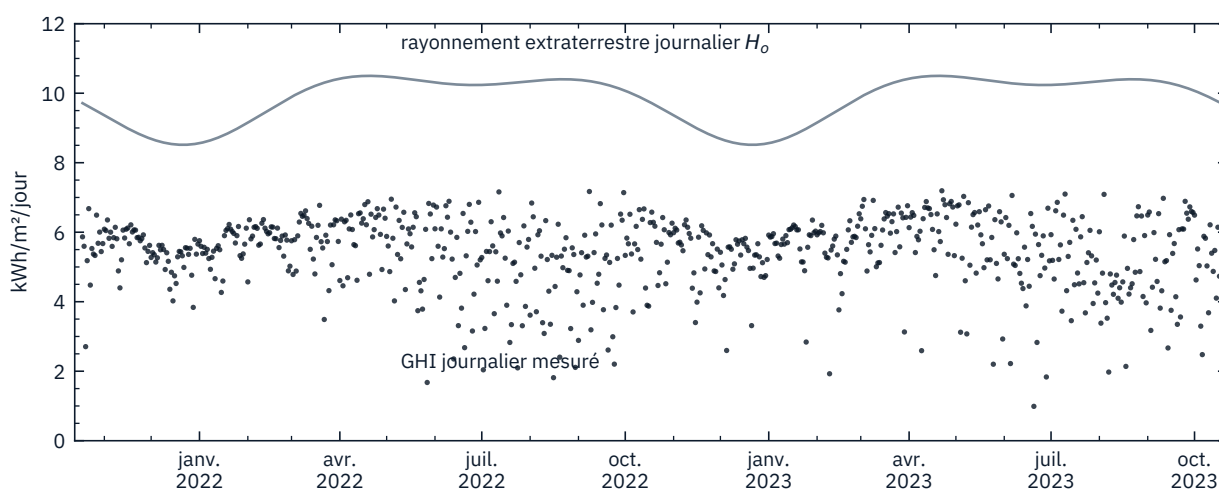




Collection guides solaires | Guide 3

La ressource solaire

Global, direct et diffus : ce que mesure une station, ce que donnent les bases de données



GHI journalier mesuré au sol à Kankan, 730 jours d'octobre 2021 à octobre 2023, sous le rayonnement extraterrestre journalier H_0 calculé pour le même lieu. Sections 1 et 5.

Siba Kalivogui

Ingénieur efficacité énergétique

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

Données : RDS Guinée 2.0.1, ESMAP/WAPP Kankan et Tarambaly

kumascience.com

Une station, quatre bases de données

Sur ses 23 mois complets, de novembre 2021 à septembre 2023, la station au sol de Kankan a reçu en moyenne 5,42 kWh/m² de rayonnement global par jour. Sur les mêmes mois, NASA POWER en donne 3,0 % de plus, ERA5-Land 3,9 % et SARA-3 11,2 %. Pour le rayonnement direct, CAMS dépasse la mesure de 28 %. Les quatre bases sont gratuites, largement utilisées, et aucune n'est fautive par construction. Ce guide explique ce qu'elles mesurent, comment les comparer, et ce que ces écarts signifient pour une étude.

Ce guide suppose acquis le calcul de la position du Soleil (guides 1 et 2). Données : RDS Guinée 2.0.1 ([doi:10.5281/zenodo.21051754](https://doi.org/10.5281/zenodo.21051754)), niveau de confiance **B**; stations ESMAP/WAPP de Kankan et de Tarambaly, mesures à la minute, niveau **A**. Notations et unités : guide 0, section 9. Licence CC BY-NC-SA 4.0.

Table des matières

1	Au sommet de l'atmosphère, 1 361 W/m²	3
2	La traversée de l'atmosphère	4
3	Global, direct et diffus	5
4	La fermeture sur les deux stations	5
5	Le diffus mesuré	6
6	L'indice de clarté	8
7	Les bases de données face à la station	9
8	L'écart entre bases selon la localité	11
9	La rupture du diffus en 2001	12
10	Exercices	13
11	Résumé	15
	Références	16

1 Au sommet de l'atmosphère, 1 361 W/m²

1.1 La constante solaire

Constante solaire G_{sc}

Éclairement du rayonnement solaire reçu hors de l'atmosphère par une surface perpendiculaire aux rayons, à la distance moyenne entre la Terre et le Soleil. Les radiomètres spatiaux donnent $G_{sc} = 1\,361\text{ W/m}^2$ [1].

De nombreux manuels et logiciels utilisent encore $1\,367\text{ W/m}^2$, valeur antérieure aux mesures récentes. L'écart, 0,4 %, compte peu dans une étude, mais il faut savoir quelle valeur un outil emploie avant de comparer ses résultats à un autre.

1.2 Au fil de l'année

La distance entre la Terre et le Soleil varie de $\pm 1,7\%$ sur l'orbite. L'éclairement variant comme l'inverse du carré de la distance, il varie de $+3,4\%$ à $-3,3\%$:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \quad (1)$$

Le maximum tombe début janvier, au périhélie, et le minimum début juillet. Sur un plan horizontal, l'éclairement extraterrestre vaut $G_o = G_{on} \cos \theta_z$, avec l'angle zénithal du guide 2.

Éclairement extraterrestre à Kaloum le 15 mars à 12h00

Le 15 mars ($n = 74$), $G_{on} = 1\,361 \times (1 + 0,033 \cos 73,0) = 1\,374\text{ W/m}^2$. Le guide 2 a donné $\cos \theta_z = 0,9396$ à cet instant, d'où $G_o = 1\,374 \times 0,9396 = 1\,291\text{ W/m}^2$. Aucune mesure au sol ne peut dépasser durablement cette valeur à cet instant.

1.3 Sur une journée

En intégrant G_o du lever au coucher, on obtient le rayonnement extraterrestre journalier sur un plan horizontal [4] :

$$H_o = \frac{24 \times 3\,600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (2)$$

en J/m², à diviser par $3,6 \times 10^6$ pour l'obtenir en kWh/m², avec ω_s l'angle horaire du coucher (guide 2) en degrés. À Kaloum, le 15 mars, $H_o = 10,23\text{ kWh/m}^2$. À Kankan, H_o varie sur l'année entre $8,51\text{ kWh/m}^2$ fin décembre et $10,50\text{ kWh/m}^2$; à Koundara, entre $8,21$ et $10,56$; à Lola, entre $8,87$ et $10,45$.

La figure 1 place les 730 jours mesurés à Kankan sous leur plafond extraterrestre. Même les journées les plus claires restent nettement en dessous. Le jour le plus lumineux atteint 71 % de H_o .

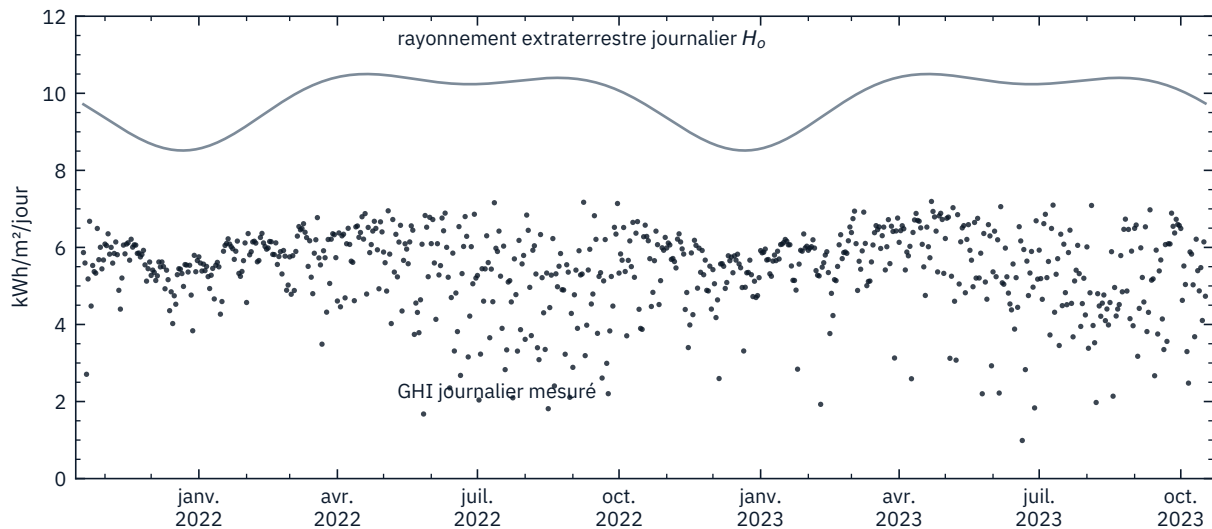


Figure 1 : GHI journalier mesuré au sol à Kankan (points, 730 jours) et rayonnement extraterrestre journalier H_o calculé par l'équation 2 (courbe). Station ESMAP/WAPP, pyranomètre Kipp & Zonen CMP10.

2 La traversée de l'atmosphère

Entre le sommet de l'atmosphère et le sol, deux mécanismes réduisent et redistribuent le rayonnement. L'absorption par l'ozone, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone retire de l'énergie, qui chauffe l'atmosphère. La diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les gouttelettes des nuages dévie une partie des photons. Certains repartent vers l'espace, les autres arrivent au sol depuis tout le ciel au lieu du seul disque solaire.

L'ampleur de ces prélèvements dépend du chemin parcouru, mesuré par la masse d'air AM . Au premier ordre, $AM = 1/\cos \theta_z$. Quand le Soleil est bas, l'expression de Kasten et Young tient compte de la courbure de la Terre [5] :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z + 0,50572 (96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}} \quad (3)$$

avec θ_z en degrés. Les deux formes coïncident à 60° ($AM \approx 2$) et divergent près de l'horizon. À 85° , la sécante donne 11,5 et Kasten et Young 10,3.

En Guinée, le Soleil de midi ne s'éloigne jamais de plus de $35,9^\circ$ du zénith (Koundara, 21 décembre). La masse d'air de midi y reste inférieure à 1,24 toute l'année (1,234 au plus). La quantité de rayonnement perdue en chemin dépend donc surtout de ce que contient l'atmosphère : vapeur d'eau, poussières de l'harmattan, nuages de la saison des pluies.

3 Global, direct et diffus

Les trois composantes au sol

- DNI (*direct normal irradiance*) : éclairement du rayonnement qui arrive en ligne droite du disque solaire, mesuré sur une surface perpendiculaire aux rayons.
- DHI (*diffuse horizontal irradiance*) : éclairement du rayonnement qui arrive du reste du ciel, mesuré sur une surface horizontale.
- GHI (*global horizontal irradiance*) : éclairement total reçu par une surface horizontale.

Le direct reçu par l'horizontale est la projection du DNI par l'angle zénithal, et le global en est la somme avec le diffus :

$$GHI = DNI \cos \theta_z + DHI \quad (4)$$

Cette relation définit les grandeurs ; elle ne modélise rien. Deux composantes et la géométrie suffisent à reconstituer la troisième.

Chaque composante a son instrument. Un pyranomètre, capteur horizontal sous coupole de verre, mesure le GHI. Un pyréliomètre, tube collimaté monté sur un suiveur, mesure le DNI. Un pyranomètre dont une bille, portée par le même suiveur, masque en permanence le disque solaire mesure le DHI.

Deux stations de la campagne ESMAP/WAPP de la Banque mondiale sont installées en Guinée : Kankan, en Haute-Guinée (375 m), et Tarambaly, dans le Fouta-Djalón, à 16 km de Labé (860 m). Chacune mesure les trois composantes à la minute, avec deux pyranomètres Kipp & Zonen CMP10 et un pyréliomètre CHP1 montés sur un suiveur SOLYS2, d'octobre 2021 à octobre 2023. Le RDS ne publie que le GHI et le DNI de Kankan, au pas journalier et mensuel ; ce guide utilise directement les fichiers à la minute publiés par la Banque mondiale, qui contiennent aussi le DHI et la station de Tarambaly.

Erreur fréquente : fermer au pas horaire

Sur des moyennes horaires, le produit $\overline{DNI} \times \overline{\cos \theta_z}$ n'est pas égal à la moyenne de $DNI \cos \theta_z$. L'écart est faible au milieu de la journée et devient sensible au lever et au coucher. Pour une fermeture exacte, il faut travailler au pas de mesure, ici la minute.

4 À Kankan et à Tarambaly, la fermeture tient à quelques pourcents près

Quand une station mesure les trois composantes, l'équation 4 devient un contrôle de qualité : les trois instruments doivent s'accorder minute par minute. Le réseau BSRN, qui fixe les pratiques des stations de référence, tolère un écart de $\pm 8\%$ quand le Soleil est à plus de 15° au-dessus de l'horizon [3]. On applique ici le test dans ce domaine, aux minutes où le Soleil dépasse 15° de hauteur et où le GHI dépasse 50 W/m^2 .

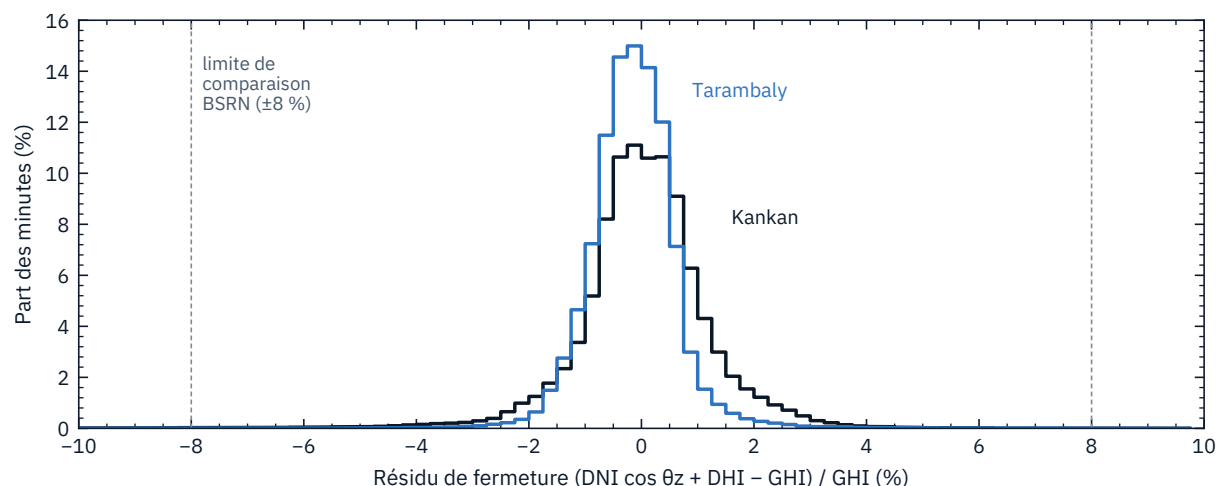


Figure 2 : Distribution du résidu de fermeture minute par minute aux stations de Kankan et de Tarambaly (hauteur du Soleil supérieure à 15° , GHI supérieur à 50 W/m^2), par tranches de 0,25 %. Tirets : tolérance de comparaison du réseau BSRN.

Fermeture des trois composantes mesurées

À Kankan, sur 424 579 minutes, le résidu médian vaut $+0,04 \%$ et 90 % des minutes se situent entre $-2,0$ et $+1,9 \%$. À Tarambaly, sur 414 677 minutes, il vaut $-0,16 \%$ et 90 % des minutes se situent entre $-1,4$ et $+1,0 \%$. La tolérance de $\pm 8 \%$ est respectée par 99,0 % des minutes à Kankan et 99,8 % à Tarambaly.

Source : fichiers ESMAP/WAPP à la minute, Kankan et Tarambaly | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

Les trois instruments de chaque station concordent donc largement mieux que la tolérance. Ce résultat qualifie la cohérence des mesures entre elles; il ne dispense pas de l'étalonnage de chaque instrument, que les rapports de la campagne documentent. Le résidu de Kankan est un peu plus dispersé, avec une traîne positive dont ce guide n'isole pas la cause.

5 Dans les deux stations, le diffus apporte près de la moitié du rayonnement

La figure 3 donne, mois par mois, les trois composantes mesurées à Kankan. La figure 4 compare la part du diffus dans les deux stations.

Part du diffus dans le rayonnement global

À Kankan, le diffus représente 47,5 % du global sur les deux années : 31 % en janvier, 39 % de novembre à mars, 57 % de juin à septembre, avec un maximum de 62 % en août. De février à avril, la part reste proche de 47 %, avant les pluies.

À Tarambaly, elle vaut 45 % sur les deux années : 25 % en janvier, 34 % de novembre à mars, 58 % de juin à septembre, et 38 à 40 % de février à avril.

Source : fichiers ESMAP/WAPP à la minute, Kankan et Tarambaly | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

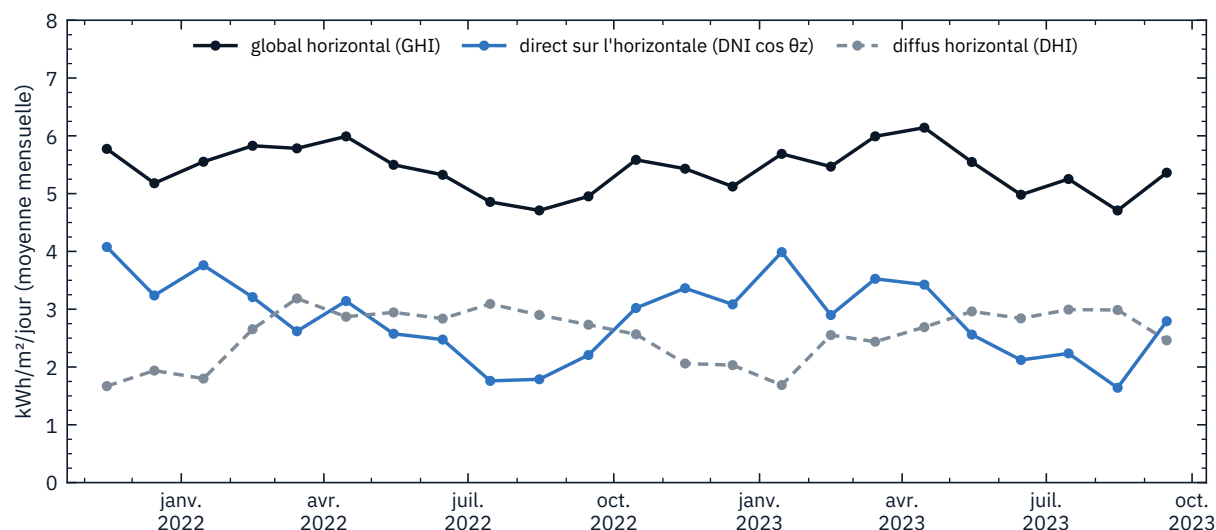


Figure 3 : Moyenne mensuelle de l'irradiation journalière à Kankan : GHI et DHI mesurés par pyranomètre, direct sur l'horizontale calculé minute par minute à partir du DNI mesuré par pyréliomètre. Mois complets de novembre 2021 à septembre 2023.

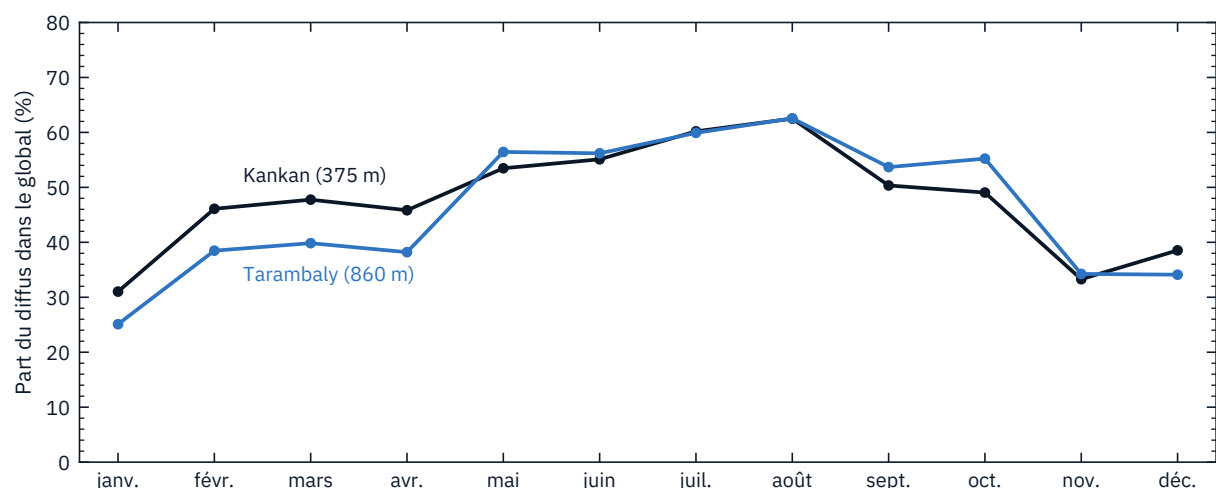


Figure 4 : Part du diffus dans le rayonnement global, mois par mois, aux stations de Kankan et de Tarambaly (deux années confondues, minutes où les trois composantes sont disponibles).

En saison des pluies, les deux stations se rejoignent : les nuages diffusent le rayonnement et le direct s'effondre. En saison sèche, la part du diffus est plus faible à Tarambaly qu'à Kankan, de 6 à 8 points de janvier à avril. Deux explications sont plausibles sans être isolées ici : l'altitude, qui réduit l'épaisseur d'atmosphère traversée (la pression y est inférieure d'environ 5 %), et une charge en poussière différente. De février à avril à Kankan, avant les pluies, la part élevée du diffus pourrait venir de la poussière de l'harmattan et des feux de brousse ; le guide 4 y revient avec les modèles de ciel clair.

Avec les seuls GHI et DNI horaires de la station, on aurait déduit une part du diffus de 48,0 % à Kankan, contre 47,5 % mesurés à la minute. La déduction par l'équation 4 tient donc bien sur cette station.

Cette répartition a une conséquence technique. Un module photovoltaïque convertit le direct comme le diffus. Un système à concentration n'utilise que le direct. À Kankan, le DNI mesuré passe d'environ 5,9 kWh/m²/jour en janvier à 2,3 en août, soit une ressource

divisée par plus de deux.

6 À Kankan, l'indice de clarté médian passe de 0,63 à 0,50 d'une saison à l'autre

Pour comparer des jours, des mois ou des sites, on rapporte le rayonnement global à son plafond extraterrestre :

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (5)$$

où H est le GHI journalier. L'indice de clarté journalier K_T est la fraction du rayonnement extraterrestre qui atteint le sol. Au pas horaire, on note $k_t = \text{GHI}/G_0$.

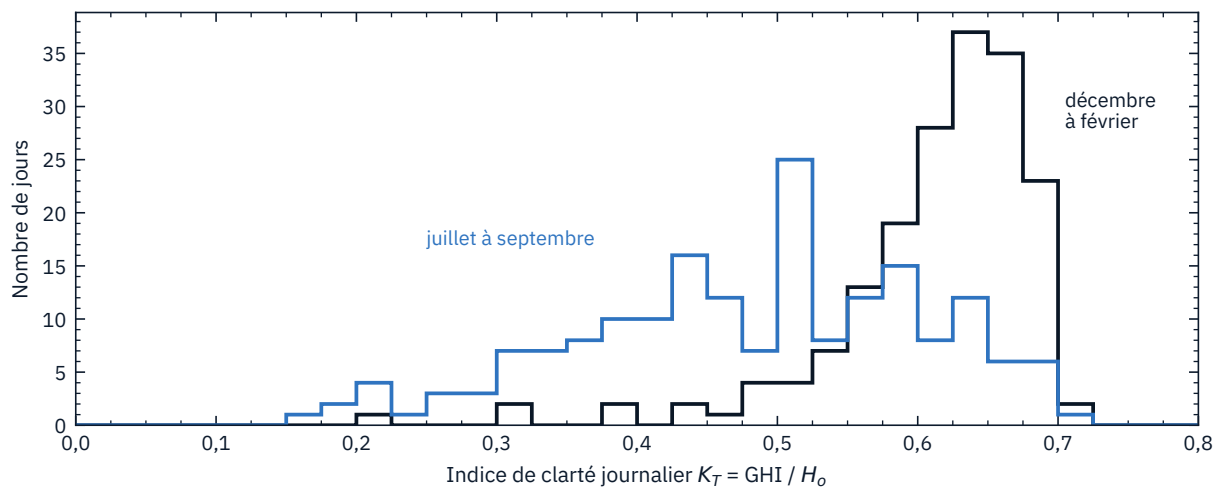


Figure 5 : Distribution de l'indice de clarté journalier mesuré à Kankan, de décembre à février (180 jours) et de juillet à septembre (184 jours), par tranches de 0,025.

Indice de clarté journalier à Kankan

De décembre à février, la médiane vaut 0,63 et 80 % des jours se situent entre 0,54 et 0,68. De juillet à septembre, la médiane tombe à 0,50 et 80 % des jours se situent entre 0,32 et 0,63. Aucun jour des deux années ne dépasse 0,71.

Source : station ESMAP/WAPP de Kankan, H_0 calculé | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

Les deux distributions se recouvrent en partie, mais leurs médianes sont séparées de 0,13 (figure 5). La saison sèche forme un pic étroit, et les journées se ressemblent. Celle de la saison des pluies s'étale, et une journée peut y recevoir deux fois moins qu'une autre. Pour le stockage d'un système autonome, cette dispersion compte autant que la moyenne. Les seuils souvent cités, $K_T > 0,65$ pour un ciel clair et $K_T < 0,30$ pour un ciel couvert, sont des repères. À Kankan, le premier n'est atteint que par un tiers des jours de décembre à février ; la brume sèche pourrait l'expliquer, sans que ces données l'isolent.

7 À Kankan, les bases s'écartent de la mesure de 3 à 28 %

7.1 Quatre familles de sources

Source	Méthode et résolution	Dans le RDS Guinée
NASA POWER	rayonnement dérivé de satellites (chaîne SRB jusqu'en 2000, CERES ensuite), maille de 1° (environ 110 km)	GHI, DNI, DHI; mensuel et journalier depuis 1984 (DNI depuis 2001), horaire 2001-2025
SARAH-3	satellite Meteosat, maille d'environ 5 km	GHI mensuel 2021-2023
ERA5-Land	réanalyse météorologique, grille de 0,1°	GHI mensuel 2001-2020, journalier 2021-2025
CAMS Radiation	satellite Meteosat et modèle d'aérosols, quelques kilomètres	DNI mensuel 2004-2023

Table 1 : Sources de rayonnement du RDS Guinée. Toutes relèvent du niveau de confiance B.

7.2 Écarts mensuels

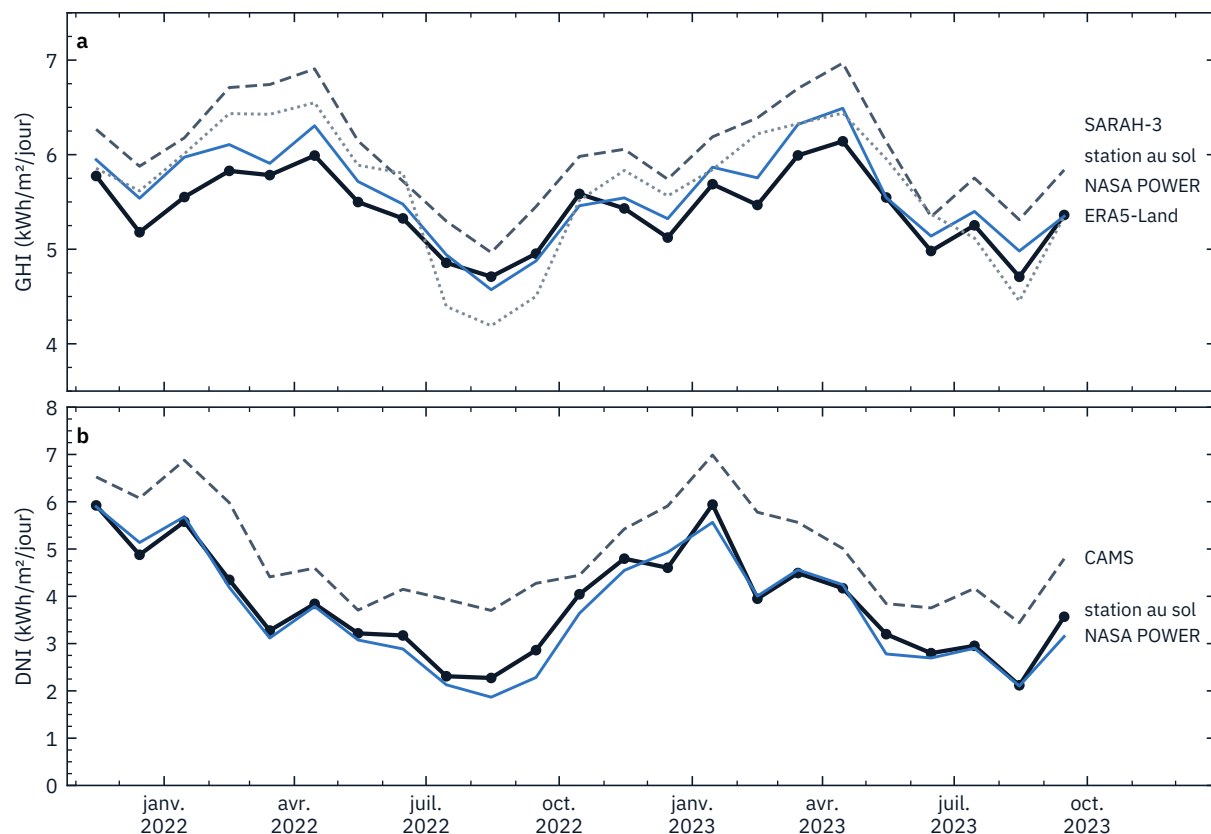


Figure 6 : Moyennes mensuelles de l'irradiation journalière à Kankan : mesure au sol (trait noir avec points) et bases de données. (a) GHI : NASA POWER (bleu), SARAH-3 (tirets), ERA5-Land (pointillés). (b) DNI : NASA POWER (bleu), CAMS (tirets). 23 mois complets.

Écart moyen des bases à la mesure de Kankan

Pour le GHI, NASA POWER dépasse la mesure de 3,0 % (4,4 % de novembre à mars, 1,5 % de juin à septembre). ERA5-Land la dépasse de 3,9 %, mais passe de +7,7 % en saison sèche à -2,4 % en saison des pluies. SARA3 la dépasse de 11,2 %, toute l'année.

Pour le DNI, NASA POWER est inférieur de 3,5 % (jusqu'à -9,2 % en saison des pluies). CAMS est supérieur de 28,4 % (46 % en saison des pluies).

Source : station ESMAP/WAPP de Kankan; RDS Guinée 2.0.1 | Période : nov. 2021 à sept. 2023, 23 mois | Niveau de confiance **B**

Le niveau de confiance de ces écarts est celui de la base comparée, B : la mesure sert de référence, mais l'écart qualifie la base.

Tarambaly permet de tester si ces écarts se transposent. La station tombe dans la même maille de 1° de NASA POWER que Labé et Pita, dont les séries de rayonnement sont identiques dans le RDS. Sur 730 jours, NASA POWER y présente un biais de +0,2 % (+1,5 % de novembre à mars, -2,4 % de juin à septembre), un écart quadratique moyen de 9,8 % et une corrélation de 0,89. Le biais de +2,8 % mesuré à Kankan ne se retrouve pas à Tarambaly : un biais établi en un point ne se transpose pas tel quel à un autre site, ni à une autre période. Le guide 8 traite cette question.

7.3 Un biais faible ne garantit pas de bons jours

Un écart moyen de quelques pourcents peut cacher une mauvaise restitution jour par jour. La figure 7 compare les deux bases qui publient un GHI journalier.

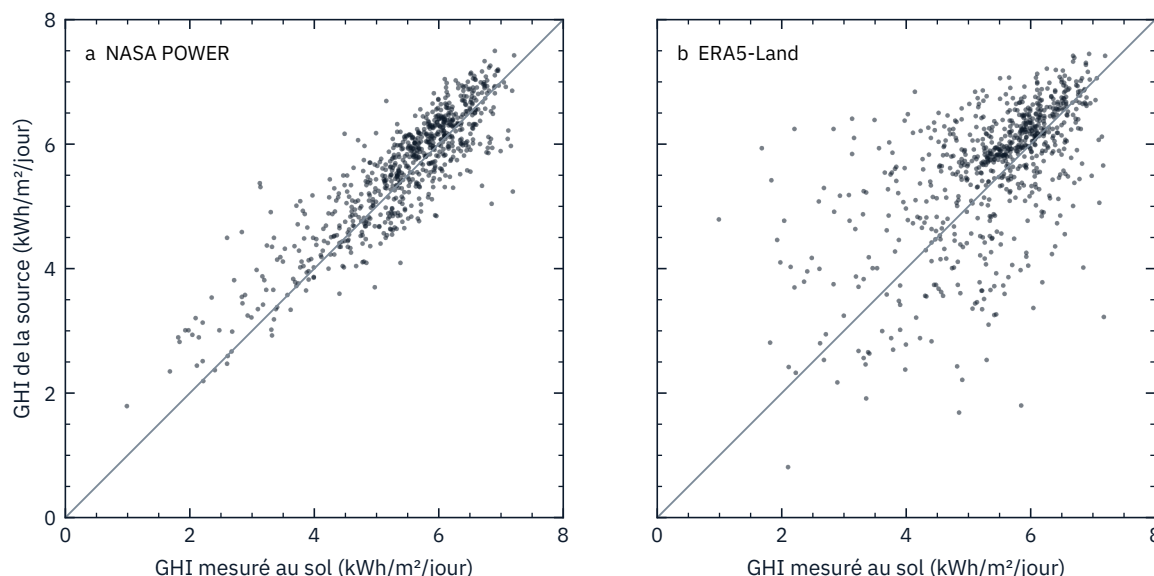


Figure 7 : GHI journalier de NASA POWER (a) et d'ERA5-Land (b) face à la mesure de Kankan, 730 jours. Diagonale : accord parfait.

Sur les 730 jours comparés à la station de Kankan, NASA POWER présente un écart quadratique moyen de 9,5 % et une corrélation de 0,89 avec la mesure; ERA5-Land, un écart quadratique moyen de 18,4 % et une corrélation de 0,58. Leurs biais moyens au pas journalier sont pourtant proches, +2,8 et +3,8 %. Pour une étude qui dépend de l'enchaînement des journées, comme le calcul d'un stockage, le biais moyen ne suffit donc pas à

choisir une base. Les réanalyses représentent souvent mal la nébulosité d'un jour donné, ce qui pourrait expliquer l'écart ; la comparaison présentée ici ne permet pas de l'isoler.

À retenir

Pour qualifier une base sur un site, la comparer à la mesure au sol la plus proche mois par mois, puis jour par jour. Le biais moyen dit si la base surestime ; l'écart quadratique et la corrélation disent si elle restitue les bonnes journées.

8 Entre NASA POWER et SARAH-3, l'écart va de 2,3 à 12,8 % selon la localité

Sans station au sol, on peut au moins comparer deux bases entre elles. La figure 8 donne, pour les 34 localités du RDS, l'écart mensuel médian entre NASA POWER et SARAH-3 sur le GHI.

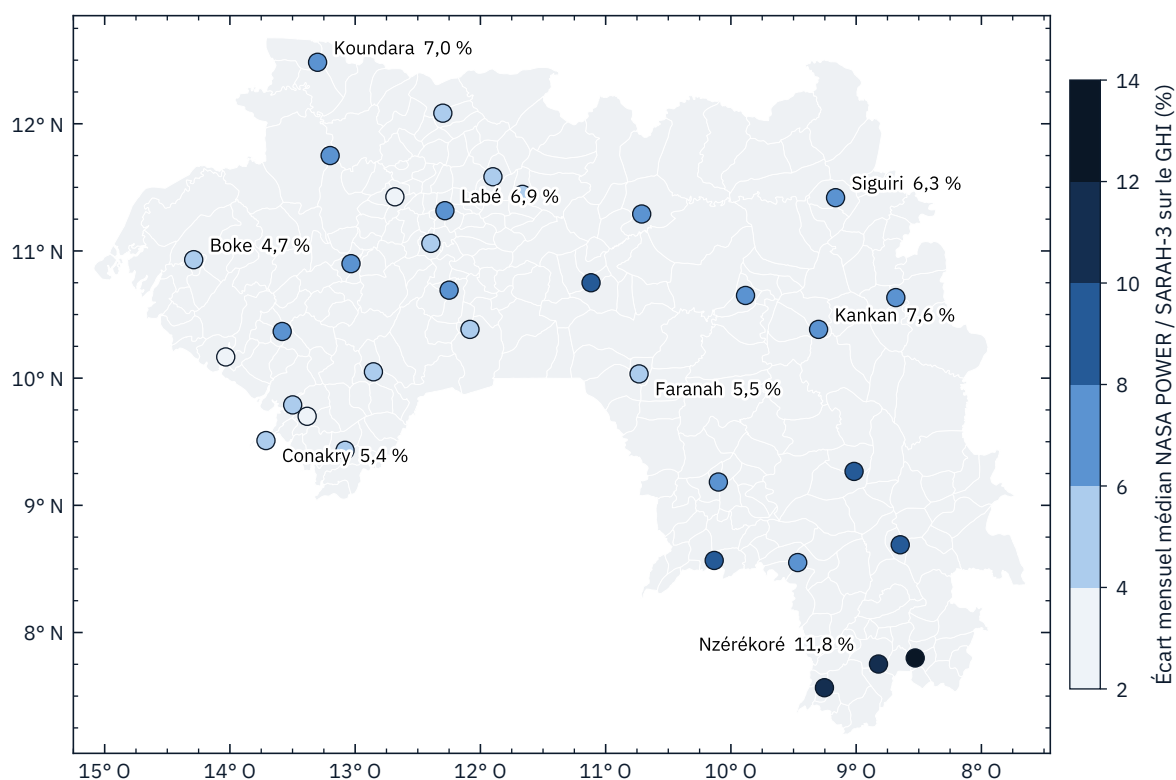


Figure 8 : Écart mensuel médian, en valeur absolue, entre le GHI de NASA POWER et celui de SARAH-3, pour les 34 localités du RDS Guinée, sur les 36 mois de 2021 à 2023. Fond : sous-préfectures (COD-AB, OCHA).

Écart NASA POWER et SARAH-3 aux 34 localités

L'écart médian va de 2,3 % à Boffa à 12,8 % à Lola, avec une valeur centrale de 6,3 %. SARAH-3 donne en général plus que NASA POWER (écart signé médian de -6,5 %). Les trois écarts les plus forts sont en Guinée forestière : Yomou (11,1 %), Nzérékoré (11,8 %) et Lola (12,8 %).

Source : RDS Guinée 2.0.1 | Période : 2021 à 2023, 36 mois | Niveau de confiance **B**

Un désaccord entre deux bases ne dit pas laquelle est juste, et un accord ne garantit pas qu'elles le sont toutes les deux : elles peuvent partager une même erreur. Sans référence au sol, cet écart ne mesure donc l'erreur d'aucune des deux. Il signale les localités à examiner en priorité, et celles où une mesure au sol serait la plus utile. En Guinée forestière, aucune station de référence n'est disponible dans le RDS.

Erreur fréquente : prendre un écart entre bases pour une incertitude

L'atlas d'incertitude de Kuma Science cartographie ce même écart entre sources. Il le présente comme un indicateur de dispersion entre modèles, utile pour hiérarchiser les sites. Une incertitude au sens métrologique exige une comparaison à une mesure de référence (guide 7).

8.1 Deux villes, un seul pixel

Kindia et Mamou sont distantes de 92 km, avec 378 m de dénivelé. Dans NASA POWER, leurs séries de rayonnement sont identiques sur les 300 mois de 2001 à 2025 : les deux villes tombent dans la même maille de 1°. Leur température, calculée sur une grille plus fine, diffère en moyenne de 1,3 °C. ERA5-Land, à 0,1°, les sépare : son GHI journalier diffère en moyenne de 0,40 kWh/m² entre les deux villes.

Erreur fréquente : comparer deux sites sur un même pixel

Avant de comparer deux localités proches avec une base, vérifier qu'elles ne partagent pas la même maille. Deux séries identiques ne prouvent pas que les deux sites reçoivent le même rayonnement.

9 En 2001, le diffus de NASA POWER baisse de 23 % en médiane

NASA POWER remonte à 1984 pour le GHI et le DHI. La série longue paraît idéale pour étudier la variabilité d'une année à l'autre. La figure 9 montre pourtant une marche en 2001 sur le diffus.

Rupture du DHI de NASA POWER en 2001

À Kankan, le DHI moyen passe de 3,21 kWh/m²/jour sur 1984-2000 à 2,53 sur 2001-2020, soit -21 %, alors que le GHI passe de 5,62 à 5,58 (-0,7 %). Aux 34 localités, la baisse du DHI va de -19 % à -34 % (médiane -23 %); celle du GHI reste comprise entre -1,5 % et +0,1 %.

Source : RDS Guinée 2.0.1, NASA POWER mensuel | Période : 1984-2000 contre 2001-2020 | Niveau de confiance **B**

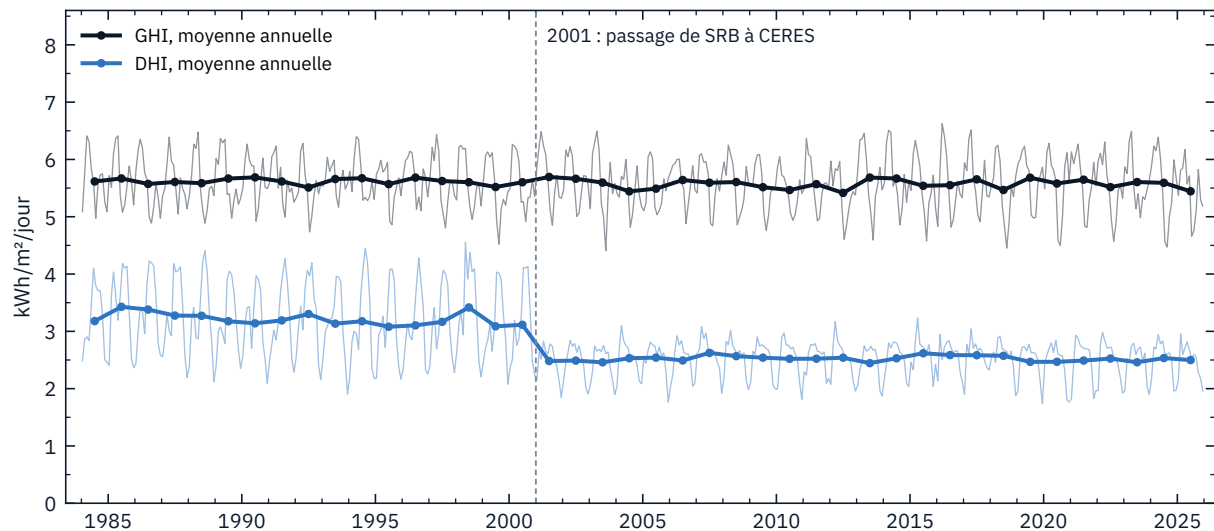


Figure 9 : GHI et DHI mensuels de NASA POWER à Kankan, 1984-2025 (traits fins) et moyennes annuelles (points). Avant 2001, le rayonnement provient de la chaîne SRB ; à partir de 2001, de la chaîne CERES.

Une baisse durable du diffus de 19 à 34 %, apparue la même année dans les 34 localités sans que le global varie, et qui coïncide avec le passage de la chaîne SRB à la chaîne CERES, désigne fortement un changement de traitement. Un phénomène naturel peut modifier brusquement le diffus, par exemple les aérosols d'une grande éruption volcanique comme celle du Pinatubo en 1991, mais cet effet est transitoire [2]. Le DNI n'existe dans NASA POWER qu'à partir de 2001 ; le DHI antérieur est publié dans le RDS, mais il ne se compare pas au DHI postérieur.

À retenir

Avant d'utiliser une longue série, tracer ses moyennes annuelles et chercher les sauts. Quand une marche durable touche toutes les localités la même année, vérifier dans la documentation de la base si elle coïncide avec un changement de méthode avant de l'interpréter comme un signal climatique.

10 Exercices

Exercice 1 (application)

Calculer G_{on} le 3 janvier et le 4 juillet ($n = 3$ et $n = 185$). Quel est le rapport entre les deux ?

Corrigé

On applique l'équation 1.

Étape 1, les angles : $360 \times 3/365 = 2,96^\circ$ et $360 \times 185/365 = 182,47^\circ$.

Étape 2, les cosinus : $\cos 2,96^\circ = 0,9987$ et $\cos 182,47^\circ = -0,9991$.

Étape 3, les éclaircissements : $1\,361 \times (1 + 0,033 \times 0,9987) = 1\,361 \times 1,0330 = 1\,406 \text{ W/m}^2$; $1\,361 \times (1 - 0,033 \times 0,9991) = 1\,361 \times 0,9670 = 1\,316 \text{ W/m}^2$.

Étape 4, le rapport : $1\,406/1\,316 = 1,068$. Début janvier, la Terre est au plus près du Soleil et reçoit 6,8 % de plus que début juillet.

Exercice 2 (application)

Calculer la masse d'air à Koundara au midi du 21 décembre ($\theta_z = 35,9^\circ$), par la sécante et par Kasten et Young.

Corrigé

Étape 1, la sécante : $\cos 35,9^\circ = 0,8100$, d'où $AM = 1/0,8100 = 1,235$.

Étape 2, le terme de correction de l'équation 3 : $96,080 - 35,9 = 60,18$, puis $60,18^{-1,6364} = 0,00123$ et $0,50572 \times 0,00123 = 0,00062$.

Étape 3, Kasten et Young : $AM = 1/(0,8100 + 0,0006) = 1,234$.

Le terme de correction ne pèse que 0,08 % du dénominateur : les deux formes coïncident tant que le Soleil est haut. Il ne devient important qu'au voisinage de l'horizon.

Exercice 3 (application)

Un jour d'août à Kankan, la station mesure un GHI de 3,2 kWh/m². Le 15 août, $H_o = 10,39$ kWh/m². Quel est l'indice de clarté ? Comment classer ce jour ?

Corrigé

On applique l'équation 5 : le sol a reçu 3,2 kWh/m², le sommet de l'atmosphère 10,39. $K_T = 3,2/10,39 = 0,31$: 31 % du rayonnement arrivé au sommet de l'atmosphère a atteint le sol. Le jour se situe à la limite du ciel couvert ; il appartient aux 10 % de jours les plus sombres de juillet à septembre.

Exercice 4 (application)

Pour une heure donnée, un pyranomètre mesure 800 W/m², un pyréliomètre 750 W/m², et $\cos \theta_z = 0,85$. Quel est le diffus, et quelle part du global représente-t-il ?

Corrigé

On part de l'équation 4, $GHI = DNI \cos \theta_z + DHI$, que l'on résout pour le diffus : $DHI = GHI - DNI \cos \theta_z$.

Étape 1, le direct horizontal : $750 \times 0,85 = 637,5$ W/m².

Étape 2, le diffus : $800 - 637,5 = 162,5$ W/m².

Étape 3, la part : $162,5/800 = 0,20$, soit 20 % du global, ce qui correspond à une heure claire.

Exercice 5 (Python)

À partir de deux fichiers du RDS, `nasa-power/mensuel_1981_2025.csv` et `terrain-kankan/mensuel_2021_2023.csv`, retrouver l'écart de 3,0 % entre NASA POWER et la mesure sur le GHI de Kankan, en ne gardant que les mois d'au moins 28 jours mesurés.

Corrigé

Joindre les deux fichiers sur l'année et le mois, filtrer jours ≥ 28 , puis calculer le rapport des moyennes moins un. Garder les mois incomplets d'octobre 2021 et d'octobre 2023 modifie légèrement le résultat.

Exercice 6 (pour aller plus loin)

Pour une autre localité du RDS, comparer le DHI moyen de NASA POWER sur 1984-2000 et sur 2001-2020, puis la part du diffus dans le global sur chaque période. Laquelle retenir pour une étude, et pourquoi ?

Corrigé

La baisse sera comprise entre 19 et 34 % selon la localité. Seule la période postérieure à 2001 est cohérente avec le DNI et avec les séries horaires du RDS ; la période antérieure ne sert que pour le GHI.

11 Résumé

1. $GHI = DNI \cos \theta_z + DHI$; l'indice de clarté rapporte le global à son plafond extraterrestre.
2. À Kankan et à Tarambaly, le diffus pèse 34 à 39 % du global de novembre à mars et 57 à 58 % de juin à septembre.
3. Une base se qualifie sur un site par son biais et par sa restitution jour par jour; une longue série se vérifie par ses moyennes annuelles.

Le guide 4 décrit le rayonnement par ciel clair, celui que le sol recevrait sans nuages, et la part qu'en retirent les aérosols.

Références

- [1] G. Kopp, J. L. Lean, « A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L01706, 2011.
- [2] E. G. Dutton, J. R. Christy, « Solar radiative forcing at selected locations and evidence for global lower tropospheric cooling following the eruptions of El Chichón and Pinatubo », *Geophysical Research Letters*, vol. 19, n° 23, p. 2313-2316, 1992.
- [3] C. N. Long, Y. Shi, « An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements », *The Open Atmospheric Science Journal*, vol. 2, p. 23-37, 2008.
- [4] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4^e édition, Wiley, 2013, chapitres 1 et 2.
- [5] F. Kasten, A. T. Young, « Revised optical air mass tables and approximation formula », *Applied Optics*, vol. 28, n° 22, p. 4735-4738, 1989.
- [6] B. Y. H. Liu, R. C. Jordan, « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », *Solar Energy*, vol. 4, n° 3, p. 1-19, 1960.
- [7] Organisation météorologique mondiale, *Guide des instruments et des méthodes d'observation* (OMM-N° 8), volume I, chapitre 7, édition 2024.
- [8] J. Muñoz-Sabater et al., « ERA5-Land : a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications », *Earth System Science Data*, vol. 13, p. 4349-4383, 2021.
- [9] Z. Qu et al., « Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance : The Heliosat-4 method », *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 26, n° 1, p. 33-57, 2017.
- [10] EUMETSAT CM SAF, *Surface Radiation Data Set, Heliosat (SARAH)*, édition 3.
- [11] NASA Langley Research Center, *POWER Project*. <https://power.larc.nasa.gov>.
- [12] Kuma Science, *Référentiel de données solaires de la Guinée (RDS)*, version 2.0.1, 2026, licence CC BY 4.0. [doi:10.5281/zenodo.21051754](https://doi.org/10.5281/zenodo.21051754).
- [13] 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.