

Cours gisement solaire 3eme année Energétique
Univ M'sila
Partie III

Mesure sur une surface d'inclinaison quelconque

L'inclinaison i est l'angle du plan de l'objet étudié par rapport à l'horizontale. L'orientation γ est l'angle entre la normale au plan de l'objet étudié et le plan méridien du lieu (elle est comptée positivement vers l'Ouest par rapport au Sud dans l'hémisphère Nord).

Mesure par ciel clair sur une surface horizontale

Le rayonnement global G reçu par une surface horizontale se décompose en deux termes:

- le rayonnement direct I (éclairage corrigé des phénomènes atmosphériques)
- le rayonnement diffus D en provenance de toute la voûte céleste.

On aura donc sur un plan horizontal :

$$G_h = I \sin h + D_h = I_h + D_h$$

Pour connaître D_h , on fait appel à la fraction d'insolation σ qui représente le nombre d'heures de soleil mesurées par l'héliographe divisé par la durée théorique du jour.

Par ciel clair, on peut en première approximation, utiliser la formule empirique:

$$D_h = G_h \cdot (0.9 - 0.8\sigma) \text{ valable pour } 0.15 < \sigma < 0.70$$

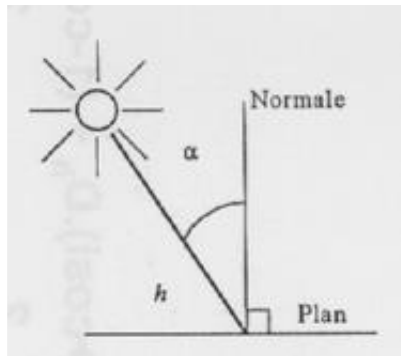
Expression du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque

Si i est l'angle d'inclinaison de la normale du plan de mesure avec la verticale du lieu, h la hauteur du soleil, a l'azimut et α l'angle d'incidence du rayon direct avec la normale au plan de mesure, on aura pour la composante directe I_i du rayonnement frappant le capteur:

- Soleil à midi (azimut nul): $a = 0$

pour un plan horizontal :

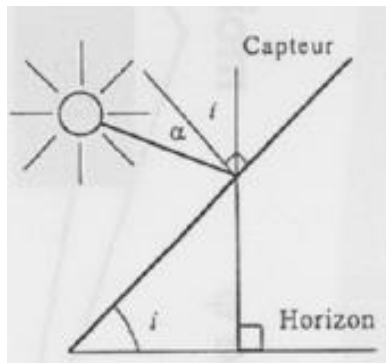
$$i = 0 \quad \text{et} \quad \mathbf{I}_i = \mathbf{I} \cdot \sin h$$



pour un plan incliné sur l'horizontale

et orienté Sud : $\alpha = 90^\circ - (h+i)$

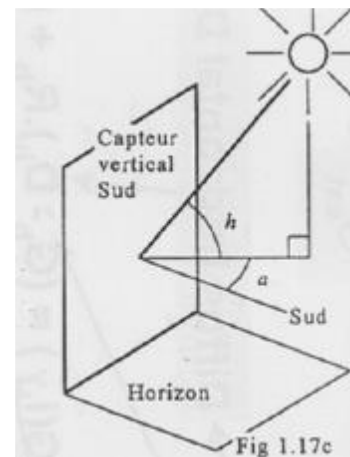
$$\text{et } \mathbf{I}_i = \mathbf{I} \cdot \cos \alpha = \mathbf{I} \cdot \sin (h+i)$$



- Azimut quelconque:

pour un plan vertical orienté Sud

$$i=90^\circ \text{ et } \mathbf{I}_i = \mathbf{I} \cdot \cos h \cdot \cos a$$



pour un plan incliné sur l'horizontale

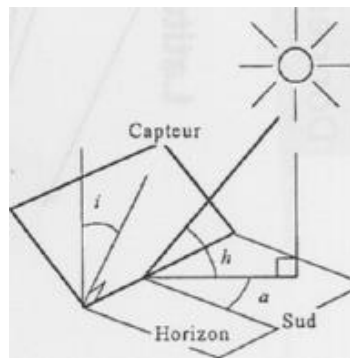
et orienté Sud

\mathbf{I}_i est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur:

- l'une perpendiculaire à l'horizon: $\mathbf{I} \cdot \sin h$,
- l'autre dans le plan de l'horizon,
- pointant vers le sud: $\mathbf{I} \cdot \cos h \cdot \cos a$

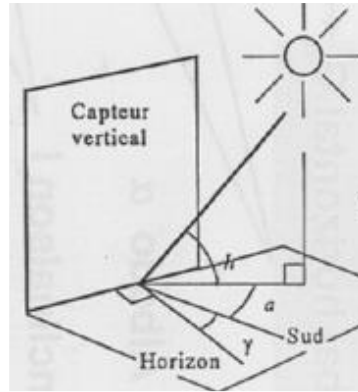
la somme des projections donne:

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{I} (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos a \cdot \sin i)$$



pour un plan vertical d'orientation quelconque
 dont la normale fait un angle γ
 avec le plan méridien :

$$i=90^\circ \quad \text{et} \quad I_i = I \cdot \cos h \cdot \cos (\gamma - a)$$



pour un plan d'inclinaison quelconque i
 et d'orientation quelconque γ :

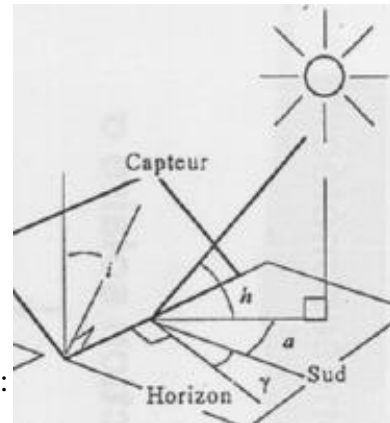
$$I_i = I \cos \beta = I (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (\gamma - a) \cdot \sin i)$$

Ainsi, la formule la plus générale donnant

l'angle d'incidence β du rayonnement solaire direct

tombant sur un vitrage d'inclinaison i et d'orientation γ est :

$$\beta = \text{Arc cos} (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (\gamma - a) \cdot \sin i)$$



Composante diffuse pour une surface d'orientation quelconque

Pour estimer l'apport solaire sur une surface d'orientation quelconque, il faut clairement séparer le calcul de la part du rayonnement diffus puisque seule intervient pour ce dernier l'inclinaison i de la surface qui permet de voir plus ou moins d'espace et plus ou moins d'albédo en provenance du sol. Par exemple une surface verticale ne voit que la moitié de l'espace, mais l'albédo du sol peut devenir prépondérant.

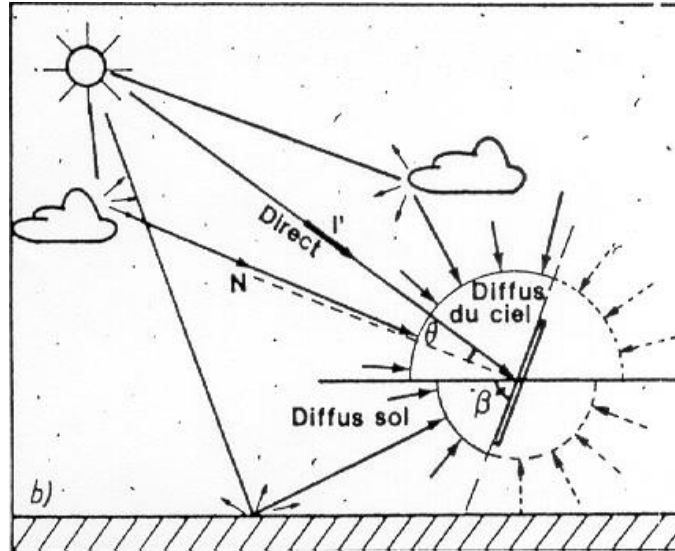
$$D = \frac{1 + \cos i}{2} \cdot D_h + \frac{1 - \cos i}{2} \cdot \alpha \cdot G_h$$

α est le coefficient d'albédo de sol.

Pour un plan vertical, en prenant $\alpha = 0.2$, on aura : $D_v = 0.5 (D_h + 0.2G_h)$

Dans des conditions moyennes de nébulosité, pour connaître D_h , on fait appel à la fraction d'insolation σ et en première approximation, la composante diffuse est donnée par la relation empirique:

$$D_h = G_h (1 - 0.25\sigma - 0.6\sqrt{\sigma})$$



La fraction d'insolation σ .

C'est le paramètre représentatif des conditions de nébulosité du ciel. La nébulosité est le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale du ciel au-dessus du territoire correspondant.

Cette notion n'étant que descriptive, on la relie à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe et qui s'en déduit par le rapport : $\sigma = S / S_0$ avec S = durée d'insolation mesurée et S_0 durée maximale d'insolation.

Il est possible de relier le rayonnement global G sur une surface à la fraction d'insolation et au rayonnement diffus D . Connaissant G , on peut donc calculer le rayonnement diffus D .

Valeurs typiques de l'albédo: $\alpha = 0.2$: prés, pelouses, 0.5 : ciment-béton, 0.9 : neige fraîche

Rayonnement direct

Irradiance directe ciel clair (sans nuages)

- L'irradiance (éclairage) directe dans un plan perpendiculaire au soleil est donnée en W/m^2 par la formule de **Kasten**:

$$I_1 = (I_0 - 31 T_L) \exp(-m T_L / (0.9 m + 9.4))$$

où I_0 est la constante solaire hors atmosphère

$$m = \frac{P_m}{1013} \frac{0.88^z}{\sinh}$$

$$T_L = 1.6 + \beta_a + 0.5 \ln t$$

Par l'épaisseur d'atmosphère traversée m , la formule tient compte de la pression atmosphérique en mbar et de l'altitude z en km. Quant au trouble de Link, il dépend du coefficient de diffusion d'Angström et de la hauteur d'eau condensable.

- La composante du rayonnement direct sur une surface horizontale est alors, dans tous les cas :

$$I_{1h} = I_1 \cdot \sin h$$

- Et la composante directe dans un plan d'inclinaison quelconque i et d'orientation quelconque γ le soleil à une hauteur h et un azimut a :

$$I_{1i} = I_1 (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (\gamma - a) \cdot \sin i)$$

Irradiation directe ciel quelconque

La dispersion des éclairagements et les écarts entre valeurs mesurées et calculées sont très sensiblement réduits si l'on procède à une intégration sur des intervalles de temps de l'ordre de l'heure: on obtient alors des valeurs moyennes qui correspondent, avec une bonne précision, à celles déduites de relevés portant sur plusieurs journées identiques. **On prend alors, pour le calcul de la hauteur du Soleil, l'heure correspondant au milieu de l'intervalle de temps considéré, et on suppose que les éclairagements calculés restent inchangés durant tout cet intervalle, ce qui fait que l'rradiation est égale à l'irradiance multipliée par une heure.**

$$I_h = K \cdot I_{1h}$$

$$K = \sigma / (1 + c (1 - \sigma))$$

Le rapport K est donc une fonction de la fraction solaire σ et d'un paramètre de nuage c compris entre 0 et 2, à déterminer expérimentalement, en fonction du type de nuages et du régime des passages nuageux. L'étude statistique des variations de K en fonction de σ pour les intervalles horaires de chaque journée, montre que, en France Nord, c varie de 0,3 en hiver à 1 en été, et dans le Sud de 0,5 l'hiver à 1,2 l'été ; en l'absence de connaissance du climat du site, on prendra $c = 1$ en toutes saisons.

Rayonnement diffus

Ciel clair (sans nuages)

Pour calculer l'irradiance diffuse dans un plan horizontal, nous avons concocté la formule suivante :

$$D_{1h} = 380 \exp(-4/T_L) \cdot \exp(-z/7,8) \cdot (\sin h)^{(T_L + 6) / 30}$$

Ciel quelconque

Pour calculer l'irradiation diffuse horizontale par ciel quelconque dans un plan horizontal, la formule suivante a été proposée par **Bedel** :

$$D_h = I_h \cdot f(\sigma) / (1 - f(\sigma)) \text{ avec } f(\sigma) = 0,9 - \sigma (0,9 - (D_{1h} / G_{1h}))$$

où σ représentant la fraction d'ensoleillement pour l'intervalle de temps horaire considéré.

Rayonnement global

Ciel clair (sans nuages)

Pour calculer l'irradiance globale dans un plan horizontal, nous avons concocté la formule suivante qui tient compte de l'altitude z (km), à partir de la formule proposée par une commission de **l'Organisation Météorologique Mondiale** :

$$G_{1h} = (1\ 300 - 57 \cdot T_L) \exp(0,22z/7,8) \cdot (\sin h)^{(T_L + 36) / 33}$$

Cette relation doit bien sûr vérifier à toute heure la condition : $G_{1h} = I_{1h} + D_{1h}$

Ciel quelconque

La formule générale dûe à **Schuepp** donne pour l'irradiation globale horizontale pour un ciel quelconque :

$$G_h = G_{1h} \cdot (a + (1 - a) \cdot (0,5 \cdot \sigma (\sigma + 1))^{0,5})$$

Où σ est la fraction solaire et a est un coefficient climatique compris entre 0 et 1, déduit des mesures :

- en régions septentrionales, on prendra $a = 0$,
- en régions tempérées, $a = 0,10$,
- en régions intertropicales, $a = 0.33$,
- et en régions équatoriales, $a = 0,5$.

Cette relation doit bien sûr vérifier à toute heure la condition : $G_h = I_h + D_h$

Intégration journalière

L'intensité maximale du rayonnement reçu a lieu à midi vrai. Si l'on veut intégrer l'énergie reçue pendant la journée, en faisant l'hypothèse de conditions météo stationnaires, en première approximation, la courbe peut être assimilée à une arche de sinussoïde dont l'aire représente l'énergie cumulée:

$$Q = \frac{2}{\pi} G_{\max} \cdot \Delta t$$

Références bibliographiques :

1. Alain Ricaud, Le gisement solaire et transferts énergétiques, Cours d'un Master Energies Renouvelables de l'Université de CERGY-PONTOISE (Janvier 2011)