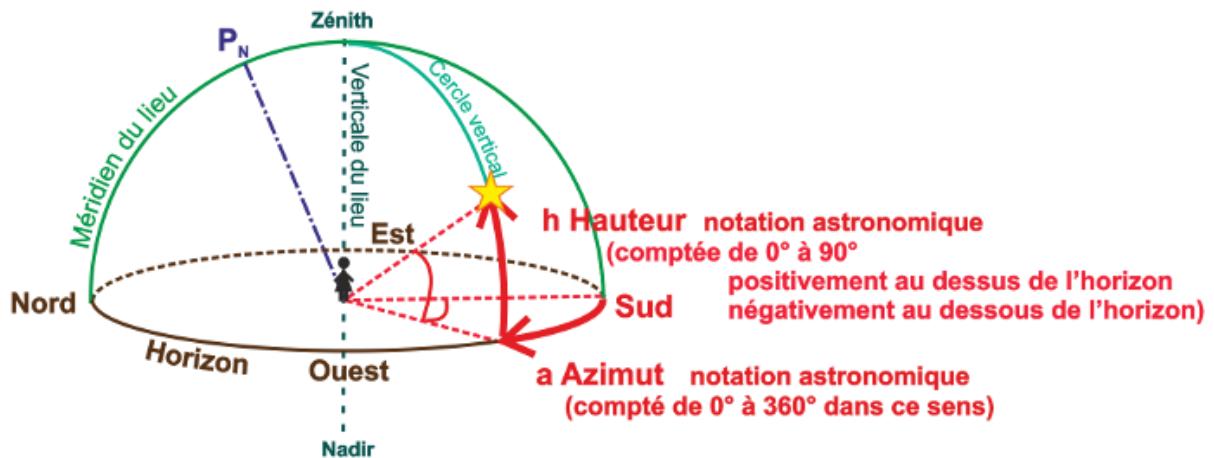


Chapitre 2

Energie solaire

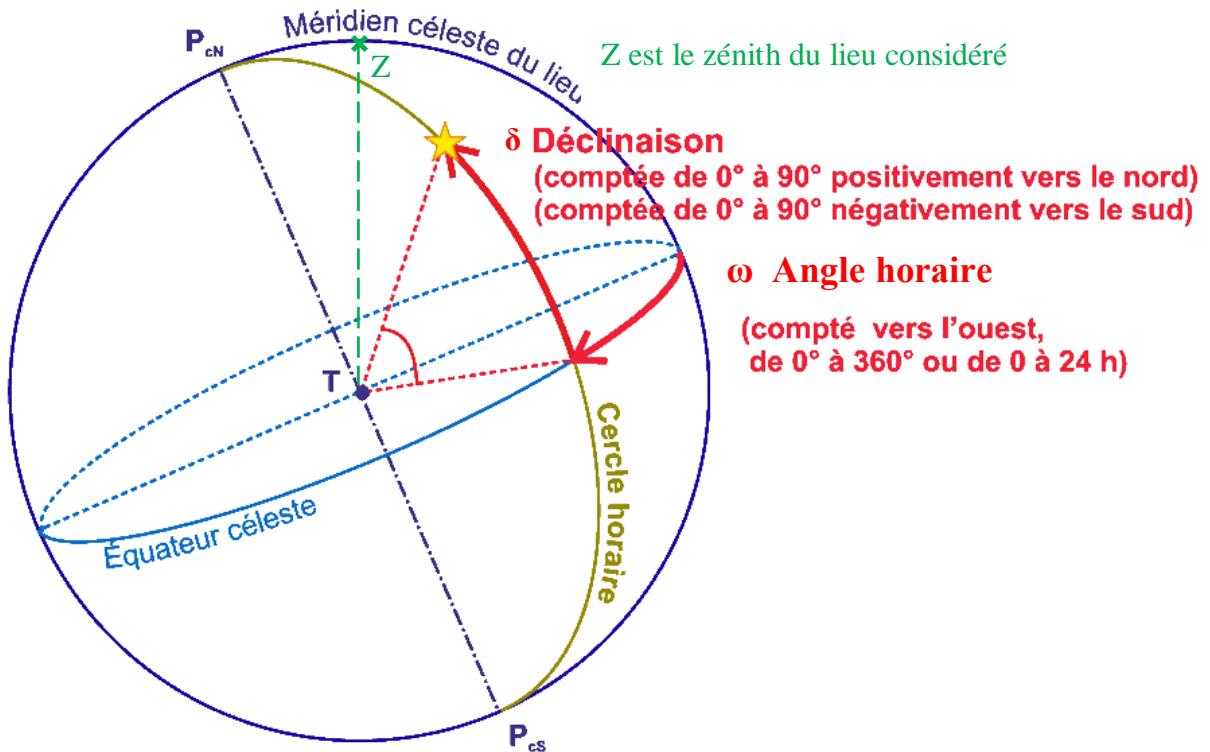
1. Coordonnées horizontales

Le plan de référence est le plan horizontal de l'observateur. Les coordonnées horizontales d'un astre sont **l'azimut** (noté **a**) et la **hauteur** (notée **h**) de cet astre. Les coordonnées horizontales d'une même étoile observée au même instant sont différentes en deux points de la Terre et varient continuellement en raison du mouvement journalier de rotation de la Terre.



2. Coordonnées horaires

Les coordonnées horizontales introduites précédemment sont intéressantes pour définir la position du soleil par rapport à une installation donnée. Par contre, elles sont peu commodes pour décrire le mouvement apparent du Soleil. Il est préférable pour cela d'utiliser un autre système de coordonnées, les coordonnées horaires, qui sont définies à la figure ci-dessous :

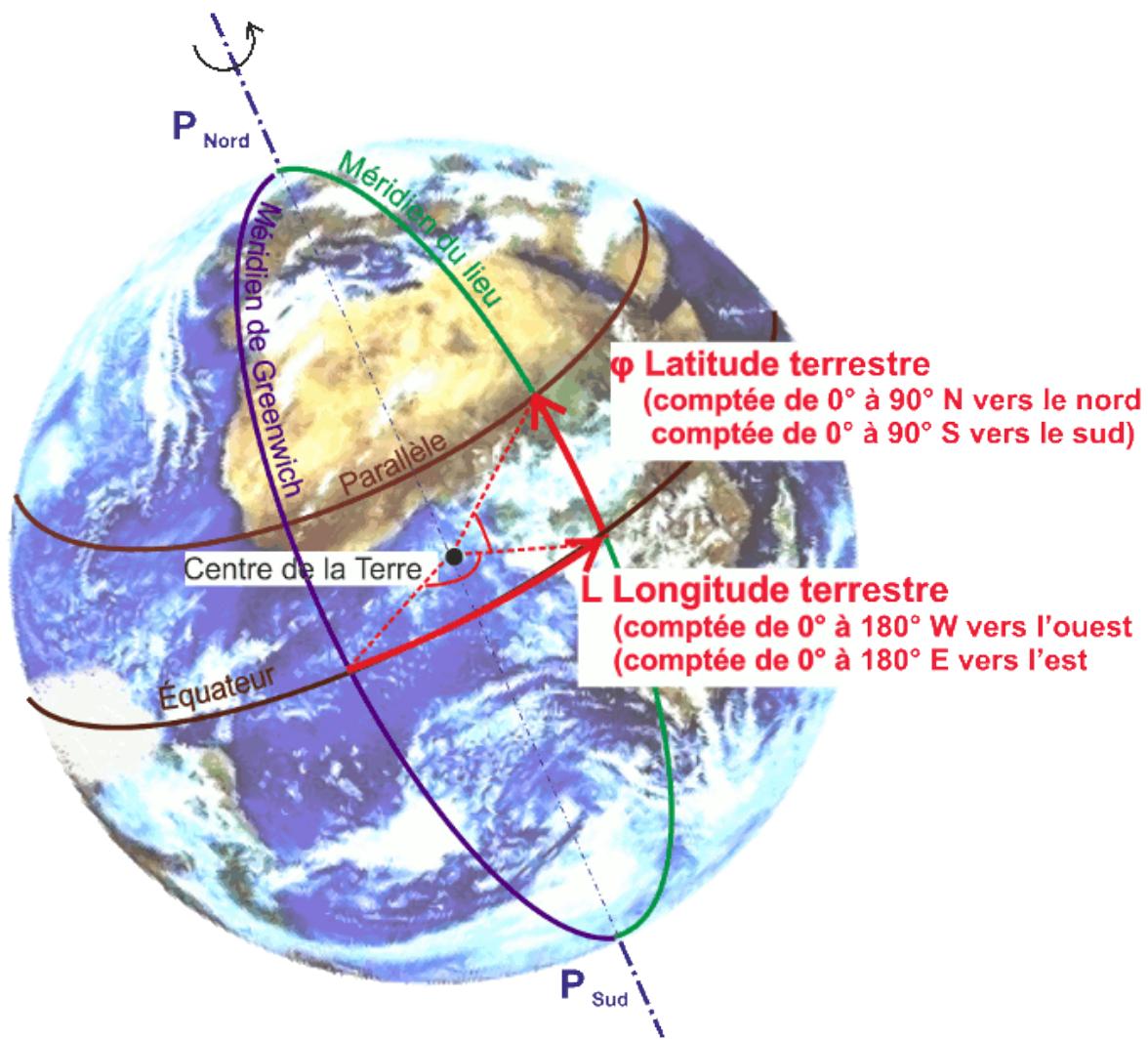


Le plan de référence est le plan de l'**équateur céleste**. Les coordonnées horaires d'un astre sont **l'angle horaire (ω)** et la **déclinaison (δ)** de cet astre. Seul l'angle horaire dépend du lieu d'observation. **La déclinaison solaire δ** est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons.

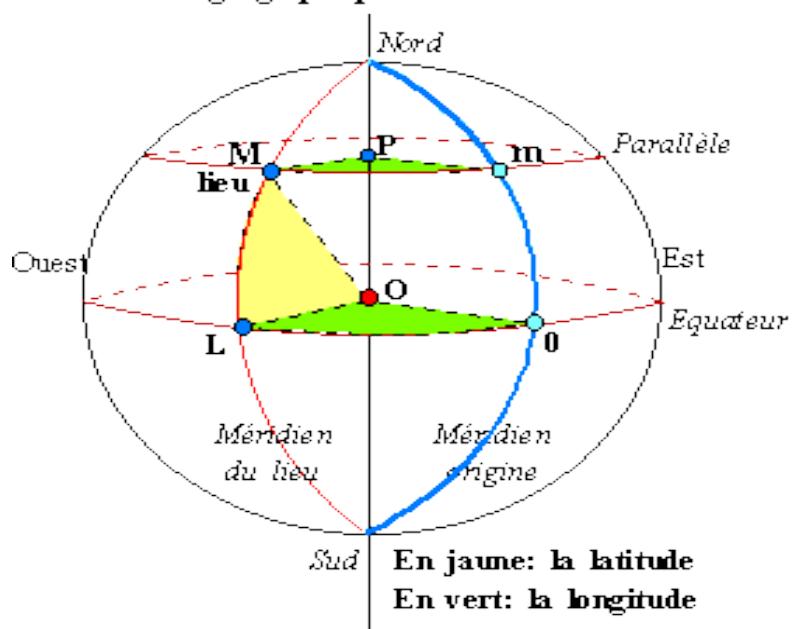
NB **Z** est le zénith du lieu considéré. Le plan équatorial (équateur céleste) est perpendiculaire à l'axe **PP'** des pôles.

3. Coordonnées géographiques ou terrestres

Les coordonnées terrestres, d'un point de la surface de la Terre sont **la latitude (ϕ)** et la **longitude (L)** de ce point.



Coordonnées géographiques:



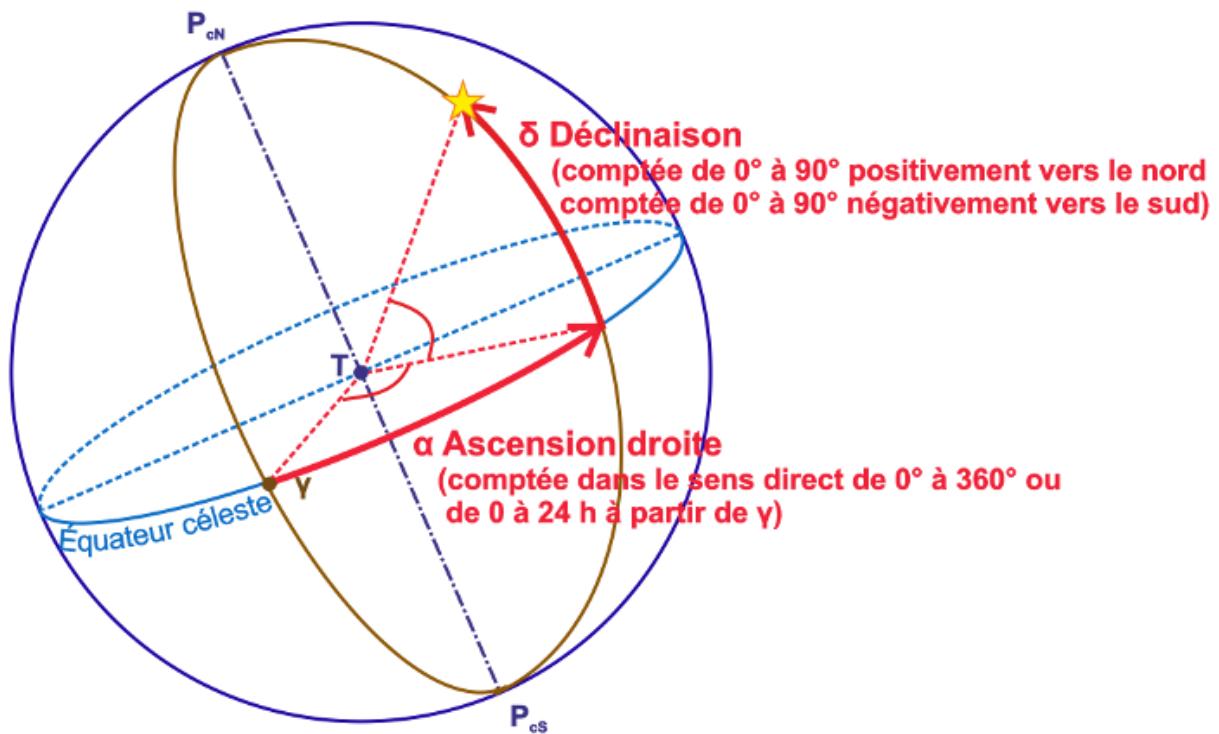
NB Tous les lieux d'un même parallèle ont la même latitude (ne pas confondre avec 'altitude'). La latitude des lieux situés sur l'équateur est 0° (zéro degré). La latitude des pôles est 90° Nord pour le pôle Nord et 90° Sud (ou -90°) pour le pôle Sud.

Tous les lieux d'un même méridien ont la même longitude. Le méridien qui passe par Greenwich a un rôle particulier : sa longitude est 0° . Tous les autres méridiens sont mesurés en prenant ce méridien comme origine (à partir du méridien Greenwich).

-**La latitude Φ** , permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle

varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

4. Coordonnées équatoriales



Le plan de référence est le plan équatorial.

Les coordonnées équatoriales d'un astre sont **l'ascension droite (α)** et la **déclinaison** de cet astre (δ)

a. Angle horaire ω :

Définit comme étant 15° fois le nombre d'heures de différence avec le midi solaire; affecté de signe positif pour les heures de l'après midi. L'angle horaire est négatif avant midi solaire TSV

$$\omega = \frac{360}{24} \text{ (TSV- 12)}$$

b. Temps solaires

- **Temps solaire vrai**

On appelle " Temps Solaire Vrai (TSV) en un lieu et à un instant donné, l'angle horaire du Soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même et sa révolution autour du Soleil, il est lié à l'alternance des jours et des nuits. C'est le TSV qui est indiqué sur les cadrans solaires.

Remarque importante : La définition de TSV donnée ci-dessus est la définition en Astronomie. En physique, on prend, par commodité, TSV = 12h (midi) pour la valeur nulle de l'angle horaire

C'est cette dernière définition que nous utiliserons par la suite.

$$\text{TSV} = 12 + (\omega / 15) \text{ en heures,}$$

TSV : en heures (h) , ω en degrés ($^{\circ}$)

- **Temps solaire moyen**

La vitesse de la Terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année. Pour avoir un temps qui " s'écoule " à vitesse constante (celui mesuré par les horloges), on définit donc un temps solaire moyen.

Historiquement, la journée solaire moyenne a été utilisée pour définir les unités de temps. On a encore avec une bonne précision 1 jour = 24h 00m 00s.

L'écart entre TSV et TSM varie selon la date,, par définition.

L'expression de cet écart porte le nom de " Equation du temps ".

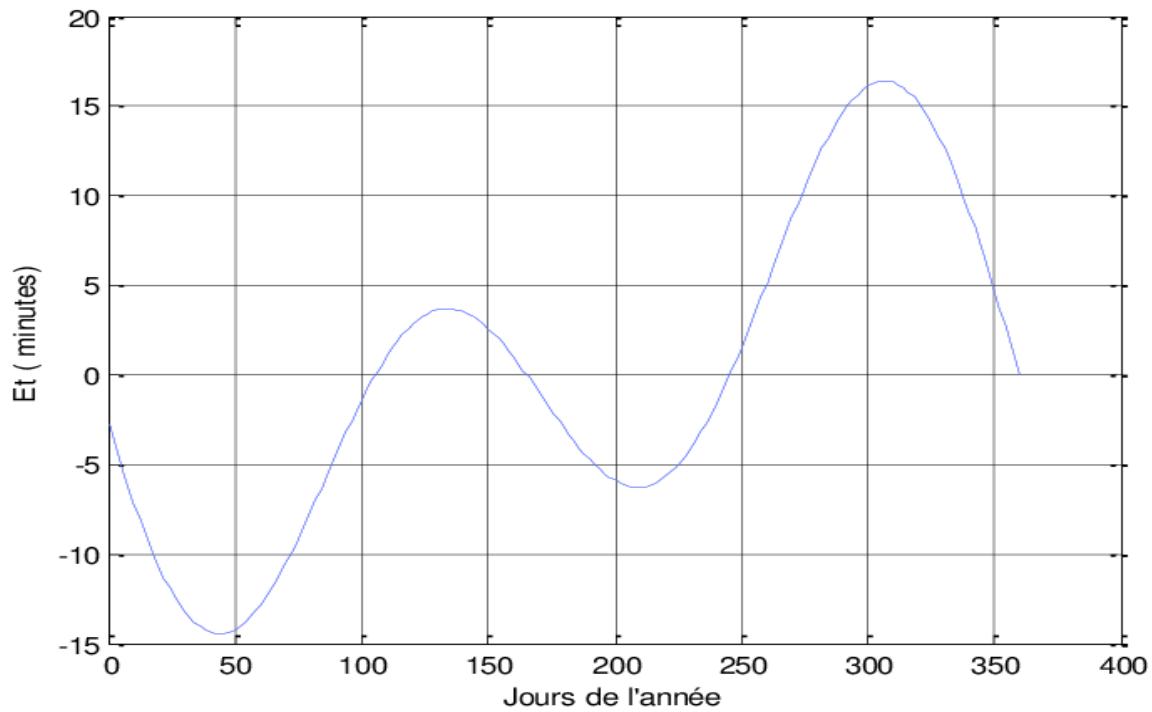
$\text{TSV} = \text{TSM} + \text{Et}$

L'éuation de temps est donnée par la relation suivante :

$$\text{Et} = 9.87 \sin 2N - 7.53 \cos N - 1.5 \sin N$$

$$N = (360/365) \times (j-81)$$

j : étant le nombre du jour dans l'année à compter du 1^{er} janvier



Equation du temps en fonction du jour de l'année

- **Temps universel**

Par convention, le temps universel (GMT : le temps moyen de Greenwich) a été choisi comme étant le temps solaire moyen correspondant au méridien de Greenwich augmenté de 12 heures (pour les usages de la vie civile, le jour commence à minuit et non à midi).

$$TSM = T_U + \frac{\lambda}{15}$$

- **Temps légal**

Le temps légal est l'heure liée au temps universel TU par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heure qui dépend de la longitude (1 heure de temps pour 15° de longitude) et des coutumes de chaque pays (heure d'été et heure d'hiver)

$$T_L = T_U + \frac{\lambda}{15} + \Delta h$$

NB

Temps solaire vrai Temps indiqué par un cadran solaire

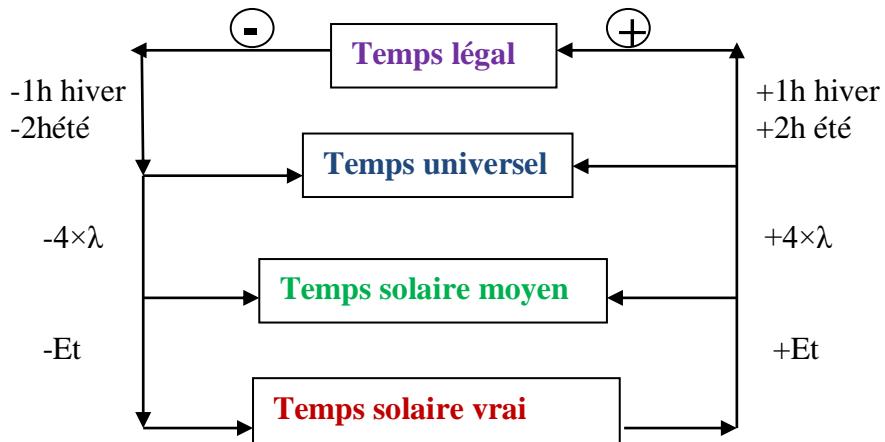
Temps solaire moyen Temps solaire vrai corrigé avec l'équation du temps

Temps universel

Temps solaire moyen tenant compte de la correction due à la longitude (4 minutes par degré)

Temps légal

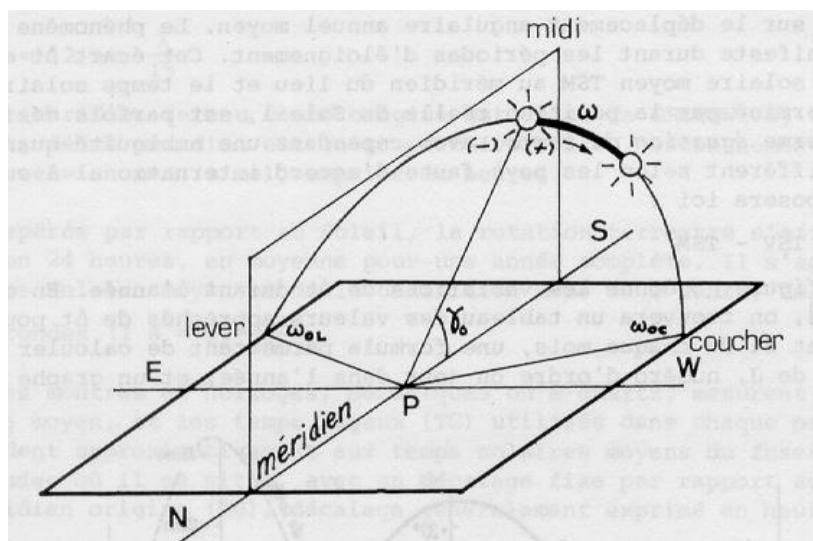
Temps universel prenant en compte le décalage dû aux heures d'hiver (+1 h) ou d'été (2 h)



- **Repérage du soleil dans le ciel**

La hauteur du soleil est une donnée fondamentale pour deux raisons principales:

- Elle intervient explicitement dans les calculs d'apport énergétique.
- l'implantation dans un site donné demande une étude des ombres portées par l'environnement bâti ou naturel.



Angle horaire ω du soleil

- **Angle horaire ω du soleil**

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de 15° , soit encore 4mn de temps par $^\circ$ de longitude

- **Hauteur angulaire**

C'est l'angle h formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il est donné par la relation:

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

où l'on rappelle que φ , δ , ω sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire. De la hauteur h , on peut déduire **les heures de lever et de coucher de soleil**.

En faisant $h=0$, on trouve :

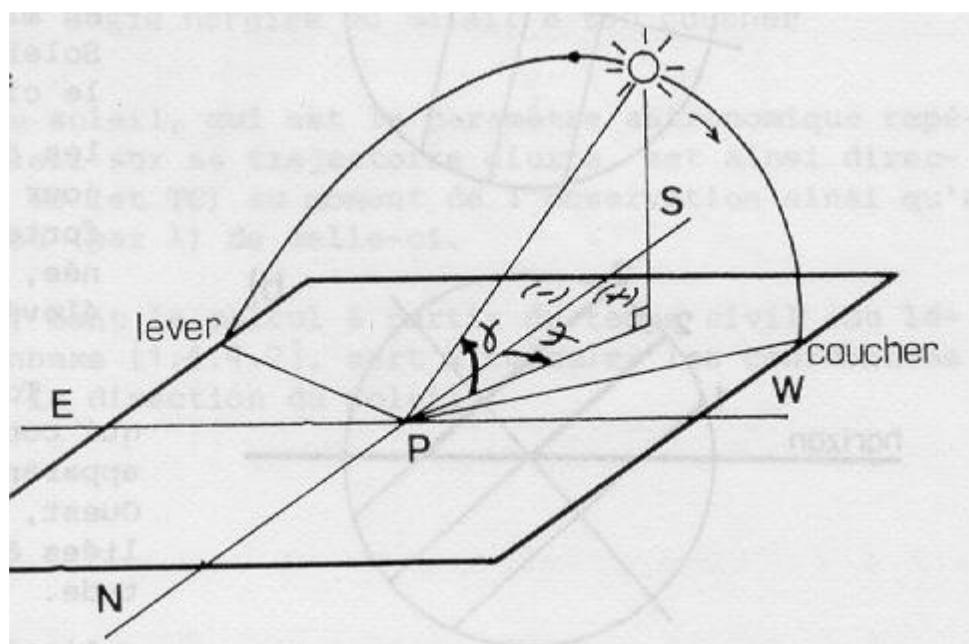
$$\cos \omega_0 = -\tan \varphi \tan \delta$$

L'heure solaire au lever et au coucher est respectivement :

$$(TSV)_{\text{lever}} = 12 - \omega_0/15 \quad (TSV)_{\text{coucher}} = 12 + \omega_0/15$$

La durée astronomique du jour s'obtient tout aussi facilement en faisant:

$$D_0 = (2/15) \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$$



hauteur angulaire (h) et azimuth (a) du soleil

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

$$\sin a = \frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cos h}$$

- **Rayonnement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair**

1. Angle d'incidence

Dans les applications solaires, la question est donc de calculer l'angle (θ) entre un

rayon arrivant directement du soleil et la normale à un plan quelconque.

L'orientation

du plan est définie par :

- Son inclinaison (β): Angle que fait le plan avec l'horizontal.
- Son azimut (a): Angle que fait la normale à la surface du plan considéré et le plan méridien

Rayonnement solaire au niveau de la surface de la Terre

Atténuation du rayonnement solaire

Lors de sa traversé dans l'atmosphère, il subit diverses atténuations qu'on peut les classer en deux types :

- **Atténuation par absorption :**

le rayonnement solaire absorbé est transformé en chaleur et disparaît du bilan du rayonnement utilisable au sol.

- **Atténuation par diffusion :**

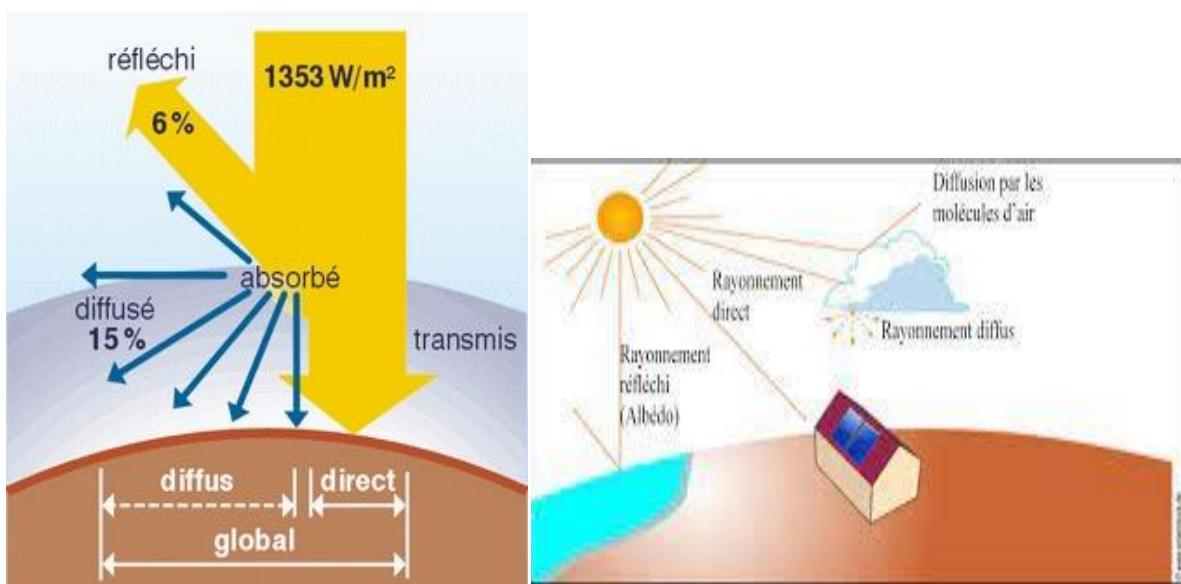
Le rayonnement diffusé est rayonné à l'espace, peut être à nouveau diffusé vers le sol ou vers le ciel, absorbé ou transmis.

Le rayonnement solaire provenant au sol peut se décomposer donc en deux parties :

1. **Rayonnement direct** ; provenant directement du soleil.
2. **Rayonnement diffus** ; provenant de toutes les directions de l'espace.

L'ensemble du rayonnement direct et diffus donne le rayonnement solaire global.

$$I_G = I_D + I_d$$



Composition du rayonnement solaire

- **Masse atmosphérique**

La masse atmosphérique (**m**) est définie comme étant le rapport de la longueur du parcours réel au plus cours parcourt du soleil, en fonction de la hauteur du soleil (*h*) elle se calcule comme suit :

$$m = \frac{1}{\sin h}$$

I-1. Le rayonnement solaire

- **Masse d'air (Air Mass) :**
 - Rapport entre l'épaisseur traversée par le rayonnement direct et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.

$$OB = \frac{OA}{\sin \alpha}$$

$$\text{Air Mass } \frac{OB}{OA} = \frac{1}{\sin \alpha}$$

Atmosphère

Sol

14

a. Rayonnement solaire direct

Pour un plan normal au rayons solaires situé à la surface de la Terre, le rayonnement direct est donné par :

$$I_{DN} = I_0 \times C_0 \times A \times e^{(\frac{-B}{\sinh})}$$

I_{DN} :flux solaire direct reçu par les surfaces normales aux rayons solaires.

I_0 : constante solaire = 1367 w/m²

A et B : coefficients pour tenir en compte des conditions atmosphériques.

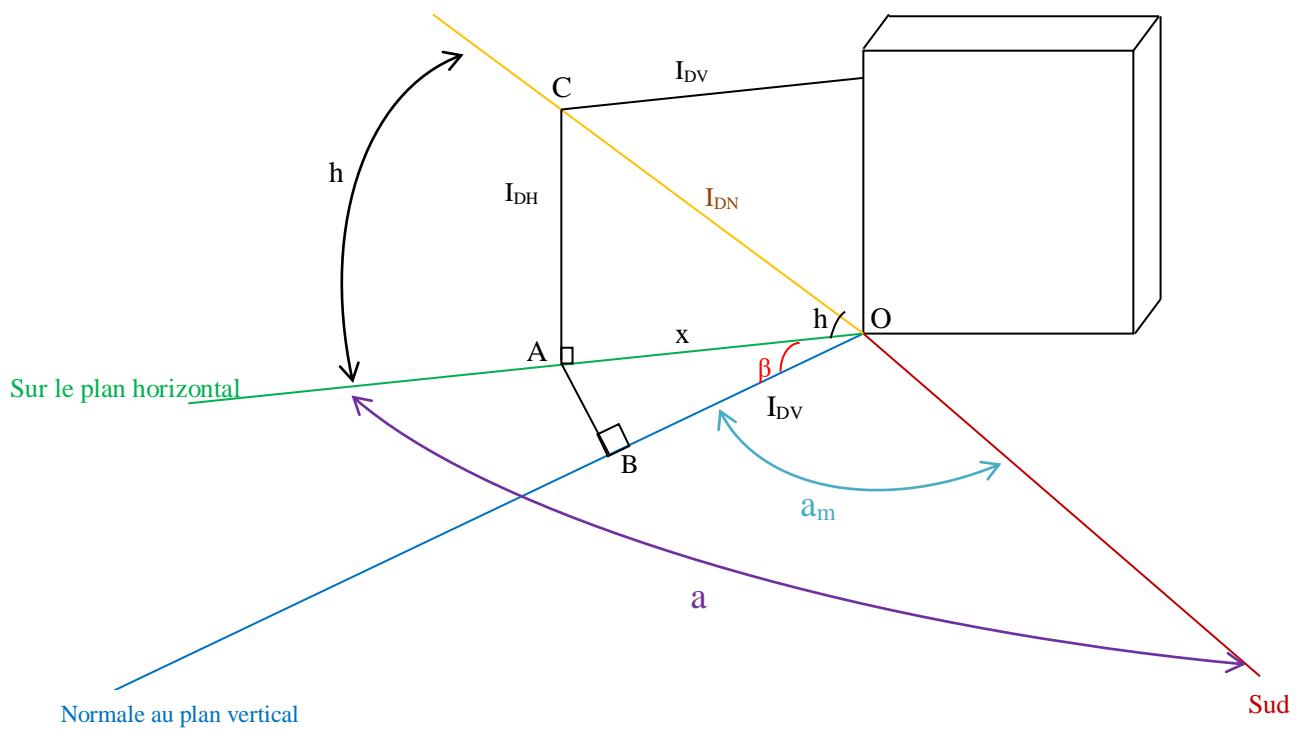
C_0 : facteur de correction pour tenir compte la variation de la distance entre la Terre et le Soleil, elle se calcule comme suit :

$$C_0 = 1 + 0.034\cos[30(N_m - 1) + N_j]$$

(N_m) : nombre du mois (1÷12)

(N_j) nombre des jours (1 ÷ 31)

- Rayonnement solaire direct reçu par surface verticale ou horizontal



Plan horizontal

Δ (OAC)

$$\sinh = \frac{I_{DH}}{I_{DN}} \Rightarrow I_{DH} = I_{DN} I_{DN} \times \sinh$$

$$\beta = a - a_m$$

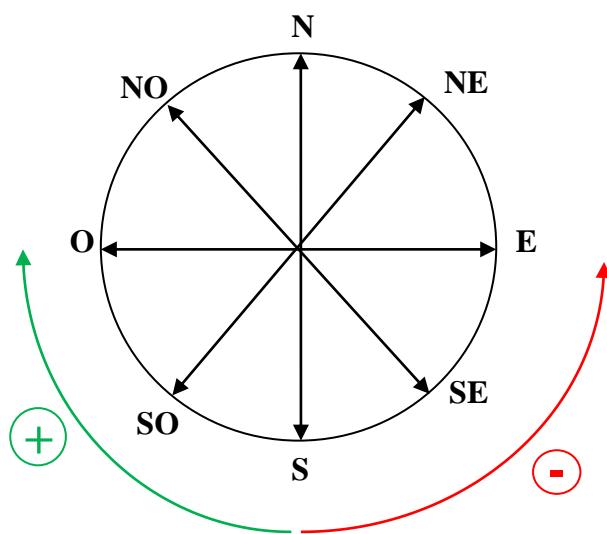
Δ (OAB)

$$\cos\beta = \frac{I_{DV}}{x} \Rightarrow I_{DV} = x \times \cos\beta$$

$$x = I_{DN} \times \cosh \Rightarrow I_{DV} = I_{DN} \times \cosh \times \cos\beta$$

a : azimut du soleil

a_m : angle d'azimut de la paroi verticale considéré comme l'angle entre l'orientation sud et la normale au plan vertical. Les valeurs de (a_m) sont données en fonction de l'orientation.



Orientation	S	SE	E	NE	N	SO	O	NO
$a_m (^\circ)$	0	-45	-90	-135	± 180	+45	+90	+135