

CHAPITRE III :
Calcul du
rayonnement solaire
au sol

III.1 Mesure le rayonnement global 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 9:

$$G_h = I \sin h + D_h = I_h + D_h \dots \dots \dots (III.1)$$

Pour connaître D_h , on fait appel à la fraction d'insolation s 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:

$$D_h = G_h \cdot (0.9 - 0.8s) \text{ valable pour } 0.15 < s < 0.70 \dots \dots \dots (III.2)$$

III.2 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 (Fig 17-a): $i = 0$ et $I_i = I \cdot \sin h$
- pour un plan incliné sur l'horizontale, et orienté Sud (Figure 17-b):
 $a = 90^\circ - (h+i)$ et $I_i = I \cdot \cos a = I \cdot \sin (h+i)$
- Azimut quelconque:
- pour un plan vertical orienté Sud (Fig 17-c): $i=90^\circ$ et $I_i = I \cdot \cos h \cdot \cos a$
- pour un plan incliné sur l'horizontale et orienté Sud (Figure 13-d):

I_i est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur:

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

la somme des projections donne:

$$I_i = I (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos a \cdot \sin i) \dots\dots\dots(III.2)$$

- pour un plan vertical d'orientation quelconque dont la normale fait un angle g avec le plan méridien (Fig 17-e):

$i=90^\circ$ et $I_i = I \cdot \cos h \cdot \cos (g-a)$

- pour un plan d'inclinaison quelconque i et d'orientation quelconque g (Fig 17-f):

$$I_i = I \cos _ = I (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (g - a) \cdot \sin i) \dots\dots\dots(III.3)$$

Ainsi, la formule la plus générale donnant l'angle d'incidence i du rayonnement solaire direct tombant sur un vitrage d'inclinaison i et d'orientation g est :

$$\beta = \text{Arc cos} (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (g - a) \cdot \sin i) \dots\dots\dots(III.4)$$

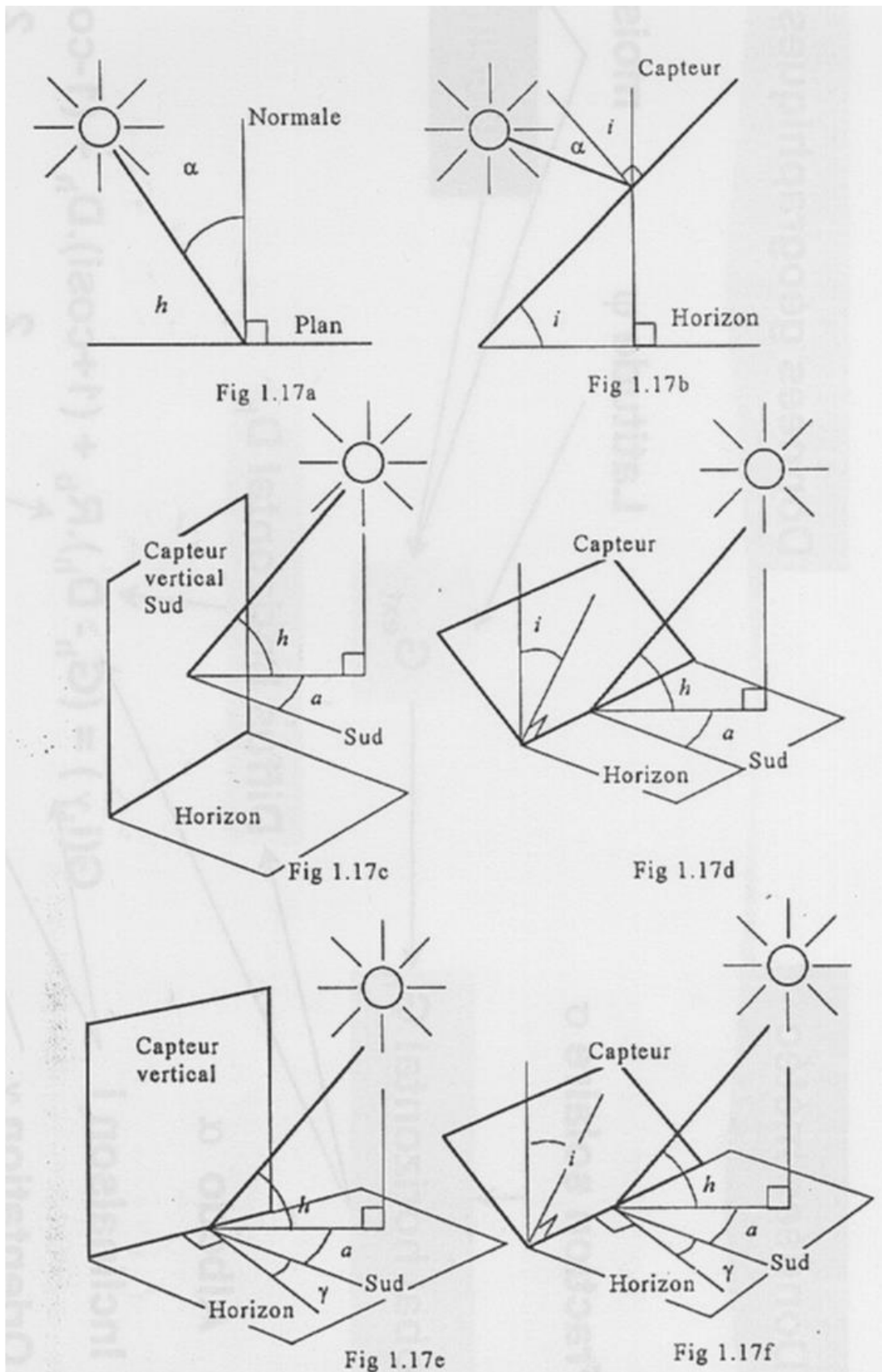


Fig III.1 Plan d'inclinaison quelconque i et d'orientation quelconque

III.3 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 (voir définition p.25).

$$D = \frac{1+\cos i}{2} D_h + \frac{1-\cos i}{2} \rho \cdot G_h \dots \dots \dots (III.5)$$

où ρ est le coefficient d'albédo du sol.

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

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

$$D_h = G_h (1 - 0.25s - 0.6 \sqrt{s}) \dots \dots \dots (III.6)$$

La fraction d'insolation s .

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 : $s = S / S_0$ 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 .

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:

$$I_1 = (I_0 - 31 TL) \exp(-m TL / (0.9 m + 9.4)) \dots\dots\dots(III.7)$$

où I_0 est la constante solaire hors atmosphère, .

$$TL = 1,6 + 16 ba + 0,5 \ln t \dots\dots\dots(III.8)$$

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 :

$$I_{1h} = I_1 \cdot \sin h \dots\dots\dots(III.9)$$

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

$$I_{1i} = I_1 (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (g - a) \cdot \sin i) \dots\dots\dots(III.10)$$

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'irradiation est égale à l'irradiance multipliée par une heure.

$$I_h = K.I_1h \dots \dots \dots (III.11)$$

$$K = s / (1+c (1- s)) \dots \dots \dots (III.12)$$

Le rapport K est donc une fonction de la fraction solaire s 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 s 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 :

$$D_{1h} = 380 \exp (-4/ TL) \cdot \exp (-z/7,8) \cdot (\sin h) L(T+16)/3 \dots (III.13)$$

Ciel quelconque

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

$$D_h = I_h \cdot f(s) / (1 - f(s)) \text{ avec } f(s) = 0.9 - s (0.9 - (D_{1h} / G_{1h})) \dots(III.14)$$

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

III.4. 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 :

$$G_{1h} = (1300 - 57 \cdot TL) \exp(0,22z/7,8) \cdot (\sin h) (TL + 36) / 33 \dots(III.15)$$

Cette relation doit bien sûr vérifier à toute heure la condition :

$$G_{1h} = I_{1h} + D_{1h} \dots\dots\dots(III.16)$$

Ciel quelconque

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

$$G_h = G_{1h} \cdot (a + (1 - a) \cdot (0,5 \cdot s \cdot (s + 1))^{0,5}) \dots\dots\dots(III.17)$$

Où s 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 :

$$G_h = I_h + D_h \dots\dots\dots(III.18)$$

III.5 Modèles simplifiés pour l'atmosphère

Il existe plusieurs modèles pour la simulation de l'éclairement solaire global, direct et diffus, généralement exprimés par des approches semi empiriques, les plus fréquemment connus et utilisés dans la pratique on citera principalement les modèles : PERRIN DE BRICHAMBAUT , le modèle de Liu Jordan , Capderou et R.Sun, ces quatre modèles donnent de bons résultats pour estimer l'irradiation solaire sur un plan parfaitement horizontal ou sur un plan incliné.

Méthode Semi-Empirique de Perrin Brichambaut [40-41]

Tout rayonnement incident sur terre va être décomposé en plusieurs rayonnements. Ces derniers varient en fonction de la hauteur du soleil, de l'angle d'incidence, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère. La modélisation théorique des éclairissements solaires est très compliquée, ils sont en fonction des variations climatiques et des intempéries.

La méthode empirique de Perrin Brichambaut a donné de bons résultats pour l'estimation de l'énergie reçue par un capteur d'orientation quelconque .

Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)

Pour un ciel clair, les éclairissements du rayonnement direct I_d diffus I_s et global I_g reçus sur un capteur sont donnés par les relations suivantes:

$$I_s = A (\sin(h))^{0.4} \dots\dots\dots(III.19)$$

$$I_g = A' (\sin(h))^{\beta'} \dots\dots\dots(III.20)$$

$$I_d = A \left(\exp\left(-\frac{1}{B \sin(h+2)}\right) \right) \cos(\theta) \dots\dots\dots(III.21)$$

$$I_g = I_s + I_d \dots\dots\dots(III.22)$$

I_g : éclairement global reçu par une surface horizontale (w/m^2).

I_s : éclairement diffus reçu par une surface horizontale (w/m^2).

I_d : éclairement directe reçu par une surface horizontale (w/m^2).

A, B, A', B' : sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère

La Déclinaison(δ)

Elle est bien représentée par la formule suivante

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \cdot \sin((2\pi/365) \cdot (284 + N_j))$$

Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert)

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuses continues, plus ou moins denses optiquement, et au travers des quelles il n'est pas possible de distinguer le disque Solaire.

Dans ces conditions, le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que du rayonnement diffus .Si la couverture nuageuse est homogène, on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol. Le rayonnement global par un ciel couvert est ;

$$I'_g = K I_g (1 + 0.33 \sin(h)) \dots\dots\dots(III.23)$$

K : coefficient qui dépend de l'état du ciel avant d'être recouvert par les nuages.

$K = 0.6$ pour un ciel bleu foncé.

$K = 0.3$ pour un ciel bleu clair.

$K = 0.6$ pour un ciel bleu laiteux .

III.6. Modèles statistiques [39,43]

III.6. 1. Modèles de Liu Jordan:

Rapport du rayonnement global horaire en moyenne mensuelle, au rayonnement global Journalier en moyenne mensuelle (r_t)

Est défini par :

$$r_t = \frac{I^*}{H} \dots\dots\dots(III.24)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s)} \dots\dots\dots(III.25)$$

Avec:

$$a = 0.409 + 0.5015 \sin (\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin (\omega_s - 60)$$

Et :

ω : Angle horaire compté en degré, positivement le matin à partir du midi solaire et négativement à l'après midi.

ω_s : Angle horaire du lever du soleil. Où dessus de l'horizon pour le jour choisi D'après Liu et Jordan, pour une Journée quelconque du mois r t est identique au rapport entre le rayonnement global horaire I et le rayonnement global Journalier H .

b) rapport du rayonnement diffus horaire en moyenne mensuelle, au rayonnement diffus Journalier en moyenne mensuelle (r_d).

Il est défini par :

$$r_d = \frac{I_d^*}{H_d} \dots\dots\dots(III.26)$$

$$r_d = \left(\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s} \right) \dots\dots\dots(III.27)$$

Rayonnement direct horaire :

$$I_b = I - I_d \dots\dots\dots(III.28)$$

Avec :

I: Rayonnement global horaire sur une surface horizontale.

Id : Rayonnement diffus horaire sur une surface horizontale.

Ib : Rayonnement direct horaire sur une surface horizontale.

Rayonnement solaire horaire sur une surface inclinée

rayonnement direct sur une surface inclinée Le rayonnement direct sur une surface inclinée I_{bi} est donné par la relation suivante :

$$I_{bi} = R_b I_b \dots\dots\dots(III.29)$$

Avec:

I_{bi}: rayonnement direct sur une surface inclinée

R_b : Rapport du rayonnement direct journalier incliné à celui sur une surface horizontale : il est donné par la relation suivante :

$$\frac{I_{bi}}{b} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \beta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega} \dots\dots\dots(III.30)$$

Avec:

ϕ : Latitude du lieu

β : Angle entre le plan horizontale et le plan considéré (inclinaison) rayonnement solaire horaire diffus sur une surface inclinée.

Qu'une surface faisant un angle β avec l'horizontale regarde une portion du ciel sous l'angle solide : $\frac{1+\cos\beta}{2}$ et une position du sol, sous l'angle solide $\frac{1-\cos\beta}{2}$.

Si ρ est l'albédo du sol on a donc :

$$I_{di} = I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \dots\dots\dots(III.30)$$

On peut prendre $\rho = 0.2$ en absence de neige.

$\rho = 0.8$ en cas de neige.

Rayonnement solaire global horaire sur une surface inclinée :

$$I_i = I_b R_b \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \dots\dots\dots(III.31)$$

Le premier terme de l'équation représente l'ensoleillement qui arrive directement du soleil, il est obtenu en faisant le produit du rayonnement direct sur une surface horizontale par un facteur géométrique R_b qui dépend de l'orientation du capteur, de la latitude du lieu et du moment de l'année.

Le second terme représente la contribution du rayonnement diffus I_d et dépend de l'inclinaison β du capteur.

Le dernier terme représente la réflexion du rayonnement sur le sol face au capteur et dépend de l'inclinaison du capteur et du coefficient de réflexion de lumière diffuse du sol ρ .

III.6. 2.Modèle de Capderou [39,43].

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directes et diffuses de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs de troubles, à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffuses par ciel clair.

Eclairement reçu sur un plan horizontal par ciel clair

La connaissance du facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair.

Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement direct traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \dots\dots\dots(III.32)$$

T_0 : Est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante:

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\phi) + 0.1(2 + \sin(\phi)) \times A_{he} - 0.2Z - (1.22 + 0.14 \times A_{he}) \times (1 - \sin(h)) \dots\dots\dots(III.33)$$

$$A_{he} = \sin\left(\frac{360}{365}\right) \times (n - 121) \dots\dots\dots(III.34)$$

Z : L'altitude du lieu

T_1 : Le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche:

$$T_1 = 0.89^z \dots\dots\dots(III.34)$$

T_2 : Est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption (il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β , T_2 est donné par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he})(0.63)^z \dots\dots\dots(III.35)$$

L'éclairement direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par:

$$I_{bh} = I_c \exp[-T_L \times \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h)\right)^{-1}] \sin(h) \dots\dots\dots(\text{III.36})$$

L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal.

$$I_{dh} = I_c \times \exp\left((-1 + 1.06 \log(\sin(h))) + a - \sqrt{a^2 + b^2}\right) \dots\dots\dots(\text{III.37})$$

$$a = 1.1$$

$$b = \log(T_L - T_0) - 2.8 + 1.02 \times (1 - \sin(h))^2$$

L'éclairement global reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$I_{gh} = I_{bh} + I_{dh} \dots\dots\dots(\text{III.38})$$

Éclairement solaire global reçu sur un plan incliné

L'éclairement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I_b = I_c \times \exp[-T_L \times \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h)\right)^{-1}] \cos \theta \dots\dots\dots(\text{III.39})$$

L'éclairement diffus du ciel est composé de trois parties:

La composante directe ou curcuma solaire. Elle provient du voisinage du soleil dans un Cône de demi-angle au sommet compris entre 3° et 15°. Elle peut être considérée aussi qu'elle provient directement du soleil.

$$\delta_d = I_c \times \exp\left(-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}\right) \dots\dots\dots(\text{III.40})$$

$$a = 3.1 - 0.4b$$

$$b = \log(T_L - T_0) - 2.28 - 0.5 \log(\sin(h))$$

La composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme.

$$\delta_i = I_{dh} - \delta_d \sin(h) \dots\dots\dots(\text{III.41})$$

I_{dh} : L'éclairement diffus sur un plan horizontal.

La composante du cercle de l'horizon qui provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphérique

$$b = \exp(0.2 + 1.75 \log(\sin(h))) \dots\dots\dots(\text{III.42})$$

$$a = \log(T_L - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h)) \dots\dots\dots(\text{III.43})$$

$$\delta_h = I_c \frac{-0.02a}{a^2 + ab + 1.8} \exp(\sin(h)) \dots\dots\dots(\text{III.44})$$

Le diffus du ciel est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel

$$\delta_i = I_{dh} - \delta_d \sin(h) \dots\dots\dots(\text{III.45})$$

L'éclairement diffus du sol est caractérisé par l'albédo du sol qui indique la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque (α, γ).

$$I_{dsol} = \delta_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \dots\dots\dots(\text{III.46})$$

$$\delta_d = \rho I_{gh}$$

I_{gh} : Est l'éclairement global horizontal.

ρ : Albédo du sol.

L'éclairement diffus rétrodiffusé est celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol. Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante :

$$\delta'_i = 0.9(\rho - 0.2)I_{gh} \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L - T_0}}\right) \dots\dots\dots(III.47)$$

L'éclairement diffus incident sur un plan incliné est donné par.

$$I_d = I_{dciel} + I_{dsol} + \delta'_i \frac{1 + \sin(\beta)}{2} \dots\dots\dots(III.48)$$

D'où l'éclairement global incident à un instant donné sur un plan inclinés.

$$I_g = I_b + I_d \dots\dots\dots(III.49)$$

III.6. 3.Modèle de R. Sun [40]

Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

Éclairement solaire direct incident sur un plan horizontal par ciel clair

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur TLK selon la formule suivante :

$$I_d = I_c \exp(-0.8662 \times T_L \times m \times \delta_r(m)) \dots\dots\dots(III.50)$$

Le terme $-0.8662 T_L$: est le deuxième facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair (sans dimension) corrigé par Kasten.

Le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair
 Id est donné par l'équation suivante ;

$$I_d = I_c \times \exp(-0.8662 \times T_{LK} \times m \times \delta_r(m)) \times \sin(h) \dots\dots\dots(III.51)$$

Éclairement solaire diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair :

Puisque le ciel sans nuage devient plus trouble, donc, l'éclairement diffus augmente lorsque l'éclairement direct diminue. L'estimation de la composante diffuse sur un plan horizontal est effectuée en faisant le produit de l'éclairement énergétique normal extraterrestre, le facteur de transmission (Tn) est en fonction uniquement du facteur de trouble atmosphérique de Linke corrigé (TLK) et une fonction du diffus de l'altitude solaire F_d qui ne dépend que de l'altitude solaire h .

$$I_s = I_c \times T_n(T_{LK}) \times F_d(h_0) \dots\dots\dots(III.52)$$

L'estimation du facteur de transmission Tn(TLK) permet de donner un éclairement diffus théorique sur une surface horizontale. L'expression suivante est sous forme d'une fonction polynomiale de deuxième ordre [44,45].

$$T_n(T_{LK}) = -0.051843 + 0.030543T_{LK} + 0.0003797T_{LK}^2 \dots\dots\dots(III.53)$$

F_d : La fonction de l'altitude solaire est donnée par l'expression:

$$F_d(h_0) = A_1 + A_2 \sinh_0 A_3 \sin^2 h_0 \dots\dots\dots(III.54)$$

Ai: sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble TL corrigé, définis par les expressions suivantes [46]

$$A_1' = 0.26463 - 0.06158T_{LK} + 0.003108T_{LK}^2$$

$$A_1 = A_1' \quad \text{si} \quad A_1' T_n(T_{LK}) \geq 0.0022$$

$$A_2 = 2.0420 + 0.018945T_{LK} - 0.011101T_{LK}^2$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231T_{LK} - 0.0085079T_{LK}^2$$

Subséquentement, l'éclairement global sur une surface horizontale est calculé comme suit ;

$$I_g = I_d + I_s \dots\dots\dots(III.55)$$

III.7 Effets des nuages

Les nuages servent de réflecteurs du rayonnement solaire entrant, également appelé insolation, qui est l'énergie rayonnée à ondes courtes par le soleil qui se propage dans l'atmosphère terrestre. Cependant, la mesure dans laquelle un nuage individuel reflète l'insolation dépend de son épaisseur, car les nuages minces reflètent moins l'insolation que les nuages épais [47] .

Les nuages hauts, y compris les cirrus, cirrostratus et cirrocumulus, se trouvent au-dessus de 20 000 pieds. Ces nuages sont principalement composés de particules de glace en suspension et ont tendance à être très minces. Cette minceur permet à la majeure partie de l'insolation de traverser des nuages de type cirrus sans perdre beaucoup d'énergie due à la réflexion.

Les nuages du milieu, y compris les altocumulus et les altostratus, se trouvent entre 6 500 et 23 000 pieds. Les nuages d'altocumulus sont constitués de gouttelettes d'eau, tandis que les nuages d'altostratus sont constitués de gouttelettes de glace et d'eau. Les nuages d'altocumulus ont tendance à être plus épais que les nuages d'altostratus, et les deux types de nuages ont tendance à être plus épais que les nuages de type cirrus. Ainsi, les nuages moyens ont

tendance à refléter une proportion d'insolation plus élevée que les nuages hauts.

Les nuages bas, y compris les stratus, les nimbostratus et les cumulus, se trouvent en dessous de 6 000 pieds. Ces nuages sont entièrement composés de gouttelettes d'eau. Leur épaisseur les amène à refléter une forte proportion d'ensoleillement qui atteint cette basse altitude.

Les cumulonimbus, également appelés nuages d'orage, ont tendance à refléter la plus forte proportion d'insolation. Leur altitude varie de près de la surface de la Terre à plus de 50 000 pieds.

III.8. Algorithme de calcul du rayonnement sur une surface arbitrairement orientée et inclinée:

Le calcul de l'irradiation sur la surface arbitraire se fait en utilisant les étapes suivante selon l'algorithme:

ETAPE 1 : Lire t : le jour, le mois, l'altitude, temps solaire vrai, albedo

ETAPE 2 : Calcul la Déclinaison puis l'angle horaire.

ETAPE 3 : Calcul le rayonnement hors atmosphère

ETAPE 4 : Calcul le facteur d'inclinaison

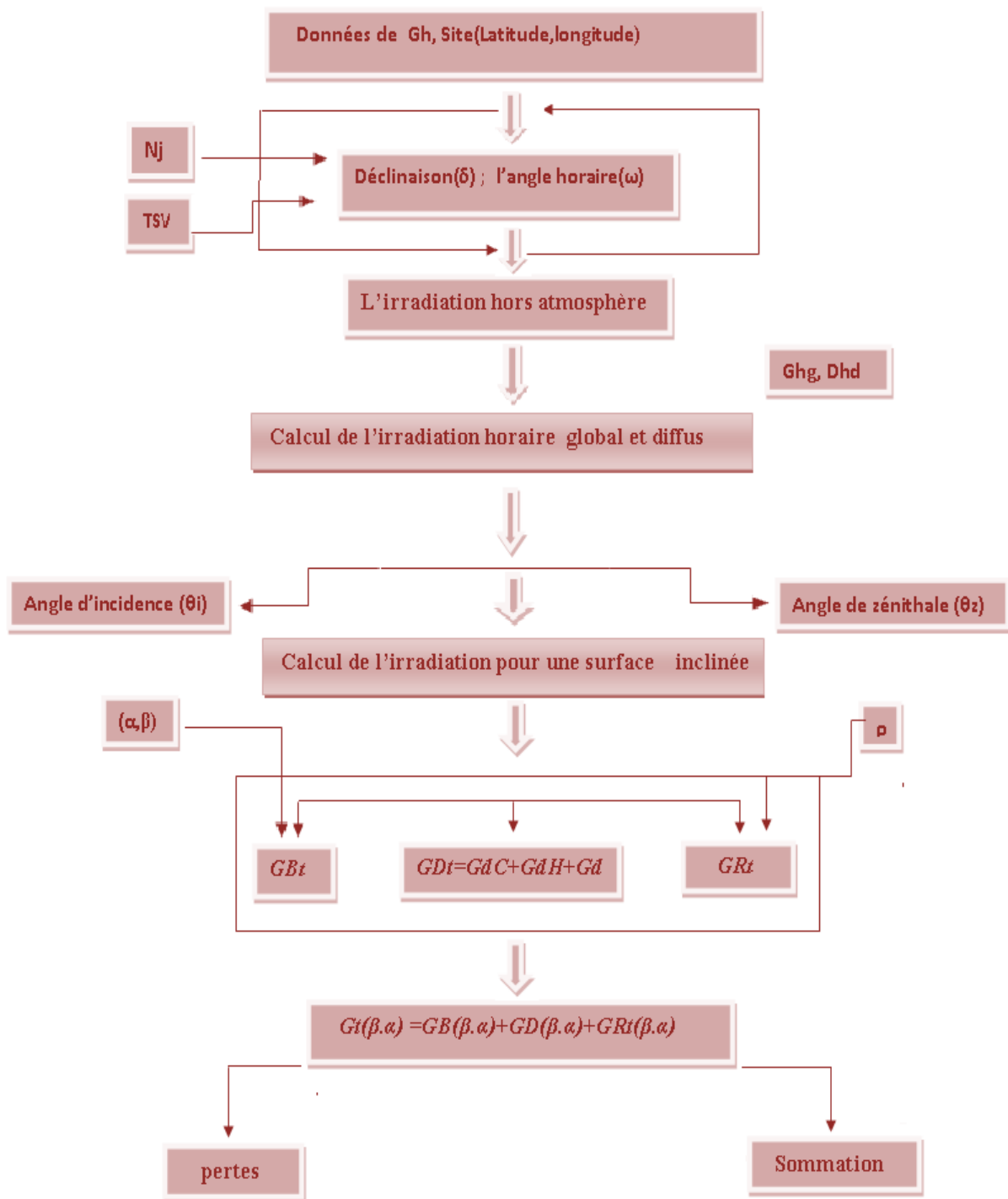
ETAPE 5: Calcul le rayonnement direct

ETAPE 6: Calcul le rayonnement diffus

ETAPE 7: Calcul le rayonnement réfléchi

ETAPE 8: Calcul du rayonnement global

ETAPE 9: Calcul l'irradiations horaires global sur une surface horizontale pour toutes les heures d'une (journée moyenne).



Figure(III.8) : Algorithme de calcul de l'irradiation solaire sur plan incliné