

*Université IBN ZOHR*  
*Faculté des Sciences, Agadir*  
*Département de Physique*

**Filière** : SMP<sub>6</sub>, PARCOURS ENERGETIQUE, SEMESTRE 6, ERDD5

**Module** : ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

**Elément de module** : CAPTEUR PLAN ET CONCENTRATEURS

**Année Universitaire** : 2012-13

**Professeur** : Abdellatif ELANIQUE





## AVANT PROPOS

Le regain d'intérêt vers les sources d'énergies renouvelables depuis les années 70 à l'échelle internationale et tout récemment à l'échelle nationale relève un défi quant à la formation de nos futurs lauréats des Facultés des Sciences. Les pages qui suivent s'inscrivent dans ce cadre : développer les bases scientifiques de «*l'énergie solaire thermique*» aux étudiants énergéticiens pour qu'ils puissent procéder à des choix technologiques dans leur carrière.

Le présent cours constitue une introduction au domaine de «*l'énergie solaire thermique*» destiné aux étudiants des filières Sciences de la Matière Physique (SMP<sub>6</sub>) et plus particulièrement ceux des parcours suivants : Energétique (ET<sub>6</sub>) et Licence Professionnelle (ERDD<sub>6</sub>) de la Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir.

Le cours développe les différentes notions en relation avec la source d'énergie qu'est le soleil. Le chapitre 1 aborde les notions indispensables pour mener à bien les calculs de détermination du gisement solaire d'un site donné. Élément clé de l'énergie solaire basse température, le capteur plan est présenté de façon très détaillée dans le chapitre 2, en privilégiant l'étude du rendement. En vue d'obtenir des hautes températures, l'étude des surfaces catadioptriques, mises en œuvre dans les concentrateurs, est abordée dans le chapitre 3.

De nombreux exercices d'applications ont été introduits afin de faciliter la compréhension des notions développées et retenir les ordres de grandeurs.

*Remerciements:*

*Je tiens à remercier mes étudiants pour leur remarques pertinentes et plus particulièrement ceux des filières ERDD5 (licence professionnelle) et ET6 de la FSA. En vue d'améliorer le contenu du cours, toute critique, suggestion ou remarque serait bien entendu la bienvenue.*

Agadir, Mars 2013

Prof. Abdellatif Elanique

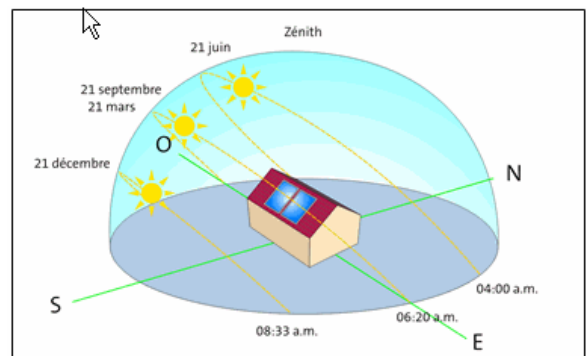
# CHAPITRE 1 : RAYONNEMENT SOLAIRE

الشمس والقمر بحسبان ﴿٥٥﴾

*Résumé :* Dans ce chapitre, seront rappelées les notions fondamentales concernant notre principale source d'énergie, le soleil. L'atténuation du rayonnement solaire (RS) par l'atmosphère terrestre sera discutée. La compréhension des caractéristiques du RS direct est essentielle dans les projets construction des centrales solaires à concentration (CSP). Les aspects concernant le calcul de la position de soleil seront illustrés. Enfin, les techniques de mesure du RS seront abordées.

## Plan du Chapitre :

1. Energie solaire hors Atmosphère
  - 1.1. Structure du soleil
  - 1.2. Origine
  - 1.3. Constante Solaire
  - 1.4. Spectre solaire
2. Influence de l'atmosphère terrestre
  - 2.1. Atténuation du RS
  - 2.2. Masse Atmosphérique (Air Mass)
  - 2.3. Rayonnement direct, diffus et réfléchi
  - 2.4. Eclairage direct sur un plan incliné
3. Aspects géométriques du RS direct
  - 3.1. Calcul de la position du soleil
    - 3.1.1. Paramètres de position
    - 3.1.2. Systèmes de coordonnées
    - 3.1.3. Paramètres de temps
    - 3.1.4. Cas particuliers
  - 3.2. Diagramme solaire
4. Mesure du Rayonnement Solaire
  - 4.1. Mesure Terrestre
  - 4.2. Mesure par Satellite



## 1. ENERGIE SOLAIRE HORS ATMOSPHERE

### 1.1. Structure du soleil

L'Univers est composé de galaxies regroupées en amas. L'un de ces amas galactiques, appelée amas local contient la Galaxie (avec un grand G) ou Voie Lactée ; c'est celle où nous vivons. De type spiral, elle est composée d'une centaine de milliard d'étoiles dont l'une d'entre elles est le Soleil.

Le Soleil est situé au centre de notre système solaire. Il possède un diamètre de 1 392 000 km (109 fois la Terre<sup>1</sup>) et une masse de  $2 \cdot 10^{30}$  kg (330 000 fois celle de la Terre). Il est composé d'hydrogène (75 % de la masse) et d'hélium (23 % de la masse). La structure du soleil est caractérisée par la présence de cinq zones : le noyau, la zone radiative, la zone convective, la photosphère, et la couronne.

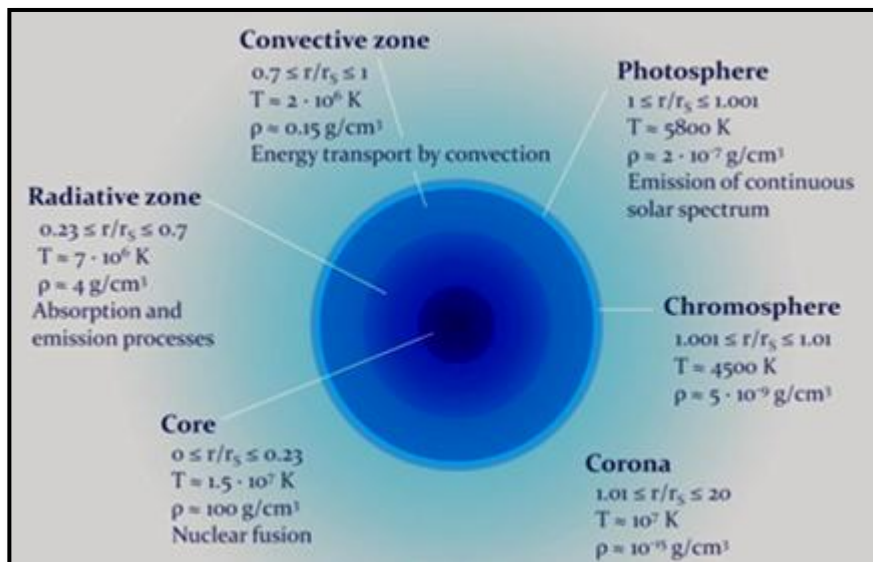


Fig. 1 : Structure du Soleil.

- Le noyau (cœur) s'étend sur 200 000 km environ du centre à 0,23 rayon solaire, sa température approche les  $15 \cdot 10^6$  K<sup>2</sup> et sa densité très élevée avoisine les  $10^5$  kg/m<sup>3</sup>. C'est dans le noyau que se produisent les réactions nucléaires de fusion qui transforment, l'hydrogène en hélium.
- La zone radiative s'étend de 0,23 à 0,7 rayon solaire. Sa température moyenne est de  $7 \cdot 10^6$  K. L'énergie s'y propage par processus radiative.
- La zone convective, comprise entre 0,7 et 1 fois le rayon solaire, est caractérisée par une température moyenne de  $2 \cdot 10^6$  K et un mode de transfert d'énergie convectif.
- La photosphère, est une couche d'environ 300 km est une température de 5800 K. elle donne l'image visible du soleil. C'est là où est émise la lumière visible avec son spectre continue.

<sup>1</sup> Pour exprimer les distances entre les objets célestes, on utilise l'Unité Astronomique (UA) qui correspond à la distance Terre-Soleil ; ( $1 \text{ UA} = 149\,597\,870 \text{ km}$ ).

<sup>2</sup> Le degré Kelvin est lié au degré Celsius par :  $[\text{K}] = [^\circ\text{C}] + 273.15$ .

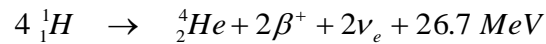
- La chromosphère (environ 10.000 km) et la couronne, (20 rayons solaires) ne sont visibles que pendant une éclipse solaire. Ils représentent l'atmosphère solaire. Ils sont presque transparents, bien que le nom de la chromosphère provienne de sa couleur légèrement rougeâtre.

## 1.2. Origine

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium. Deux cycles ont été imaginés pour cette fusion :

- Le cycle proton-proton qui fournit 90% de l'énergie solaire ;
- Le cycle de carbone qui fournit les 10% restants.

On peut résumer ces deux cycles par l'équation globale suivante (en omettant le rayonnement  $\gamma$ ) :



Quatre protons (noyaux d'hydrogène H) fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium He avec émission de deux positons  $\beta^+$  (rayonnements bêta) et de deux neutrinos  $\nu_e$ , accompagnés d'une énergie égale à 26,7 MeV<sup>3</sup>.

## 1.3. Constante solaire

On appelle *Constante solaire*, notée  $C^*$ , la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre :  $C^* \approx 1367 \text{ (W/m}^2\text{)}$ <sup>4</sup>. Notons que la distance Terre-Soleil varie quelques peu au cours de l'année (en raison de la légère excentricité de l'orbite terrestre). Il en est de même de la puissance reçue par une surface de un mètre carré perpendiculaire au RS et située à la limite de l'atmosphère terrestre.

**Exercice 1 :** Détermination de la puissance  $P_s$  rayonnée par le soleil ?

Prenons pour le flux solaire la valeur moyenne de 1367 W par m<sup>2</sup> de surface réceptrice perpendiculaire aux rayons solaires à la limite de l'atmosphère terrestre. Considérons une sphère centrée sur le soleil ayant pour rayon 1UA (1UA  $\approx 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$ ).

On suppose que le l'émission du RS est *isotrope*, c.à.d. *identique dans toutes les directions*. Il s'ensuit que la puissance rayonnée par le soleil est égale à la surface de cette sphère multipliée par la constante solaire :  $P_s = 4\pi(149,6 \cdot 10^9)^2 \times 1367$  soit

$$P_s = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

<sup>3</sup> Million d'électron Volts : 1 MeV = 1,6 10<sup>-13</sup> J

<sup>4</sup> Valeur fixée en 1982 par "The World Meteorological Organization".

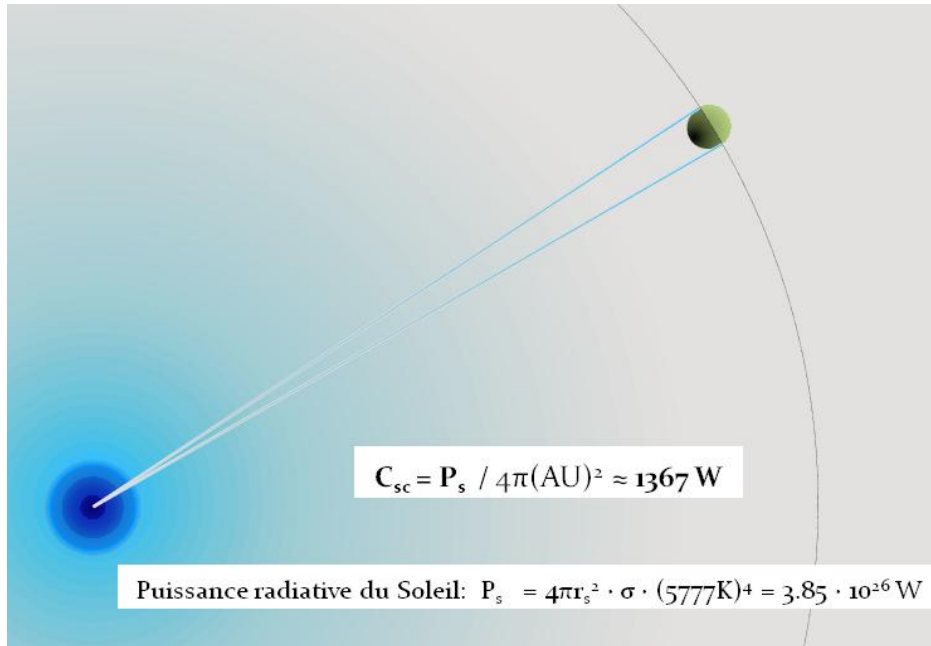


Fig. 2 : Détermination de la Constante solaire

La détermination de la température de la surface visible du soleil (photosphère) fut estimée à 5777 K grâce à la théorie de l'émission du corps noir de Josef Stefan (1878).

**Exercice 2 :** Estimation de la température de la photosphère ?

La connaissance de la puissance émise par le soleil permet de remonter à la température de sa surface considérée comme un corps noir<sup>5</sup> (CN).

La puissance  $P_{CN}$  émise par un CN de surface  $S$  à la température  $T$  vaut :

$$P_{CN} = \sigma \cdot T^4 \cdot S$$

avec  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , Constante de Stefan-Boltzman.

Dans notre cas, on a :  $3,83 \cdot 10^{26} = 5,67 \cdot 10^{-8} \times T^4 \times 4\pi(0,696 \cdot 10^9)^2$

$$\text{Soit : } T = 5777 \text{ K}$$

#### 1.4. Spectre solaire

Le spectre solaire est continu, c.à.d. que les photons émis peuvent avoir toutes les énergies possibles et produire ainsi toutes les radiations imaginables mais selon des proportions très différentes selon la bande spectrale.

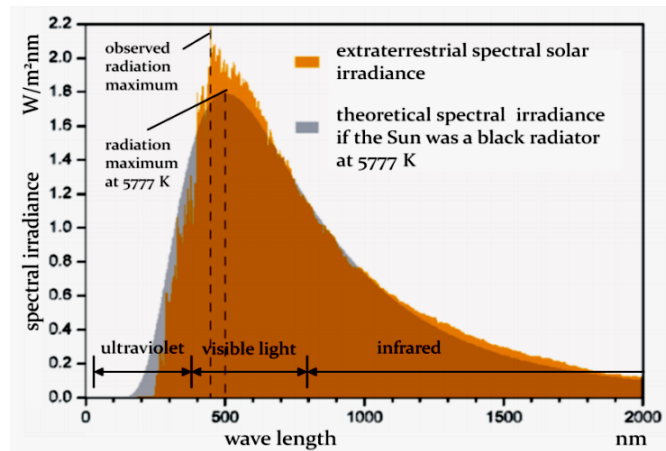
On étudie le spectre de la lumière solaire à la limite de l'atmosphère terrestre en installant sur un satellite un *spectrohéliographe*.

<sup>5</sup> Rappel : Un corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre.



En décomposant la lumière reçue par un jeu de prisme, cet appareil mesure la puissance rayonnée par bande spectrale centrée sur la longueur d'onde  $\lambda$  de largeur  $1 \mu\text{m}$ . Celle-ci est donnée en Watts par mètre carré et nano-mètre ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{nm}$ ).

Fig.3 : Spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre (AM0)<sup>6</sup> auquel a été superposé le spectre du corps noir à 5777 K.



La figure 3 représente le spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre. Si on y reporte le spectre du CN à la température de 5777 K, on s'aperçoit que les deux courbes sont très proches l'une de l'autre. Ceci confirme bien le calcul effectué plus haut (voir Ex.2) : le soleil peut être assimilé à un CN à 5777 K. Notons que le décalage entre les deux courbes de la fig.3 est dû à deux raisons : tout d'abord, le soleil n'est pas un vrai CN ; de plus, la température au sein du soleil n'est pas uniforme.

Rappelons que la lumière visible ne représente qu'une infime partie de l'échelle des longueurs d'ondes comme on peut s'en apercevoir à la figure 4.

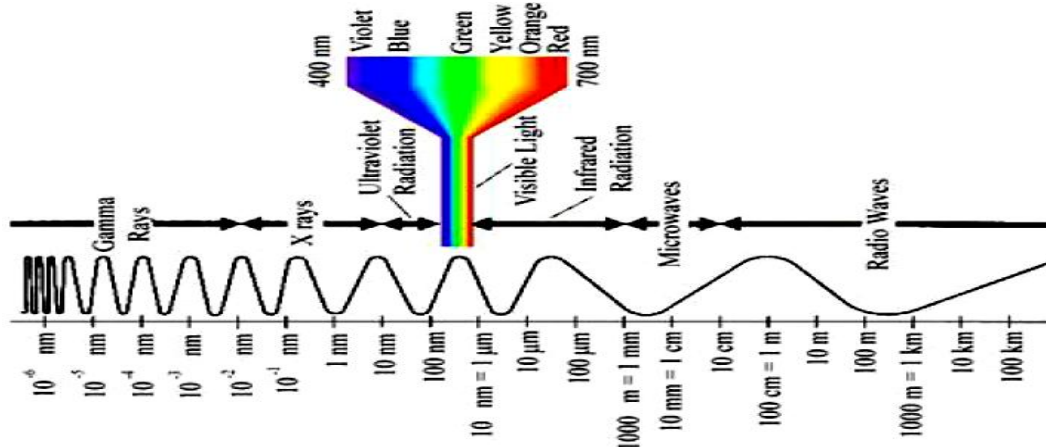


Fig. 4 : Echelle des longueurs d'ondes depuis les rayons cosmiques jusqu'aux ondes Radio.

En intégrant la courbe expérimentale de la fig.3 on peut déduire la fraction énergétique des trois principales bandes du RS à la limite de l'atmosphère terrestre : UV (7%), Visible (42%), IR (51%).

<sup>6</sup> AM0 = «Air Mass Zero» en anglais ; correspond à l'étude du RS à la limite de l'atmosphère terrestre. Voir § sur l'influence de la masse atmosphérique.

## 2. INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE TERRESTRE

Véritable filtre, l'atmosphère terrestre modifie profondément le spectre du rayonnement solaire (RS) reçu au niveau du sol. Sans ce filtre, la vie sur terre serait unimaginable. En effet, le rayonnement UV et les rayons cosmiques sont nocifs pour le développement des cellules vivantes.

Du sol jusqu'à une altitude d'environ 11 km on trouve la troposphère. C'est dans la troposphère, qui représente les 5/6 de la masse de l'atmosphère, que l'on rencontre la plupart des phénomènes météorologiques<sup>7</sup>. La température moyenne y est continuellement décroissante avec un gradient de  $-6,5$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ).

### 2.1. Atténuation du RS

Deux phénomènes atténuent le RS traversant l'atmosphère. Il s'agit de l'absorption et de la diffusion.

- L'absorption est sélective et dépend principalement de 4 éléments :
  - L'ozone ( $\text{O}_3$ ) qui arrête les UV ( $\lambda < 0,28 \mu\text{m}$ ) nocifs pour la vie ;
  - La vapeur d'eau qui absorbe fortement dans IR avec des bandes d'absorption à 1, 1.4 et 1.8  $\mu\text{m}$  ;
  - Le gaz carbonique qui est aussi un fort absorbant des IR ;
  - L'oxygène qui absorbe les bandes étroites du spectre visible.
- La diffusion se produit avec les molécules d'air, particules en suspension. Elle est d'autant plus importante que la longueur d'onde  $\lambda$  du RS est petite (loi de Rayleigh en  $\lambda^{-4}$ ) et que l'air est humide et pollué.

La fig.6 montre l'influence de l'atmosphère sur le RS reçu au niveau de la mer. L'atténuation est très importante dans l'UV et l'IR. Dans l'IR, on constate plusieurs bandes d'absorption dues à la vapeur d'eau. Dans le visible, l'atténuation est moins importante que dans les domaines UV et IR.

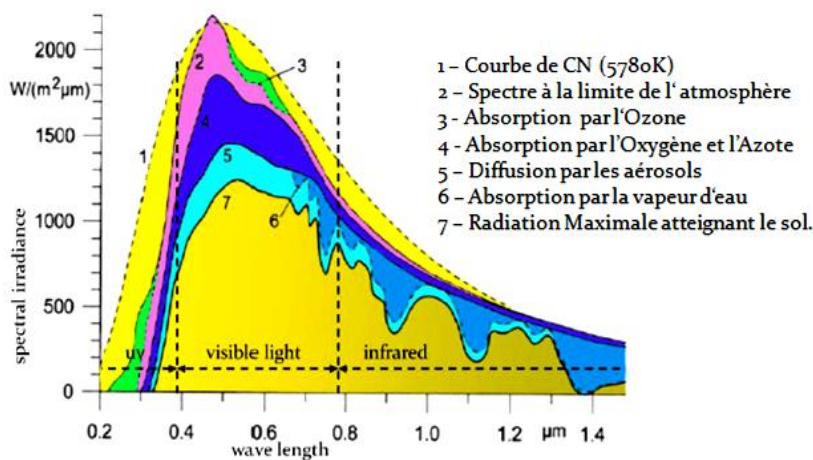


Fig. 6 : Effet de l'atmosphère sur le RS.

<sup>7</sup> Ceci s'explique par le fait que passé 10 km d'altitude, l'air est pratiquement sec, toute la vapeur d'eau s'étant condensée à cause de la chute de température.

## 2.2. Masse Atmosphérique (Air Mass)

Plus grande est la longueur du parcours de la lumière solaire dans l'atmosphère terrestre, plus grande est l'atténuation de celle-ci. Pour tenir compte du trajet parcouru par la lumière, on utilise la notion de masse atmosphérique. Celle-ci est égale au rapport, noté  $AM$ , de la distance parcourue dans l'atmosphère par un rayon en provenance du soleil à l'épaisseur verticale de l'atmosphère mesurée au niveau de la mer.

En première approximation, la masse atmosphérique  $AM$  est donnée par la formule suivante :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

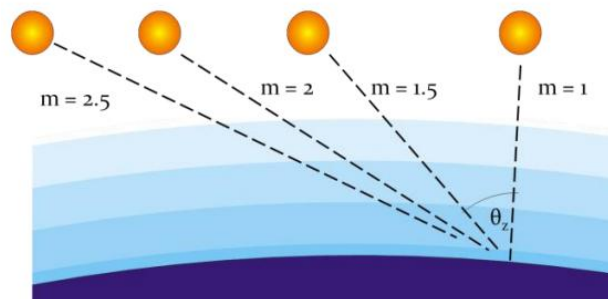


Fig. 7 : Influence de la masse atmosphérique

Où  $\theta_z$  est l'angle de zénith (angle d'incidence) : angle entre la normale à la surface terrestre et la direction du soleil ( $\theta_z = 90^\circ - h$ ) ; avec  $h$  la hauteur du soleil.

Ainsi, pour le soleil au zénith ( $h=90^\circ$  soit  $\theta_z=0^\circ$ ),  $AM=1$  (AM1= Air Mass One en anglais) et pour le soleil vu sous un angle ( $h=30^\circ$  soit  $\theta_z=60^\circ$ ),  $AM=2$  (AM2) ce qui signifie que le chemin parcouru sera le double.

## 2.3. Rayonnement direct, diffus et réfléchi

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

- Le rayonnement direct ( $S$ ) est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le rayonnement diffus ( $D$ ) est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le rayonnement global ( $G$ ) est la somme du rayonnement direct et diffus.

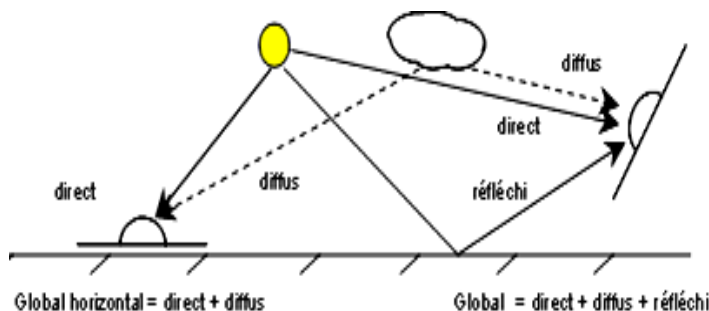


Fig. 8 : Types de RS tombant sur une surface plane ou inclinée.

Les notations utilisées pour les composantes du RS sur une surface horizontale sont données dans le tableau suivant:

<b>Irradiation solaire</b> Energie reçue pendant une certaine durée $W.m^{-2}.durée^{-1}$ ou $kWh.m^{-2}.durée^{-1}$	Directe	S	G = S + D
	Diffuse	D	
	Globale	G	
<b>Eclairement solaire</b> Flux instantané $W.m^{-2}$	Direct	S*	G* = S* + D*
	Diffus	D*	
	Global	G*	

Tableau : Notations utilisées en énergétique solaire

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale (l'irradiation directe normale (*Direct Normal Irradiance* : *DNI*) est désigné par **I**. Nous désignerons par :

**I** : l'énergie reçue (irradiation) en  $kWh.m^{-2}.durée^{-1}$ ;

**I\*** : le flux normal reçu (éclairement) en  $W.m^{-2}$  (**DNI**)

$\theta_z$  : angle au zénith c.à.d. l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil, il est donné par :  $h=90^\circ - \theta_z$  où **h** est la hauteur du soleil.

#### 2.4. Eclairement direct sur un plan incliné

L'angle d'incidence est défini comme étant l'angle entre la direction du rayonnement et la normale au plan éclairé. Dans le cas d'un plan perpendiculaire au RS, l'angle d'incidence  $\theta$  vaut  $0^\circ$ . Imaginons maintenant un plan exposé au faisceau sous différents angles d'incidence (fig. 9). Le flux de puissance ( $W/m^2$ ) reçu par le plan est inversement proportionnel à la section du faisceau. La surface éclairée dépend de l'angle d'incidence  $\theta$ .

La réduction de l'irradiance dans le cas d'une orientation non-perpendiculaire à la surface éclairée est appelée parfois '*effet cosinus*'.

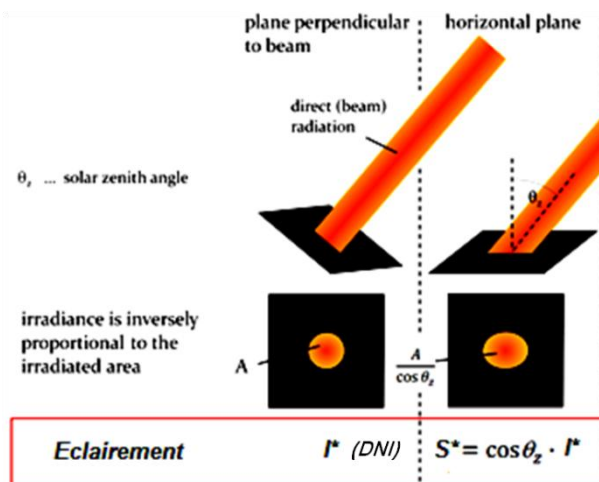


Fig.9 : Irradiance sur plans inclinés.

D'où :

$$S^* = \sin(h) \times I^* \quad \text{car} \quad \cos(\pi/2 - h) = \sin(h)$$

## 2.5. Mesure sur une surface d'inclinaison quelconque

L'inclinaison  $i$  est l'angle du plan de l'objet étudié par rapport à l'horizontale. L'orientation  $\gamma$  est l'angle entre la normale au plan de l'objet étudié et le plan méridien du lieu (elle est comptée positivement vers l'Ouest par rapport au Sud dans l'hémisphère Nord).

### 2.5.1. Rayonnement direct reçu sur un plan quelconque

L'éclairement direct  $S^*$  ( $S^* \perp \text{capteur}$ ) est la composante normale au capteur, de l'éclairement  $I^*$ .

Si  $n$  représente le vecteur unitaire normal à la surface élémentaire; et  $k$  le vecteur unitaire donnant la direction du soleil.

On peut écrire :  $S^* = I^* \cdot (k \cdot n)$

$$n = (\sin \gamma \times \sin i, \cos \gamma \times \sin i, \cos i)$$

$$k = (\cos h \times \sin a, \cos h \times \cos a, \sin h);$$

il vient :

$$S^*(i, \gamma) = I^* [\sin i \cdot \cos h \cdot \cos(a - \gamma) + \cos i \cdot \sin h]$$

On peut remarquer que la surface n'est ensoleillée que si  $k \cdot n > 0$  d'où  $S^* > 0$ .

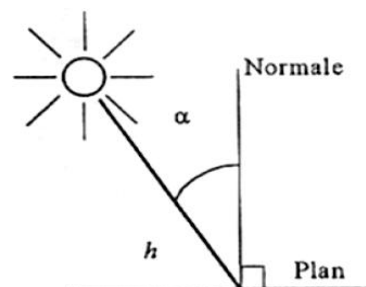
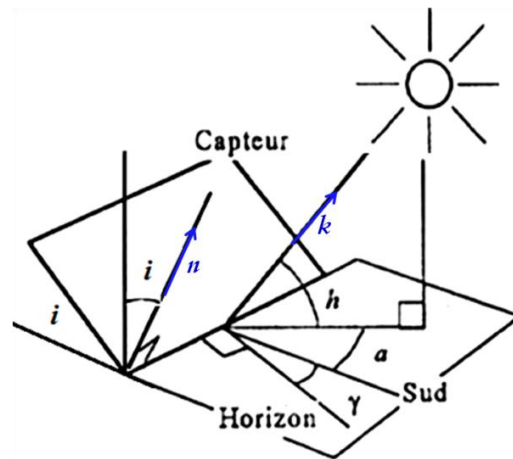
- Quand  $k \cdot n < 0$  le soleil éclaire inutilement le dos de la surface réceptrice et l'on a  $S^* = 0$ .
- Quand la lumière est rasante, on a  $k \cdot n = 0$  et  $S^* = 0$ .

#### Cas particuliers :

1. Capteur Horizontale ( $i=0$ ):

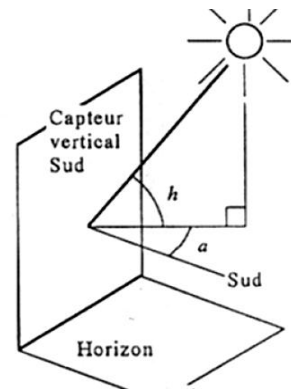
(par exemple Piscine plein air)

$$S_h^*(i=0, \gamma) = I^* \sin h$$



2. Capteur Verticale ( $i=90^\circ$ ): par exemple baies vitrées orientées Sud:

$$S_v^*(i=90, \gamma=0) = I^* \cosh \cdot \cos a$$



### 2.5.2. Rayonnement diffus $D^*(i)$

Ici on suppose que le rayonnement diffus provenant du ciel ou bien du sol est isotrope. On suppose également que le sol est horizontal.

- Lorsque le capteur est horizontal ( $i=0^\circ$ ), il reçoit le rayonnement diffusé par le ciel soit:  $D_h^*$  (100%)
- S'il est incliné d'un angle  $i$ , il voit moins de ciel mais par contre reçoit du sol une fraction de la quantité :  $(\alpha^* \cdot G_h^*)$  ou  $\alpha^*$  est l'albédo du sol pour le RS c.à.d. facteur de réflexion du sol vis-à-vis du RS.

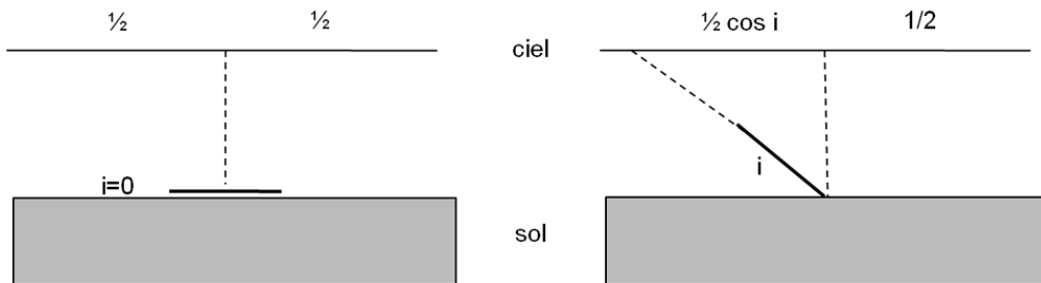


Fig10. Effet de l'inclinaison  $i$  sur la réception du rayonnement diffus.

La figure précédente montre que la fraction de  $D_h^*$  reçue par le capteur en provenance du ciel s'écrit :

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos i = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos i)$$

Quant à la fraction de  $(\alpha^* \cdot G_h^*)$  en provenance du sol, elle s'écrit :

$$1 - \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos i) = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos i)$$

Finalement, on obtient :

$$D^*(i) = \left( \frac{1 + \cos i}{2} \right) D_h^* + \left( \frac{1 - \cos i}{2} \right) a^* G_h^*$$

### 2.5.3. Eclairement Global $G^*(i, \gamma)$

C'est la somme des éclairements direct et diffus :  $G^* = S^* + D^*$

D'où :  $D_h^* = G_h^* - I^* \cdot \sin h$

### 2.5.4. Irradiation directe journalière S

On s'intéresse à présent à l'énergie tombant sur une surface donnée. Les quantités seront exprimées en kWh/m<sup>2</sup> de surface réceptrice. L'irradiation directe journalière  $S$  sur un plan horizontal peut être déterminé par intégration sur la Journée des valeurs de l'éclairement  $S^* = I^* \cdot \sin h$ .

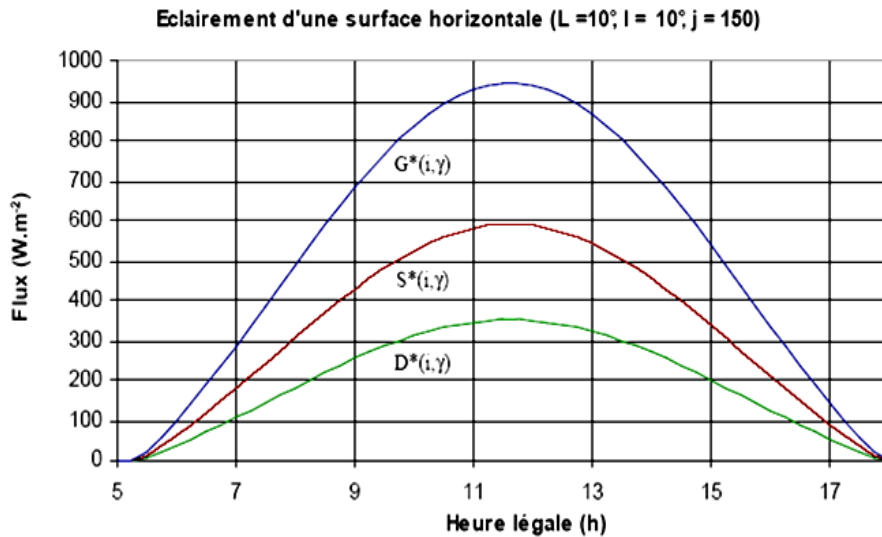


Fig.11 : variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée à ciel claire.

Comme le montre la fig. 11, l'évolution des courbes d'éclairement  $G^*$ ,  $S^*$  et  $D^*$  est en première approximation sinusoïdale sur la durée du jour ddj:

$$G^* = G_{ms}^* \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{ddj}\right)$$

Où  $t$  en heures et  $G_{ms}^*$  la valeur maximale correspondant au midi solaire

## 3. ASPECTS GEOMETRIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT

Les concentrateurs solaires (CSP) utilisent le rayonnement solaire direct seulement puisque c'est le seul qui possède une direction bien définie. Dans le but de concentrer les rayons solaires, il est nécessaire d'orienter en permanence le système vers le soleil. Il est donc important de savoir la direction du faisceau c.à.d. la position (apparente) du soleil par rapport à un observateur terrestre.



Cette section présente les aspects géométriques pour localiser la position du soleil<sup>8</sup>.

### 3.1. Calcul de la position du soleil

#### 3.1.1. Paramètres de position

Tout point de la sphère terrestre peut être repérer par deux coordonnées appelées coordonnées terrestres : sa *latitude*  $\varphi$  (positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud) et sa *longitude*  $L$  (positive à l'ouest, négative à l'est). Le méridien<sup>9</sup> origine, servant à la mesure de la longitude, est celui de Greenwich.

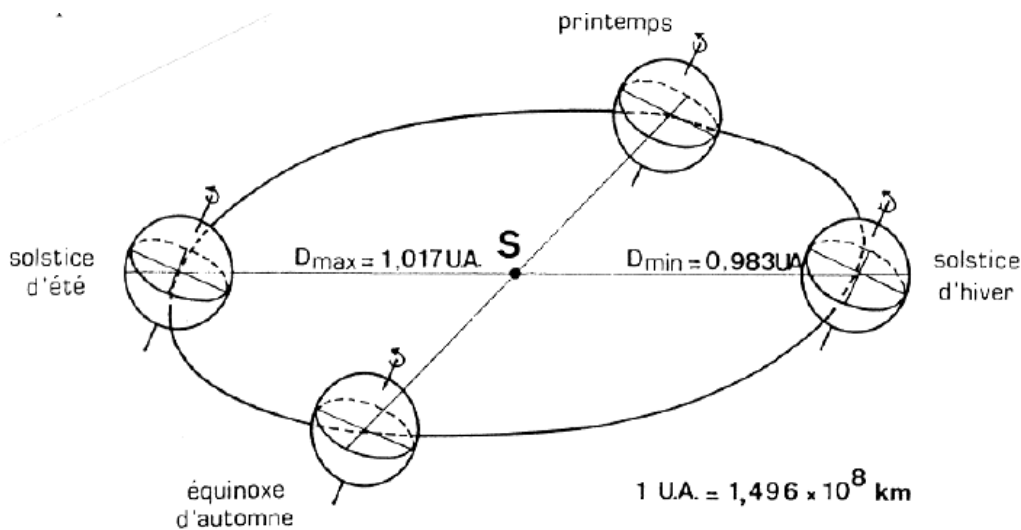


Fig. 12 : trajectoire de la terre autour du soleil.

La terre décrit autour du soleil une ellipse située dans un plan appelé *plan de l'écliptique*. L'excentricité  $e$  de cette ellipse est faible ( $e=0,017$ ) ; aussi peut-on l'assimiler à un cercle en première approximation.

L'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction Terre-Soleil est appelé *déclinaison*  $\delta$ . Cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique de  $-23.45^\circ$  à  $+23.45^\circ$ . La position de la terre à l'équinoxe de printemps est appelée *point vernal*  $\gamma$ . L'année tropique, temps écoulé entre deux passages de la terre au point vernal, est de 365 jours 5 heures 48 minutes 46 secondes. Ceci implique la correction d'un jour tout les quatre ans (années bissextiles).

<sup>8</sup> Les calculs présentés ici sont d'une précision suffisante pour comprendre les algorithmes, beaucoup plus complexe utilisés en ingénierie solaire, mis en œuvre pour le calcul exacte de la position du soleil (exemple *Algorithme de Michalsky*, *Algorithme NREL*). Ces derniers tiennent compte du phénomène de réfraction de l'atmosphère.

<sup>9</sup> Un méridien terrestre est un demi-cercle passant par les pôles Nord et Sud.



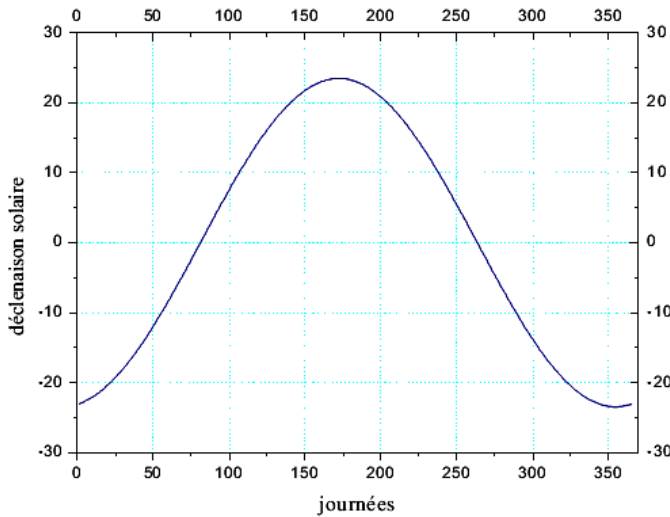


Fig.15 : déclinaison  $\delta$  du soleil en fonction du numéro du jour de l'année.

La déclinaison  $\delta$  (fig. 15) peut être calculée en fonction du numéro du jour de l'année  $n$  (1<sup>er</sup> janvier  $\equiv 1$ ) :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$$

La déclinaison est maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre).

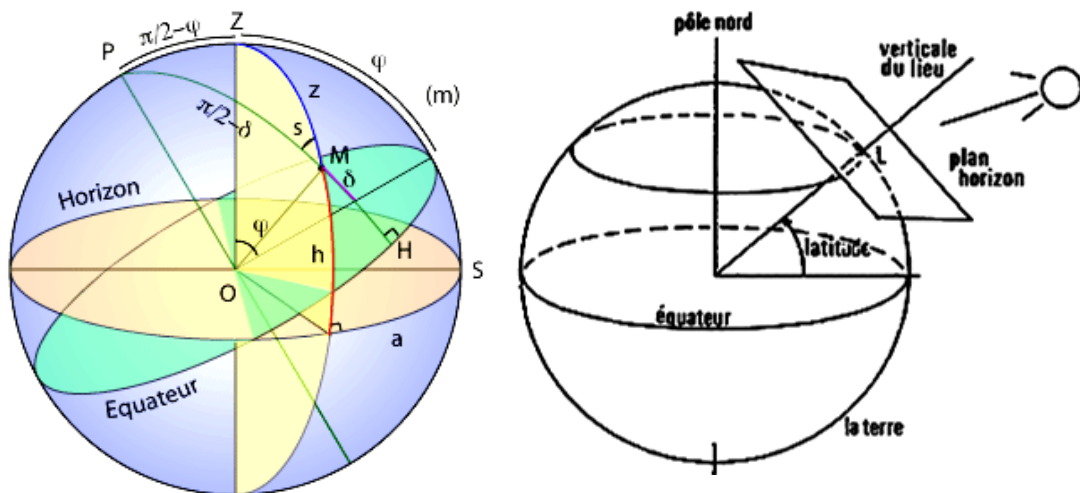


Fig. 16 : Géométrie terre-soleil d'un point de vue géocentrique.

Le plan horizontal est le plan qui inclut la ligne horizontale de l'observateur terrestre. Il divise le ciel en deux hémisphères :

L'hémisphère supérieure visible à partir de la position de l'observateur et l'hémisphère inférieure non visible pour ce même observateur.

Le zénith est le point de la sphère céleste<sup>10</sup> situé sur la verticale de l'observateur. Le nadir est le point de la sphère céleste opposé au zénith. Le méridien est le cercle de la sphère céleste qui est perpendiculaire aux plans horizontale et équatoriale.

### 3.1.2. Systèmes de coordonnées

Pour repérer la position d'objets célestes par rapport à un observateur sur terre, Il existe en général deux systèmes de coordonnées : coordonnées équatoriales et coordonnées horizontales.

#### a) Coordonnées équatoriales ( $\omega, \delta$ )

Ce système se base sur le plan équatorial. Les deux coordonnées sont la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$ . L'angle horaire  $\omega$ , dû à la rotation de la terre autour de son axe, est l'angle que fait le plan contenant le *cercle horaire*<sup>11</sup> de l'astre avec le plan contenant le méridien céleste.

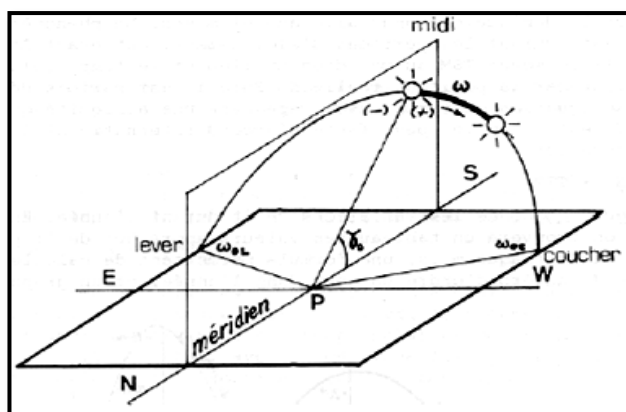
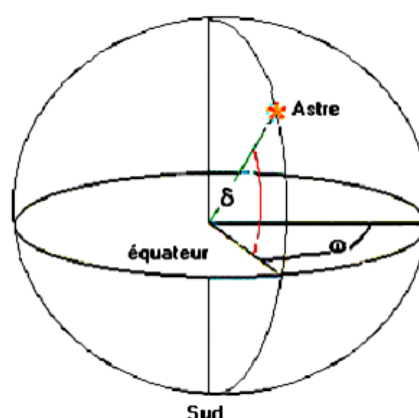


Fig.17 : Angle horaire  $\omega$

Fig. 18 : Système de coordonnées équatoriales.

L'angle horaire  $\omega$  dépend exclusivement du temps et plus précisément du temps solaire, qui signifie le temps basé sur le mouvement apparent du soleil. Le midi solaire (TSV=12h00) correspond donc au moment où le soleil passe par le méridien local.



<sup>10</sup> La sphère céleste est la sphère ayant pour centre la Terre est pour rayon la distance Terre-Soleil c.à.d. 1UA.

<sup>11</sup> Un cercle horaire est un cercle passant par l'astre étudié et dont le plan contient l'axe reliant les pôles nord et sud célestes (axe du monde).

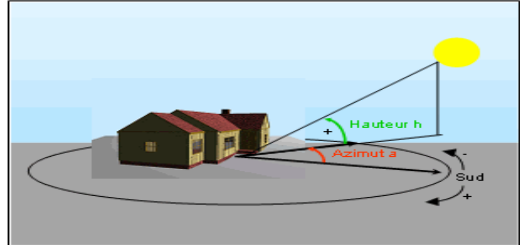
Sachant que la terre tourne avec une vitesse angulaire de  $15^\circ$  par heure, on en déduit la relation liant  $\omega$  et  $t$  :

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{15^\circ}{1\text{h}} = \frac{1^\circ}{4\text{min}}$$

Avec  $\omega=0$  au midi solaire ;  $\omega<0$  le matin et  $\omega>0$  l'après midi.

b) Coordonnées horizontales ( $h,a$ )

Appelé aussi coordonnées *locales*, ce système est basé sur le plan horizontal de l'observateur terrestre. Les deux coordonnées sont :



- La hauteur angulaire  $h$  qui est l'angle fait par la direction du soleil avec le plan horizontal ;
- L'azimut  $a$  : angle entre cette projection et la direction du Sud.  $a$  est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

Ce système de coordonnées est plus descriptif car d'un point de vue humain, nous observons le soleil dans un plan horizontal cependant ces mêmes coordonnées dépendent du lieu d'observation.

Les relations de passage des coordonnées équatoriales ( $\omega,\delta$ ) aux coordonnées horizontales ( $h,a$ ) pour un site géographique de latitude  $\varphi$  sont données par les formules de Gauss suivantes (Pour la démonstration, voir TD) :

$$\cos h \cdot \sin a = \cos \delta \cdot \sin \omega$$

$$\cos h \cdot \cos a = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi - \sin \delta \cdot \cos \varphi$$

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \sin \delta \cdot \sin \varphi$$

Ces formules sont très importantes en énergétique solaire puisqu'elles permettent de déterminer l'azimut  $a$  et la hauteur  $h$  du soleil dès que l'on connaît la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$  en un lieu de latitude  $\varphi$ . Nous avons vu comment déterminer la déclinaison à partir du numéro du jour  $n$ . L'angle horaire  $\omega$ , quant à lui, est déterminé à partir de l'heure pour laquelle nous voulons connaître la position du soleil. Ici interviennent donc des paramètres du temps.

### 3.1.3. Paramètres de temps

La position du soleil dans le ciel nous renseigne sur le *temps solaire vrai* (TSV<sup>12</sup> ou *Solar Time ST*). C'est le temps donné par les cadrans solaires. Il existe une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire  $\omega$  :

<sup>12</sup> TSV : le temps basé sur l'angle horaire du Soleil (angle entre le méridien du lieu, plan vertical passant par le Sud, et le méridien de la direction du Soleil, plan passant

$$\omega = (TSV - 12) \times 15$$

Avec TSV en heures et  $\omega$  en degrés. Cette formule provient du fait que le soleil semble tourné dans le plan de l'équateur de  $360^\circ$  en 24 heures soit  $15^\circ$  par heure. De plus, le choix arbitraire de prendre l'angle horaire nul quand le soleil est dans le plan du méridien local (midi solaire) permet d'expliquer la formule.

**Exercice 3 :** Calculer les coordonnées locales ( $h, a$ ) du soleil à Toulouse ( $\varphi=43,6^\circ$ ) pour la journée du 18 Avril à 10h TSV ?

- Numéro du jour  $DoY=108$  ;
- Déclinaison  $\delta(108)=10,5^\circ$  ;
- Angle horaire  $\omega=(10-12)\times 15=-30^\circ$
- Hauteur  $h$  :  $\sinh = \cos(10,5) \cdot \cos(-30) \cdot \cos(43,6) + \sin(10,5) \cdot \sin(43,6)$   
 | Soit  $h=47,9^\circ$
- Azimut  $a$  :  $\sin a = \frac{\cos(10,5) \cdot \sin(-30)}{\cos(47,9)} \Rightarrow a = -47,2^\circ$

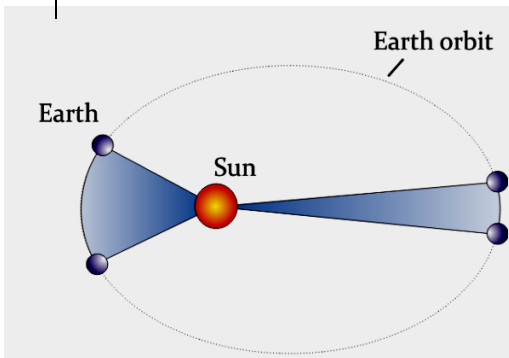


Fig. 19 : trajectoire elliptique de la terre autour du soleil.

Comme on l'a vu, la trajectoire de la terre autour du soleil est elliptique (1<sup>ère</sup> loi de Kepler). Durant ce mouvement, le rayon vecteur Soleil-Terre balaie des aires égales durant des intervalles de temps égaux (deuxième loi de Kepler). Par conséquent, la *durée du jour solaire vrai*<sup>13</sup> varie selon les époques de l'année (cf fig. 19)

On introduit alors la notion de temps solaire moyen (TSM)<sup>14</sup> qui varie de  $\pm 16$  mn par rapport au TSV :

$$TSM = TSV - ET$$

Où le terme correctif ET est appelé *équation du temps*<sup>15</sup>. Ce terme peut être calculé par la formule suivante :

---

par l'axe de la Terre et par le Soleil ; 1 heure= $15^\circ$ ) ; il est indiqué par les cadrans solaires.

<sup>13</sup> La durée du jour solaire vrai est l'intervalle de temps entre deux passages consécutifs du soleil dans le plan du méridien local.

<sup>14</sup> TSM : le temps solaire moyen est l'angle horaire que l'on observerait si le mouvement apparent du Soleil était régulier. Le temps civil (TC) est le TSM augmenté de 12h afin que le changement de jour ne se fasse pas au milieu de la phase diurne.

$$E = 229,2.(0,000075 + 0,001868.\cos B - 0,032077.\sin B - 0,014615.\cos 2B - 0,04089.\sin 2B)$$

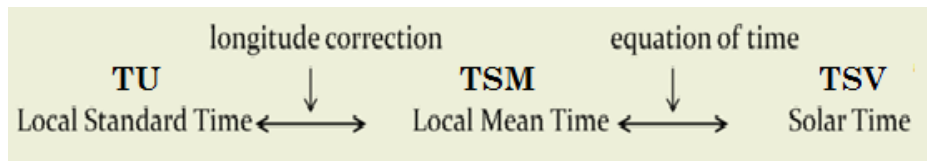
$$\text{avec } B = (n-1)\frac{360}{365}$$

avec  $n$  numéro du jour de l'année et  $E=ET$ .

Le temps Universel TU est égal au TSM du méridien origine (Méridien de Greenwich). On a donc :

$$TU=TSM+L/15$$

Avec  $L$  la longitude en degrés et les temps en heures.



L'heure que nous lisons aux horloges publiques est le temps légal TL. Il est égal au temps universel TU (qui peut être déterminé en écoutant une radio internationale par ex.) affecté des corrections de fuseau  $C_1$  ( $>0$  à l'est de Greenwich,  $<0$  à l'ouest) ainsi que d'une correction de saison  $C_2$  s'il ya lieu.

$$TL=TU+C_1+C_2 ;$$

Au Maroc par exemple :

$C_1=0$  h (le Maroc est situé sur le fuseau de Greenwich, voir Fig. 20) et  $C_2=0$  en hiver et  $C_2=+1$  h en été.

Les relations de passages entre TL, TSM et TSV sont les suivantes :

- 1)  $TSV= TU + L/15 + ET$
- 2)  $TU=TL - C_1 - C_2$
- 3)  $TSM = TU - L/15$

Pour des raisons évidentes de calcul, il n'est pas tenu compte du décalage de l'heure d'été dans les logiciels.

Temps Universel TU	Temps Solaire Moyen TSM	Temps Solaire Vrai TSV
Durée du jour constante	Durée du jour constante	Durée du jour variable
$\omega=0$ (midi solaire) ne peut jamais être à midi	$\omega=0$ (midi solaire) aux alentours de midi (variations de saisons)	$\omega=0$ , toujours vrai au midi solaire
Défini pour chaque zone de temps	Défini pour chaque longitude	Défini pour chaque longitude

Table 1 : Caractéristiques des différentes échelles de temps.

<sup>15</sup> Ce terme exprime la différence entre la durée du jour vrai et la durée du jour moyen qui est de 24h. Cette différence est due à l'orbite elliptique de la terre autour du Soleil.

**Exercice 4 :** Calculons le TSV, le 18 avril à Toulouse (longitude  $L=-1,37^\circ$ ) si l'heure légale TL est 10h ? Sachant que la correction de fuseau  $C_1=+1h$  pour la France et  $C_2=+1 h$  en été.

- $TU = TL - C_1 - C_2 = 10 - 1 - 1 = 8h$
- Correction de longitude :  $L/15 = -1,37^\circ/15 = -0,09h$
- $TSM = 8 - (-0,09) = 8,09h$
- Numéro du jour :  $DoY = 108$
- Paramètre  $d$  dans ET :  $d = 105^\circ \rightarrow ET = 0,7 \text{ min} = 0,01h$
- $TSV = 8,09 + 0,01 = 8,10h$  soit  $TSV = 8h6mn$

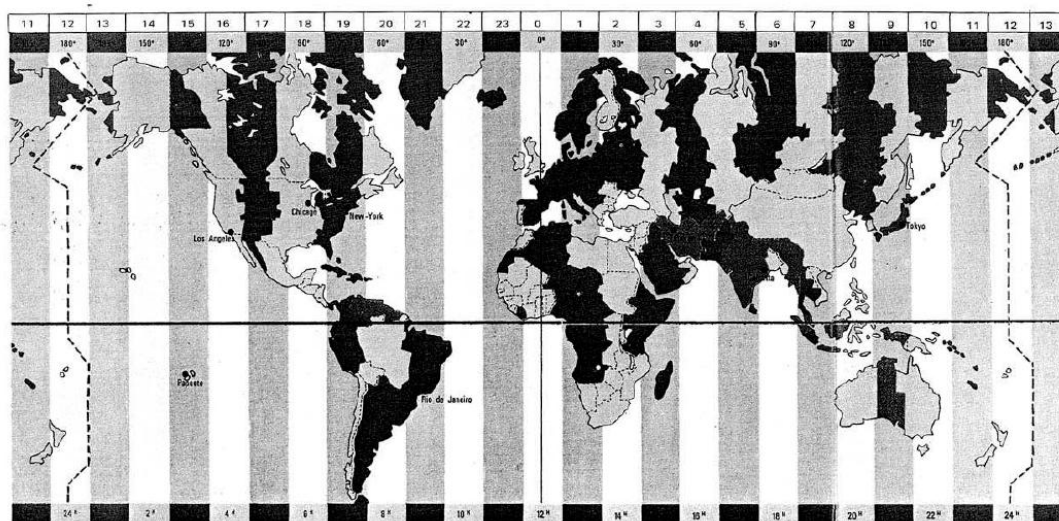


Fig. 20 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

### 3.1.4. Cas particuliers

Les quantités relatives au lever et au coucher du soleil ( $h=0$ ) sont marquées de l'indice inférieur « $\phi$ » et celles relatives au midi solaire ( $TSV=12h$ ,  $a=\omega=0$ ) de l'indice « $m$ ».

Nous avons donc :

- Hauteur à midi solaire :  $h_m = \sin^{-1}(\cos(\delta - \varphi))$  ;
- Angle horaire au coucher :  $\omega_0 = \cos^{-1}(-tg\varphi \cdot tg\delta)$  ;
- Azimut au coucher :  $a_0 = \cos^{-1}(-\sin\delta/\cos\varphi)$  ;
- Durée du jour :  $ddj = 2\omega_0 / 15$ .

Remarque :

- si  $tg\varphi \cdot tg\delta \geq 1$ , le soleil ne se couche pas ( $\omega_0 = a_0 = 180^\circ$ ) ;
- si  $tg\varphi \cdot tg\delta \leq -1$ , le soleil ne se lève pas ( $\omega_0 = a_0 = 0^\circ$ ).

### 3.2. Diagramme solaire

Un *diagramme solaire*, est un diagramme circulaire sur lequel sont représentés la hauteur  $h$  en fonction de l'azimut  $\alpha$ . Un réseau de courbes représente la trajectoire du soleil pour différentes journées.

L'intérêt d'un tel diagramme en énergétique solaire est de renseigner rapidement l'utilisateur sur l'effet de Masque dû à un obstacle pouvant occulter le soleil une partie du temps. L'organigramme de la fig.21 permet de suivre la construction d'un tel diagramme.

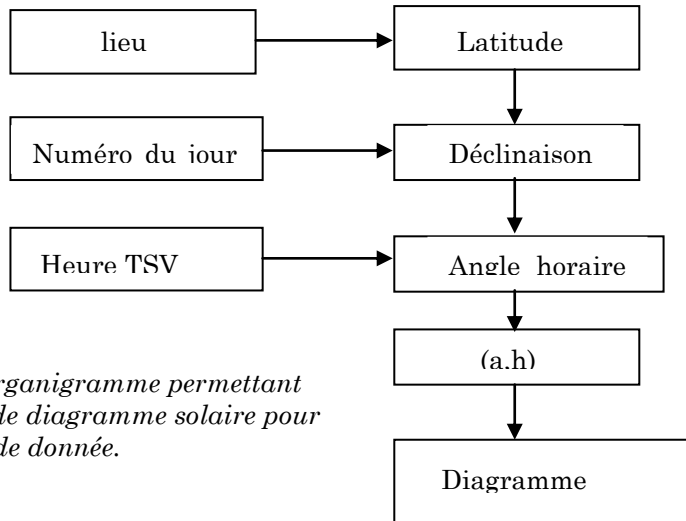


Fig. 21 : Organigramme permettant le traçage de diagramme solaire pour une latitude donnée.

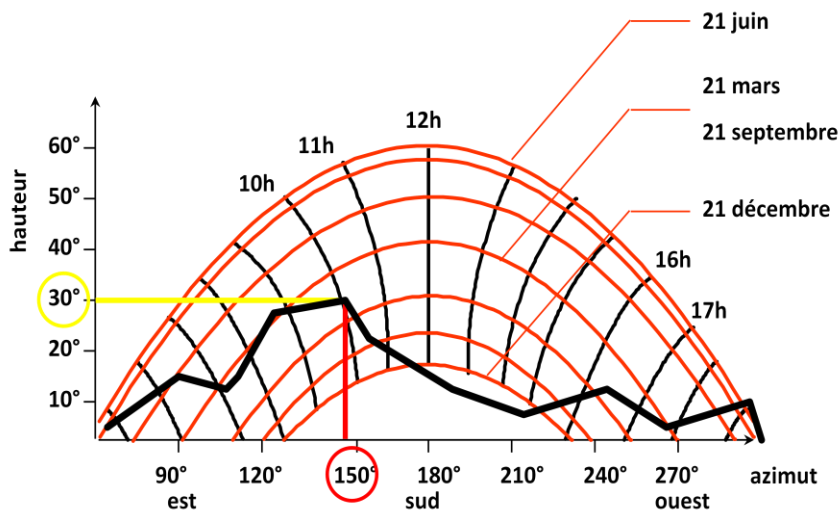


Fig.22 : Exemple de diagramme solaire.

Un exemple de diagramme solaire est donné dans la fig. 22. Les courbes rejoignant les points de même heure (TSV) sont appelées *isohoraires*. Il faut ensuite relever les masques à l'endroit où l'on désire implanter l'installation solaire.



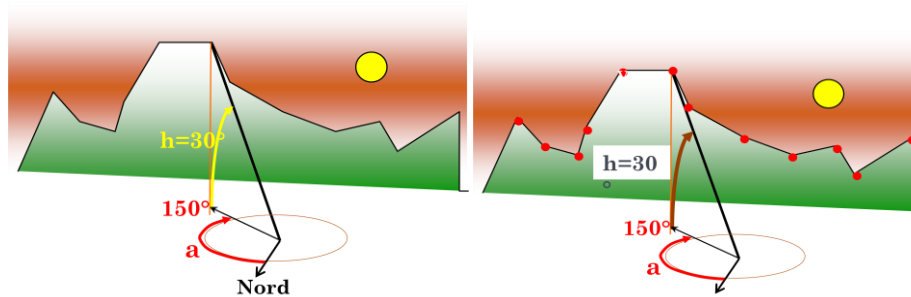


Fig. 23 : Figure montrant le relevé des hauteurs  $h$  et azimuts  $a$  des obstacles.

Pour cela, il faut se munir d'une *boussole* et d'un *clinomètre* et relever la hauteur angulaire et l'azimut de tous les obstacles potentiels (fig. 23).

Ces données, une fois reportées sur un graphe représentant la projection de la course fictive du soleil à l'endroit du site, permettront de déterminer les heures de lever et de coucher du soleil en fonction de la saison.

#### 4. MESURE DE RAYONNEMENT SOLAIRE

Tout projet de centrale électro-solaire requière des données de rayonnements pour le choix du site. Il y a deux possibilités pour accéder au rayonnement solaire : par stations météorologiques terrestres ou par images satellites.

##### Ground measuring



##### Satellite measuring

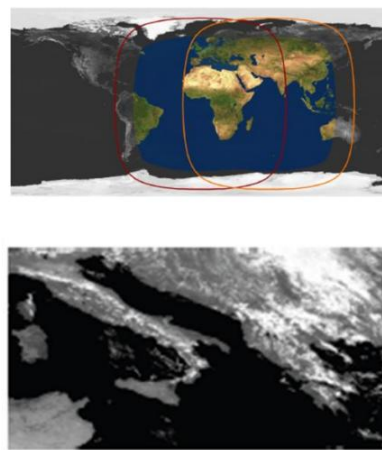


Fig.24 : Méthodes de mesure du rayonnement solaire.

Les mesures terrestres sont locales, très précises mais nécessitent un large intervalle de temps de mesure pour être fiable. En revanche, les données satellites couvrent de très vastes régions.

##### 4.1. Mesure terrestre

Le plus souvent, le rayonnement global et diffus sont mesurés par un pyranomètre (fig. 25). Un courant électrique, proportionnel à l'éclairement reçu



est fourni par une thermopile<sup>16</sup> protégée par deux hémisphères en verre et par un disque métallique recouvert de peinture blanche. L'appareil, monte horizontalement, donne la valeur de l'éclairement global  $G$ . Pour mesurer le rayonnement diffus  $G_d$ , il suffit de monter sur le pyranomètre une bande venant occulter le rayonnement direct. La différence entre le rayonnement global  $G$  et le diffus  $G_d$  n'est autre que le rayonnement direct incident  $G_b$ .

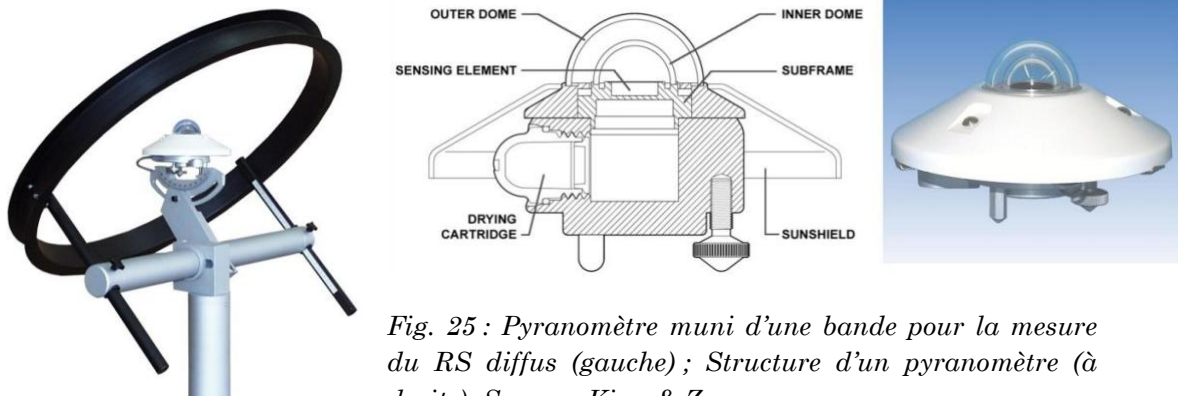


Fig. 25 : Pyranomètre muni d'une bande pour la mesure du RS diffus (gauche) ; Structure d'un pyranomètre (à droite). Source : Kipp & Zonen.

La bande en noir dans la fig. 25 est inclinée d'un angle  $90^\circ - \varphi$  où  $\varphi$  est la latitude du lieu de mesure. Adoptant ainsi une orientation parallèle au plan équatorial.

**L'héliographe de Campbell-Stokes**, comportant une boule de verre et



fonctionnant selon le principe de la loupe, permet de mesurer la durée d'insolation, c'est-à-dire la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct a une puissance suffisante (en pratique plus de  $120 \text{ W/m}^2$ ) pour brûler ou décolorer une bande de papier changée chaque jour.

#### 4.2. Mesure par satellite

Il est également possible de déterminer l'ensoleillement d'un site donné à partir des images satellites. L'analyse des images, initialement destinées à l'observation de la couche nuageuse (par exemple Meteosat en Europe), permet de déterminer avec une bonne précision la quantité d'énergie reçue sur le sol. Cette méthode est complémentaire aux mesures terrestres, moins chère et couvre de larges intervalles de temps (donc fiable). Elle permet une comparaison

<sup>16</sup> Une thermopile est un ensemble de thermocouple qui, chauffés par le RS, fournissent une d.d.p. L'intérêt d'un tel instrument est qu'il est indépendant de la longueur d'onde du rayonnement incident.

rapide entre les performances de site potentiel pour les projets de centrales électro- solaires.

Les satellites utilisés sont de type géostationnaires, c.à.d. ils sont fixes par rapport à la terre. Ils sont situés en dessus de l'équateur à une distance de 36000 km.

Les mesures de rayonnement solaire sont regroupées dans différentes bases de données internationales parmi lesquelles :

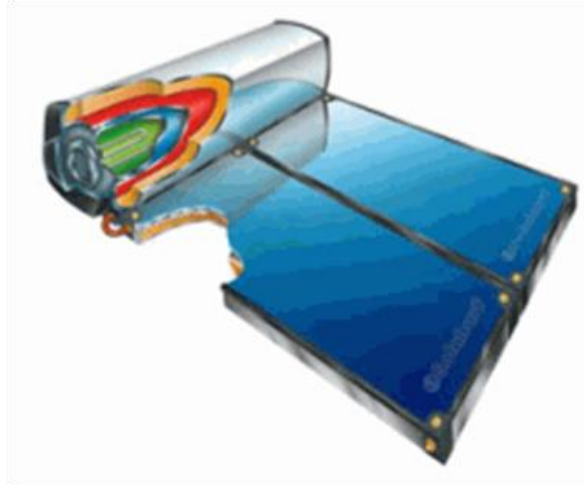
- Meteonorm,
- European Solar Radiation Atlas (ESRA),
- Eosweb,
- RETScreen,
- NASA's Surface Meteorology and Solar Energy (SSE),
- Satel-Light...etc.

La table ci-dessous montre un exemple de données météo fourni par Meteonorm pour le site de Farafra (Egypte).

<b>Time of day</b>	<b>Solar altitude</b>	<b>Azimuth</b>	<b>Diffuse hor. irradiation</b>	<b>DNI</b>
<b>h</b>	<b>°</b>	<b>°</b>	<b>Wh/m<sup>2</sup></b>	<b>Wh/m<sup>2</sup></b>
1	0.0	0	0	0
2	0.0	0	0	0
3	0.0	0	0	0
4	0.0	0	0	0
5	0.0	0	0	0
6	1.4	-115.3	11	0
7	13.8	-109.2	45	586
8	26.6	-103.5	67	743
9	39.7	-98.5	142	684
10	53	-93.2	208	677
11	66.3	-86.3	204	769
12	79.4	-71.2	316	640
13	84.7	45.2	327	626
14	72.3	81.5	253	705
15	59	90.4	203	721
16	45.7	96.2	151	730
17	32.5	101.3	148	551
18	19.5	106.5	75	581
19	6.9	112.4	39	227
20	0.0	0	0	0

Table 2 : Exemple de données de rayonnement solaire du 1<sup>er</sup> Juillet 2009 pour le site de Farafra (Egypte). Source Meteonorm.

## **CHAPITRE 2 : CAPTEURS PLANS**



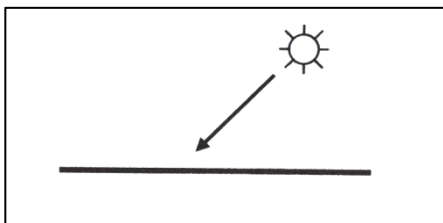
Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou simplement capteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. En complément du panneau photovoltaïque, qui transforme la lumière (les photons) en électricité, le capteur solaire thermique récupère l'énergie envoyée par le Soleil sous forme de chaleur (rayonnement) pour la transmettre à un fluide caloporteur (air ou liquide).

Les capteurs solaires plans (CSP) sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Sans concentration du rayonnement solaire, le flux d'énergie tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser 1 kW/m<sup>2</sup>. Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à 100°C. Par contre, ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent les composantes directes et diffuses du rayonnement solaire (RS). Ils sont essentiellement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage de piscines.

## 1. DESCRIPTION DU CAPTEUR PLAN

### 1.1. Surface absorbante

Son rôle est de transformer le RS de courtes longueurs d'onde en chaleur. La fraction du RS incident qui est absorbée par le capteur est appelée *fraction d'absorption solaire*  $\alpha$  (ou *absorptivité*) de la surface. Le complément à un  $(1-\alpha)$  de cette fraction correspond au *facteur de réflexion solaire*  $\rho$  (ou réflectivité) dans le cas où la plaque est opaque et donc le facteur de transmission solaire  $\tau$  est nul.



**Fig. 1 :** Schéma d'un capteur plan limité à la seule plaque absorbante.

L'absorbeur, en chauffant, va rayonner dans l'infrarouge. La fraction d'énergie effectivement rayonnée sur l'énergie que rayonnerait la surface considérée comme un corps noir est appelée *facteur d'émission infrarouge*  $\varepsilon$  ou *émissivité*.

L'émittance  $E$  d'une surface ayant pour température  $T$  s'écrit :

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

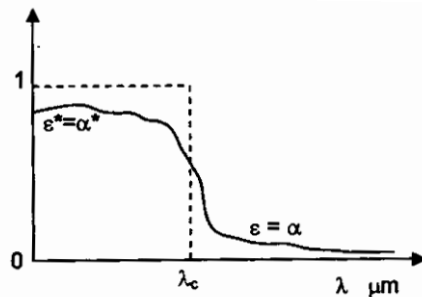
où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann :  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ .

- On appelle *sélectivité* le rapport du facteur d'absorption solaire  $\alpha$  sur le facteur d'émission infrarouge  $\varepsilon$ .

Dans les applications du chauffage solaire on cherche à obtenir une grande sélectivité en augmentant la partie absorbée du RS et en diminuant la partie émise dans l'IR. Ceci est possible puisque la bande spectrale d'absorption solaire [ $\lambda \leq 3 \mu\text{m}$ ] et la bande spectrale d'émission infrarouge [ $\lambda \geq 3 \mu\text{m}$ ] ne se recouvrent pratiquement pas.

- On appelle *longueur d'onde de coupure*, notée  $\lambda_c$ , la longueur d'onde qui sépare ces deux bandes spectrales.

Dans la plupart des applications solaires,  $\lambda_c \approx 3 \mu\text{m}$ . La figure ci-dessous illustre cette caractéristique qu'est la sélectivité :



**Fig. 2 :** Une surface sélective possède un facteur d'absorption  $\alpha$  pour les courtes longueurs d'onde du RS proche de 1 tandis son facteur d'émission  $\epsilon$  pour les grandes longueurs d'ondes (IR) est faible.

Le tableau suivant donne la sélectivité de quelques surfaces. Notons que c'est le revêtement qui compte : une surface d'un matériau donné mais revêtue d'une couche de peinture noire ou blanche n'aura pas le même comportement sur le plan des échanges radiatifs.

état de surface de différents matériaux	$\alpha^*$	$\epsilon$	$\alpha^*/\epsilon$
cuivre poli	0,25	0,02	12,5
film plastique recouvert d'or	0,30	0,03	10
acier poli	0,63	0,09	7
aluminium anodisé	0,80	0,14	5,71
nickel brillant	0,34	0,07	4,86
aluminium poli	0,10	0,04	2,5
peinture noire (silicate)	0,97	0,88	1,10
peinture aluminium	0,26	0,26	1
acier sablé	0,75	0,80	0,94
SSM : Kapton aluminisé de 0,5 mm d'épaisseur	0,36	0,52	0,69
peinture blanche (silicate)	0,14	0,90	0,16
OSR	0,11	0,83	0,13

**Table 1 :** Propriétés de quelques surfaces. La sélectivité est le rapport de l'absorptivité solaire  $\alpha$  sur l'émissivité IR  $\epsilon$ . Les OSR (Optical Solar Reflector) sont des miroirs en verre argenté ou aluminisé. Les SSM (Second Surface Mirror) sont des films plastiques (polyamide, polyester) souples et métallisés (argent, aluminium).

Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique.

Dans le cas des métaux, on utilise souvent le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium. Certaines de leurs propriétés thermophysiques sont données dans le tableau ci-dessous.

métal	conductivité thermique $\lambda$ W/m.K	chaleur massique $c_p$ J/kg.K	masse volumique $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
cuivre	384	398	8900	108
acier inoxydable	14	480	7800	4
aluminium	204	879	2700	86

*Table 2 : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques pouvant constituer la plaque de capteurs solaires plans.*

L'emploi de matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux. Les avantages sont :

- + La légèreté,
- + La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures,
- + La faible sensibilité des plastiques à la corrosion.

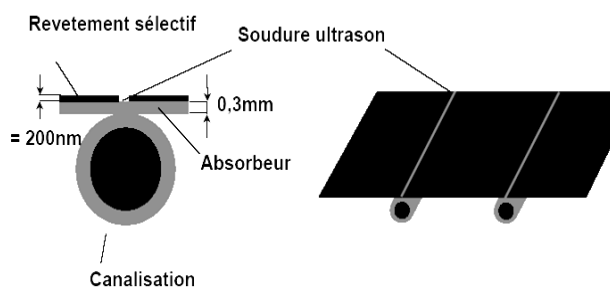
Les inconvénients sont :

- Une mauvaise conductibilité thermique,
- Un vieillissement dû aux rayonnements ultraviolet UV,
- Une tenue médiocre aux températures élevées.

Pour améliorer le rendement des capteurs, les absorbeurs sont recouverts d'un *revêtement sélectif*. Ces revêtements sont de couleur noire afin **d'absorber le RS au maximum ( $\alpha \sim 1$ )** et leur état de surface est tel qu'ils **piègent les rayonnements IR** qui sont émis lors de l'échauffement. Le coefficient d'émissivité est alors beaucoup plus faible que pour une peinture noire classique.

Généralement ces revêtements (voir Fig. 3) utilisent des **oxydes de nickel** ou de **chrome**, voire de **titane** :

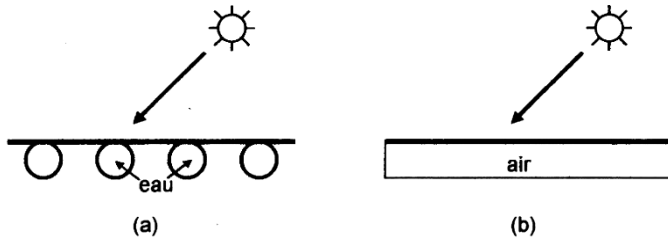
- *ChromeCoat* ( $\alpha = 0.95$ ,  $\varepsilon = 0.10$ ) sur cuivre ;
- *MTI Krosol* : ( $\alpha = 0.96$ ,  $\varepsilon = 0.12$ ) sur cuivre.



*Fig. 3 : Coupe transversale d'un absorbeur recouvert d'un revêtement sélectif (200 nm) pour optimiser l'absorption et l'émission.*

## 1.2. Fluide Caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise soit l'air, soit l'eau.



**Fig. 3 :** Schéma d'un capteur plan avec son système d'évacuation de la chaleur :  
(a) à eau,  
(b) à air.

L'air possède les avantages suivants :

- + Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été en cas de fort ensoleillement,
- + Avec l'air sec, il n'y a pas de problème de corrosion,
- + Toute fuite est sans conséquence,
- + Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant, l'utilisation de l'air entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux,
- La chaleur spécifique  $c_p$  de l'air est plus faible comparée avec celle de l'eau :  $\rho.c_p(\text{air})=1225 \text{ J/m}^3.K$  ;  $\rho.c_p(\text{eau})=4,210^6 \text{ J/m}^3.K$ ,
- Les conduites doivent donc avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant,
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

La technique généralement utilisée pour souder la tuyauterie sur la face arrière de la plaque absorbante (absorbeur) est la soudure par Ultrason, car elle permet de réduire le plus possible la résistance thermique de contact.

## 1.3. Couverture transparente

Elle est facultative mais peut permettre d'accroître sensiblement le rendement du convertisseur par *effet de serre* :

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

Par contre ils sont opaques aux UV (on ne bronze pas derrière une vitre) et retiennent une grande partie des IR que l'absorbeur émet lors de son



échauffement. La chaleur dégagée par ce dernier reste emprisonnée dans l'enceinte du capteur. C'est le *phénomène d'effet de serre* (fig. 4).

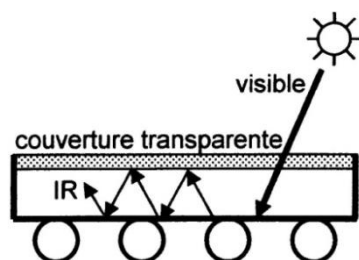


Fig. 4 : Schéma d'un capteur plan possédant une couverture transparente au RS

L'intérêt d'une couverture transparente pour le RS est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur dépasse 70°C. Un double vitrage est alors envisageable pour accroître le rendement du capteur.

Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en *verre*, mais on peut trouver aussi des produits de synthèse tel que le *polycarbonate*, le *polyméthacrylate* ou encore le *polyester armé*.

Le tableau 3 fournit quelques propriétés de ces matériaux :

matériau	noms commerciaux	épaisseur mm	$\tau^*$ %	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg.K	$\lambda$ W/m.K	$k_a$ 10 <sup>-5</sup> /K
verre à vitre		3	85-92	2700	840	0,93	0,9
polycarbonate	Makrolon Lexan	3,2	82-89	1200	1260	0,2	6,6
polyméthacrylate	Altuglas Plexiglas	3,2	89-92	1200	1460	0,2	7
polyester armé		1	77-90	1400	1050	0,21	3,5
polytéraphthalate d'éthylène	Mylar Terphane	0,025	84	1,38	1170	0,25	7
polyfluoroéthylène propylène	Teflon FEP	0,05	97	2,15	1170	0,25	10
polyfluorure vinyle	Tedlar	0,1	93	1,50	1380	0,12	4

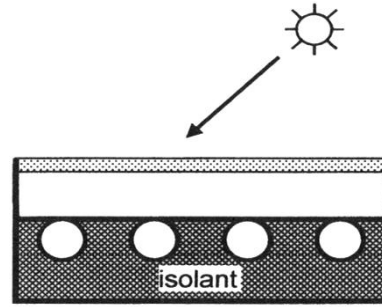
Tableau 3 : Propriétés physiques de quelques matériaux transparents au RS mais opaque aux IR.  $\tau^*$  Facteur de transmission solaire,  $\rho$  masse volumique,  $c_p$  chaleur massique,  $\lambda$  conductivité thermique,  $k_a$  coefficient de dilatation thermique.

#### 1.4. Isolant

Pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois. Vers *l'avant*, c'est le plus souvent une lame d'air qui constitue l'isolant. Son épaisseur ne doit pas être trop importante (entre 2 et 3 cm) pour limiter les transferts par convection.



Fig. 5 : Schéma d'un capteur plan complet avec son isolant en face arrière.



Sur la partie *arrière* du capteur, on place une ou plusieurs couches d'isolant de type laine de verre, polystyrène, mousse de polyuréthane... le tableau 4 donne les caractéristiques de certains matériaux pouvant servir d'isolant.

- Flux de chaleur traversant l'isolant :

On se place en régime permanent, c.à.d. la température est indépendante du temps. On suppose que l'écoulement de la chaleur est monodirectionnel suivant la direction perpendiculaire au *mur*. Ce dernier est constitué de la plaque, de l'isolant et du coffre qui lui sert de protection. On peut montrer (voir *Annexe - Conduction*) que le flux de chaleur  $\phi$  traversant le mur isolant s'écrit :

$$\phi = \frac{T_p - T_a}{\sum_i \left( \frac{e}{\lambda} \right)_i}$$

L'indice  $i$  caractérisant l'un des matériaux rencontré par la chaleur durant son écoulement de la plaque, à la température  $T_p$ , vers l'extérieur à  $T_a$ .

1) **Application :**

On installe en face arrière d'un CSP une plaque de polyuréthane de 50 mm d'épaisseur ( $\lambda=0,029 \text{ W/m.K}$ ) protégé de l'extérieur par un coffre en pastique de 5 mm ( $\lambda=0,166 \text{ W/m.K}$ ). On suppose connu les températures de la plaque  $T_p=60^\circ\text{C}$  et extérieure  $T_a=15^\circ\text{C}$ .

Calculons la déperdition calorifique  $\phi$  de ce capteur par sa face arrière en  $\text{W/m}^2$ ?

$$\phi = \frac{60 - 15}{\frac{0,05}{0,029} + \frac{0,005}{0,166}} = 25,7 \text{ W/m}^2.$$

Notons qu'il peut exister entre 2 matériaux solides en contact une résistance thermique de *Contact*. Son importance dépend de l'état de surface respectif des matériaux. Dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les 2 face en contact un film d'air qui empêche la conduction de la chaleur. Presser les matériaux l'un contre l'autre permet de diminuer cette résistance de contact (but transmettre le max.). Dans le cas de l'isolation, la résistance de contact est bonne à prendre (ne pas comprimer alors les matériaux) en effet l'air a une

conductivité thermique très basse ( $\lambda=0,025 \text{ W/m.K}$  à  $20^\circ\text{C}$ ) et lorsqu'il ne bouge pas, il apparait comme un des meilleurs isolants.

Matériau	Conductivité thermique $\lambda \text{ (W/m.K)}$	Masse Volumique $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Chaleur Massique $c_p \text{ (J/kg.K)}$
Air à $20^\circ\text{C}$	0,025	1,2	1003
Mousse de polyuréthane	0,029	30	1600
Polystyrène expansé	0,040	20	1500
Laine (vêtement)	0,040	450	1880
Liège expansé	0,048	120	1380

**Tableau 4 :** Propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolant.

## 2. RENDEMENT D'UN CSP

### 2.1. Bilan énergétique :

Soit  $\mathcal{Q}_a^*$  l'énergie solaire absorbée par un capteur. Une partie de celle-ci est emmagasinée dans le fluide caloporteur ; c'est l'énergie utile  $\mathcal{Q}_u$ . Cette énergie peut être directement utilisée (chauffage par air chaud par exemple) ou bien transférée à un stockage (ballon d'eau chaude par exemple).

Un capteur subit des pertes thermiques principalement par convection et rayonnement. Ces pertes seront notées  $\mathcal{Q}_p$ . Si l'on s'intéresse à une période de mise en température du système (démarrage par exemple), il faudra tenir compte de l'énergie absorbée par le capteur nécessaire à cette montée en température. Cette énergie, notée  $\mathcal{Q}_t$ , dépend de l'inertie thermique de l'installation. On a donc :

$$\mathcal{Q}_a^* = \mathcal{Q}_u + \mathcal{Q}_p + \mathcal{Q}_t$$

Par la suite, on admettra les hypothèses suivantes :

- Le régime est supposé permanent ;
- La vitre et l'absorbeur sont supposées isothermes ;
- On néglige les effets de bord, c.à.d. on suppose un capteur infini ;
- Le ciel rayonne à  $T_\infty$  donnée par la formule empirique suivante :

$$T_\infty = 0,0552 \times T_a^{1,5}.$$

## 2.2. Rendement du capteur

La fig. 6 représente la géométrie du capteur étudié tandis que la fig. 7 indique les paramètres utilisés pour exprimer les différentes températures.

Fig. 6 : Schéma du capteur étudié.

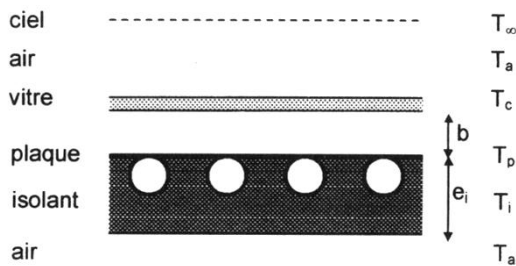
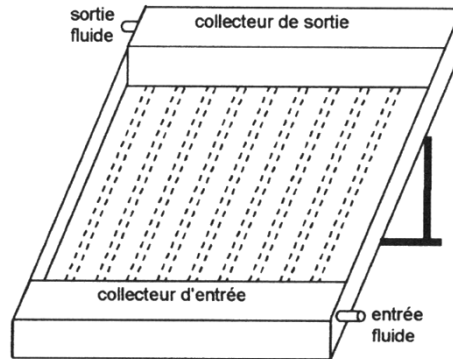


Fig. 7 : Schéma donnant les températures des différents composants intervenant dans la détermination du rendement d'un CSP.

### 1) Flux absorbée :

Le flux solaire absorbé par le CSP vaut en première approximation :

$$Q_a^* = E \times \tau_c \times \alpha_p$$

- $E$  est l'éclairement solaire (densité de flux) au niveau du capteur ( $W/m^2$ );
- $\tau_c$  est le coefficient de transmission de la couverture (%);
- $\alpha_p$  est le coefficient d'absorption de la plaque absorbante i.e. l'absorbeur (%).

### 2) Flux utile :

Le flux utile  $Q_u$  ( $W/m^2$ ) est celui qui permet de réchauffer le débit de fluide caloporteur  $\dot{m}$  de la température d'entrée  $T_e$  jusqu'à la température de sortie  $T_s$  :

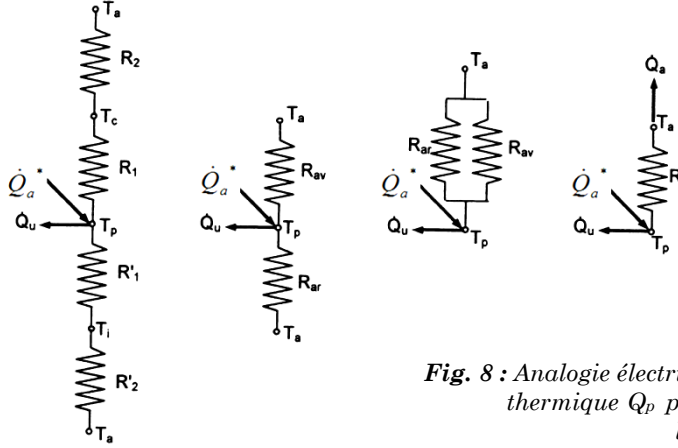
$$Q_u = \dot{m} c_p (T_s - T_e)$$

- $\dot{m}$  est le débit massique du fluide caloporteur par unité de surface ( $Kg/s.m^2$ );

- $c_p$  est la chaleur spécifique du fluide caloporteur ( $J/kg \cdot ^\circ C$ );
- $T_s, T_e$  : températures du fluide à la sortie et à l'entrée du capteur ( $^\circ C$ )

### 3) Flux perdu

Le flux thermique  $Q_p$  ( $W/m^2$ ) perdu avec l'environnement peut être déterminé par une analogie électrique comme indiqué à la fig. 8 :



**Fig. 8 :** Analogie électrique permettant de déterminer le flux thermique  $Q_p$  perdu par la plaque (l'absorbeur) avec l'environnement à la température  $T_a$ .

Soit  $R_1$  la résistance thermique existant entre l'absorbeur (plaque) à  $T_p$  et la vitre (couverture) à  $T_c$ . La résistance thermique  $R$  est l'inverse de la *conductance thermique*  $K$  (soit  $K=1/R$ ). Dans notre cas, cette dernière est la somme de deux termes : une conductance due à la convection naturelle qui règne dans l'air emprisonné entre l'absorbeur et la vitre et une autre due au phénomène d'échange radiatif intervenant entre ces deux surfaces à températures différentes.

Soit  $h_{c1}$  et  $h_{r1}$  les coefficients d'échange thermique relatifs respectivement à la convection et au rayonnement. On a :

$$R_1 = \frac{1}{h_{c1} + h_{r1}}$$

Soit  $R_2$  la résistance thermique entre la vitre et l'extérieur à  $T_a$ . De la même façon que pour  $R_1$ , on a affaire à des échanges thermiques par convection et rayonnement. On notera  $h_{c2}$  et  $h_{r2}$  les coefficients d'échange correspondants. Et par suite :

$$R_2 = \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}}$$

$R_1$  et  $R_2$  étant en série, la résistance thermique vers l'avant du capteur  $R_{av}$  s'écrit :

$$R_{av} = R_1 + R_2$$

Soit  $R_1'$  la résistance thermique créée par l'isolant. On a affaire à de la conduction pure. Le coefficient d'échange par conduction thermique dans le cas du mur semi-infini <sup>[17]</sup> s'écrit :

$$R_1' = \frac{e_i}{\lambda_i}$$

Où  $e_i$  et  $\lambda_i$  représentent respectivement l'épaisseur et la conductivité thermique de l'isolant.

Soit  $R_2'$  la résistance thermique entre la face externe de l'isolant et l'air ambiant à  $T_a$ . En général, cette résistance peut être *négligée* ( $R_2' \approx 0$ ) puisque la température de surface de l'isolant étant très proche de  $T_a$ .

Ainsi, la résistance thermique  $R_{ar}$  arrière du capteur s'écrit :

$$R_{ar} = R_1' + R_2'$$

L'analogie électrique de la figure 8 permet d'écrire :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_1' + R_2'}$$

Soit en utilisant les conductances :  $K = K_{av} + K_{ar}$

$$\text{Avec } K_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2} \text{ et } K_{ar} = \frac{1}{R_1' + R_2'} \approx \frac{1}{R_1'}$$

Finalement, le flux thermique perdu s'écrit :

$$\mathcal{Q}_p = K(T_p - T_a)$$

On en déduit le rendement instantané  $\eta$ , égal au rapport de l'énergie utile sur l'éclairement solaire reçu par le capteur :

$$\begin{aligned} \eta = \frac{\mathcal{Q}_u}{E} &= \frac{\mathcal{Q}_a - \mathcal{Q}_p}{E} = \tau_c \cdot \alpha_p - \frac{\mathcal{Q}_p}{E} \\ &= \tau_c \cdot \alpha_p - K \times \frac{(T_p - T_a)}{E} \\ &= B - K \times \frac{(T_p - T_a)}{E}; \end{aligned}$$

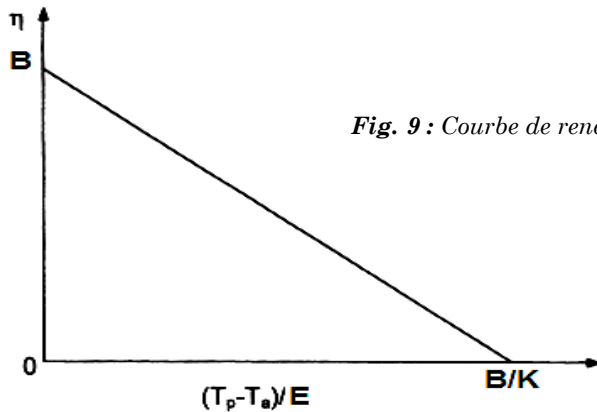
$$\text{avec : } B = \tau_c \cdot \alpha_p$$

---

<sup>[17]</sup> On suppose que la chaleur se propage dans une direction perpendiculaire au mur et ne tient pas compte des limitations spatiales du système plan étudié.

- $B$  : facteur optique traduit la qualité optique du capteur ( $0 < B < 1$ );
- $K$  : coefficient globale des pertes thermiques, il caractérise la qualité de l'isolation du capteur (couverture+absorbeur+coffre) ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).
- Le rapport  $\frac{(T_p - T_a)}{E}$  est appelé température réduite.

La connaissance des coefficients  $B$  et  $K$  est utile dans les avants projets pour déterminer la surface des capteurs nécessaire à l'utilisation envisagée (dimensionnement);



**Fig. 9 :** Courbe de rendement  $\eta$  d'un CSP donnée en fonction de la température réduite  $(T_p - T_a)/E$

D'après la Fig. 9, le rendement sera d'autant meilleur que la température de l'absorbeur sera proche de la température ambiante. C'est la raison pour laquelle il ne faut pas rechercher de hautes températures du fluide caloporteur avec des capteurs solaires plans.

### 2.3. Rayonnement seuil ou seuil de démarrage :

Contrairement à un capteur PV dont la production est proportionnelle à l'irradiation incidente, un capteur thermique ne fournit une énergie utilisable qu'au-delà d'un certain seuil d'irradiance, fonction des caractéristiques du capteur et des températures de fonctionnement. Ce seuil est *la puissance minimale nécessaire pour que le rendement du capteur devienne positif*, c'est-à-dire qu'il puisse fournir de l'énergie à un niveau de température supérieure à celui de la charge qu'il alimente. L'expression du seuil d'irradiance  $E_s$  dépend de la formule du rendement utilisé :

$$\frac{(T_p - T_a)}{E_s} = \frac{B}{K} \Rightarrow E_s = \frac{K}{B} (T_p - T_a)$$

### 2.4. Température de stagnation :

Un capteur solaire ne monte pas indéfiniment en température. Plus sa température de fonctionnement augmente, plus le rendement diminue jusqu'à s'annuler.

La température de stagnation  $T_s$  est la température atteinte par le capteur en l'absence de circulation du fluide, donc à rendement nul. Elle est d'autant plus élevée que l'irradiation est importante, la température extérieure élevée et le capteur performant. L'expression de  $T_s$  est obtenue en résolvant l'équation :

$$\eta = 0 \Rightarrow T_s = \frac{E \cdot B}{K} + T_a$$

### 2.5. Normes et Intervenants :

Au Maroc, la norme NM 14.5.004 constitue le cadre réglementaire régissant les capteurs solaires en circulation (fabriqués et/ou importés). Cette norme, qui repose en grande partie sur des normes européennes (NE 12975-2), intègre les aspects sécurité des capteurs solaires thermiques.

Des mesures de performances thermiques effectuées par des laboratoires agréés dans des conditions normalisées permettent d'homologuer des valeurs précises des coefficients **B** et **K**. Au Maroc, les capteurs, mis sur le marché, sont couverts par des avis techniques délivrés par l'Agence Nationale des Energies Renouvelables et d'Efficacité Énergétique (ANEREE), Marrakech.

L'Association Marocaine des Industries Solaires et Eolienne *AMISOLE* ([www.amisole.com](http://www.amisole.com)), regroupe les entreprises intervenant dans ce secteur parmi lesquelles : *AG energie, Batiterm, Chaffoteaux, Clean Energie, Energetica, Giordano maroc, NRJ International, Phototherm, Solargie, Noorweb, Sisteclen, Sococharbo,...*etc.

## 3. Autres types de Capteurs

### 3.1. Les capteurs sans vitrage

Ce capteur est constitué d'un caoutchouc souple très résistant : l'Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM). Du fait de l'absence de vitrage, et donc des pertes de transmission afférentes, il possède un très bon rendement pour les températures proches de la température de l'air ambiant. Il ne permet pas de produire d'eau chaude sanitaire. Par ailleurs, son coût est d'environ 100 euro/m<sup>2</sup>.



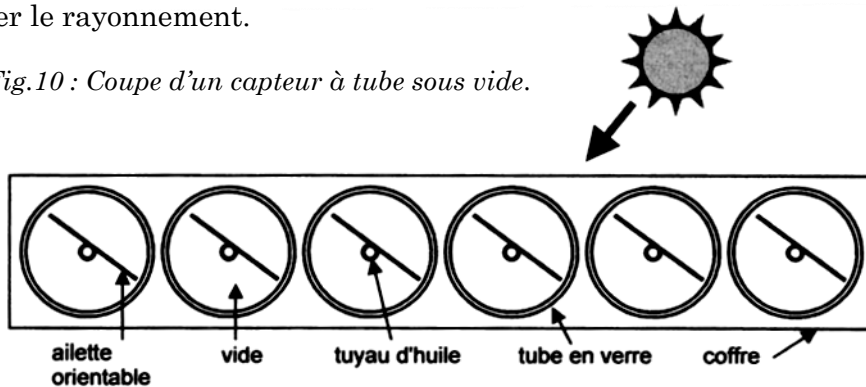
### 3.2. Les capteurs à tubes sous vide

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes parallèles transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre (Fig.10). Au milieu de chaque tube se trouve un tuyau coaxial soudé à une ailette mobile jouant le rôle de surface absorbante. Dans le tuyau central circule une huile thermique dont la température peut aisément dépasser 100°C sans risque d'ébullition.



Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

Fig.10 : Coupe d'un capteur à tube sous vide.



Pour être efficace le vide doit être poussé  $< 10^{-3}$  Pa. Un tube devient inutile s'il n'est pas totalement hermétique et il faut le changer pour préserver la performance de l'ensemble du capteur. Afin de visualiser cette éventualité, les tubes sont munis d'un témoin (getter) en baryum, qui dépose une couche métallisée sur l'intérieur du tube pendant la fabrication. Cette couche argentée de baryum devient blanc en contact avec l'air et ainsi sert de témoin à la perte de vide.

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures ( $\sim 150^{\circ}\text{C}$ ) avec des rendements corrects. Ils conviennent parfaitement à un système de climatisation par absorption.



# Les Capteurs à Concentration

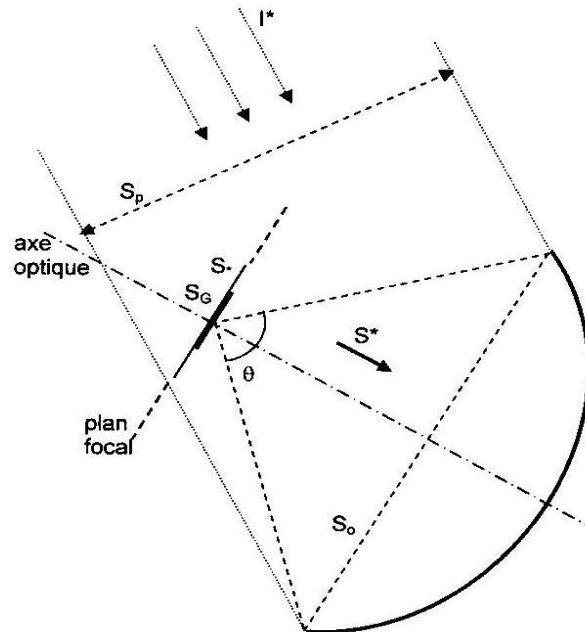
Si l'on veut produire du travail à partir de l'énergie solaire, il faut donc atteindre des températures de source chaude  $T_c$  plus élevées que celles rencontrées avec les capteurs plans. Le rendement de Carnot  $\eta_c$  est la pour le rappeler :  $\eta_c = 1 - T_f / T_c$  ou  $T_f$  est la température de la source froide et  $T_c$  celle de la source chaude. Pour cela, il est nécessaire de concentrer le rayonnement solaire (RS) au moyen de surface optique ce qui élimine en pratique la composante diffuse du RS. Une orientation permanente et précise du capteur est donc nécessaire pour obtenir un bon rendement. Un système à concentration sera donc souvent un système dynamique.

## 1. Description

### 1.1. Définitions

La figure 1 définit les différentes grandeurs géométriques que l'on peut rencontrer dans la description des capteurs à concentration.

Fig. 1: Schéma d'un capteur solaire à concentration (CSC).



Avec :

- $\theta$  Angle d'ouverture du Concentrateur (*rim angle*) c.à.d. l'angle sous lequel on voit le concentrateur à partir du Plan Focal (PF) ;
- $I^*$  Eclairement solaire ( $W/m^2$ ) ;
- $S^*$  Eclairement direct dans la section d'ouverture du concentrateur ( $W/m^2$ ) ;
- $S_o$  section d'ouverture (ou ouverture) caractérisé par l'angle  $\theta$  ;
- $S_p$  section de passage du RS entrant dans le concentrateur;  $S_p$  se confond avec  $S_o$  quand l'axe optique du concentrateur est orienté vers le soleil.
- $S_g$  surface de l'image de Gauss du soleil; c'est l'image nette du soleil dans le plan focal PF donnée par les rayons paraxiaux (c.à.d. des rayons proches de l'axe optique)
- $S_*$  surface de l'image réelle du soleil dans le PF.

Considérons le réflecteur à deux dimensions de la fig. 2 ; c'est un cylindre, supposé de longueur infinie.

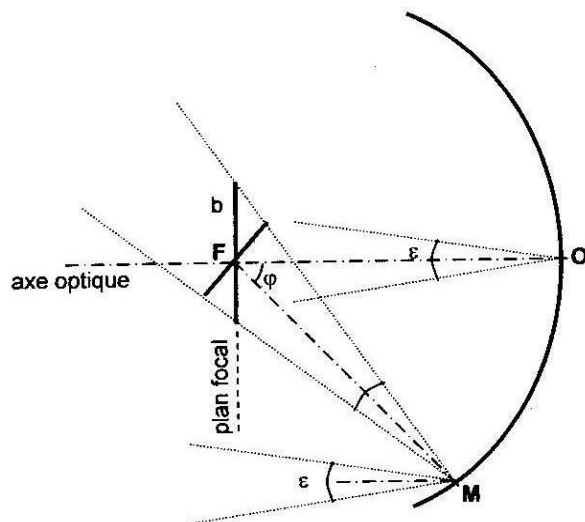


Fig. 2 : Représentation dans le Plan Focal d'un concentrateur cylindrique, de l'image d'une source vue sous un angle  $\varepsilon$ .

La largeur  $b$  de l'image dans le PF, donnée par des rayons éloignés de l'axe optique est :

$$b = \frac{2 \cdot r \cdot \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\cos \varphi}$$

Avec  $r=MF$ .

Pour des rayons paraxiaux ( $\varphi=0$ ), on obtient *par définition* la largeur (ou diamètre<sup>18</sup>) de l'image de Gauss, en remarquant que  $\tan \varepsilon \approx \varepsilon$  :

$$b_G = f \cdot \varepsilon$$

Avec  $f=OF$ =distance focale.

**Application :** Pour un capteur de 10 m de focale ( $f=10$  m), l'image de Gauss du soleil aura une largeur  $b_G = 10 \cdot \frac{32}{60} \cdot \frac{\pi}{180} = 9,3$  cm ; En effet *En effet le diamètre apparent du soleil*<sup>19</sup> vaut 32' d'arc.

On peut généraliser ainsi : la dimension  $b_G$  de l'image de Gauss du Soleil est égal en centimètres à la distance focale en mètres.

On définit par ailleurs les quantités suivantes :

<sup>18</sup> Largeur dans le cas d'un concentrateur à 2 dimensions (cylindro-parabolique par ex.) et diamètre dans le cas d'un concentrateur à 3 dimensions (sphérique et parabolique par ex.)

<sup>19</sup> Le diamètre apparent du Soleil étant l'angle  $\varepsilon$  sous lequel on voit le Soleil à partir de la Terre.

$\dot{Q}_G^*$	Flux solaire moyen dans l'image de Gauss.	
$C^*$	Concentration énergétique	$C^* = \frac{\dot{Q}_G^*}{S^*}$
$C_G$	Concentration idéale	$C_G = \frac{S_0}{S_G}$
$\eta$	Efficacité du concentrateur	$\eta = \frac{C^*}{C_G}$
$C$	Concentration géométrique	$C = \frac{S_0}{S_*}$
$C_e^*$	Concentration effective i.e. réelle du système (tient compte des pertes)	
$FF$	Facteur de Four	$FF = \frac{C_e^*}{C^*}$

## 1.2. Détermination de la Concentration géométrique

### a) Concentrateur à 3 dimensions

Soit un système d'angle d'ouverture  $\theta$  avec l'axe optique orienté vers le soleil (fig. 3). L'image du soleil, formée sur la surface réceptrice élémentaire  $dS$ , reçoit un flux  $\phi_*$  qui s'écrit en (W/m<sup>2</sup>) :

$$\phi_* = \int_0^{\theta/2} I^* \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega$$

Où  $I^*$  représente l'intensité du RS par unité de surface et par unité d'angle solide (W/m<sup>2</sup>.sr) . Le  $\cos \alpha$  provient du fait que la composante utile est celle // à l'axe optique.

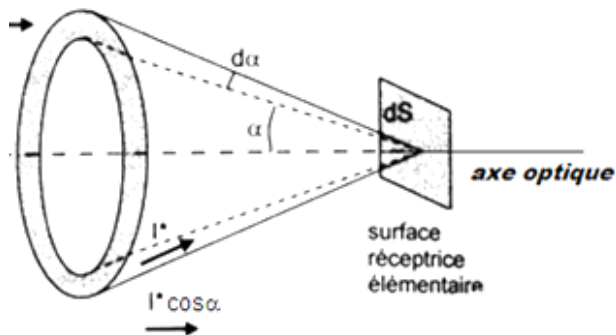


Fig. 4: Concentration sur une surface réceptrice élémentaire du RS incident  $I^*$  tombant sur une surface élémentaire d'un concentrateur à 3 dimensions.

L'angle solide élémentaire  $d\Omega$  (fig. ci-contre) s'écrit :

$$d\Omega = 2\pi \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha ;$$

Il est défini par les intersections des 2 cônes de demi-angle aux sommets  $\alpha$  et  $\alpha+d\alpha$  avec la sphère de rayon unité ( $R=1$ ).

Soit finalement après intégration :

$$\Phi_* = \pi \cdot I^* \cdot \sin^2(\theta/2)$$

Dans le cas où il n'y a pas de concentrateur, le flux  $\Phi_0$  reçu par  $m^2$  correspond au cas précédent mais avec un angle d'ouverture réduit à l'angle sous lequel on voit la source, c.à.d. l'angle  $\varepsilon$  sous lequel on voit le Soleil de la Terre. Il suffit donc de remplacer  $\theta$  par  $\varepsilon$ . D'où :

$$\Phi_0 = \pi \cdot I^* \cdot \sin^2(\varepsilon/2)$$

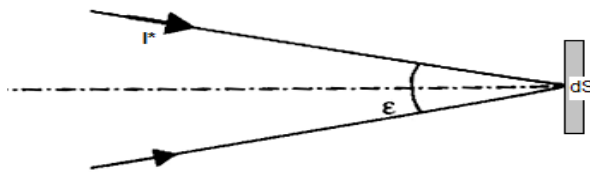


Fig.5: Rayons extrêmes en provenance du soleil vu sous l'angle  $\varepsilon$ .

Le flux  $\Phi_0$  correspond à la puissance rayonnée par le soleil et reçu par  $m^2$  de l'ouverture  $S_0$ .

La conservation de l'énergie permet d'écrire :

$$\text{Puissance solaire totale à l'ouverture} = \text{Puissance sur la surface de l'image du soleil}$$

$$S_0 \cdot \Phi_0 = S_* \cdot \Phi$$

Rappelons que la concentration géométrique vaut par définition:  $C = \frac{S_0}{S_*}$  ;

Il s'ensuit que :

$$C = \frac{S_0}{S_*} = \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

Dans le cas d'un concentrateur à 3 dimensions (sphérique ou parabolique par exemple), cette concentration s'écrira donc :

$$C = \frac{\sin^2(\theta/2)}{\sin^2(\varepsilon/2)}$$

### b) Concentrateur à 2 dimensions

Dans le cas d'un concentrateur à 2 dimensions, la concentration n'a lieu que suivant une seule direction, le système étant cylindrique de longueur supposé unitaire (fig.6).

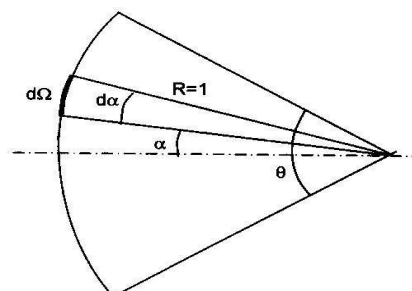


Fig.6: Angle solide  $d\Omega$  dans le cas d'un concentrateur deux dimensions de longueur unitaire.

Dans ce cas,  $d\Omega = R \cdot d\alpha \cdot 1 = d\alpha$ ,

D'où :

$$\Phi = \int_{-\theta/2}^{\theta/2} I^* \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega = 2 \cdot I^* \cdot \sin(\theta/2)$$

Sans concentration, il suffit de remplacer dans l'expression précédente,  $\theta$  par  $\varepsilon$ . D'où :

$$\Phi = 2 \cdot I^* \cdot \sin(\varepsilon/2)$$

On en déduit la concentration géométrique C :

$$C = \frac{\sin(\theta/2)}{\sin(\varepsilon/2)}$$

### 1.3. Concentration géométrique maximale $C_{max}$

L'angle  $\varepsilon$  est l'angle sous lequel on voit le Soleil à partir de la Terre :

$$\varepsilon = 32' = \frac{32}{60} \times \frac{\pi}{180} = 9,31 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$$

Les valeurs limites pour  $C_{max}$  sont obtenues en posant  $\theta = \pi$ ,

On obtient ainsi :

- Pour un concentrateur à 3 dimensions :  $C_{max} = 46165$  ;
- Pour un concentrateur à 2 dimensions :  $C_{max} = 215$

Un système permettant d'obtenir les valeurs  $C_{max}$  des concentrations géométriques est un *concentrateur idéal*. Dans la pratique, les valeurs maximales atteintes sont plus faibles en raison de la qualité optique des réflecteurs qui ne sont jamais parfaitement réfléchissants.

### 1.4. Température maximale du récepteur

Soit une source de rayonnement de surface diffuse  $S_s$ . Un système optique d'ouverture  $S_o$  concentre le rayonnement sur un récepteur de surface  $S_r$ .

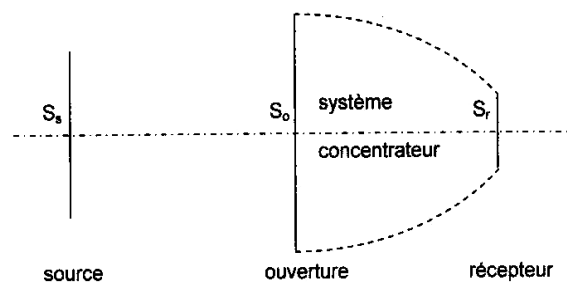
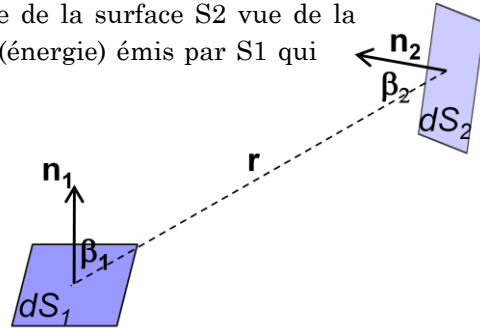


Fig.7 : Schéma d'un système concentrateur.

**Rappel :** On rappelle que le facteur de forme de la surface S2 vue de la surface S1 est la fraction de flux hémisphérique (énergie) émis par S1 qui reçue par S2 :

$$dF_{dS_1-dS_2} = dF_{12} = \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dS_2 ;$$

Avec  $S_1 F_{12} = S_2 F_{21}$  (loi de réciprocité).



On peut montrer (voir TD) que la température maximale du récepteur  $T_r$  est inférieure à la température de la source  $T_s$  c.à.d. le soleil :

$$T_r < T_s \cdot \left( \frac{C}{C_{\max}} \right)^{1/4} ; \text{ ou } C = \frac{S_0}{S_*} \text{ et } C_{\max} = \frac{1}{F_{os}}$$

Avec

$C$  : facteur de concentration géométrique du système ;

$S_*$  : surface de l'image réelle du soleil dans le PF ;

$F_{os}$  : facteur de forme entre l'ouverture du système et la source.

La température d'un récepteur solaire ne peut donc dépasser la température de 5770 K.

## 2. Concentrateur parabolique

Les concentrateurs paraboliques (*Solar Dish System*) sont des systèmes à focalisation ponctuelle avec un facteur de concentration situé généralement entre 1000 et 13000 et sont modulaires avec double axe de rotation.

### 2.1. Concentration idéale

La paraboïde de révolution (dite parabole) est une surface dite *stigmatique*: tout rayon // à l'axe optique converge après réflexion, en un point  $F$  appelé foyer.

Par définition, la distance focale  $f$  vaut:  $f = CF = FO = OF'$ .

Une propriété de la parabole: si  $M$  est un point situé sur la parabole, alors  $FM = MM'$ .

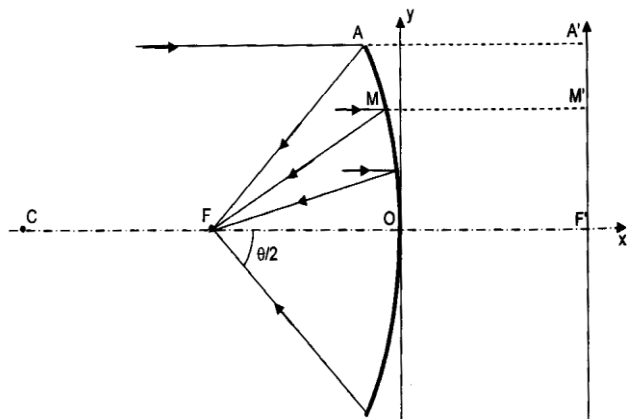


Fig. 9 : Coupe d'u paraboïde de révolution caractérisée par la distance focale  $f = CF = FO = OF'$ .



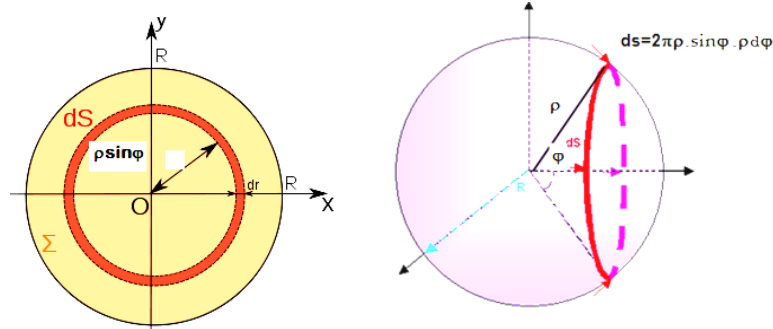
### 2.3. Concentration énergétique

Par définition, la concentration énergétique s'écrit :  $C^* = \frac{\mathcal{Q}_G^*}{S^*}$  ;

Avec  $S^*$ , éclairement direct dans la section d'ouverture (DNI),

$\mathcal{Q}_G^*$  flux solaire moyen dans l'image de Gauss.

En se référant à la même figure 10, le point M est un point du paraboloïde et l'angle que fait le rayon  $FM=\rho$  avec l'axe optique étant  $\varphi$  :



Une couronne élémentaire du paraboloïde vaut :

$$ds_{cour.} = 2\pi \cdot \rho \sin\varphi \cdot \rho d\varphi = 2\pi\rho^2 \sin\varphi d\varphi,$$

Elle reçoit une puissance égale a :  $dQ^* = S^* \cdot 2\pi\rho^2 \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi$

On supposant que cette puissance  $dQ^*$  est entièrement<sup>20</sup> réfléchi et repartis uniformément dans le PF, l'image de Gauss reçoit la fraction:

$$dQ_G^* = dQ^* \cdot \frac{S_G}{S_e(\varphi)} = dQ^* \cdot \frac{\pi \cdot f^2 \cdot \xi^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho^2 \cdot \xi^2} \cdot 4 \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \varphi}$$

$$\text{Soit : } dQ_G^* = S^* 2\pi \cdot f^2 \cdot \sin\varphi \cos\varphi \cdot d\varphi$$

La puissance totale reçue dans l'image de Gauss s'écrit:

$$Q_G^* = \mathcal{Q}_G^* \cdot S_G = \int_0^{\theta/2} dQ_G^* = S^* \pi \cdot f^2 \sin^2(\theta/2)$$

$$\text{Et finalement : } C^* = \left( \frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\theta}{2} \right)^2$$

$$\text{L'efficacité du paraboloïde s'écrit : } \eta = \frac{C^*}{C_G} = \left( \cos \frac{\theta}{4} \right)^4$$

<sup>20</sup> Si la couronne élémentaire reçoit la puissance  $dQ^*$ , la puissance réfléchié vers le récepteur vaut :  $dQ^* / \cos \varphi$ .



Pour  $\theta=\pi$ , on retrouve la concentration énergétique maximale:  $C^*=46165$  et  $\eta=25\%$ .

### 3. Concentrateur cylindro-parabolique

Les concentrateurs cylindro-paraboliques (*Parabolic Trough System*) sont des systèmes à focalisation linéaire avec un facteur de concentration situé généralement entre 30 et 80 et sont munis d'un simple axe de rotation (N-S). Ce type de technologie est actuellement le plus répandu sur le marché de production d'électricité par voie solaire thermique (ou thermodynamique).



#### 3.1. Concentration idéale

Si  $L$  est la longueur du concentrateur, la section d'ouverture s'écrit :

$$S_0 = L \cdot 2 \cdot y_A$$

$$\operatorname{tg}(\theta/4) = \frac{y_A}{2 \cdot f} \Rightarrow S_0 = 4f \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\theta/4)$$

La surface de l'image de Gauss vaut :  $S_G = L \cdot f \cdot \varepsilon$

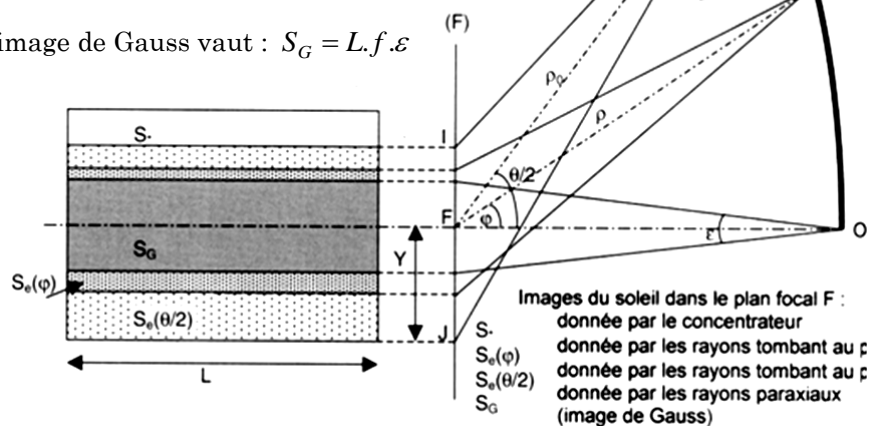


Fig. 11 : Coupe d'un demi-capteur cylindro-paraboloïde de révolution montrant les projections dans le PF de l'image du soleil.

D'où la concentration idéale :

$$C_G = \frac{S_0}{S_G} = \frac{4f \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\theta/4)}{f \cdot L \cdot \varepsilon}$$

$$\Rightarrow C_G = \frac{4}{\varepsilon} \operatorname{tg}(\theta/4)$$

#### 3.2. Concentration géométrique

En posant  $FJ=Y$  et  $AF=\rho_0$ , on a :

$$Y \approx \frac{\rho_0 \cdot \varepsilon}{2 \cos(\theta/2)} \quad , \quad S_* = 2 \cdot Y \cdot L \quad , \quad S_0 = 2 \cdot L \cdot \rho_0 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Sachant que :

$$C = \frac{S_0}{S_*} = \frac{2.L.\rho_0.\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2.L.\rho_0.\varepsilon} \times 2 \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

On trouve :

$$C = \frac{\sin \theta}{\varepsilon}$$

### 3.3. Concentration énergétique

La puissance reçue par une bande élémentaire de l'ouverture du capteur vaut :

$$dQ^* = S^* \cdot L \cdot \rho d\varphi$$

En supposant une répartition uniforme de l'énergie dans le PF et une surface réfléchissante parfaite, la fraction reçue dans l'image de Gauss vaut:

$$dQ_G^* = dQ^* \cdot \frac{S_G}{S_e(\varphi)} = S^* L \rho d\varphi \cdot \frac{f \varepsilon L}{L 2 Y_\varphi} = S^* L \rho d\varphi \cdot \frac{f \varepsilon}{2 \rho \varepsilon} \cdot 2 \cos \varphi$$

soit

$$dQ_G^* = S^* L \cdot f \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi$$

La puissance totale reçue dans l'image de Gauss s'écrit :

$$Q_G^*(W) = \mathcal{Q}^*(W/m^2) \times S_G = \int_{-\theta/2}^{+\theta/2} dQ_G^* = 2 \times S^* L f \sin(\theta/2)$$

D'où :

$$C^* = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\varepsilon}$$

La concentration énergétique sera maximale pour  $\theta=\pi$  :  $C^*=215$  avec  $\eta=50\%$ .

### 3.4. Montage

Il existe 2 types de montage d'un capteur cylindro-parabolique :

- Montage suivant l'axe du monde (Nord-Sud):  
Le tube récepteur est parallèle à l'axe de rotation de la terre. Le suivi du soleil nécessite un simple asservissement en rotation autour de cet axe.
- Le montage est-ouest: le tube récepteur est orienté est-ouest. Il faut orienter le

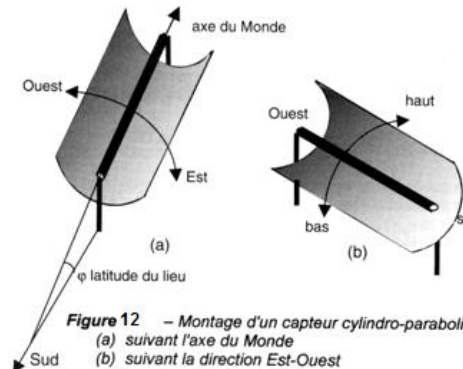


Figure 12 - Montage d'un capteur cylindro-parabolique :  
(a) suivant l'axe du Monde  
(b) suivant la direction Est-Ouest

capteur vers le soleil deux ou 3 fois par jour pour optimiser le système.

#### 4. Centrales solaires à tours

Les centrales solaires transforment le RS en énergie thermique ensuite en électricité (voie thermodynamique). Afin de satisfaire au principe de Carnot, il est nécessaire d'élever au maximum la température de la source chaude pour augmenter le rendement.

Ce sont des systèmes à focalisation ponctuelle fixe avec des facteurs de concentration situés entre 200 et 1000 et dont les héliostats possèdent 2 axes de rotation. L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée.

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil

Individuellement et le réfléchit en direction d'un receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes de 800 °C à 1000°C.

##### 4.1. Rendement de conversion

Le schéma de principe d'une centrale solaire est donné par la fig. 13 : un champ d'héliostats (H) fait converger le RS à l'entrée d'une chaudière (Ch) dont laquelle circule un fluide caloporteur qui stocke l'énergie thermique dans un réservoir (S). Celui-ci alimente en énergie un générateur de vapeur (GV). La vapeur se détend dans une turbine (T) entraînant un alternateur (A), puis est envoyée vers un condenseur (C). Devenue liquide, elle retourne au GV.

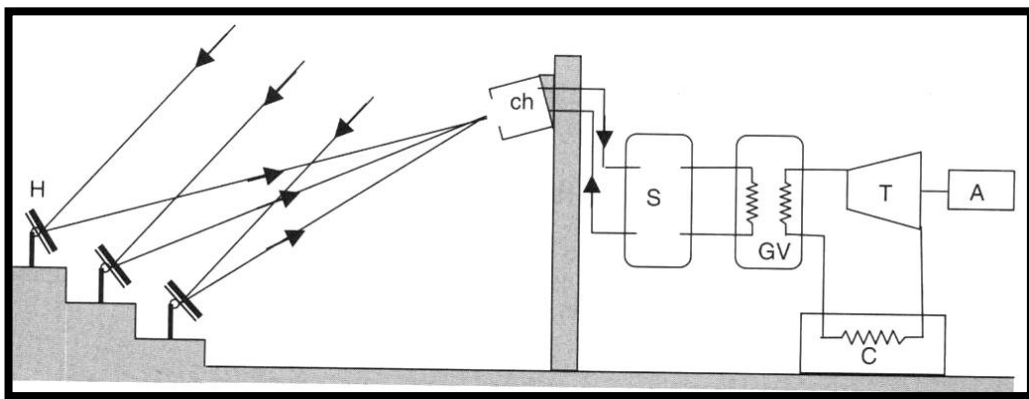


Fig. 13 : Schéma de principe d'une centrale solaire

La puissance de la chaudière  $P_{ch}$  est égale à la puissance solaire absorbée moins les pertes thermiques. Les grandeurs physiques relatives à la chaudière sont :

$\mathcal{G}_{ch}^*$  flux solaire moyen dans l'ouverture

$S_{ch}$  Section de passage du RS;

$\alpha_{ch}$  Facteur d'absorption solaire apparent;

$\varepsilon_{ch}$  Facteur d'émission IR apparent;

$T_{ch}$  température moyenne des parois intérieures

$T_a$  température ambiante

Si on ne considère que les pertes par rayonnement (les parois extérieures de la chaudière étant bien isolées), on peut écrire :

$$P_{ch} = \mathcal{G}_{ch}^* S_{ch} \alpha_{ch} - \varepsilon_{ch} \sigma (T_{ch}^4 - T_a^4) S_{ch}$$

Le rendement de la chaudière vaut :

$$\eta_{ch} = \frac{P_{ch}}{\mathcal{G}_{ch}^* S_{ch}} = \alpha_{ch} - \frac{\varepsilon_{ch} \sigma (T_{ch}^4 - T_a^4)}{\mathcal{G}_{ch}^*}$$

Soit  $I^*$  l'éclairement solaire direct sur les héliostats et  $C_e$  la concentration effective de l'installation, le flux solaire moyen dans l'ouverture de la chaudière s'écrit :

$$\mathcal{G}_{ch}^* = C_e^* \cdot I^*$$

En considérant que la température du condenseur est la même que la température ambiante  $T_a$ , on peut écrire le rendement de Carnot sous la forme :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_a}{T_{ch}}$$

Finalement le rendement théorique de la centrale s'écrira :

$$\eta_{th} = \eta_{ch} \times \eta_C = \alpha_{ch} \left( 1 - \frac{T_a}{T_{ch}} \right) \left( 1 - \frac{\varepsilon_{ch} \sigma (T_{ch}^4 - T_a^4)}{\alpha_{ch} C_e^* I^*} \right)$$

Si l'on tient compte de toutes les pertes, on peut écrire :

$$\eta_{th} = \alpha_{ch} \left( 1 - \frac{T_a}{T_{ch}} \right) \left( 1 - \frac{K_{ch} (T_{ch} - T_a)}{\alpha_{ch} C_e^* I^*} \right)$$

Où  $K_{ch}$  est le coefficient global des pertes thermiques de la chaudière.

La température optimale  $T_{ch,opt}$  est donnée en écrivant :  $\frac{d\eta_{th}}{dT_{ch}} = 0$ .

Finalement, la température optimale  $T_{ch,opt}$  vaut :

$$T_{ch,opt} = \sqrt{T_a \left( T_a + \frac{\alpha_{ch} C_e^* I^*}{K_{ch}} \right)}$$

La figure ci-contre traduit l'évolution du rendement  $\eta_{th}$  en fonction de la température de chaudière  $T_{ch}$  pour différentes valeurs de la concentration effective  $C_e^*$ . Les courbes ont été tracées avec les données numériques indiquées dans la légende de la figure en question.

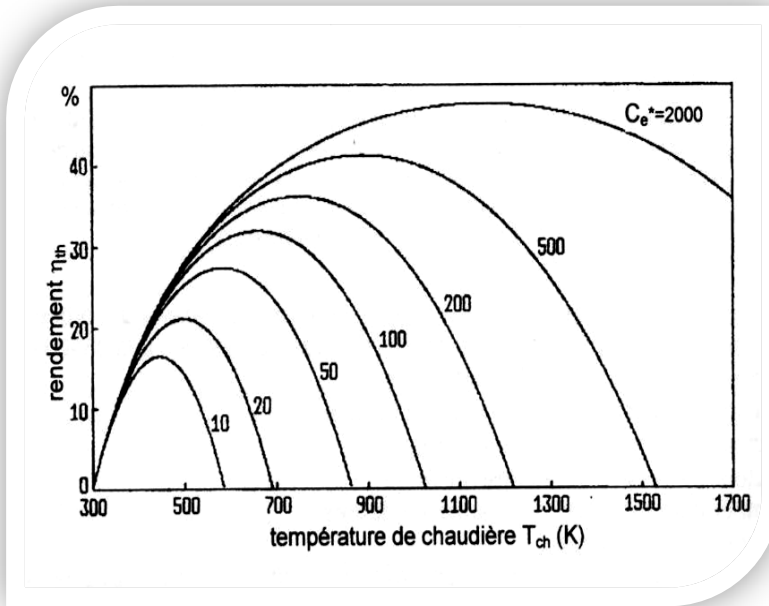


Fig. 14 : rendement théorique d'une chaudière en fonction de sa température pour différentes valeurs de la concentration effective. Les courbes ont été obtenues pour les données suivantes :

$\alpha_{ch}=0.7$ ,  $\varepsilon_{ch}=0.9$ ,  
 $I^*=800 \text{ W/m}^2$  et  
 $T_a=300 \text{ K}$ .

La température de la chaudière doit être adaptée à la concentration effective pour espérer atteindre le rendement maximal.

*Conclusion :* la technologie des centrales solaires est relativement jeune, elle présente donc un énorme potentiel de développement.

