CHAPITRE I : Rayonnement solaire hors atmosphère

I.1. 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 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.

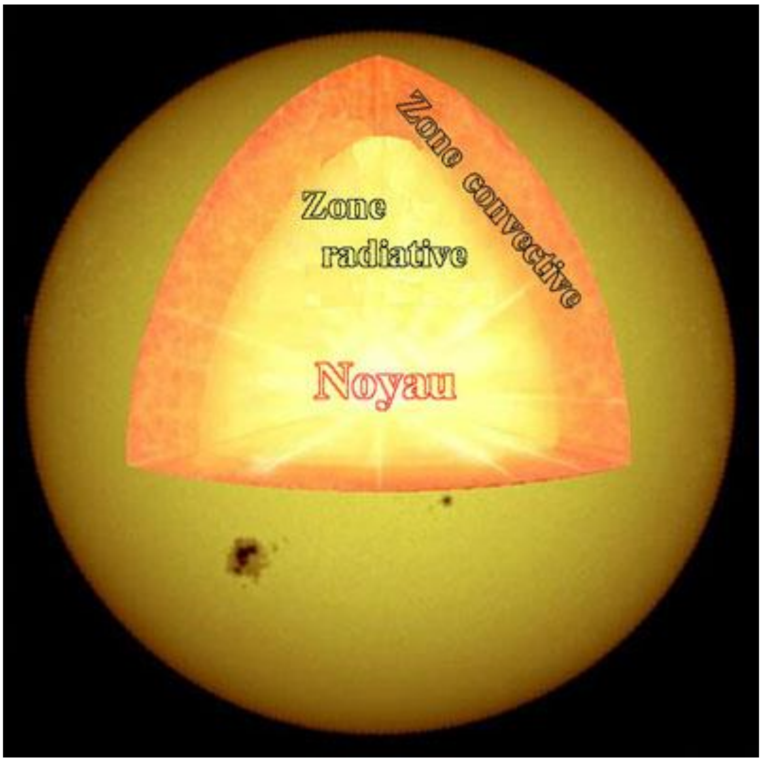


Fig I.1 Le soleil.[IMCCE - Observatoire de Paris]

I.1.1 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 λ :

$$E = h\nu = hc/\lambda \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (I.1)$$

Où h est la constante de Planck, ν 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° K [19-20]. Les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM_0. Sa distribution en énergie est répartie en :

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38$ µm 6.4 %

Visible $0.38 < \lambda < 0.78$ µm 48.0 %

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10$ µm 45.6 %

La puissance rayonnée à la surface du soleil est de l'ordre de 386 milliards de milliards de mégawatts, dont 1.7 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.

I.1.2. Position géométrique du soleil

Le soleil est une étoile située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre [21]. 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 2.10^{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, …).

I.1.3.Nature du rayonnement

I.1.3.1.Fusion thermonucléaire

Par un processus de fusion thermonucléaire qui repose sur la transformation d'hydrogène en hélium suivant la réaction ci-dessous (cycle de Bethe):

le soleil émet d'énormes quantités d'énergie dans l'espace dont la puissance est estimée à 64 103 KW/m².

Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace, sous forme de faisceaux parallèles, à la vitesse constante de 300 000 km à la seconde, dénommée vitesse de la lumière.

L'ensemble de ces radiations ou rayonnements qu'on nomme aussi l'irradiation solaire parcourt une distance d'environ 150 millions de kilomètres, pour arriver à l’extérieur de l’atmosphère de la Terre avec une puissance de l’ordre de 1367 W/m², qu’on appelle la constante solaire.

I.1.4.Rayonnement électromagnétique :

On appelle ainsi tout rayonnement provoqué par une excitation quelconque de la matière. Sa vitesse est : dans le vide C_0 = 299 850 km/s, dans un milieu d’indice n,

$$C = C_0/n \qquad \text{(I.2)}$$

Le rayonnement électromagnétique est constitué de radiations monochromatiques caractérisées par une longueur d’onde λ ou fréquence ν tel que :

$$C = \lambda.\nu \qquad \text{(I.3)}$$

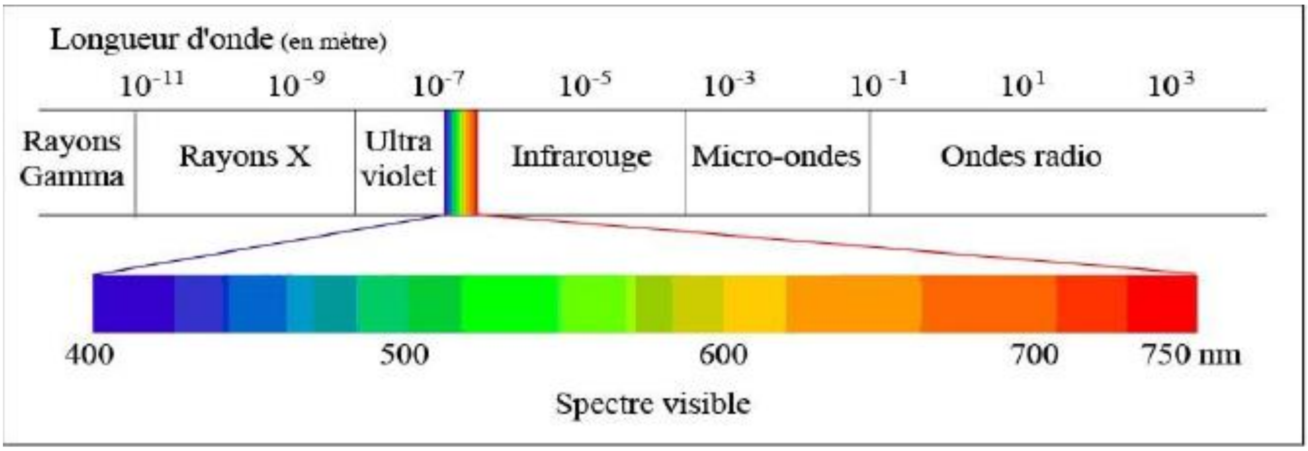


Fig.I.2- spectre des ondes électromagnétique.

I.1.4.1.Flux énergétique φ :

Le flux énergétique de rayonnement, c'est la puissance émise par une source, transportée par un faisceau ou reçue par une surface sous forme de rayonnement, et on l'exprime en Watts (W) :

$$\phi = dQ/dt \qquad \text{(I.4)}$$

I.1.4.2.Intensité énergétique : I

L'intensité I d'un faisceau ou d'une source dans une direction donnée est le quotient d'une portion $d\varphi$ du flux émis par la source dans une direction considérée, dans un cône infiniment petit, axé sur cette direction, par l'angle solide élémentaire $d\Omega$ déterminé par ce cône

$$I = \phi = dQ/d\Omega \ (W.sr^{-1}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (I.5)$$

I.1.4.3.Emittance énergétique : M

L'émittance énergétique M d'une source, en un point d'une surface émissive, est le quotient du flux $d\varphi$ à partir d'un élément infiniment petit entourant le point, par l'aire dS de cet élément :

$$M = d\varphi/dS \quad (W.m^{-2}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (I.6)$$

I.1.4.4.Eclairement énergétique : E (ou Irradiance)

L'éclairement énergétique E en un point d'une surface réceptrice est le quotient du flux reçu par un élément infiniment petit entourant le point, par l'aire de cet élément :

$$E = d\varphi/dS \quad (W.m^{-2}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (I.7)$$

I.1.5.Loi de wien

Deux lois fournissent respectivement l'abscisse λm et l'ordonnée du maximum d'émittance monochromatique du corps noir à chaque température.

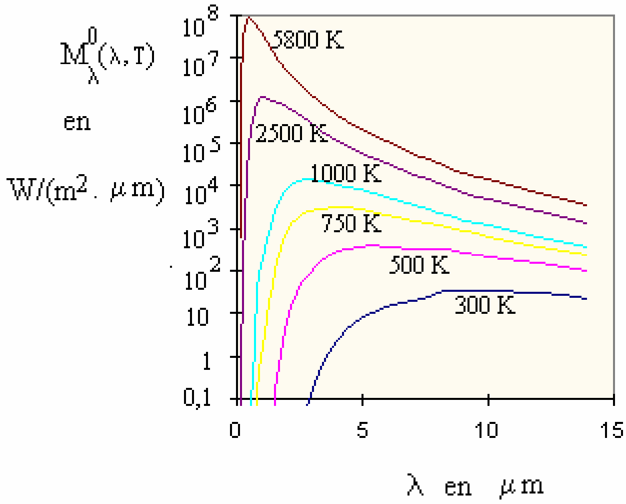


Fig I.3. L'émittance monochromatique.

I.1.5.1.1ère loi de WIEN, ou loi du déplacement

La « loi du déplacement » de WIEN :

λ_m.T=2898 µm.k

Exprime le fait que l'abscisse λ_m du maximum de se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température T croît.

Exemples :

T = 300 K (17 °C)

λ_m = 2898/300 =9.66 µm

T = 1000 K (727 °C)

λ_m = 2898/1000 = 2,898 µm

I.1.5.2. 2ème loi de WIEN

La 2ème loi de WIEN fournit la valeur du maximum $M°_{\lambda m}$ en fonction de la température T :

$$M°_{\lambda m} = B.T^5 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(I.8)$$

$$B = 1,287.10^{-11} W/(m^2.\mu m.K^5)$$

Exemple :

T = 300 K (17 °C)

$M_{\lambda m} = 31,3\ W.m^{-2}\ .\mu m^{-1}$

T = 1000 K (727 °C)

$M_{\lambda m} = 1,287.10\ W.m^{-2}\ .\mu m^{-1}$

I.2.Rayonnement thermique :

Correspond à l'émission due à une augmentation de temperature d'un corps composé de radiations de longueurs d'ondes $0,1\ \mu m \leq \lambda \leq 100\ \mu m$

Le spectre solaire, en dehors de la couche atmosphérique, se répartit sur une bande allant de 0,2 à 25 µm, avec des radiations supplémentaires :

- l' UV extrême de longueur d'onde $\lambda = 0,1216\ \mu m$
- les rayons X de longueur d'onde $0,005\ nm \leq \lambda \leq 1\ nm$

Les rayons radioélectriques de longueur d'onde $10 \leq \lambda \leq 100$ cm

L'énergie de ces radiations est inférieure à 10 - 5 de l'ensemble du rayonnement solaire.

Remarque :

Les rayons lumineux ne sont pas tous d'origine thermique.

Exemple :

Fluorescence (de fluorine : minerai utilisé dans des opérations métallurgiques), sa durée de vie est courte.

Phosphorescence (cristaux de sulfure de zinc dans lesquels on introduit des traces d'un autre métal tel que l'argent), sa durée de vie est longue.

Décharge électrique dans les gaz raréfiés

I.3 Mouvement de la terre autour du soleil

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [23-25].

L'exentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de ±1,7% par rapport à la distnace moyenne qui est de 149 675 10^6 km.

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles.

Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut 23°27'. Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure

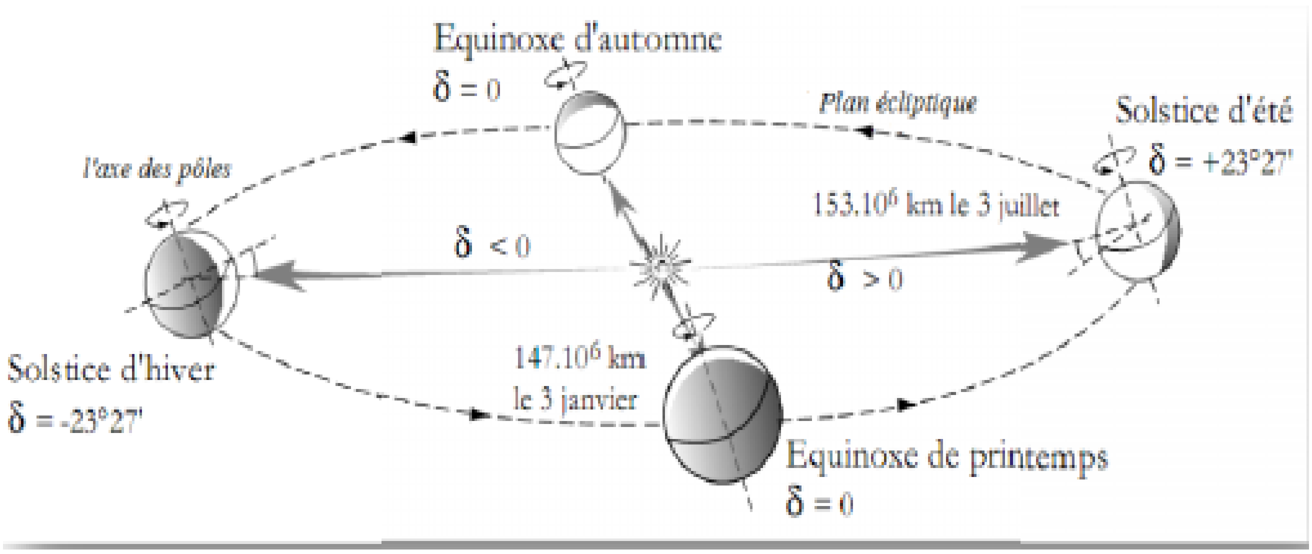


Fig.I.4- Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil [27]

I.4. Rotation de la terre autour de l'axe polaire :

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique céleste. On appelle déclinaison δ l'angle formé par l'axe Terre - Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de +23° 27 solstice d'été (21 juin), à -23° 27 solstice d'hiver (23 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 Février et 23 Septembre (ce sont les équinoxes) et elle est responsable

des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes la déclinaison passe par 0o (-23° 27 < δ < + 23° 27).

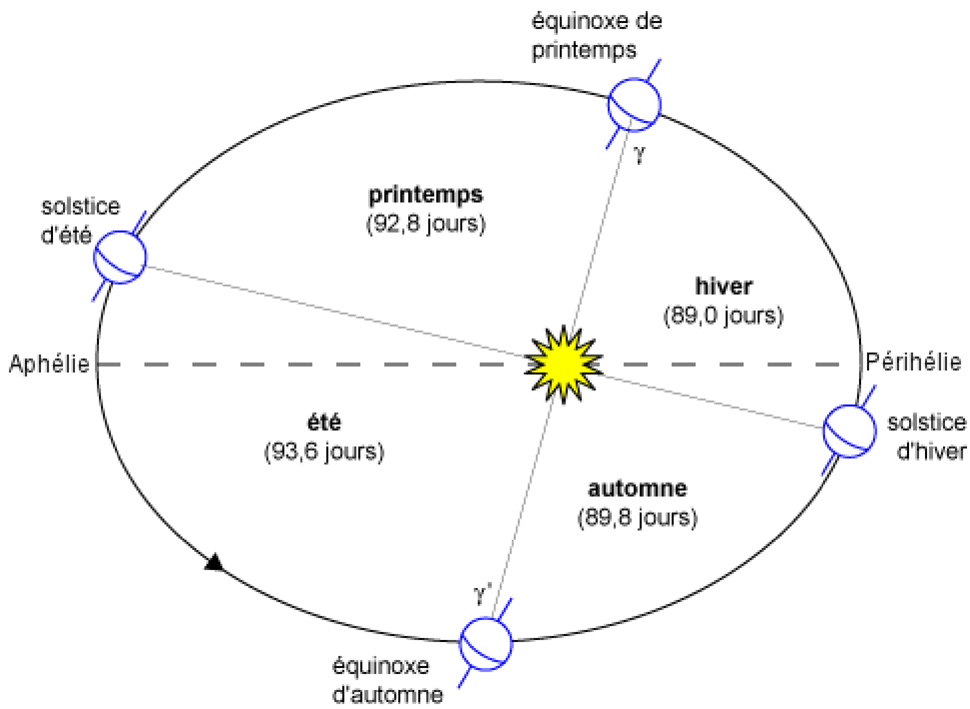


Fig I.5 : Rotation de la terre autour de l'axe polaire. [22]

Repérage d'un site à la surface de la terre

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

La latitude (θ)

La longitude (φ)

L'‘altitude (z)

I.5.La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense. Avec la terre en son centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. Les schémas suivants représentent les différentes caractéristiques sur la sphère [26].

I.5.1.Les coordonnes Horizontales (h,a)

Considérons la sphère céleste locale de centre (o), la verticale du lieu (oz). Une étoile A. Soit (oa) la projection de (A) sur l'horizon (h) du lieu. Par définition :

h = (oa, oA) est la hauteur de l'étoile comptée positivement de (0 à +90°) vers z et négativement de (0 à -90°) vers N. [27]

a = (ok, oa) est l'azimut de A compte positivement dans le sens rétrograde de 0 à 360° à partir d'une origine ok. Signalons que d'autres conventions existent, par exemple, on peut le compter positivement vers l'ouest et négativement vers l'est

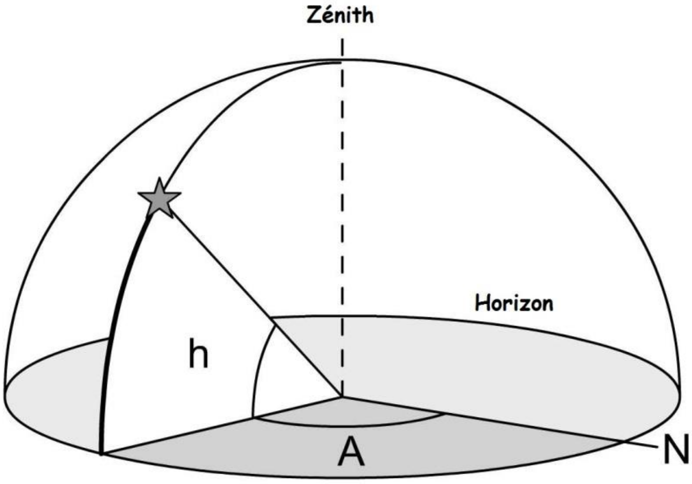


Fig.I.6- coordonnées Horizontales.

Ces deux angles sont fonction de :

- la latitude du lieu
- la date (jour de l'année)
- l'heure à la journée.

I.5.2.Azimut

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

Attention, l'azimut a diffère de l'angle horaire h, comme il est montré sur la figure**. I.6**.

La connaissance de l'azimut est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'origine des azimuts correspond à la direction du Sud dans l'hémisphère Nord. L'angle d'azimut est compté positivement vers l'Ouest. [27]

L'azimut est relié à l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison par la relation:

$$sina = \frac{cos\delta.sin\omega}{cosh} \text{.............................(I.9)}$$

Et si l'on souhaite exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur h, on peut utiliser la formule :

$$tga = \frac{sin\omega}{sin\varphi.cos\omega - cos\varphi.tg\delta} \text{.........................(I.10)}$$

I.7.1. 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 :

$$\mathbf{s(h)=sin(\Phi).sin(\delta)+cos(\delta).cos(\omega).cos(\Phi)} \text{ ....(I.12)}$$

I.7.2.Angle horaire du soleil

L'angle horaire ***(ω)***(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:

$$\omega=15\ (TSV-12) \text{...(I.13)}$$

L'angle horaire ***ω*** varie de -180° à 180°.

TSV : est le temps solaire vrai (**TSV** en heures et ***ω*** 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°.**

I.7.3.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 ou le soleil se couche ou bien le soleil se lever; il est donné par l'équation suivante

$$\omega_{ss}=-\omega_{sr}=\cos^{-1}(-\tan(\Phi)\times\tan(\delta)) \quad \text{(I.14)}$$

Où

δ : est la déclinaison

Φ: est la latitude du lieu.

I.6.**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).

I.6.1.**La latitude Φ**

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° à l'équateur jusqu'90° aux pôles, elle est comptée positivement de (0 à +90°) vers le Nord et négativement de (0 à -90°) vers le Sud. Généralement, cette grandeur est notée Φ

I.6.2.Longitude λ :

Permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord- Sud de référence appelée le méridien Greenwich. λ varie de -180° à +180°.

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

I.6.3. L’altitude

L'altitude est l'élévation verticale d'un lieu ou d'un objet par rapport à un niveau de base. C'est une des composantes géographique et biogéographique qui explique la répartition de la vie sur terre.

L'altitude est aussi une grandeur qui exprime un écart entre un point donné et un niveau de référence ; par convention, sur Terre ce niveau est le plus souvent le niveau de la mer (ou « niveau zéro »).

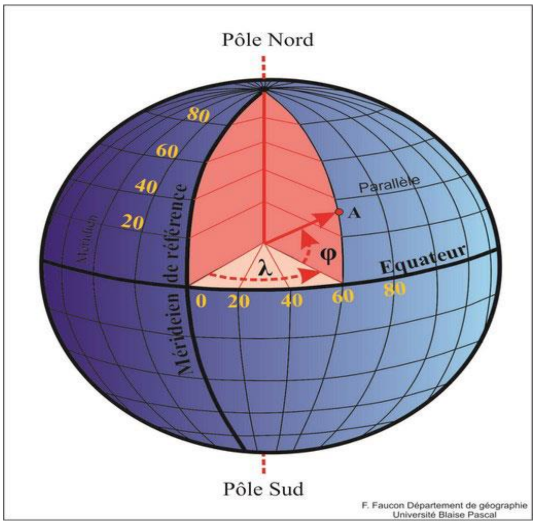


Fig I.7 Les coordonnées géographiques

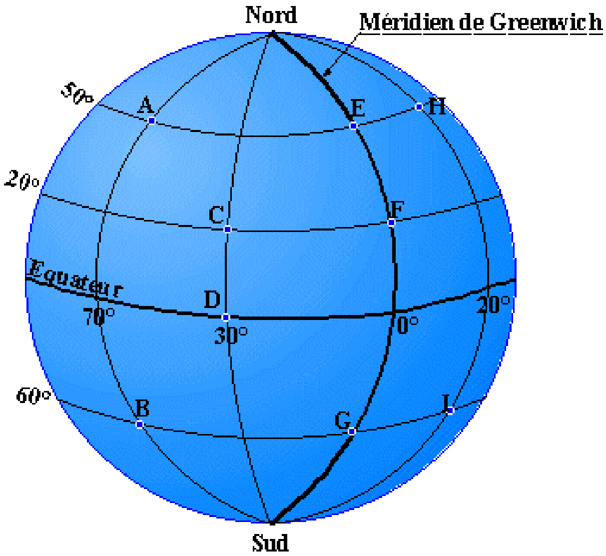


Fig I.8. Les coordonnées géographiques

I.6.4. Déclinaison(δ)

C'est l'angle entre la direction terre-soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de (- **23°45'**) au solstice d'hiver à **(+23°45'**) au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Elle est bien représentée par la formule suivante

$$\delta(°)=\mathbf{23.45}.\mathbf{si}n((\mathbf{36}0).(\mathbf{284}+\mathbf{Nj})/365) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(I.11)$$

N : Numéro du jour dans l'année

δ varie entre deux valeurs extrêmes :**-23.45° ≤δ≤+23.45°**

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.

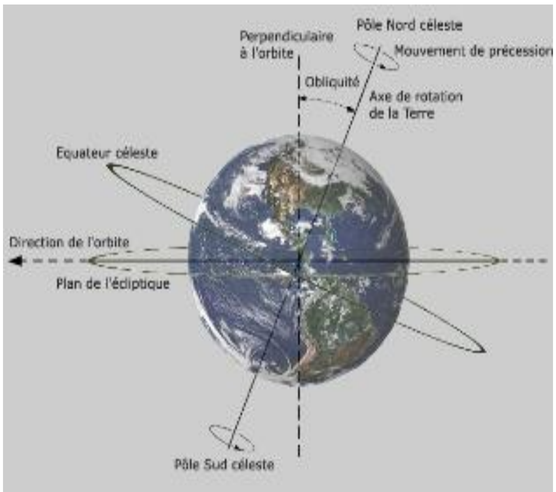


Fig I.8.Déclinaison(δ)

I.8. **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 [27].

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

$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\varphi).\tan(\delta)]$, (Degrés)……………………. (I.15)

Pour un plan incliné d'un angle β', l'angle horaire est :

$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\varphi-\beta').\tan(\delta)]$, (Degrés)…………………….. (I.16)

ω_s

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

$$w_{sr} = min\left\{w_s, \quad cos^{-1}\left(\frac{-xy-\sqrt{x^2-y^2+1}}{x^2+1}\right\}\right. \text{…………..(I.17)}$$

$$w_{ss} = -min\left\{w_s, \quad cos^{-1}\left(\frac{-xy-\sqrt{x^2-y^2+1}}{x^2+1}\right\}\right. \text{….(I.18)}$$

Pour un plan incline d'un angle β' et oriente par un angle < 0, l'angle horaire au coucher du soleil est :

$$w_{sr} = -min\begin{cases} w_s, & cos^{-1}(\frac{-xy-\sqrt{x^2-y^2+1}}{x^2+1} \end{cases}\text{..........(I.19)}$$

$$w_{ss} = -min\begin{cases} w_s, & cos^{-1}(\frac{-xy-\sqrt{x^2-y^2+1}}{x^2+1} \end{cases}\ldots(\text{I}.20)$$

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 [27].:

$Dj = \frac{2}{15}\cos^{-1}[-\tan(\varphi).\tan(\delta)]$, (Heures)………………….. (I.21)

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).

I.9.**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 ($40°7'N$).

<u>Solution</u>

A 11:00, l'angle horaire est w = + 15°

La déclinaison $\delta = -8.67°$

Nous obtenons l'angle zénithal par :

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

= 51.71°

La hauteur du soleil est $h = 90 - \theta_Z = 38.28°$.

L'azimut est obtenu par :

$$a_Z = cos^{-1}\left[\frac{sin38,28\ sin40,16 - sin(-8,67)}{cos38,28cos40,16}\right] = 19,3^o$$

L'angle horaire au coucher du soleil est :

$w_s = cos^{-1}(-tan40.16.tan(-8.67)) = 82.44^{\circ}$

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

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

La durée astronomique du jour est donc :$\overset{?}{N_d} w_s = 11h$ vrai).

Exemple I.2

Calculer l'angle horaire au lever et au coucher du soleil le 2 novembre à M'sila (35° 42′nord) pour un plan orienté d'un angle 35°et incliné par un angle:

(a) $\beta = 50^{\circ}$

(b) $\beta = 80^{\circ}$

Exemple I.3

Calculer l'angle horaire au coucher du soleil à M'sila, (35° 42′nord) le 1 Mai pour :

a)- Un plan horizontal

b)- Un plan incliné d'un angle de 60°

c)- Un plan incliné d'un angle de 90°.

Exemple I.4

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 m’sila.

I.10. Le fuseau horaire

C'est une bande de 15° 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°. 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.

I.11 - 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 [28].

- Le temps solaire vrai

Il est donné par relation [29] :

$$TSV = 12 + w/15 \quad \text{(I.22)}$$

w :est compté positivement l'après midi.

- Le temps solaire moyen (TSM)

Le temps solaire moyen diffère peu du temps solaire vrai, cette différence est définie par l'équation du temps *t E*

$$Et = TSV - TSM \quad \text{(I.23)}$$

Et: étant la correction du *TSV* par rapport ou *TSM* ; est exprimé en minutes et fraction décimales de minutes.

$$E_t = 9.87 \sin 2.\frac{360}{365}(d-81) - 7.53 \cos \frac{360}{365}(d-81) - 1.5 \sin \frac{360}{365}(d-81)$$

d = n^0 du jour dans l'année.

.(I.24)

Le temps universel

Le temps universel TU est défini par l'heure du passage du soleil à la méridienne origine. Le méridien retenu comme origine et celui de Greenwich et le TSM correspond au temps universel (c'est le TSM à la longitude 0º). 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:

$$TU = TSM \pm \frac{\lambda}{15} \quad \text{(I.25)}$$

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

Le temps légal (TL)

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.

$$TL = TU + \Delta H \qquad \text{(I.26)}$$

ΔH étant le décalage horaire entre le méridien de

I.12.Correction par la distance terre-soleil

Les variations annuelles de la distance terre-soleil sont dues au fait que la trajectoire autour du soleil est une ellipse [30].

Elles se traduisent par des variations du rayonnement hors atmosphère (L'éclairement solaire direct extra-terrestre).

Le coefficient de correction (g) du à cette variation de la distance a été déterminé à partir de la position de la terre sur son orbite en fonction du quantième jour de l'année, ce coefficient est donné par la relation :

$$\gamma = 1 + 0.034\cos\left[\frac{360}{365}(J-3)\right] \qquad \text{(I.27)}$$

I.12.1.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 :

$$ET = 9.87\sin(2\beta_o) - 7.53\cos(\beta_o) - 1.5\sin(\beta_o) \qquad \text{(I.28)}$$

L'angle β_o est défini en fonction du numéro du jour de l'année :

$$\beta_0 = \frac{360}{365}(nj - 81), \quad \text{Degrés .}$$

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.

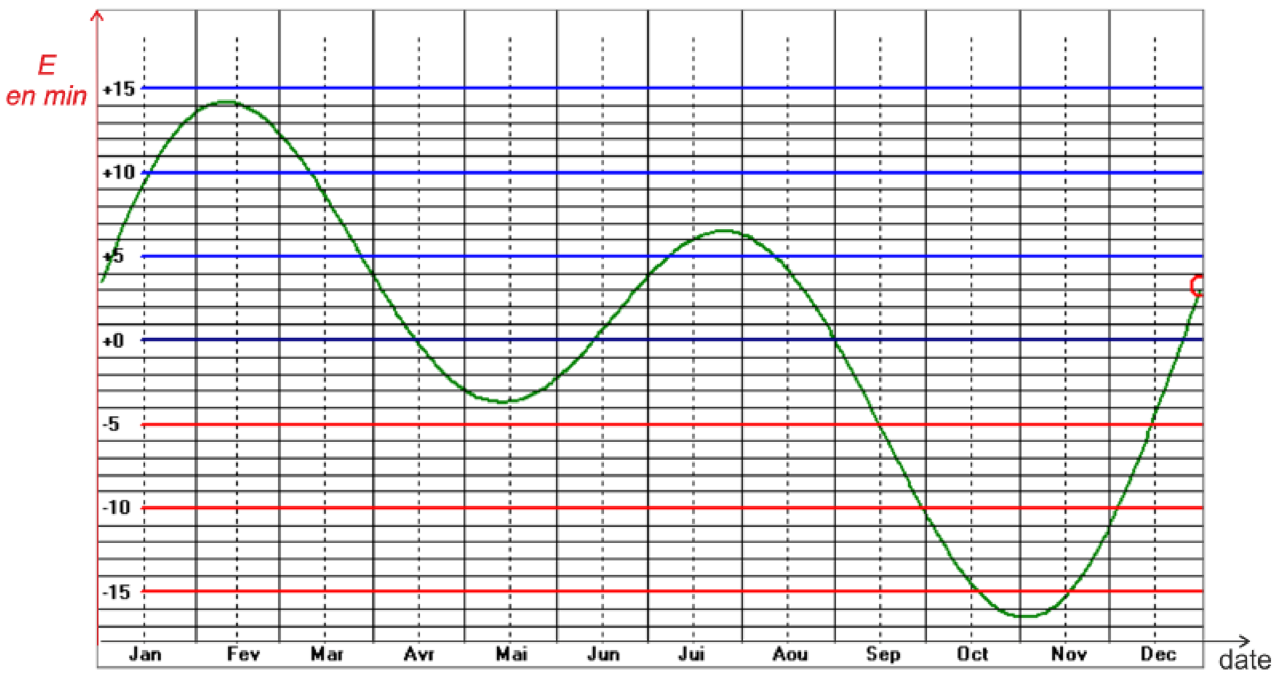


Fig I.10. Equation du temps ET en fonction du jour de l'année.

Tableau I.1. Variation de l'équation du temps (ET en min) et de la déclinaison du Soleil (D en degré) pour le premier jour de chaque mois de l'année.

Mois	ET	D
Janvier	-3	-23.1
Février	-14	-17.3
Mars	-13	-8.0
Avril	-4	4.1
Mai	3	14.8
Juin	2	21.9
Juillet	-4	23.2
Août	-6	18.3
Septembre	0	8.6
Octobre	10	-2.8
Novembre	16	-14.1
Décembre	11	-21.6

-

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 :

$$TSV = TL - \Delta H + (ET + 4L)/60 \qquad \text{(I.29)}$$

ΔH: 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 16h à M'sila, heure légale le 10 Août, quel est le temps solaire vrai ?

L = + 4,2^0 , T = TL +1 ,ET = - 5mn =0,08 h

TSV= (TL - 1 + (L/15) + ET) = (16-1 + 0.28 - 0.08) = 15h et 20 mn.

I.13- Irradiation hors atmosphère

I.13.1 Flux et de l'irradiation solaire sur une surface horizontale

Considérons un plan horizontal, à la limite de l'atmosphère terrestre situé à une latitude ϕ. [31-32]

$$H^* = I_0 \sinh \quad \text{....................................(I.30)}$$

Ou I0 : représente la constante solaire que l'on peut considère constante compte tenu de sa faible variation au cours du temps

Notons : H0 : irradiation Journalière

On a : $$H_0 = \int_{Iourne} H^* dt = \int_{L.S}^{C.S} I_0 \sinh \, dt \quad \text{.......................(I.31)}$$

L.S et C.S correspondent aux heures de lever et couche du soleil.

$$H_0 = I_0 \int_{LS}^{CS} (\sin\delta \sin\phi + \cos w \cos\delta \cos\Phi) dt \quad \text{…………..…} \quad (I.32)$$

Pour une journée et un lieu donné, δ et Φ sont fixes d'autre part. 1heure de temps correspond à une variation de 15^0 de l'angle horaire w

dt=(12/Л)dw

Avec le temps (t) en heures et l'angle w en radions

L’intégration donne alors :

Le rayonnement extraterrestre sur une surface horizontale H_0 peut être calculer pour une journée précis n de l’année, par l'équation suivante :

$$H_0 = \frac{86400.1367}{\pi}\left(1 + 0.033\cos\left(\frac{360}{365}n\right)\right)(\cos\Phi\cos\delta\sin w_s + w_s \sin\Phi \sin\delta) \quad (I.33) \text{…}$$

Φ : Latitude du lieu

δ : Déclinaison solaire

n: nombre du jour de l’année.

I.13.2. Flux et de l'irradiation solaire sur une surface d'orientation quelconque

Un plan quelconque est défini par deux angles (α, γ)

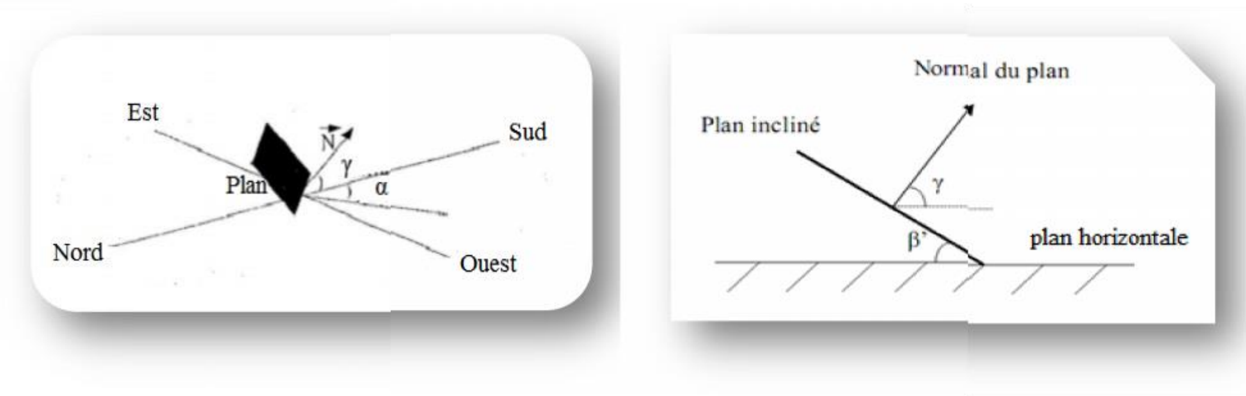
a: azimut du plan, c’est l’angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

γ: hauteur du plan, c’est l’angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

Sa valeur peut être calculée par l'équation :

$\gamma = 90° - \beta'$

β': inclinaison du plan, c'est l'angle entre le plan et sa projection sur le plan horizontal.



.Figure 6 : Orientation d'un plan quelconque.

I.13.3 Angle d'incidence des rayons solaires

L'angle d'incidence du faisceau solaire avec un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque (β', γ) est l'angle formé par le vecteur directionnel du faisceau solaire et la normale sortante au plan [27] .

- Pour un plan orienté plein sud

$\cos(i) = \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\varphi - \beta') + \sin(\delta)\sin(\varphi - \beta')$ ……….(I.34)

- Pour un plan orienté plein nord

$\cos(i) = \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\varphi - \beta') + \sin(\delta)\sin(\varphi + \beta')$………

(I.35)

Pour un plan horizontal ($\beta'=0$), $\cos(\,i\,) = \sin(h)$ d'après la relation précédent

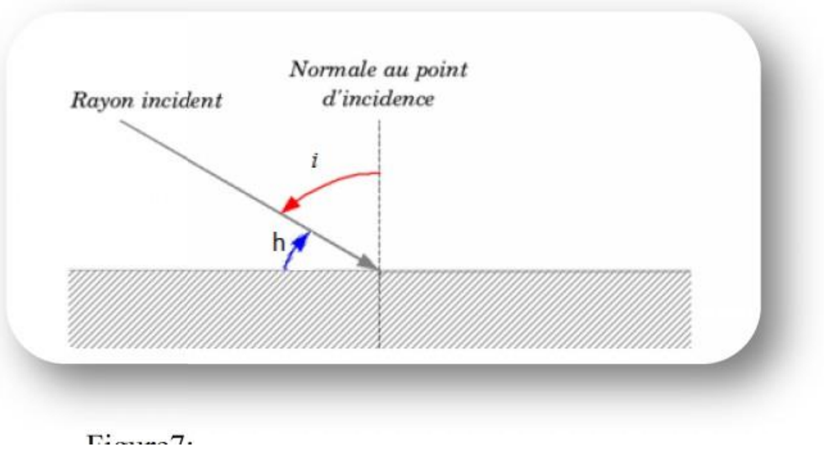


Fig I.5. Angle d'incidence