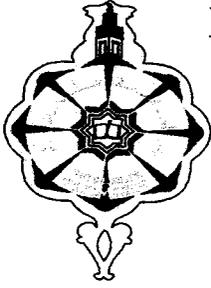


IN/5304407/103



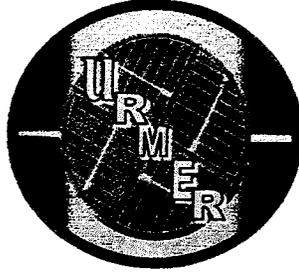
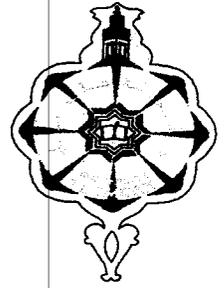
République Algérienne Démocratique et populaire

Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen

Faculté des Sciences

Département de Physique

Unité de Recherche des Matériaux et Energies Renouvelables

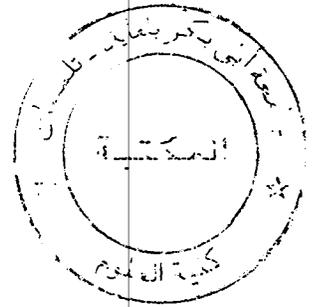


Mémoire de fin d'étude

Présenté pour obtenir le diplôme de :

Ingénieur d'état en physique

Option: Matériaux et Caractérisations



Thème

“La conception d'un capteur solaire photo-thermique alimenté par fibres optiques”

Présentée par : Mr MENNI YOUNES

Soutenue en Juillet 2009

Devant le jury composé de :

- ❖ Mr N. BIBI-TRIKI (Maître de conférences, Université de Tlemcen) : Président.
- ❖ Mr AEK. MERED (Maître de conférences, Université de Tlemcen) : Examineur.
- ❖ M<sup>me</sup> Z.DIB (Chargé de cours, Université de Tlemcen) : Examineur.
- ❖ Mme C.BOUHADJERA (Chargé de cours, Université de Tlemcen) : Encadreur.



BFS13759



## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### Chapitre I

#### Concepts de base

I. Introduction.....	4
II. Rayonnement solaire.....	4
II-1. Le soleil.....	4
II-2. Grandeurs physiques relatives au soleil et à la terre.....	9
II-3. Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère terrestre.....	17
II-4. Concentration du rayonnement.....	20
III. Le transfert de chaleur.....	23
III-1. Définitions.....	23
III-2. Bilan d'énergie.....	25
III-3. Dynamique des échanges thermiques.....	26
IV. Conclusion.....	39

### Chapitre II

#### Les fibres optiques et les systèmes solaires à concentration

I. Introduction.....	40
II. Les fibres optiques.....	40
II-1. Introduction.....	40
II-2. Définitions.....	41
II-3. Caractéristiques générales des fibres optiques.....	44
III. Systèmes solaires à concentration.....	64
III-1. Système à récepteur central.....	64
III-2. Système à collecteur distribué.....	65
IV. Conclusion.....	68



## Liste des symboles

- $l$  : Longueur (m).
- $d$  : Diamètre.
- $s$  : Section.
- $n_1$  : Indice du Cœur.
- $n_2$  : Indice de Gaine.
- $\theta_0$  : Ouverture angulaire.
- $i_1$  : Angle d'incidence interne limite correspondant à la « réflexion totale ».
- $\mu$  : Coefficient de réflexion interne.
- $\tau(\lambda)$  : Coefficient d'atténuation du cœur à la longueur d'onde  $\lambda$ .
- $\bar{\tau}$  : Coefficient d'atténuation moyen sur l'ensemble du spectre solaire.
- $\bar{\tau}'(\theta)$  : Coefficient d'atténuation moyen en ligne pour un angle d'incidence  $\theta$ .
- $D_{ts}$  : Distance terre-soleil.
- $R_{\epsilon_0}$  : Rayon du disque solaire
- $\epsilon_0$  : Rayon angulaire du disque solaire.
- $R_{\epsilon}$  : Rayon d'une couronne.
- $\epsilon$  : Rayon angulaire d'une couronne.
- $D_h$  : Constante solaire ; densité incidente à AMO.
- $D_i$  : Densité incidente au sol.
- $P_0$  : Puissance incidente sur un élément quelconque du système.
- $\Delta P$  : Perte de puissance associée à chaque élément.
- $P_c$  : Puissance captée par le concentrateur.
- $P_e$  : Puissance sur la face d'entrée du conducteur optique.
- $P_s$  : Puissance disponible sur la face de sortie.
- $D_s$  : Densité à la surface du soleil.
- $D_i$  : Densité incidente au sol.
- $D_r$  : Densité sur le récepteur.
- $C(M)$  : Concentration locale au voisinage du point M.
- $C_{max}$  : Concentration maximale théorique.
- $C_{opt}$  : Concentration optimale théorique pour une ouverture.
- $C$  : Concentration moyenne.
- $C_t$  : Concentration moyenne sans perte de flux (totalité de la « tache image »).

- $C_r$ : Concentration moyenne sur le récepteur.
- $S_c$ : Surface de capteur normale au rayonnement.
- $f$ : Distance focale.
- $R_c$ : Rayon d'ouverture.
- $\theta_0$ : Ouverture angulaire.
- $\eta$ : Fraction de la puissance captée, acceptée par la fibre.
- $\eta_0$ : Valeur de  $\eta$  pour réaliser  $C_{opt}$ .
- $V$ : Volume.
- $t$ : Temps.
- $h$ : Coefficient d'échange superficiel.
- $K$ : Coefficient global d'échange.
- $W$ : Puissance solaire.
- $G$ : Rayonnement global.
- $S$ : Rayonnement Direct.
- $D$ : Rayonnement Diffus.
- $E_G$ : Energie globale instantanée.
- $E_S$ : Energie directe instantanée.
- $E_D$ : Energie diffus instantanée.
- $P_f$ : Puissance à l'entrée de la fibre optique.
- $P_{id}$ : Puissance incidente sur le concentrateur.
- $S_f$ : Surface de la fibre optique.
- $Q$ : Quantité de chaleur à la sortie de la fibre optique.
- $Q_1$ : Quantité de chaleur du fluide dans le réservoir.
- $Q_2$ : Les pertes de chaleur du sphère.
- $Q_3$ : Quantité de chaleur pour le chauffage d'une habitation.
- $\varphi$ : La densité de chaleur.
- $\lambda$ : Conductivité thermique.
- $\gamma$ : Chaleur volumique.
- $\rho$ : Masse volumique.
- $\alpha$ : Absorptivité.
- $\varepsilon$ : Emissivité.
- $\tau$ : Transmissivité.
- $\sigma$ : Constante de Stéphan.
- $c$ : Chaleur massique.
- $T$ : Température.



## Chapitre III

### Les capteurs solaires photo-thermique

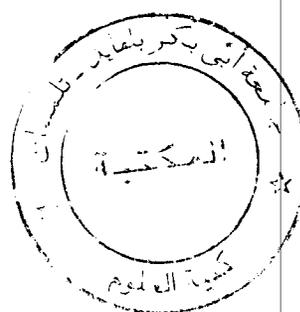
I. Introduction.....	69
II. Le capteur solaire plan.....	69
II-1. Définition.....	69
II-2. Classification des capteurs solaires plans.....	70
II-3. Inclinaison optimale d'un capteur solaire plan.....	75
II-4. Bilan thermique global de la paroi absorbante.....	76
II-5. Transfert de chaleur par conduction à l'intérieur de la paroi absorbante en régime permanent.....	78
II-6. Rendements d'un capteur solaire.....	82
III. Conclusion.....	83

## Chapitre IV

### Modélisation et simulation

I. Introduction.....	84
II. La fibre optique solaire et le miroir parabolique.....	85
II-1. La fibre optique solaire.....	85
II-2. Le concentrateur.....	89
III. Conception d'un capteur alimenté par une seule fibre optique.....	92
III-1. L'interface fibre-concentrateur.....	93
III-2. Analyse de la tache image du soleil.....	95
IV. Energie reçue par un capteur plan.....	96
IV-1. L'énergie instantanée.....	96
IV-2. L'énergie journalière.....	97
IV-3. L'énergie annuelle.....	97
IV-4. Estimation des énergies reçues par un capteur.....	98
V. Energies reçues par un capteur au fil du soleil.....	101
VI. Application aux systèmes à concentration.....	104
VI-1. Energie incidente sur le concentrateur.....	104
VI-2. L'énergie à l'entrée de la fibre.....	105

VI-3. L'énergie solaire à la sortie de la fibre optique.....	107
VII. Conception d'un procédé économique.....	111
VII-1. Description du dispositif.....	111
VIII. Conclusion.....	118
<b>Conclusion générale</b> .....	119
<b>Références bibliographiques</b>	



# **Introduction générale**



## Introduction Générale

L'énergie solaire disponible sur terre se présente sous la forme de rayonnement direct, diffus et global. Les fluides que l'on peut chauffer directement à l'aide de capteurs plans sont essentiellement destinés à des usages domestiques, car la température atteint au mieux une centaine de degrés [1].

L'utilisation de l'énergie solaire à des fins industrielles nécessite des températures plus élevées et donc la concentration du rayonnement, pour arriver à quelques centaines de degrés, des dispositifs de moyennes ou fortes puissances ont été développés ces dernières années ; ce sont par exemple, les projets de Thek et Them. Les fours solaires proprement dits, qui permettent d'atteindre quelques milliers de degrés ont été réalisés, en particulier en France, depuis plus longtemps mais ils n'ont jamais dépassé le stade du laboratoire. Ils présentent, en effet, un certain nombre d'inconvénients qui les rendent peu commodes et difficilement adaptables à une utilisation industrielle :

- Les fortes concentrations sont obtenues avec des réflecteurs à symétrie axiale, miroirs sphériques ou mieux paraboliques.

- Le faisceau réfléchi forme un cône de lumière d'autant plus ouvert que la concentration recherchée est plus grande ; l'ouverture du dispositif récepteur doit être suffisante pour accepter ce cône ; les pertes thermiques sont alors importantes.

- Par ailleurs, la répartition énergétique dans la région où la concentration recherchée est la plus élevée, que l'on appelle abusivement « image du soleil », est loin d'être homogène.

- Enfin, le récepteur doit suivre la course du soleil en même temps que le concentrateur si celui-ci est mobile (système Thek) ; ou bien si l'on veut que cet ensemble soit fixe, il faut une réflexion supplémentaire sur un ensemble de miroirs plans jouant le rôle d'héliostats (systèmes à double réflexion utilisés dans les ensembles de fortes puissances).

Toutes ces raisons font qu'il est difficile d'utiliser directement, à des fins industrielles, l'énergie solaire dans la zone de forte concentration. On est amené à la transférer une fois concentrée jusqu'au dispositif d'utilisation alors désolidarisé du concentrateur.

La première idée qui vient à l'esprit, et qui a déjà été exploitée, consiste à utiliser des fluides caloporteurs (eau, huiles minérales, sels fondu, air, etc.).

Cependant, leur stabilité propre ainsi que la tenue des conduites limitent les températures accessibles à quelques centaines de degrés.

On peut se demander s'il n'est pas plus intéressant de transporter, avec des conducteurs de lumière, l'énergie solaire une fois concentrée, tout en lui conservant son caractère radiatif. Cette méthode de transfert n'a pas à notre connaissance, été étudiée jusqu'à présent.

### **Quels avantages peut-on attendre [1]?**

Si le conducteur de lumière est souple, le dispositif d'utilisation est désolidarisé du concentrateur assujetti à suivre le soleil.

Le récepteur est alors installé à distance ; il est fixe ; il ne masque pas le réflecteur.

L'énergie recueillie est transportée sous sa forme radiative ; Le récepteur peut l'utiliser telle quelle comme un flux lumineux ayant sensiblement les mêmes caractéristiques spectrales que celle de la lumière solaire. Ou bien, il peut transformer cette énergie pour produire de la chaleur à partir d'une source de rayonnement ayant les caractéristiques thermiques proches de celles de la surface du soleil, c'est à dire d'un corps noir à environ 5800K.

Cette énergie est amenée à l'intérieur d'un récepteur, donc très bien isolé thermiquement. Si elle a été récupérée par plusieurs concentrateurs, elle est introduite par plusieurs conducteurs et être distribuée de façon contrôlée sur le récepteur proprement dit :

- En superposant les faisceaux de lumière, on augmente la concentration.
- En choisissant leur arrangement, on maîtrise les gradients thermiques.

Ce rapide survol du transport de l'énergie solaire concentrée par des conducteurs de lumière laisse présager de l'intérêt de cette méthode et des utilisations potentielles qui en résulte.

### **Problématique du Mémoire**

Vers cet objectif d'optimisation nous avons entrepris un travail d'optimisation d'Un Procédé Economique de Chauffage d'une Habitation Par Voie Solaire pour le site de Tlemcen, et prédire les performances en fonction de l'ensoleillement.

L'intérêt de notre travail porte d'une part, sur les notions de transfert thermique de la chaleur qui ont pris ces dernières années une importance particulière en raison du coût élevé de l'énergie et des impératifs d'économie qui en résulte, d'où la nécessité de s'initier aux transferts thermiques.

Et d'autre part, notre travail est axé sur la recherche d'une relation liant le cycle avec la source chaude qui est dans notre cas, le capteur solaire. Notre mémoire comprend les parties suivantes :

Après cette brève introduction, nous abordons, dans le chapitre suivant, les concepts de base sur le rayonnement solaire et sa concentration ainsi que les notions de transfert

thermique. Dans le second chapitre, nous présentons les notions physiques essentielles à l'étude des fibres optiques ainsi que les différents systèmes solaires à concentrations. Le chapitre trois, est consacré à une description technique du dispositif de base qui sert à capter l'énergie solaire : le capteur solaire, et une étude des différents composants du capteur solaire a été effectuée dans ce chapitre. Le dernier chapitre consiste à établir un programme de simulation se basant sur la modélisation et le dimensionnement de la fibre optique, du concentrateur et la sphère utilisée, il permet la détermination de l'énergie de sortie du cône ainsi que la température de l'eau dans le réservoir et la température de l'air dans la sphère.



# **Chapitre I**

## **Concepts de base**



## I. Introduction

La croissance de la demande énergétique dans le monde a largement stimulé la recherche de nouvelles sources d'énergie. Avec les progrès scientifiques techniques de ces dernières années, l'énergie solaire paraît comme une alternative intéressante aux énergies d'origine fissiles ou fossiles. De ce fait, elle fait la préoccupation de nombreux chercheurs.

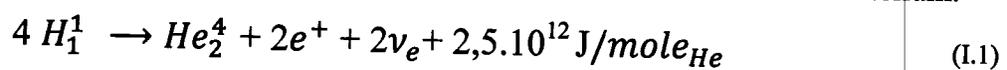
La puissance solaire reçue par  $m^2$  de la terre est non négligeable  $W = 1367 \text{ W/m}^2$ . L'énergie reçue par toute la surface de la terre en une seconde est d'environ  $Wt = 175.10^9 \text{ MW}$ . C'est une énergie inépuisable, non polluante, gratuite et dispersée sur toute la surface de la terre [2].

## II. Rayonnement solaire

### II-1. Le soleil

Sous l'effet de l'attraction gravitationnelle qui régit à grande échelle l'univers, la condensation des nuages interstellaires constitués essentiellement d'hydrogène donne naissance aux étoiles. L'énergie gravitationnelle est convertie en énergie cinétique d'où l'apparition d'une densité et d'une température plus élevée au centre de l'étoile, ceci entraîne des réactions thermonucléaires. Lorsque la force de pression à l'équilibre est égale à la force gravitationnelle, l'étoile « Soleil » est née, ce processus de transformation est estimé à  $10^7$  ans et l'état d'équilibre atteint  $10^{10}$  ans [3].

Le soleil étant une sphère gazeuse non homogène, elle est constituée d'environ 85% d'hydrogène et de 15% d'hélium. Sa température interne est de 15 à 20 millions de degrés Celsius. Ce flot continu de chaleur provient d'une suite des réactions thermonucléaires exothermiques compliquées dite « Cycle de Bethe », qui transforme à chaque seconde et de façon irréversible, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium.



$e^+$  : Positron.  $\nu_e$  : Neutrino électronique.

#### II-1-1. Structure du soleil

Le soleil peut être assimilé à une sphère de rayon  $R_{e0}$  égal à cent fois celui de la terre ( $R_{e0} \approx 7.10^5 \text{ Km}$ ). Il est distant de celle-ci d'environ  $D=150.10^6 \text{ km}$ . Il irradie dans l'espace une puissance énorme dont la terre ne reçoit qu'une infime partie. D'une manière générale, la puissance émise par le soleil correspond à la combustion de  $8.10^{15}$  tonnes de pétrole par seconde, c'est à dire qu'il brûle en 9 jours l'équivalent en pétrole de la masse de la terre... [3]

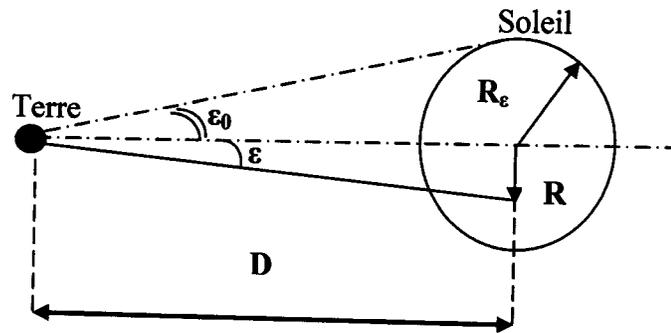


Figure I-1 : Diamètre apparent du soleil [3].

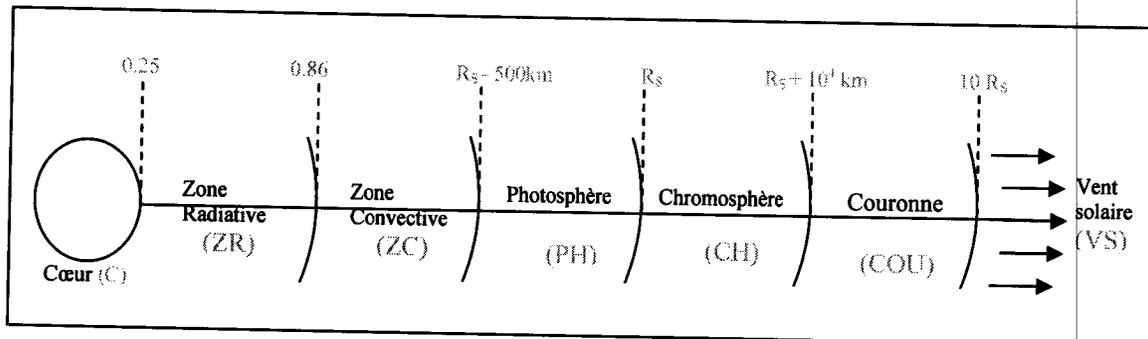


Figure I-2: Structure interne du soleil.

Avec  $R_{e0}$  : Rayon du soleil [3].

- Cœur (C) :  $[r < 0,25. R_{e0}]$  est la zone dépeuplée et le siège du transport d'énergie par convection.
- Zone radiative (ZR) :  $[0,25. R_{e0} < r < 0,85. R_{e0}]$  est le siège du transport d'énergie par rayonnement.
- Zone convective (ZC) :  $[0,86. R_{e0} < r < R_{e0} - 500\text{Km}]$  est la zone dépeuplée et le siège du transport d'énergie par convection.
- Photosphère (PH) :  $[R_{e0} - 500\text{Km} < r < R_{e0}]$  c'est la partie visible du soleil d'épaisseur 500km de couleur jaune-blanche, elle est à l'origine des réabsorptions du spectre solaire.
- Chromosphère (CH) :  $[R_{e0} < r < R_{e0} + 10^4\text{Km}]$  de couleur rose, partie visible lors des éclipses totales par sa température plus élevée de celle de la (PH), elle constitue une barrière pour la matière (atomes ionisés).
- Couronne (COU) :  $[R_{e0} + 10^4\text{Km} < r < 10. R_{e0}]$  de couleur blanche, visible pendant les éclipses, elle constitue un nuage d'électrons, son rôle est de protéger la terre des rayons  $\gamma$  et des rayons cosmiques.
- Vent solaire (VS) :  $[r > 10. R_{e0}]$  il est à l'origine du champ magnétique solaire, il contrôle les irrptions solaires.

La distribution spectrale du rayonnement arrivant au niveau de la terre et la brillance apparente du soleil sont caractérisées hors atmosphère. En dehors de l'atmosphère, les résultats sont dits à « masse d'air zéro » : [2]

- $AM_0$  ; Si on élimine les perturbations dues à l'atmosphère (absorption du gaz, état météorologique, pollution...);
- $AM_1$  ; Au niveau de la mer, et dans les conditions de température et de pression, les résultats sont normalisés à « masse d'air ».

### II-1-2. Spectre solaire

L'énergie émise par le Soleil l'est sous la forme de rayonnements électromagnétiques de longueurs d'ondes variant de 0,25 à 4  $\mu\text{m}$ , dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière  $c$  ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [4].

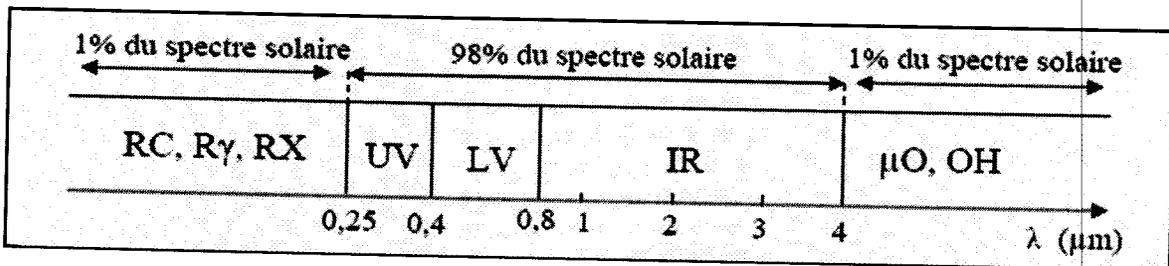


Figure I-3 : Spectre lumineux terrestre [4].

La répartition de cet éclairage énergétique dans les divers domaines de longueur d'onde est résumée dans le tableau (I-1). On peut noter que le rayonnement ultraviolet (UV) représente, tous types confondus, plus de 8 % du total en termes d'énergie [5].

Région spectrale	Longueurs d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Eclairage énergétique ( $\text{Wm}^{-2}$ )	Pourcentage (%)
Infrarouge	0,8 à 4 $\mu\text{m}$	695	50,8
Visible	0,4 à 0,8 $\mu\text{m}$	559	40,9
UV-A	0,32 à 0,40	86	6,3
UV-B	0,28 à 0,32	21	1,5
UV-C	0,28 à 0,25	6	0,4

Tableau I-1: L'éclairage énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde.

Le soleil rayonne comme un corps noir qui a un diamètre de  $1,39 \cdot 10^6$  km et à une température de 5800 K dans l'intervalle de spectre compris entre les longueurs d'onde 0,25 et 4  $\mu\text{m}$  [5].

La répartition de l'énergie du corps noir et du soleil à la température de 5800°K est donnée par le tableau suivant: [2]

Hors atmosphère	% Puissance solaire	% Puissance du corps noir
UV: $0,25 \mu\text{m} < \lambda < 0,41 \mu\text{m}$	7	9,9
LV: $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,81 \mu\text{m}$	47,5	46,6
IR : $0,8 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$	45,5	43,5

Tableau I-2 : Répartition de l'énergie du corps noir et du soleil à 5800°K.

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'ondes, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde  $\lambda'_m$  donnée par la loi de WIEN : [6]

$$\lambda'_m \cdot T_s = 2898 (\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (1.2)$$

À  $T = 5800$  K,  $\lambda'_m \approx 0,5 \mu\text{m}$

### II-1-3. Brillance radiale

La brillance radiale apparente du disque solaire n'est pas uniforme. Elle dépend essentiellement de la distance apparente du centre  $R_\epsilon$ . Notre étude porte sur la variation de cette brillance en fonction de  $R_\epsilon$ , ou en fonction de l'angle  $\epsilon$  correspondant [2].

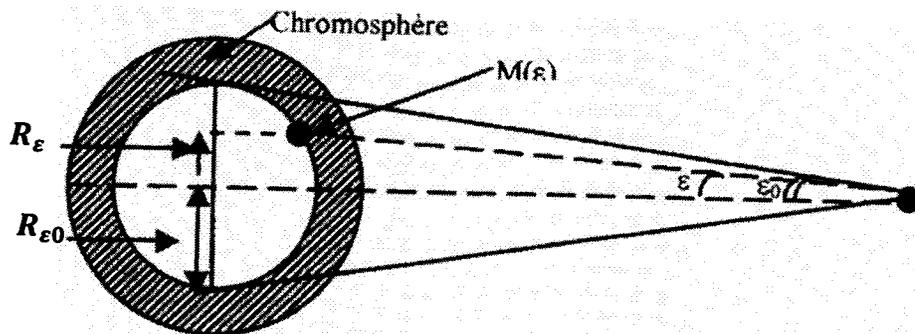


Figure I-4 : Variation de la brillance du soleil [2].

Chaque point d'une surface perpendiculaire au rayonnement solaire reçoit un cône de lumière qui s'appuie sur le disque solaire apparent dont le rayon solaire est  $\epsilon_0 = 4,654 \cdot 10^{-3}$  rad, soit 16 minutes d'arc. Ce rayonnement émis par la photosphère de façon uniforme est atténué

dans la traversée de la chromosphère, c'est-à-dire que la quantité d'énergie reçue du centre du soleil est plus importante que celle qui vient du bord. Abbot et ses collaborateurs ont donné sous forme numérique pour les différentes longueurs d'onde la valeur de la brillance relative  $B/B_0$  (rapport de la brillance en un point, caractérisé par  $\epsilon$ , à la brillance au centre  $B_0$ ) en fonction du rayon angulaire  $\epsilon$  [2].

Pour faciliter le calcul de la répartition énergétique, par exemple au foyer de certains concentrateurs, José a proposé une expression analytique donnée sous la forme :

$$\left[ \frac{B}{B_0} \right]_j = \{ a + b [ 1 - (\epsilon/\epsilon_0)^2 ] \}^{1/2} \quad (1.3)$$

Où  $a$  et  $b$  représentent des coefficients dépendant que de la longueur d'onde.

Pour  $\epsilon = 0$ , on a  $B = B_0$ ;  $a = 0,39$  et  $b = 0,61$  sont les valeurs moyennes qui sont compatibles avec les résultats expérimentaux mesurés sur l'ensemble du spectre.

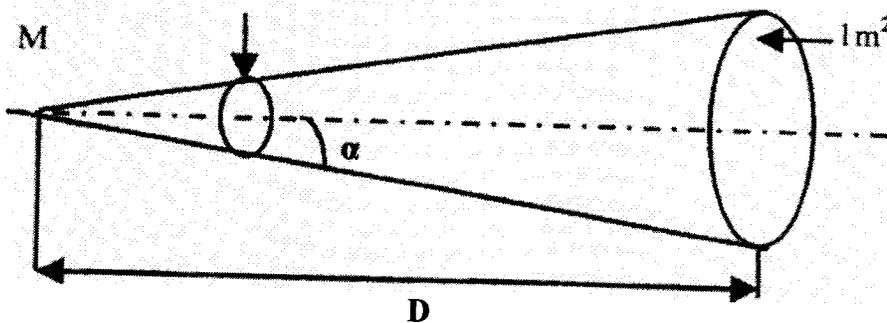


Figure I-5 : Angle solide.

La brillance du soleil étant une fonction du rayon angulaire  $\epsilon = \frac{R_\epsilon}{D}$ , à l'état AMO la puissance  $P$  reçue sur une surface circulaire de 1 mètre carré vue d'un point  $M(\epsilon)$  sous l'angle solide  $\Omega$  s'écrit :

$$P = 1 \cdot D_h = \int_0^{R_{\epsilon 0}} B(\epsilon) \Omega 4\pi R_\epsilon dR_\epsilon \quad (1.4)$$

$\Omega$  est indépendant du point  $M$  considéré et peut s'écrire :

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \alpha) \approx \pi \alpha^2 = D^{-2} \quad (1.5)$$

$$D_h = \Omega D^2 4\pi \int_0^{\epsilon_0} B(\epsilon) \cdot \epsilon \cdot d\epsilon \quad (1.6)$$

$$D_h = 2\pi \varepsilon_0^2 \bar{B} \quad (1.7)$$

La valeur numérique de  $\bar{B}$  déduite de cette expression est  $10^7 \text{ w. st}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , il faut l'attribuer dans l'hypothèse simplificatrice où l'on considère que la brillance est uniforme.

On peut prendre comme unité de brillance cette valeur moyenne. Quelque soit les expressions analytiques de  $B(\varepsilon)$ , leurs valeurs moyennes doivent toujours égales à  $\bar{B}$ .

## II-2. Grandeurs physiques relatives au soleil et à la terre

### II-2-1. Mouvement de la terre autour du soleil

On peut décomposer le mouvement de chacun d'eux en mouvement de rotation et mouvement de translation.

#### a. Mouvement de translation

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation autour d'elle-même en 23h 56min 4" et autour du soleil en 365jours 5h 48mn 40s  $\approx 365,25$  jours. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne avec une vitesse moyenne  $V_t \approx 29,77\text{Km/s}$  [vitesse maximale en hiver 30,27 Km/s et minimale en été 29,77 Km/s]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons. [7]

#### b. Mouvement de rotation

La terre tourne autour de son axe de rotation (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de :  $P_r = 23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h}$ . Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est ;  $V_r \approx 0,465\text{Km/s}$ , elle est variable en fonction de latitude  $\varphi$  telle que : [7]

$$V_r(\varphi) = V_r \cdot \cos(\varphi) \quad (1.8)$$

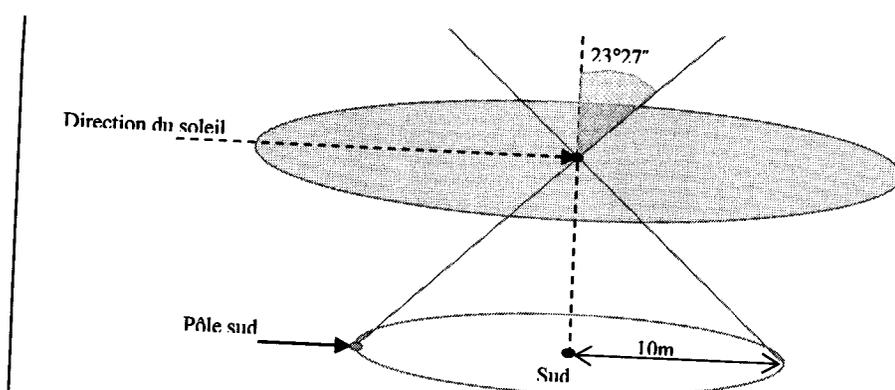


Figure I.6 : Vibration de la terre

- L'angle entre (SH) et (SA) augmente de 62" chaque année.

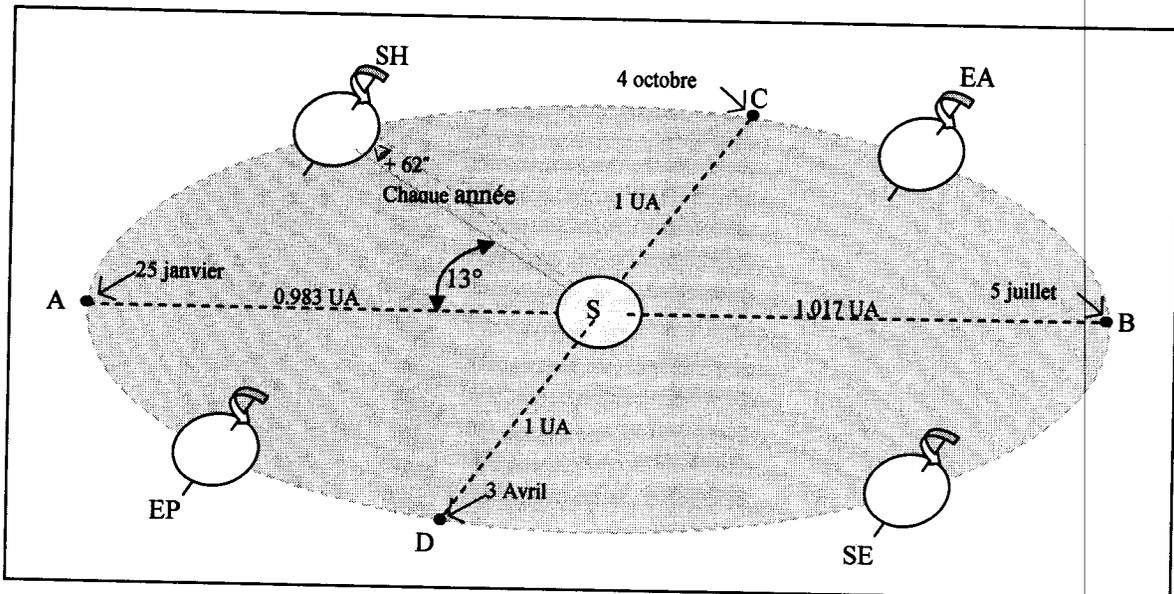


Figure I-7 : Trajectoire de la terre autour du soleil [3].

### II-2-2. Distance Terre - Soleil

Etant donné que la trajectoire de la rotation de la terre autour du soleil est elliptique, la distance terre-soleil varie d'une façon sinusoïdale. Elle est donnée en fonction du numéro de jour de l'année par : [4]

$$D(N) = 1 - 0,017 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right) \quad (I.10)$$

Ces distances sont données en unité astronomique (UA), elle est connue avec une grande précision :  $1UA = (149597890 \pm 500) \text{ km}$ .

Soit  $I_0$  la puissance reçue à la distance de 1UA du soleil, et  $I$  la puissance reçue à la distance  $d$ , quelconque (exprimée en UA).

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{d}{1}\right)^{-2} \quad (I.11)$$

Par définition, la correction de cette distance est:

$$C = \frac{I}{I_0} \quad (I.12)$$

On en déduit l'expression  $C(N)$ ,  $d$  restant proche de 1 dans le cas de la terre.

$$C(N) = 1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 2)\right) \quad (I.13)$$

La puissance pour une distance quelconque est :

$$I = C(N) \cdot I_0 \quad (I.14)$$

Avec :  $I_0 = 1353$

N : Numéro de jour de l'année depuis le 1<sup>er</sup> janvier.

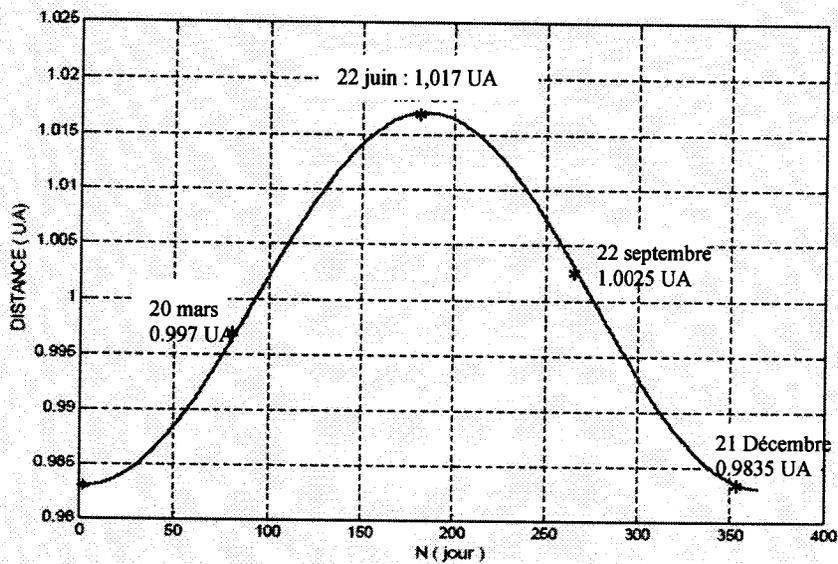


Figure I-8 : Distance terre soleil en fonction de numéro du jour de l'année [4].

Les valeurs de la distance terre- soleil aux solstices et aux équinoxes sont données respectivement par : [4]

- (EP) : Equinoxe du printemps (20 ou 21 mars)       $N = 79$  et  $D_{TS} = 0.997$  UA.
- (SE) : Solstice d'été (21 ou 22 juin)               $N = 173$  et  $D_{TS} = 1.017$  UA.
- (EA) : Equinoxe d'automne (22 ou 23 septembre)       $N = 265$  et  $D_{TS} = 1.0025$  UA.
- (SH) : Solstice d'hiver (21 ou 22 décembre)           $N = 255$  et  $D_{TS} = 0.9835$  UA.

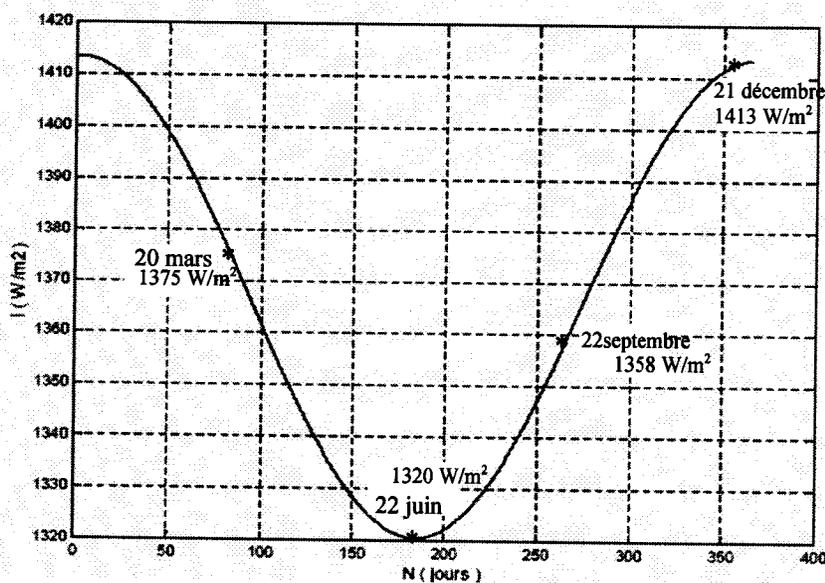


Figure I-9 : Evaluation annuelle de la constante solaire corrigée [4].

Les valeurs de la constante solaire aux solstices et aux équinoxes sont données respectivement par :

- (EP) : Equinoxe du printemps (20 ou 21 mars)  $N = 79$  et  $I = 1375 \text{ W/m}^2$ .
- (SE) : Solstice d'été (21 ou 22 juin)  $N = 173$  et  $I = 1320 \text{ W/m}^2$ .
- (EA) : Equinoxe d'automne (22 ou 23 septembre)  $N = 265$  et  $I = 1358 \text{ W/m}^2$ .
- (SH) : Solstice d'hiver (21 ou 22 décembre)  $N = 255$  et  $I = 1413 \text{ W/m}^2$ .

### II-2-3. Coordonnées horaires

La position du soleil est repérée par rapport au plan équatorial de la terre par deux angles : [8]

- $\delta$ : Déclinaison du soleil.
- $H$  : Angle horaire

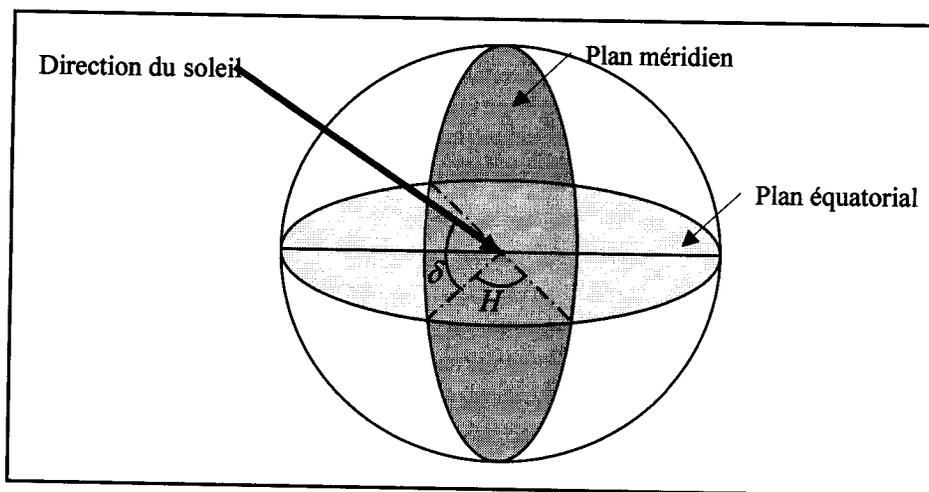


Figure I-10 : Repère équatorial [8].

#### a. Déclinaison du soleil

La déclinaison du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial terrestre. Elle varie au cours de l'année de  $+23^{\circ}27'$  à  $-23^{\circ}27'$ .

Aux équinoxes, la déclinaison est nulle. La déclinaison du soleil en fonction du jour de l'année est donnée selon la relation de PERRIN DE BRICHAMBAUT par : [9]

$$\delta(N) = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} (284 + N)\right) \quad (I.15)$$

L	E	$\delta$	Date	Saison		Durée en jours
0	EP: Equinoxe de printemps	0	20 ou 21 Mars	$0 \leq L < 90$	Printemps	92,81
90	SE: Solstice d'été	$+23^{\circ}27''$	21 ou 22 Juin	$90 \leq L < 180$	Eté	93,62
180	EA: Equinoxe d'automne	0	22 ou 23 Septembre	$180 \leq L < 270$	Automne	89,82
270	SH: Solstice d'hiver	$-23^{\circ}27''$	21 ou 22 décembre	$270 \leq L < 360$	Hiver	89,00

Tableau I-3 : Définition astronomique des saisons.

- L : Longitude céleste
- E : Point du plan de l'écliptique.

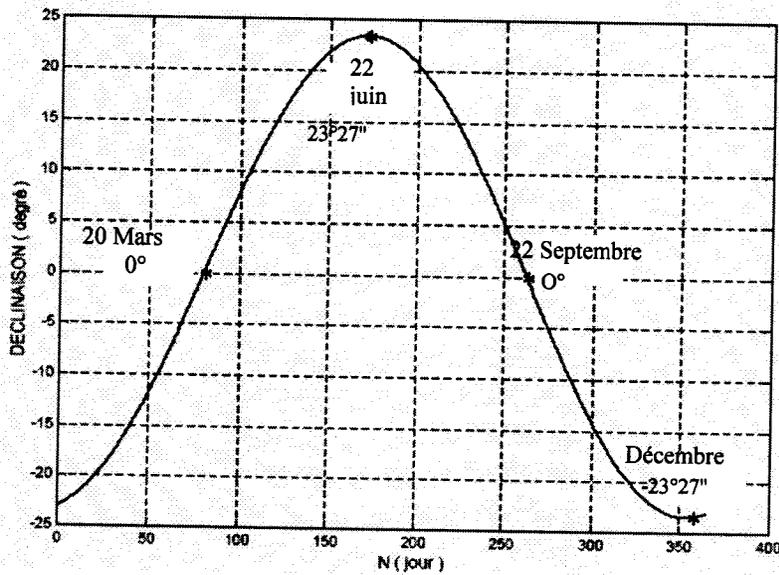


Figure I-11 : Déclinaison du soleil en fonction de numéro du jour de l'année.

**b. Angle horaire**

C'est l'angle entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu.

Il est donné par : [ 9]

$$H = 15(TSV - 12) \tag{I.16}$$

Avec :

$$TSV = TL - DE + \left( \frac{E_t + 4\lambda}{60} \right) \tag{I.17}$$

$$E_t = 9,87 \cdot \sin(2 \cdot N') - 7,35 \cdot \cos(N') - 1,5 \cdot \sin(N') \tag{I.18}$$



$$N' = \frac{360}{365} (N-81) \quad (I.19)$$

- DE = +1 Pour l'Algérie.
- DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
- TSV: Temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.
- TL: Temps légal = temps donné par une montre.
- $E_t$ : Correction de l'équation du temps.
- $\lambda$ : Longitude du lieu.

#### II-2-4. Coordonnées horizontale

La position du soleil est repérée par rapport au plan horizontal du lieu par deux angles :

- h: Hauteur du soleil.
- a: Azimut du soleil

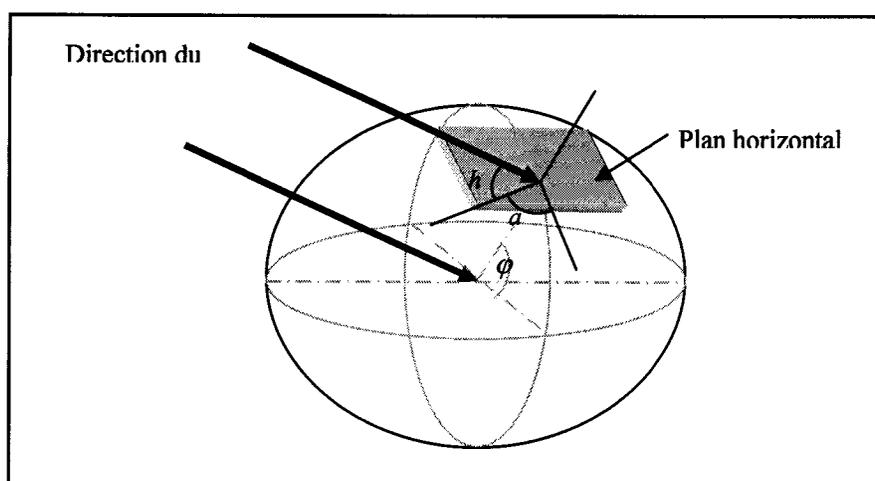


Figure I-12 : Repère horizontal [9].

##### a. Hauteur du soleil

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil est donnée par la relation suivante : [9]

$$\sin(h) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (I.20)$$

Où:

- $\delta$ : Déclinaison solaire.
- $\omega$ : Angle horaire.

- L: Latitude de lieu qui se détermine par l'angle que fait la direction passant par le centre de la terre et ce lieu.
- h: Varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la saison, l'heure de la journée et la latitude du site.

$$-90^\circ \leq h \leq +90^\circ \quad (I.21)$$

- La valeur de h est positive pendant le jour et négative pendant la nuit.

### b. Azimut du soleil

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil perpendiculaire au plan fondamental. Il est donné par : [10]

$$\sin(a) = \frac{\sin(\delta) \cdot \sin(H)}{\cos(h)} \quad (I.22)$$

- $a < 0$  : le soleil est à l'est
- $a > 0$  : le soleil est à l'ouest
- $a = 0$  : le soleil est au sud.
- $-180^\circ \leq a \leq +180^\circ$

### II-2-5. Equation de passage

La connaissance de la position du soleil dans l'une des deux coordonnées nous permet de la connaître dans l'autre coordonnée en appliquant les matrices de passage.

Pour passer de  $(h, a) \rightarrow (\delta, H)$  : [10]

$$\begin{pmatrix} \sin(h) \\ \cos(h) \cdot \cos(a) \\ \cos(h) \cdot \sin(a) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(H) \cdot \cos(\varphi) & \sin(H) \cdot \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ \cos(H) \cdot \sin(\varphi) & \sin(H) \cdot \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) \\ \sin(H) & -\cos(H) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\delta) \\ 0 \\ \sin(\delta) \end{pmatrix} \quad (I.23)$$

Pour passer de  $(\delta, H) \rightarrow (h, a)$  ;

$$\begin{pmatrix} \sin(\delta) \\ \cos(\delta) \cdot \cos(H) \\ \cos(\delta) \cdot \sin(H) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(a) \cdot \cos(\varphi) & -\sin(a) \cdot \cos(\varphi) \\ \cos(a) \cdot \sin(\varphi) & \sin(a) \cdot \sin(\varphi) \\ \sin(a) & -\cos(a) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(h) \\ 0 \\ \sin(h) \end{pmatrix} \quad (I.24)$$

### II-2-6. Durée du jour

La durée astronomique du jour est le temps entre le lever et le coucher du soleil. Elle varie en fonction de la latitude du lieu au cours de l'année, elle est exprimée par : [10]

$$D_j = TSV_{\text{coucher}} - TSV_{\text{lever}} \quad (I.25)$$



On peut aussi la calculer par la relation suivante :

$$D_j = (H_c - H_l) / 15 \quad (I.26)$$

Ou encore :

$$D_j = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\text{tg}(\delta) \cdot \text{tg}(\varphi)) \quad (I.27)$$

- $H_c$  : Angle horaire de couche du soleil.
- $H_l$  : Angle horaire de lever du soleil.

## II-3. Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère terrestre

### II-3-1. Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère

On appelle constante solaire, l'énergie reçue du soleil par unité de surface placée perpendiculairement aux rayons lumineux dans l'espace au voisinage de la terre, à la distance d'une unité astronomique ( $1\text{U.A} = 1,495 \cdot 10^8 \text{ km}$ ) du soleil.

Les mesures les plus récentes donnent une valeur de  $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ , qui varie environ de  $\pm 3\%$  au cours de l'année.

### II-3-2. Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère

La densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère est représentée sur la figure (I-13) (elle est exprimée en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ).

La plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge : 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et  $4 \mu\text{m}$  [5].

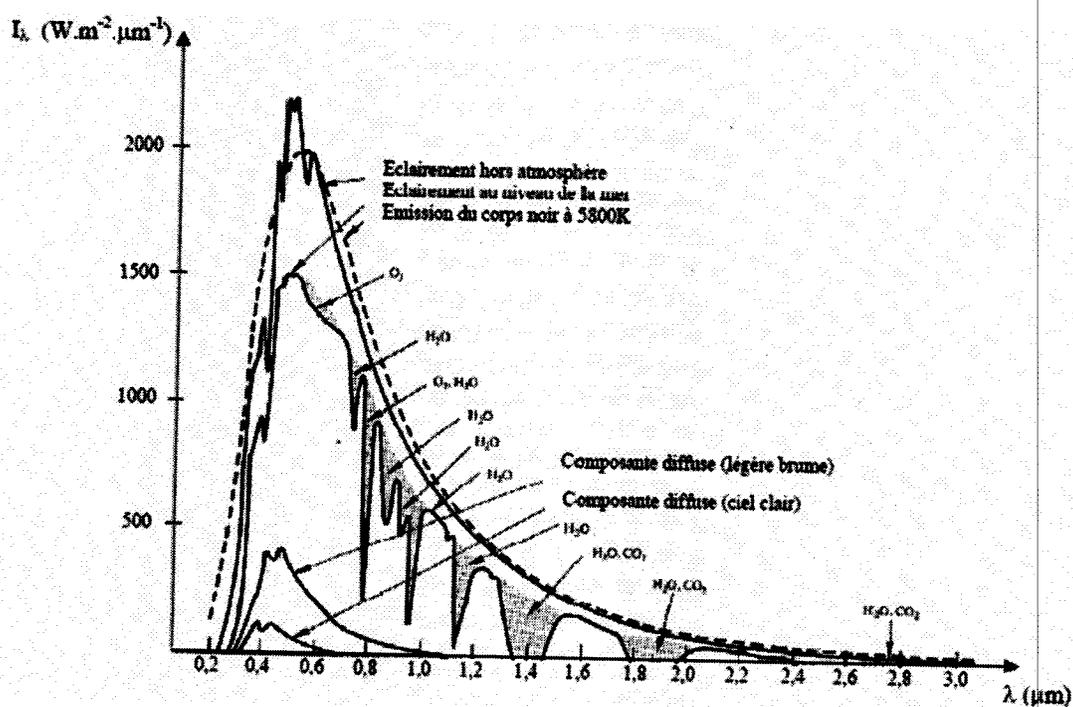


Figure I-13 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.

Le rayonnement extraterrestre arrivant à la surface de l'atmosphère croise sur son passage des phénomènes d'absorption et de diffusion qui contribue à son affaiblissement, on distingue :

- L'absorption par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau.
- La diffusion moléculaire par les gaz de l'atmosphère, par la vapeur d'eau et par les aérosols (fines particules en suspension dans l'air).

La masse d'air, le facteur de trouble et l'épaisseur d'eau condensable sont des facteurs représentatifs de ces phénomènes.

L'absorption et la diffusion se produisent simultanément en augmentant la complexité de l'extinction ; elles sont fonction de la longueur d'onde et de l'épaisseur atmosphérique traversée par les rayons solaires.

### II-3-3. Rayonnement solaire au sol

Le rayonnement reçu par un capteur solaire d'inclinaison quelconque au sol est constitué de trois composantes principales :

#### a. Le rayonnement direct S

C'est l'éclairement énergétique provenant directement du disque solaire (ciel clair) et reçu par une surface réceptrice normale aux rayons solaires. Ce rayonnement peut être mesuré par unPyrhéliomètre.

L'énergie pour un plan incliné d'un angle quelconque avec le rayonnement direct du soleil peut être calculée par la méthode de BRICHANBAUT: [2]

$$S = A \cdot \cos(i) \cdot \exp\left(-\frac{1}{B \cdot \sin(h+2)}\right) \quad (I.28)$$

#### b. Le rayonnement diffus D

Une partie du rayonnement solaire est absorbée et diffusée par l'atmosphère et une autre partie est réfléchiée par les nuages pour former un rayonnement diffus qu'on note (D). Il peut être mesuré par la relation suivante: [2]

$$D = \left(\frac{1+\cos(B)}{2}\right) \cdot D_H + \left(\frac{1-\cos(B)}{2}\right) \cdot a^* \cdot G_H \quad (I.29)$$

- $a^*$ : Albédo du sol.  $a^* = 0,9$  à  $0,8$  neige,  $a^* = 0,8$  à  $0,4$  sol clair,  $a^* = 0,4$  à  $0,2$  verdure
- $i$  : Angle entre la normale du capteur et le rayonnement solaire.

$$D_H = A'' \cdot (\sin(h))^{0,4} \quad (I.30)$$

$$G_H = A'' \cdot (\sin(h))^{B''} \quad (I.31)$$

A, B, A', A'', B'' : sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère.

Etat de l'atmosphère	A	B	A'	A''	B''
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1.12
Ciel bleu laiteux	1200	2.5	187	990	1.25

Tableau I-4 : Constantes caractérisant l'état de l'atmosphère.

### c. Le rayonnement global G

C'est l'éclairement énergétique d'une surface par la superposition des trois composantes direct, diffus et réfléchi [3].

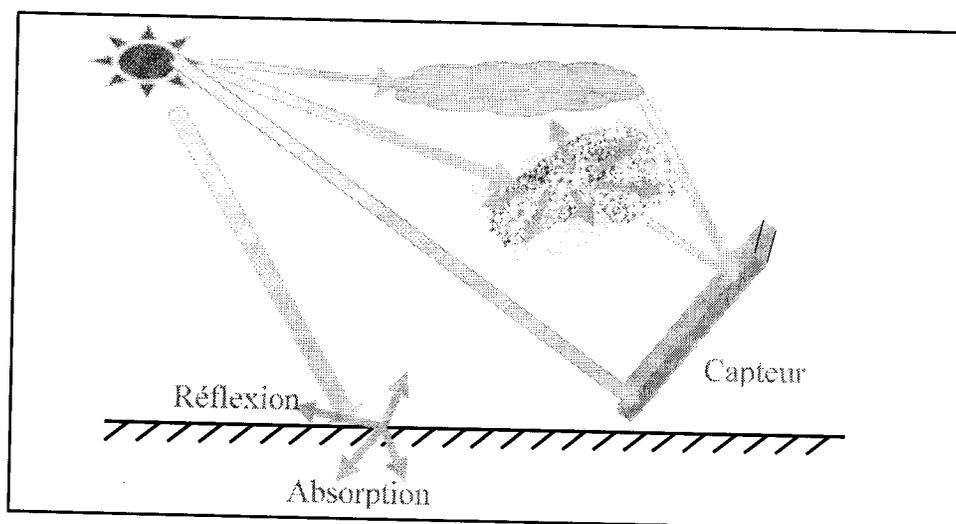


Figure I-14 : Composantes du rayonnement solaire.

Le rayonnement global peut être mesuré par un pyranomètre.

- Pour une surface horizontale, le global est donné par l'expression suivante :

$$G_h = S_h + D_h \quad (I.32)$$

- Pour une surface inclinée, il faut tenir compte de l'angle d'inclinaison et de la valeur de l'albédo du sol :

$$G_i = S_i + D_i + REF \quad (I.33)$$

## II-4. Concentration du rayonnement

L'utilisation directe du rayonnement solaire est intéressante pour les usages domestiques puisqu'elle conduit à des températures égales à une centaine de degrés Celsius. Pour disposer localement des températures plus élevées, il faut que la densité de puissance soit plus grande. Il est donc indispensable de concentrer le rayonnement, c'est-à-dire de faire parvenir sur un élément de surface  $ds$  une densité de puissances  $D_s$  supérieur à  $D_i$  (densité de puissance incidente sur une surface perpendiculaire aux rayons) qui arrive naturellement. Nous définissons alors la concentration par la relation suivante : [2]

$$C = \frac{D_s}{D_i} \quad (I.34)$$

### II-4-1. Valeur limite de concentration

La concentration se fait sans apport de travail extérieur, d'après la thermodynamique la température  $T_\tau$  atteinte sur la surface réceptrice ne peut pas être supérieure à celle de la surface du soleil. Il existe donc une valeur maximale  $C_{\max}$  de la concentration, pour laquelle  $T_\tau = T_s$ . La concentration de rayonnement se fait nécessairement par voie optique. Les règles d'invariance photométriques montrent qu'on ne peut réaliser qu'une concentration optimale  $C_{\text{opt}}$  telle que :  $C_{\text{opt}} < C_{\max}$  (l'égalité correspond aux processus réversibles de la thermodynamique, l'inégalité traduit l'irréversibilité).

Dans ce qui suit, on montre comment obtenir les valeurs de la concentration maximale  $C_{\max}$  par la thermodynamique et de la concentration optimale  $C_{\text{opt}}$  par les lois de l'optique [2].

### II-4-2. Concentration maximale théorique

L'égalité des températures de la source (le soleil) et du récepteur est obtenue lorsque les hypothèses suivantes sont simultanément réalisées : [2]

- 1-La source et le récepteur sont assimilés à des corps noirs.
- 2-La source et le concentrateur (quelconque) et le récepteur constituent un système isolé sur lequel les échanges d'énergies s'opèrent uniquement par rayonnement.

Hors atmosphère, une surface disposée perpendiculairement aux rayons solaires reçoit une densité de puissance uniforme  $D_h = 1367 \text{ W/m}^2$ . Cette valeur standard est appelée « constante solaire ».

En éliminant les perturbations dues à l'atmosphère (absorption du gaz, état météorologique, pollution...), on aura  $D_i = D_h$  ; Tous les éléments de ce système, à l'exception du récepteur et de la source, sont parfaitement transparents ou réfléchissants ; donc il n'y a pas de perte de puissance.

Dans ces conditions, l'équilibre thermique dans une surface  $S$  du récepteur à la température  $T_r$  est atteint quand la puissance perdue  $P_p$  du rayonnement qu'elle émet est égale à la puissance  $P_c$  du rayonnement qu'elle reçoit, qui représente la puissance captée par le concentrateur provenant directement du soleil.

La loi de Stéphan, s'écrit :

$$P_p = \sigma T_r^4 S \quad (I.35)$$

La puissance émise par le soleil  $P_{sol}$  est :

$$P_{sol} = \sigma T_r^4 S_{sol} \quad (I.36)$$

Telle que  $S_{sol} = 4\pi R_{\epsilon_0}^2$  est la surface du soleil.

Cette puissance est émise dans l'angle solide de  $4\pi$ .

Le concentrateur de surface  $S_c$  reçoit une fraction de cette puissance égale à  $\Omega / 4\pi$ , avec :

$$\Omega = S_c / D^2 \quad (I.37)$$

Donc la puissance reçue est :

$$P_c = \sigma T_r^4 S_c R_{\epsilon_0}^2 / D^2 \quad (I.38)$$

En remarquant que  $R_{\epsilon_0}^2 / D^2 = \epsilon_0^2$  et en écrivant les densités de puissances sur le récepteur  $D_s$  et sur le concentrateur  $D_c$ , il vient que :

$$C = \frac{T_r^4}{T_s^4} \frac{1}{\epsilon_0^2} \quad (I.39)$$

Quand  $T_r = T_s$ , la concentration est maximale :

$$C_{max} = \frac{1}{\epsilon_0^2} \quad (I.40)$$

En remplaçant  $\epsilon_0$  par sa valeur numérique, on trouve :

$$C_{max} = 46160 \quad (I.41)$$

La densité de puissance maximale sur le récepteur, s'écrit  $D_s = C_{max} \cdot D_h$ , sa valeur est  $63,3 \text{ MW/m}^2$ , elle représente aussi la densité de puissance sur la surface du soleil.

Le calcul de la concentration maximale que nous venons de développer, suppose un « soleil uniforme » correspondant, comme nous venons de le voir à une température moyenne de

5780K. Nous savons que cette hypothèse est fautive. Dans sa partie centrale, le soleil est plus brillant qu'en moyenne, la température thermodynamique associée est donc plus élevée. Il est donc possible d'accroître la densité de puissance sur le récepteur à la condition de perdre volontairement du rayonnement provenant du « bord du soleil ».

### II-4-3. Concentration optimale

L'étendue optique du faisceau doit être conservée à la traversée du concentrateur. « Le soleil est une source de brillance uniforme » posée par hypothèse, il est vu sous l'angle  $2\epsilon_0$  depuis tous les points de la face d'entrée  $S_c$  du concentrateur. Le rayonnement intercepté par ce dernier passera dans une surface  $S$  en faisant avec sa normale un angle  $\theta$  inférieur à une valeur limite  $\theta_0$  (cas de la face d'entrée d'un conducteur optique). L'étendue optique du faisceau de la face d'entrée du concentrateur est donnée par la relation suivante : [2]

$$S_c 2\pi (1 - \cos \epsilon_0) \approx \pi S_c \epsilon_0^2 \quad (I.42)$$

Dans le cas réel où on cherche à optimiser la concentration, posons les hypothèses suivantes :

La surface  $S$  est très petite devant la surface  $S_c$  ;

Le système possède un axe de révolution perpendiculaire à  $S_c$  et  $S$  passant par leur centre.

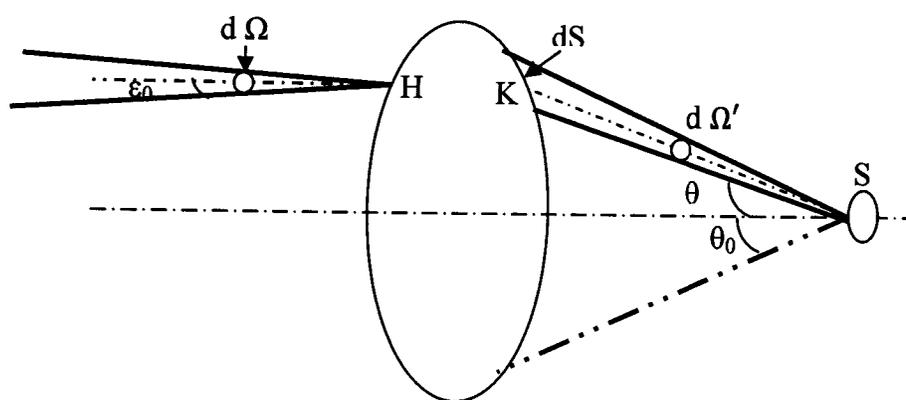


Figure I-15 : Principe de concentration [2].

Dans ces conditions, tous les points de  $S$  reçoivent un faisceau de lumière conique. L'étendue de faisceau élémentaire délimitée entre les angles  $\theta$  et  $\theta + d\theta$  s'écrit :

$$d\xi = S \cos 2\pi \sin \theta d\theta \quad (I.43)$$

L'étendue optique du faisceau intercepté  $S$  s'obtiendra en intégrant l'équation (I.43) entre les valeurs 0 et  $\theta_0$ . En appliquant la relation qui traduit le principe de conservation de l'étendue optique du faisceau :

$$n S d\Omega = n' S' d\Omega \quad (I.44)$$

On obtient :  $S_c \varepsilon_0^2 = S \sin^2 \theta_0$ , si  $n = n' = 1$ , correspondant au cas étudié.

En choisissant le cas idéal (absence d'absorption), la puissance est conservée et le facteur de concentration se réduit au rapport des surfaces  $S$  et  $S_c$  : c'est le facteur de concentration optimal correspondant à l'angle  $\theta_0$  :

$$C_{opt} = \frac{\sin^2 \theta_0}{\varepsilon_2} = C_{max} \sin^2 \theta_0 \quad (I.45)$$

Pour une ouverture  $\theta_0 = \pi / 2$ , la concentration optimale prend la valeur  $C_{max}$ .

### III. Le transfert de chaleur

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

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [11].

#### III-1. Définitions

##### III-1-1. Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température:  $T = f(x, y, z)$ . La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas : [11]

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou instationnaire.

##### III-1-2. Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température : [11]



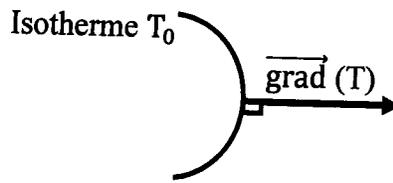


Figure I-16 : Gradient de température.

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{I.46})$$

Avec :

- $\vec{n}$  : Vecteur unitaire de la normale.
- $\frac{\partial T}{\partial n}$  : Dérivée de la température le long de la normale.

### III-1-3. Quelques types de quantité de chaleur

Lorsqu'un corps reçoit, ou perd, de l'énergie sous forme de chaleur, on constate expérimentalement que sa température augmente, ou baisse. L'énergie calorifique correspond : [12]

- Pour les gaz et les liquides, à l'agitation moléculaire (essentiellement) ; quand T augmente,  $E_c = 3/2 \cdot k_B T$  aussi, avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ , c'est la constante de Boltzmann.
- Pour les solides, à l'agitation de vibration autour d'une position ; quand T augmente, l'amplitude de vibration aussi.

Enfin, la qualité de la matière intervient, sous la forme d'un coefficient constant : la capacité calorifique 'C'en (exprimée en J/mol. K ou cal/mol. K)

L'équation fondamentale régissant la quantité de chaleur en fonction des variables citées est:

$$dQ = m \cdot C \cdot dT \quad (\text{J ou cal}) \quad (\text{I.47})$$

Cette équation s'applique pour un état fixé de la matière. Or la matière peut se trouver sous 3 états différents (solide, liquide ou vapeur) qui correspondent à des états de désorganisation (entropie) croissante.

Lorsqu'il y a changement d'état (de phase), la température ne varie pas tant qu'il reste deux phases en présence : par exemple, dans la casserole, l'eau est à 100°C que le gaz soit fort ou moyen, il y a seulement plus ou moins d'eau qui s'évapore. A chaque unité de masse évaporée, il a fallu apporter une certaine quantité d'énergie : c'est la chaleur latente de vaporisation 'L'.

L : quantité de chaleur nécessaire pour évaporer un gramme de liquide (J/Kg ou cal/Kg)

Donc, pour évaporer une masse  $m$  de liquide, il faut une quantité de chaleur :

$$\Delta Q = m \cdot L \quad (I.48)$$

### III-1-4. Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur: [11]

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (I.49)$$

Où :  $S$  est l'aire de la surface ( $m^2$ ).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface  $S$  par unité de temps:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (W) \quad (I.50)$$

### III-2. Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être : [11]

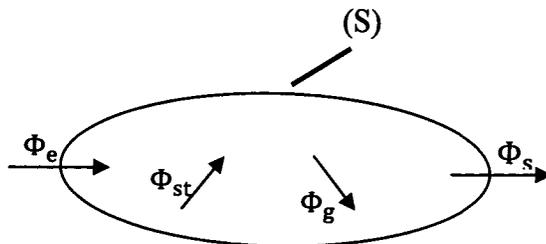


Figure I-17 : Formulation d'un problème énergétique de transfert de chaleur.

Avec :

- $\Phi_{st}$  : Flux de chaleur stocké
  - $\Phi_g$  : Flux de chaleur généré
  - $\Phi_e$  : Flux de chaleur entrant
  - $\Phi_s$  : Flux de chaleur sortant
- } Dans le système (S)

On applique alors le 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\Phi_e + \Phi_g = \Phi_s + \Phi_{st} \quad (W) \quad (I.51)$$

### III-3. Dynamique des échanges thermiques

Les quantités de chaleur que nous venons de définir peuvent s'échanger de 3 façons au sein d'un même état de la matière :

- Conduction,
- Convection (pas dans les solides),
- Rayonnement.

#### III-3-1. Transfert de chaleur par conduction [11]

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

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

$$\vec{\Phi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (I.52)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\Phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (I.53)$$

Avec :

- $\Phi$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W).
- $\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).
- $x$  : Variable d'espace dans la direction du flux (m).
- $S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ ).

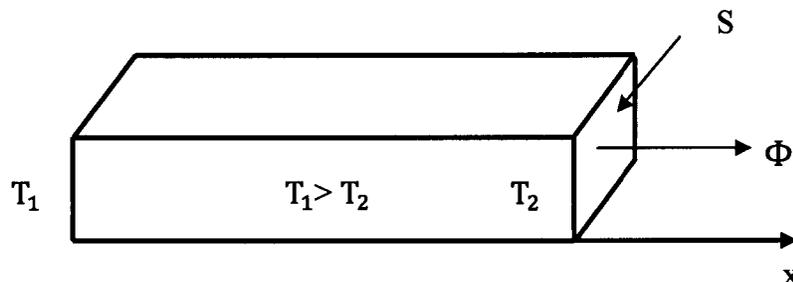


Figure I-18 : Flux de chaleur transmis par conduction.

On trouvera dans le tableau au dessous les valeurs de la conductivité thermique  $\lambda$  de certains matériaux parmi les plus courants.

Matériau	$\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ )	Matériau	$\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ )
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Coton	0,059
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	14,9	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Brique terre cuite	1,1	Polystyrène extrudé	0,027
Verre	0,78	Air	0,026

Tableau I-5 : La conductivité thermique  $\lambda$  de certains matériaux.

### III-3-2. Transfert de chaleur par convection [11]

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels il est généralement prépondérant.

#### a. Définitions

##### 1. Convection naturelle et forcée ;

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

-La convection libre ou naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

-La convection forcée : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

## b. Expression du flux de chaleur

### 1. Analogie de Reynolds ;

De même qu'au niveau moléculaire on explique la viscosité des gaz par la transmission des quantités de mouvement des molécules lors des chocs intermoléculaires, on explique la transmission de la chaleur par la transmission d'énergie cinétique lors de ces mêmes chocs.

Cette liaison intime des phénomènes de viscosité et de transfert de chaleur conduit à l'analogie de Reynolds : dans un écoulement fluide avec transfert de chaleur dans un tube, le profil des vitesses et le profil des températures sont liés par une relation de similitude :

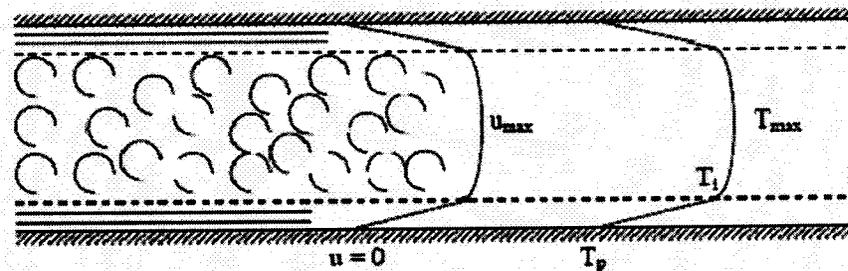


Figure I-19 : Analogie de Reynolds.

### 2. Couches limites dynamiques et thermiques ;

Quelque soit le régime d'écoulement, il demeure une sous-couche laminaire (couche limite dynamique) dont l'épaisseur est d'autant plus réduite que le nombre de Reynolds est grand. L'épaisseur de cette couche limite varie en fonction de nombreux paramètres : nature du fluide, température, rugosité de la paroi...

L'analogie de Reynolds montre que le gradient thermique est particulièrement important au voisinage de la paroi, c'est à dire dans la sous-couche laminaire. Quelque soit le régime d'écoulement du fluide, on considère que la résistance thermique est entièrement située dans le film laminaire qui joue le rôle d'isolant thermique (couche limite thermique).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{I.54})$$

Avec :

- $e$  : Épaisseur du film laminaire (m).
- $\lambda$  : Conductivité thermique du fluide ( $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

Rigoureusement, le flux de chaleur par unité de surface s'écrit alors :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} (T_p - T_i) \quad (\text{I.55})$$

Où :

- $T_i$  : est la température à la limite du film laminaire (K).

Pour un régime thermique bien établi, on peut considérer en première approximation que par suite des courants de convection la masse fluide au-delà du film laminaire est à une température constante et prendre comme loi de la densité de flux de chaleur la relation :

$$\phi = \frac{\lambda}{e} (T_p - T_\infty) \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (\text{I.56})$$

Avec :  $T_\infty$  ; Température du fluide loin de la paroi (K) Qui correspond au modèle de Prandtl représenté au dessous à titre d'exemple pour l'écoulement d'un fluide dans une conduite :

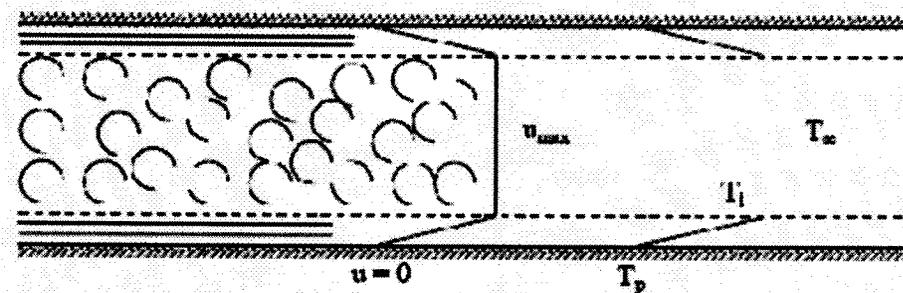


Figure I-20 : modèle de Prandtl.

$T_\infty$ , qui est la température moyenne du fluide dans une section perpendiculaire à l'écoulement dans le cas de la circulation d'un fluide dans une canalisation, dépend du régime d'écoulement. Dans le cas d'un échange paroi fluide, on prendra pour  $T_\infty$  la température du fluide loin de la paroi.

3. Loi de Newton : Valeur du coefficient de transfert ;

Cette loi simple présente néanmoins une énorme difficulté dans son application puisque l'on ne connaît pas l'épaisseur  $e$  du film laminaire. C'est ce qui amène à définir un coefficient de transfert superficiel ou coefficient de transfert de chaleur par convection par :

$$h_c = \frac{\lambda}{e} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}) \quad (\text{I.57})$$

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur  $\phi$  est donné par la relation dite loi de Newton :

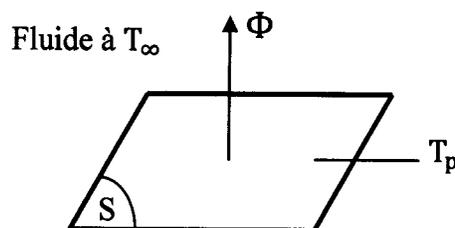


Figure I-21 : Flux de chaleur transmis par convection entre un solide et un fluide.

$$\Phi = h_c \cdot S (T_p - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (\text{I.58})$$

Avec :

- $h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W m^{-2} K^{-1}$ ).
- $T_p$  : Température de surface du solide (K).
- $T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide (K).
- $S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $m^2$ ).

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer  $h_c$  qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange,...

On trouvera dans le tableau au dessous l'ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection pour différentes configurations.

Configuration	$h$ ( $Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )
<u>Convection naturelle</u>	
• Plaque verticale de hauteur 0,3 m dans l'air	4,5
• Cylindre horizontal de diamètre 5 cm dans l'air	6,5
• Cylindre horizontal de diamètre 2 cm dans l'eau	890
<u>Convection forcée</u>	
• Courant d'air à 2 m/s sur une plaque carrée de 2 m de côté	12
• Courant d'air à 35 m/s sur une plaque carrée de 0,75 m de côté	75
• Eau à 0,5 kg/s dans un tube de diamètre 2,5 cm	3500
• Courant d'air à 50 m/s perpendiculaire à un tube de diamètre 5 cm	180
<u>Ebullition de l'eau</u>	
• Dans un récipient	2500-35000
• En écoulement dans un tube	5000-100000
<u>Condensation de l'eau sous 1 atm</u>	
• Sur une surface verticale	1000-11000
• A l'extérieur de tubes horizontaux	10000-25000

Tableau I-6 : coefficient de transfert de chaleur par convection pour différentes configurations.

### c. Calcul du flux de chaleur en convection forcée

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

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (\text{I.59})$$

Définis par: (Où :  $u$  est la vitesse moyenne de fluide (m/s) ;  $\mu$  : viscosité dynamique (Kg) et  $\rho$  : la masse volumique de fluide (Kg/ m<sup>3</sup> ).

- $\text{Nu} = \frac{hD}{\lambda}$  : Nombre de Nusselt.
- $\text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu}$  : Nombre de Reynolds.
- $\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$  : Nombre de Prandtl.

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

- Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl.
- Suivant la valeur de Re et la configuration → choix de la corrélation.
- Calcul de Nu par application de cette corrélation.
- Calcul de  $h_c = \frac{\lambda \text{Nu}}{D}$  et de  $\Phi = h_c S (T_p - T_\infty)$ .

### d. Calcul du flux de chaleur en convection naturelle

#### 1. Mécanisme de la convection naturelle ;

Considérons un fluide au repos en contact avec une paroi plane à température  $T_0$ . Si l'on porte la paroi à une température  $T = T_0 + \Delta T$ , le fluide au contact de la paroi va s'échauffer par conduction et la masse du volume unité va passer de  $\rho_0$  à  $\rho_0 - \Delta \rho$  :

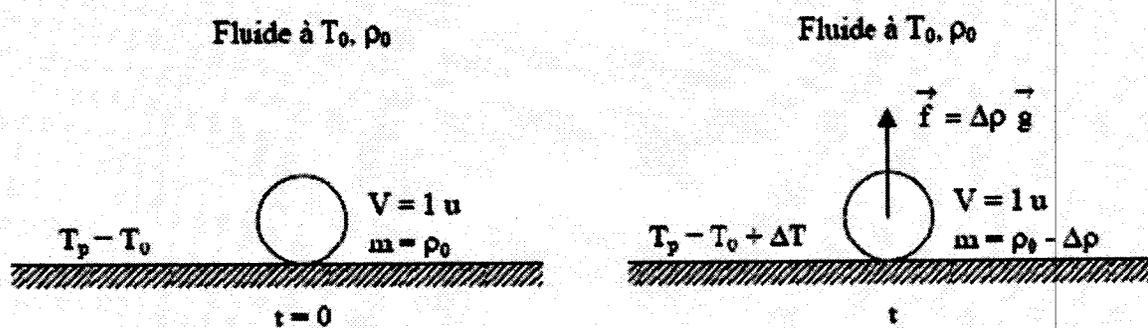


Figure I-22 : Mécanisme de la convection naturelle.

Il sera donc soumis à une force ascensionnelle  $\vec{f} = -\Delta\rho \cdot g$ . Le principe fondamental de la dynamique permet d'évaluer l'accélération du fluide :

Pour un volume unité :  $m = \rho$  d'où :  $\Delta\rho \cdot g = \rho \cdot \gamma$  et  $\gamma = \frac{\Delta\rho}{\rho} g$

En introduisant le coefficient de dilatation cubique  $\beta$  du fluide défini par  $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta T}$ , il vient :

$$\gamma = \beta \cdot g \cdot \Delta T \quad (I.60)$$

$\beta g \Delta T$  est donc le module de l'accélération produite par l'expansion thermique due à la variation  $\Delta T$  de la température  $T_0$ . Ce mouvement du fluide induit par les différences de masse volumique résultantes des gradients de température va donner naissance aux courants de convection.

Dans le cas d'un transfert de chaleur par convection naturelle le long d'une plaque plane, le coefficient de convection dépend des caractéristiques du fluide :  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $c_p$ ,  $\beta$ ,  $g$ , de la paroi caractérisée par la longueur  $L$ , et de l'écart de température  $\Delta\theta$  aux bornes du film ce que l'on peut traduire par une relation du type :

$$\phi = f(\lambda, \rho, \mu, c_p, \beta, g, L, \Delta T) \quad (I.61)$$

Dans le système M, L, T,  $\theta$ , Q, cette relation entre 8 grandeurs se réduit à une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (I.62)$$

Définis par :

- $Nu = \frac{hD}{\lambda}$  : Nombre de Nusselt.
- $Gr = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2}$  : Nombre de Grashof.
- $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$  : Nombre de Prandtl.

## 2. Signification physique du nombre de Grashof ;

Lorsque la masse unité du fluide, soumise à l'accélération  $\beta g \Delta T$  subit une variation d'altitude  $L$ , la conservation de l'énergie permet d'écrire :

$$\frac{u^2}{2} = \beta g \Delta T L \quad (I.63)$$

$\frac{u^2}{2}$  : Représente la variation d'énergie cinétique et  $(\beta g \Delta T L)$  la variation d'énergie potentielle.

On voit donc que le nombre de Grashof peut se mettre sous la forme :

$$\text{Gr} = \frac{1}{2} \left( \frac{u L \rho}{\mu} \right)^2 \quad (\text{I.64})$$

Il est donc proportionnel au carré d'un nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement. En pratique, en convection naturelle, le courant qui prend naissance reste laminaire jusqu'à ce que le nombre de Grashof atteigne une valeur d'environ  $10^9$ .

### 3. Calcul du flux de chaleur en convection naturelle ;

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :  $\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr})$  définis par :

- $\text{Nu} = \frac{hD}{\lambda}$  : Nombre de Nusselt
- $\text{Gr} = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2}$  : Nombre de Grashof
- $\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$  : Nombre de Prandtl

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

- Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl.
- Suivant la valeur de Gr et configuration → choix de la corrélation.
- Calcul de Nu par application de cette corrélation.
- Calcul de  $h_c = \frac{\lambda \text{Nu}}{D}$  et de  $\Phi = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_\infty)$ .

## III-3-3. Transfert de chaleur par rayonnement

### a. Les radiations électromagnétiques [13]

Dans le sens classique, les radiations électromagnétiques sont considérées comme des ondes qui consistent en des composantes de champs électrique et magnétique qui sont perpendiculaires l'un à l'autre et tous deux perpendiculaires à la direction de propagation. La lumière, la chaleur (ou l'énergie du rayonnement), le radar, les ondes radio et les rayons X sont tous des formes de radiations électromagnétiques.

Chacune est caractérisée par un rang spécifique de longueurs d'onde, et par la technique Particulière par laquelle elle a été générée. Le spectre électromagnétique des radiations S'étend sur un large intervalle depuis les rayons  $\gamma$  émises par les matériaux radioactifs et ayant des longueurs d'onde de l'ordre de  $10^{-12}$  m, passant par les rayons X, ultraviolets,



visibles, Infrarouges, et finalement les ondes radio avec des longueurs d'onde aussi grandes que  $10^5\text{m}$ . Ce spectre est souvent représenté sur une échelle logarithmique.

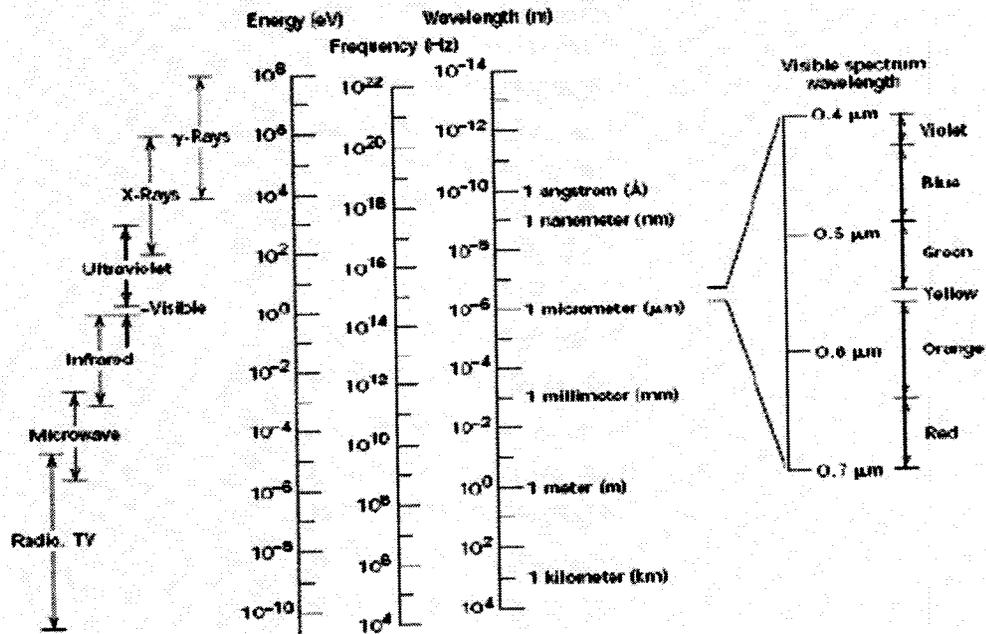


Figure I-23 : Spectre du rayonnement électromagnétique.

La lumière visible se trouve dans une région très étroite du spectre, avec des longueurs d'ondes entre environ  $0.4\mu\text{m}$  ( $4 \cdot 10^{-7}\text{m}$ ) et  $0,7\mu\text{m}$ . La couleur perçue est déterminée par la longueur d'onde ; par exemple, une radiation ayant une longueur d'onde d'environ  $0,4\mu\text{m}$  apparaît violette, alors que le vert et le rouge se produisent à environ  $0,5$  et  $0,65\mu\text{m}$  respectivement.

La lumière blanche est simplement un mélange de toutes les couleurs. La lumière visible est par définition l'ensemble des radiations pour lesquelles l'œil humain est sensible. Toutes les radiations électromagnétiques traversent le vide à la même vitesse, celle de la lumière, notamment  $3 \cdot 10^8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Cette vitesse,  $c$ , est reliée à la perméabilité électrique du vide  $\epsilon_0$  et la perméabilité magnétique du vide  $\mu_0$  :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (I.65)$$

Ainsi, il y a une association existe entre la constante électromagnétique  $c$  et les deux constantes électrique et magnétique. En plus, la fréquence  $\nu$  et la longueur d'onde  $\lambda$  de la radiation électromagnétique sont une fonction de la vitesse suivant :

$$c = h \nu \quad (I.66)$$

La fréquence est exprimée en hertz, et  $1\text{Hz} = 1\text{cycle par seconde}$ .

Quelques fois il est plus convenable de voir la radiation électromagnétique d'un point de vue de la mécanique quantique, en ceci que la radiation, plutôt que d'être des ondes, elle est composée de groupes ou de paquets d'énergie appelés photons. L'énergie  $E$  d'un photon est dite quantifiée, ou peut avoir uniquement des valeurs spécifiques, définie par la relation :

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.67)$$

Où :  $h$  est une constante universelle appelée constante de Planck dont la valeur de  $6,63 \cdot 10^{-34}$  (Joule . s).

Ainsi, l'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence de la radiation, ou inversement proportionnelle à sa longueur d'onde.

### b. L'interaction de la lumière avec les solides [13]

Lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre (e. g. de l'air à la substance du solide), plusieurs choses arrivent. Une partie de la radiation lumineuse peut être transmise à travers le milieu, une autre peut être absorbée, et le reste sera réfléchi à l'interface entre les deux milieux. L'intensité  $I_0$  du faisceau incident à la surface du milieu solide doit être égale à la somme des intensités des faisceaux transmis, absorbés et réfléchis, notés  $I_T$ ,  $I_A$  et  $I_R$  respectivement :

$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (1.68)$$

L'intensité de la radiation, exprimée en watts par mètre carré, correspond à l'énergie transmise par unité de temps à travers une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation. Une forme alternative de l'équation est :

$$T + A + R = 1 \quad (1.69)$$

Où  $T$ ,  $A$  et  $R$  représentent, respectivement, la transmissivité ( $I_T / I_0$ ), l'absorbitivité ( $I_A / I_0$ ) et la réflectivité ( $I_R / I_0$ ), ou les fractions de la lumière incidente qui sont transmise, absorbée et réfléchie par un matériau.

Les matériaux qui sont capables de transmettre la lumière avec de faibles absorptions et réflexion sont transparents : on peut voir à travers eux. Les matériaux translucides sont ceux à travers lesquels la lumière est transmise avec une diffusion ; c'est à dire que la lumière est dispersée à l'intérieur, au point que les objets ne soient pas clairement distingués lorsqu'ils sont observés à travers un spécimen du matériau. Les matériaux qui ne permettent pas la transmission de la lumière sont dits opaques. Les métaux massifs sont opaques dans tout le spectre visible ; c'est à dire, toute radiation lumineuse est ou bien absorbée ou bien réfléchie. D'un autre côté, les matériaux isolants électriquement peuvent être fabriqués transparent. En plus, certains matériaux semiconducteurs sont transparents alors que d'autres sont opaques.



### c. Corps noir

C'est un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, il est défini par :  $A = 1$ .

Une surface enduite de noir de fumée est approximativement un corps noir.

Propriétés du corps noir : [14]

- Tous les corps noirs rayonnent de la même manière.
- Le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température.

On représente idéalement un corps noir comme une cavité à parois interne opaque (absorbance maximale), percée d'un petit trou par lequel pénètrent les radiations qui se retrouvent piégées dans la cavité [14].

Le spectre d'émission du corps noir, couvrant toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique, suit une fonction particulière qui passe par un maximum pour une longueur d'onde dépendant de la température.

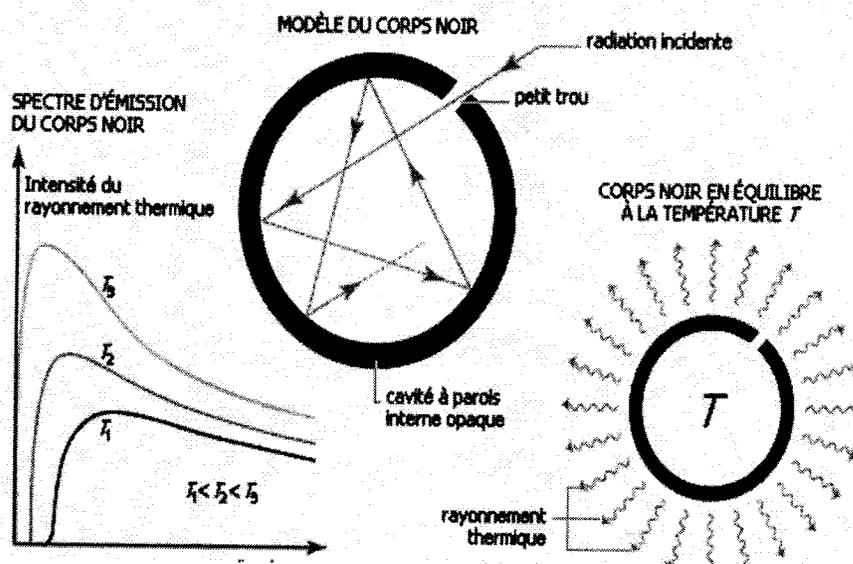


Figure I-24 : modèle de corps noir [14].

### d. L'expression du flux échangé par rayonnement [15]

On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Concédons en figure (I-25) un mur de surface  $S$  dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures  $T_1$  et  $T_p$  ; ( $T_1 > T_p$ ). Ce mur est donc soumis à un phénomène de conduction. On suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température  $T_\infty$ .

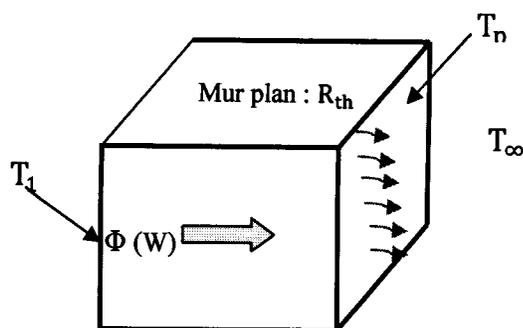


Figure I-25 : Flux de chaleur transmis par conduction et par rayonnement.

D'après la loi de Stefan, le flux de chaleur échangé entre la surface  $S$  et le milieu ambiant peut s'écrire :

$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{W}) \quad (\text{I.70})$$

Avec :

- $\Phi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W).
- $\sigma$  : Constante de Stephan ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).
- $\epsilon$  : Facteur d'émission de la surface ( $\epsilon = 1$  pour un corps noir,  $\epsilon \ll 1$  : corps brillant).
- $T_p$  : Température de surface du corps (K).
- $T_\infty$  : Température du milieu ambiant (K).
- $S$  : Aire de la surface ( $\text{m}^2$ ).

La puissance  $4^{\text{ème}}$  de la température implique une transformation systématique de l'unité de l'unité de température en degré Kelvin ( $T(\text{K}) = T(\text{°C}) + 273,15$ ).

Le corps noir est défini comme étant une surface idéal qui absorbe tout le rayonnement qu'elle reçoit. Le soleil peut être considéré comme un corps noir dont la température de surface est proche de 5800K. Expérimentalement on observe que les corps les plus absorbants sont aussi les plus thermiquement émissifs. C'est pourquoi le corps noir est pris comme élément de comparaison et de référence pour le rayonnement des corps quelconque. L'influence des matériaux sur l'énergie rayonnée est défini par le coefficient d'émission  $\epsilon$  (pris égal à 1 pour le corps noir).

L'expression de flux de chaleur échangé par rayonnement est non linéaire, elle fait intervenir la température en (K) à la puissance quatrième en peut cependant la linéariser lorsque la différence de température  $T_p - T_\infty$  reste faible.

En effet on peut écrire le flux de chaleur :

$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \left( T_p^3 + T_p T_\infty^2 + T_\infty T_p^2 + T_\infty^3 \right) (T_p - T_\infty) \quad (\text{I.71})$$

Si on fait l'approximation:  $T_p^2 T_\infty = T_p^3$  et  $T_\infty^2 T_p = T_\infty^3$ , en introduisant de plus la température moyenne :

$$T_m = \frac{T_p + T_\infty}{2} \quad (I.72)$$

La relation est sensiblement devient :

$$\Phi = h_r \cdot S(T_p - T_\infty) \quad (I.73)$$

Avec :

$$h_r = 4 \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_m^3 \quad (I.74)$$

On trouve alors une formulation semblable à celle de flux de chaleur échangé avec convection par un coefficient d'échange par rayonnement  $h_r$  exprimé en ( $Wm^{-2} K^{-1}$ )

Dans le cas d'un transfert de chaleur couplé convection-rayonnement, on peut définir un coefficient d'échange globale :

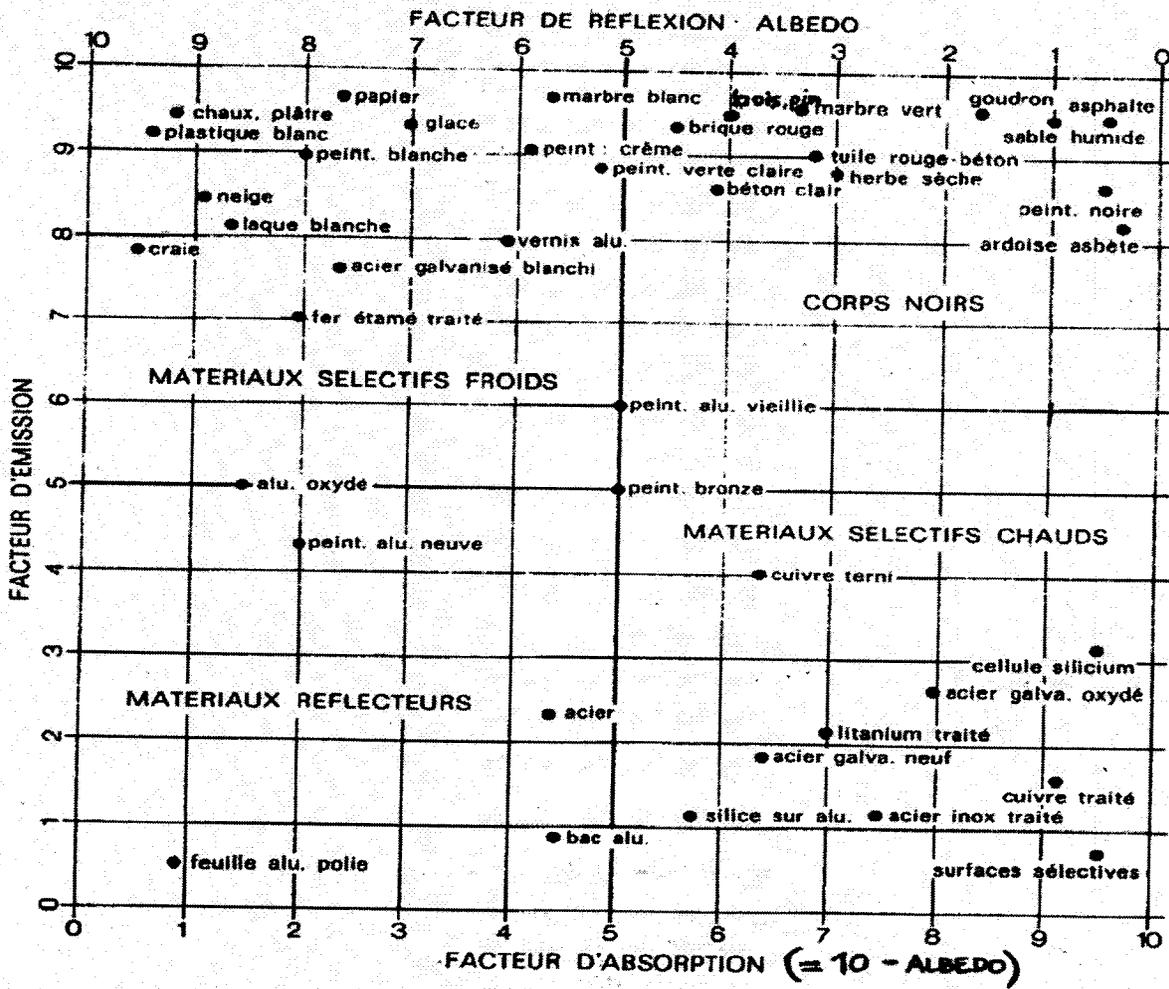
$$h_G = h_c + h_r \quad (I.75)$$

Ce coefficient conduisant à un flux de chaleur global :

$$\Phi = h_G(T_p - T_\infty) \quad (I.76)$$

Acier inox	0,25
Ciment	0,96
Brique	0,75
Béton	0,93
Pierre	0,93
Email	0,85 à 0,95
Laque	0,95
Peinture à l'huile	0,94
Peinture aluminium	0,35
Liège	0,93

Tableau I-7 : Facteur d'émission normale de surface  $\varepsilon$  de quelques matériaux à 300 K.



Albédo = facteur de réflexion par rapport au rayonnement solaire ( $\lambda < 3 \mu\text{m}$ ).

Figure I-26 : Emissivité de certains corps [11].

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une description générale sur le soleil et le rayonnement solaire et sa concentration ainsi que, les notions physiques de transfert thermique.

## **Chapitre II :**

# **Les fibres optiques et les systèmes solaires à concentration**



## I. Introduction

Dans ce chapitre, on se propose d'introduire les notions physiques essentielles à l'étude de l'un des matériaux modernes 'la fibre optique'. Ainsi que, les systèmes solaires à concentration.

## II. Les fibres optiques

### II-1. Introduction

Les principes de guidage de la lumière sont connus depuis l'antiquité. Les romains lors de leur banquet exhibaient des jeux d'eau et de lumière : Les fontaines lumineuses : Ces fontaines consistaient en une lampe placée dans un compartiment étanche et transparent (verre) au milieu de leur réservoir. Sur les cotes du réservoir des trous d'où s'échappaient des jets d'eau, guidaient la lumière.

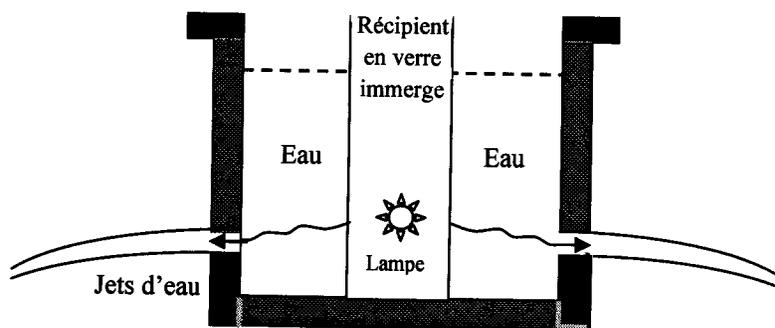


Figure II-1: Principe des fontaines lumineuses romaines dans l'antiquité [16].

On considère un «tuyau» d'eau dans lequel se trouve de la lumière. L'eau a un indice  $n_1$ , entourée d'air d'indice  $n_2$ .

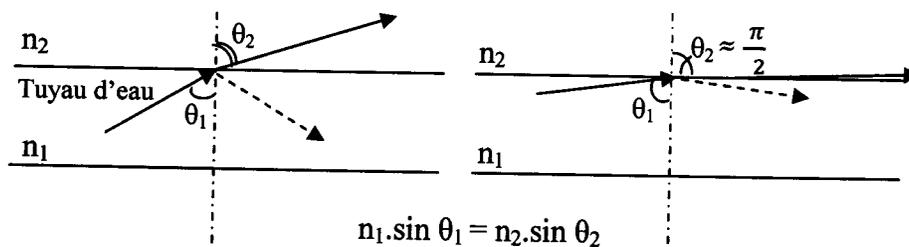


Figure II-2: Loi de réfraction dans un tuyau d'eau d'indice  $n_1$  entourée d'air

Nous appliquons la loi de Descartes pour déterminer le trajet suivi par les rayons lumineux dans le tuyau:

Si  $n_1 > n_2$  ( $n_1 / n_2 > 1$ ) (la vitesse de la lumière dans l'eau est plus faible que dans l'air) alors  $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta_1$ .  $\sin \theta_2$  est plus grand que  $\sin \theta_1$  c'est à dire que l'angle  $\theta_2$  est plus grand que

l'angle  $\theta_1$ . Il peut exister une situation particulière où  $\theta_2$  est égal à  $\frac{\pi}{2}$ .

Pour cette valeur de  $\theta_2$ , la lumière est totalement réfléchie et reste dans l'eau, sans pour autant que  $\theta_1$  soit parallèle à la direction du tuyau. En fait, on peut définir un angle limite :  $\theta_{\text{limite}}$  au-delà duquel le rayon reste dans le matériau.

$$\theta_{\text{limite}} = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (\text{II.1})$$

Ce résultat est particulièrement intéressant parce qu'il signifie qu'on peut garder (guider) de la lumière dans le tuyau même si la direction de propagation de la lumière n'est pas exactement dans l'axe du tuyau. En fait tous les rayons lumineux "mal orientés", mais dont l'angle reste compris entre  $\mp \theta_{\text{limite}}$  sont guidés dans le tuyau, tandis que les autres sont perdus.

Maintenant que nous avons compris ce principe nous pouvons imaginer remplacer l'eau par un plastique ou par du verre et réaliser ainsi de long barreau ou fil conduisant la lumière. En utilisant du verre nous réinventons la fibre optique. Pour cela il suffit de fabriquer un long tuyau de verre entouré d'un matériau d'indice plus faible [16].

## II-2. Définitions

La découverte de la fibre optique est l'un des développements des plus récents et les plus intéressants en optique. Si on définit un fil électrique comme une section métallique conductrice d'électron, on peut définir la fibre optique comme un fil de verre ou autre substance transparente capable de conduire des photons [13].

Les fibres optiques sont des tubes capillaires de faible diamètre composées de deux types de matériaux naturels ou synthétiques. Ils transmettent la lumière le long d'un trajet rectiligne ou incurvé suivant le principe de réflexion totale interne [2].

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire schématisé sur la figure (II-3). Ils se composent d'un cœur et d'une gaine, toutes deux des matériaux transparents en verre ou en plastique. Un revêtement protecteur, en plastique souple, entoure la gaine [17].

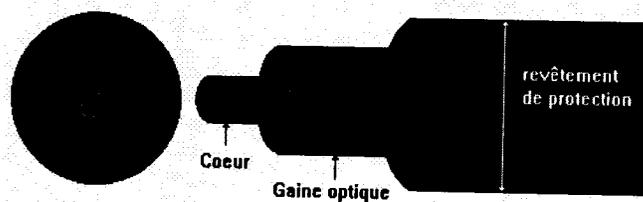


Figure II-3: Schéma général d'une fibre optique [17].

Un faisceau à fibre optiques est utilisé pour transmettre de la lumière soit indépendamment soit couplé à un appareil d'analyse. Le cœur et la gaine sont des matériaux transparents, il est important que l'indice de réfraction du cœur,  $n_1$ , soit supérieur à l'indice de réfraction de la gaine optique,  $n_2$ , pour que la réflexion totale soit possible, les rayons lumineux à se déplacer à l'intérieur du cœur ; le revêtement externe protecteur, protège le cœur et la gaine des dommages qui peuvent résulter de l'abrasion et les pressions externes[2].

Une fibre optique a la forme d'un cylindre plein de très petit diamètre composée d'un milieu diélectrique que l'on nomme cœur recouvert d'un second milieu la gaine optique, d'indice de réfraction,  $n_2$ , inférieur à celui du cœur,  $n_1$ . la fibre optique est un guide de la lumière, régi par la loi de Descartes, constituée d'un cœur dans lequel se propage l'onde lumineuse en se réfléchissant sur la gaine optique d'indice de réfraction plus faible[2].

## II-2-1. Principes physiques

### a. Indice de réfraction

L'indice de réfraction  $n$  d'un matériau est défini comme étant le rapport entre la vitesse  $c$  dans le vide et celle dans le milieu  $v$  :

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II.2})$$

La valeur de  $n$  (le degré d'inclinaison) dépend de la longueur d'onde de la lumière. Cet effet est graphiquement démontré par la figure familière de la dispersion ou la séparation d'un faisceau de lumière blanche en ses couleurs constitutives par un prisme en verre. Chaque couleur est déviée différemment lorsqu'elle passe dans et hors le prisme, ce qui résulte en la séparation des couleurs.

L'indice de réfraction  $n$  affecte pas uniquement la trajectoire optique de la lumière, mais il influence la fraction de la lumière qui réfléchit à la surface. On définit la vitesse de la lumière  $v$  dans le milieu :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (\text{II.3})$$

Où  $\epsilon$  et  $\mu$  sont, respectivement, la permittivité et perméabilité de la substance particulière. A partir de l'équation (II-2), on a :

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (\text{II.4})$$

Où  $\epsilon_r$  et  $\mu_r$  sont, respectivement, la constante diélectrique et la perméabilité magnétique relative. Puisque la plupart des substances sont seulement légèrement magnétique,  $\mu_r \cong 1$  et :

$$n \cong \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{II.5})$$

L'indice de réfraction pour un verre soda-lime typique est approximativement de 1,5. L'addition d'ions de baryum et de plomb (sous forme de BaO et PbO) à un verre augmente significativement la valeur de  $n$ . Par exemple, des verres avec une grande teneur en plomb (environ 90wt% de PbO) possèdent un indice de réfraction d'approximativement 2,1. Pour les céramiques cristallines qui ont une structure cristalline cubique, et pour les verres, l'indice de réfraction est indépendant de la direction cristallographique (i.e. ils sont isotropes). Les cristaux non cubiques, d'un autre côté, ont un indice de réfraction anisotrope ; c'est-à-dire que l'indice est plus grand le long des directions qui ont la densité ionique plus élevée [13].

Matériaux	Indice de réfraction
Les céramiques	
Silica glass	1.458
Borosilicace (Pyrex) glass	1.47
Soda lime glass	1.51
Quartz ( $\text{SiO}_2$ )	1.55
Dence optical flint glass	1.65
Spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )	1.72
Periclase ( $\text{MgO}$ )	1.74
Courundum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	1.76
Les polymères	
Polytetrafluoroethylene	1.35
Polymethyl methacrylate	1.49
Polypropylène	1.49
Polyéthylène	1.51
Polystyrène	1.60

Tableau II-1 : L'indice de réfraction de différents matériaux céramiques et polymères [13].

### b. Loi de Descartes

Le principe physique majeur qui a inspiré la technologie des fibres optiques est ce qu'on appelle « la réflexion totale interne ». Ceci découle de la loi de la réfraction ainsi que Celle de la réflexion [18].

La loi correspondant à ce principe est: la loi de Descartes :



Lorsqu'un faisceau lumineux heurte obliquement la surface qui sépare deux milieux plus ou moins transparents, il se divise en deux : une partie est réfléchi tandis que l'autre est réfractée, c'est à dire transmise dans le second milieu en changeant de direction.

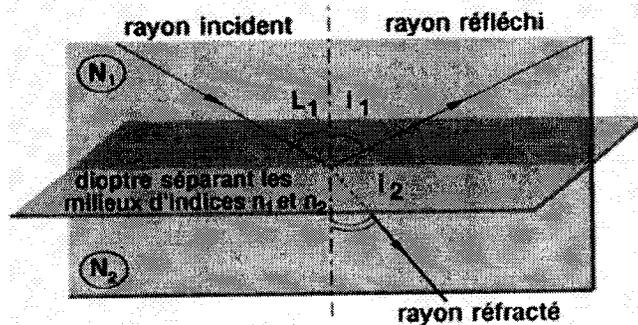


Figure II-4 : Principe de réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux [18]

C'est ce principe qui est utilisé pour guider la lumière dans la fibre. La fibre optique comprend ainsi deux milieux : le cœur, dans lequel l'énergie lumineuse se trouve confinée, grâce à un second milieu, la gaine, dont l'indice de réfraction est plus faible. Les recherches menées dans les années 1970 ont conclu que la silice était un bon support pour des longueurs d'onde prises dans le proche infrarouge (850 nm - 1300 nm - 1500 nm).

Voici donc les deux grandes lois générales (la réflexion et de la réfraction) dont est soumise la lumière lorsque celle-ci parcourt des milieux transparents. Examinons maintenant comment s'applique ces lois dans la fibre optique et comment fait-on pour que la réflexion totale interne soit respectée. Car le but de la fibre optique est que l'intensité de lumière émise à l'entrée de celle-ci soit, dans son intégralité, autant que possible Retrouvée à la sortie.

### II-3. Caractéristiques générales des fibres optiques

Ces dernières années, de nombreux types de fibres dédiés à des applications capteur particulières, ont été développés: cependant les fibres pour les télécommunications restent largement utilisées pour les raisons de coût et de disponibilité.

#### II-3-1. La structure des fibres optiques

##### a. Matériaux pour des fibres optiques

Pour composer une fibre optique, il est nécessaire d'avoir deux sortes de matériaux, naturels et synthétiques avec la plus faible atténuation possible et de bonnes propriétés mécaniques. Les matériaux synthétiques sont obtenus par polymérisation de matériaux naturels. Les matières premières naturelles sont souvent à base de silice ( $\text{SiO}_2$ ). Les fibres synthétiques sont obtenues à partir des matériaux polymères [19].

Il existe donc [19] :

- Les verres, qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques, mais de trop grandes atténuations (de 40 à 50 dB/Km). Ainsi, elles sont utilisées plutôt sur de courtes distances (en HI-FI par exemple).
- Les liquides, ils ont des atténuations très faibles. On peut rencontrer des fibres à « curliquide » constituées par des liquides tels que l'hexachlorobutadiène ou encore le tétrachloroéthylène.
- Le plastique, dont des avantages sont le prix et la facilité de pose. Les fibres en plastique sont utilisées surtout dans les réseaux locaux et dans le matériel grand public.

### b. Les propriétés des fibres optiques

Les propriétés des fibres optiques peuvent être groupées en cinq catégories : mécanique, électrique, thermique, optique et acoustiques [2].

- Mécanique : faible diamètre, fragile, flexible. Et par suite, ils sont remarquablement rigides ; durant la production de fibres en continue, ils sont testés pour assurer qu'ils répondent à la rigidité minimale standard requise.
- Électrique : ne conduisent pas de l'électricité.
- Thermique : utilisation entre -40 et +80 °C.
- Optique : un certain nombre délimité de longueurs lumineuses peuvent transmettre la lumière et sous un certain angle.
- Acoustique : le transport des ondes lumineuses entraîne une perte acoustique de quelques dB par Km due à la réflexion du rayon lumineux.

Deux autres termes sont d'une certaine importance, notamment l'élaboration et la performance. La structure d'une fibre optique dépend de la manière dont elle a été élaborée. En même temps, la performance de la fibre est fonction de ses propriétés. La relation entre ces quatre notions (structure, propriétés, élaboration et performance) joue un rôle décisif dans la conception, la production et l'utilisation des fibres optiques.

Elaboration → Structure → Propriétés → Performances [13].

### c. Quelques matériaux naturels pour les fibres optiques

Les performances des fibres optiques dépendent en grande partie des procédés de fabrication et des matériaux utilisés, avec deux buts recherchés [2] :

- L'élaboration de verre très pur.
- Le contrôle précis du profil d'indice dans les fibres à gradient d'indice.

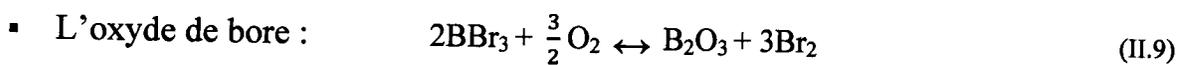
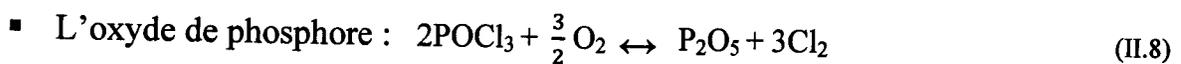
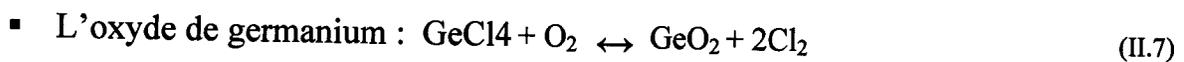
Les verres à forte teneur en silice utilisés pour la production de fibres optiques ont une viscosité qui rend difficile d'utilisation des méthodes verrières traditionnelles pour obtenir un très faible taux d'impuretés.

La silice, qui présente une absorption extrêmement faible pour les longueurs d'onde courantes, mais ses propriétés mécaniques sont médiocres. C'est avec cette sorte de fibre que l'on obtient les meilleurs résultats.

La silice est un composé oxygène du silicium, de formule  $\text{SiO}_2$ , présent dans un grand nombre de minéraux, tel que le quartz, la calcédoine et l'opale. Et par suite, est un matériau dispersif, c'est-à-dire que son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde. On réalise alors la production de particules de verres  $\text{SiO}_2$  par les réactions chimiques d'oxydation en phase vapeur [2] :



Il est possible de faire varier l'indice du matériau en mélangeant des dopants au produit de base de la réaction chimique au dessus, toute la difficulté réside dans le contrôle de l'indice lors de la fabrication pour obtenir un indice optimal, dont les réactions chimiques sont :



Des fibres exceptionnellement pures et de haute qualité sont fabriquées en utilisant des procédés sophistiqués et assez complexes. Les impuretés et autres défauts qui absorbent, dispersent, et ainsi atténuent le faisceau de lumière doivent être éliminés, ce qui rend le procédé encore plus compliqué.

L'atténuation de la lumière dans ces verres est imperceptiblement petite. Par exemple, la perte de puissance à travers seize kilomètres de fibres est équivalente à celle de vingt cinq millimètres de verre ordinaire de fenêtre.

### II-3-2. Les différentes sortes des fibres optiques

Les fibres optiques comportent deux grandes familles : les fibres multi modes et les fibres monomodes dans lesquelles des sous catégories sont répertoriées. Le choix d'un type de fibre particulier va dépendre des avantages et des inconvénients de chaque type de fibre pour une application donnée.



### a. Les fibres multimodes

Une fibre optique multi mode est une fibre en verre de section circulaire dont le cœur c'est-à-dire la partie centrale où se propage la lumière a un diamètre grand devant la longueur d'onde [16]. Le terme multi modes signifie que la lumière se répartie sur un certain nombre de trajectoire solution des équations de propagation appelée modes, qui résultent des interférences entre les réflexions multiples sur l'interface cœur-gaine [17].

En 1981, D. Marcuse a montré que le mode de propagation est unique si la variable de la fonction de Bessel  $j_0$  solution de l'équation de propagation est inférieure à 2,405 (1<sup>er</sup> zéro de la fonction). Au delà, le nombre de modes est approximativement égal à  $V^2/2$  où le paramètre  $V$ , appelé fréquence normalisée est défini dans une fibre de rayon de cœur  $a$ , comme suit [2]:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{II.10})$$

La fibre aura un comportement uni modal si  $V < V_c = 2,405$ ; ce qui conduit à définir à un diamètre de cœur maximale:

$$a_{\max} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{2,405}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (\text{II.11})$$

Les fibres multi modes ont un diamètre du cœur important (de 50 à 85  $\mu\text{m}$ ).

La réflexion interne est accomplie en variant l'indice de réfraction entre les matériaux du cœur et de la gaine. Pour ce faire, deux types de conceptions sont employés : les fibres à faible d'indice ou saut d'indice (débit limité à 50Mb/s), les fibres à gradient d'indice (débit limite à 1Gb/s) et les fibres à conservation de polarité [18].

#### ❖ Fibre à saut d'indice

C'est le type de fibre le plus simple, directement issue des applications optiques traditionnelles. Dans cette fibre, le cœur est homogène et d'indice varie brutalement d'une valeur  $n_1$  au centre (le cœur a un relatif gros diamètre, par rapport à la longueur d'onde de la lumière est de l'ordre du  $\mu\text{m}$  dans l'infrarouge) à une valeur plus faible  $n_2$  à la périphérie [16].

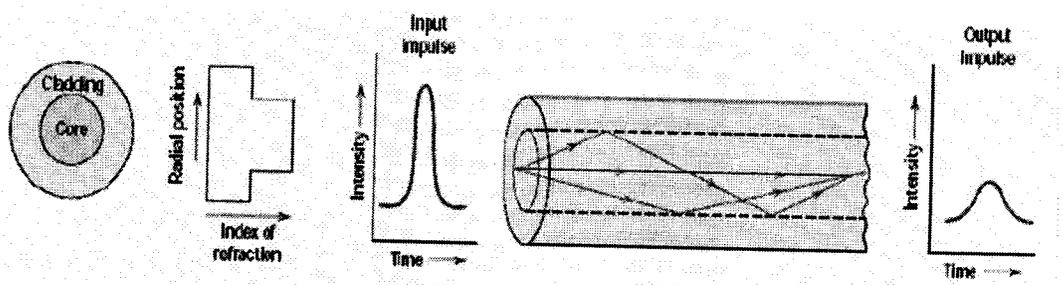


Figure II-5 : Fibre à saut d'indice [13].

Le profil d'indice le plus simple est celui d'une fibre à saut d'indice. Le diamètre du cœur des fibres à saut d'indice multi mode est compris entre  $50\mu\text{m}$  et  $200\mu\text{m}$ . Ce type de fibre est surtout utilisé pour des liaisons industrielles et militaires. Bande passante de quelques dizaines de MHz par Km [18].

C'est la raison pour laquelle une seconde génération de fibre à vue le jour ; les fibres à gradient d'indices ont été spécialement conçues pour minimiser cet effet de dispersion modale [13].

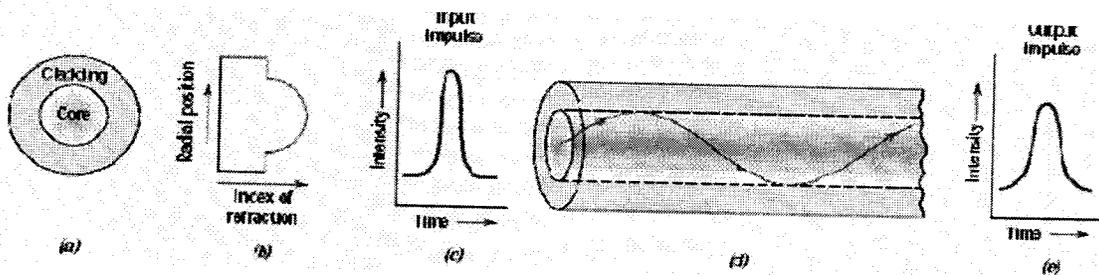


Figure II-6 : Fibre à gradient d'indice [13].

Leur cœur, contrairement à la fibre à saut d'indice, n'est pas homogène, il est en fait constitué de plusieurs couches de verres dont l'indice de réfraction est différent à chaque couche et l'indice de réfraction diminue de l'axe jusqu'à la gaine [17].

L'élargissement de la pulse est évité en utilisant la conception en indice graduel. Ici, des impuretés comme l'oxyde de bore ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) ou le dioxyde de germanium ( $\text{GeO}_2$ ) sont ajoutées dans le verre de silice de sorte que l'indice de réfraction varie de manière parabolique à travers la section.

Une fibre à gradient d'indice a un diamètre de cœur de  $50\mu\text{m}$  et d'une gaine de  $120\mu\text{m}$ . Le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. On approche ainsi d'une égalisation des temps de propagation, ce qui veut dire que l'on a réduit la dispersion modale. Leur faible atténuation acoustique 3dB. Km et leur bande passante comprise entre 400 et 3000 Mhz par Km permettent leur utilisation dans la télédistribution et les liaisons informatiques à haut débit [13].

#### ❖ Fibres à conservation de polarité

Dans certaines applications, tel que les capteurs (température, pression, gyromètre, etc.), il est nécessaire de conserver la polarisation de la lumière dans la fibre. Ceci peut être réalisé en créant une contrainte sur la fibre [2].



### b. Les fibres monomodes

Si le rayon est très petit, c'est-à-dire voisin de la longueur d'onde, il ya un seul mode et la fibre est dite monomode, et il n'ya plus de dispersion intermodale. La condition de propagation monomode de longueur d'onde  $\lambda$  dans une fibre de rayon de cœur à d'indice  $n_1$  entourée d'une gaine d'indice  $n_2$ , s'écrit [16] :

Ce critère impose pour chaque longueur d'onde différent un diamètre de cœur a différent.

$$\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405 \quad (\text{II.12})$$

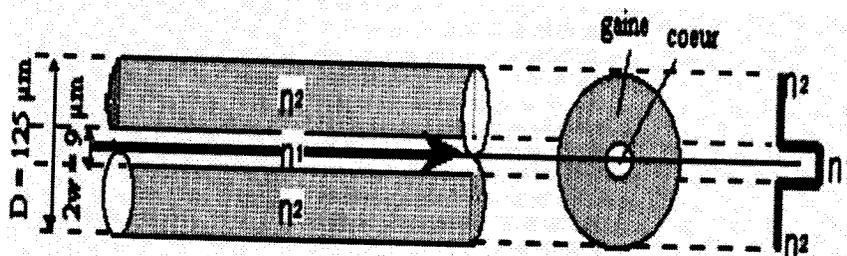


Figure II-7 : Fibre monomode (9/125) [20].

Typiquement une fibre monomode est caractérisée par un diamètre de cœur de 3 à 9  $\mu\text{m}$  ( $\approx 10\mu\text{m}$ ) avec un diamètre de gaine de 80  $\mu\text{m}$  à 125 $\mu\text{m}$ .

La fibre monomode dont le cœur est si fin que le chemin de propagation du différent mode est pratiquement directe. La dispersion modale devient quasiment nulle. La bande passante transmise est presque infinie ( $>10 \text{ GHz/km}$ ). Cette fibre est utilisée essentiellement pour les sites à distance.

Le petit diamètre du cœur (10 $\mu\text{m}$ ) nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes laser qui sont relativement onéreuses [2].

### c. L'ouverture Numérique (O.N)

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine. Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur [16].

La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique (O.N.) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur-gaine de la fibre [16].

Puisque nous avons défini un angle limite  $\theta_{\text{limite}}$  dans la fibre duquel les faisceaux lumineux sont conservés, on peut aussi retrouver l'expression de l'angle limite  $\theta_0$  d'injection de la lumière dans la fibre, comme elle est représentée sur la figure (II-8), cet angle vérifie :

$$\sin\theta_0 = n_1 \cdot \sin\phi_{\text{limite}} = n_1 \cdot \sin(\pi/2 - \theta_{\text{limite}}) \quad (\text{II.13})$$

$$= n_1 \cdot \cos\theta_{\text{limite}} \quad (\text{II.14})$$

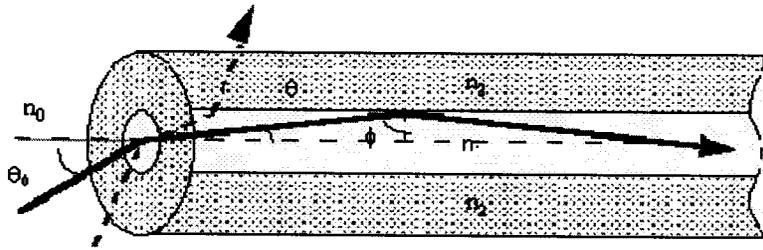


Figure II-8 : L'ouverture numérique; Angle limite d'incidence d'un rayon préparatif [16].

En remplaçant la valeur de  $\theta_{\text{limite}}$  déterminée précédemment ;

On définit l'ouverture numérique ;  $O.N = n_0 \cdot \sin\theta_0$  ; (II.15)

Or par la relation de Descartes ;  $n_0 \cdot \sin\theta_0 = n_1 \cdot \sin\phi$  ; (II.16)

En utilisant le résultat obtenu et en remplaçant  $\theta_{\text{limite}}$  par son expression il vient :

$$O.N = \sin\theta_0 = n_1 \cdot \cos(\sin^{-1}(n_2/n_1)) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (\text{II.17})$$

$$= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2 \cdot \Delta} \quad (\text{II.18})$$

Où  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  : la différence relative d'indices.

L'ouverture numérique est un des paramètres les plus importants d'une fibre .une forte ouverture numérique permet de coupler une grande quantité de lumière dans la fibre. Par contre, elle introduit également un étalement des impulsions par effet de dispersion modale.

#### d. Le profil d'indice

L'indice de réfraction du milieu caractérise la propagation de la lumière dans le guide d'onde. En réalité, c'est l'allure de l'indice du cœur  $n_1$  par rapport à celui de la gaine  $n_2$  qui joue un rôle important. On distingue deux familles de profil, celle à saut d'indice et celle à gradient d'indice [2].



Le profil d'indice est de la forme [ ] :

$$[n(r)]^2 = \begin{cases} n_1^2(1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^l) & \text{si } r \leq a \\ n_1^2(1 - 2\Delta) & \text{si } r > a \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Où  $l$  : paramètre définissant le profil d'indice (par exemple si  $l=2$  alors le profil est parabolique).

En pratique les variations de l'indice ne dépassant pas 1%. Ceci permet d'assurer une grande bande passant et une faible atténuation [2].

Les fibres multi modes dans lesquelles un plus ou moins grand nombre de modes se propagent et les fibres monomodes qui possèdent qu'un seul mode.

En fait l'étude des modes se fait à partir des équations de Maxwell qui expriment les lois fondamentales de l'électromagnétisme. On parle alors de la propagation d'onde et non plus de rayon lumineux. Dans une fibre à saut d'indice le nombre des modes est donné par  $\frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2)$  où  $a$  est le rayon du cœur de la fibre. Dans une fibre à gradient d'indice parabolique le nombre des modes est deux fois plus petit.

Le tableau suivant donne le nombre des modes pour une fibre caractérisée par les valeurs suivantes :  $a=25\mu\text{m}$ ,  $\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0,01$  et  $n_2 = 1,45$  [21] :

	$\lambda=0,83\mu\text{m}$	$\lambda=1,3\mu\text{m}$
Profil d'indice parabolique	376	153
Fibre à saut d'indice	753	306

Tableau II-2 : Le nombre des modes pour une fibre multi mode.

On voit que le nombre de modes varie avec la longueur d'onde de la source en  $1/\lambda^2$ .

La formule  $\frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2)$  montre que le nombre des modes est d'autant plus petit à quelques centièmes, on arrive à des valeurs de  $a$  de quelques microns pour avoir une fibre monomode.

L'avantage d'une fibre optique monomode par rapport à une multi mode est un meilleur guidage du mode principal et une diminution des pertes dues à l'absence de couplage de

modes entre eux. Il faut une distance d'environ 400 mètre pour que la répartition des modes dans la fibre optique se stabilise.

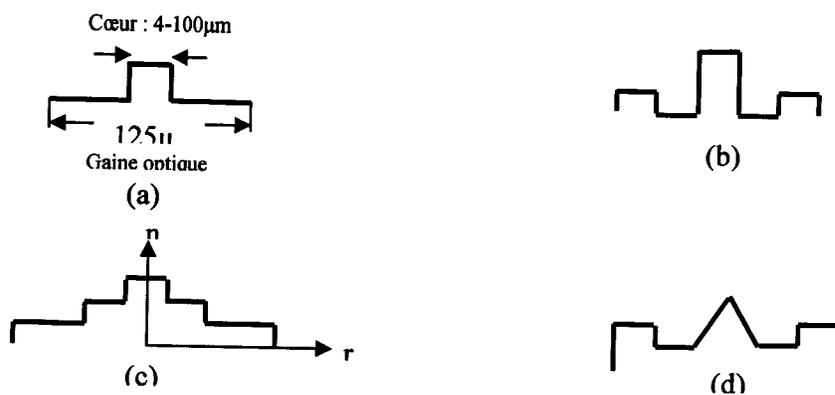


Figure II-9 : Profil d'indice: (a) Fibre à saut d'indice; (b) Fibre W ou à gaine semi-enterrée; (c) Fibre à gaine interne surélevée; (d) Fibre à cœur triangulaire et gaine semi-enterrée [2].

**e. L'atténuation**

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption [2].

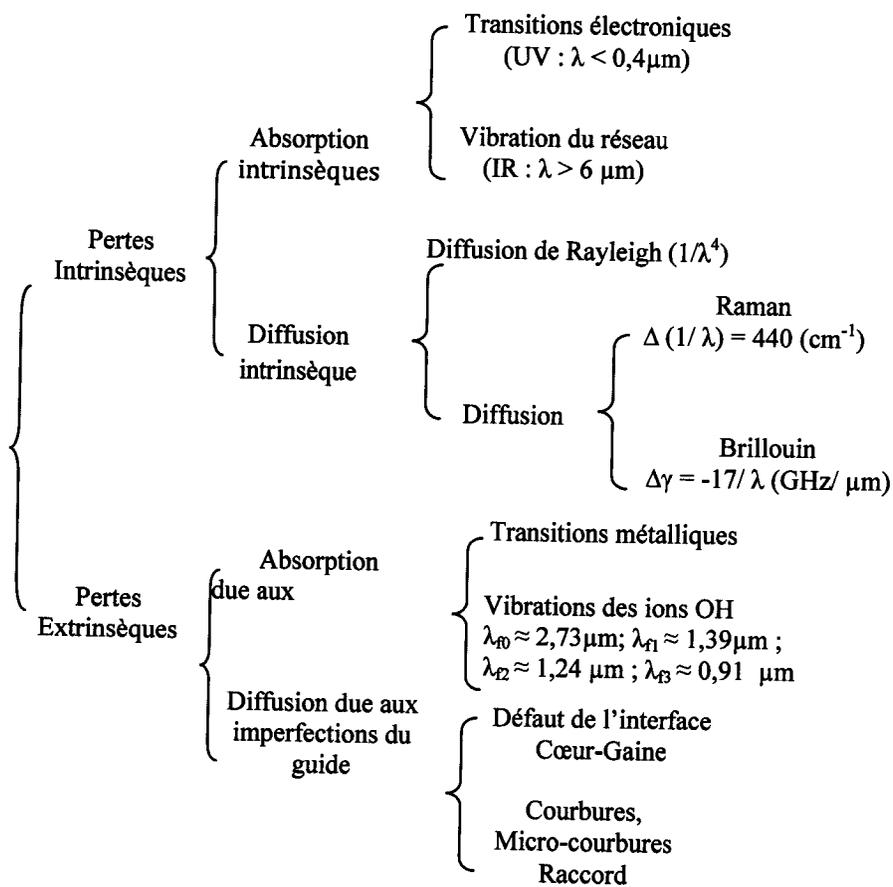


Figure II-10: Représentation en détail les différentes causes d'atténuation irréductibles [2].

De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les micro courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour la fibre standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement [2].

On définit généralement le paramètre  $\alpha$  (dB/Km) comme étant l'atténuation en puissance est donc  $2\alpha$ . La loi de Beer-Lambert reliant la puissance incidente  $P(0)$  à la puissance de sortie  $P(L)$  après un parcours guidé de longueur  $L$  s'écrit [2] :

$$P(L) = P(0) \cdot \exp(-2\alpha L) \tag{II.20}$$

L'atténuation est définie comme dix fois le logarithme décimale du rapport des puissances :

$$A = 10 \log_{10} \left( \frac{P(L)}{P(0)} \right) \tag{II.21}$$

Ainsi, en remplaçant  $P(L)$  par son expression, nous obtenons :

$$A = 10 \log_{10} (\exp(2\alpha L)) = 10(2\alpha L) \log_{10}(e) \rightarrow A/L = 4,34(2\alpha) = \alpha_T \tag{II.22}$$

Cette équation relie  $2\alpha$  et  $\alpha_T$  l'atténuation en puissance dont l'unité est le dB/Km. Celle-ci est bien entendue la somme des différents termes de diffusion :

$$\alpha_T = \alpha_{\text{diffusion}} + \alpha_{\text{absorption}} + \alpha_{\text{courbures}} \tag{II.23}$$

### f. Dispersion des différentes fibres optiques

La capacité d'information d'une fibre est proportionnelle à la largeur de la bande passante. Or lorsqu'une impulsion se propage dans une fibre, elle a toujours tendance à s'élargir en réduisant la bande passante de la fibre. L'élargissement de l'impulsion est composé de façon quadratique de la dispersion modale  $D_{\text{mod}}$  et la dispersion chromatique  $D_{\text{chro}}$  celle dernière étant due aux effets an binés du matériau, de guidage et du profil d'indice].

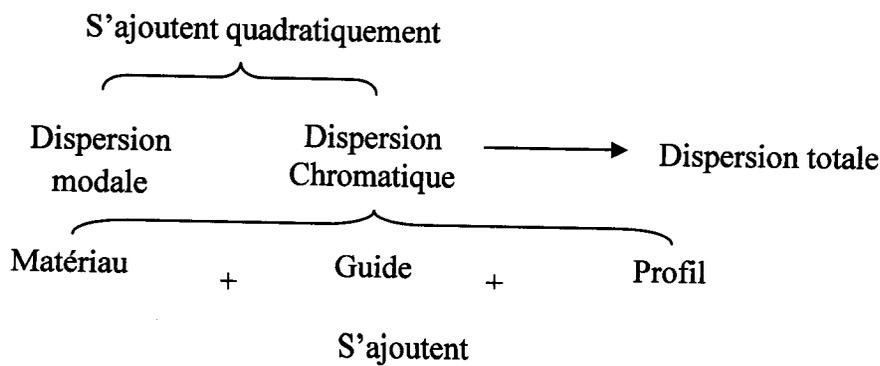


Figure II-11 : Les différentes contributions à la dispersion [2].



❖ **Dispersion modale**

Cette dispersion est due aux écarts entre les temps de propagation de groupe entre les différents rayons compris dans l'ouverture numérique : ces rayons effectuent des chemins optiques de longueurs différents et contribuent à l'élargissement des impulsions. Pour la fibre multimodale où un grand nombre des modes se propage, les vitesses de groupe des modes sont différentes, alors l'impulsion propagée dans cette fibre s'élargit [16].

Par conséquent on observe un effet d'élargissement d'impulsion à la fin de la fibre, effet plus sensible dans le cas d'une fibre à saut d'indice.

Dans une fibre à gradient d'indice, les différences de vitesse sont bien inférieures, ce qui s'obtient en augmentant la vélocité des modes d'ordre supérieur pour compenser la longueur de trajet plus importante.

Ceci conduit à un élargissement d'impulsion moindre, respectivement à une bande passante plus élevée [16].

Expliquons la dispersion modale :

Comparons deux impulsions présente à  $t_0$  à l'extrémité d'une fibre de longueur  $L$ , et d'ouverture numérique  $ON$ . L'une des impulsions se propage suivant l'axe de symétrie de révolution de la fibre (angle nul), tandis que la deuxième arrive avec un angle égal à l'angle limite.

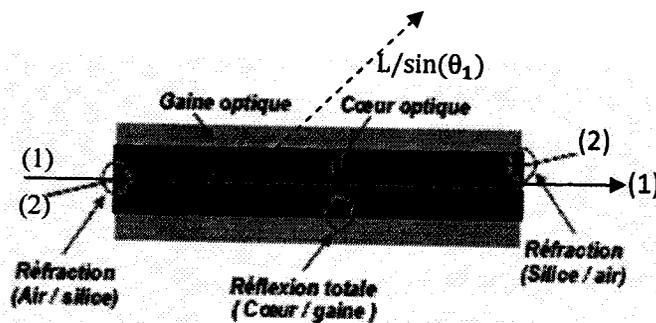


Figure II-12 : Dispersion modale.

Ces deux impulsions vont donc avoir des trajets différents. Celle qui se propage suivant l'axe aura le trajet le plus court (longueur  $L$ , vitesse  $C/n_1$ ). En revanche, l'impulsion caractérisée par un angle  $\theta_{1\text{limite}}$ , se propagera sur une longueur effective [16] :

$$L_{\text{effective}} = L / \sin(\theta_{1\text{limite}}) \tag{II.24}$$

Le retard entre la première impulsion et la dernière est :

$$\Delta t = n_1 \cdot \frac{L_{\text{effective}} - L}{c} \tag{II.25}$$

Soit

$$\Delta t = \frac{n_1}{c} L \left( \frac{1}{\sin \theta_{1\text{limite}}} - 1 \right) \tag{II.26}$$

En remplaçant  $\theta_1$  limite par son expression il vient :

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left( \frac{n_1}{n_2} \right) (n_1 - n_2) \quad (\text{II.27})$$

En réalité quand une impulsion est présente à l'entrée d'une fibre, tous les angles d'incidences compris entre 0 et  $\theta_0$  existent. En sortie de fibre, chaque trajet lumineux caractérisé par un angle différent subit un retard différent compris entre 0 et  $\Delta t$ . L'impulsion de départ se trouve donc élargie de  $\Delta t$  indépendamment de la largeur de son impulsion initial. C'est cet élargissement de l'impulsion qui est désigné par dispersion modale.

Dans une fibre monomode, toute la puissance optique est transportée via un mode unique. Donc les impulsions d'entrée et de sortie auront la même force. On n'observe aucun élargissement d'impulsion. Par conséquent, la dispersion multi mode d'une fibre monomode peut être considérée comme négligeable [16].

#### ❖ Dispersion chromatique (Intermodale)

Dans le verre toutes les longueurs d'ondes n'ont pas la même vitesse de propagation. Tout revient à écrire l'indice de réfraction du verre comme une fonction de la longueur d'onde  $n(\lambda)$ . le retard temporel crée par la dispersion chromatique entre deux signaux séparés en longueur d'onde de  $\Delta\lambda$ , le long d'une fibre de longueur  $L$ , de coefficient de dispersion chromatique est [16] :

$$\Delta t_{\text{chromatique}} = D_{\text{chro}} L \Delta\lambda \quad (\text{II.28})$$

Trois causes contribuent à cet effet, la dispersion matériau est la plus important :

-La dispersion matériau ; usuellement donnée en  $\text{Ps}/(\text{nm} \cdot \text{Km})$  est produite par la dépendance spectrale des indices de réfraction de la fibre associés aux différentes vitesses de propagation.

$$D_{\text{mat}} = \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}) \quad (\text{II.29})$$

La dispersion est donc la dérivée seconde de l'indice de réfraction par rapport à la longueur d'onde ; elle représente la courbure de la fonction  $n(\lambda)$ . Une valeur typique pour cette dispersion est  $80 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{Km})$  à  $850 \text{ nm}$ .

Par chance, la dispersion intrinsèque de la silice s'annule pour  $\lambda = 1273 \text{ nm}$ , longueur d'onde à laquelle le niveau d'atténuation est faible. C'est ce facteur qui a initialement orienté le choix de la seconde fenêtre des transmissions optiques vers  $1,3 \mu\text{m}$ .

-La dispersion due au guidage ;

Plus faible que la précédente est produite par la dépendance spectrale des caractéristiques modales de la fibre. Dans les fibres multi modes cet effet est pratiquement



éliminé par la présence de nombreux modes mais dans les fibres unimodales il peut être expliqué par le fait qu'une partie de l'énergie de l'onde se propage dans la gaine.

Ainsi l'indice de réfraction effectif est une valeur intermédiaire entre celui du cœur et la gaine. Aux grandes longueurs d'ondes la taille du mode est augmentée, produisant une variation de cet indice effectif (même si les indices restent constants).

Ainsi :

$$n_{\text{eff}} = n_2 + b(\lambda)(n_1 - n_2) \quad (\text{II.30})$$

$n_{\text{eff}}$ ,  $n_2$  et  $n_1$  les indices effectifs de la gaine et du cœur.

$$D_{\text{guide}} = \frac{\lambda}{c} (n_1 - n_2) \frac{d^2 b}{d\lambda^2} \quad (\text{ps/Km.nm}) \quad (\text{II.31})$$

-La dispersion du profil ; est due à la dépendance spectrale des indices du cœur et de la gaine. Dans les fibres multi modes à gradient de hautes performances, ce paramètre est fondamental. Dans les fibres unimodales cette dispersion est généralement incluse dans la dispersion du guide.

La dispersion chromatique totale dans une fibre unimodale est la somme algébrique des termes précédents (dispersion matériau et guide). Il se trouve que ces deux termes sont de signes opposés pour les longueurs d'ondes au-delà de  $1,3 \mu\text{m}$  ; il est alors possible en choisissant convenablement les paramètres opto - géométriques du guide de compenser la dispersion du matériau en augmentant volontairement celle liée au guide. La dispersion chromatique globale peut ainsi être pratiquement annulée pour toute longueur d'onde déterminée supérieure à  $1,3 \mu\text{m}$ . C'est ce qui est réalisé lorsque l'on désire faire coïncider ce point de dispersion nulle avec la longueur d'onde d'atténuation minimale des fibres ( $1,55 \mu\text{m}$ ).

### g. Les pertes par transmission

#### ❖ Les pertes de Fresnel

Ces pertes sont dues essentiellement au passage d'un milieu d'indice donné à un autre d'indice différent. Une partie du rayonnement est réfléchi et une autre est transmise ; cette dernière est définie par la transmittance  $T$ . Ces pertes ont pour valeur :

$$\text{Pertes de Fresnel} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{2+n_x+n_y}{4}\right) \quad (\text{II.32})$$

Si deux fibres sont séparées en regard par une lame d'air ( $n_x = 1$ ) et ( $n_y = 1,49$ ) (cœur de la fibre), les pertes de Fresnel sont de  $0,17 \text{ dB}$  mais comme il ya passage fibre / air et air / fibre, alors la perte totale est de  $0,34 \text{ dB}$ . Pour diminuer ces pertes nous utilisons un produit de



couplage à l'interface fibre / diode électroluminescente ou fibre / source d'infra rouge, l'indice de réfraction de ces sources est de 3,6 où une colle EPOXY peut réduire les pertes de 1 dB environ. Si les dimensions de la diode sont inférieures à celles de la fibre, il est recommandable de l'équiper d'une lentille. Dans le cas contraire, il faut déplacer la lentille sur la fibre optique [2].

#### ❖ Les pertes dues aux ouvertures numériques

Les pertes relatives à l'ouverture numérique (O.N) peuvent être négligées lorsque l'ouverture numérique de la partie réceptrice (fibre ou récepteur) est supérieure à celle de la source (fibre ou récepteur) [2] :

$$\text{Pertes}_{(O.N)} = 20 \cdot \log\left(\frac{ON \text{ de la source}}{ON \text{ du récepteur}}\right) \quad (\text{dB}) \quad (\text{II.33})$$

### II-3-3. Propriétés mécaniques et vieillissement des fibres optiques

La fiabilité d'une liaison fibre optique dépend de sa tenue mécanique et de son vieillissement [2].

#### a. Résistances mécaniques

La résistance théorique d'un fil de silice de 125  $\mu\text{m}$  de diamètre est de 25 daN mais les valeurs de résistance couramment obtenues (2 à 5daN) s'expliquent par la présence de fissures superficielles agissant comme concentrateur de contraintes. Les techniques actuelles permettant d'obtenir des répartitions de défauts assez homogènes et tendent à limiter les défauts extrinsèques.

#### b. La fatigue

La fatigue statique du verre, causée par l'humidité ambiante, résulte de la croissance des fissures superficielles quand une charge est appliquée. Cette croissance dépend également de la température et elle s'accélère rapidement quand la température augmente.

### II-3-4. Propagation de la chaleur par conduction [15]

On considère un tube homogène, parfaitement isolé, de longueur L et de section S possédant une masse volumique, une conductivité thermique  $\lambda$  et une chaleur massique  $c_p$  (figure II-13).

Initialement les deux réservoirs de chaleur situés de part et d'autre du dispositif sont à la même température  $T_0$ . Le système est alors en équilibre thermique et l'ensemble est à la température  $T_0$ . A l'instant  $t = 0s$ , le réservoir de température  $R_{v1}$  passe de  $T_0$  à la température  $T_1$  alors que celle de  $R_{v2}$  est inchangée. On se propose de déterminer l'évolution de la température dans le tube en fonction de la distance x et du temps t.



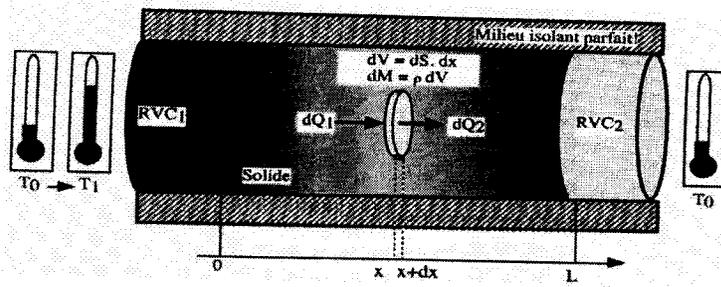


Figure II-13 : Propagation de la chaleur dans le tube.

Prenons en  $x$  un volume élémentaire  $dV$ , de surface  $dS$  et d'épaisseur  $dx$ . La loi de Fourier permet de connaître durant un temps  $dt$ , la quantité de chaleur  $dQ_1$  qui passe en  $x$  et  $dQ_2$  en  $x+dx$  :

$$dQ_1 = -\lambda \cdot \left[ \frac{dT}{dx} \right]_x dS \cdot dt \quad (II.34)$$

$$dQ_2 = -\lambda \cdot \left[ \frac{dT}{dx} \right]_{x+dx} dS \cdot dt \quad (II.35)$$

Sachant que  $dQ_1 > dQ_2$ , la différence de quantité de chaleur entre  $x$  et  $x + dx$ , a été accumulée dans le volume élémentaire  $dV = dS \cdot dx$  considéré. Cet élément de volume a pour masse :  $dM = \rho \cdot dV$ .

Compte-tenu de sa chaleur massique  $c_p$ , on peut écrire :

$$dQ_1 - dQ_2 = dM \cdot c_p \cdot dT \quad (II.36)$$

Soit :

$$dQ_1 - dQ_2 = \rho \cdot dx \cdot dS \cdot c_p \cdot dT \quad (II.37)$$

Dans ces conditions :

$$\frac{\left[ \frac{dT}{dx} \right]_{x+dx} - \left[ \frac{dT}{dx} \right]_x}{dx} = \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \frac{dT}{dt} \quad (II.38)$$

Le terme de gauche représente en fait la dérivée seconde de l'évolution de la température en fonction de la distance  $x$ . La relation devient donc :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \left( \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \right) \frac{dT}{dt} = 0 \quad (II.39)$$

Où :  $\frac{\rho \cdot c_p}{\lambda}$  représente la constante de diffusion thermique  $D_{th}$  (en  $s/m^2$ ) du matériau.

Si on se place en régime permanent, c'est-à-dire :  $\frac{dT}{dt} = 0$ , la relation (II.39) a pour solution :

$$T(x) = \frac{T_0 - T_1}{L} x + T_1 \quad (II.40)$$

La répartition de la température dans le tube en régime permanent est donc linéaire.

❖ Région transitoire

Dans le cas général, la solution de l'équation (II.39) dépend des conditions initiales et sa résolution sort du cadre de mathématiques enseignées en début de première année.

La figure (II-14) représente la solution de l'équation différentielle (II.39) pour un tube de longueur  $L$  de 10 cm, ayant une constante de diffusion thermique  $D_{th} = 0,835 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . La température  $T_0$  de  $RVC_2$  est égale à  $0^\circ\text{C}$  alors que  $RVC_1$  passe de 0 à  $50^\circ\text{C}$  à l'instant  $t = 0$ .

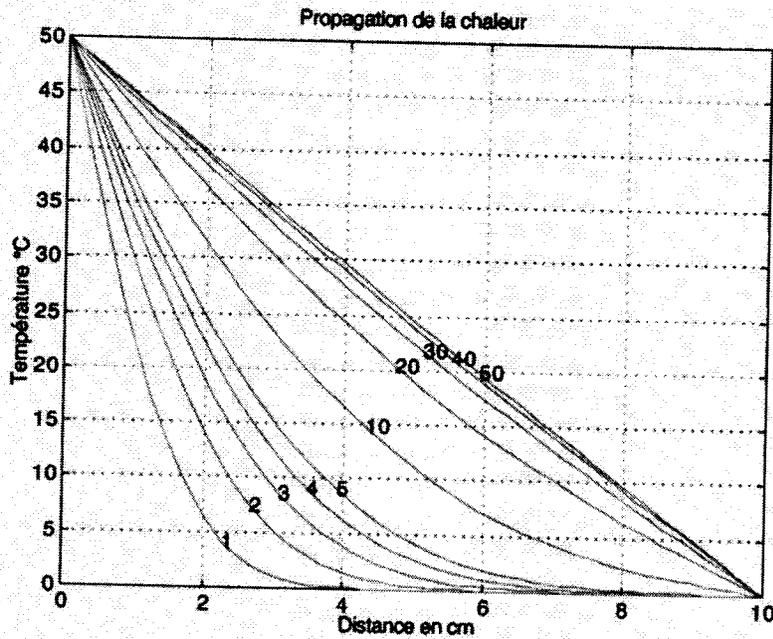


Figure II-14 : l'évolution de la température en fonction de la distance  $x$  et du temps  $t$ .

La figure (II-14) montre que la répartition de la température dans le tube en fonction du temps et de la distance est caractérisée par un régime transitoire de durée 50s. Au-delà, sa répartition devient linéaire.

Autre exemple : on considère en figure (II-15), un tube homogène de longueur  $L = 10$  cm ayant une constante de diffusion thermique :  $D_{th} = 10^{-4} [ ] \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$ . Initialement les deux réservoirs de chaleur sont à la température  $T_0$  de  $30^\circ\text{C}$ .

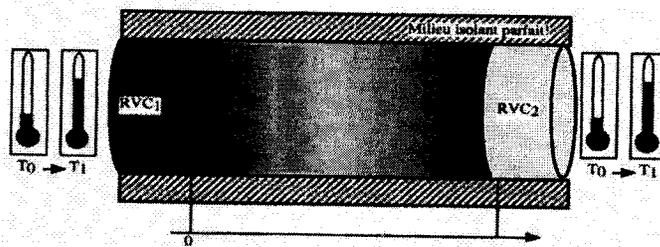


Figure II-15 : Propagation de la chaleur dans le tube.



A l'instant  $t = 0$  s, la température des réservoirs de chaleur RVC prend la valeur  $T_1 = 100^\circ\text{C}$ .

La solution de l'équation (II.39) est telle que :

$$T(x, t) = T_1 + \frac{2}{\pi} (T_1 - T_0) \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} [1 - (-1)^n] \sin(n\pi \frac{x}{L}) \exp(-n^2 \pi^2 D_{th} \frac{t}{L^2}) \quad (II.41)$$

En prenant  $n = 100$ , le graphe de la relation précédente est donné en figure (III-15) qui montre qu'au bout de 300 s, le régime permanent est terminé et que l'ensemble de la barre est à la température  $T_1$  d'équilibre de  $100^\circ\text{C}$ .

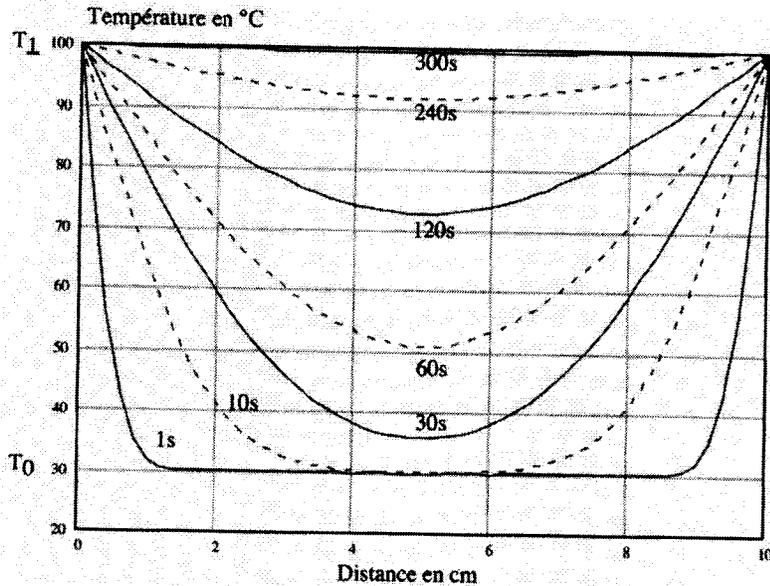


Figure II-16 : l'évolution de la température en fonction de la distance  $x$  et du temps  $t$ .

❖ Puissance de sortie de la fibre

Elle dépend du flux incident à l'instant de la mesure, de la réflectivité du miroir qui n'est jamais parfaite, on peut le rendre beaucoup plus réfléchissant par une évaporation sous vide d'Argent ou d'Aluminium (leurs réflectivité est de 92 % pour Ag et 73 % pour Al).

Les pertes de la fibre (Réflexion vitreuse à l'entrée et à la sortie sont de 3,5 % pour chacune), l'atténuation  $\tau$  du cœur est de  $2.10^{-2}$  dB/m.

Dans l'étude expérimentale faite par J.M.Cariou où il a évalué les effets consécutifs au traitement de surface d'un miroir parabolique en utilisant la fibre optique Q.S.F.1000 d'une longueur de 5m et en essayant de déterminer le réglage permettant d'obtenir la puissance maximale (voir tableau II-3) : [2]

$\theta^\circ$	5	8	10	12	14	16	18	20
Traitement								
Argent								
$P_s$ en Watt	0,28	0,57	0,9	1,22	1,64	2,21	2,59	2,8

Aluminium P <sub>s</sub> en Watt	0,21	0,46	0,71	1,00	1,31	1,71	2,03	2,25
Rapport	1,33	1,24	1,27	1,22	1,25	1,29	1,28	1,25

$$10^{-0,1\bar{\tau} \cdot (15-5)} = 0,955 ; \text{ Avec } \bar{\tau} = 2.10 - 2 \text{ (dB/m)}$$

Fibre	Rapport des Réflectivités							
L=5m P <sub>s</sub> en Watt	0,28	0,57	0,9	1,22	1,64	2,21	2,59	2,8
L=15m P <sub>s</sub> en Watt	0,27	0,54	0,84	1,13	1,50	2,00	2,30	2,42
Rapport	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,89	0,87

QSF1000 P <sub>s</sub> en Watt	0,28	0,57	0,9	1,22	1,64	2,21	2,59	2,8	
QSF600 P <sub>s</sub> en Watt	0,13	0,29	0,43	0,58	0,76	0,95	1,1	1,17	
Rapport	EXP	48,2	49,1	47,8	47,5	46,3	43,0	42,5	41,8
	THE	48,5	48,2	48	47,7	47,3	46,9	46,5	46,0

Tableau II.3 : La puissance de sortie de la fibre et les différents facteurs réduisant le rendement.

Quelque soit l'angle  $\theta$  du concentrateur, le rapport des puissances mesurées est compatible avec celui des coefficients de réflectivité ; le miroir idéal est à base d'Argent.

Dans le tableau ci-dessus, nous remarquons l'influence de la longueur de la fibre. Les résultats obtenus montrent une perte importante de puissance vis à vis aux grandes longueurs et ouvertures de la fibre.

Si on se limite aux conditions suivantes,  $\theta = 18^\circ$  et  $l < 15m$ , un miroir de bonne qualité permet d'obtenir un rendement toujours supérieur à 75 %. Cette valeur reste comparable devant celle de la théorie en tenant compte de toutes les atténuations suivantes : [2]

- Pertes du Miroir 8 % ( $\rho_M=92$  %).
- Pertes par Réflexion sur les extrémités de la fibre 2 (3,5) % ( $\rho_F=93$  %).
- Pertes en Lignes 10 % ( $\rho_l=90$  %).
- Pertes Interface Fibre - Concentrateur 0 % ( $\eta=1$ ).



La densité de puissance à l'entrée de la fibre QSF 1000 caractérisée par une longueur de 5m est égale à  $3340 \text{ kW/m}^2$  alors que la concentration  $C=3340$ . Par contre avec la fibre QSF 600, on ne peut avoir que 50 % de la puissance captée par le miroir, mais il faut s'attendre à une augmentation de la concentration C, pour une même longueur  $C=3890$ , soit un gain en concentration de 17 %.

### II-3-5. Domaine d'application

Les fibres optiques ont trouvée des débouchés dans un grand nombre de secteur (télécommunication, transport de l'énergie lumineuse, médicale, militaire, etc.).

#### a. Télécommunication

A présent, presque toutes les télécommunications sont transmises par ce moyen plutôt que par les câbles de cuivre. La transmission du signal à travers un câble métallique conducteur est électronique (i.e. par les électrons), alors qu'en utilisant les fibres optiques transparentes, la transmission du signal est photonique, c'est à dire par le biais de photons de radiations électromagnétiques [13].

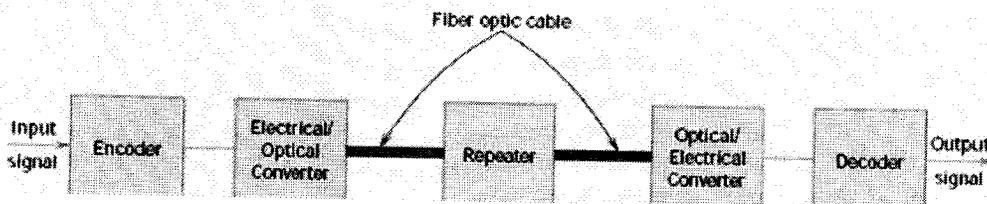


Figure II-17 : système général de transmission par la fibre optique.

#### b. Transport de l'énergie lumineuse

-Transmission et transport de lumineuse d'un espace limité vers un espace non limité : par exemple les lampes décoratives constituées de fibres optiques diffusant de la lumière d'une ampoule située à l'extrémité inférieure des fibres.

-Transmission et transport de lumière d'un espace non limité vers un espace limité : Utilisés seuls, ils peuvent permettre d'éclairer un objet un appareil, etc., alors qu'il n'est pas possible de placer la source lumineuse sur le lieu de l'emploi pour des raisons d'exiguïté ou de sécurité. Pour examiner de petits objets d'habitude inaccessibles.

-Transmettre de la lumière invisible d'un espace non limité vers un autre espace non limité : Dans les télécommunications on code les ondes acoustiques de la parole sous forme d'impulsion lumineuses et on les envoie dans des fibres optiques.

-Multiplier une source unique : On peut en ramifiant un faisceau à l'une de ses extrémités, éclairer à l'aide d'une seule source plusieurs appareils, comme pour un tableau de bord.

Concentrer ou transformer une source lumineuse : Avec un système optique approprié, le flux lumineux d'une source de grande surface pourra être condensée sur l'entrée d'un conducteur permettant ainsi de disposer à la sortie d'une intense en un lieu éloigné de la source d'origine. De tels conducteurs permettent de capter des signaux lumineux à distance et aussi de transformer la forme du signal capté : c'est ainsi qu'un signal provenant d'une fente lumineuse pourra être recueilli à l'autre extrémité du conducteur sous forme circulaire et inversement ; d'autres anamorphes sont naturellement possibles [2].

-Codage et décodage d'image : il suffit de prendre un conducteur d'image dont les deux extrémités se correspondent point par point, d'en mêler les fibres dans la partie médiane du faisceau, de les bloquer et de faire une section dans cette zone. Les deux nouvelles surfaces se correspondront point par point mais sans aucune correspondance avec les extrémités d'origine du conducteur, l'un étant le codeur, l'autre le décodeur. Si l'on forme à l'entrée côté ordonné du codeur une image, elle sera à la sortie totalement désordonnée. Pour la rendre en clair, il faudra la décrypter grâce au décodeur convenablement orienté [2].

### c . Application divers

Elles sont nombreuses et les plus connues concernent :

1-La médecine, où la fibre optique est notamment utilisée :

- Filmer des endroits sensibles ou inaccessibles de corps humain, de fait de la réalisation de la caméra et de câble de très petites taille.
- En chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de: pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine ...

### II-3-6. Les avantages d'utilisation des fibres optiques

Ils sont nombreux, on peut les classer comme suit :

- ❖ **Très faible atténuation** [20]
  - L'atténuation du signal est inférieure à celle d'un conducteur électrique et les distances couvertes sans nécessité d'installer des amplificateurs sont bien plus grandes.
  - Très grande bande utilisable : La bande passante est généralement bien supérieure à celle que l'on peut obtenir avec un câble électrique.
  - Multiplexage possible : Peut-on passer plusieurs informations différentes dans la même fibre et les récupérer à l'autre bout intact.
- ❖ **Avantages de mise en œuvre** : très petite taille, grande souplesse, faible poids appréciable aussi bien en télécommunication que pour le câblage en informatique, aéronautique, application industriel.



- ❖ **Sécurité électrique** : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de fortes tensions.
- ❖ **Sécurité électromagnétique** : la fibre optique est totalement insensible aux rayonnements électromagnétiques dans lesquels nous baignons.
- ❖ **Avantage économique** : Moindre coût, en comparaison des autres supports.

### III. Systèmes solaires à concentration

Deux concepts ont été développés en plus ou moins commercialisés : Les systèmes à récepteurs central et les systèmes à collecteurs distribués (Cylindro-parabolique et parabolique). En fonction du niveau de température de la chaleur, l'énergie solaire à concentration peut être utilisée pour faire fonctionner des centrales à vapeur, des turbines à gaz,...

#### III-1. Système à récepteur central

Un champ circulaire de miroirs concentre les rayons solaires sur un capteur localisé au sommet d'une tour. Afin de chauffer un fluide caloporteur (air, eau, sels fondus, sodium,...) qui permet de transporter la chaleur vers le système de production d'électricité. Des températures très élevées dépassant 1000 °C peuvent être atteintes, ce qui permet la réalisation d'un cycle combiné avec une grande performance [22].

C'est par exemple dans la filière du solaire thermodynamique, la centrale solaire à miroir de Fresnel pourrait néanmoins devenir plus compétitive que les systèmes à collecteurs distribués.

Ce central est inventé par le physicien français Augustin Fresnel, la lentille de Fresnel a été conçue pour équiper le système optique des phares de signalisation marine.

Le système est aujourd'hui repris à grande échelle pour concentrer le rayonnement solaire sur un tube horizontal [ ].

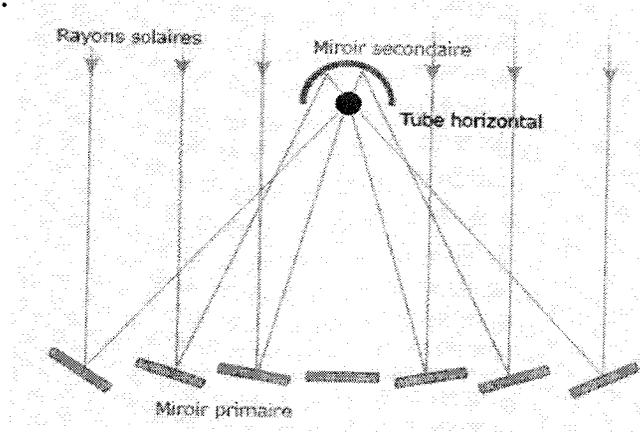


Figure II-18 : Principe de fonctionnement d'un concentrateur à miroirs de Fresnel [14].

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "réflecteurs compacts linéaires". Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur. Un fluide caloporteur est chauffée jusqu'à  $500^{\circ}$  en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité [14].

### III-2. Systèmes à collecteurs distribués

#### a. Le concentrateur cylindro – parabolique

Les miroirs cylindro – paraboliques (en forme d'auge) concentrent les rayons solaires sur l'axe focal, sur lequel se trouve le tube absorbeur [23].

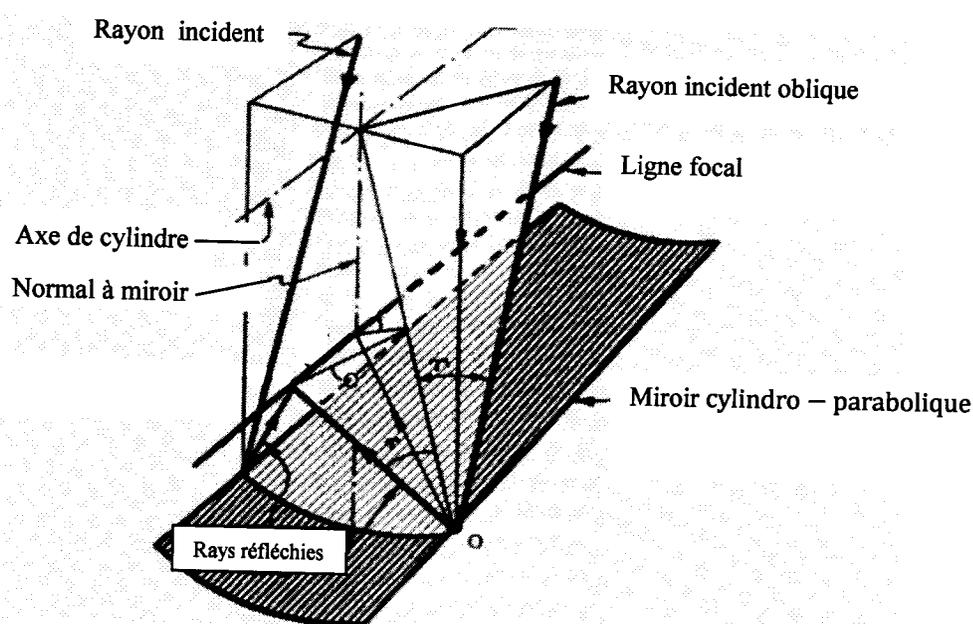


Figure II-19 : Schéma d'un collecteur à concentrateur cylindro – parabolique.

L'élément le plus important dans ces systèmes est le tube absorbeur, à l'intérieur duquel circule le fluide caloporteur. Le tube absorbeur est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, est entouré d'une enveloppe transparente en verre, il est placé le long de la ligne focale du concentrateur cylindro- parabolique [23].

Les températures atteintes sont de l'ordre de  $400^{\circ}\text{C}$ , L'énergie solaire incidente absorbée, n'est pas entièrement transmise au fluide caloporteur, une partie est dissipée sous forme de pertes thermiques entre l'absorbeur et la vitre. En prenant en considération les différentes parts d'énergies, celle recueillie par le fluide et perdue vers l'ambiance telle qu'elle est montrée par la figure suivante [23].

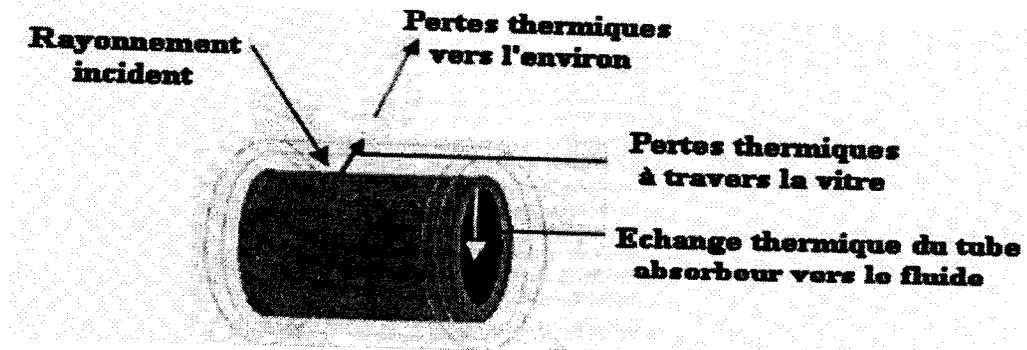


Figure II-20 : Schématisation des échanges thermiques entre les différents Éléments du collecteur cylindro – parabolique [23].

Pour être efficace, ces concentrateurs doivent se déplacer pour suivre la course apparente du soleil avec deux orientations possibles [23] :

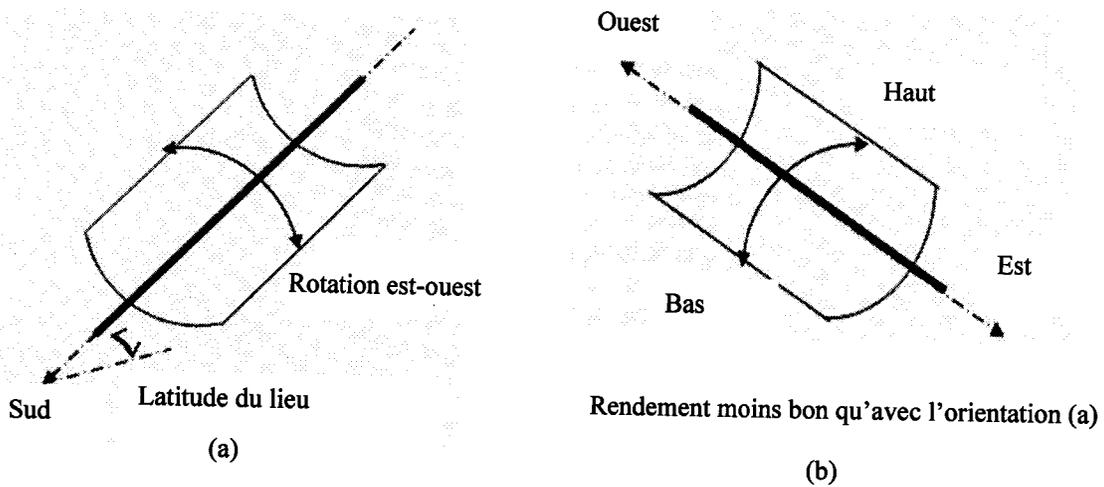


Figure II-21 : L'orientation d'un concentrateur cylindro – parabolique.

(a) : Orientation axe rotation terrestre  
 Tube récepteur // axe rotation Terre.  
 Suivi solaire Est-Ouest.

(b) : Orientation est – Ouest  
 Tube récepteur // axe est - ouest.  
 Suivi solaire haut/bas 2-3 fois/jour.

**b. Le concentrateur parabolique**

Le capteur solaire parabolique est un miroir qui réfléchit les rayons du soleil sur un point de convergence (récepteur), comme il est représenté par la figure suivante [23] :



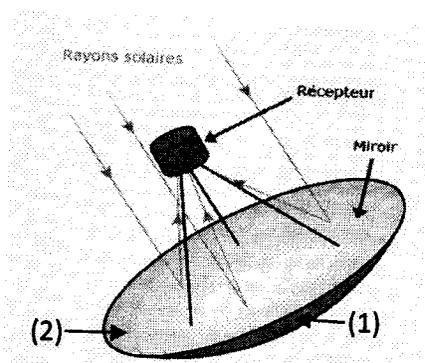


Figure II-22 : Principe de fonctionnement d'un concentrateur parabolique.

Le miroir parabolique se compose de deux parties [24] :

(1) : Le support annulaire; est l'ensemble des alliages d'aluminium, ce qui lui assure une bonne résistance aux intempéries de même de bonne qualité mécanique en plus d'une légèreté.

(2) : Le réflecteur et la couverture transparente; sont constitués d'une feuille de plastique de 0,1mm d'épaisseur possédant de bonne qualité : optiques et mécaniques.

Cependant, pour le réflecteur : la feuille de calcul le constituant, est recouverte d'un revêtement d'argenture, la feuille de plastique est fluoro - polymérique, sa grande inertie chimique lui assure une longévité accrue de même que la constante pour ses qualités mécaniques et optiques.

Après 5 ans d'utilisation et d'expérimentation à l'extérieur, les caractéristiques mécaniques et optiques du film plastique reste sensiblement inchangée.

Après 10 ans d'utilisation intensive, les qualités mécaniques et optiques se dégradent d'environ 5% [23]. La géométrie essentielle du ce miroir elle est montrée par la figure au dessous :

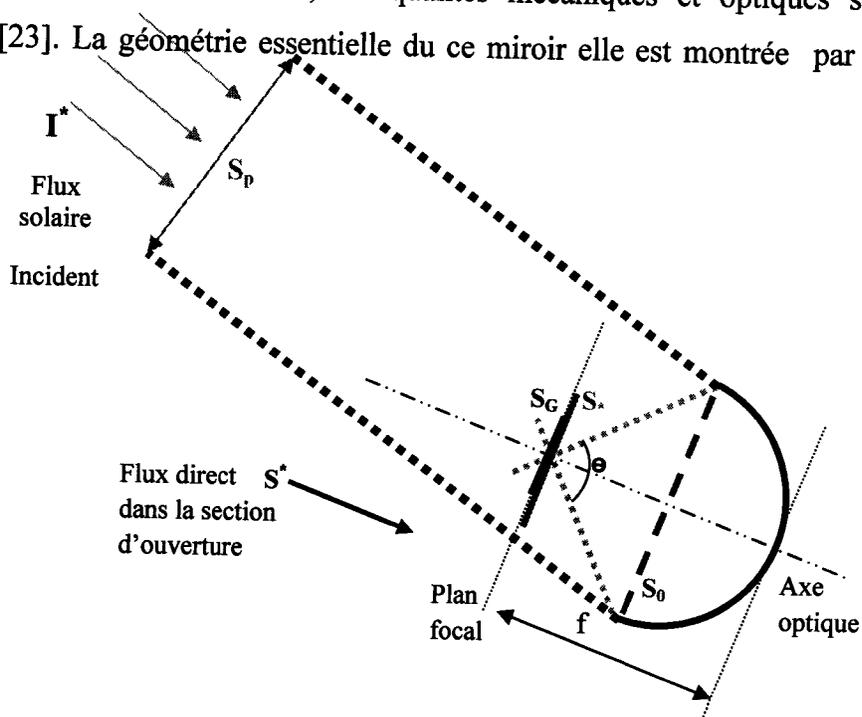


Figure II-23 : Grandeurs caractéristiques du concentrateur parabolique.

Avec

- $S_0$  : Section d'ouverture
- $S_p$  : Section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur  
 $S_p = S_0$  si  $I^*$  est // à l'axe optique
- $S_G$  : surface de Gauss image du soleil au plan focal par les rayons proches de l'axe optique (par axiaux)
- $S_*$  : surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal
- $\theta$  : angle d'ouverture du concentrateur (angle dont on voit le concentrateur du plan focal).
- $f$  : distance focale

Les systèmes concentrateurs à miroirs paraboliques peuvent de deux types [24] :

a) : Réception indirecte aux moyens de miroirs plans orienteurs mobiles renvoyant les rayons solaires sur un paraboloïde fixe.

b) : Réception direct sur le paraboloïde fixe ou mobile constamment dirigé vers le soleil.

Bien que la réception directe sur un paraboloïde mobile, comporte une seule réflexion, elle a l'inconvénient de donner un foyer mobile dans l'espace, ce qui entraîne de sérieux problèmes pratiques d'utilisation.

Pour de moyennes concentrations, le deuxième type de réception (paraboloïde fixe) fera objet de notre travail, nous avons choisi de mettre la technologie de la production de l'énergie thermique par un concentrateur solaire couplé à une seule fibre optique solaire multimodale à saut d'indice.

#### IV. Conclusion

L'énergie solaire concentrée peut être transportée avec des conducteurs de lumière, cette technique s'avère très prometteuse quant aux applications thermiques. Elle devrait permettre une utilisation de l'énergie solaire concentrée avec des rendements de puissance qui peuvent dépasser les 50 % (Températures atteintes à 1500 et 3000°C).



## **Chapitre III :**

# **Les capteurs solaires photo-thermiques**



## I. Introduction

La technologie solaire thermique représente deux techniques distinctes pour la collection de l'énergie solaire, les capteurs solaires et les systèmes solaires à concentration.

Un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite que la surface d'ouverture du collecteur, afin d'augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur. Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et de sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. La figure suivante montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l'énergie solaire [23].

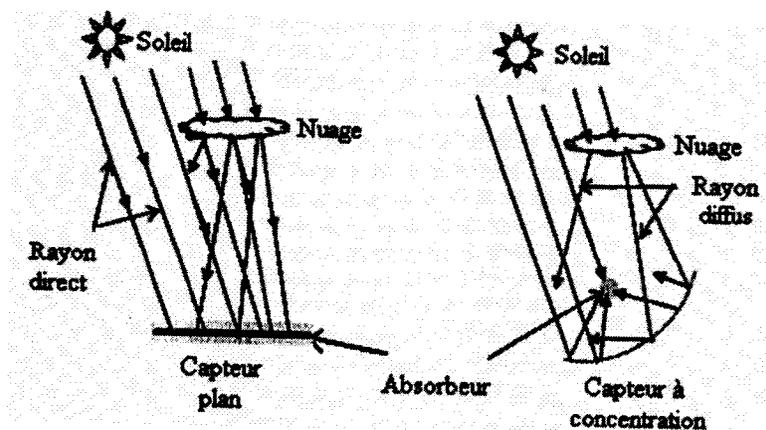


Figure III-1 : Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire [23].

## II. Le capteur solaire plan

### II-1. Définition

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 toute les sources usuelles de chaleur, c'est-à-dire pour chauffer les locaux industriels ou les logements, fournir l'eau chaude sanitaire, activer les croissances des végétaux, sécher les grains et les fourrage, 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 [11].



Ces capteurs sont d'un principe très simple et se composent : [11]

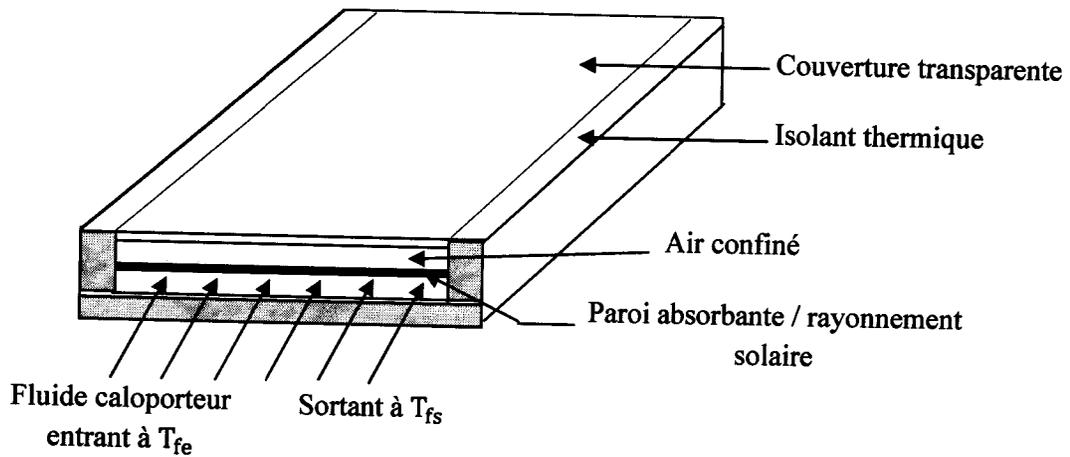


Figure III-2 : Composantes d'un capteur solaire.

1. Une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre.
2. Un isolant thermique (dos et côtés non exposés).
3. La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide caloporteur (fluide de travail) qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur.

## II-2. Classification des capteurs solaires plans

On peut classer les capteurs solaires d'après le fluide de travail utilisé. L'air constitue une classe de ces fluides et l'eau une autre. Naturellement, il en existe d'autres. On utilise par exemple des hydrocarbures ou des hydrocarbures halogénés, en particulier pour la réfrigération et la génération d'électricité, et l'eau peut contenir un antigel comme l'éthylène-glycol. Mais le capteur de chaleur solaire à air s'adapte typiquement aux appareils de chauffage à air alors que le capteur de chaleur solaire à eau s'adapte plutôt aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage.

Si l'on classe les fluides de transfert de chaleur par niveau de performance technique, on trouve en tête les fluides possédant une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et un produit chaleur massique-masse volumique élevé. D'après ce classement, l'air est le moins efficace, l'eau est moyenne et les métaux liquides les mieux placés. Il n'existe actuellement aucun capteur solaire à métal liquide, mais il en existe quelques uns fonctionnant à l'air, car d'autres facteurs, comme un bas point de congélation, une bonne inertie chimique, une bonne durabilité et sécurité d'emploi, ainsi qu'un bas prix, entrent en jeu. Si la fonction de l'appareil

est de fournir de l'air chaud pour le séchage ou le chauffage de locaux, la nature non corrosive de l'air permet d'utiliser des matériaux peu coûteux et de ne pas craindre de fuites intempestives des circuits. Bien sur, si le but est d'obtenir de l'eau chaude, l'eau elle-même ou un mélange d'eau et d'antigel sera utilisé dans un appareil en cuivre ou autre matériau résistant à la corrosion [25].

On trouvera dans les deux tableaux au dessous les valeurs de la masse volumique  $\rho$ , la chaleur massique  $c_p$ , la conductivité thermique  $\lambda$ , le coefficient de la viscosité  $\mu$  et le nombre de Prandtl pour l'air et de l'eau à différentes températures  $\theta$  (en °C) :

Propriétés de l'eau à saturation					
$\theta$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg. °C)	$\lambda$ (W/m. °C)	$10^4 \cdot \mu$ (Pa. s)	Pr
0	1002	4218	0.552	17.90	13.06
20	1001	4182	0.597	10.10	7.02
60	985	4185	0.651	4.71	3.02
100	960	4216	0.680	2.82	1.74
140	928	4283	0.684	1.99	1.24
180	889	4417	0.675	1.54	1.00
220	842	4610	0.652	1.26	0.89
260	786	4949	0.611	1.08	0.87
300	714	5728	0.540	0.96	1.02

Tableau III-1 : Propriétés physique de l'eau à saturation [11].

Où :

- $\rho = -0,00380 \cdot \theta^2 - 0,0505 \cdot \theta + 1002,6$  (kg/m<sup>3</sup>).
- $c_p = 4180$  (J/kg. °C).
- $\lambda = -9,87 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2 + 2,238 \cdot 10^{-3} \cdot \theta + 0,5536$  (W/m. °C).
- $\mu = 10^{-4}(0,00200 \cdot \theta^2 - 0,3389 \cdot \theta + 17,199)$  (Pa. s).
- $Pr = 1,577 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 - 0,261 \cdot \theta + 12,501$

Propriétés de l'air à 1 atm					
$\theta$ (°C)	$\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg. °C)	$\lambda$ (W/m. °C)	$10^5 \cdot \mu$ (Pa. s)	Pr
0	1.292	1006	0.242	1.72	0.72
20	1.204	1006	0.0257	1.81	0.71
60	1.059	1008	0.0287	1.99	0.70
100	0.946	1012	0.0318	2.18	0.69
140	0.854	1016	0.0345	2.34	0.69
180	0.779	1002	0.0372	2.50	0.69
220	0.700	1028	0.0399	2.64	0.68
260	0.662	1036	0.0425	2.79	0.68
300	0.616	1045	0.0450	2.93	0.68

Tableau III-2 : Propriétés physique de l'air à 1 atm [11].

Où :

- $\rho = \frac{353}{(\theta+273)} \text{ (kg/ m}^3\text{)}.$
- $c_p = 1008 \text{ (J/kg. °C)}.$
- $\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \cdot \theta + 0,0242 \text{ (W/p. °C)}.$
- $\mu = 10^{-5} (0,0046 \cdot \theta + 1.7176) \text{ (Pa. s)}.$
- $Pr = -2,54 \cdot 10^{-4} \cdot \theta + 0,7147$



### II-2-1. Capteurs solaire à eau

On peut distinguer deux types de systèmes : les systèmes à basse pression de circulation et les systèmes à haute pression de circulation [25].

On emploie les systèmes à basse pression pour le chauffage des piscines, le chauffage d'eau industrielle dans les cas de systèmes à recirculation ou lorsque l'emploi d'une pompe de remise en pression ne pose pas de problèmes, et pour l'eau chaude sanitaire ou, de chauffage dans les foyers domestiques de certaines régions du monde. Dans les systèmes à basse pression, il suffit d'un film plastique mince comme réservoir pour l'eau. Le plastique doit cependant être suffisamment épais pour supporter les conditions atmosphériques, sans l'être trop car c'est un très mauvais conducteur thermique. La figure (III-3) illustre un capteur solaire très simple à eau chaude [25].

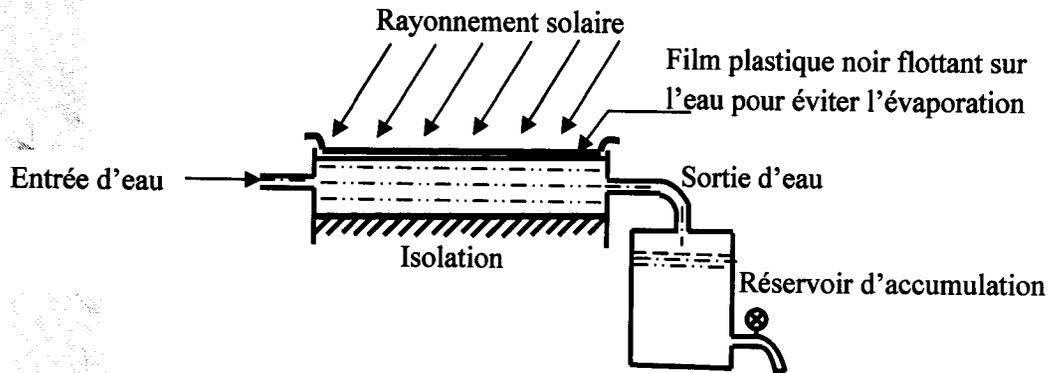


Figure III-3 : Chauffe - eau solaire simple sans pression [25].

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

La figure (III-4) montre un collecteur solaire à eau chaude à haute pression. Ces ailettes sont normalement en acier, en aluminium ou en cuivre, et ont une épaisseur de l'ordre de 0,25 mm pour le cuivre ; 0,5 mm pour l'aluminium et 2,0 mm pour l'acier, à cause des différences de conductivité thermique. L'espacement entre les tubes dépend de l'épaisseur des ailettes, ce qui l'on montrera plus loin dans l'étude détaillée [25].

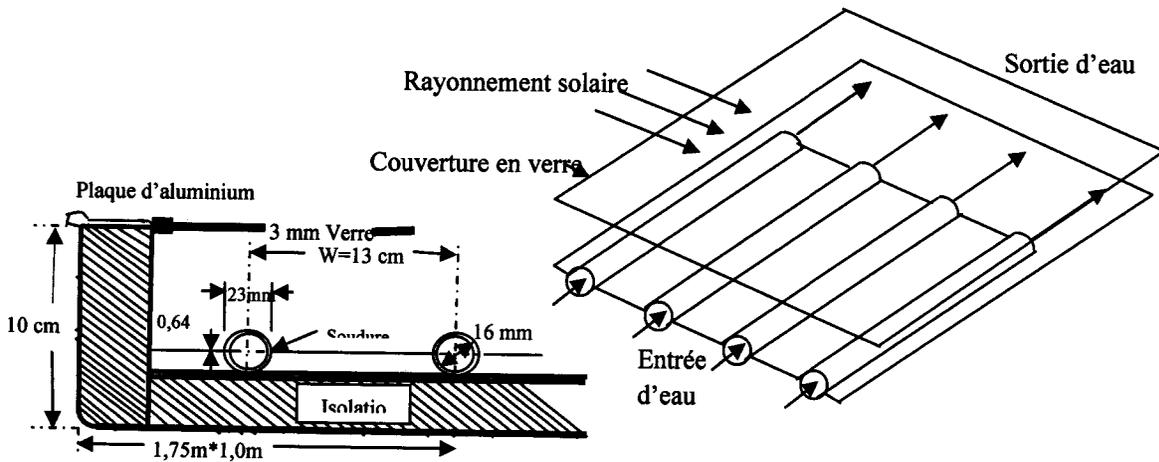


Figure III-4 : Capteur solaire à eau chaude à haute pression [25]

### II-2-2. Capteurs solaire à air

Les capteurs à air très simple sont constitués d'une couche absorbante à dos isolé, refroidie par un courant d'air circulant entre l'absorbeur et un couvercle de verre. Si l'on utilise un absorbeur non sélectif, c'est-à-dire, comme on l'expliquera plus loin, possédant une émissivité élevée et une forte capacité d'absorption, l'absorbeur est ainsi couplé à la paroi interne du couvercle de verre par le rayonnement thermique. Le couvercle de verre joue alors aussi le rôle de surface de transfert. Ce moyen simple d'augmenter la surface de transfert thermique souffre néanmoins du fait que le couvercle de verre ne permet pas facilement d'éviter des pertes de chaleur [25].

Si l'on veut utiliser le vitrage comme une garde pour réduire les pertes de chaleur, il faut que le transfert de chaleur ait lieu entre le dos de l'absorbeur et l'air. L'absorbeur constitue alors la paroi frontale du canal d'air et le revêtement intérieur de l'isolation constitue le fond du canal [25].

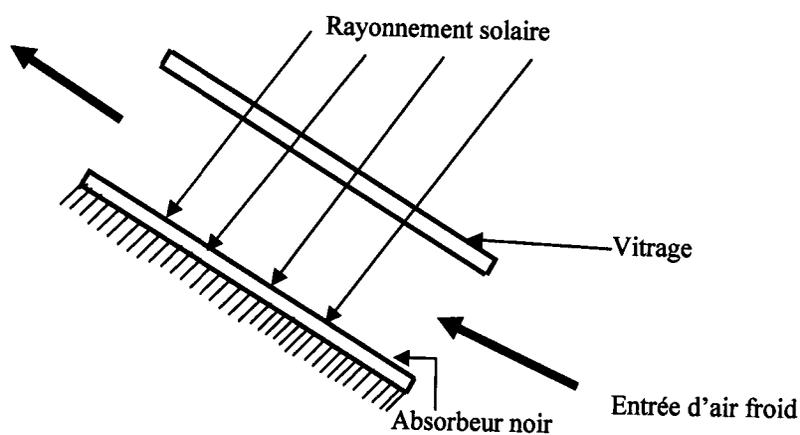


Figure III-5 : Capteur à air simple [25].

On peut augmenter la surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur et à la face interne de l'isolation, soit en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée (figure III-6) on double par exemple la surface d'échange de chaleur et la protection de la surface absorbante en utilisant un absorbeur strie de rainures en "V" avec un angle de 60°. Le rainurage du fond du canal améliore encore l'échange de chaleur, la valeur de cette amélioration dépendant du coefficient de transfert de chaleur par convection dans le canal [25].

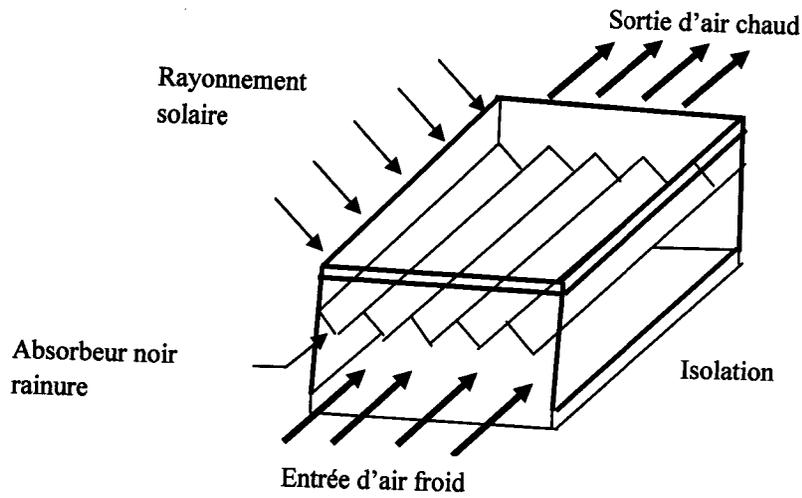


Figure III-6 : Capteur à absorbeur rainuré [25].

Une autre méthode d'amélioration du rapport surface d'échange sur projection de la surface d'absorbeur consiste à utiliser un absorbeur poreux. On peut employer à cet effet du tissu noir, de la fibre de verre assemblage de lamelles.

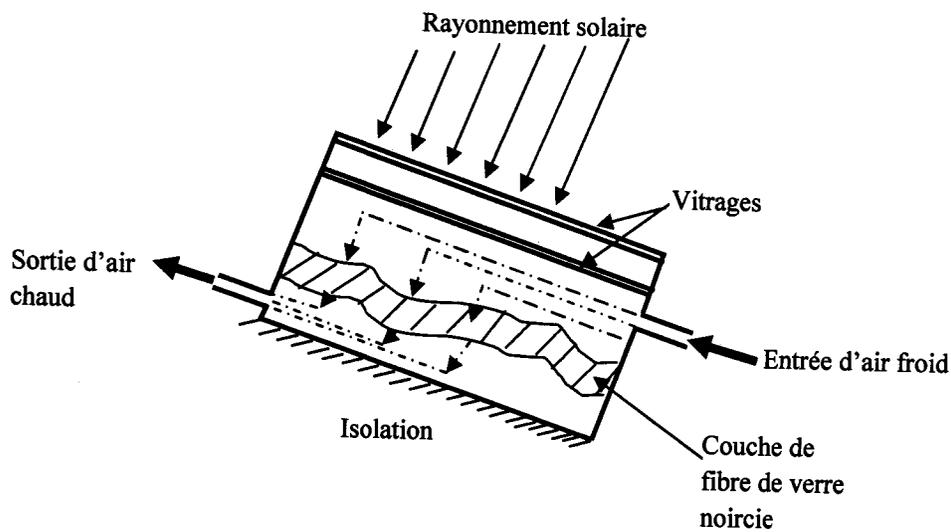


Figure III-7 : Capteur à absorbeur poreux [25].

### II-3. Inclinaison optimale d'un capteur solaire plan

Les capteurs solaires peuvent être fixes ou à poursuite. Le capteur fixe peut ne pas bouger pendant la journée, ce qui est le cas des chauffe-eau solaires à usage domestique. Dans l'hémisphère nord, ils font face au sud et font avec l'horizontale un angle égal à la latitude pour optimiser la collecte moyenne de rayonnement sur l'année ou la collecte de printemps et d'automne.

En augmentant l'angle jusqu'à obtenir une orientation verticale, on améliore la collecte en hiver et en diminuant cet angle jusqu'à l'horizontale, on favorise la collecte en été.

Les capteurs fixes possèdent les avantages de simplicité d'une construction (toi ou mur). Leur investissement n'est alors pas complètement à imputer à la captation. La contrepartie est 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 protégée 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 élevée, il est nécessaire que le capteur ou certains de ses composants suive le déplacement du soleil avec précision [23].

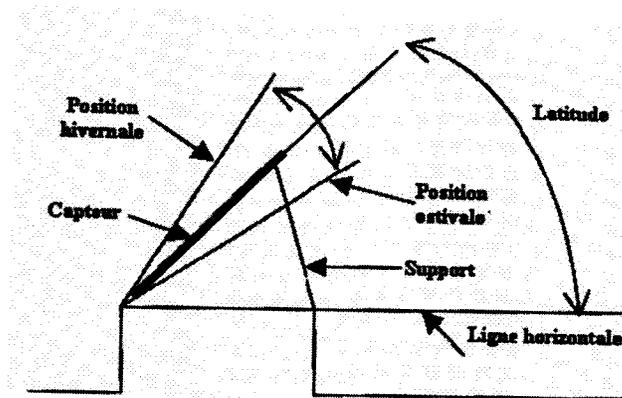


Figure III-8 : Installation d'un capteur solaire.

#### II-4. Bilan thermique global de la paroi absorbante

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit : [11]

$$\Phi_{sa} = \Phi_p + \Phi_u + \Phi_{st} \quad (W) \quad (III.1)$$

Où :

- $\Phi_{sa}$  : Flux solaire absorbé
- $\Phi_p$  : Flux perdu par la paroi absorbante
- $\Phi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur
- $\Phi_{st}$  : Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\Phi_{st} = M_e C_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (III.2)$$

Où :

- $M_e$  : Masse en eau du capteur définie par :  $\sum m_i \cdot c_i = M_e \cdot c_{eau}$ ,  $i$  : représentant les différents éléments constitutifs du capteur.
- $T$  : Température moyenne du capteur (K).
- $t$  : Temps (s).
- $c_{eau}$  : Capacité calorifique de l'eau (J/kg K).

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\Phi_{sa} \approx \tau_{cs} \alpha_{ps} G_{(i,\gamma)}^* S \quad (III.3)$$

Où :

- $\Phi_{sa}$  : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)
- $G_{(i,\gamma)}^*$  : Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ( $W m^{-2}$ )
- $\alpha_{ps}$  : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.
- $\tau_{cs}$  : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire
- $S$  : Surface de la paroi absorbante ( $m^2$ ).

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

$$\Phi_u = q_{cf}(T_{fs} - T_{fe}) \quad (III.4)$$

Où :

- $q_{cf}$  : Débit calorifique du fluide caloporteur ( $W \cdot K^{-1}$ ) = débit massique multiplié par capacités calorifique.
- $T_{fe}$  : Température d'entrée du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur (K).
- $T_{fs}$  : Température de sortie du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur (K).

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\Phi_p = h_p(T_{pm} - T_a)S \quad (III.5)$$

Où :

- $h_p$  : Coefficient global de pertes du capteur ( $WK^{-1}m^{-2}$ ).
- $T_{pm}$  : Température moyenne de la paroi absorbante (K).
- $T_a$  : Température de l'air extérieur (K).



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

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \quad (\text{K}) \quad (\text{III.6})$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température  $\Delta T$  existant entre le fluide et la paroi absorbante.

### II-5. Transfert de chaleur par conduction à l'intérieur de la paroi absorbante en régime permanent

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

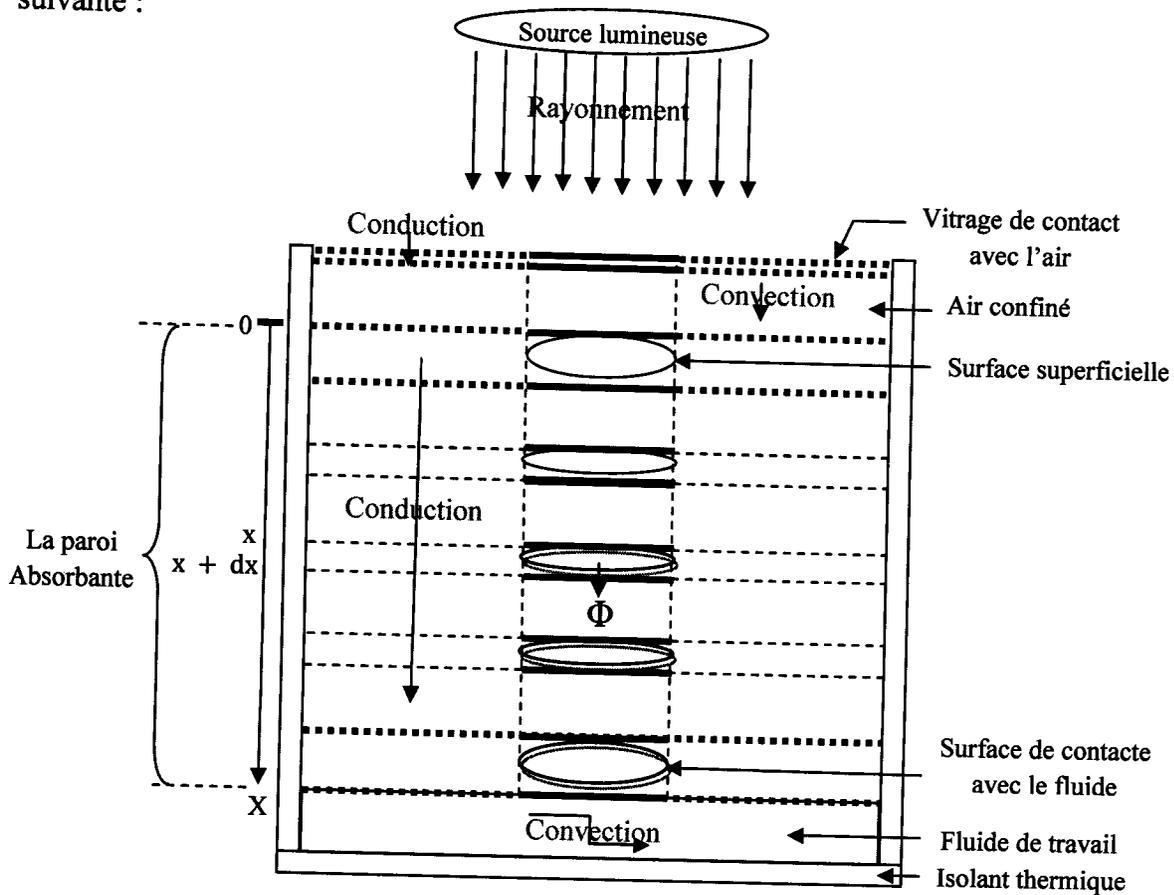


Figure III-9 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan [15].

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. Elle est produite par les mouvements des molécules, des atomes ou des électrons. L'effet macroscopique observable est une égalisation de la température du système. Cependant si

certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (réservoir de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide [15].

### II-5-1. Loi de Fourier

Fourier apparente la conduction de chaleur à l'écoulement d'un fluide qui a lieu des régions chaudes vers les régions froides et dont les seules manifestations dans la matière se traduisent par des variations de températures (effet macroscopique). Les dilatations des dispositifs seront négligées.

Considérons un milieu cylindrique homogène de section  $S$  et de longueur  $L$  (figure III-10). Les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température  $T_2$  (source chaude) et  $T_1$  (source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaude vers la source froide. Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière uniforme [15].

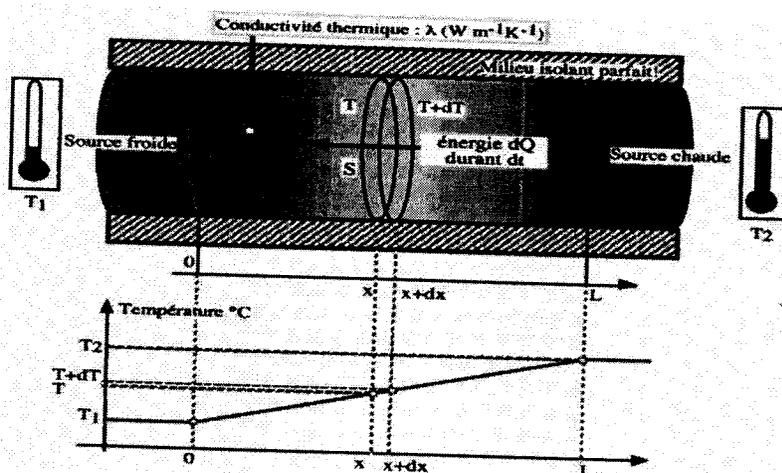


Figure III-10 : Principe de transfert de chaleur par conduction [15].

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleur élémentaire  $dQ$  qui traverse en  $x$  une surface  $S$  d'épaisseur  $dx$  durant le temps  $dt$  :

$$dQ = -\lambda \cdot S \frac{dT}{dx} \cdot dt \quad (\text{III.7})$$

Où :

- $dQ$  : Energie élémentaire en (Joule).
- $\lambda$  : Conductivité thermique du matériau en  $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ .
- $S$  : Section en  $(m^2)$ .
- $dt$  : Temps élémentaire en (s).
- $\frac{dT}{dx}$  : Gradient de température en  $x$  en  $(K \cdot m^{-1})$ .

La relation (1) permet de définir :

Le flux de chaleur  $\Phi$  en Watt qui circule en  $x$  :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.8})$$

Ainsi que la densité de chaleur  $\varphi$  en ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.9})$$

Le signe des relations précédentes indique que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température ( $\frac{dT}{dx}$  est positif sur la figure III-10).

### II-5-2. Conséquence de la loi de Fourier

Considérons en figure (III-11), un mur homogène d'épaisseur  $L$ , de section  $S$ , de conductivité thermique  $\lambda$  dont la face en  $x=0$  est maintenue à la température  $T_1$  et la face en  $x=L$  à la température  $T_2$ . Le flux de chaleur  $\Phi$  (W) qui traverse ce mur, est tel que : [15]

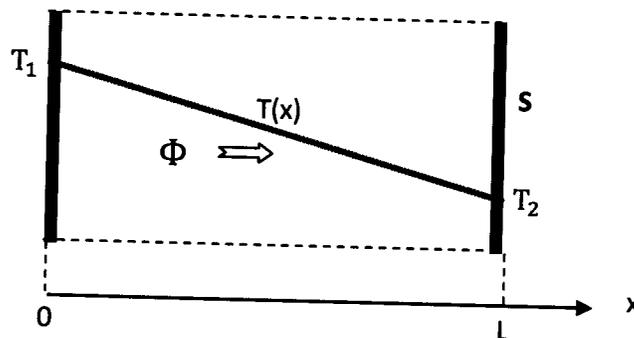


Figure III-11: Transfert par conduction à l'intérieur d'un mur homogène [15].

Le flux de chaleur est :

$$\Phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.8})$$

En régime permanent, la répartition de la température est linéaire :

$$T(x) = -\frac{T_1 - T_2}{L} x + T_1 \quad (\text{III.10})$$

Le gradient de température est alors constant :

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (\text{III.11})$$

La relation (III-9) devient alors :

$$\Phi = \frac{\lambda \cdot S}{L} (T_1 - T_2) \quad (\text{III.12})$$

Le flux de chaleur est donc proportionnel à la différence de température entre les faces du mur. Le coefficient de proportionnalité représente la conductance thermique du dispositif :

$$G_{th} = \frac{\lambda \cdot S}{L} \quad (\text{W/K}) \quad (\text{III.13})$$

On définit aussi la résistance thermique du milieu :

$$R_{th} = \frac{1}{G_{th}} = \frac{1}{\lambda} \frac{L}{S} \quad (\text{K/W}) \quad (\text{III.14})$$

Dans ces conditions, la différence de température entre les deux faces s'écrit :

$$T_1 - T_2 = R_{th} \cdot \Phi \quad (\text{III.15})$$

On trouvera dans les deux tableaux au dessous les valeurs de la masse volumique  $\rho$ , la chaleur massique  $c_p$  et la conductivité thermique  $\lambda$ , pour certains matériaux métalliques, alliages et céramiques, à différentes températures  $\theta$  (en °C) : [11]

	$\theta$ (°C)	$\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg. °C)	$\lambda$ (W/p. °C)
Acier au carbone	20	7833	465	54
	200			48
	600			35
Aluminium	20	2707	896	204
	400			249
Argent	20	10525	234	407
Chrome	20	2118	7160	449
Cuivre	20	8954	383.1	386
	400			363
Or	20	1336	19300	129
Fer	20	7870	452	73
Laiton 70% Cu, 30% Zn	20	8522	385	111
	400			147

Tableau III-3 : Les propriétés physiques des métaux, alliages et céramiques.

Pour les isolants thermiques, on utilise des matériaux très faibles conduction de la chaleur, pour isoler le dos du capteur solaire. Le tableau suivant, donne les propriétés physiques de certains isolants thermiques : [11]

	$\theta$ (°C)	$\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg. °C)	$\lambda$ (W/p. °C)
Coton	20	80	1300	0.06
Laine de roche	20	20	880	0.047
	20	55	880	0.038
	20	135	880	0.041
Laine de verre	20	8	875	0.051
	20	10	880	0.045
	20	15	880	0.041
	20	40	880	0.035
Polyuréthane (mousse rigide)	20	32	1300	0.03
	20	50	1360	0.035
Polystyrène expansé	20	12	1300	0.047
	20	14	1300	0.043
	20	18	1300	0.041

Tableau III-4 : Les propriétés physiques de certains matériaux isolants.

## II-6. Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante : [11]

- Le rendement global :

$$\eta = \frac{\Phi_u}{G_{(i,\gamma)}^* S} \quad (\text{III.16})$$

- Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\Phi_u}{\Phi_{sa}} \quad (\text{III.17})$$

- Le rendement optique :

$$\eta_0 = \frac{\Phi_{sa}}{G_{(i,\gamma)}^* S} \quad (\text{III.18})$$

On définit également des rendements moyens sur une période donnée (jour, mois, année). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan (III.1) sur la période choisie :

$$\int_0^t \Phi_{sa} dt = \int_0^t \Phi_u dt + \int_0^t \Phi_p dt$$

Soit :

$$\Phi_{sa} = \Phi_u + \Phi_p \quad (\text{III.19})$$

On définit alors les rendements global  $\eta$  ; interne  $\bar{\eta}_i$  et optique  $\bar{\eta}_0$  moyens du capteur sur la période considérée par :

$$\bar{\eta} = \frac{Q_u}{\int_0^t G_{(i,\gamma)}^* S dt} \quad (\text{III.20})$$

$$\bar{\eta}_i = \frac{Q_u}{Q_{sa}} \quad (\text{III.21})$$

$$\bar{\eta}_0 = \frac{Q_{sa}}{\int_0^t G_{(i,\gamma)}^* S dt} \quad (\text{III.22})$$

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

Enfin, Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très haute température. En revanche, il est possible d'utiliser des capteurs par concentration, mais ils sont plus complexes et plus onéreux. Il s'agit de réflecteurs qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un récepteur (foyer). Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité, et les températures obtenues sur le récepteur (appelé cible) peuvent atteindre plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de degrés Celsius [23].

### III. Conclusion

Le capteur plan convient mieux aux applications à basse température, si le stockage s'effectue à des températures situées entre 30° et 40°C. Une des meilleures applications du chauffage solaire concerne le chauffage des piscines; Les capteurs travaillent alors dans des conditions où le rendement est compris entre 60 et 70%. Par contre, si l'on cherche à obtenir des températures plus fortes, il y a lieu de prévoir une très grande surface du capteur ou l'utilisation des capteurs à concentration.

# **Chapitre IV :**

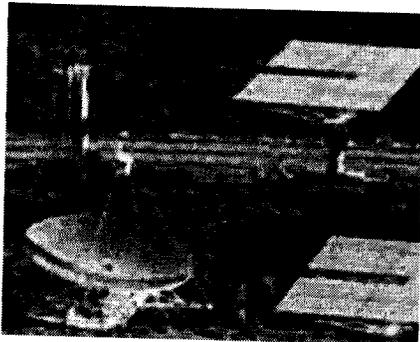
## **Modélisation et simulation**



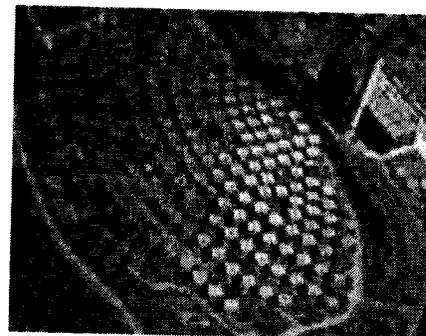
## I. Introduction

Après avoir développé dans les chapitres précédents les notions du transfert thermique ainsi que le rayonnement solaire et de sa concentration, nous avons mis au point une technique de modélisation avec un programme de simulation qui nous a permis d'estimer la puissance de sortie de la fibre optique solaire et les températures de sortie du fluide et de l'air pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le chauffage.

Les capteurs à concentration permettent d'atteindre des températures supérieures à 150 °C; un collecteur avec une surface réfléchissante de forme cylindro – parabolique qui sont de longs miroirs cylindriques qui concentre les rayonnements solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces ce qui permet d'élever la température jusqu'à 500°C. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée [2]. Dans un concentrateur cylindro – parabolique, le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) peut être porté à environ 400°C. Dans les concentrateurs paraboliques, on peut obtenir des températures plus élevées (jusqu'à 1500°C). L'eau chaude produite peut être utilisée directement pour le chauffage de locaux, de piscines, ou à des fins industrielles. Elle peut aussi être transformée en travail mécanique ou électrique de façon très classique, avec toutefois un faible rendement dû à la température trop basse de la source chaude [26].



(a)



(b)

Figure IV-1 : Capteurs à concentration.

(a) : Collecteur à concentration parabolique

(b) : Les centrales à tour, sortes de belvédères cernés par un champ de miroir orientables situés sur le sol (les "héliostats") qui renvoient les rayons solaires vers le haut de la tour ou est installé une chaudière.

## II. La fibre optique solaire et le miroir parabolique

La concentration du rayonnement solaire permet, pour une surface de capteur donnée, de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur. Ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration. Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 1800°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène...[2].

### II-1. La fibre optique solaire

#### II-1-1. Considération théorique

##### a. Pertes de Fresnel

Quelque soit le conducteur de lumière utilisé, il faut à chaque extrémité, tenir compte des pertes de puissance liées au passage de l'onde électromagnétique entre deux milieux diélectriques (l'air et le cœur du conducteur). Si les faces d'entrée et de sortie de ce conducteur sont des plans optiques, à partir de la théorie de Fresnel on peut évaluer ces pertes à 4 % sur chacune des faces [2].

##### b. Coefficient d'atténuation

Les conducteurs de lumière ont été développés depuis quelques années sous forme de fibres optiques pour les besoins de télécommunications, ils ont alors le diamètre extrêmement faible (quelques dixièmes de mm) et souvent les indices  $n_1$  et  $n_2$  sont très voisins. Comme les distances à parcourir sont importantes (supérieures au km), il est indispensable que le milieu constituant le cœur soit le plus transparent possible. Il s'agit généralement de verres très purs et actuellement de meilleurs résultats ont été obtenus avec des Silices de synthèses. On a l'habitude de relier la transmittance des fibres à une atténuation caractéristique  $\tau$  (exprimée en dB/km) qui est donnée par l'expression suivante [2] :

$$\frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda)} = 10^{-0,1\tau(\lambda).l} \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

- $P_0$  : La puissance incidente.

L'atténuation  $\tau$  dépend de la longueur d'onde. La présence d'impuretés provoque l'apparition de bandes d'absorption ; la diffusion Rayleigh fait augmenter l'atténuation vers les courtes longueurs d'ondes correspondantes. En atteignant des valeurs de  $\tau$  inférieures à 1dB/km, l'atténuation sera minimisée.

Pour transporter le rayonnement solaire avec de tels conducteurs, il est indispensable de considérer la valeur moyenne  $\bar{\tau}$  de  $\tau$  sur l'ensemble du spectre solaire.  $\bar{\tau}$  est définie par la relation suivante :

$$\int_0^{\infty} \frac{dP_0}{d\lambda} 10^{-0,1\tau(\lambda)l} d\lambda = 10^{-0,1\bar{\tau}l} \int_0^{\infty} \frac{dP_0}{d\lambda} d\lambda \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

- $P_0$  : La puissance sur la face d'entrée du conducteur.
- $l$  : La longueur de la fibre.

Dans notre cas les distances de propagation sont faibles (de l'ordre de 10 m) et que le maximum de puissance soit transmis, pour que les valeurs de  $\bar{\tau}$  tolérables dans la pratique, et dans la limite où les pertes  $[P/P_0 = (P_0 - P) / P_0]$  sont supérieures à 10 % avec une longueur de 10 mètres, la valeur de  $\bar{\tau}$  n'excède pas 50 dB/km [2].

### c. Ouverture

L'ouverture d'un conducteur de lumière est caractérisée par un angle limite  $\theta_0$  défini par la relation suivante :

$$\sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

- $\sin \theta_0$  : l'ouverture numérique.

Ces définitions supposent que :

- ❖ Tous les rayons sont dans un plan méridien du conducteur.
- ❖ Pour les rayons qui peuvent se propager dans la fibre (intérieurs à un cône de demi-angle au sommet  $\theta_0$ ), les réflexions internes sont parfaitement totales.
- ❖ La géométrie de la fibre est parfaite.

Dans la pratique, les fibres à grande ouverture sont réalisées avec deux verres d'indices différents mais elles ont une atténuation assez élevée. Pour avoir une transparence, il faut choisir la silice de synthèse pour l'élaboration du cœur, son indice  $n_1=1,4585$  (cette valeur est égale à  $n_d$  pour la raie jaune du Sodium) est relativement faible, il s'avère difficile de trouver des matériaux ayant à la fois de bonnes qualités optiques et un indice sensiblement petit. Les

silicones qui ont un indice de l'ordre de 1,4 conduisent à des ouvertures voisines de  $20^\circ$ . Cette valeur, relativement faible, va jouer un rôle significatif dans l'utilisation envisagée.

En réalité, tous les rayons ne sont pas méridien, une réflexion n'est jamais parfaitement totale et, quel que soit le soin apporté à la fabrication du conducteur, il existe des défauts géométriques à la surface de séparation entre le cœur et la gaine [2].

Le coefficient de réflexion interne s'écrit :  $\mu=1-x$ , ( $x \ll 1$ ). Ceci est dû du fait que les diélectriques constituant le cœur et la gaine ne sont pas parfaits, l'indice de réfraction relatif est donc mathématiquement un nombre complexe. Cette atténuation s'explique par la notion de décalage transversal (Effet Gauss – Hanschen) qui se produit lors de la réflexion totale : l'onde associée à un pinceau lumineux élémentaire parcourt une très grande distance dans le second milieu, elle est atténuée vu que celui-ci est très légèrement absorbant. Ce phénomène négligeable pour une seule réflexion est bien évident, mais devient sensible dans une fibre optique en présence d'un grand nombre de réflexions [2].

Les défauts géométriques existant à la surface de séparation entre la gaine et le cœur sont aléatoires, et par conséquent ils modifient les angles d'incidence internes (couplage des modes), ce phénomène se traduit par :

- ❖ Un affaiblissement important de la puissance transportée par les rayons lumineux qui attaquent la fibre au voisinage de l'angle limite.
- ❖ Une homogénéisation du faisceau lumineux au cours de sa propagation.

A partir de ces deux phénomènes, on aura :

- ❖ L'ouverture expérimentale du faisceau toujours inférieure à la valeur numérique donnée par la relation théorique.
- ❖ La face de sortie d'une fibre suffisamment longue peut être considérée comme une source de brillance uniforme.

Le coefficient d'atténuation moyen n'est plus une constante, il doit tenir compte de l'angle  $\theta$  sous lequel la fibre reçoit la puissance transmise. La variation de l'atténuation est fonction de l'angle  $\theta$  pour une lumière monochromatique, elle peut être estimée en supposant que tous les rayons sont méridiens et en négligeant l'effet des défauts géométriques [2].

#### d. Section

L'utilisation de conducteurs de lumière pour le transport de l'énergie solaire concentrée dans le but de désolidariser le concentrateur mobile du récepteur, nous informent que les conducteurs choisis sont souples. Vu que leur cœur est en verre, expérimentalement il sera

difficile de dépasser des diamètres du cœur de l'ordre du millimètre. Nous aurons donc à faire à des fibres optiques dont la section  $s$  est toujours faible.

#### e. Puissance transportable

Notre but est de transporter le maximum de puissance dans le conducteur de section minimale. En tenant compte de cette section et de l'ouverture angulaire du conducteur, signifie qu'il faudra réaliser sur la face d'entrée de la fibre, la concentration la plus élevée possible. Le conducteur utilisé est capable de recevoir un tel flux d'énergie. Supposons que l'énergie qui n'est pas transmise est intégralement absorbée dans la fibre, seule une partie sera diffusée, ce qui met en évidence son échauffement.

Un conducteur pour lequel  $\bar{\tau} = 50$  dB/km devrait dissiper le long de chaque mètre 1,2 % de la puissance transportée. Nous verrons, par la suite, que les puissances transportées sont toujours faibles (quelques watts), de sorte qu'aucun problème d'échauffement ne se posera.

Si l'on pouvait concentrer le rayonnement sur un conducteur de gros diamètre mais souple, on pourrait transporter une forte puissance. Il y aurait alors risque d'échauffement : ce paramètre devrait être étudié de façon approfondie.

On peut recevoir de constituer un conducteur souple de forte section en juxtaposant un grand nombre de fibres. Cependant, aussi compact que soit cet arrangement, il y a toujours la surface « perdue » dans la section de la face d'entrée d'un tel câble. Le rayonnement concentré arrivant dans l'espace inter conducteur est, non seulement perdu parce qu'il ne peut être canalisé, mais encore susceptible de détériorer le matériau d'enrobage de chacune des fibres.

#### II-1-2. La fibre Q.S.F 1000

Une fibre appropriée pour une conception d'un capteur photothermique devrait avoir les propriétés suivantes [27] :

- ❖ Fibre multimode à saut d'indice.
- ❖ Large ouverture numérique (O.N).
- ❖ Résiste à haute température.
- ❖ Faible atténuation sur le spectre solaire.

L'étude générale précédente nous a permis de dégager les éléments essentiels qui nous permettent de choisir, parmi les fibres optiques commerciales, la mieux adaptée à notre problème. Après avoir rappelé les pertes de transport d'énergie électromagnétiques dans la fibre optique, nous choisissons une fibre adaptée de façon adéquate avec notre étude.



L'étude a montré que pour des raisons d'échauffement, le système associe un concentrateur à chaque fibre. Les considérations sur l'atténuation imposent pour le cœur la silice de synthèse. Ainsi nous avons choisi la fibre de plus gros diamètre (1 mm), le constructeur en indique une ouverture  $\theta_0 = 20^\circ$ .

En début nous avons évoqué les pertes provenant des réflexions vitreuses sur les extrémités de la fibre. Dans le but de minimiser leurs conséquences, nous devons réaliser un poli optique de chaque face. En effet, les meilleurs dispositifs de coupe, laissent en trace d'amorce de fracture et souvent des éclats internes. Pour réaliser ce polissage, il faut mettre au point un outil, qui permet d'obtenir un poli optique convenable.

Il nous paraît d'envisager nécessairement le dépôt d'une couche anti - reffet sur les extrémités de la fibre.

L'ouverture numérique est donnée par le constructeur en fonction des indices  $n_1$  et  $n_2$  correspondants à la longueur d'onde de la raie jaune de sodium qui s'exprime par la relation suivante [16] :

$$\sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{IV.4})$$

Enfin, la fibre choisie est la Q.S.F 1000 composée d'un cœur de quartz et de silice de diamètre de 1mm, un angle  $\theta_1 = 20^\circ$  et un coefficient d'atténuation  $\tau = 3\text{dB/km}$  pour une longueur d'onde  $\lambda = 0,82 \mu\text{m}$ .

## II-2. Le concentrateur

Pour déterminer les meilleures conditions de couplage entre un concentrateur et le conducteur de lumière qui lui est associé, il est nécessaire de préciser le concentrateur le plus adéquat. Pour aboutir à ce choix dans le cas général, il faut caractériser la répartition énergétique fournie dans un plan quelconque par un concentrateur éclairé par le soleil ; tout en sachant que la connaissance des notions de la topographie énergétique est insuffisante. La limite de l'ouverture angulaire de la fibre impose aussi de connaître les conditions angulaires de cet éclairage.

Avec ces restrictions, on est amené au concentrateur susceptible de fournir le flux maximal dans le disque constitué par la face d'entrée du conducteur.

La symétrie cylindrique des conducteurs de lumière limite ce choix parmi les concentrateurs ayant la symétrie de révolution.

Par ailleurs, les ouvertures admissibles des faisceaux de lumière après concentration sont trop importantes pour que les méthodes de l'optique de Gauss soient satisfaites. En particulier, il n'y a pas lieu de considérer des « images du soleil » au sens strict du terme.

L'optimisation de la répartition énergétique dépend de la nature du concentrateur, du plan sur lequel elle est étudiée et de la brillance du soleil. Cela, si toutes les autres conditions sont parfaites.

La fibre choisie correspondant pour un angle de  $20^\circ$  d'ouverture, est donc capable de conduire dans les conditions idéales, un rayonnement dont la concentration est donnée par l'expression suivante [2] :

$$C_{\text{opt}} = \frac{\sin^2 \theta_0}{\varepsilon_0^2} = 5400 \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

- $\varepsilon_0 = 4,654 \cdot 10^{-3}$  rd.

Le dispositif qui peut être utilisé pour concentrer le rayonnement solaire sur la face d'entrée d'une fibre optique dans les conditions satisfaisantes, et qui permet d'approcher au mieux la concentration optimale ; est le miroir parabolique. Il présente un facteur de concentration optimale ( $C/C_{\text{opt}}$ ) avec une perte de 2 % lorsqu'on dépasse la concentration optimale, d'où la récupération des pertes de puissance importantes.

L'utilisation du miroir parabolique est due à un autre phénomène qui consiste à récupérer la puissance issue du bord du soleil et utiliser une source de brillance moyenne plus élevée telle que [ ] :

$$\gamma = \frac{d}{2f\varepsilon_0} = 0$$

Et :

$$\frac{C}{C_{\text{opt}}} = \frac{B_0}{B}$$

(IV.6)

### II-2-1. Influence de l'ouverture

La répartition énergétique est fonction de l'ouverture numérique ( $\theta_0$ ) et de l'idéalité du centrage (les meilleures conditions de couplage). A cet effet, il faut connaître la variation des grandeurs ( $C/C_{\text{opt}}$ ) et ( $\Delta P/P_0$ ) en fonction de  $\gamma$  et  $\theta_1$

Pour un soleil uniforme, le calcul peut être mené à son terme de manière analytique. Nous nous limitons à rappeler les relations donnant la variation des paramètres cités ci-dessous, en fonction de l'ouverture  $\theta_0$  [2] :

- Du coefficient de concentration moyenne  $C_t$  relatif à la totalité de la « tache d'image ».

- De la puissance relative  $\frac{\Delta P}{P_0}$  perdue quand on capte l'énergie intérieure à un disque de diamètre  $d$  centré au foyer.

On trouve :

$$C_t = \frac{\sin^2(2\theta_0)}{4\varepsilon_0^2} \quad (\text{IV.7})$$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = 1 - \gamma^2 \cos^4 \frac{\theta_0}{2} \quad (\text{IV.8})$$

La deuxième relation n'est valable que si  $(\gamma = d/2f\varepsilon_0)$  inférieure ou égale à 1.

Le coefficient du concentrateur sur le disque s'écrit  $C = \eta \frac{S}{s}$ , d'où :

$$\frac{C}{C_{\text{opt}}} = \frac{4\eta}{\gamma^2(1+\cos\theta_1)^2} = \frac{\eta}{\gamma^2 \cos^4(\frac{\theta_1}{2})} \quad (\text{IV.9})$$

Donc il est possible de récupérer la perte de puissance en fonction de  $\theta_0$  pour atteindre le facteur  $(C/C_{\text{opt}})$  désiré. Une fois que  $(C/C_{\text{opt}}, \theta_0, d)$  sont connus, nous pouvons déterminer les caractéristiques géométriques du concentrateur parabolique tels que  $f$  (distance focale) et  $R_c$  (rayon du concentrateur). Les pertes de puissance dues aux défauts géométriques du miroir sont estimées à 5 %.

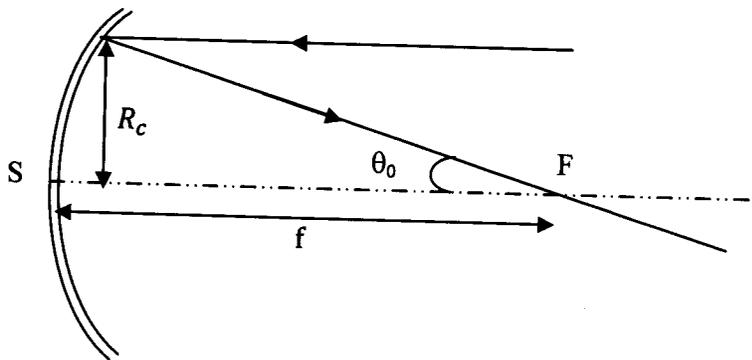


Figure IV-2 : Détermination de la distance focale  $f$  et du rayon du concentrateur  $R_c$  [2].

### III. Conception d'un capteur alimenté par une seule fibre optique

L'utilisation de l'énergie solaire a mis une large disponibilité dans les applications thermiques et dans la production de l'électricité (photovoltaïque). La difficulté de cette utilisation est la faible densité, et le transport d'énergie solaire sous forme thermique se traduit par de forte perte que le transport d'énergie solaire sous forme rayonnante, pour résoudre ce problème il faut utiliser un concentrateur placé dans un système de suivie du soleil. L'idée de transporter l'énergie solaire concentrée a commencé en 1980 par un groupe de chercheurs français.

Actuellement la technologie des fibres optiques disponibles pour cette transmission offre une haute qualité de production avec un gros diamètre du cœur de ces fibres, c'est la caractéristique principale des fibres optiques solaires.

Dans ce travail, nous utilisons des conducteurs de lumière qui ont l'avantage de faibles atténuations, c'est à dire avoir des pertes minimales lors du transport dans le cas des fibres optiques [20].

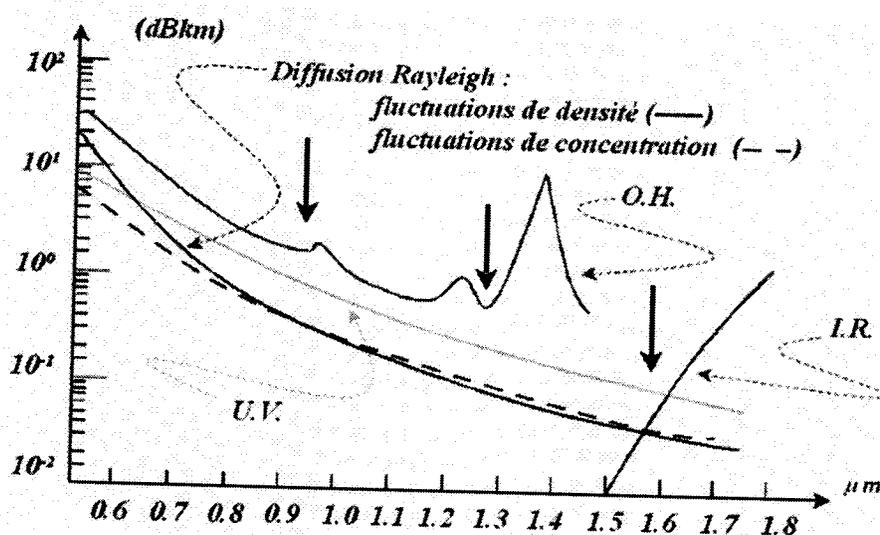


Figure IV-3: Profil de l'atténuation spectrale de la fibre optique faite de silice [20].

On voit que plusieurs paramètres contribuent à faire perdre de la puissance au signal optique :

- Tout d'abord ce que l'on appelle la diffusion Rayleigh qui traduit à la fois l'effet des impuretés, des imperfections, des craquelures et des variations d'indice.
- Ensuite les effets de vibration de la liaison hydroxyde (OH oxygène hydrogène), que l'on ne peut pas supprimer, et qui présentent un pic de forte atténuation autour de 1400 nm.
- On a aussi une influence des ultraviolets et des infrarouges (UV et IR).

En superposant ces profils d'atténuation, on remarque trois bandes spectrales à l'atténuation assez faible (flèches noires sur la figure) :

- Autour de 900 nm.
- Autour de 1300 nm.
- Et autour de 1550 nm Ces trois bandes sont celles que l'on utilise couramment.

Il existe certaines fibres (chez Lucent Technologies) qui n'ont pas de pic dû à OH vers 1400 nm, elles présentent alors une très large fenêtre exploitable de 1335 à 1625 nm.

Ainsi, en minimisant certains effets d'atténuation, on peut élargir les fenêtres utilisables par le signal.

L'atténuation globale est considérée comme constante sur la bande spectrale utilisée. Nous choisissons une fibre adaptée de façon adéquate dans notre étude, la fibre optique choisie est la Q.S.F 1000 composée d'un cœur de quartz et de silice possède un cœur de 1 mm de diamètre, fabriqué en Silice de synthèse, d'atténuation moyenne  $\tau$  égale à  $2 \cdot 10^{-2}$  dB/m sur l'ensemble du spectre solaire, une ouverture numérique de  $\theta_F = 20^\circ$ .

### III-1. L'interface fibre-concentrateur

Nous allons maintenant analyser tous les facteurs expérimentaux qui peuvent aboutir aux meilleurs réglages du couplage et réduire le facteur de puissance ( $C/C_{opt} = 1$ ) si  $\gamma = 1$  et  $\theta_0 = 20^\circ$ .

Les caractéristiques géométriques du miroir parabolique qu'il faut associer à la fibre Q.S.F 1000 sont :  $f = 10,38$  cm,  $R_c = 36,6$  cm et un diamètre de 68 mm.

Les contraintes technologiques ont conduit à choisir un miroir de 10 cm de distance focale et de 68 mm de diamètre. Il est placé dans l'ensemble mécanique schématisé dans la figure (IV-4). Ce système comporte un certain nombre de dispositifs de réglage qui facilitent la mise en évidence de façon systématique des effets suivants [2] :

- ❖ Défocalisation Axiale : Elle correspond à un écart  $\Delta f$  suivant l'axe de la face d'entrée de la fibre et du plan focal.
- ❖ Défocalisation Radiale : L'axe de révolution de la fibre ne coïncide pas avec l'axe du concentrateur qui provoque un écart  $\Delta d$ .
- ❖ Défaut de Pointage : L'effet de l'écart de pointage  $\Delta \epsilon$  du système par rapport à la direction moyenne du rayonnement a pour conséquence une rotation de l'image du soleil d'un angle  $2\Delta \epsilon$  et une défocalisation radiale  $\Delta f = 2f\Delta \epsilon$ . Les pertes provoquées par ces sous dimensionnement sont de 10 %.

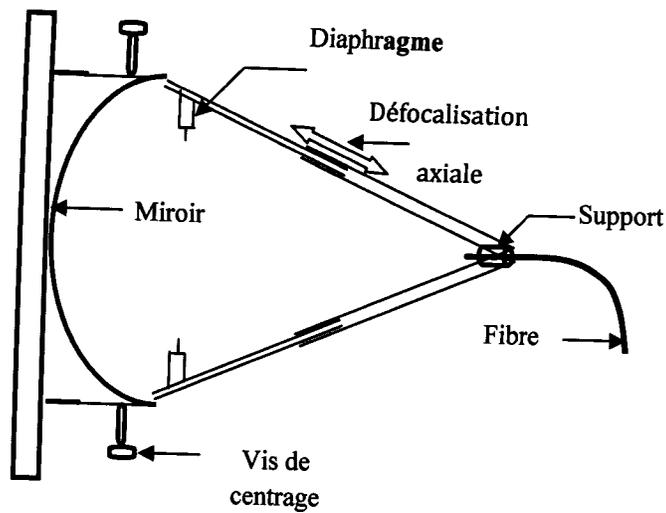


Figure IV-4. Schéma du Dispositif utilisé dans le Transport de L'énergie Solaire Concentrée  
Le centrage du miroir par rapport à l'axe de la fibre (Défocalisation radiale) est assuré par trois vis calantes. Le déplacement de l'extrémité de la fibre par rapport au plan focal (Défocalisation Radiale) qui s'effectue à l'aide d'une bague filtrée au pas d'un millimètre, et un diaphragme étalonné, permet d'étudier les variations d'ouverture du faisceau.

La condition de pointage est liée directement au diamètre de la fibre ou d'un paquet à fibre optique et à la section d'image de concentrateur. Il est représenté sur la figure (IV-5). Elle montre les diagrammes du tracé du rayon d'un concentrateur parabolique alimenté par une seule fibre optique de 1 mm de diamètre avec 0,66 d'ouverture numérique.

- La vue est du plan focal regardant vers le concentrateur.

Le cercle rouge au centre de concentrateur représente la fibre optique portant sur le plan focal.

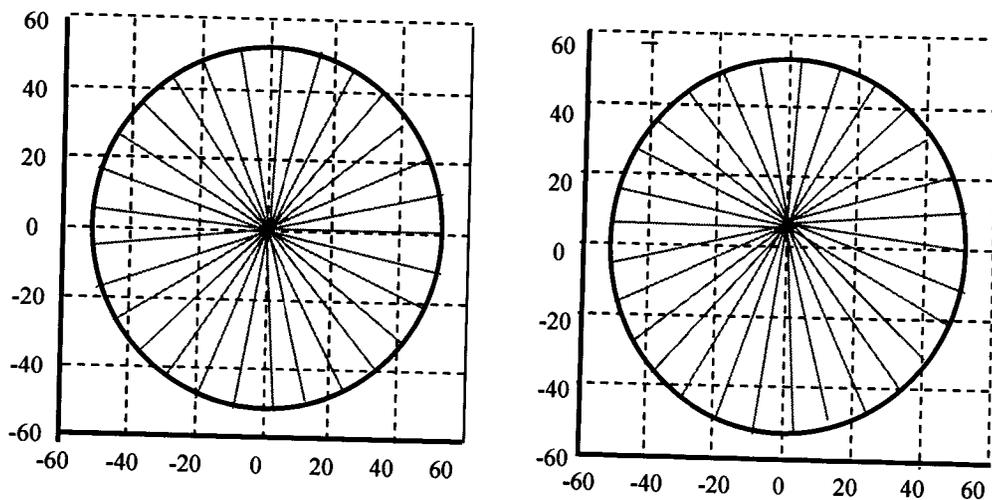


Figure IV-5 : Contrôle de pointage d'un concentrateur parabolique [27].

(a) : Convergence du rayonnement solaire réfléchis en point d'intersection de l'axe optique avec le plan focal ( $0^\circ$ ).

(b) : le pointage sur le plan focal avec un angle  $5^\circ$  par rapport à l'axe optique.

La figure (a) : montre le concentrateur parfaitement aligné avec le rayon solaire. La figure (b) : montre le concentrateur est mal aligné avec le rayon solaire par  $5^\circ$ .

Le grand cercle au dessus de la fibre centrale représente l'image solaire de concentrateur. Il est important de noter dans la figure (b) que l'image solaire ne recouvre pas la fibre optique à cause de ce défaut d'alignement, l'image solaire est plus grande que le diamètre de la fibre tandis que sur la figure (a) a les mêmes grandeurs.

### III-2. Analyse de la tache image du soleil [2]

Après avoir effectué le centrage relatif de la fibre et du miroir et avoir obtenu le maximum de la puissance à la sortie de la fibre, nous remplaçons la fibre par un miroir de renvoi afin d'analyser la répartition énergétique dans la tache image du soleil. Pour cela, nous réalisons un agrandissement (voir figure IV-6).

Le faisceau conique ouvert à  $20^\circ$  est réfléchi par le concentrateur d'un angle droit par un petit miroir disposé au voisinage du plan focal. L'objectif a 50 mm de distance focale et ouvert à  $f/1,4$  ; constitue un agrandissement de la tache focale dans un plan distant de 2 m environ qui est monté sur un ensemble de trois platines micrométriques formant un trirectangle avec lequel nous ajustons le centrage.

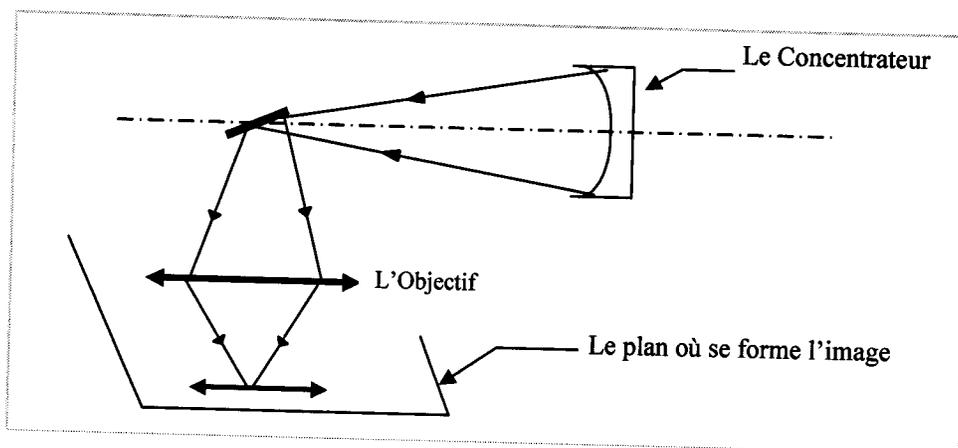


Figure IV-6 : Formation de la Tache Image du Soleil.

L'agrandissement est de 40 fois et l'angle du soleil est une tache circulaire de 4 cm de diamètre, l'écran est percé d'une fente dans laquelle on peut déplacer une fibre optique d'un diamètre de  $400 \mu\text{m}$ . Le balayage se fait par un vis, au pas de 1mm, entraînée par un moteur synchrone tournant à 60 tours /min. Le tout est placé sur une platine qui assure dans le plan de l'image une translation perpendiculaire à la direction du balayage.

#### IV. Energie reçue par un capteur plan

Le rayonnement global (G) reçu par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) est composé de trois rayonnements ; direct (S), diffus (D) et réfléchi par le sol (R). Ces rayonnements varient aléatoirement en fonction de la hauteur du soleil, de l'Azimut, de l'angle d'incidence, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère. Le calcul de ces rayonnements s'avère très compliqué. On utilise des méthodes approchées pour l'estimation.

Pour l'Algérie la méthode de PERRIN DE BRICHAMBAUT donne de bons résultats pour l'estimation de l'énergie incidente [2].

##### IV-1. L'énergie instantanée

Les puissances du rayonnement direct ( $E_S$ ), diffus ( $E_D$ ) et global ( $E_G$ ) reçues par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) incliné de  $\beta$  par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes [2] :

$$\begin{cases} E_S = A \cos i e^{\frac{-1}{B \sin^2(h+2)}} \\ E_D = \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) D_H + \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) a^* G_H \quad \text{avec} \quad \begin{cases} D_H = A' (\sin h)^{0,4} \\ G_H = A'' (\sin h)^{B''} \end{cases} \\ E_G = E_S + E_D \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

$$[E_S] = [E_D] = [E_G] = \text{W/m}^2$$

- $a^*$  étant l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol)

$$a^* = \begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 & \text{neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 & \text{sol clair} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 & \text{verdure} \end{cases}$$

- Pour Tlemcen  $a_{\text{moy}}^* = 0,2$

A, B, A', A'', B'', sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère.

Etat de l'atmosphère	A	B	A'	A''	B''
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1,15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1,22
Ciel bleu laiteux	1200	2,5	187	990	1,25

Tableau -IV-1. Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère.

### IV-2. L'énergie journalière

L'énergie journalière reçue par un capteur  $(\alpha, \gamma)$  s'obtient par l'intégration des formules de  $E_S, E_D, E_G$  sur toute la durée du jour par un ciel clair [ ] :

$$E_{jS} = \int_{H_L}^{H_C} E_S dH \quad E_{jD} = \int_{H_L}^{H_C} E_D dH \quad E_{jG} = \int_{H_L}^{H_C} E_G dH \quad (IV.11)$$

L'intégration tout au long de la journée ne fournit pas une bonne valeur car il est difficile de maîtriser correctement les intempéries.

❖ Pour un plan d'orientation quelconque, l'énergie reçue dépend de la durée du jour et du nombre d'heures d'ensoleillement :

$$\begin{aligned} E_{jS} &= \int_{t_c}^{t_c} E_S dt \\ E_{jD} &= \int_{t_c}^{t_L} E_D dt \\ E_{jG} &= \int_{t_L}^{t_L} E_G dt \end{aligned} \quad (IV.12)$$

Pour l'estimation de l'énergie journalière incidente sur un capteur d'orientation quelconque on utilise une méthode numérique qui donne de bons résultats pour le site de Tlemcen telles que :

$$E_{jS} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_S \quad E_{jD} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_D \quad E_{jG} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_G \quad (IV.13)$$

Avec :

- $E$  : L'énergie instantanée (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.
- $k$  : Le nombre d'intervalles entre le lever et le coucher du soleil sur ce capteur.
- $\Delta T$  : La différence entre le temps du lever et du coucher sur le capteur.

### IV-3. L'énergie annuelle

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est donnée par la somme des énergies journalières [2].

$$\left\{ \begin{aligned} E_{aS} &= \sum_1^N E_{jS} \\ E_{aD} &= \sum_1^N E_{jD} \\ E_{aG} &= \sum_1^N E_{jG} \end{aligned} \right. \quad (IV.14)$$

#### IV-4. Estimation des énergies reçues par un capteur

Le rayonnement reçu par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) est constitué du rayonnement solaire direct et diffus dont l'ensemble constitue le rayonnement global. Dans notre travail nous avons envisagé le cas du ciel bleu clair.

##### ➤ Estimation de l'énergie instantanée

Un programme de simulation permettant le calcul de l'énergie instantanée incidente sur différents capteurs ( $\alpha, \gamma$ ) pour le site de Tlemcen, par ciel moyen et pour les quatre saisons (EP - EA - SE - SH) est mis au point.

Les résultats de ce programme sont donnés par les figures suivantes :

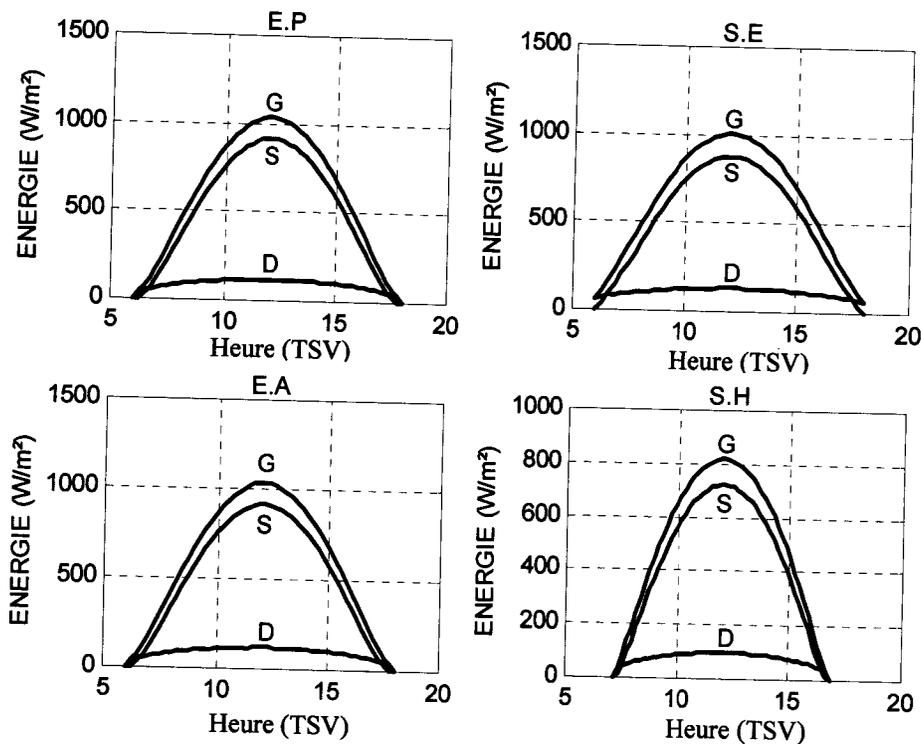


Figure IV-7 : Estimation de l'énergie instantanée sur site de Tlemcen pour un capteur Tel.

D'après ces figures on constate que le capteur (0, 90-34.56) reçoit le soleil à partir de 6h TSV pour (EP-EA) et à partir de 7h TSV environ pour SH.

L'énergie instantanée incidente sur ce capteur pour le site de Tlemcen est presque la même pour (EP-EA), elle est maximale à 12h est égale à 1000 W/m<sup>2</sup>.

##### ➤ Estimation de l'énergie journalière :

Pour l'estimation de l'énergie journalière reçue par un capteur d'orientation quelconque nous avons appliqué une méthode numérique donnant de bons résultats pour le

site de Tlemcen. Cette méthode est générale, elle peut être appliquée pour n'importe quel capteur placé en n'importe quel lieu de la terre et d'orientation quelconque.

La figure suivante représente la variation de l'énergie journalière durant toute l'année pour différentes inclinaisons d'un capteur ( $\theta, \gamma$ ) :

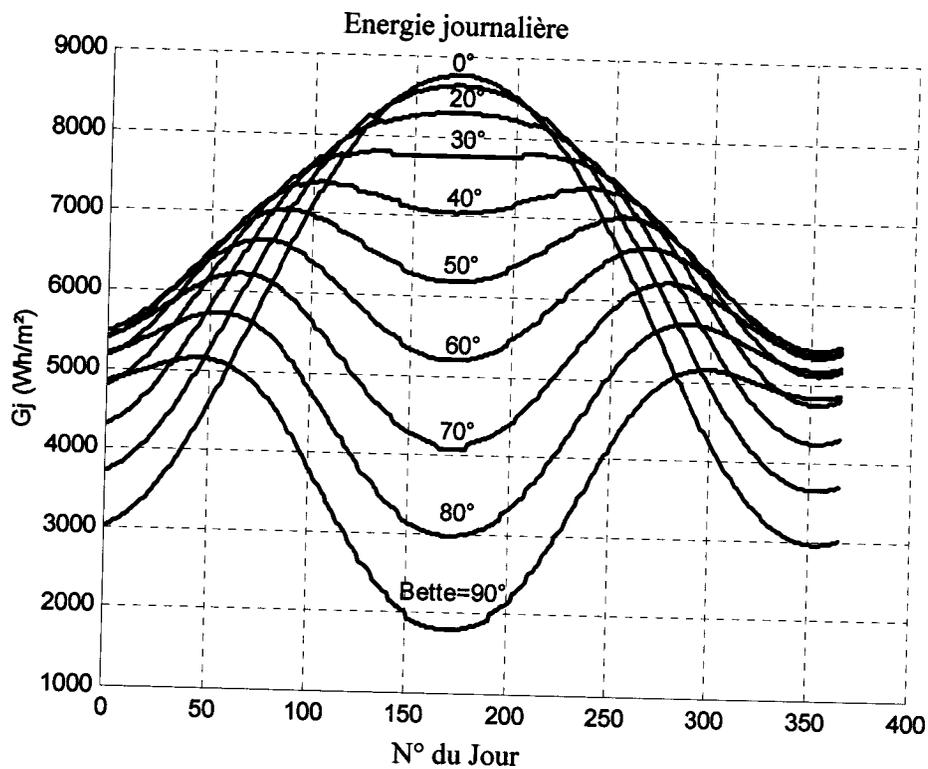


Figure IV-8 : Estimation des énergies pour différentes orientations des capteurs au site de Tlemcen.

A partir de cette courbe on constate que l'énergie journalière est maximale pour le capteur  $(0, 90)$  et minimale pour le capteur  $(0, 0)$  au Solstice été, tel que :

$$G_J(\text{Max}) \cong 9000 \text{ Wh/m}^2. \text{ Et } G_J(\text{min}) \cong 2000 \text{ Wh / m}^2.$$

L'énergie journalière incidente sur le capteur TEL pour le site de Tlemcen aux  $(EA-EP)$ ,  $SE$  et  $SH$ , est donnée par le tableau suivant :

	$E_{jG}$ ( $Wh/m^2$ )	$E_{jS}$ ( $Wh/m^2$ )	$E_{jD}$ ( $Wh/m^2$ )
EA-EP	7330.7	6221.9	1108.8
SE	7567.9	6260.2	1307.7
SH	4980.9	4245.6	735.3

Tableau IV-2 L'énergie journalière incidente sur le capteur TEL sur le site de Tlemcen.

➤ **Estimation de l'énergie annuelle :**

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est déterminée par un programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières pour les différents états de ciel sur le site de Tlemcen :

$$\begin{cases} E_{aS} = \sum_1^N E_{jS} \\ E_{aD} = \sum_1^N E_{jD} \\ E_{aG} = \sum_1^N E_{jG} \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

L'orientation face au Sud sert à capter le maximum d'énergie solaire le long de l'année. La figure suivante présente la variation de l'énergie annuelle sur le site de Tlemcen. Pour un capteur  $(\alpha, \gamma)$  orienté au plein sud avec différentes inclinaisons :

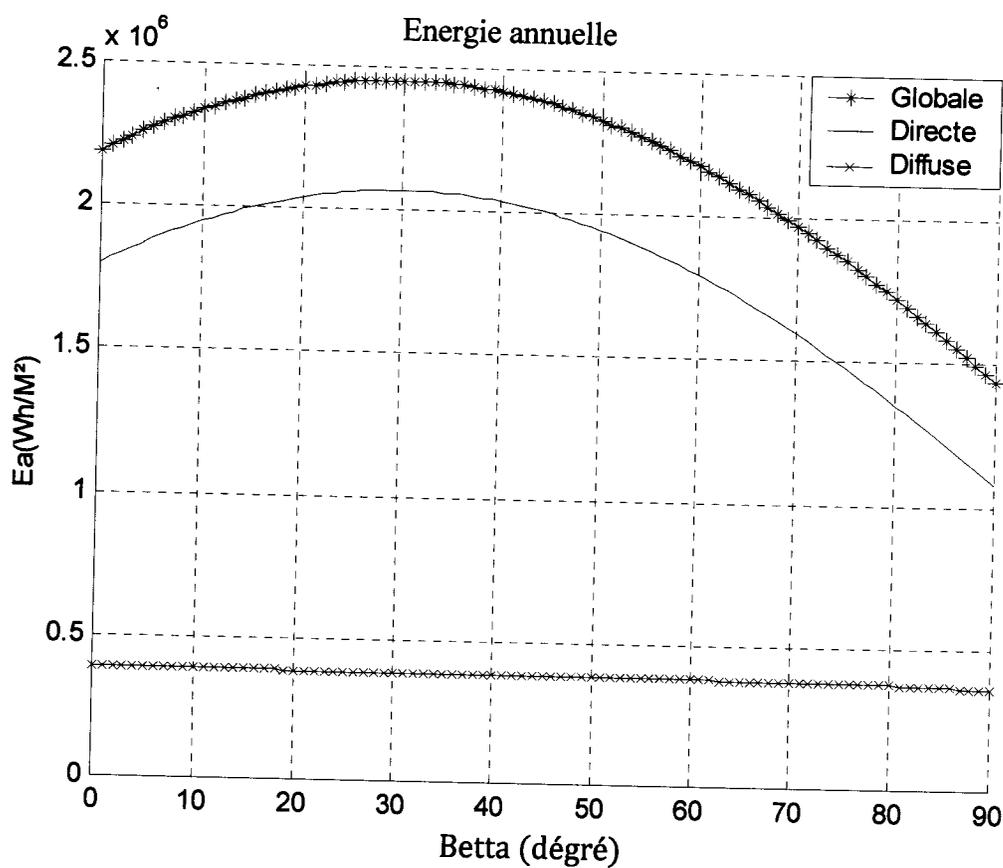


Figure IV-9 : L'énergie annuelle incidente sur un capteur quelconque sur le site de Tlemcen (ciel bleu clair).

Ce programme de simulation permet aussi l'optimisation de  $\alpha$  et  $\gamma$  pour l'obtention des valeurs maximales de  $E_{aS}$ ,  $E_{aG}$  et  $E_{aD}$ . Les résultats d'optimisation d'un capteur Sud obtenus pour le site de Tlemcen sont :

❖ Le maximum annuel de direct :

$$E_{aS}(\text{max}) = 2.0690 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2 \quad \text{pour} \quad \begin{cases} \alpha = 0^\circ \\ \gamma = (90 - 30)^\circ \end{cases}$$

❖ Le maximum annuel du diffus :

$$E_{aD}(\text{max}) = 3.8897 \cdot 10^5 \text{ Wh/m}^2 \quad \text{pour} \quad \begin{cases} \alpha = 0^\circ \\ \gamma = (90 - 7)^\circ \end{cases}$$

❖ Le maximum annuel du global :

$$E_{aG}(\text{max}) = 2.4516 \cdot 10^5 \text{ Wh/m}^2 \quad \text{pour} \quad \begin{cases} \alpha = 0^\circ \\ \gamma = (90 - 30)^\circ \end{cases}$$

Pour un capteur sud ( $\alpha = 0$ ,  $\gamma = 90 - \varphi$ ), les valeurs de  $E_{aS}$ ,  $E_{aG}$  et  $E_{aD}$  sont données respectivement par :

- Energie annuelle globale :  $E_{aG} = 1.73332 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- Energie annuelle directe :  $E_{aS} = 1.3885 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- Energie annuelle diffuse :  $E_{aD} = 0.3447 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$

Nous avons mis au point un programme de simulation qui nous a permis de tracer les rayons solaires incidents sur un capteur d'orientation quelconque et placé en n'importe quel lieu de la terre. Ce programme nous permet d'estimer les énergies incidentes sur ce capteur et d'optimiser cette énergie. On constate que pour des énergies annuelles maximales (globale et directe), l'inclinaison optimale d'un capteur sur le site de Tlemcen est obtenue pour une orientation face au sud, d'inclinaison  $\beta = \varphi - 5^\circ$  au lieu de  $\beta = \varphi$  trouvé dans la littérature solaire [2].

## V. Energies reçues par un capteur au fil du soleil

### ➤ Estimation de l'énergie instantanée :

Par un ciel moyen ce programme permet de simuler les énergies horaires (directe, diffuse et globale) pour un capteur qui suit le soleil à Tlemcen.

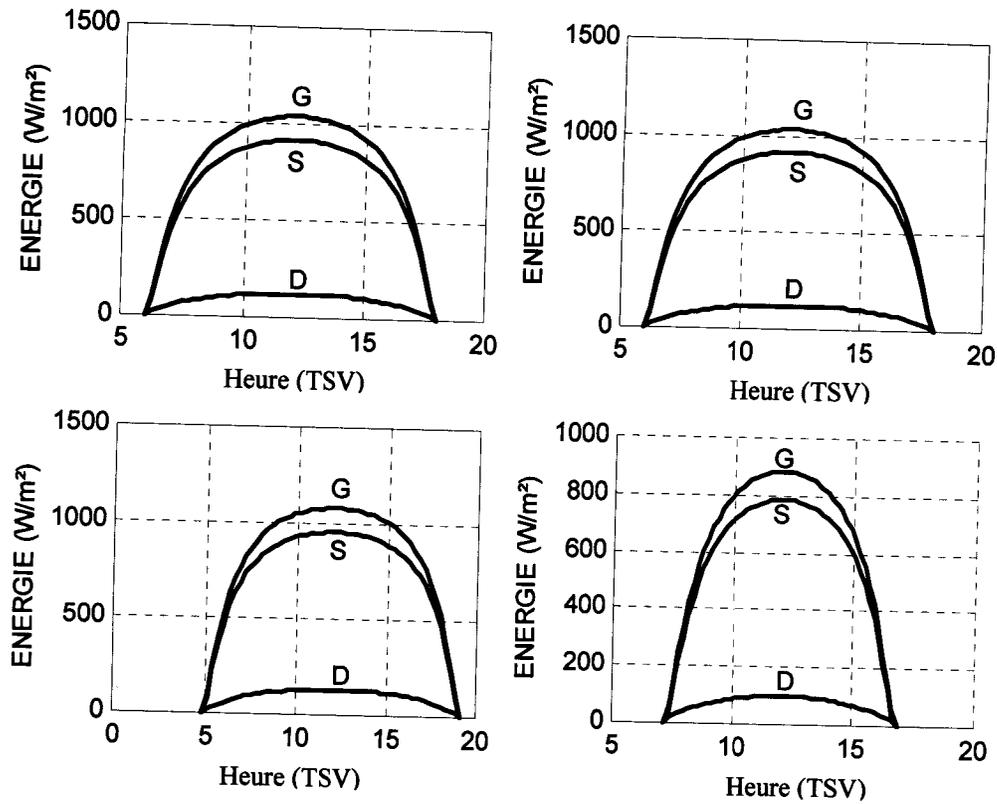


Figure IV-10 : Estimation de l'énergie instantanée pour un capteur qui suit le soleil au site de Tlemcen.

D'après les courbes représentatives de la variation de l'énergie en fonction du temps pour Les quatre saisons (SH-EP-EA-SE) à un ciel moyen et pour un capteur qui suit le soleil, on constate que l'énergie est à peu près constante durant toute la journée, contrairement pour le capteur TEL telle que l'énergie croît graduellement puis décroît pour atteindre une valeur nulle correspondante au coucher du soleil.

Pour les deux plans, la valeur maximale est au S.E à 12 heures TSV, elle vaut :

- Pour un plan qui suit le soleil :  $G_{MAX} = 1076,6 \text{ W/m}^2$ .
- Pour un plan TEL :  $G_{MAX} = 1000 \text{ W/m}^2$ .

Ainsi le minimum de puissance pour les deux capteurs au S.H à 12 heures TSV, les valeurs sont les suivantes :

- Pour un plan qui suit le soleil :  $G_{MIN} = 883.85 \text{ W/m}^2$ .
- Pour un plan TEL :  $G_{MIN} = 850 \text{ W/m}^2$ .

➤ **Estimation de l'énergie journalière :**

L'estimation d'énergie journalière incidente sur un capteur qui suit le soleil pour le site de Tlemcen donne les résultats suivants :

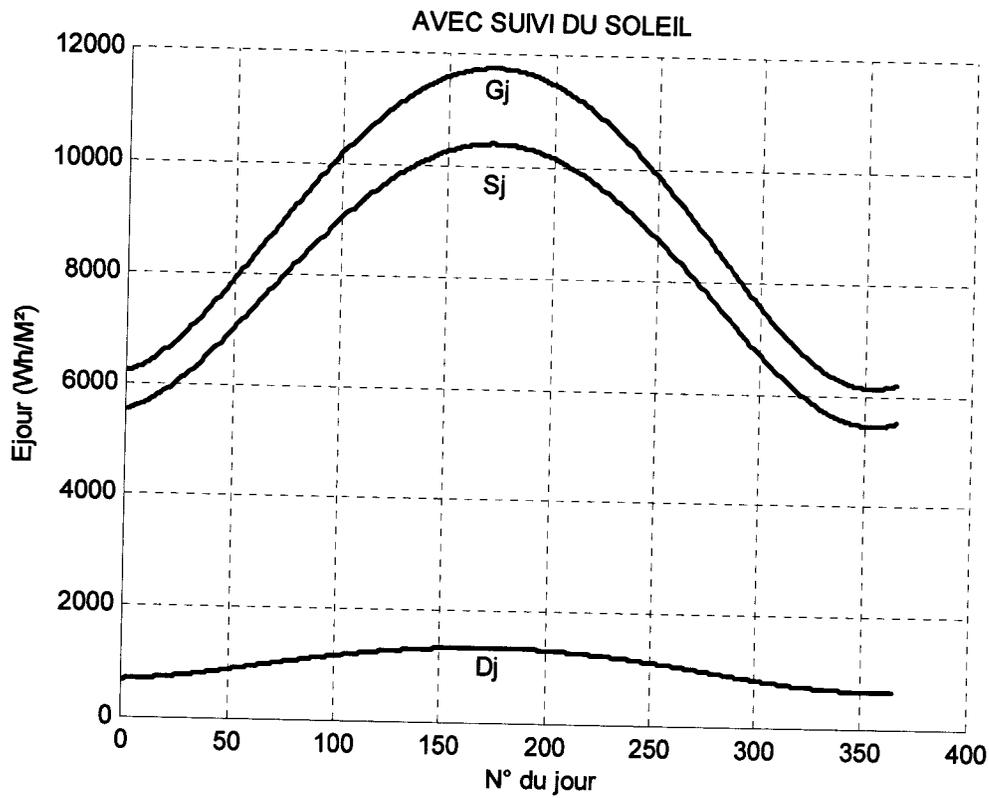


Figure IV-11 : Estimation d'énergie journalière pour le capteur qui suit le soleil.

D'après le graphe ci dessus, l'énergie journalière varie en fonction du quantième de l'année, le maximum d'énergie globale et directe correspond au SE et le minimum au SH.

Saisons	Capteur qui suit le soleil			Capteur TEL		
	E globale $\text{Wh/m}^2$	E directe $\text{Wh/m}^2$	E diffuse $\text{Wh/m}^2$	E globale $\text{Wh/m}^2$	E directe $\text{Wh/m}^2$	E diffuse $\text{Wh/m}^2$
EP - EA	9335	8273	1062	7229	6138.4	1090.6
SE	11743	10399	1344	7469.3	6159.7	1309.6
SH	6125	5451	675	4911.7	4188.6	723.1

Tableau IV-3 : Estimation d'énergie journalière pour les deux capteurs.

L'énergie incidente sur un capteur qui suit le soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année. Le maximum d'énergie journalière vaut:  $11743 \text{Wh/m}^2$  correspond au S.E et le

minimum vaut:  $6125,4 \text{ Wh/m}^2$  correspondent au S.H. On constate que cette énergie est quasi constante sur chaque journée de l'année.

➤ **Estimation de l'énergie annuelle incidente :**

La connaissance de l'énergie annuelle permet un bon dimensionnement du système.

Le programme de simulation de l'énergie annuelle pour un capteur au fil du soleil donne les résultats suivants :

- ❖ L'énergie annuelle directe :  $E_s = 2.956 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$ .
- ❖ L'énergie annuelle diffuse :  $E_D = 0.377 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$ .
- ❖ L'énergie annuelle globale :  $E_G = 3.334 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$ .

## VI. Application aux systèmes à concentration

Dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré.

### VI-1. Energie incidente sur le concentrateur

➤ **Estimation de l'énergie instantanée pour un concentrateur qui suit le soleil :**

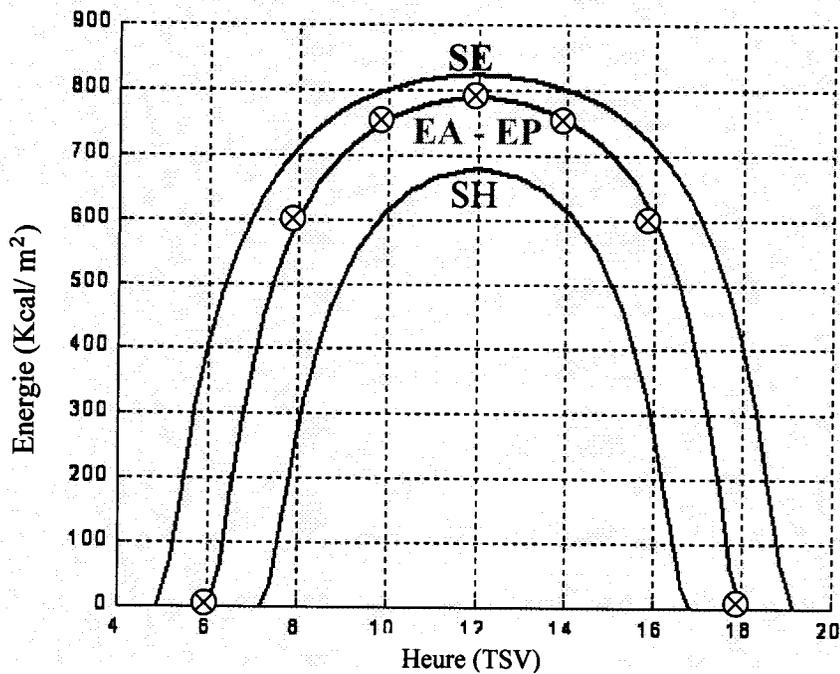


Figure IV-12 : Energie instantanée direct sur un concentrateur

aux équinoxes et aux solstices pour le site de Tlemcen (Ciel bleu Clair).

— : Simulation

⊗ : Expérimentation

La figure (IV-12) nous illustre la variation de l'énergie instantanée incidente sur un capteur qui suit le soleil théorique et expérimental et nous remarquons bien que le maximum est à 12 TSV mais la courbe expérimentale le cinquième point est très loin. Son explication est qu'il y avait un passage nuageux pendant la période de mesure (14h TSV). Les mesures ont été réalisées à l'équinoxe de printemps (20 Mars 2003).

➤ **Estimation de l'énergie journalière pour un concentrateur qui suit le soleil :**

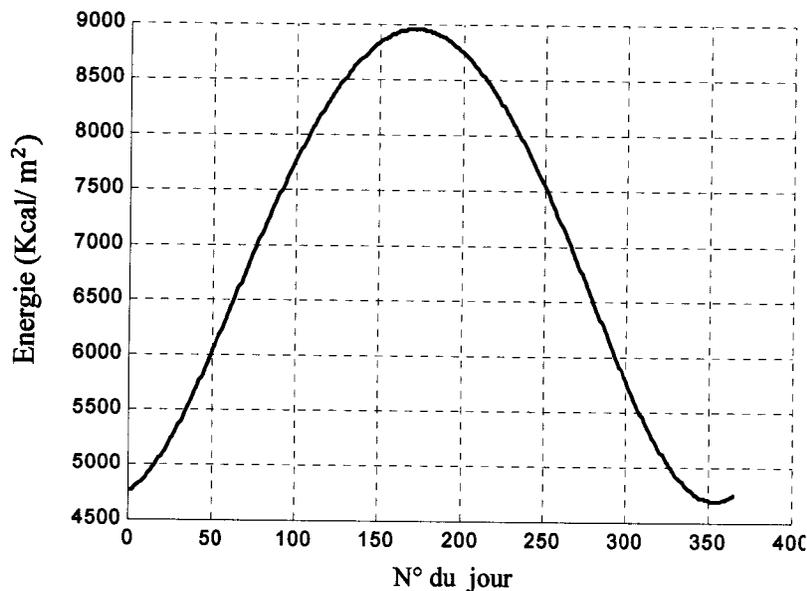


Figure IV-13 : Energie journalière directe incidente sur un concentrateur  
(Site de Tlemcen, Ciel bleu clair).

La figure (IV-13) montre la variation de l'énergie journalière directe incidente sur le concentrateur durant toute l'année. On reçoit le maximum au solstice été (N = 171) qui correspond au 21 juin,  $S_{\text{Max}} = 8956 \text{ Kcal/m}^2$ .

## VI-2. L'énergie à l'entrée de la fibre

Nous étudions la variation des énergies à l'entrée de la fibre optique aux équinoxes.

Nous utilisons pour notre étude :

- Un miroir parabolique qui a les caractéristiques géométriques suivantes :  $f = 11 \text{ cm}$  et  $R_c = 38,79 \text{ mm}$ , de surface réfléchissante fabriquée en Argent et bien adapté à la fibre Q.S.F 1000.
- Une fibre optique Q.S.F 1000, elle a un diamètre  $d = 1 \text{ mm}$ , l'atténuation moyenne du cœur sur l'ensemble du spectre solaire est :  $\bar{\tau} = 2.10^{-2} \text{ dB/m}$ . La longueur de la fibre est  $l = 5 \text{ m}$ .

Le coefficient moyen  $C_t$  relatif à la tache image s'écrit [2] :

$$C_t = \frac{P_0}{P_{in}} = \frac{\sin^2(2\theta_0)}{4\epsilon_0^2} \quad (IV.16)$$

Avec :

- $P_0$  : Puissance reçue sur la tache du foyer du concentrateur.
- $P_{in}$  : Puissance incidente sur le concentrateur.
- $\epsilon_0$  : est égal à  $4,654 \cdot 10^{-3}$  rd.
- $\theta_0$  : L'ouverture du concentrateur.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P_0 - P_f}{P_0} \quad (IV.17)$$

Où:

- $P_f$  : Puissance à l'entrée de la fibre.

Nous déterminons l'énergie solaire concentrée à l'entrée de cette fibre par la relation :

$$P_f = \frac{\sin^2(2\theta_0)}{4\epsilon_0^2} P_{in} \gamma^2 \cos^4 \frac{\theta_0}{2} \quad (IV.18)$$

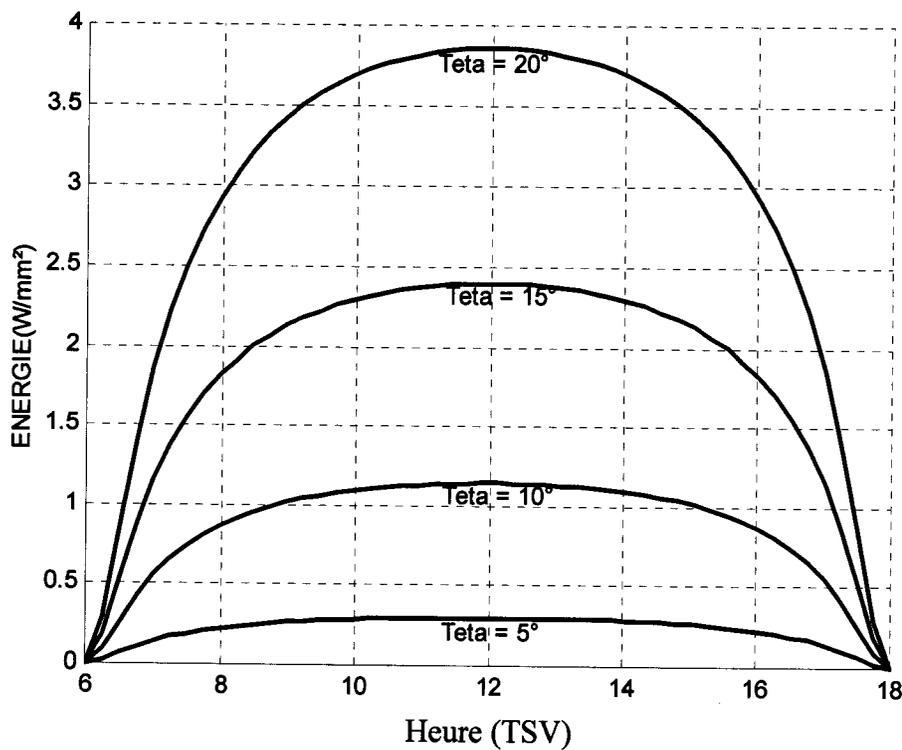


Figure IV-14 : Energie instantanée à l'entrée d'une fibre aux équinoxes et pour différentes ouvertures (Site de Tlemcen).

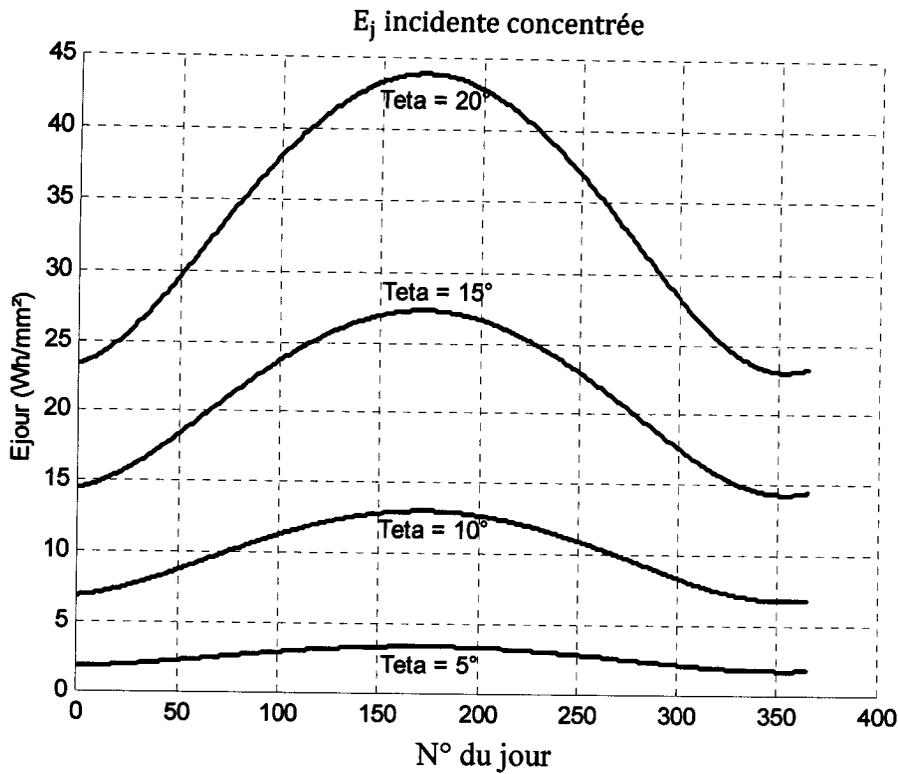


Figure IV-15 : Energie journalière à l'entrée de la fibre pour différentes ouvertures (site de Tlemcen).

Les figures (IV-14) et (IV-15) montrent l'influence de l'ouverture du concentrateur sur l'estimation des énergies (instantanée et journalière) à l'entrée de la fibre optique, et confirment la conception de cette dernière.

### VI-3. L'énergie solaire à la sortie de la fibre optique

On se limitant aux conditions suivantes :

- $\theta = 20^\circ$
- Un rendement de 75% est obtenu en tenant compte des atténuations suivantes :
  - Pertes du Miroir : 8 % ( $\rho_M = 92\%$ ). Fabriqué en Argent.
  - Pertes par Réflexion sur les extrémités de la fibre : 2 (3,5) % ( $\rho_F = 93\%$ ).
  - Pertes en Lignes : 10 % ( $I = 90\%$ ).
  - Pertes Interface Fibre - Concentrateur 0 % ( $\eta = 1$ ).

Nous avons mis au point un programme de simulation qui permet l'estimation de l'énergie thermique de sortie de la fibre optique solaire en fonction de ces différentes longueurs.

Pour déterminer la puissance transportée par la fibre nous utilisons la loi de Beerlambert [2]:

$$P_s = P_f \exp(-0,1\bar{\tau} l) \quad (\text{IV.19})$$

Avec :

- $P_s$  : Puissance de sortie de la fibre.

- $P_f$  : Puissance à l'entrée de la fibre.
- $\bar{\tau}$  : L'atténuation moyenne du cœur sur l'ensemble de spectre solaire.

Le terme  $\exp(-0,1 \bar{\tau} l) = 0,99$  pour  $l = 5m$  et  $\bar{\tau} = 2.10^{-2}$  dB/m.

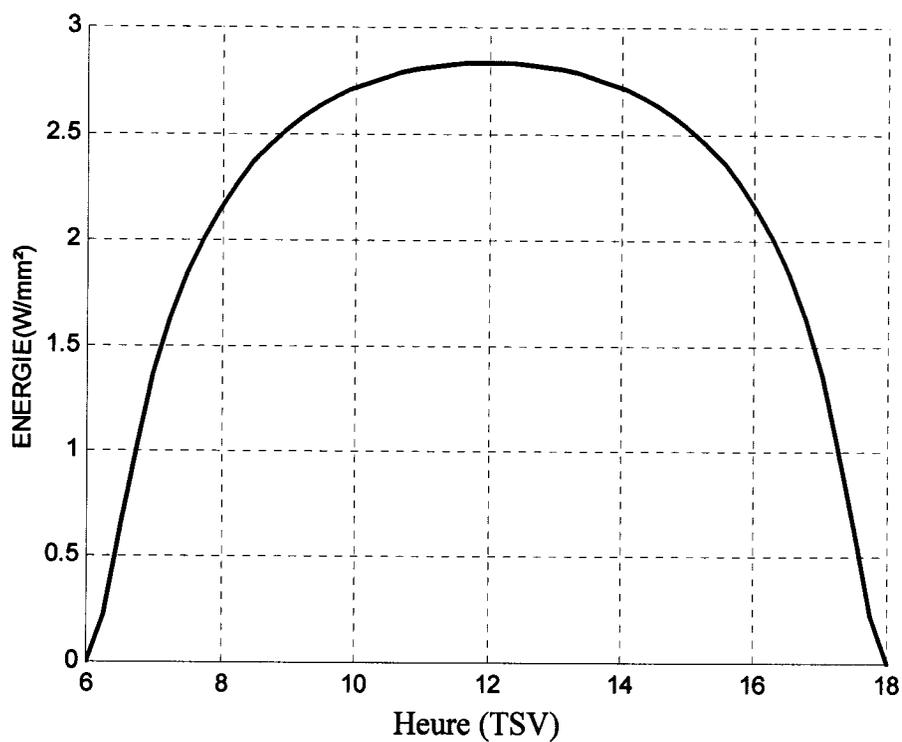


Figure IV-16 : Energies instantanées de sortie d'une fibre de longueur  $l = 5m$ .

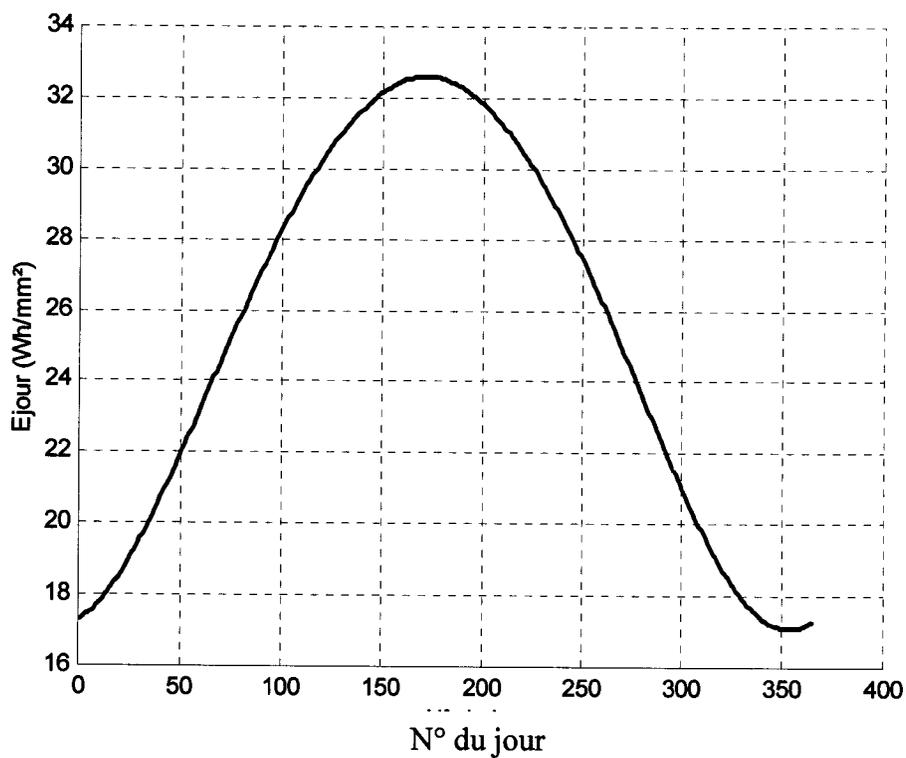


Figure IV-17: Energies journalières de sortie d'une fibre de longueur  $l = 5m$ .



Ces deux figures permettent la détermination de la puissance de sortie d'une fibre solaire de 5 mètres de longueur.

L'énergie instantanée est maximale à 12 TSV elle vaut 2,86 W/mm<sup>2</sup>.

L'énergie journalière est maximale au solstice été elle est égale à 32,59 Wh/mm<sup>2</sup>.

Les figures traduisent l'influence du rendement du système et de l'atténuation de la fibre sur sa puissance de sortie.

Ps (W)	5°	10°	15°	20°
L = 5m	0,2215	0,8494	1,7808	2,8652
L = 10m	0,2193	0,8409	1,7631	2,8367

Tableau IV-4 : Puissance de sortie de la fibre aux équinoxes pour deux longueurs différentes

- Pour une longueur l = 5m

Ps (W)	5°	10°	15°	20°
Miroir en Argent	0,2215	0,8494	1,7808	2,8652
Miroir en Aluminium	0,1669	0,6399	1,3417	2,1587

Tableau IV-5 : Puissance de sortie de la fibre aux équinoxes pour deux miroirs différents

Nous traçons la puissance de sortie de la fibre en fonction de différentes longueurs de la fibre.

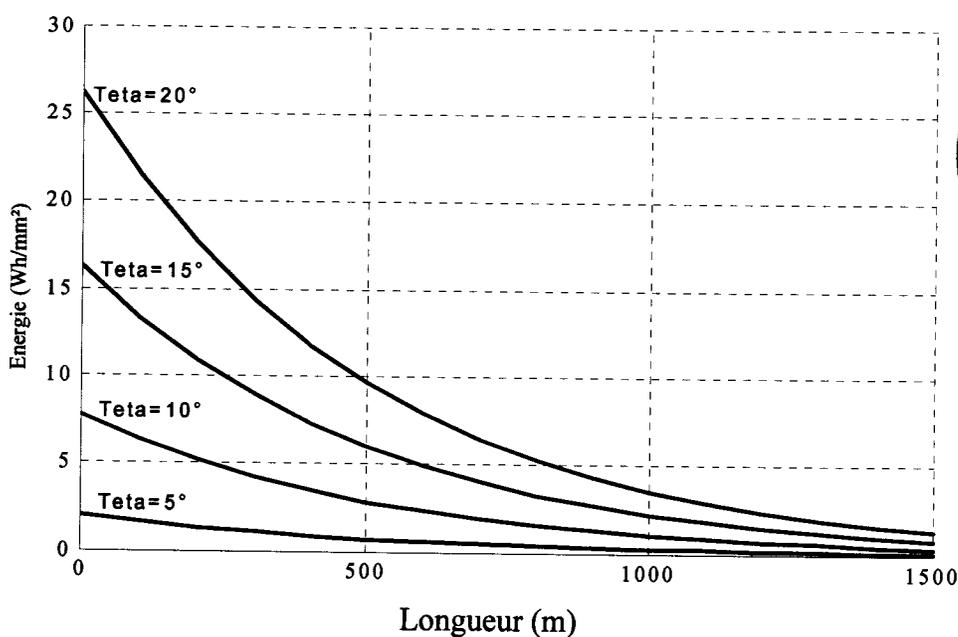
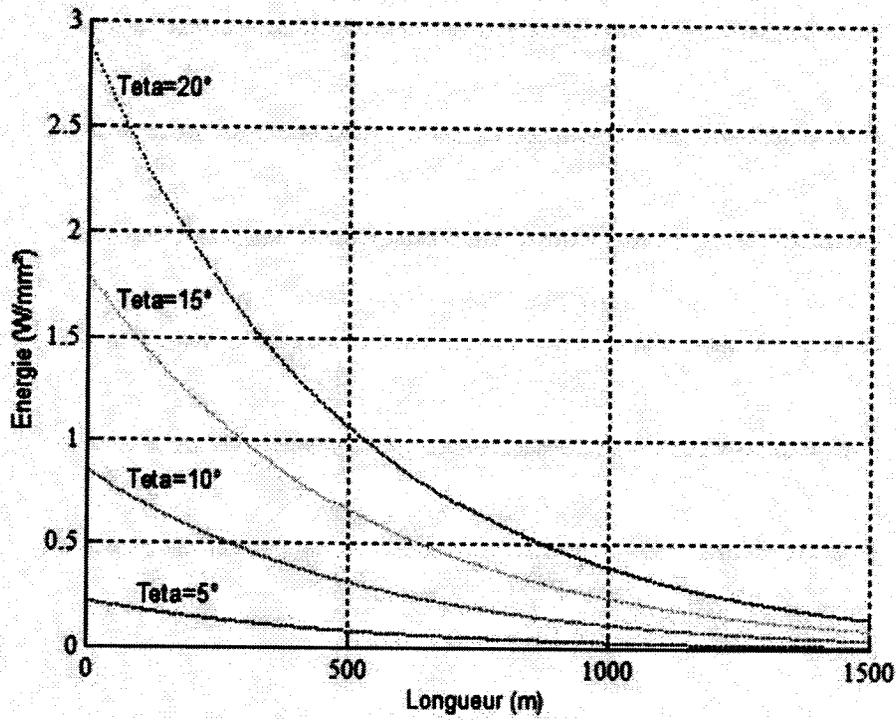


Figure IV-18 : Variation de l'énergie journalière aux Equinoxes en fonction des différentes longueurs de la fibre.



Ces deux courbes illustrent l'influence de la longueur de la fibre. Bien que l'atténuation augmente avec la longueur de la fibre.

Pour quatre ouvertures, la puissance est inversement proportionnelle à la longueur de la fibre, la puissance peut être transportée jusqu'à 1500m.

Les deux figures suivantes montrent l'influence de la longueur et du diamètre de la fibre optique sur l'estimation des énergies à la sortie de la fibre optique. On ne peut pas dépasser l'ouverture de 20° parce qu'on est limitée par l'ouverture numérique de la fibre.

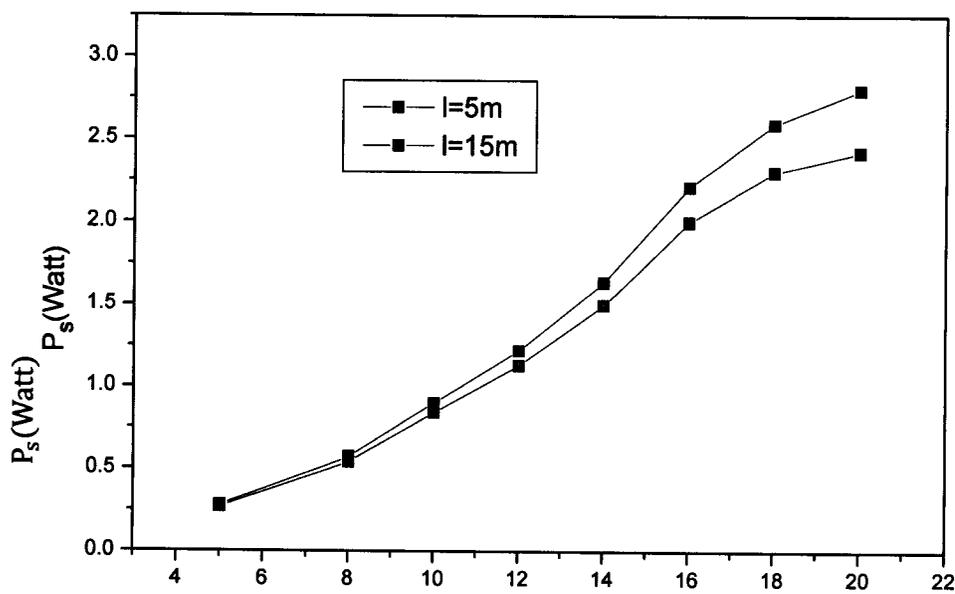


Figure IV-20 : Influence de la longueur de la fibre sur la puissance  $P_s$  pour les différentes ouvertures du concentrateur.

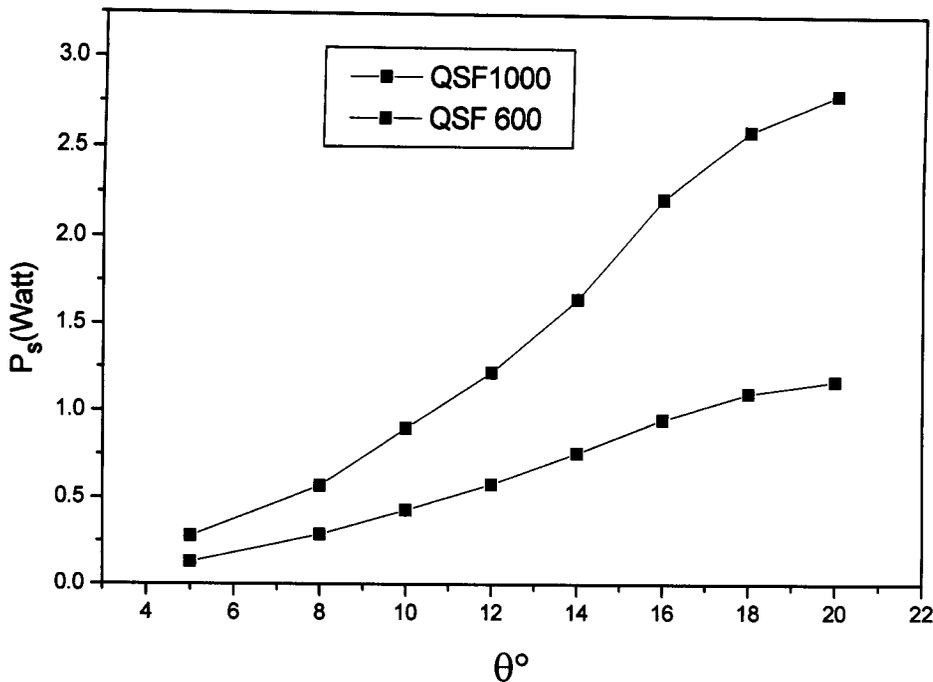


Figure IV-21 : Influence du diamètre de la fibre sur la puissance de sortie pour les différentes ouvertures du concentrateur.

D'après la figure (IV-20) nous remarquons l'influence de la longueur de la fibre. Les résultats obtenus montrent que les pertes de puissance sont proportionnelles aux longueurs de la fibre. Concernant la figure (IV-21), nous avons tracé la puissance en sortie de la fibre en fonction de l'ouverture du concentrateur pour deux fibres de diamètre différent, nous constatons que la fibre QSF 1000 donne de bons résultats.

## VII. Conception d'un procédé économique

Après avoir développé dans les chapitres précédents les notions du rayonnement solaire et de sa concentration, ainsi ce que sont les conducteurs de lumières, nous avons mis au point un programme de simulation qui nous a permis d'estimer la température de sortie du fluide (eau) donnée dans la figure (IV-12), du montage suivant que nous avons conçu :

### VII-1. Description du dispositif

Le concentrateur est un miroir parabolique qui a les caractéristiques géométriques suivantes :  $R=366\text{mm}$  ; la distance focale  $f=10\text{ cm}$ .

Une fibre optique QSF 1000 avec une longueur de  $l = 5\text{m}$  composée d'un cœur de quartz et de silice possède un cœur de  $1\text{ mm}$  de diamètre, fabriqué en Silice de synthèse, d'atténuation moyenne  $\tau$  égale à  $2.10^{-2}\text{ dB/m}$  sur l'ensemble du spectre solaire, une ouverture numérique de  $\theta_F = 20^\circ$ , entourée par une canalisation d'eau de ville afin de permettre un refroidissement de cette dernière.

Nous avons conçu un absorbeur sphérique, ce dernier a un rayon  $R=25\text{cm}$ .  
 L'absorbeur englobe toute la surface interne de la sphère, il est constitué d'une peinture noir sur cuivre avec les coefficients d'absorption  $\alpha = 0.95$  et d'émission  $\varepsilon = 0,18$ .  
 L'ensemble du Sphère + fibre est isolé avec de la laine de verre.

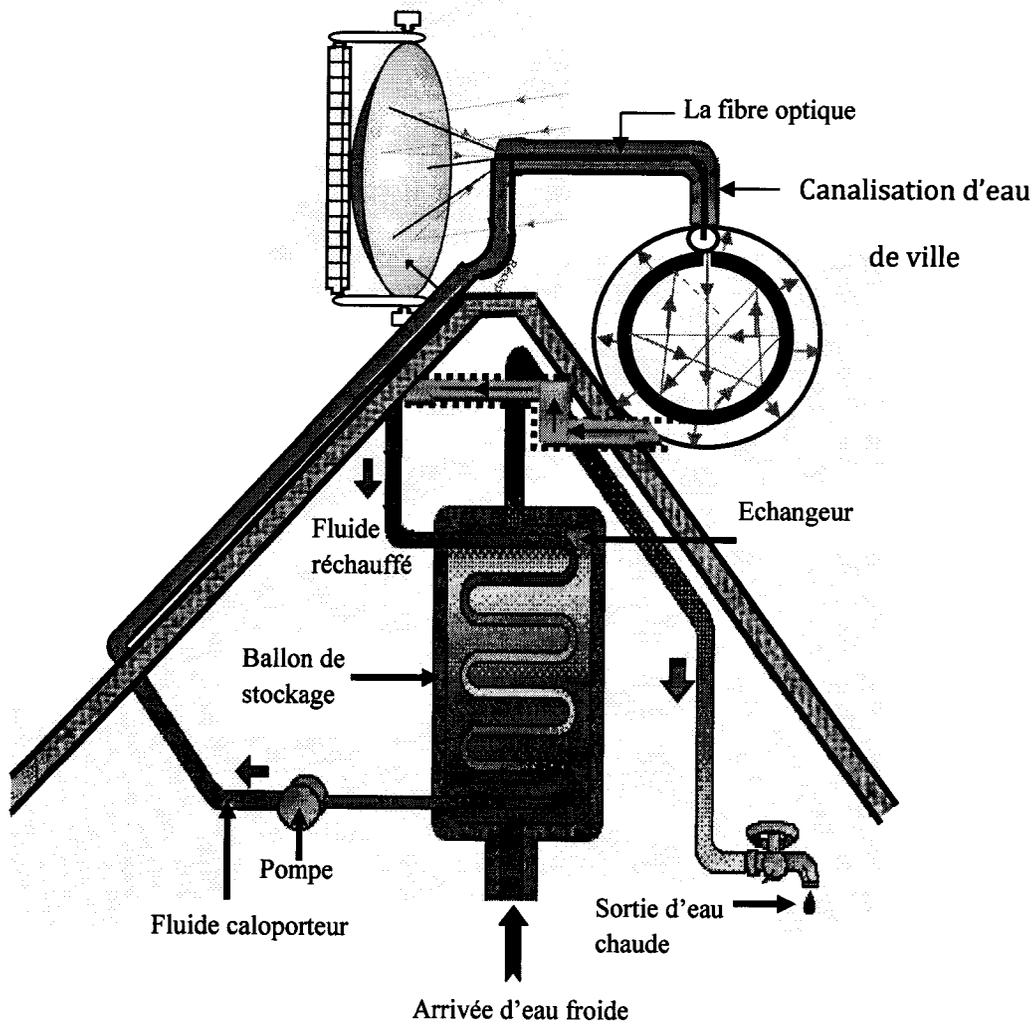


Figure IV-22 : Schéma de l'expérience.

Pour déterminer la température de sortie du fluide de la sphère, il faut savoir :

- La puissance de sortie de la fibre que nous avons déterminée dans les chapitres précédents.
- La surface de la sphère (S).

$$S = \frac{3\pi R^2}{4} - S_F \quad (\text{IV-20})$$

Avec :

- $R = 250\text{mm}$  : est le rayon de la sphère.
- $S_F$  : est la surface de la fibre optique.

$$P_s = hS\Delta T \quad \text{d'où} \quad \Delta T = P_s/hS \quad (\text{IV-21})$$

Avec :

$$h = \text{Nu} \cdot \lambda / D \quad (\text{IV-22})$$

$$\text{Nu} = 0,0259 \cdot (\text{Re}^{4/5}) \quad (\text{IV-23})$$

$$\text{Re} = U \cdot \frac{D}{\mu} \quad (\text{IV-24})$$

Avec :

- $\lambda = 0.143 \text{ cal}/(\text{Sec. m} \cdot ^\circ\text{C})$ .
- $\mu = 0,985 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{Sec}$
- $U = 1\text{m}/\text{Sec}$
- $D = 0,02\text{m}$  sont les caractéristiques de l'eau.
- D'où  $\text{Re} = 20304$  ;  $\text{Nu} = 72.33$  et  $h = 517.16 \text{ cal}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$ .

Pour la détermination de la température de sortie du fluide, nous avons mis un programme de simulation qui consiste à déterminer :

- L'énergie instantanée et journalière pour le site de Tlemcen.
- L'énergie concentrée à l'entrée de la fibre.
- L'énergie à la sortie de la fibre.
- La surface de la sphère utilisée.
- Ainsi que les pertes à l'entrée, à la sortie de la fibre et le transport de cette énergie par le fluide caloporteur et enfin la température du fluide dans le réservoir.

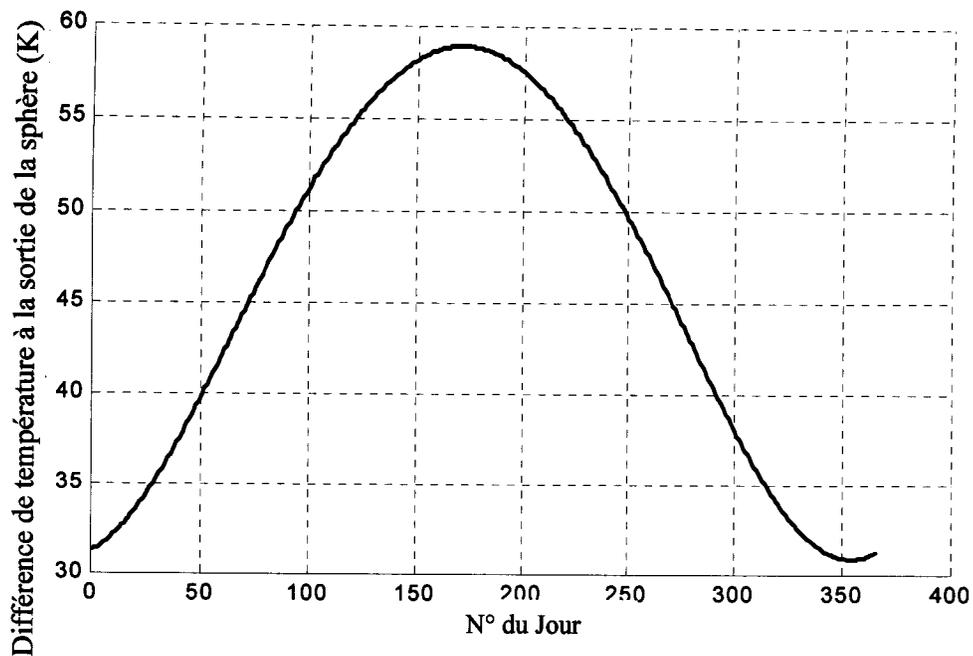


Figure IV-23: Différence de température d'entrée sortie d'eau.

D'après ces résultats nous remarquons qu'il y a une très grande différence entre la température d'entrée et de sortie, elle est de l'ordre de  $32^{\circ}\text{K}$  en hiver et  $58^{\circ}\text{K}$  en été. Dans une deuxième conception nous allons utiliser de l'air comme fluide caloporteur pour le chauffage de l'habitation pour cela nous fermons le robinet d'eau (figure IV-24).

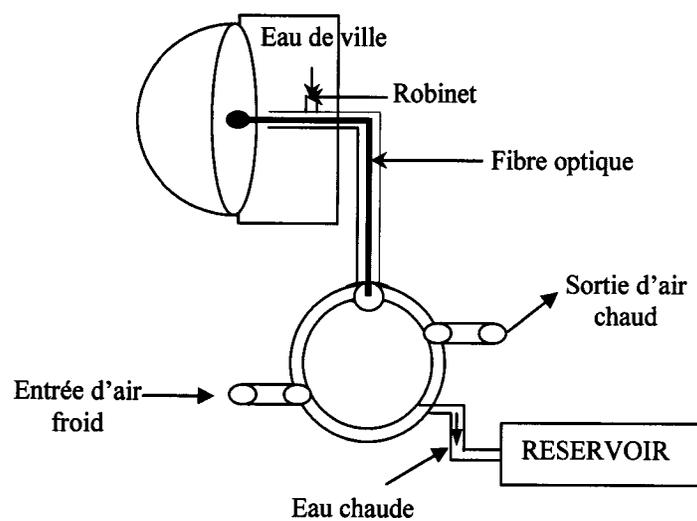


Figure IV-24 : Capteur photo thermique sphérique à air.

De la même façon comme le calcul de la différence de température d'entrée sortie d'eau chaude sanitaire nous calculons la différence de température d'entrée sortie d'air du système qui a les caractéristiques suivantes :

$$P_s = h_1 S \Delta T \quad \text{D'où} \quad \Delta T = \frac{P_s}{h_1 S} \quad (\text{VI-25})$$

Avec :

$$h_{11} = \frac{(Nu_1 \lambda_1)}{D} \quad (\text{VI-26})$$

$$Nu_1 = 0,0259 \cdot (Re_1^{4/5}) \quad (\text{VI-27})$$

$$Re_1 = U_1 \cdot \frac{X}{\mu_1} \quad (\text{VI-28})$$

Avec :

- $\lambda_1 = 0.0255 \text{ W/(m. } ^\circ\text{C)}$
- $\mu_1 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Sec}$
- $U = 5 \text{ m/Sec}$
- $D = 0.02\text{m}$  sont les caractéristiques de l'air. Et les résultats sont donnés dans la figure (IV-25).

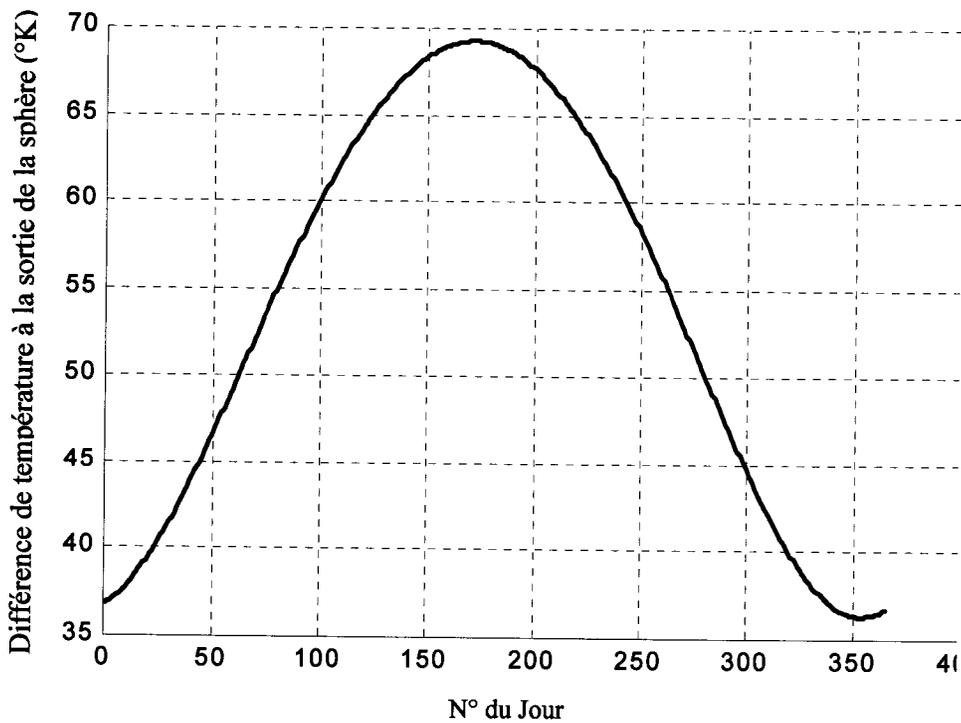


Figure IV-25 : Différence de température d'entrée sortie d'air.

Nous remarquons que la différence de température d'entrée sortie d'air est de l'ordre de  $36^\circ\text{K}$  en hiver et elle peut atteindre les  $70 \text{ K}$  en été.

Là aussi on peut jouer sur la vitesse de circulation d'air et sur la surface d'échange du cône pour augmenter le transfert de chaleur.

➤ **Transport mixte**

Nous utilisons un chauffage mixte ou le transport de calories s'effectue aussi bien par l'air que par l'eau. Pour cela nous avons fixé la différence de température d'entrée sortie d'eau à 20°C et nous avons essayé de déterminer la quantité de chaleur transportée par l'air pour le chauffage d'une habitation (voir figure IV-26).

Pour déterminer la différence de température d'entrée sortie d'air, on procède de la façon suivante :

- $Q$  : La quantité introduite par la fibre optique.
- $Q_1$  : La quantité de chaleur transportée par l'eau.
- $Q_2$  : Les pertes de chaleur à travers le système.
- $Q_3$  : La quantité de chaleur transportée par l'air.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \Rightarrow Q_3 = Q - (Q_1 + Q_2) \quad (\text{VI-29})$$

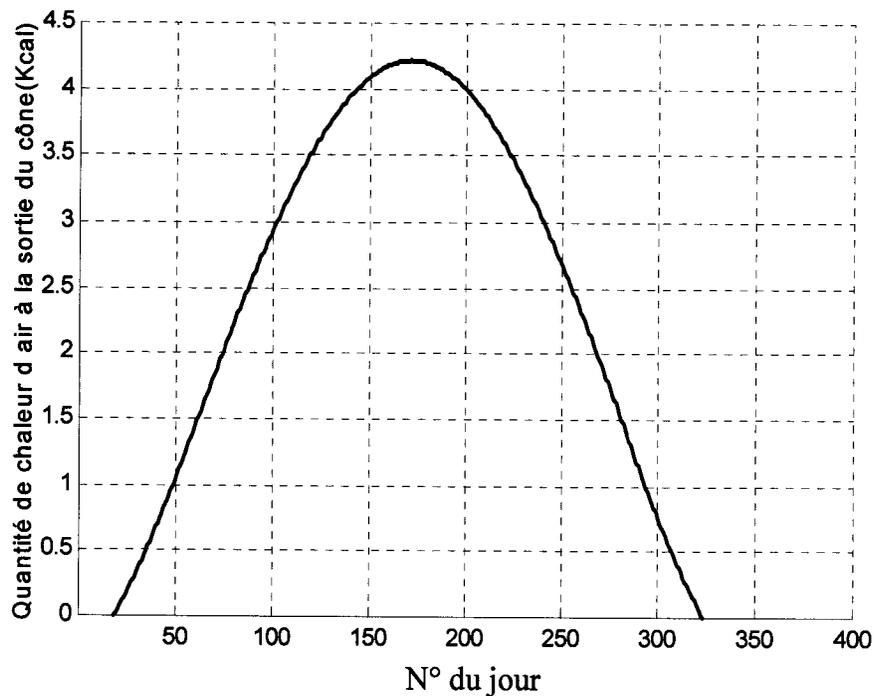


Figure IV-26 : Quantité de chaleur journalière transportée par l'air à Tlemcen pour un ciel bleu clair.

Après la détermination de la quantité de chaleur qui sort du cône nous allons déterminer la différence de température d'entrée sortie de l'air de la même façon que celle de l'eau. Les résultats de simulation sont représentés sur la figure IV-27 :

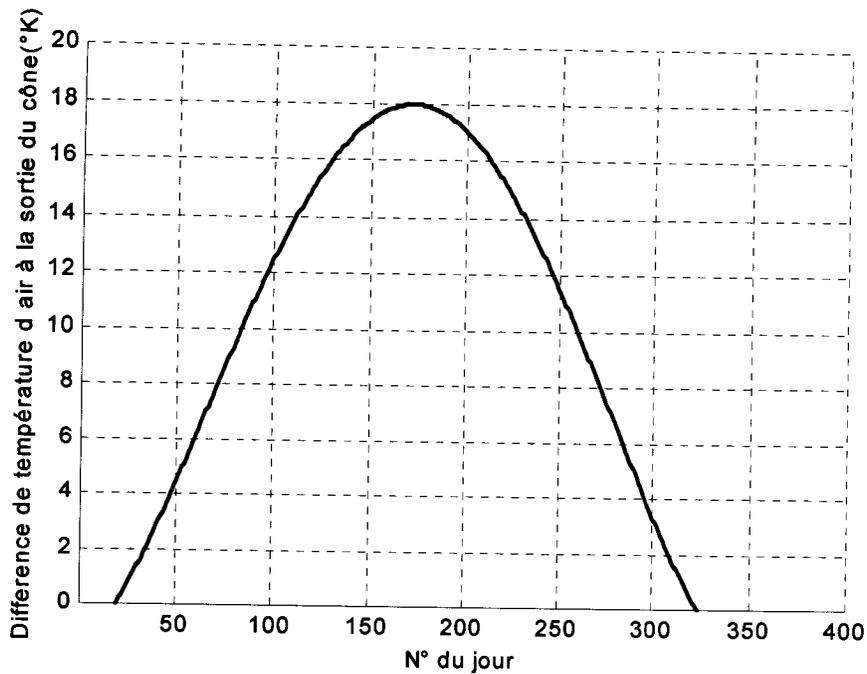


Figure IV-27 : Evolution de la différence de température journalière transporté par l'air à Tlemcen

Le choix des vitesses de circulation d'eau et d'air par un système de régulation permet l'apport d'eau chaude sanitaire et le chauffage adéquat d'une habitation. Mais ce qui est intéressant dans cette partie de notre travail c'est la période hivernale parce que c'est dans cette période ou on aura besoin du chauffage. Pour cela nous avons tracé la température de sortie d'air de notre système pour différente fixation de la température du fluide (eau) caloporteur (figure IV-28), C'est-à-dire on peut jouer sur la vitesse de circulation de l'eau utili

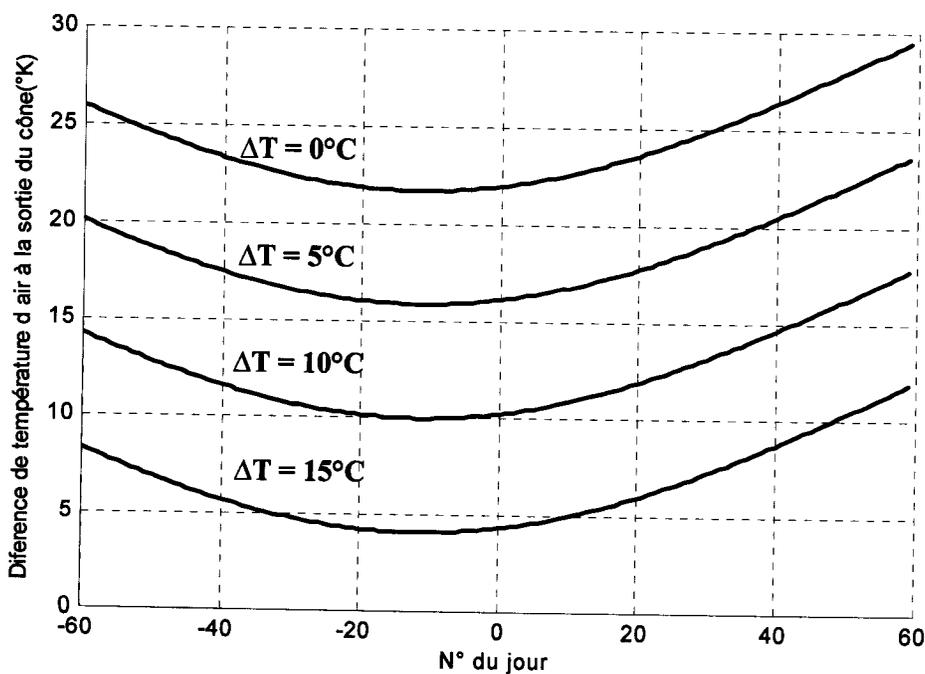


Figure IV-28 : Evolution de la différence de température transportée par l'air pendant la période hivernale.

### VIII. Conclusion

L'énergie solaire concentrée peut être transportée avec des conducteurs de lumière, cette technique s'avère très prometteuse quant aux applications thermiques. Elle devrait permettre une utilisation de l'énergie solaire concentrée avec des rendements de puissance qui peuvent dépasser les 50% (Températures atteintes à 1500 et 3000°C), parmi ces applications les fours solaires. Dans ce dernier chapitre nous avons élaboré un logiciel qui permet d'estimer l'énergie incidente au fil du soleil, cette énergie se concentre sur une tache au foyer d'un miroir parabolique, l'énergie concentrée peut être transférée puis transportée par une fibre optique. Le programme de simulation réalisé détermine la puissance de sortie de la fibre optique QSF1000, ainsi que les températures de l'eau chaude sanitaire dans le réservoir et de l'air à la sortie du cône pour le chauffage de l'habitation. Ce programme est plus général, on peut estimer cette puissance et ces températures durant toute l'année, en n'importe quel moment et n'importe quel lieu de la terre, pour des fibres et des concentrateurs différents. Et tout ce travail contribue à beaucoup d'application, la plus récente est la réalisation des fours solaires.

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire présente donc un intérêt particulier pour les pays en voie de développement : elle est susceptible d'améliorer très rapidement et moyennement un cout minimal les conditions de vie et de productivité des habitations géographiquement dispersées. Employer l'énergie solaire pour le chauffage de l'habitat et la production de d'eau chaude est désormais possible et d'actualité. D'ores et déjà, les conditions économiques font que l'investissement supplémentaire nécessaire s'amortit en moins de dix ans ; pour certaines applications elles assurent aux utilisateurs économiques et sécurité pour des fonctions essentielles de l'habitat. Le développement des équipements solaires justifie et renforce le souci d'autonomie énergétique au niveau national. Cependant, la réalisation des maisons utilisant l'énergie solaire répond à des problèmes à l'échelle d'une famille ou au mieux de quelques familles. Mais la vie sociale regroupe des concentrations humaines plus importantes qui posent des problèmes tout à fait différents.

L'apparition de la fibre optique en transmission et son application aux différents domaines lors de ces dernières années, n'étaient pas seulement dû à une soif de créer de nouveaux systèmes mais aux caractéristiques remarquables que représentent ces conducteurs de lumière.

De nombreux champs d'applications de ces conducteurs de lumière ont été abordés en littérature. Nous citons parmi les nombreuses applications :

- ❖ L'incapacité de dépôt de fil de cuivre le long des câbles électriques à cause de la sensibilité aux interférences électromagnétiques.
- ❖ Dépôt des fibres optiques dans les galeries des mines souterraines, des centrales nucléaires (dimensions et absence d'étincelles).
- ❖ Capteur de température dans les réacteurs des avions.
- ❖ Communications téléphoniques terrestres et sous-marines.
- ❖ Transport d'énergie solaire sous une forme radiative du concentrateur jusqu'aux fours solaires qui ont un impact important dans l'industrie solaire.

Notre étude nous a permis d'apprécier particulièrement cette dernière application. L'énergie solaire incidente et relativement faible, l'utilisation de la concentration permet d'augmenter la densité de puissance, et la fibre constitue un bon support pour transporter le maximum de puissance avec des faibles atténuations.

Après avoir défini la notion des fibres optiques, les contraintes physiques inhérentes à la conception, nous serons amenés à utiliser un bon concentrateur dont l'ouverture est limitée

à celle du conducteur optique. Nous avons réalisé un système pour lequel l'énergie concentrée se transporte le long d'une fibre optique, à la sortie nous mettons la sphère absorbante et nous déterminons la quantité de chaleur à la sortie de ce dernier et la température dans le réservoir. Ce dernier facilite la diffusion de la chaleur et un confort dans la maison solaire.

Pour déterminer l'énergie de sortie de cette fibre, nous avons réalisé un programme de simulation en utilisant le logiciel MATLAB. Le travail que nous avons mené dans ce mémoire a été orienté vers l'estimation de l'énergie de sortie d'une fibre solaire et ceci pour une conception et optimisation des fours solaires.

Ce programme est général, On peut déterminer la puissance de sortie en n'importe quel lieu de la terre, à n'importe quel moment, et même en changeant le type de concentrateur et de la fibre solaire utilisée.

Tout au long de ce travail nous avons abordé les aspects physiques du transport de l'énergie solaire dans les conducteurs de lumière ainsi que l'application aux réalisations des fours solaires.

Bien qu'étant maintenant convaincus de l'intérêt de cette technique, nous restons parfaitement conscients qu'il faudra traiter le problème du prix de revient. Ce n'est qu'en franchissant cette étape que doivent devenir opérationnelles des utilisations industrielles du transport optique de l'énergie solaire concentrée.

En conclusion, il est certain que si l'on parvient à mettre au point des systèmes de chauffage efficace, performant et économique, c'est un vaste marché qui s'ouvrira dans les pays chauds.

## **'Références Bibliographiques'**

- [1] : Séminaire National sur « l'énergie solaire », Université de Tlemcen 1989.
- [2] : C.Zidani, « Etude du transport d'énergie solaire par fibres optiques : Application aux systèmes à concentration », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2002.
- [3] : A.Mammeri, « Conversion d'énergie », Manuelle de cours, Chapitre 1, Université de Tlemcen 2007/2008.
- [4] : J.Royer, T.Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuelle de cours, Université d'Ottawa, 1998.
- [5] : P.Bessemoulin, J.Oliviéri, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », La météorologie 8° série – n° 31, Septembre 2000.
- [6] : R.Bernard, G.Menguy, M.Schwarty, « Le rayonnement solaire, Conversion thermique et application », Technique et Documentation, Paris 1980.
- [7] : Le site web : <http://www.enpc.fr>.
- [8] : A.Labouret, M.Villor, « Energie solaire photovoltaïque », 3<sup>ème</sup> édition le moniteur, Maison d'édition Dunod, 2003.
- [9] : J.M.Chasseriaux, « Systèmes à concentrations », Document de cours, Université Paris 7, 1984.
- [10] : Le site web : <http://www.giovanola.ch>.
- [11] : Yves Jannot, « Thermique solaire », Cours de Transfert thermique 2<sup>ème</sup> année, Ecole des Mines Nancy, Octobre 2003.
- [12] : Le site web : <http://www.cermep.fr>.
- [13] : H.I.Faraoun, « Les propriétés optiques des solides », Document de cours, Université de Tlemcen, 2008/2009.
- [14] : Microsoft encarta 2008.
- [15] : Philippe Roux, « Cours de thermique », 2006.
- [16] : Chikh Blad, « Les fibres optiques », Document de cours, Université de Tlemcen, 2008/2009.
- [17] : Pierre Lecoy, « Traité des nouvelles technologies de télécommunications », Edition Hermes, 1999.
- [18] : Le site web : <http://www.telcite.fr>.

- [19] : N.Bouchenak Khalladi, « Etude et modélisation de la propagation d'une impulsion dans un milieu dispersif », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2007/2008.
- [20] : Laurent Baysse, « La fibre optique... », 6 Mars 2005.
- [21] : M.Françon, « Thèmes actuels en optique », Cours de physique fondamentale et application, Université Pierre et Marie – Curie, 1986.
- [22] : H.Derbal, « Conversion solaire thermique à concentration, Les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques », Centre de développement des énergies renouvelables, Juin 2007.
- [23] : K.Ogilvie, « L'Abc des Technologies de l'Energie Renouvelable », Pollution Probe, Canada, Septembre 2003.
- [24] : N.Senoussaoui, « Etude et réalisation d'un concentrateur parabolique, mesure et simulation », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 1994.
- [25] : D.K.Edwards / Traduit par L.Marlot, « Capteurs solaire », SCM place des reflets 92081, Paris – La défense 2.
- [26] : A.Ferrière, « Les centrales solaires thermodynamiques: L'Etat de l'art et les perspectives mondiales », Colloque de l'institut ENSAM de Corse, Bastia, Mars 2005.
- [27] : Paul.R.Henshl, Phil Palmer, Adam M.Baker, « Solar Termal Propulsion augmented with fiber optics : A System Design Proposal », Surrey space centre, SSTL, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH.UK.