

4. Rayonnement Solaire sur les surfaces inclinées

Petros Axaopoulos TEI d'Athènes, Grèce

Apprentissage des Résultats

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

- Définir le rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi sur la surface inclinée
- connaître la signification de l'indice de clarté
- calculer le rayonnement solaire horaire et mensuel sur la surface de diverses orientations et inclinaisons
- expliquer comment l'angle d'orientation et d'inclinaison sur une surface affecte le rayonnement solaire d'incident
- comprendre comment le choix l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau photovoltaïque affecte la production électrique
- déterminer l'angle d'inclinaison optimum d'un panneau de photovoltaïque, en prenant en considération la latitude du site, l'application prévue et la période de temps ou le système solaire est utilisé.

La connaissance du rayonnement solaire reçu par une surface inclinée est nécessaire pour la plupart des applications concernant les systèmes solaires. Généralement, les stations météorologiques fournissent seulement le rayonnement solaire globale sur le plan horizontal, une méthode pour calculer le rayonnement sur une surface inclinée de base horaire ou mensuelle est nécessaire. Dans ce but, les sections suivantes décrivent une méthodologie pour le calcul du rayonnement solaire sur les surfaces inclinées aux périodes horaires et mensuelles.

4,1 RAYONNEMENT HORAIRE SUR LA SURFACE INCLINÉE

Le rayonnement solaire reçu sur un plan incliné par rapport à la surface au sol se décompose en trois composantes: le rayonnement direct provenant du disque solaire, le rayonnement diffus provenant de la voute céleste, et le rayonnement réfléchi provenant de du sol dans la zone environnante (Fig. 4.1).

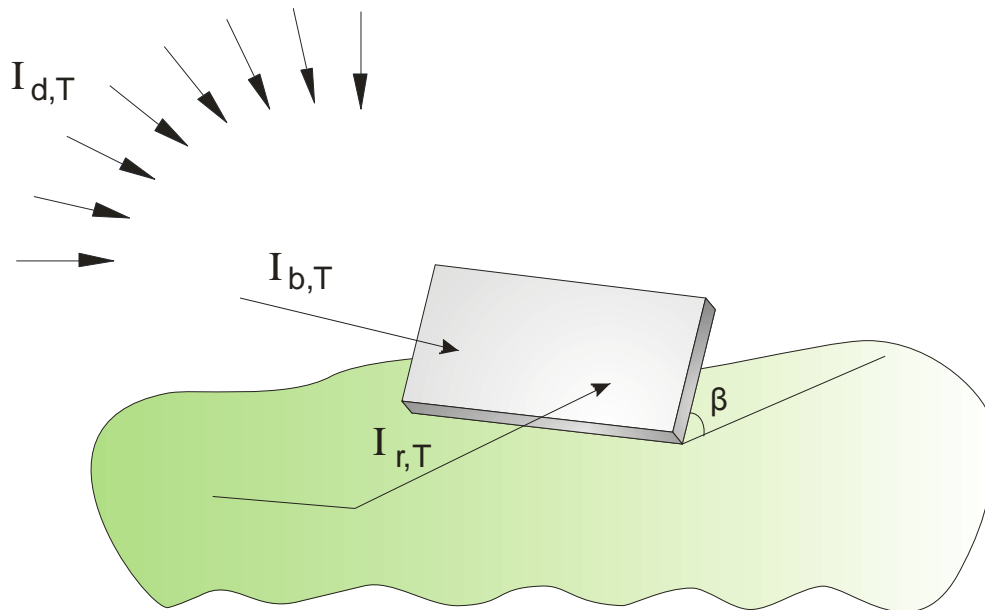


Figure 4.1 : rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi sur la surface inclinée.

Le rayonnement direct qu'une surface reçoit dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires. Le rayonnement diffus reçu par la surface inclinée ne dépend pas de l'orientation du plan et ne vient pas de l'intégralité du ciel ou du sol voisin, il vient seulement de la partie du ciel que la surface « voit ». Par conséquent, pour le calcul du rayonnement solaire sur une surface inclinée, un facteur de conversion devra être pris en considération pour chacune des composantes [1].

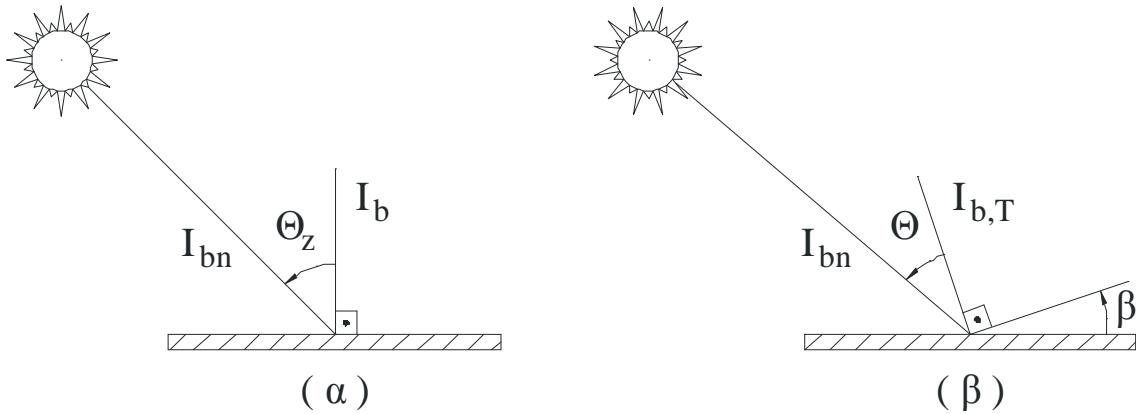


Figure 4.2 Détermination des facteurs de conversion pour l'irradiance solaire directe sur une surface horizontale (α) sur une surface inclinée(β)

Le facteur de conversion pour l'irradiance solaire directe (R_b), est le rapport entre l'irradiance solaire directe sur la surface inclinée ($I_{b,T}$) sur l'irradiance solaire directe sur la surface horizontale(I_b).

De la Fig. 4.2 l'équation suivante est facilement déduite :

$$R_b = \frac{I_{b,T}}{I_b} = \frac{I_{b,n} \cos \theta}{I_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4.1)$$

En introduisant $\cos \theta_z$ de l'équation 3.5 dans l'équation 4.1, la nouvelle équation peut être écrite comme suit :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (4.2)$$

De cette équation, il devient évident que la valeur du R_b varie au cours de la journée et de l'année pour un emplacement indiqué.

Le calcul de la composante rayonnement diffus est fondé sur l'hypothèse que l'irradiance diffuse est isotrope, c'est à dire qu'elle est uniformément reçue de la voûte céleste. Le facteur de conversion pour le rayonnement diffuse est le rapport entre l'irradiance diffuse incidente sur une surface inclinée ($I_{d,T}$) et l'irradiance diffuse incidente sur une surface horizontale (I_d).

Du rayonnement diffus provenant de la voûte céleste, seul un pourcentage atteint la surface inclinée. Ce pourcentage est le rapport entre la partie de la voûte céleste que la surface inclinée « voit » et la surface hémisphérique entière de la voûte céleste. Dans le modèle isotrope et pour une surface inclinée non ombragée au sol, avec l'angle β de la pente de la surface inclinée, le facteur de conversion est donné par la relation :

$$R_d = \frac{I_{d,T}}{I_d} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (4.3)$$

Le facteur de conversion pour la partie irradiance réfléchi (Rr) est le rapport entre l'irradiance incidente réfléchi sur le sol sur la surface inclinée ($I_{r,T}$) et l'irradiance totale horizontale réfléchi par le sol (I_r). Cependant, l'irradiance réfléchi par le plan horizontal du sol est le produit de la réflectivité du sol ρ (nommée albédo) par l'irradiance totale incidente dans le plan horizontal (I).

Comme dans le cas précédent, en supposant que l'irradiance réfléchi est isotrope, pour une surface inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontal, le facteur de conversion est donné par :

$$R_r = \frac{I_{r,T}}{I\rho} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4.4)$$

Ainsi, l'irradiance solaire sur la surface inclinée IT pendant une heure est la somme des trois termes :

$$IT = I_b R_b + I_d R_d + I\rho R_r \quad (4.5)$$

Vu les équations 4.1, 4.3 et 4.4, l'équation 4.5 peut être réécrite comme :

$$I_T = I_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + I\rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4.6)$$

Cette équation peut être employée pour calculer toute l'irradiation solaire horaire sur une surface inclinée d'un angle β , où les angles θ et θ_z correspondent au point médian du temps considéré. Le coefficient de réflectivité ρ (appelé albédo) est habituellement pris égal à 0,2, mais quand la zone environnante est couverte de neige sa valeur peut être plus élevée. Diverses valeurs de ρ sont indiquées dans le Tableau 4.1

Les réflectivités de différentes surfaces sont présentées dans le tableau 4.1

Type de surface au sol	Réfectivité
Neige Fraîche	0,87
Sable Sec	0,18
Sable Humide	0,09
Forêt Conifère	0,05
Nouveau béton	0,33
Vieux béton	0,23

En divisant les deux côtés de l'équation 4.6 par I et vu l'équation 4.1, l'équation suivante peut être écrite :

$$\frac{I_T}{I} = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \sigma \nu \beta}{2}\right) + \rho \frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \quad (4.7)$$

Selon la valeur l'indice de clarté K , le rapport I_d/I est donnée par les relations suivantes [2].

$$I_d/I = 1 - 0.09K \text{ pour } K \leq 0,22 \text{ (}\alpha\text{)}$$

$$I_d/I = 0,9511 - 0.1604K + 4.388K^2 - 16.638K^3 + 12.336K^4 \text{ pour } 0.22 < K < 0.8 \text{ (}\beta\text{)}$$

$$I_d/I = 0,165 \text{ pour } K > 0.8 \text{ (}\gamma\text{) (4,8)}$$

L'indice de clarté horaire (K) est le rapport de l'irradiation solaire totale sur une surface horizontale (I) sur l'irradiation extraterrestre sur une surface horizontale (I_o). Cet indice de clarté est considéré comme étant le facteur d'atténuation de l'atmosphère. Généralement quand l'atmosphère est claire, une plus petite fraction d'irradiation est dispersée. Par ailleurs, l'indice de clarté est un paramètre stochastique, qui est fonction de l'époque de l'année, de la saison, des conditions climatiques et de la situation géographique.

$$K = \frac{I}{I_o} \quad (4.9)$$

Le calcul de l'irradiation extraTerrestre horaire sur une surface horizontale peut être rapproché par les relations suivantes si l'angle de zénith (θ_z) correspond au point médian du temps considéré.

$$I_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (4.10)$$

L'irradiation extraterrestre sur une surface horizontale (I_o) peut être obtenue en intégrant l'équation 4,10 pendant une période entre les angles d'heure ω_1 et ω_2 [2].

$$I_{o(\omega_1-\omega_2)} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G_{on} \cos \theta_z d\omega = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot n}{365}\right) \cdot \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (4.11)$$

Exemple 4.1

Un panneau photovoltaïque doit être installé à Ioannina, Grèce ($\phi = 39^\circ 42'$), avec une inclinaison de 35° par rapport au sud. En utilisant le modèle diffus isotrope, calculez toute l'irradiation solaire horaire. En utilisant le modèle diffus isotropique, calculez l'irradiation solaire horaire directe, diffuse et réfléchiée dans le plan incliné de 10 heures à 11 heures du matin le 3 avril. L'irradiation solaire horaire sur une surface horizontale est 520 Wh/m^2 et réflectivité du sol $\rho = 0,2$.

Solution

le 3 Avril, $n = 93$ et de l'équation 3,2 la déclinaison solaire est de:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \frac{284 + 93}{365}\right) = 4.81^\circ$$

L'angle d'heure solaire (ω) à considéré est celui calculé pour le point médian entre 10 heures et 11 heures du matin. Par conséquent, $\omega = -22.5^\circ$. Avec des valeurs connues de δ , de ω et de ϕ , l'angle solaire de zénith (θ_z) peut être calculé à partir de l'équation 3.5 :

$$\cos \theta_z = \sin 4.81 \cdot \sin 39.7 + \cos 4.81 \cdot \cos 39.7 \cdot \cos(-22.5) = 40.37^\circ$$

De l'équation 2.5, l'irradiance solaire extraterrestre G_{on} est calculé et ainsi, l'irradiance extraterrestre horaire sur une surface horizontale est donnée par la formule :

$$I_o = 1365.6 \times \cos 40.37 = 1040,45 \text{ kW/m}^2$$

Ici, il faut mentionner que I_o pourrait être calculé à partir de la relation 4.11 pendant une période d'une heure de ω_1 (10 heures) à ω_2 (11 heures). Pour comparer la valeur de I_o avec ce calcul, $I_o = 1037,71 \text{ kWh/m}^2$. Cette valeur peut être comparée à $1040,45 \text{ kWh/m}^2$, supposant que l'irradiance est constante pour la période d'une heure.

K peut être calculé à l'aide de l'équation 4.9.

$$K = \frac{520}{1040.46} = 0.5$$

En substituant la valeur de K dans l'équation 4.8 (β), le taux $I_d/I = 0,66$. Par conséquent :

$$I_d = 0.66 \times 520 = 343.2 \text{ Wh/m}^2$$

$$I_b = 0.34 \times 520 = 176.8 \text{ Wh/m}^2$$

En ce point, l'angle d'incident solaire (θ) devrait être calculée. Connaissant l'angle solaire de zénith (θ_Z), l'altitude solaire peut être calculée par l'équation 3.1 comme suit :

$$h = 90 - 40,37 = 49.63^\circ$$

L'angle solaire d'azimut (α) peut être calculée par l'intermédiaire de l'équation 3.14 :

$$\sin \alpha = \frac{\cos 4.81 \cdot \sin(-22.5)}{\cos 49.63} = -36.07^\circ$$

Étant donné que $\gamma = 0$, l'équation 3.16 fournit :

$$\cos \theta = \cos 35 \cdot \cos 40.37 + \sin 35 \cdot \sin 40.37 \cdot \cos(-36.07) = 22.42^\circ$$

$$\text{d'où } \theta = \cos^{-1}(0,9242) = 22,42^\circ$$

En substituant toutes les valeurs connues dans l'équation 4.6, toute l'irradiation sur la surface inclinée (IT) peut être calculée :

$$I_T = 176.8 \frac{\cos 22.42}{\cos 40.37} + 343.2 \frac{1 + \cos 35}{2} + 520 \cdot 0.2 \frac{1 - \cos 35}{2}$$

$$I_T = 214.52 + 312.17 + 9.4 = 536.1 \text{ Wh / m}^2$$

En conséquence, toute l'irradiation sur le panneau est 536,1Wh/m², le direct est 214,52 Wh/m², le diffus est 312,17 Wh/m² et reflété est 9,4 Wh/m².

4,2 RAYONNEMENT MENSUEL SUR LA SURFACE INCLINÉE

La même démarche que celle employée pour développer des équations précédemment peut également être utilisée pour le calcul de l'irradiation solaire quotidienne totale (H_T) sur une surface inclinée. Puisque les irradiances reflétées diffuses et au sol sont indépendantes de l'angle d'incidence, les facteurs de conversion quotidiens sont identiques aux facteurs instantanés donnés par les équations 4.3 et 4.4.

Supposant que le modèle isotrope pour le rayonnement reflété, diffus et global est en quelque sorte analogue à l'équation 4.6, alors l'irradiation solaire quotidienne totale sur une surface inclinée peut être écrit comme suit :

$$H_T = H_b R_b + R_d \left(\frac{1 + \sigma \nu \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \right) \quad (4.12)$$

Dans ce cas, R_b est le rapport de l'irradiation journalière sur la surface inclinée, $H_{b,T}$, et l'irradiation journalière horizontale H_b . Ainsi, pour les surfaces inclinées vers l'équateur ($\gamma = 0$) dans l'hémisphère nord, ce rapport peut être déterminé en intégrant l'équation 4.2 pour la période de temps appropriée, du lever apparent du soleil ω_{sr}' au coucher apparent du soleil ω_{ss}' sur la surface inclinée et du lever vrai de Soleil ω_{sr} au coucher vrai du Soleil ω_{ss} pour la surface horizontale.

$$R_b = \frac{\int_{\omega_{sr}'}^{\omega_{ss}'} \sigma \nu \theta d\omega}{\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \sigma \nu \theta_Z d\omega} \quad (4.13)$$

Etant donné que $\omega_{sr}' = -\omega_{ss}'$ et que $\omega_{sr} = -\omega_{ss}$, ces angles peuvent être unifiés en respectivement ω_s' et ω_s [3]:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (4.14)$$

ou ω_s' est l'angle horaire du couché de soleil sur le plan incliné, donné par l'équation suivante, et ou "min" est la plus petite des deux valeurs de l'équation suivante entre crochet.

$$\omega_s' = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left(-\tan(\phi - \beta) \varepsilon \phi \delta \right) \right\} \quad (4.15)$$

Pour des applications solaires, dans de nombreux cas, il est nécessaire de calculer toute l'irradiation solaire mensuelle sur la surface inclinée. En pareil cas, une équation similaire à l'équation 4.12 peut être utilisée, si le facteur de conversion est calculé pour un jour typique approprié du mois. Ainsi, toute l'irradiation solaire mensuelle moyenne sur une surface inclinée peut être évaluée en utilisant l'équation suivante :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \bar{H} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.16)$$

Définissant le facteur de conversion \bar{R} comme rapport de toute l'irradiation solaire mensuelle moyenne sur la surface inclinée \bar{H}_T sur celle à l'horizonta \bar{H} :

$$\bar{H}_T = \bar{H}\bar{R} \quad (4.17)$$

En utilisant cette simple équation, \bar{H}_T peut être calculé si \bar{H} et \bar{R} pour le mois considéré, un site donnée et une inclinaison fixée, sont connus. Pour quelques villes, les tables de ces données sont disponibles avec les valeurs de \bar{R} , pour différents mois et diverses angles d'inclinaison.

Assimilé avec l'équation 4.7, l'équation 4.16 peut être transformée en l'équation suivante :

$$\frac{\bar{H}_T}{H} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{H}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{H} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (4.18)$$

Plusieurs relations pour le ratio $\frac{\bar{H}_d}{H}$ ont été proposées par les divers chercheurs [4-9], Selon Liu et Jordan [9], ce ratio peut être calculée utilisant l'équation suivante :

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 1.390 - 4.027\bar{K} + 5.531\bar{K}^2 - 3.108\bar{K}^3 \quad (4.19)$$

Dans ce cas, \bar{K} est l'indice de clarté (clearness index) qui correspond au rapport entre l'irradiation quotidienne de moyenne mensuelle sur une surface horizontale au sol (\bar{H}) et l'irradiation extraterrestre quotidienne de moyenne mensuelle (\bar{H}_o).

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (4.20)$$

L'irradiation extraterrestre quotidienne de moyenne mensuelle (\bar{H}_o), peut être calculée en intégrant le G_o au cours de la période du lever de Soleil (ω_{sr}) au coucher du Soleil (ω_{ss}).

$$\bar{H}_o = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} G_o \cos \theta_Z d\omega \quad (4.21)$$

Si la constante solaire est en W/m^2 et que les équations 2.5 et 3.5 sont prises en considération, alors l'équation suivante donnera en J/m^2 :

$$\bar{H}_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta\right) \quad (4.22)$$

L'irradiation extraterrestre quotidienne de moyenne mensuelle est une quantité utile et peut être calculée par l'équation 4.22 pour des latitudes dans l'intervalle $+60^\circ$ à -60° .

Exemple 4.2

En utilisant la supposition que le diffus est isotrope, calculez l'irradiation solaire mensuelle moyenne sur un panneau photovoltaïque incliné d'un angle de 40° vers le sud, pour une latitude de $37^\circ 06' N$. La réflectivité au sol est 0,2 et les valeurs mensuelles de l'irradiation totale sur une surface horizontale sont affichées dans le tableau 4.2 (ci après dans la solution).

Solution

D'abord, l'irradiation solaire mensuelle moyenne pour la surface inclinée sera calculée analytiquement pour janvier, les autres mois pourront être calculés d'une façon similaire. Pour le jour moyen de janvier, la déclinaison solaire peut être calculée, considérant la 17ème ligne du tableau 3.1. Ainsi pour $n = 17$, l'équation 3.2 donne :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \frac{284+17}{365}\right) = -20.92^\circ$$

Utilisant l'équation 3.10, l'angle d'heure de coucher du Soleil ω_s est :

$$\omega_s = \arccos\theta(-\tan 37.1 \cdot \tan(-20.92)) = 73.2^\circ$$

Puisque δ et ω_s sont maintenant connus, l'irradiation extraterrestre quotidienne de moyenne mensuelle est calculée à partir de l'équation 4.22 :

$$\bar{H}_o = 146,31 \text{ kW.h/m}^2$$

L'indice de clarté peut être obtenu à partir de l'équation 4.20 :

$$\bar{K} = \frac{51}{146.31} = 0.35$$

L'indice de clarté \bar{K} est employé pour calculer $\frac{\bar{H}_d}{H}$ à partir de l'équation 4.19

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 1.446 - 2.965 \cdot 0.35 + 1.727 \cdot (0.35)^2 = 0.62$$

L'angle d'heure de coucher du Soleil ω'_s sur la surface inclinée est calculé par l'équation 4.15 :

$$\omega'_s = \min\{73.2, \cos^{-1}(-\tan(37.1 - 40) \cdot \tan(-20.92))\} = \min(73.2^\circ, 91.1^\circ)$$

\bar{R}_b est calculé par l'équation 4.14 :

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(37.1-40) \cdot \cos(-20.92) \cdot \sin 73.2 + (3.14/180) \cdot 73.2 \cdot \sin(37.1-40) \cdot \sin(-20.92)}{\cos 37.1 \cdot \cos(-20.92) \cdot \sin 73.2 + (3.14/180) \cdot 73.2 \cdot \sin 37.1 \cdot \sin(-20.92)} = 2.09$$

En utilisant les valeurs mentionnées ci-dessus, toute l'irradiation solaire mensuelle moyenne pour la surface inclinée, peut être obtenue pour janvier, à l'aide de l'équation 4.18.

$$\bar{H}_T = 69,62 \text{ kW.h/m}^2$$

Les résultats pour les 12 mois sont affichés dans le tableau 4.2

Tableau 4.2

Mois	H kW.h/m ²	Ho kW.h/m ²	Hd/H	Rb	HT kW.h/m ²
Janv.	51	146,31	0,62	2,09	69,62
Fév.	67,4	172,48	0,55	1,68	84,92
Mars	111	247,38	0,46	1,32	126,54
Avr.	149	294,60	0,38	1,02	147,51
Mai	193	343,48	0,32	0,84	169,84
Juin	205	347,10	0,29	0,77	170,15
Juillet	212	350,30	0,28	0,80	180,20
Août.	194	318,68	0,28	0,94	184,30
Septembre.	161	258,90	0,27	1,19	181,93
Oct.	111	207,08	0,35	1,55	148,74
Nov.	75	151,50	0,40	1,97	116,25
Déc.	52	134,54	0,55	2,22	78,00

4.3 RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LA SURFACE DE DIVERSES ORIENTATIONS ET ANGLES D'INCLINAISON

L'incidence de rayonnement solaire sur une surface dépend, notamment, de sa pente et de son orientation. Pour une surface à une place particulière, l'augmentation de sa pente permet la réception de plus de rayonnement pendant l'hiver que pendant l'été. Ainsi, pour les applications solaires qui exigent l'énergie des panneaux solaires principalement pendant l'hiver la pente devrait être grande, alors que quand les panneaux sont utilisés pendant l'été, l'inclinaison devrait être faible.

Pour la disponibilité maximum en énergie pendant l'hiver, l'été et sur l'année entière, une règle empirique qui s'applique à l'inclinaison du capteur est que cette inclinaison devrait être respectivement 10 à 15° plus grande que la latitude du site, 10 à 15° plus petite que la latitude du site ou approximativement égal à la latitude du site. Par conséquent, les différents sites/emplacements ont différents angles optimaux de pente pour les panneaux solaires.

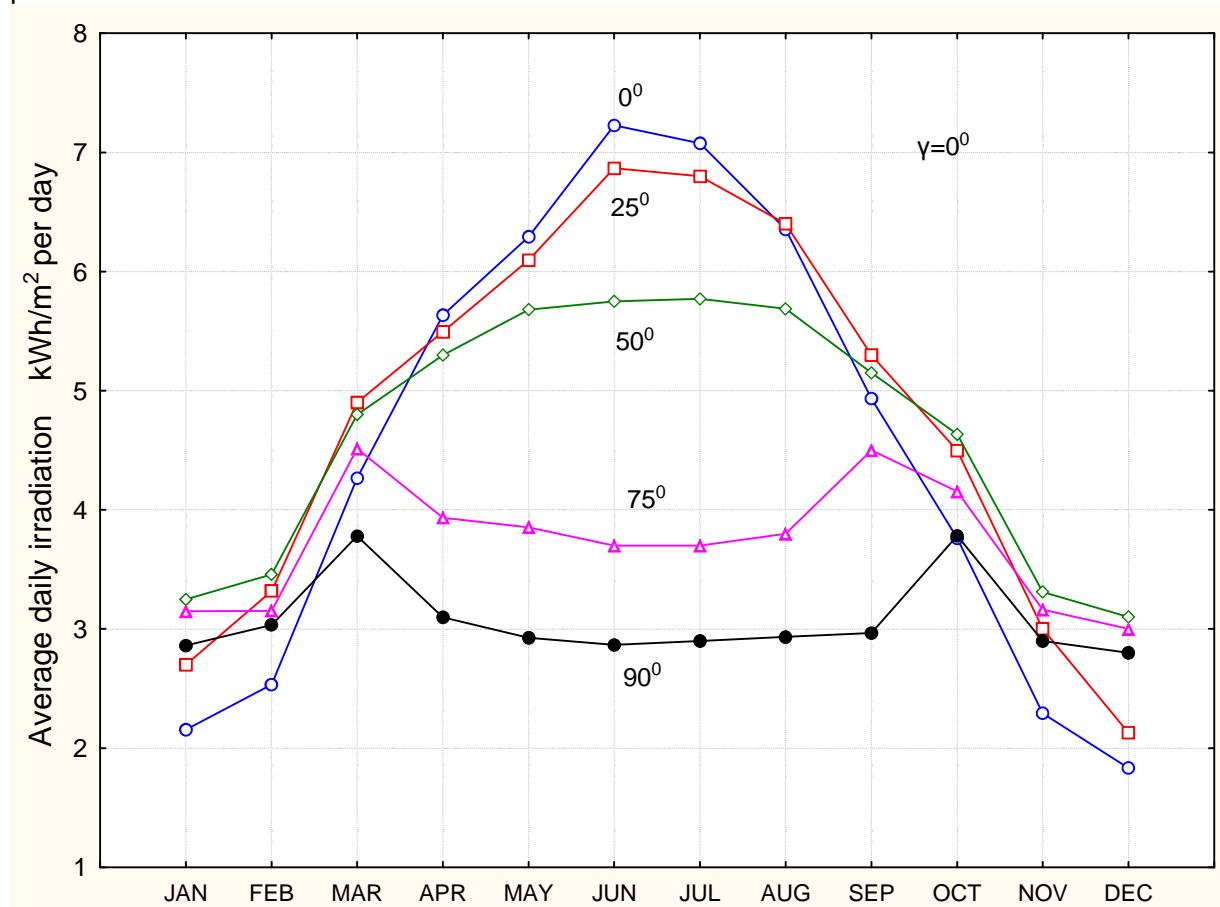


Figure 4.3 : Effet de l'inclinaison sur l'irradiation moyenne quotidienne mensuelle pour une latitude de 38°, de réflectivité au sol de 0,2 et d'orientation sud ($\gamma = 0$).

La figure 4.3 affiche l'irradiation quotidienne de moyenne mensuelle reçue par des surfaces orientées vers le sud pour différentes inclinaisons[10]. Ces valeurs se rapportent à la latitude de 38° N, un albédo $\rho = 0,2$ approximativement. Néanmoins, ceux-ci fournissent une image complète de l'influence de la pente sur l'irradiation solaire reçue par une surface. Ce chiffre confirme la règle empirique citée précédemment.

On sait que l'angle d'inclinaison du panneau photovoltaïque détermine en grande partie l'irradiance solaire reçue et est le facteur premier qui régit la puissance de sortie du panneau. Pendant que la position du Soleil sur la sphère céleste change au cours de la journée et suit un chemin différent pour chaque jour de l'année, il devient évident que la détermination d'un angle d'inclinaison optimal est essentiel pour le fonctionnement optimal de chaque système photovoltaïque.

Afin d'illustrer l'effet de la pente d'un panneau photovoltaïque sur la puissance électrique en sortie, une expérience a été entreprise à une heure précise, pendant le matin d'un jour à Athènes [11]. La puissance crête du panneau photovoltaïque était 55 Wp, l'orientation était au sud et l'angle d'inclinaison pouvait varier de 0° à 90° par pas de 10° . Les résultats expérimentaux sont tracés en Fig. 4.4. Comme on peut le voir, l'angle d'inclinaison optimal est autour de 60° . Au delà de l'angle d'inclinaison optimal, la puissance de sortie chute graduellement. L'angle d'inclinaison optimal de l'exemple expliqué en Fig. 4.4 est haute parce que c'est le matin (10h34 du matin), ainsi, l'altitude solaire est faible.

Figure 4.4 : résultats expérimentaux de la puissance de sortie maximum d'un panneau photovoltaïque de 55 Watt crête à différents angles d'inclinaison pour Athènes ($\phi=38^\circ$ N).

Un autre facteur qui affecte le rayonnement solaire incident sur une surface est l'orientation de la surface. On peut considérer que le rayonnement solaire est symétrique autour de midi solaire, alors, la meilleure orientation pour un panneau solaire fixe est l'orientation sud ($\gamma = 0$). Une déviation de 10 à 10° de l'orientation des modules PV vers l'est ou l'ouest par rapport au sud a une faible influence sur l'irradiation annuelle collectée.

L'orientation d'un panneau photovoltaïque solaire exerce également un effet sur le temps qu'il recevra le rayonnement solaire. Par exemple, un panneau solaire orienté au sud-est recevra la plus grande quantité de rayonnement solaire pendant le matin.

La figure 4.5 affiche une moyenne mensuelle de l'irradiation quotidienne sur une surface horizontale et sur quatre surfaces verticales (sud, est, nord et ouest) à la latitude 38° N [10]. Une caractéristique que cette figure 4.5 affiche est que toutes les courbes sauf celle de la surface au sud ont un maximum correspondre au solstice d'été, alors que la surface au sud a deux maxima qui correspondent à l'équinoxe de printemps et à l'équinoxe d'automne. En outre, on peut noter que la surface verticale au sud recevra de plus grandes quantités d'irradiation solaire pendant les mois d'hiver, alors que la surface horizontale prédomine pendant les mois d'été.

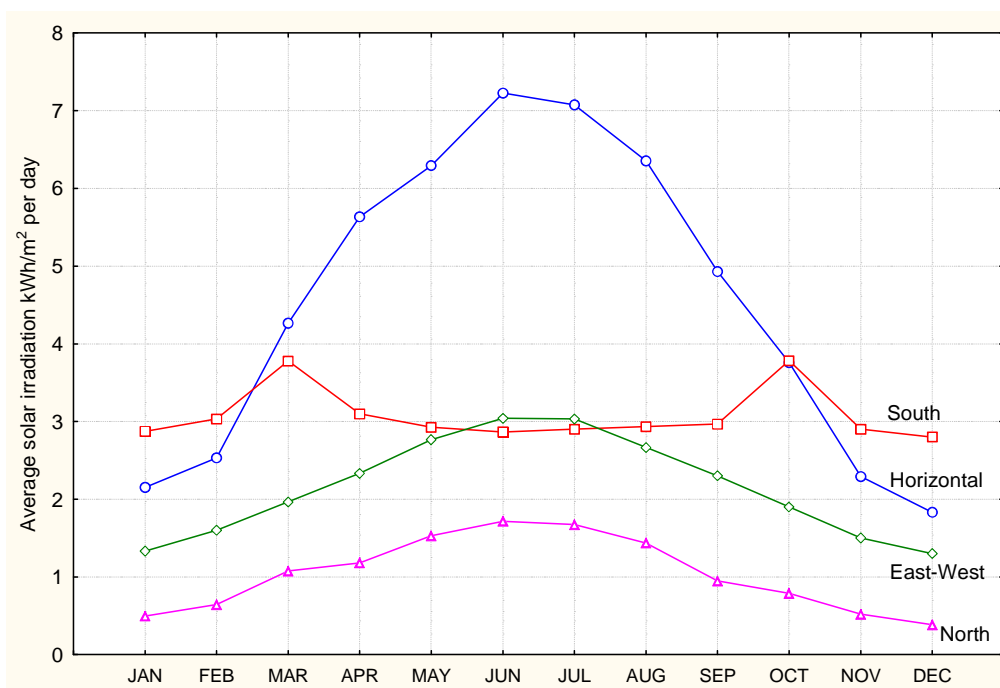


Figure 4.5 : Irradiation quotidienne moyenne Mensuelle sur une surface horizontale et quatre surfaces verticales (sud, est, nord et ouest) à la latitude 38°N.

Pour une description plus détaillée, débutions avec la courbe représentant l'irradiation solaire sur la surface verticale au nord. Pendant les mois d'hiver, le Soleil se lève et se couche au sud de la ligne est-ouest et pour cette raison il n'y a pas irradiation solaire

directe sur cette surface. Réciproquement, pendant les mois d'été, du fait de la longueur plus longue de jour, un peu d'irradiation solaire directe tombe sur cette surface.

Les courbes représentant l'irradiation solaire sur la surface verticale ouest et est présentent de plus grandes valeurs que la surface exposée au nord verticale. Pendant les mois d'été le Soleil se lève et se couche au nord de la ligne est-ouest, le chemin apparent du Soleil est plus long et pour cette raison, l'irradiation solaire incidente sur ces surfaces est plus haute que celle de la surface exposée au nord.

La surface horizontale reçoit beaucoup plus d'irradiation pendant l'été parce que la hauteur solaire est maximisée pour l'été.

La courbe représentant l'irradiation solaire sur la surface du sud verticale une forme complètement différente comparée aux autres courbes. Les deux valeurs maximales correspondent à l'équinoxe de printemps et à l'équinoxe automne. Pendant les mois d'hiver, du fait de la faible hauteur du soleil sur l'horizon, cette surface reçoit la plus grande quantité d'irradiation solaire. La combinaison de la faible hauteur du soleil avec la courte durée du jour pendant l'hiver donne l'avantage à la surface orientée sud pour l'irradiation en hivers comparée aux autres orientations.

La règle empirique mentionnée ci-dessus pour l'inclinaison d'un panneau fixe donne de bons résultats une fois appliquée dans de petites installations solaires. Cependant, dans le cas de grandes installations solaires, même un léger changement de pente correspond à un grand décalage sur l'irradiation incidente. En outre, avec les systèmes photovoltaïques où le coût de panneaux solaires est élevé, il est nécessaire d'étudier la pente optimum pour chaque application particulière. Par exemple, si les panneaux photovoltaïques seront utilisés pour un système relié à un réseau qui demeure fonctionnel tout au long de l'année, la pente optimale devrait être calculée sur l'année. Cet angle optimal est habituellement proche de la latitude. Cependant, dans le cas d'un système photovoltaïque autonome avec des batteries pour stockage de l'énergie, le critère peut ne pas être de maximiser toute l'irradiation solaire sur l'année, mais de maximiser l'irradiation quotidienne pendant le mois avec le moins d'irradiation solaire, afin de réduire au minimum les conditions de stockage de l'énergie. Par exemple, dans l'hémisphère nord, décembre est considéré comme le mois avec l'irradiation la plus faible, ainsi l'angle de panneau sera plus grand que l'angle de latitude. Généralement, la pente optimale de panneau devrait être déterminée par la latitude de l'emplacement, de l'application prévue et de la période de temps durant laquelle système solaire est destiné à être utilisé.

References

- [1] Agami Reddy T. 1987. The design and sizing of active solar thermal systems, Clarendon press Oxford.
- [2] Duffie, J. A. and W. A. Beckman 2006. "Solar Engineering of thermal Processes" John Wiley & Sons, Inc.

- [3] Klein S. A. 1977. "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces" Solar Energy Vol. 19, 325-329.
- [4] Collares-Pereira M. and A. Rabl 1979. "The average distribution of solar radiation-correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values". Solar Energy 22, 155 -164.
- [5] Erbs D, Klein SA, Duffie J A. 1982. "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation". Sol Energy 28(4): 293-302.
- [6] Ruth D. W. and R. E. Chant 1976. The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. Solar Energy 18, 153 154.
- [7] Choudhury N. K. D.1963. "Solar radiation at New Delhi". Solar Energy 7, 44 -52.
- [8] Tuller S. E. 1976. "The relationship between diffuse, total, and extraterrestrial solar radiation". Solar Energy 18, 259 -263.
- [9] Liu B.Y. H. and R.C. Jordan 1960. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation" Solar Energy 4(3), 1-19.
- [10] Axaopoulos P. J 1995. "Renewable energy sources" in Greek. Course notes.
- [11] Axaopoulos P. J and Emmanouil D. Fylladitakis 2014. "Photovoltaic engineering e-learning applications developed for remote laboratory experimentation systems" Int Journal Energy Environ Eng 5:78.