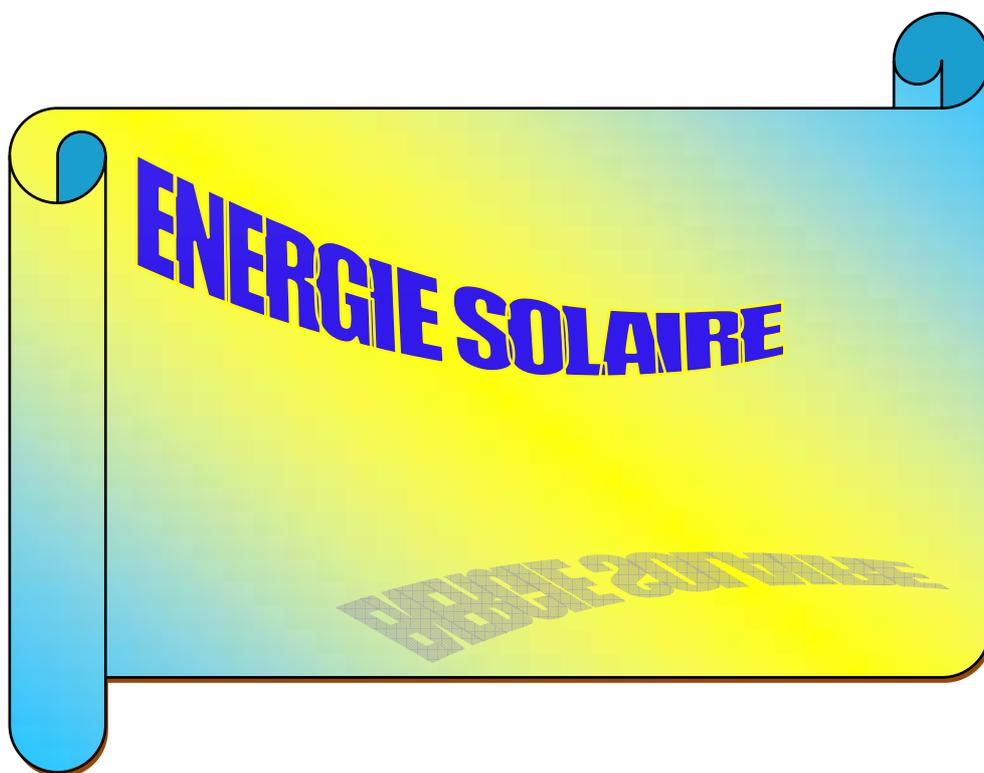
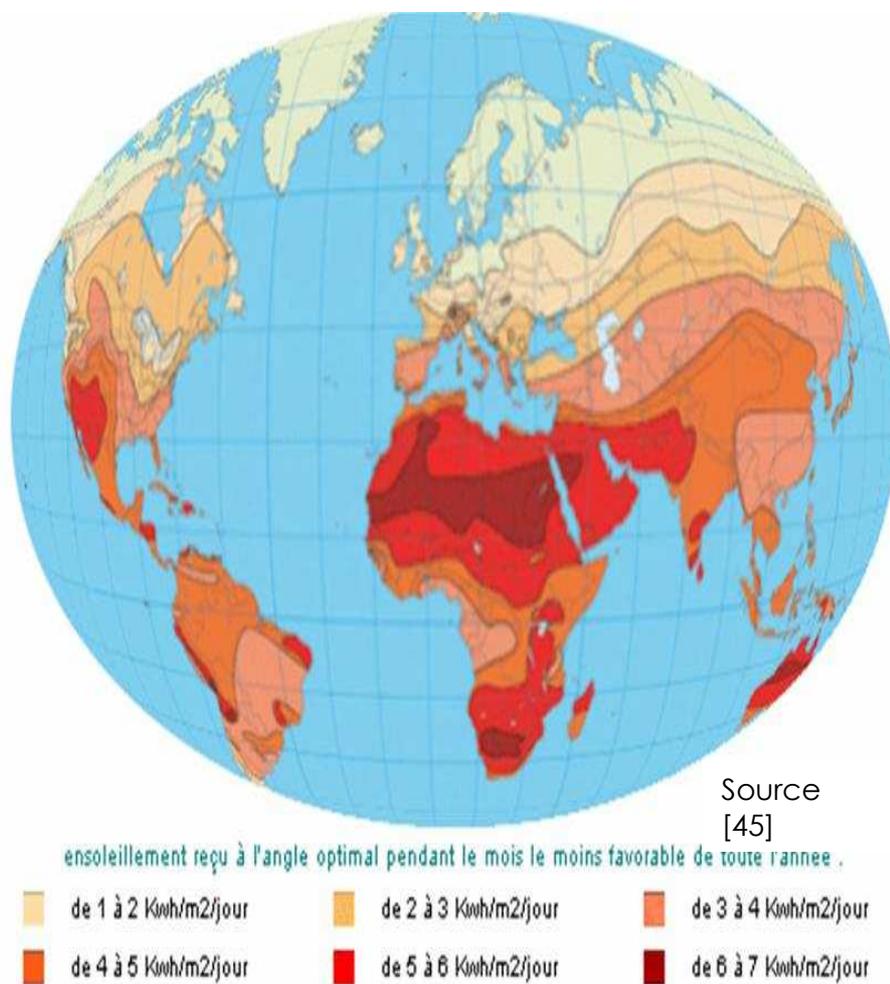


# Chapitre II



L'**énergie solaire** est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement. Grâce à divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur ou en électricité .

La figure suivante montre les pays qui reçoivent le maximum de quantité d'énergie solaire au cours du mois le moins favorable de l'année.



***Fig. II-1 - L'ensoleillement***

## II.1 - TECHNIQUE POUR CAPTER L'ENERGIE SOLAIRE

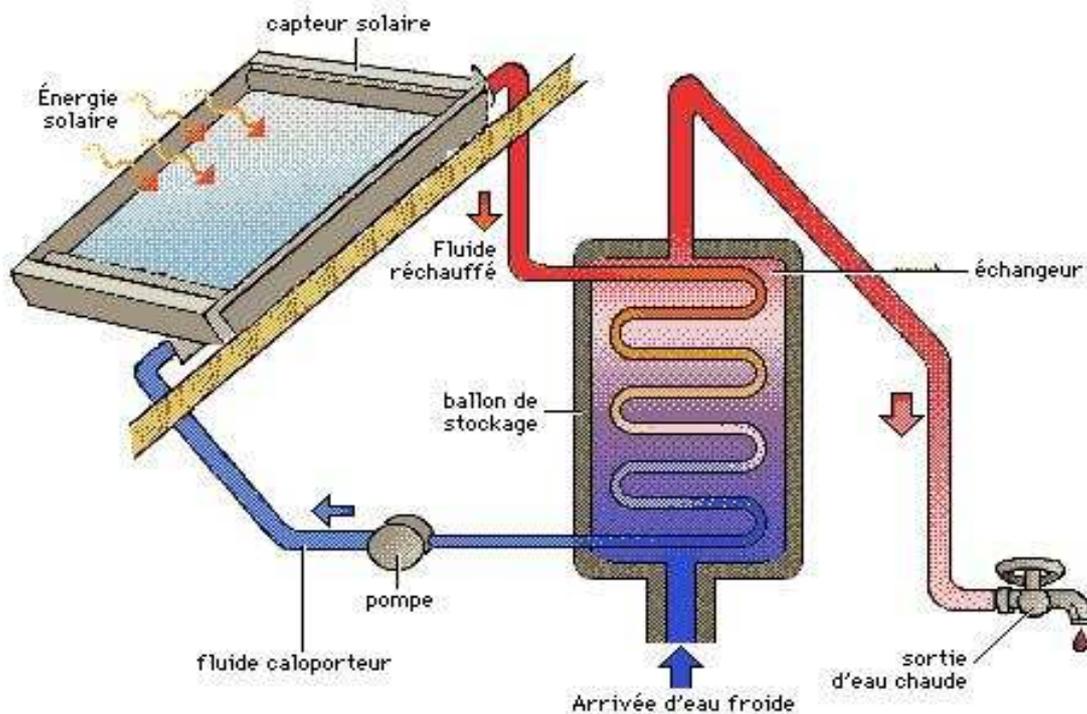
On utilise des capteurs solaires plans ( panneaux ) qui sont des dispositifs destinés à recueillir le rayonnement solaire pour le convertir en énergie thermique ou en énergie électrique.

### II.1.1- Types de capteurs solaires

Il existe deux types de capteurs :

#### a - Le capteur solaire thermique

La fonction d'un tel capteur est de transformer le rayonnement solaire en chaleur, Il alimente le chauffe eau solaire pour produire de l'eau chaude. Un liquide caloporteur, réchauffé dans le panneau par le Soleil, effectue un circuit fermé du capteur au ballon où il chauffe l'eau qui s'y trouve.



**Fig. II-2 - Capteur solaire thermique (chauffe - eau)**

### **b - Le capteur solaire photovoltaïque**

Ce type de capteur est complètement différent du capteur thermique. Dans cette technique découverte en 1839 par le français Becquerel, des cellules semi-conductrices en silicium cristallin transforment directement le rayonnement solaire ( les photons ) en électricité ( les électrons ). L'intensité électrique produite reste exactement proportionnelle au rayonnement solaire. Elle est maximale quand le Soleil est au zénith et nulle la nuit. Cette électricité est produite en courant continu.



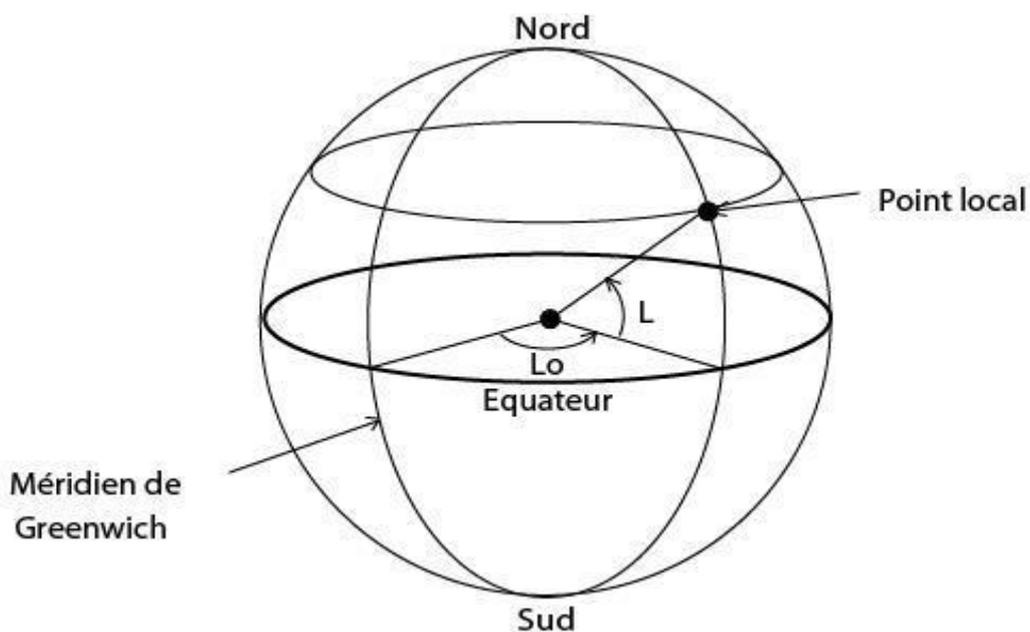
***Fig. II-3 - Capteur solaire photovoltaïque***

## II.2 - EXPRESSIONS DES RAYONNEMENTS SOLAIRES

### II.2.1 - La latitude et la longitude d'un lieu

La **latitude ( L )** d'un lieu ( point local ) est l'angle formé par le plan équatorial et la direction « centre de la Terre - point local ». Elle est exprimée en degrés et varie entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  à partir de l'équateur vers les pôles. Cet angle est positif pour l'hémisphère Nord et négatif pour l'hémisphère Sud.

La **longitude ( Lo )** d'un lieu est l'angle formé par le méridien de référence ( méridien de Greenwich ) et le méridien du point local. A partir de ce méridien d'origine, elle varie entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$ . Cet angle est positif vers l'Ouest et négatif vers l'Est.



*Fig. II-4 - Latitude et longitude d'un point local*

## II.2.2 - Position du Soleil

En réalité, c'est la Terre qui tourne autour du Soleil mais un observateur terrestre a l'impression de voir le Soleil qui tourne autour de la Terre. Le mouvement du Soleil est alors un mouvement apparent.

La position du Soleil dans le ciel peut se repérer soit par les coordonnées horaires, soit par les coordonnées azimutales.

### a - Les coordonnées horaires

La **déclinaison (  $\delta$  )** du Soleil est l'angle entre la direction Terre - Soleil et le plan équatorial céleste. Cet angle varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver ( 21 juin ) à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été ( 21 décembre ) et nul aux équinoxes.

L'**angle horaire (  $\omega$  )** du Soleil est l'angle le long de l'équateur céleste entre le plan du méridien du lieu ( plan passant par la direction Sud ) et celui contenant la direction du pôle céleste et celle du Soleil. Cet angle est compté en heures dans le sens rétrograde vers l'Ouest.

Les valeurs de la déclinaison et de l'angle horaire peuvent se calculer par les relations :

$$\delta = \text{Arc sin}( 0,3978 \sin( 0,985 j - 80 ) ) \quad ( II - 1 )$$

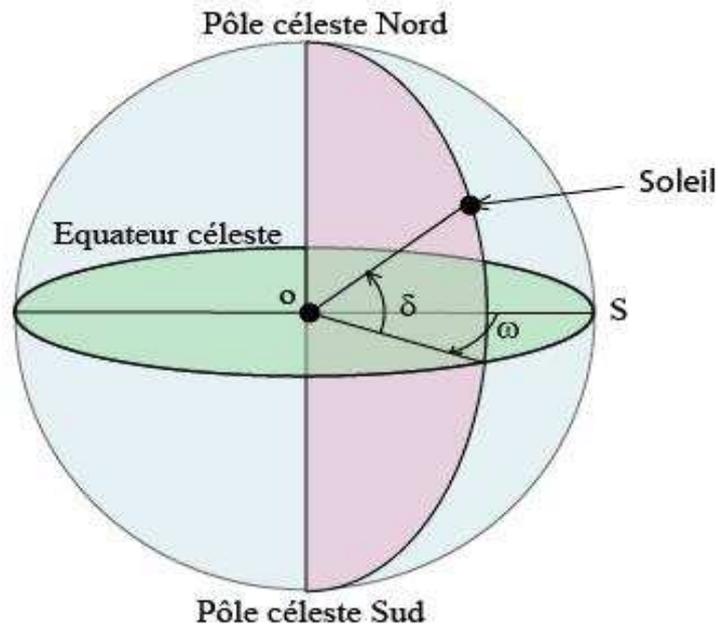
$\delta$  s'exprime en degrés

$j$  : numéro d'ordre du jour dans l'année

$$\omega = \frac{(TSV - 12)}{15} \quad ( II - 2 )$$

$\omega$  s'exprime en degrés

**TSV** : temps solaire vrai [h]



*Fig. II-5 - Angle horaire et déclinaison du Soleil*

### **b - Les coordonnées azimutales**

Les coordonnées azimutales du Soleil sont :

Le **hauteur du Soleil ( h )** : angle formé par le plan horizontal du lieu considéré et la direction « point local - Soleil ».

L'**azimut du Soleil ( a )** : l'angle horizontal formé par le plan méridien ( axe Nord - Sud ) et le plan vertical de la direction « point local - Soleil ». Le signe de l'azimut est le même que celui de l'angle horaire.

La hauteur et l'azimut du Soleil ont pour expressions :

$$h = \text{Arcsin}(\sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega)) \quad (\text{II} - 3)$$

**h** s'exprime en degrés

**L** : latitude du lieu

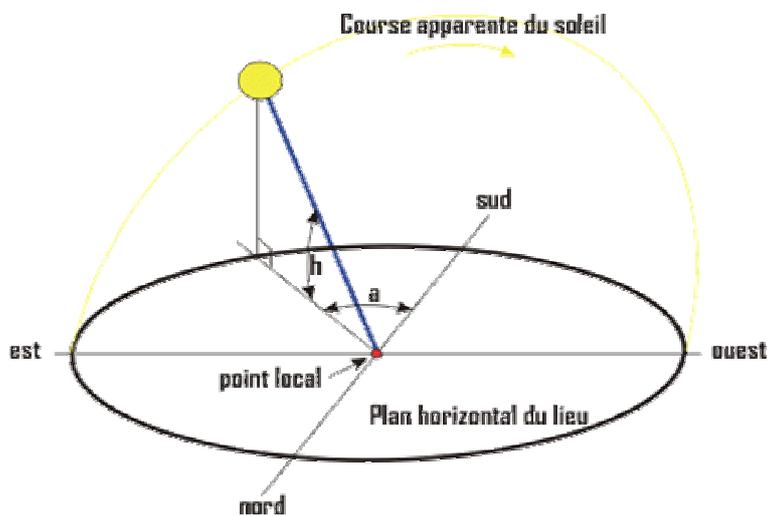
$$a = \text{Arc sin}\left(\frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)}\right) \quad (\text{II} - 4)$$

**a** s'exprime en degrés

**δ** : déclinaison du Soleil

**ω** : angle horaire

**h** : hauteur du Soleil



**Fig. II-6** Azimut et hauteur du Soleil

### II.2.3 - Heures du lever et du coucher du Soleil

L'heure solaire vraie du lever du Soleil est obtenue par la relation :

$$t_{sv\text{lever}} = 12 - \frac{\text{Arccos}(-\tan(L)\tan(\delta))}{15} \quad (\text{II} - 5)$$

**t<sub>svlever</sub>** s'exprime en heures

**δ** : déclinaison du Soleil

On peut déterminer l'heure solaire vraie du coucher du Soleil par la formule :

$$t_{sv\text{coucher}} = 12 + \frac{\text{Arccos}(-\tan(L)\tan(\delta))}{15} \quad (\text{II} - 6)$$

**t<sub>svcoucher</sub>** s'exprime en heures

**δ** : déclinaison du Soleil

### II.2.4 - Durée d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement se calcule par la relation suivante :

$$d = \frac{2}{15} \text{Arc cos}(-\tan(L)\tan(\delta)) \quad (\text{II} - 7)$$

**d** s'exprime en heures

**L** : latitude du lieu

**δ** : déclinaison du Soleil

## II.2.5 - Détermination du rayonnement solaire

Pour pouvoir déterminer le rayonnement solaire reçu par un capteur plan nous utilisons le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT qui est basé sur le facteur de trouble de Linke [3].

### a - Rayonnement solaire direct $I$

Le rayonnement direct  $I$  qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications s'obtient par la formule suivante :

$$I = E_s e^{(-m.T_L.Er)} \quad (II - 8)$$

$I$  s'exprime en  $W/m^2$

Où  $E_s$  est le rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Ce rayonnement se détermine par la relation :

$$E_s = E_0 \left( 1 + 0,0334 \cos\left(\frac{360(j - 2,7206)}{365,25}\right) \right) \quad (II - 9)$$

$E_s$  en  $[W/m^2]$

$j$  : numéro d'ordre du jour dans l'année (exemple : 1 pour le 1<sup>er</sup> janvier)

$E_0$  : constante solaire (valeur moyenne de  $E_0$ , égale à  $1367 W/m^2$ )

Dans la formule ( II - 8 ) la grandeur **m** appelée « masse d'air optique relative » a pour expression :

$$m = \frac{P_{atm}}{(101325 \sin(h) + 15198,75(3,885 + h)^{-1,253}} \quad (II - 10)$$

Avec

$$P_{atm} = 101325(1 - 2,26 \cdot 10^{-5} z)^{5,26} \quad (II - 11)$$

**P<sub>atm</sub>** en Pascal

**z** : altitude du lieu en [m]

**h** : hauteur du Soleil

Le « facteur de trouble de Linke » **T<sub>L</sub>** dans l'expression ( II - 8 ) s'obtient par :

$$T_L = 2,4 + 14,6b + 0,4(1 + 2b) \ln(P_v) \quad (II - 12)$$

Avec

$$P_v = HR \cdot P_{vs} \quad (II - 13)$$

$$P_{vs} = 2,165 \left(1,098 + \frac{T}{100}\right)^{8,02} \quad (II - 14)$$

( **P<sub>vs</sub>** : pression de vapeur saturante en [ mmHg ] ; **T** : température de l'air en [°C] ; **HR** : taux moyen d'humidité relative (= 50% ou 0,5) )

**b** étant le coefficient de trouble atmosphérique

**b = 0,02** ( lieu situé en montagne )

**b = 0,05** ( lieu rural )

**b = 0,10** ( lieu urbain )

**b = 0,20** ( lieu industriel )

La grandeur **Er** figurant dans la formule ( II - 8 ) est appelée « épaisseur optique de Rayleigh » et se calcule par :

$$Er = \frac{1}{0,9m + 9,4} \quad ( II - 15 )$$

### **b - Rayonnement solaire direct S**

Un capteur plan placé au sol ne reçoit que le rayonnement solaire direct **S** qui est une partie du rayonnement **I**. Ce rayonnement **S** est donné par la relation :

$$\mathbf{S = I \cdot C} \quad ( II - 16 )$$

Où **C** est le coefficient d'incidence ( angle formé par le rayonnement solaire **I** avec la perpendiculaire au plan du capteur ) tel que :

$$C = \sin(i) \cos(h) \cos(o - a) + \cos(i) \sin(h) \quad ( II - 17 )$$

Où **i** et **o** sont respectivement l'angle d'inclinaison du capteur et l'angle d'orientation du capteur.

( **h** étant la hauteur et **a** azimut du Soleil )

**c - Rayonnement solaire diffus D**

Le rayonnement diffus 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.

$$D = 125 (\sin(h))^{0,4} \left(1 + \frac{\cos(i)}{2}\right) + 211,86 (\sin(h))^{1,22} \left(1 - \frac{\cos(i)}{2}\right) \quad (\text{II} - 18)$$

**D** en [W/m<sup>2</sup>]

**h** : hauteur du Soleil

**i** : inclinaison du capteur solaire

**d - Rayonnement solaire global G**

Le rayonnement total reçu par le capteur plan placé au sol est la somme des rayonnements **S** et **D**. Ce rayonnement est appelé rayonnement global **G** tel que :

$$G = S + D \quad (\text{II} - 19)$$

**II.2.6 - Energie solaire globale journalière**

L'énergie solaire globale journalière est l'aire limitée par l'axe des heures et la courbe représentative du rayonnement solaire global en fonction de l'heure.