

# Principes de base de la géométrie solaire

---

*Petros Axaopoulos TEI d'Athènes, Grèce*

## Apprentissage des Résultats

Après l'étude de ce chapitre, les lecteurs pourront :

- Comprendre les bases de la géométrie Terre-Soleil
- Exécuter les divers calculs angulaires
- Faire la différence entre solaire et l'heure locale
- Définir la position du soleil par rapport à la terre
- Expliquer le chemin apparent journalier et annuel du mouvement du soleil
- Calculer l'incidence solaire pour une face orientée et inclinée arbitrairement relativement à la Terre

Ce chapitre décrit le système géométrique formé par la Terre et le Soleil et comment il peut être employé pour définir la position du Soleil par rapport à la Terre. Pour les applications à énergie solaire, il est important de comprendre le mouvement apparent du soleil, aussi bien que la position angulaire respective entre le Soleil et la Terre. La Compréhension de ce mécanisme sera d'importance dans les chapitres suivants, qui incluent des notions élémentaires d'astronomie. Ainsi, l'accent est mis sur les notions et conditions qui concernent les positions relatives de la Terre et du Soleil et leurs corrélations, qui sont d'importance élevée dans la géométrie solaire.

### 3,1 La rotation de la Terre

La Terre tourne autour de son propre axe, connu sous le nom d'*Axe Polaire P-P'* (Fig. 3.1). Les points par lesquels cet axe traverse la Terre sont les pôles Nord (Np) et Sud (Sp). La normale du grand cercle EIWI' à cet axe s'appelle l'équateur et le plan contenant l'équateur est le plan équatorial qui divise la Terre entre hémisphère nord et hémisphère sud. La normale du grand cercle ESWN à l'axe ZZ' s'appelle l'horizon. La position du Soleil dans le ciel varie tout au long du jour et de la saison du fait de la rotation de la Terre autour de son axe une fois par jour. De même, la terre évolue sur son orbite elliptique autour du soleil en une révolution par an, avec le soleil à un des foyers de l'ellipse (Fig. 3.2).

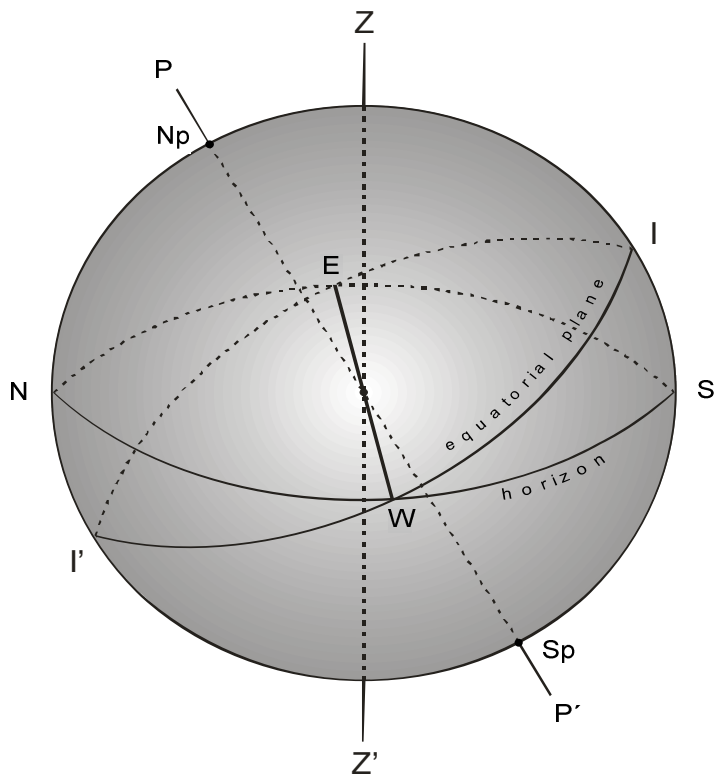


Figure 3 .1 Horizon et plan équatoriale

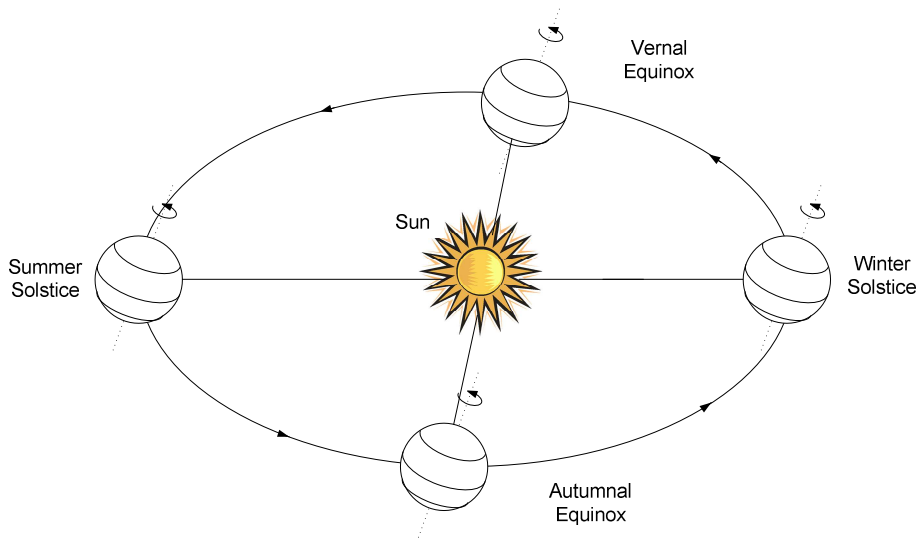


Figure 3.2 Rotation de la terre sur son axe et orbite elliptique autour du soleil

Le plan contenant l'orbite elliptique de la Terre est appelé plan de l'écliptique. Les saisons proviennent du fait que l'axe de la Terre, qui est perpendiculaire au plan équatoriale, est incliné par rapport au plan de l'écliptique (Figure3.3).

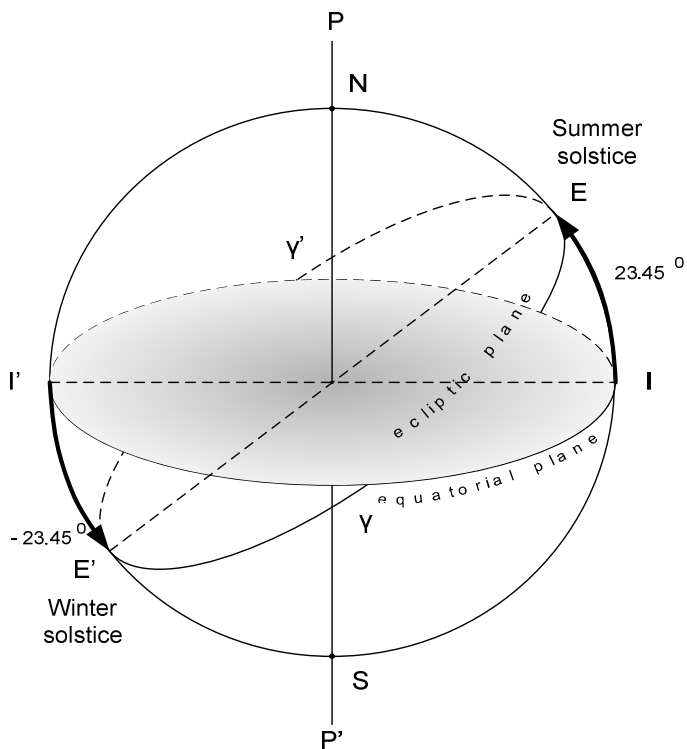


Figure 3.3 Plan équatoriale et écliptique

En outre, l'écliptique peut être défini comme le chemin apparent du mouvement du Soleil sur la sphère céleste vu de la Terre. Les points  $\gamma\gamma'$  sur le plan de l'écliptique intersecté par le plan équatorial de la sphère céleste s'appellent les équinoxes. Ces points déterminent les dates qui ont 12 heures de jour et 12 heures d'obscurité. L'excursion la plus septentrionale du Soleil s'appelle le solstice d'été et aura la plus longue durée du jour. Le solstice d'hiver est inversement la durée la plus courte du jour.

Le rayonnement solaire reçu à différentes latitudes et à différentes saisons varie parce que l'axe de la rotation de la terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique, mais est incliné d'un angle fixe de 23.45° (Fig. 3.3). Ainsi, le rayonnement solaire frappe l'hémisphère nord de la Terre plus directement lors du solstice d'été, expliquant l'été dans cet hémisphère au cours de cette période de l'année. En même temps, le rayonnement solaire frappe l'hémisphère sud de la Terre de façon plus oblique, expliquant l'hiver dans cette région. Le Schéma 3.2 montre que pendant le solstice d'été (vers le 21 juin), la Terre est placée sur son orbite de sorte que le Pôle

Nord soit  $23.45^\circ$  incliné vers le Soleil, alors que pendant le solstice d'hiver le Pôle Sud est incliné à  $23,45^\circ$  vers le soleil (vers le 21 décembre). Pendant les équinoxes de l'automne et du printemps, ni l'un ni l'autre des pôles n'est incliné vers le soleil.

### 3,2 Longitude et Latitude

Le système de coordonnées géographiques est un système qui permet à chaque emplacement sur la Terre d'être spécifié par l'intermédiaire de deux angles, la longitude (L) et la latitude ( $\phi$ ). Le plan de référence est le plan équatorial qui est perpendiculaire à l'axe de rotation et intercepte la surface de la Terre le long de l'équateur. Les Cercles interceptant la surface terrestre parallèle à l'équateur détermine la latitude. La latitude est définie comme l'angle entre le plan équatorial et une ligne du centre de la Terre et un emplacement (T) sur la surface de la Terre. Par définition la latitude est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud.

Pour la détermination de la longitude, on a besoin d'un plan perpendiculaire face à l'équateur comprenant l'axe de rotation. Ce plan créera un cercle d'intersection, ou deux demi-cercles allant d'un pôle aux autres méridiens nommés.

La longitude zéro est par définition le méridien passant par Greenwich en Angleterre. La longitude de n'importe quel site sur terre est déterminée par l'angle entre le méridien zéro de référence et le méridien passant par ce site en question, avec des valeurs positives pour des emplacements à l'ouest du méridien de Greenwich et des valeurs négatives pour des emplacements à l'est du méridien de Greenwich. Parfois, le suffixe O ou E est utilisé après la valeur de la longitude. Ces définitions sont illustrées par la Fig. 3.4.

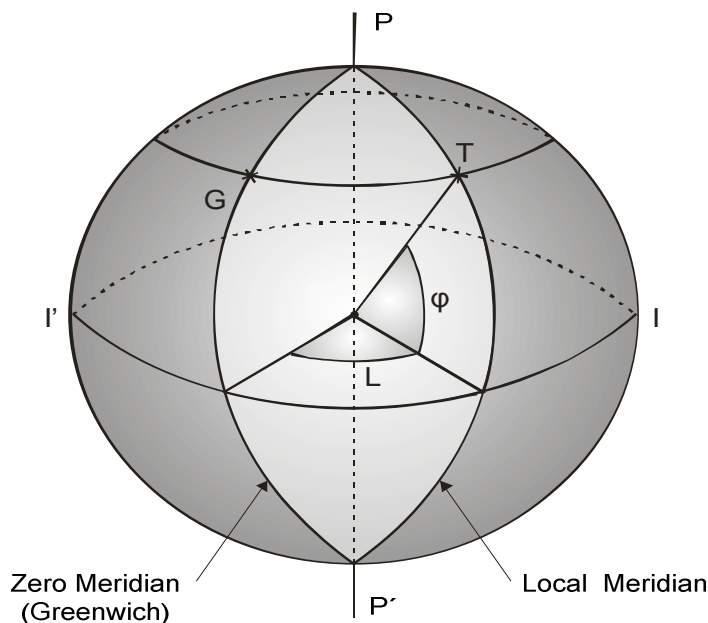


Figure 3.4 : Latitude et longitude L pour un emplacement T.

### 3,3 Bases de géométrie astronomique

Afin de déterminer les bases de géométrie astronomique, un principe de base est que les étoiles, y compris le Soleil, sont fixées sur la surface de la sphère céleste. Cette sphère imaginaire a un rayon arbitraire et son centre dépend des coordonnées du système. Le rayon est à la distance suffisamment grande de la Terre, ainsi l'emplacement du soleil et d'autres étoiles peut être vu en tant que points. Le centre de la sphère coïncide avec la position de l'observateur dans le système horizontal tandis que dans le système équatorial, il coïncide avec le centre de la Terre. Selon le système, la position d'un point passant la surface de la sphère céleste peut être spécifiée si deux angles sont connus. Un modèle simple illustrant les mouvements apparents journaliers et annuels est présenté en Fig. 3.5.

Dans le système horizontal, le plan de référence est l'horizon de l'observateur. Ce plan intercepte la sphère céleste à l'horizon. L'intersection de la normale sur ce plan et la sphère céleste s'appelle *Zénith* ( $z$ ). Dans ce système, la position du soleil dans la sphère céleste est déterminée par deux angles, l'*angle solaire d'altitude* ( $h$ ) et l'*angle solaire d'azimut* ( $\alpha$ ).

L'*angle solaire d'altitude* ( $h$ ) est l'angle formé par la ligne joignant le centre du soleil et l'observateur et par la ligne joignant l'observateur avec la projection du soleil sur l'horizon, s'étendant de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$ . L'altitude solaire est positive quand le Soleil est au-dessus de l'horizon, négative quand le Soleil est au-dessous de l'horizon. La distance au Zénith est le complément de l'angle d'altitude et s'appelle *angle de zénith* ( $\theta_Z$ ), qui est donnée par :

$$\theta_Z = 90^\circ - h \quad (3,1)$$

L'azimut solaire ( $\alpha$ ) est la distance angulaire entre la direction sud et la projection horizontale du soleil sur l'horizon. Un azimut solaire positif indique une position à l'est du sud et un angle négatif d'azimut indique l'ouest du sud (POUR MOI, dans ma convention, C'EST LE CONTRAIRE !!!). Elle est mesurée à partir du sud dans l'Hémisphère Nord et à partir du nord dans l'hémisphère Sud. Des angles solaires d'altitude ( $h$ ) et d'azimut( $\alpha$ ) peuvent être calculés à partir des équations simples de trigonométrie sphérique [1].

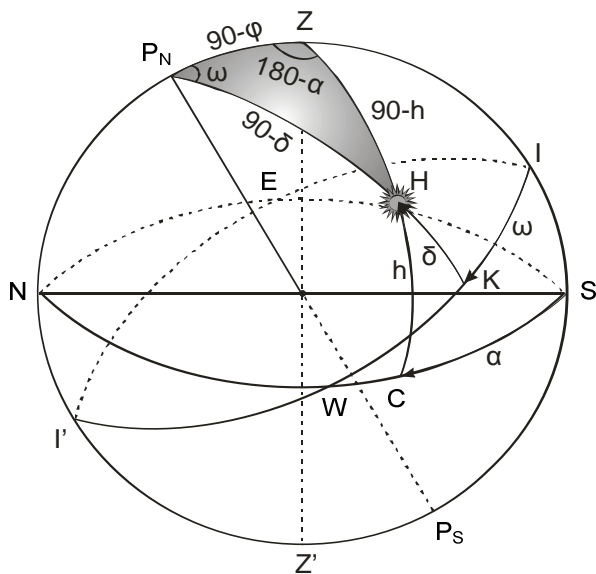


Figure 3.5 La sphère céleste

Dans le système équatorial, le plan de référence est l'équateur. Les deux angles pour la détermination de la position du soleil sur la sphère céleste sont à tout moment l'angle de déclinaison solaire ( $\delta$ ) et l'angle d'heure ( $\omega$ ).

La déclinaison Solaire est l'angle entre les rayons du soleil et le plan de l'équateur de la Terre. Elle varie d'un angle de  $+23,45^\circ$  à  $-23,45^\circ$ .

Cette variation entraîne les saisons, avec leur période inégale de lumière du jour et d'obscurité. La déclinaison solaire atteint sa valeur maximale,  $(+23,45^\circ)$  le 21 juin. Ce jour s'appelle solstice d'été dans l'hémisphère Nord et solstice d'hiver dans l'hémisphère Sud. Pendant le solstice d'été, tous les emplacements au nord de l'équateur ont plus que douze heures de jour, alors que tous les emplacements au sud de l'équateur ont des longueurs de jour de moins de douze heures. La valeur minimum,  $(-23,45^\circ)$  est atteinte le 20 décembre. Ce jour marque le solstice d'hiver dans l'hémisphère Nord et solstice d'été dans l'hémisphère Sud. Pendant le solstice d'hiver, tous les emplacements au nord de l'équateur ont des longueurs de jour de moins de douze heures, alors que tous les emplacements au sud de l'équateur ont plus de douze heures de jour. La déclinaison solaire est nulle à l'équinoxe de printemps (21 mars) et à l'équinoxe d'automne (22 septembre). Pendant ces jours, la durée du jour, indépendamment de la latitude, est exactement de 12 heures.

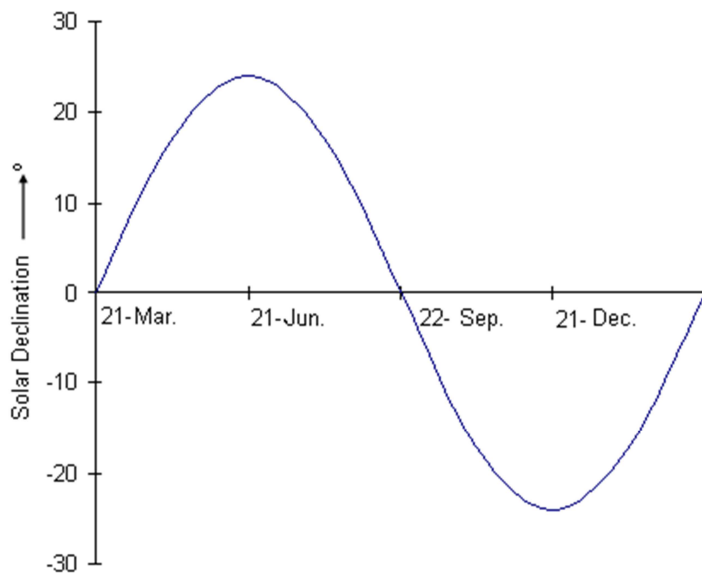


Figure 3.6 : variation de l'angle de déclinaison solaire pendant une année.

On peut estimer que la déclinaison solaire est constante sur une période de une journée (bien qu'elle puisse varier de plus ou moins 0,5 degrés) pendant le jour. Dans la Fig. 3.6 cet angle est affiché en degrés pendant les quatre jours caractéristiques de l'année.

La déclinaison, en degrés, pour n'importe quel jour donné peut être approximativement calculée par l'équation suivante [2] :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 360 \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (\text{Équation 3.2})$$

Où n est le jour de l'année.

La déclinaison solaire dépend du jour de l'année. Cependant, si des valeurs moyennes mensuelles sont exigées, le jour recommandé du mois où la déclinaison est la plus proche de la déclinaison ramenée à une moyenne mensuelle doit être utilisé (Tableau 3.1).

Le tableau 3.1 présente le jour moyen recommandé de chaque mois et le jour correspondant de l'année, avec la valeur moyenne mensuelle.

Mois	Date	Jour de l'année	Déclinaison Solaire
Janv.	17	17	-20,9

Fév.	16	47	-13,0
Mars.	16	75	-2,4
Avr.	15	105	9,4
Mai	15	135	18,8
Juin	11	162	23,1
Juil.	17	198	21,2
Août.	16	228	13,5
Sept.	15	258	2,2
Oct.	15	288	-9,6
Nov.	14	318	-18,9
Déc.	10	344	-23,0

L'angle d'heure Solaire ( $\omega$ ) est la distance angulaire entre la direction du soleil et le méridien local. Pour un observateur sur Terre, le Soleil semble tourner autour de la Terre de  $360^\circ$  en 24 h, ou  $15^\circ$  par heure. L'angle horaire est défini en tant que zéro à midi solaire local. L'angle horaire diminue de  $15^\circ$  pour chaque heure avant midi solaire local et augmente de  $15^\circ$  pour chaque heure après midi solaire. En d'autres termes, l'angle horaire est positif l'après-midi et négatif avant midi. Pour calculer l'angle horaire, il est important d'utiliser le temps solaire (section 3.5).

### Exemple 3.1

À Athènes, Grèce ( $\phi = 37^\circ 58'$ ), quelle est la déclinaison solaire le 15 février ?

#### Solution

le 15 Février,  $n = 46$  et dans l'équation 3.2 :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + 46}{365}\right) = -13.29^\circ$$

### Exemple 3.2

Calculez l'angle d'heure solaire à 9h solaire t et 13 h solaire.

#### Solution

Selon la définition de l'angle d'heure, sa valeur à 9 h solaire sera :

$$\omega = 15 \cdot (9 - 12) = -45^\circ$$

Au temps 13 h solaire nous avons :

$$\omega = 15 \cdot (13 - 12) = 15^\circ$$

### 3.3.1 Détermination des angles solaires

Le triangle sphérique astronomique  $P_N Z H$ , relativement aux coordonnées sur Terre est présenté en ombré en Fig. 3.5, les plans sont étiquetés. La loi des cosinus, pour triangle sphérique donne l'expression suivante pour le cosinus d'angle du zénith.

$$\cos(90 - h) = \cos(90 - \delta) \cos(90 - \phi) + \sin(90 - \delta) \sin(90 - \phi) \cos \omega \quad (3.3)$$



Où encore

$$\sinh = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3.4)$$

Par définition de  $\theta_z$  (équation (3,1)), ce qui précède peut être écrit

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3.5)$$

À midi solaire, dans l'hémisphère nord l'angle d'heure ( $\omega$ ) est égal à zéro et l'équation (3.4) donne

$$\sinh_{\max} = \cos(\phi - \delta) \quad (3.6)$$

Où

$$h_{\max} = 90 - |\phi - \delta| \quad (3.7)$$

Les angles d'heure de lever de soleil et de coucher du soleil ( $\omega_s$ ), pour la surface horizontale, sont donnés en plaçant l'angle solaire d'altitude ( $h$ ) égal à zéro dans l'équation (3.4).

$$\cos \phi \cos \delta \cos \omega_s = -\sin \phi \sin \delta \quad (3.8)$$

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (3.9)$$

En résolvant l'équation (3.9) pour des  $\omega_s$ , si  $-1 \leq -\tan \phi \tan \delta \leq 1$  on obtient

$$\omega_s = \pm \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.10)$$

Un signe positif correspond au coucher du soleil et un signe négatif au lever de soleil.

Dans le cas où  $(-\tan \phi \tan \delta) < -1$  alors que le soleil ne se couche jamais (été Polaire), et quand  $(-\tan \phi \tan \delta) > 1$  alors le soleil ne se lève jamais (hiver Polaire). En outre, dans le cas où  $(-\tan \phi \tan \delta) = \pm 1$  alors le soleil n'est sur l'horizon que durant un instant seulement.

La longueur du jour en heures est indiquée par :

$$Day\ length = \frac{2\omega_s}{15} \quad (3.11)$$

En s'appliquant la règle du sinus au triangle sphérique  $P_N Z H$ , nous avons

$$\frac{\sin(90 - h)}{\sin \omega} = \frac{\sin(90 - \delta)}{\sin(180 - \alpha)} \quad (3.12)$$

où

$$\frac{\cosh}{\sin \omega} = \frac{\cos \delta}{\sin \alpha} \quad (3.13)$$

Où

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh} \quad (3.14)$$

Les azimuts du lever de soleil et du coucher du soleil peuvent être obtenus à partir de l'équation (3,14) en plaçant l'altitude solaire  $h$  à zéro et en substituant les valeurs des  $\omega$ s au  $\omega$ , nous avons :

$$\cos \alpha = -\frac{\sin \delta}{\cos \phi} \quad (3.15)$$

Dans ce cas il y a deux solutions pour le matin et deux pour l'après-midi. Les solutions correctes seront sélectionnées tels que quand la déclinaison est positive, le soleil se lève et se couche au nord de la ligne est-ouest. Quand la déclinaison est nulle, le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest. Et quand la déclinaison est négative, le soleil se lève et se couche au sud de la ligne est-ouest.

Une application des chemins apparents du soleil pour Athènes (Grèce), est donnée graphiquement directement ci-dessous.

La figure 3.7 montre le chemin du soleil apparent à travers le ciel pour Athènes (Grèce) et l'emplacement relatif du lever de soleil et du coucher du soleil, pour le solstice d'hiver (Fig. 3.7a), pour les équinoxes (Fig. 3.7b), et pour le solstice d'été (3.7c). L'angle solaire d'altitude ( $h$ ) à midi solaire est indiqué dans chaque figure. Il convient de noter que, le lever du soleil est exactement dans la direction de l'est, le coucher du soleil est exactement à l'ouest et que la longueur de jour est égale à la longueur de nuit. Entre les équinoxes de printemps et d'automne durant l'été, le soleil se lève au nord de la ligne est-ouest, la longueur du jour est plus longue et à midi solaire, lors du solstice d'été, l'altitude solaire ( $h$ ) atteint sa valeur maximale (Figure.3.7c). Entre l'équinoxe d'automne et de printemps, le soleil se lève et se couche au sud de la ligne est-ouest, la longueur du jour est plus courte et à midi solaire, lors du solstice d'hiver, l'altitude solaire atteint sa valeur minimum de l'année (Figure.3.7a).

Pour la représentation graphique du mouvement apparent du soleil sur voute céleste, pour chaque jour de l'année, et pour un emplacement donné, un logiciel peut être utilisé [3].

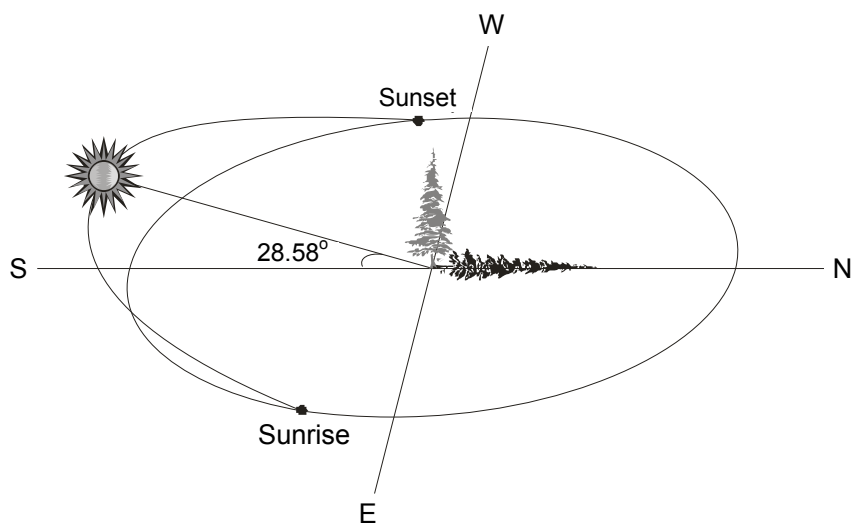


Figure3.7a : le chemin apparent du soleil a pour le solstice d'hiver (Athènes Grèce)

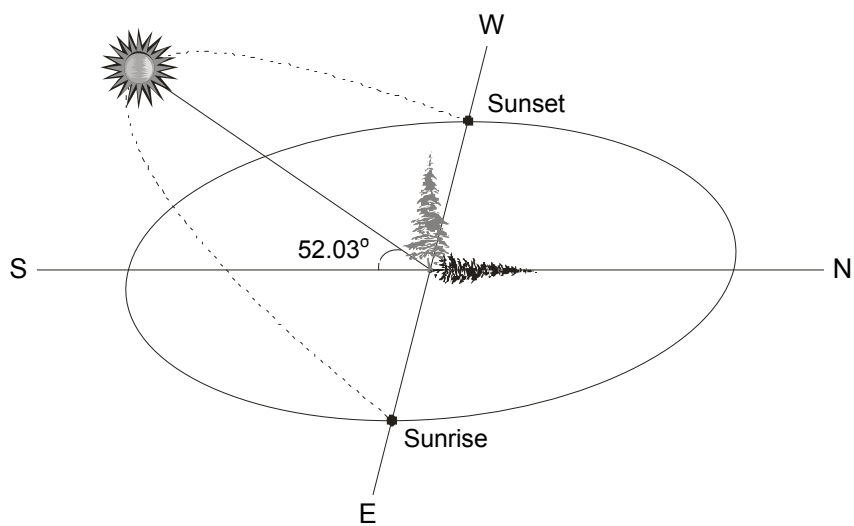


Figure 3.7b : le chemin apparent du soleil pendant des équinoxes (Athènes Grèce)

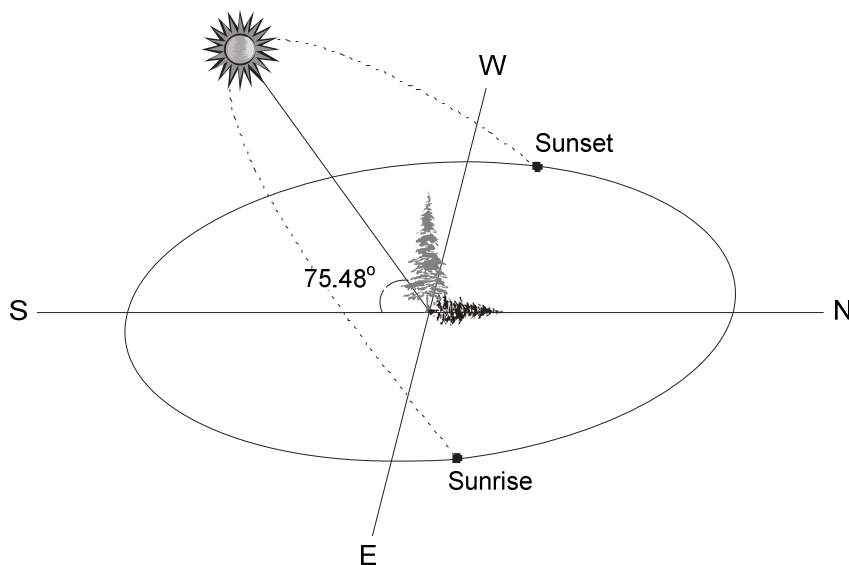


Figure 3.7c : le chemin apparent du soleil pour le solstice d'été (Athènes, Grèce)

**Exemple 3,3**

Calculez l'angle solaire d'azimut à Athènes, Grèce ( $\phi = 37^{\circ}58'$ ), le 25 février à 14 h solaire.

**Solution**

Le 25 Février,  $n = 56$  et de l'équation 3.2 :

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + 56}{365} \right) = -9.78^{\circ}$$

Le d'angle d'heure  $\omega$  est :

$$\omega = 15 \cdot (14 - 12) = 30^{\circ}$$

Dans l'équation 3.4 l'angle solaire d'altitude (h) est :

$$\sin h = \sin(-9.78) \sin 37.97 + \cos(-9.78) \cos 37.97 \cos 30 = 0.57$$

Mis en forme : Barré

Mis en forme : Surlignage

Mis en forme : Surlignage

ou  $h = 34,63^\circ$

L'angle solaire d'azimut peut être calculé avec l'équation 3.14 :

$$\sin a = \frac{\cos(-9.78) \sin 30}{\cos 34.63} = 0.60$$

Où  $\alpha = 36,79^\circ$

#### Exemple 3.4

Calculez l'angle de zénith du soleil à Athènes, Grèce ( $\phi = 37^\circ 58'$ ) à midi solaire le 20 juillet.

#### Solution

le 20 Juillet,  $n = 201$  et de l'équation 3,2 :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + 201}{365}\right) = 20.64^\circ$$

À Midi solaire, l'angle solaire d'altitude est donné par l'équation 3.7 :

$$h_{\max} = 90 - (37.97 - 20.64) = 72.67^\circ$$

Ainsi l'angle de zénith du soleil à midi solaire est donné par l'équation 3.1 :

$$\vartheta_Z = 90 - 72.67 = 17,33^\circ$$

### 3.4 Angle d'Incidence Solaire

L'angle d'incidence solaire est très utile, car il permet un calcul relativement simple de la valeur du rayonnement sur une surface. Les relations angulaires entre l'incident direct du rayonnement solaire sur un plan, telle qu'une surface de mur ou une surface vitrée, orientée arbitrairement relativement à la surface terrestre peuvent être décrites en termes de plusieurs angles. Ces angles sont illustrés sur la figure 3,8. L'orientation et l'inclinaison de la surface sont déterminées avec deux angles respectivement : l'angle extérieur d'azimut ( $\gamma$ ) et la pente ( $\beta$ ).

L'angle extérieur d'azimut est l'angle entre le sud et la projection de la normale de surface dans le plan horizontal. Cet angle est pris positif si la normale est à l'ouest du sud et négatif si à l'est du sud.

La Pente est l'angle à laquelle la surface est inclinée par rapport à l'horizontal et est pris positif pour des surfaces orientées sud.

En outre, la position du soleil relativement à la surface peut être exprimée utilisant l'angle d'incident solaire ( $\theta$ ).

L'angle d'incident Solaire est l'angle entre la normal à la surface du plan et les rayons du soleil.

Les relations entre les angles définies précédentes peuvent être calculées à partir des équations simples de trigonométrie sphérique, s'appliquant la règle des cosinus

au triangle sphérique HKC. L'angle d'incidence entre le faisceau du rayonnement et la normale à une surface peut être lié par une équation générale utilisant la pente de la surface, de l'angle solaire de zénith, de l'angle solaire d'azimut et de l'angle extérieure d'azimut. Sur la figure 3,8, le KO est la normale sur la surface horizontale, CO est la normale sur la surface inclinée et OZ est la projection horizontale de la normale sur la surface inclinée. En appliquant la règle des cosinus au triangle sphérique HKC, nous avons :

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\alpha - \gamma) \quad (3.16)$$

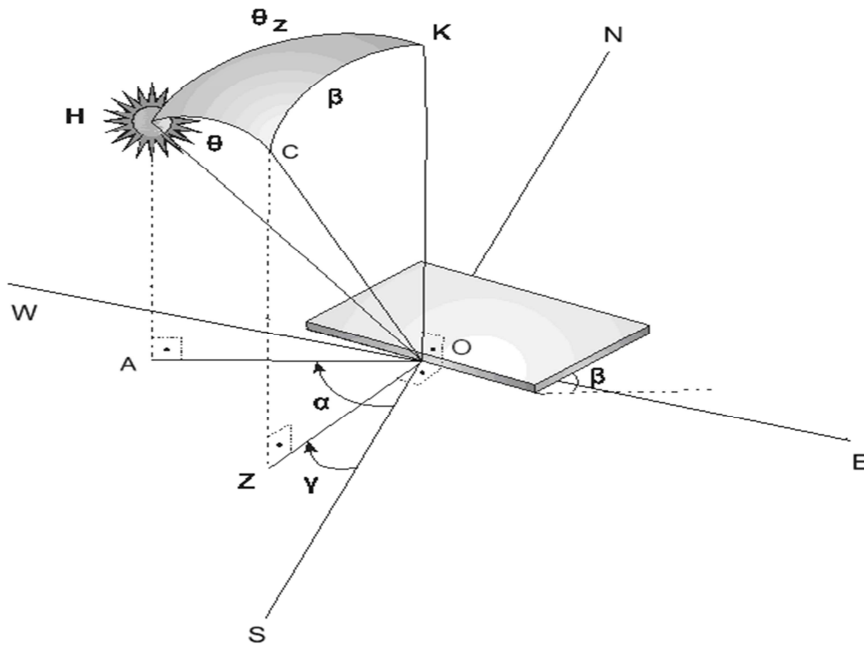


Figure 3.8 : Angle entre direction du soleil et la normal à une surface inclinée

Dans le cas d'une surface inclinée, l'angle d'heure  $\omega_{st}$  du lever de soleil ou du coucher du soleil, peut être inférieur à la valeur donnée par l'équation (3.10), si l'angle d'incidence correspondant est plus grand que  $90^\circ$ . Pour une telle situation le d'angle d'heure  $\omega_{st}$  peut être trouvé en modifiant l'équation (3.16), prenant en considération les équations (3.5) et (3.14).

Par conséquent, l'angle d'incidence en termes d'angle de latitude, de pente, de déclinaison et d'heure est donné par :

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \\ &+ \cos \delta \cos \omega (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.17)$$

Si la surface fait face à l'équateur ( $\gamma = 0$ ), l'équation (3,17) donne :

$$\cos \theta = \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta) + \cos \delta \cos \omega (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta) \quad (3.18)$$

Code de champ modifié

ou

$$\cos \theta = \sin(\phi - \beta) \sin \delta + \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega \quad (3.19)$$

Code de champ modifié

En comparant l'équation ci-dessus (3.19) à l'angle solaire zénithale de l'équation (3.5), il en résulte que un plan orienté vers le sud a une latitude effective de  $(\phi - \beta)$ . Finalement, l'angle horaire solaire de lever et de coucher du soleil pour une surface inclinée est obtenue en mettant  $\theta = 90^\circ$  dans l'équation (3.19) et en résolvant pour  $\omega$

$$\omega_{sr} = \pm \arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \quad (3.20)$$

Code de champ modifié

Cependant, puisque le  $\omega_{st}$  ne peut pas avoir des valeurs plus grandes que celle de  $\omega_s$ , l'équation complète pour le  $\omega_{st}$  est donnée par :

$$\omega_{st}' = \min\{\omega_s, \arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta)\} \quad (3.21)$$

Code de champ modifié

Les angles de lever de soleil ( $\omega'_{sr}$ ) et de coucher du soleil ( $\omega'_{ss}$ ) pour une surface inclinée qui ne fait pas face au sud, ne seront pas symétriques autour de midi solaire et peuvent être obtenues à partir de l'équation 3.17 en plaçant l'angle d'incidence  $\theta = 90^\circ$ . Cette solution donne deux valeurs pour  $\omega$  selon l'orientation extérieure [4].

Pour  $\gamma < 0$

$$\omega'_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{a \cdot b - \sqrt{(a^2 - b^2 + 1)}}{a^2 + 1} \right] \right\} \quad (3.22)$$

Code de champ modifié

$$\omega'_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{a \cdot b + \sqrt{(a^2 - b^2 + 1)}}{a^2 + 1} \right] \right\} \quad (3.23)$$

Code de champ modifié

Pour  $\gamma > 0$

$$\omega'_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{a \cdot b + \sqrt{(a^2 - b^2 + 1)}}{a^2 + 1} \right] \right\}$$

(3.24)

Code de champ modifié

$$\omega'_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{a \cdot b - \sqrt{(a^2 - b^2 + 1)}}{a^2 + 1} \right] \right\}$$

(3.25)

Code de champ modifié

là où :

$$a = \frac{\cos \phi}{\sin \gamma \tan \beta} + \frac{\sin \phi}{\tan \gamma}$$

(3.26)

Code de champ modifié

$$b = \tan \delta \left( \frac{\cos \phi}{\tan \gamma} - \frac{\sin \phi}{\sin \gamma \tan \beta} \right)$$

(3.27)

Code de champ modifié

Le « min » dans les équations 3.22 et 3.25 signifie le plus petit des deux éléments entre parenthèses.

En Outre, pour les équations ci-dessus, on suppose que l'angle extérieur de l'azimut de la surface est mesuré à partir du sud, négatif vers l'est et positif vers l'ouest.

Tous Les angles définis précédemment sont utiles dans les calculs de rayonnement solaire. L'angle d'incidence du rayonnement solaire direct détermine l'intensité de la composante solaire directe frappant la surface et la possibilité de la surface de refléter, transmettre, ou absorber le rayonnement solaire. La connaissance de cette composante est nécessaire pour déterminer tout le rayonnement solaire sur les surfaces inclinées.

### Exemple 3.5

Calculez l'angle d'incidence du rayonnement solaire pour un capteur solaire plan, orienté à  $14^\circ$  vers l'ouest et incliné à  $40^\circ$  à Athènes en Grèce ( $\phi = 37^\circ 58'$ ) le 20 mai au temps solaire de 13,00 h.

### Solution

Le 20 mai,  $n = 140$  et de l'équation 3.2 :



$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+140}{365}\right) = 19.93^\circ$$

L'angle d'heure  $\omega$  est :

$$\omega = 15 \cdot (13-12) = 15^\circ$$

De l'équation 3.17 nous avons:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin 19.93(\sin 37.97 \cos 40 - \cos 37.97 \sin 40 \cos 14) \\ &+ \cos 19.93 \cos 15(\cos 37.97 \cos 40 + \sin 37.97 \sin 40 \cos 14) \\ &+ \cos 19.93 \sin 40 \sin 14 \sin 15 = 0.943 \end{aligned}$$

Par conséquent, l'angle d'incidence pour le capteur solaire est  $\theta = 19,42^\circ$

### Exemple 3.6

Un capteur solaire plan est situé à Athènes, en Grèce ( $\phi = 37^\circ 58'$ ) avec une pente de  $45^\circ$  vers le sud. Calculez la période solaire du coucher du soleil pour ce collecteur le 14 septembre.

Mis en forme : Police : Non Gras,  
Couleur de police : Automatique

#### Solution

le 14 Septembre,  $n = 257$  et de l'équation 3,2 :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+257}{365}\right) = 2.62^\circ$$

De l'équation 3.10, nous avons:

$$\omega_s = \arccos(-\tan 37.97 \tan 2.62) = 92.05^\circ$$

et de l'équation 3.21 :

$$\arccos(-\tan(37.97 - 45) \tan 2.62) = 89.68^\circ$$

Selon l'équation 3,21 l'angle solaire de coucher du soleil sur le collecteur est la plus petite des deux valeurs calculées. Par conséquent, l'angle solaire de coucher du soleil sur le collecteur est  $89,68^\circ$  et l'heure solaire pour le coucher du soleil est à 17 heures 98.

### Exemple 3.7

Un capteur solaire plan est situé à Athènes - en Grèce ( $\phi = 37^\circ 58'$ ) avec une pente de  $60^\circ$  et orienté  $20^\circ$  vers l'est. Calculez la longueur de jour que reçoit ce collecteur le 14 octobre.

#### Solution

le 14 Octobre,  $n = 287$  et de l'équation 3.2 :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+287}{365}\right) = -9.23^\circ$$

Puisque le collecteur ne fait pas face au sud, des équations 3.26 et 3.27 nous avons :

$$a = \frac{\cos 37.97}{\sin(-20) \tan 60} + \frac{\sin 37.97}{\tan(-20)} = -3.02$$

Code de champ modifié

$$b = \tan(-9.23) \cdot \left( \frac{\cos 37.97}{\tan(-20)} - \frac{\sin 37.97}{\sin(-20) \tan 60} \right) = 0.18$$

Code de champ modifié

En utilisant l'équation 3.10, nous avons :

$$\omega_s = \pm \arccos(-\tan 37.97 \tan -9.23) = 82.71^\circ$$

Puisque  $\gamma < 0$ , les angles solaire d'heure pour le lever de soleil ( $\omega'_{sr}$ ) et le coucher du soleil ( $\omega'_{ss}$ ) pour le collecteur sont donnés par les équations 3,22 et 3,23 respectivement.

Code de champ modifié

Code de champ modifié

$$\omega'_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{-3.02 \cdot 0.18 - \sqrt{(3.02^2 - 0.18^2 + 1)}}{3.02^2 + 1} \right] \right\} = -\min \{82.71^\circ, 111.56^\circ\}$$

$$\omega'_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{-3.02 \cdot 0.18 + \sqrt{(3.02^2 - 0.18^2 + 1)}}{3.02^2 + 1} \right] \right\} = \min \{82.71^\circ, 74.92^\circ\}$$

Ainsi, les angles solaires d'heure pour le lever de soleil et le coucher du soleil sur le collecteur incliné sont  $-82,71^\circ$  et  $74,92^\circ$  respectivement. En conclusion, la longueur de jour pour le collecteur est de 10,51 heures, alors que pour la surface horizontale, elle est de 11,03 heures.

### 3.5 Temps Solaire

Le temps solaire ne coïncide pas avec le temps local donné par l'horloge pour deux raisons. Le premier est la variation de la vitesse de déplacement orbitale de la Terre dans le plan de l'écliptique. Cette correction appelée l'équation du temps (ET), et peut être déterminée approximativement à partir de la figure 3.9 ou peut être exprimée [5] sous la forme d'équation comme suit :

$$ET = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (3.28)$$

avec

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

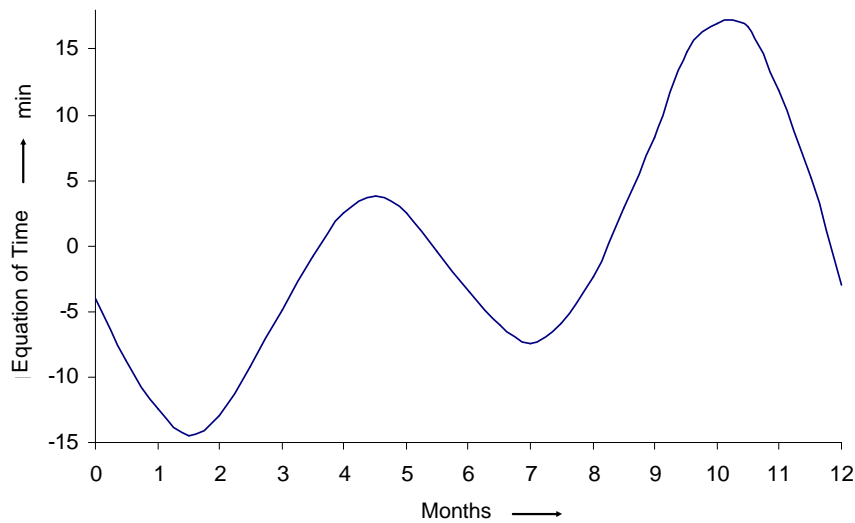


Figure 3.9 L'équation du temps (ET) en fonction de l'époque de l'année

La deuxième raison est la différence entre la longitude du site locale ( $L_{loc}$ ) et la longitude du méridien de référence ( $L_{st}$ ). Cette correction a une importance de 4 minutes pour chaque différence de 1 degré dans la longitude. Dans beaucoup de pays, des horloges sont avancées pendant une heure au delà de l'heure d'hiver en été, une telle heure s'appelle décalage de l'heure d'été (C). Ainsi, le temps solaire peut être écrit comme :

$$\text{Temps Solaire} = \text{Heure D'hiver} + ET \pm 4 (L_{st} - L_{loc}) + C \quad (3,29)$$

$L_{st}$  est la longitude du méridien standard de référence,  $L_{loc}$  est la longitude de l'emplacement et ET est l'équation du temps [6]. Un fuseau horaire de l'heure locale est une région de la terre qui a adopté la même heure d'hiver. Des zones d'heure d'hiver peuvent être définies en subdivisant géométriquement la surface de la Terre en 24 zones, encadrée par des méridiens chaque  $15^\circ$  de la longitude dans la largeur. Par exemple, le méridien standard pour l'Italie est  $15^\circ$  et pour la Grèce  $30^\circ$ . La correction de temps de l' heures d'été est égale à zéro l'hiver, sinon en été, C est égal au nombre d'heures que le moment est avancé pour le temps heures d'été, habituellement 1 heure.

Notez que tous les termes dans l'équation ci-dessus doivent être convertis en minutes. Le signe positif dans le troisième terme de cette équation est pour des emplacements à l'ouest de Greenwich tandis que le signe négatif est pour des emplacements à l'est de Greenwich.

### Exemple 3.8

Calculez

a) l'heure locale du coucher du soleil à Athènes en Grèce ( $\phi = 37^\circ 58'$ ,  $L = 23^\circ 43'$ ) le 19 avril si  $C = 0$   
 et b) la longueur du jour pour ce jour du 19 avril.

**Solution**

le 19 Avril,  $n = 109$  et de l'équation 3,2 :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + 109}{365}\right) = 10.9^\circ$$

Les angles d'heure de lever de soleil et de coucher du soleil ( $\omega_s$ ), sont données par l'équation 3.10 :

$$\omega_s = \arccos(-\tan 37.97 \tan 10.9) = 98.64^\circ = 6.58 h$$

Par conséquent, le coucher du soleil a lieu à 6 h 58, temps solaire.

De l'équation 3.28 la correction de temps le 19 avril est de 0,765 minutes. Par conséquent, en réarrangeant l'équation 3.29 nous avons :

$$\text{Heure d'hiver Locale} = 394,8 - 0,765 + 4 (30 - 23,72) \text{ de} = 419,2 \text{ min} \approx 7,0 \text{ h}$$

Par conséquent, le coucher du soleil a lieu à l'heure d'hiver locale de 19 heures 00.

b) De l'équation 3.11 la longueur de jour est :

$$Day \ length = \frac{2 \cdot 98.64}{15} = 13.15 \text{ h}$$

Code de champ modifié

## References:

- [1] Braun J. E. and J. C. Mitchell. 1983. "Solar geometry for fixed and tracking surfaces" Solar Energy, 31, 439-444.
- [2] Cooper, P.I. 1969. "The absorption of radiation in solar stills" Solar Energy, 12, 333- 346.
- [3] Axaopoulos P. and G. Pitsilis. 2007. "Energy software programs for educational use" Renewable Energy 32, 1045 - 1058.
- [4] Klein S.A. 1977. "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces" Solar Energy 19, 325-329.
- [5] Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 2006. "Solar Engineering of thermal Processes" John Wiley & Sons, Inc.
- [6] ASHRAE. 1989. Handbook of Fundamentals. Atlanta GA. ASHRAE.

## Lectures additionnelles:

- Achard, P. and R. Gicquel. 1986. "European Passive Solar Handbook". CEC DG XII.
- Bernard, R., G. Menguy, M. Schwartz. 1980. Le Rayonnement solaire. Conversion thermique et applications. 2e edition, Technique & Documentation Lavoisier.
- Coulson K. L. 1975. "Solar and Terrestrial Radiation". Academic Press, New York.
- Iqbal, M. 1983. "An introduction to Solar Radiation". Academic Press, Toronto.
- Sfeir A. A. and G. Guarracino. 1981. "Ingenierie des systemes solaires" Technique & Documentation.
- Astronomical data from the U.S. Naval observatory at <http://aa.usno.navy.mil/AA/> NASA's Space Science Data System at <http://ssds.nasa.gov/>  
<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/ask/askmag.html#list>