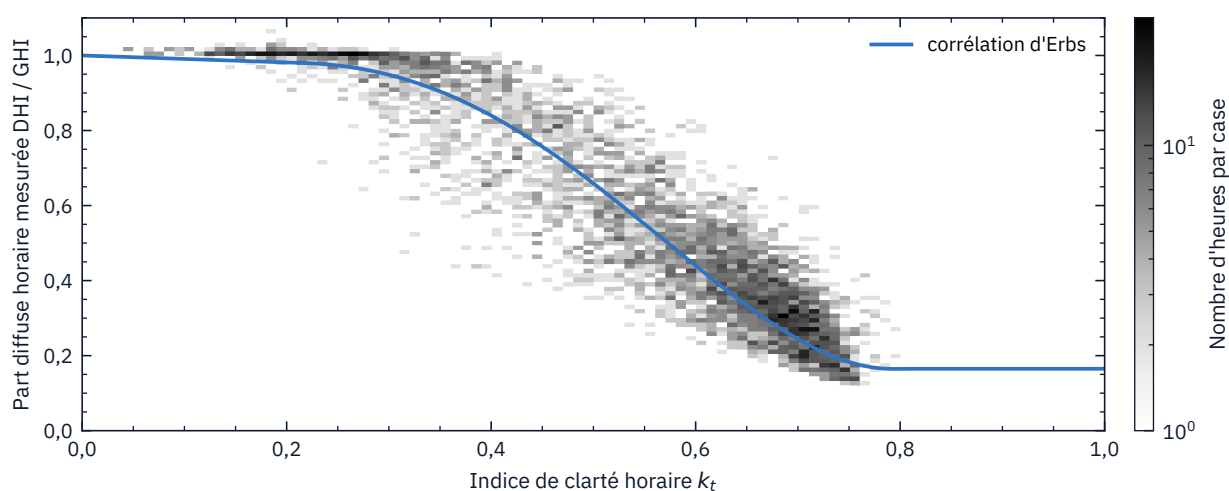




La transposition

Du rayonnement horizontal au plan des modules, vérifié sur les mesures de Kankan et de Tarambaly



Part diffuse horaire mesurée à Kankan en fonction de l'indice de clarté, 7 565 heures d'octobre 2021 à octobre 2023, et corrélation d'Erbs (courbe). Section 3.

Siba Kalivogui

Ingénieur efficacité énergétique

Énergie solaire | Octobre 2026 | v2.0 | CC BY-NC-SA 4.0

Données : ESMAP/WAPP Kankan et Tarambaly

kumascience.com

Du plan horizontal au plan des modules

Une série de rayonnement donne souvent le GHI sur un plan horizontal. Pour estimer ce que reçoit un module incliné, il faut connaître la part directe, la part diffuse et le rayonnement réfléchi par le sol. Quand la série ne fournit que le GHI, il faut d'abord retrouver les deux composantes manquantes. À Kankan et à Tarambaly, les mesures séparées du GHI, du DNI et du DHI permettent de vérifier cette estimation, puis de calculer le rayonnement reçu par un plan incliné. Sur deux années à Kankan, un plan incliné de 10° vers le sud reçoit 1,9 % de plus que l'horizontale sur l'année, et 5,0 % de moins en juin.

Ce guide suppose acquis les guides 1 à 4. Données : stations ESMAP/WAPP de Kankan et de Tarambaly, mesures à la minute d'octobre 2021 à octobre 2023, moyennées à l'heure, niveau de confiance **A**. Calculs avec pvlib [6]. Notations et unités : guide 0, section 9. Licence CC BY-NC-SA 4.0.

Table des matières

1 Les trois termes du rayonnement sur un plan	3
2 Deux modèles de ciel	3
3 Retrouver le direct et le diffus à partir du global	4
4 L'effet de la décomposition sur le plan	5
5 Isotrope ou Perez	5
6 Le plan orienté au sud en juin	6
7 Calculer sur des totaux	7
8 Exercices	8
9 Résumé	9
Références	10

1 Les trois termes du rayonnement sur un plan

Un plan de pente β et d'azimut γ (guide 2) reçoit le rayonnement direct du disque solaire, le diffus d'une partie du ciel et le rayonnement réfléchi par le sol qu'il voit :

$$G_T = \text{DNI} \max(0, \cos \theta) + \text{DHI} F_{\text{ciel}} + \rho \text{GHI} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (1)$$

où θ est l'angle d'incidence du guide 2 et ρ l'albédo du sol. Le terme $\max(0, \cos \theta)$ annule le direct quand le Soleil éclaire l'arrière du plan. Le facteur F_{ciel} dépend du modèle de ciel (section 2). Le dernier terme suppose un sol uniforme qui réfléchit de façon égale dans toutes les directions. En l'absence de mesure d'albédo sur les stations, ce guide prend $\rho = 0,2$; pour une pente de 10° , le terme réfléchi vaut alors 0,15 % du GHI, et 1,3 % pour 30° .

1.1 Le rapport R_b et son domaine d'emploi

Quand seul le direct horizontal $\text{DNI} \cos \theta_z$ est connu, on le transpose par le rapport géométrique

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

Près de l'horizon, $\cos \theta_z$ tend vers zéro et R_b prend des valeurs très grandes : une petite erreur sur l'angle ou sur le direct horizontal devient une grosse erreur sur le plan. Quand le DNI est disponible, on l'utilise directement dans l'équation 1. Sinon, on n'emploie R_b que pour des angles zénithaux inférieurs à 85° environ, ou on le plafonne.

Plan de 10° plein sud à Kankan, le 9 novembre 2022, de 12h00 à 13h00

Le pas horodaté 12 :00 couvre 12h00 à 13h00 UTC ; on calcule la géométrie à 12h30 (guide 1). À cet instant, $\theta_z = 27,38^\circ$, $\cos \theta_z = 0,888$, et le Soleil est à $4,7^\circ$ à l'ouest du sud. Pour le plan, $\cos \theta = 0,9541$, d'où $R_b = 1,074$.

Les moyennes horaires mesurées valent $\text{GHI} = 930,4$, $\text{DNI} = 912,9$ et $\text{DHI} = 116,3 \text{ W/m}^2$. La fermeture du guide 3 tient : $912,9 \times 0,888 + 116,3 = 926,9 \text{ W/m}^2$, soit $-0,4 \%$.

Avec un ciel isotrope, $F_{\text{ciel}} = (1 + \cos 10^\circ)/2 = 0,9924$:

$$G_T = 912,9 \times 0,9541 + 116,3 \times 0,9924 + 0,2 \times 930,4 \times 0,0076 = 871,0 + 115,4 + 1,4 = 987,8 \text{ W/m}^2.$$

Le modèle de Perez donne $995,7 \text{ W/m}^2$ pour la même heure.

2 Deux modèles de ciel

Le modèle isotrope de Liu et Jordan [1] suppose un ciel d'égale luminance. Le plan en voit la fraction $(1 + \cos \beta)/2$:

$$F_{\text{ciel}}^{\text{iso}} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (3)$$

Le ciel réel est plus lumineux autour du disque solaire (diffus circumsolaire) et près de l'horizon. Le modèle de Perez [4] représente ces deux zones par des coefficients qui dépendent de la clarté et de la luminosité du ciel, calculées à partir du DHI, du DNI et de la hauteur du Soleil. Ses coefficients sont tabulés ; pvlib les applique directement. Pour un plan tourné vers le Soleil, il donne plus de diffus que le modèle isotrope quand le ciel est clair.

3 Retrouver le direct et le diffus à partir du global

La plupart des bases de données ne publient que le GHI, ou un DNI et un DHI modélisés. La corrélation d'Erbs [3] estime la part diffuse $k_d = \text{DHI}/\text{GHI}$ à partir de l'indice de clarté horaire k_t du guide 3 :

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0,09 k_t & k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 k_t + 4,388 k_t^2 - 16,638 k_t^3 + 12,336 k_t^4 & 0,22 < k_t \leq 0,80 \\ 0,165 & k_t > 0,80 \end{cases} \quad (4)$$

On en déduit $\text{DHI} = k_d \text{GHI}$, puis le DNI par la relation de fermeture.

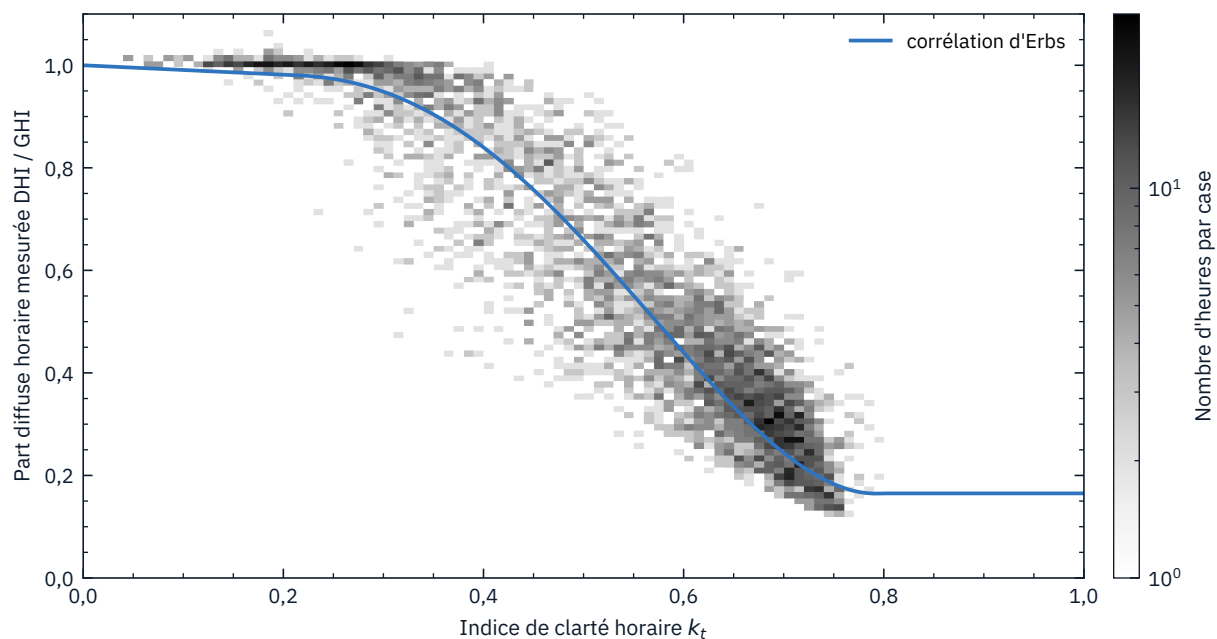


Figure 1 : Part diffuse horaire mesurée à Kankan en fonction de l'indice de clarté horaire (heures où le Soleil dépasse 10° et où le GHI dépasse 50 W/m^2 , 7 565 heures), et corrélation d'Erbs.

À une même clarté correspondent des parts diffuses très différentes (figure 1) : l'indice de clarté ne dit pas si la lumière manquante a été retenue par des nuages, qui diffusent beaucoup, ou par de la poussière, qui diffuse autrement.

Corrélation d'Erbs face aux composantes mesurées

À Kankan, sur 7 565 heures, Erbs sous-estime le DHI de 8,7 % et surestime le DNI de 5,5 %. L'écart quadratique moyen horaire atteint 28,7 % sur le DHI et 25,1 % sur le DNI. De novembre à mars, les biais restent faibles (−3,2 % sur le DHI, −0,8 % sur le DNI) ; ils dépassent 10 % le reste de l'année.

À Tarambaly, sur 7 408 heures, Erbs sous-estime le DHI de 13,1 % et surestime le DNI de 9,1 %, avec des écarts quadratiques de 33,4 et 26,0 %.

Source : fichiers ESMAP/WAPP, moyennes horaires | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

Pour l'heure de l'exemple, Erbs donne un DHI de $168,7 \text{ W/m}^2$ au lieu de $116,3$, et un DNI de $857,8 \text{ W/m}^2$ au lieu de $912,9$. Un biais moyen faible, comme celui de la saison sèche, peut donc coexister avec de fortes erreurs d'une heure à l'autre.

4 À 10° de pente, l'erreur de décomposition pèse peu sur le rayonnement du plan

Pour isoler l'effet de la décomposition, on calcule le rayonnement du plan avec le même modèle de ciel (Perez), une fois avec les composantes mesurées, une fois avec celles d'Erbs.

Rayonnement du plan calculé avec Erbs ou avec les composantes mesurées

À Kankan, pour un plan de 10° au sud, le total calculé avec Erbs dépasse de 0,3 % celui calculé avec les composantes mesurées, et l'écart quadratique horaire vaut 1,5 %. Pour 30°, l'écart quadratique horaire passe à 2,4 %. À Tarambaly, il vaut 1,2 % à 10° et 2,2 % à 30°.

Source : fichiers ESMAP/WAPP, moyennes horaires | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

Un plan peu incliné voit presque tout le ciel et presque tout le disque solaire comme le verrait un plan horizontal : répartir le global entre direct et diffus change peu ce qu'il reçoit. L'erreur de décomposition grandit avec la pente. Ce résultat vaut pour ces deux stations et pour des pentes de 10 à 30° ; il ne se transpose pas à un plan vertical ni à un suiveur, pour lesquels la répartition entre direct et diffus compte beaucoup plus.

5 Sur l'année, entre ciel isotrope et Perez, l'écart reste sous 2 % à 10 et 15°

Modèle isotrope face au modèle de Perez

À Kankan, avec les composantes mesurées, le modèle isotrope donne 0,9 % de moins que Perez pour un plan de 10° au sud, 1,2 % de moins pour 15° et 1,7 % de moins pour 30°. De novembre à mars, l'écart atteint 2,0 % à 10° et 4,8 % à 30° ; de juin à septembre, il s'inverse (+0,5 et +2,7 %). Les chiffres de Tarambaly sont très proches.

Source : fichiers ESMAP/WAPP, composantes mesurées | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

L'écart est le plus grand en saison sèche, quand le diffus circumsolaire pèse le plus, et change de signe en saison des pluies. Aucune des deux stations ne mesure le rayonnement dans un plan incliné ; ce guide ne peut donc pas dire lequel des deux modèles est le plus juste. Les deux modules photovoltaïques de mesure de salissure installés sur les stations sont inclinés vers le sud, mais le rapport de mesure précise qu'ils ne sont pas étalonnés et ne doivent servir qu'à estimer la salissure [7] ; ils ne sont pas utilisés ici.

6 À Kankan, en juin, un plan de 10° au sud reçoit 5 % de moins que l'horizontale

Le guide 2 a calculé, sans atmosphère, le rapport entre un plan incliné et un plan horizontal. Les mesures donnent ce rapport au sol (figure 2).

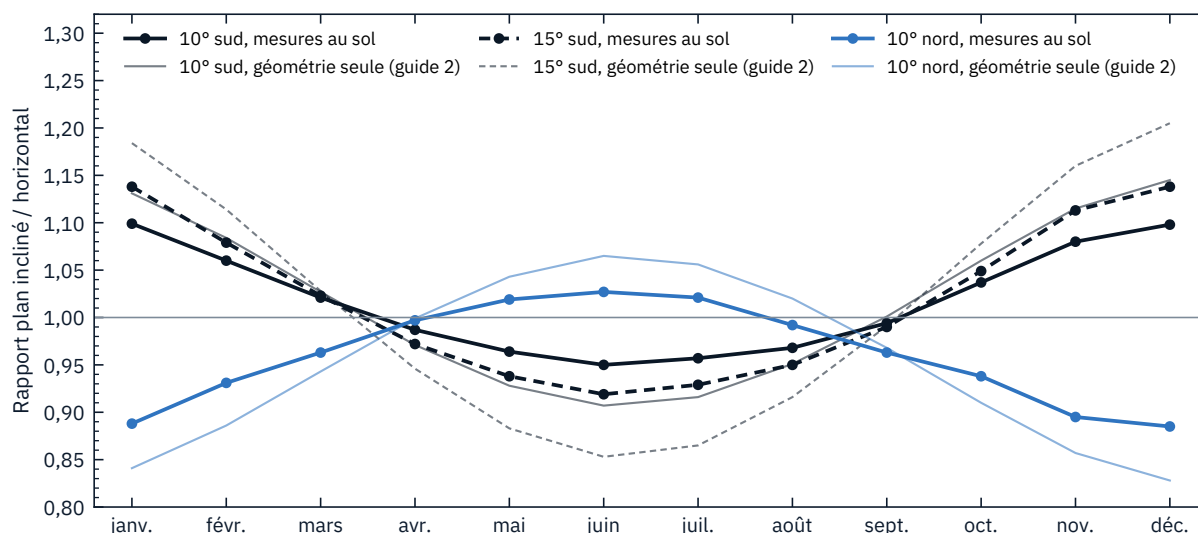


Figure 2 : Rapport, mois par mois, entre le rayonnement reçu par un plan incliné et par un plan horizontal à Kankan. Traits épais : composantes mesurées et modèle de Perez, albédo 0,2 (octobre 2021 à octobre 2023). Traits fins : calcul géométrique sans atmosphère du guide 2.

Plans inclinés et plan horizontal au sol

À Kankan, un plan de 10° au sud reçoit en juin 5,0 % de moins que l'horizontale, contre 9,3 % dans le calcul sans atmosphère du guide 2. En décembre, il reçoit 9,8 % de plus, contre 14,5 %. Sur l'année, il gagne 1,9 %. Un plan de 15° au sud perd 8,1 % en juin et gagne 2,1 % sur l'année. Un plan de 10° au nord gagne 2,7 % en juin et perd 4,1 % sur l'année. À Tarambaly, le plan de 10° au sud perd 4,9 % en juin et gagne 2,2 % sur l'année.

Source : fichiers ESMAP/WAPP, composantes mesurées, modèle de Perez | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

La perte de juin au sol est à peu près la moitié de la perte géométrique. En saison des pluies, le diffus représente 57 à 58 % du global (guide 3) ; il arrive de tout le ciel et dépend peu de l'orientation du plan. Le gain de décembre est réduit pour la même raison, mais moins, car le direct domine en saison sèche.

Ces rapports décrivent le rayonnement reçu. Ils ne suffisent pas à choisir une orientation : la production dépend aussi de la température des modules, de la salissure et du profil de consommation, que traitent les guides suivants.

7 Projeter le DNI du jour avec l'angle du midi surestime le plan de 13 %

Quand on ne dispose que de totaux journaliers ou mensuels, on est tenté de les transposer avec la géométrie d'un seul instant, le midi solaire. Tout dépend de la grandeur qu'on projette.

- Méthode correcte pour un plan peu incliné orienté au sud. On multiplie le direct horizontal du jour par le rapport R_b du midi, ou, au pas mensuel, par le rapport moyen $\bar{R}_b$ de Klein [2], qui intègre la géométrie sur la journée du jour moyen du mois. Pour un plan orienté à l'est ou à l'ouest, ou fortement incliné, un calcul journalier reste imprécis même avec un rapport intégré : il ignore la répartition du direct entre le matin et l'après-midi. On calcule alors heure par heure.
- Méthode erronée. On multiplie le DNI total du jour par le cosinus de l'angle d'incidence du midi, comme si le Soleil était resté toute la journée à sa position de midi.

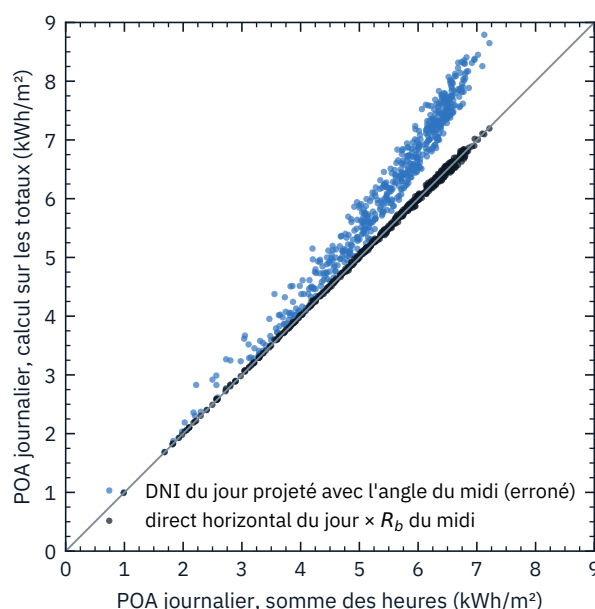


Figure 3 : Rayonnement journalier d'un plan de 10° au sud à Kankan : calcul sur les totaux du jour, selon les deux méthodes, face à la somme des 24 valeurs horaires (modèle isotrope, composantes mesurées, 563 jours complets).

Calcul sur des totaux face à la somme des heures

Pour un plan de 10° au sud à Kankan, la méthode correcte au pas journalier s'écarte de la somme des heures de +0,2 % sur l'ensemble des jours, et la méthode de Klein au pas mensuel de -0,1 %. La projection du DNI journalier avec l'angle du midi surestime le plan de 12,8 %, avec un écart compris entre +3,9 et +19,3 % pour 80 % des jours. À Tarambaly, cette surestimation atteint 14,6 %.

Source : fichiers ESMAP/WAPP, composantes mesurées | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

Le direct horizontal intègre déjà la baisse du Soleil au matin et au soir ; le rapport R_b du midi, pour un plan peu incliné, en change peu la valeur. Le DNI, lui, mesure le faisceau sur une surface toujours tournée vers le Soleil. Le projeter avec l'angle du midi revient à

supposer que le Soleil est resté toute la journée à sa hauteur de midi, ce qui surestime le rayonnement du plan.

À retenir

Pour transposer un total journalier ou mensuel, projeter le direct horizontal, pas le DNI. Pour contrôler un outil, comparer son résultat à la somme des valeurs horaires sur quelques jours de données.

8 Exercices

Exercice 1 (application)

Pour l'heure de l'exemple, recalculer le rayonnement du plan si l'on utilise le DHI et le DNI d'Erbs (168,7 et 857,8 W/m²) avec le modèle isotrope.

Corrigé

On reprend l'équation 1 et les facteurs de l'exemple : $\cos \theta = 0,9541$, $F_{\text{ciel}} = 0,9924$, terme réfléchi 1,4 W/m² (il ne dépend que du GHI, inchangé).

Étape 1, le direct : $857,8 \times 0,9541 = 818,4$ W/m², contre 871,0 avec le DNI mesuré.

Étape 2, le diffus : $168,7 \times 0,9924 = 167,4$ W/m², contre 115,4.

Étape 3, la somme : $818,4 + 167,4 + 1,4 = 987,3$ W/m², contre 987,8 avec les composantes mesurées.

Erbs donne 52,6 W/m² de direct en moins et 52,0 de diffus en plus : les deux erreurs se compensent presque, parce que sur ce plan peu incliné le direct et le diffus sont multipliés par des facteurs voisins (0,95 et 0,99).

Exercice 2 (application)

Pour un plan de 30°, calculer le facteur de ciel isotrope et le facteur de sol. Quelle part du GHI représente le terme réfléchi avec $\rho = 0,2$?

Corrigé

Étape 1 : $\cos 30^\circ = 0,866$.

Étape 2, le facteur de ciel (équation 3) : $(1 + 0,866)/2 = 0,933$. Le plan voit 93 % de la voûte céleste.

Étape 3, le facteur de sol : $(1 - 0,866)/2 = 0,067$.

Étape 4, le terme réfléchi : $\rho \times 0,067 = 0,2 \times 0,067 = 0,013$, soit 1,3 % du GHI.

Exercice 3 (application)

Une heure où le Soleil est à 3° au-dessus de l'horizon, à l'est, un plan orienté au sud a $\cos \theta = 0,10$. Calculer R_b . Pourquoi faut-il s'en méfier ?

Corrigé

Étape 1 : le Soleil est à 3° de hauteur, donc $\theta_z = 87^\circ$ et $\cos \theta_z = \cos 87^\circ = \sin 3^\circ = 0,052$.

Étape 2, l'équation 2 : $R_b = 0,10/0,052 = 1,9$.

Étape 3, la conséquence : le direct du plan vaut R_b fois le direct horizontal. Une erreur de 10 W/m² sur le direct horizontal devient une erreur de $1,9 \times 10 = 19$ W/m² sur le plan. Près de l'horizon, les erreurs sur le direct horizontal sont fréquentes, et le petit dénominateur les amplifie.

Exercice 4 (application)

Avec $k_t = 0,50$, calculer la part diffuse d'Erbs.

Corrigé

$k_t = 0,50$ est entre 0,22 et 0,80 : on prend la deuxième ligne de l'équation 4.

Étape 1, les puissances : $k_t^2 = 0,25$, $k_t^3 = 0,125$, $k_t^4 = 0,0625$.

Étape 2, les termes : $0,1604 \times 0,50 = 0,0802$; $4,388 \times 0,25 = 1,0970$; $16,638 \times 0,125 = 2,0798$; $12,336 \times 0,0625 = 0,7710$.

Étape 3, la somme : $0,9511 - 0,0802 + 1,0970 - 2,0798 + 0,7710 = 0,659$. Pour un ciel à moitié transparent, le diffus fait environ deux tiers du global.

Exercice 5 (Python)

Avec pvlib et les moyennes horaires d'une station, calculer le rayonnement d'un plan de 10° au sud avec `get_total_irradiance`, une fois avec `model="isotropic"`, une fois avec `model="perez"`. Retrouver l'écart de la section 5 pour le mois de janvier.

Corrigé

Calculer la géométrie au centre de chaque heure, fournir `dni_extra` et `airmass` pour Perez, puis sommer par mois. À Kankan, pour les heures où le Soleil dépasse 10° , le modèle isotrope donne 2,3 % de moins que Perez en janvier.

Exercice 6 (pour aller plus loin)

Refaire la section 6 pour un plan de 10° au sud en remplaçant les composantes mesurées par celles d'Erbs. La perte de juin change-t-elle ?

Corrigé

Question ouverte. D'après la section 4, l'écart sur le total est faible à 10° ; le calcul dira s'il reste faible mois par mois.

9 Résumé

1. $G_T = \text{DNI} \max(0, \cos \theta) + \text{DHI} F_{\text{ciel}} + \rho \text{GHI}(1 - \cos \beta)/2$; la géométrie se calcule au centre du pas.
2. À Kankan, un plan de 10° au sud reçoit 5 % de moins que l'horizontale en juin et 1,9 % de plus sur l'année ; la perte au sol est à peu près la moitié de la perte géométrique.
3. Un total se transpose en projetant le direct horizontal ; projeter le DNI du jour avec l'angle du midi surestime le plan de 13 à 15 %.

Le guide 6 passe du rayonnement du plan à la production électrique : température des modules, pertes, et rendement de l'installation.

Références

- [1] B. Y. H. Liu, R. C. Jordan, « A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors », *Solar Energy*, vol. 7, n° 2, p. 53-74, 1963.
- [2] S. A. Klein, « Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces », *Solar Energy*, vol. 19, p. 325-329, 1977.
- [3] D. G. Erbs, S. A. Klein, J. A. Duffie, « Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation », *Solar Energy*, vol. 28, n° 4, p. 293-302, 1982.
- [4] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, « Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance », *Solar Energy*, vol. 44, n° 5, p. 271-289, 1990.
- [5] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4^e édition, Wiley, 2013, chapitre 2.
- [6] W. F. Holmgren, C. W. Hansen, M. A. Mikofski, « pvlib python : a python package for modeling solar energy systems », *Journal of Open Source Software*, vol. 3, n° 29, 884, 2018.
- [7] World Bank, ESMAP, WAPP, *Solar resource measurement campaign in West Africa*, stations de Kankan et de Tarambaly (Guinée), données à la minute et rapports de mesure, 2021-2023, licence CC BY 4.0. <https://energydata.info>.



Kuma Science

Kuma Science construit les référentiels de données énergétiques de l'Afrique de l'Ouest, en commençant par la Guinée. Chaque chiffre publié porte sa source et son niveau de confiance.