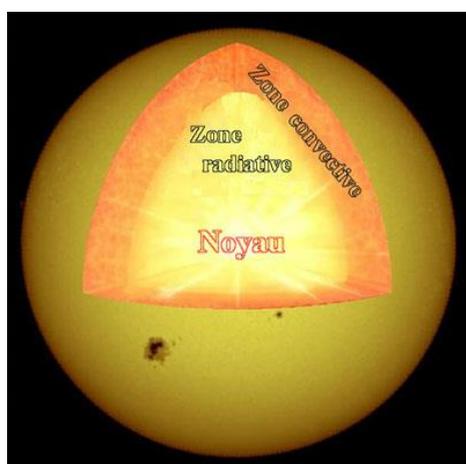


## Intitulé de la matière : Gisement solaire

### Semestre : 2

#### Le soleil

Le soleil donne une énergie électromagnétique qui est libérée par les réactions thermonucléaires au sein de lui-même. Ce sont des réactions de fusion transformant des noyaux d'hydrogène en noyau d'hélium avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique centré sur la gamme du visible. Cette émission est assez proche de celle émise par un corps noir<sup>1</sup> porté à une température légèrement inférieure à 5800 Kelvins. Malgré la distance entre le soleil et notre planète, l'impact du rayonnement solaire sur la terre représente un apport énergétique important. En effet, on peut estimer à  $178.10^{12}$  kilowatts la puissance interceptée par l'hémisphère éclairé. Sa répartition n'est pas uniforme, ni d'un point de vue géographique, ni temporellement. Hors atmosphère, ce rayonnement est parfaitement décrit par des équations mathématiques via les paramètres astronomiques. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures de lever et de coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer le gisement solaire pour un site donné. Aussi, ce chapitre sera consacré à rappeler quelques notions de base.



### Le Soleil

Le Soleil n'est qu'une étoile moyenne. S'il nous semble plus gros et plus chaud que les autres étoiles c'est parce qu'il est infiniment plus près de nous. Il n'est en effet qu'à 150.000.000 km de la Terre.

#### Caractéristiques du Soleil

- diamètre	1,4 million de km (env. 110 fois celui de la Terre)
- volume	1,3 million de fois celui de la Terre
- masse	$1,989.10^{30}$ kg (330 000 fois la Terre)
- t° interne	Jusqu'à 16.000.000° C
- t° à la surface	Env. 5500 °C (étoile de type G2)
- composition (couches extérieures)	- dihydrogène (73%) - hélium (25%)
- âge	4,6 milliards d'années



## Nature du rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence et  $c$  la vitesse de la lumière.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ \text{K}$ . Les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de  $AM_0$ . Sa distribution en énergie est répartie en :

Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$  6.4 %

Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$  48.0 %

Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$  45.6 %

La puissance rayonnée à la surface du soleil est de l'ordre de 386 milliards de milliards de mégawatts, dont  $1.7 \cdot 10^{17}$  Watt est intercepté par la terre, 30 % de ce flux est réfléchi vers l'espace, 47 % est absorbée et remise vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge, 22.5 % sert de source d'énergie au cycle d'évaporation précipitation de l'atmosphère et de 0.5 % se retrouve sous forme de photosynthèse dans les plantes.

## Position géométrique du soleil

### Définition

Le soleil est une étoile située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène, son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète (soit  $2 \cdot 10^{30}$  kg).

Le soleil est composé de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...).

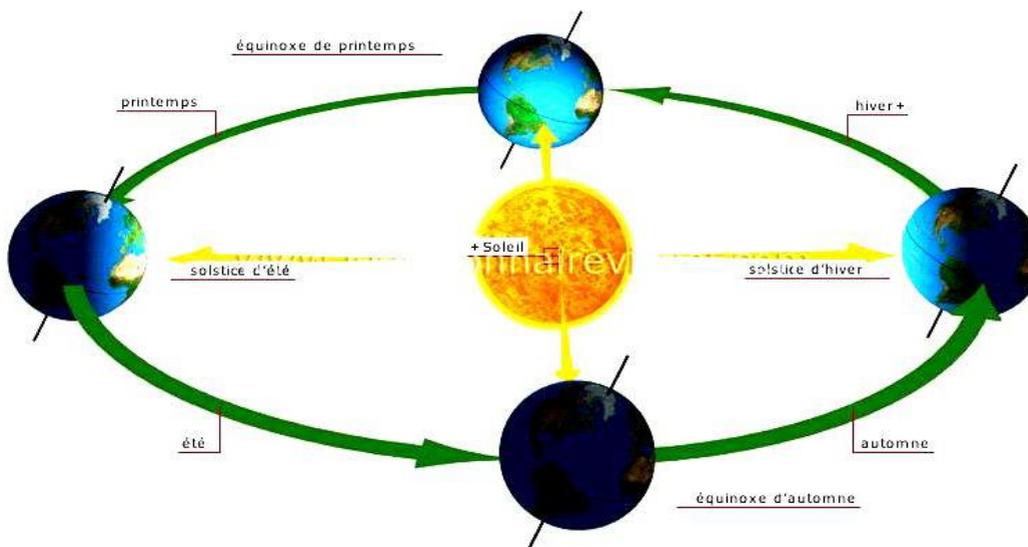
### Mouvement de la terre

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique (c'est-à-dire proche d'un cercle), ayant le soleil pour foyer dont le rayon moyen est de 149.6 millions de km, avec une variation de  $\pm 1.7\%$ . La distance Terre-soleil varie entre  $147 \cdot 10^6$  km (le 3 janvier) et  $153 \cdot 10^6$  km (le 3 juillet); sa valeur moyenne vaut  $150 \cdot 10^6$  km. Aussi, la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil n'est pas un mouvement uniforme.

Elle est plus grande en hiver qu'en été. Il en résulte que la durée du printemps et de l'été est plus longue que la durée de l'automne et l'hiver).

La planète Terre tourne autour de l'axe des pôles (axe du monde ou axe de rotation) en 24 heures. Ce phénomène génère ainsi une alternance de jour (l'hémisphère du site considéré est alors éclairé) et de nuit (l'hémisphère est à l'ombre).

Aux équinoxes, le soleil se lève à l'Est, passe par la verticale à midi et se couche à l'Ouest. Entre le 21 mars et le 21 septembre, le soleil passe au Nord de la verticale et pendant la deuxième moitié il passe au Sud de la verticale. Aux solstices (solstice d'été et d'hiver), l'angle que fait le soleil avec la verticale au midi solaire sera respectivement  $\pm 23^{\circ}27'$ .



[Mouvement de la terre autour du soleil](#)

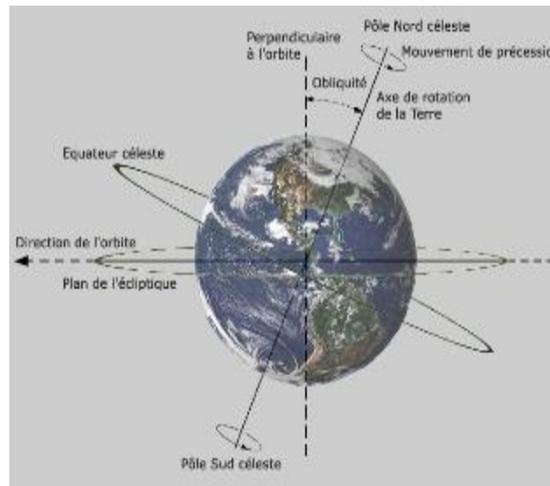
### Déclinaison( $\delta$ )

C'est l'angle entre la direction terre-soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de (-  $23^{\circ}45'$ ) au solstice d'hiver à (+ $23^{\circ}45'$ ) au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Elle est bien représentée par la formule suivante :  $\delta(^{\circ})=23.45.\text{si}((2\pi/365).(284+Nj))$

$\delta$  varie entre deux valeurs extrêmes :  $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq +23.45^{\circ}$

Les **équinoxes** sont les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial : sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales. L'**équinoxe d'automne** intervient vers le 22 septembre et l'**équinoxe de printemps** vers le 22 mars, dans l'hémisphère Nord.

Dans l'hémisphère nord, le **solstice d'été** (vers le 21 juin) est la période au cours de laquelle la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître. Le **solstice d'hiver** (vers le 21 décembre) est la période au cours de laquelle cette durée cesse de décroître. Les saisons sont inversées dans l'hémisphère sud.



Déclinaison( $\delta$ )

## Paramètres géographiques

La Terre est séparée par l'équateur en deux demi sphères, l'hémisphère Nord pour celle située du côté du pôle Nord, et l'hémisphère Sud pour celle qui est située du côté du pôle Sud. D'autre part, elle est partagée d'Ouest en Est, par le méridien d'origine qui passe par Greenwich (près de Londres en Angleterre).

### La latitude $\Phi$

La latitude d'un lieu est une valeur angulaire, expression du positionnement nord-sud de l'équateur, d'un point sur la Terre. Théoriquement, elle a pour valeur,  $0^\circ$  à l'équateur jusqu'à  $90^\circ$  aux pôles, elle est comptée positivement de ( $0$  à  $+90^\circ$ ) vers le Nord et négativement de ( $0$  à  $-90^\circ$ ) vers le Sud. Généralement, cette grandeur est notée  $\phi$ .

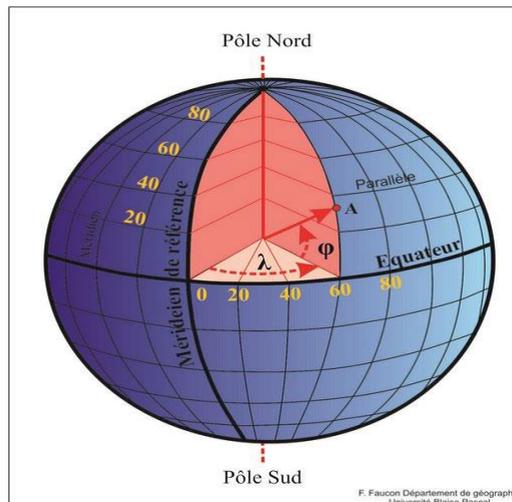
### Longitude $\lambda$ :

Permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord- Sud de référence appelée le méridien Greenwich.  $\lambda$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ .

tel que :  $\lambda > 0$  à l'est du méridien de Greenwich et  $\lambda < 0$  à l'ouest du méridien de Greenwich

## L'altitude

L'altitude exprime un écart entre un point donné et un niveau moyen, niveau de la mer (ou niveau 0). Les sommets sont associés à une altitude, calculée par divers moyens indirects (géodésie, triangulation).



## Les coordonnées géographiques

### Coordonnées horizontales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude  $\phi$  par deux angles azimut ( $\alpha$ ) et hauteur ( $h$ ).

#### a) Hauteur du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.  $h=0$  : correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre  $+90$  et  $-90$ . Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\Phi)$$

#### Angle horaire du soleil

L'angle horaire ( $\omega$ ) (encore noté  $AH$ ) du soleil étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai  $TSV$ . C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en degrés. L'angle horaire est donné par l'équation suivante:

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

L'angle horaire  $\omega$  varie de  $-180^\circ$  à  $180^\circ$ .

**TSV** : est le temps solaire vrai (**TSV** en heures et  $\omega$  en degrés), tel que le soleil se trouve au zénith à midi. A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de  $15^\circ$ .

### Angle horaire au lever et au coucher du soleil

L'angle horaire du soleil à son coucher ou lever est l'angle horaire solaire correspondant à l'heure où le soleil se couche ou bien le soleil se lève; il est donné par l'équation suivante

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} = \cos^{-1}(-\tan(\Phi) \times \tan(\delta))$$

Où

$\delta$  : est la déclinaison

$\Phi$  : est la latitude du lieu

### Azimuth du soleil

C'est l'angle que fait sur le plan horizontal et la projection de la direction du soleil avec la direction du sud.

L'azimuth du soleil varie à chaque instant de la journée.  $\alpha$  : varie entre  $-180$  et  $+180$ .

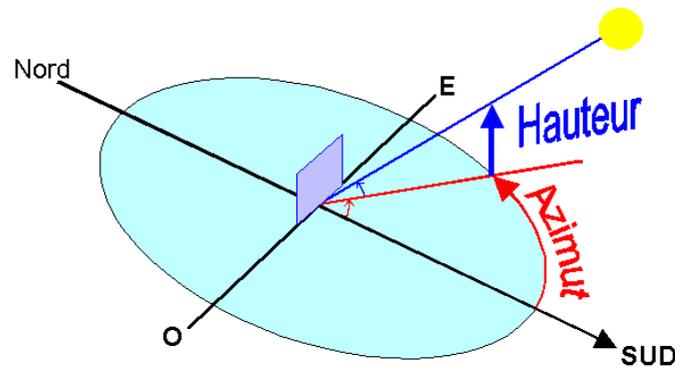
On prend :  $\alpha > 0$  vers l'ouest.

$\alpha < 0$  vers l'est.

$\alpha = 0$  vers le sud

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(\alpha) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \cdot \cos(h)$$



Azimuth et hauteur du soleil

## Durée astronomique du jour

On peut définir la durée astronomique du jour (ou la durée d'ensoleillement) comme étant la période de temps séparant les événements où le soleil est à l'horizon, c'est-à-dire que sa hauteur est nulle.

Au lever et au coucher du soleil :  $h = 0$ , à partir de l'équation on trouve :

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)], \quad (\text{Degrés})$$

Pour un plan incliné d'un angle  $\beta'$ , l'angle horaire est :

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(\varphi - \beta') \cdot \tan(\delta)], \quad (\text{Degrés})$$

Pour un plan incliné d'un angle  $\beta'$  et orienté par un angle  $\gamma > 0$ , l'angle horaire au coucher du soleil est :

$$\omega_{sr} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left( \frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right\}$$

$$\omega_{ss} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left( \frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right\}$$

La durée astronomique du jour est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente laquelle dépend de la période de l'année considérée:

$$Dj = \frac{2}{15} \cos^{-1} [-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad , \quad (\text{Heures})$$

La durée astronomique du jour est maximale le 21 juin (le jour le plus long de l'année) et minimale le 21 décembre (le jour le plus court de l'année).

## Exemple

Calculer :

- a)- L'angle zénithal et l'azimut du soleil à 11:00 ;
- b)- L'angle horaire du soleil ;
- c)- La durée astronomique du jour du 16 octobre à New York ( $40^{\circ}7'N$ ).

## Solution

A 11:00, l'angle horaire est  $w = + 15^{\circ}$

La déclinaison  $\delta = - 8.67^{\circ}$

Nous obtenons l'angle zénithal par :

$$\theta_Z = \cos^{-1}[( - 0.1507)(0.6532) + (0.9886)(0.7572)(0.9659)]$$
$$= 51.71^{\circ}$$

La hauteur du soleil est  $h = 90 - \theta_Z = 38.28^{\circ}$ .

L'azimut est obtenu par :

$$a_Z = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin 38,28 \sin 40,16 - \sin(-8,67)}{\cos 38,28 \cos 40,16} \right] = 19,3^{\circ}$$

L'angle horaire au coucher du soleil est :

$$w_s = \cos^{-1}(- \tan 40.16 \cdot \tan(- 8.67)) = 82.44^{\circ}$$

En termes du TSV, l'angle horaire au lever du soleil est :

$$12 - 82.44/15 = 6.50 \text{ h ou } 6: 30: 00$$

La durée astronomique du jour est donc :  $N_d = \frac{2}{15} w_s = 11h$

## Le fuseau horaire

C'est une bande de  $15^{\circ}$  de longitude de large s'étendant du pôle nord au pôle sud, permettant de décomposer le globe terrestre en 24 tranches horaires. Chaque fuseau est centré sur un méridien multiple de  $15^{\circ}$ . Le méridien d'origine est celui de Greenwich, qui définit le temps Universel. Chaque pays utilise en principe l'heure du fuseau le plus proche en longitude.

## Les temps solaires

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui est calculé en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local.

### Le temps solaire moyen

La rotation de la terre autour d'elle-même introduit la notion du temps solaire moyen ou TSM. On le définit comme étant le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs par le méridien du lieu, une rotation complète de la terre autour d'elle-même prend 24 heures.

### Le temps universel

Le temps universel TU est défini par l'heure du passage du soleil au méridien origine. Le méridien retenu comme origine et celui de Greenwich et le TSM correspond au temps universel (c'est le TSM à la longitude 0°). La différence entre le temps solaire moyen et le temps universel est appelée correction de longitude, le temps universel est lié au temps solaire moyen (local) par la relation:

$$TSM = TU \pm L/15$$

L: longitude du lieu, (+) pour longitude Est, (-) pour longitude Ouest.

### Le temps légal

Le temps légal (ou local) est le temps officiel de l'Etat, il diffère par rapport au temps mondial de Greenwich par un décalage exprimé en heures.

$$TL = TU + \Delta H$$

$\Delta H$  étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'Etat considéré, ( $\Delta H=1$  heure pour l'Algérie).

### Le temps solaire vrai

C'est le temps mis par le soleil entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu (direction Nord-Sud). Le temps solaire vrai et le temps solaire moyen diffèrent. Cette différence est appelée équation du temps, elle varie en fonction du jour:

$$TSV = TSM + ET$$

## L'équation du temps

C'est une équation qui tient compte de la variation de la vitesse de rotation de la Terre, elle est donnée par :

$$ET = 9.87 \sin(2\beta_o) - 7.53 \cos(\beta_o) - 1.5 \sin(\beta_o), (\text{Minute})$$

L'angle  $\beta_o$  est défini en fonction du numéro du jour de l'année :

$$\beta_o = \frac{360}{365} (nj - 81), \text{ Degrés}$$

Ainsi, un Jour Solaire peut varier entre 24 h 00 mn 30s et 23 h 59 mn 40s. D'un jour à l'autre il n'y a que quelques secondes de variation (jusqu'à 30 secondes aux alentours de la fin décembre, quand même). Mais toutes ces variations s'accumulent. La conséquence essentielle est que, au cours de l'année, l'instant du passage du Soleil au méridien (le midi solaire) se décale lentement jour après jour par rapport au midi qui serait indiqué par notre horloge parfaite et bien régulière. Cette variation peut atteindre 17 min.

## Transition du temps légal vers le temps solaire vrai

En général, pour convertir le temps standard local 'TL' au temps solaire vrai TSV, on utilise l'expression suivante :

$$TSV = TL - \Delta H + (ET + 4L)/60$$

$\Delta H$ : est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie).

TL: est le temps légal ou temps local standard, donné par une montre. L: longitude du lieu.

Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable.

## Exemple

Il est 13h à Ghardaïa, heure légale le 15 Août, quel est le temps solaire vrai ?  
 $L = + 3,8^{\circ}$  ,  $T = TL + 1$  ,  $ET = - 5mn = 0,08 h$

$$TSV = (TL - 1 + (L/15) + ET) = (13-1 + 0.25 - 0.08) = 12h \text{ et } 10 \text{ mn.}$$