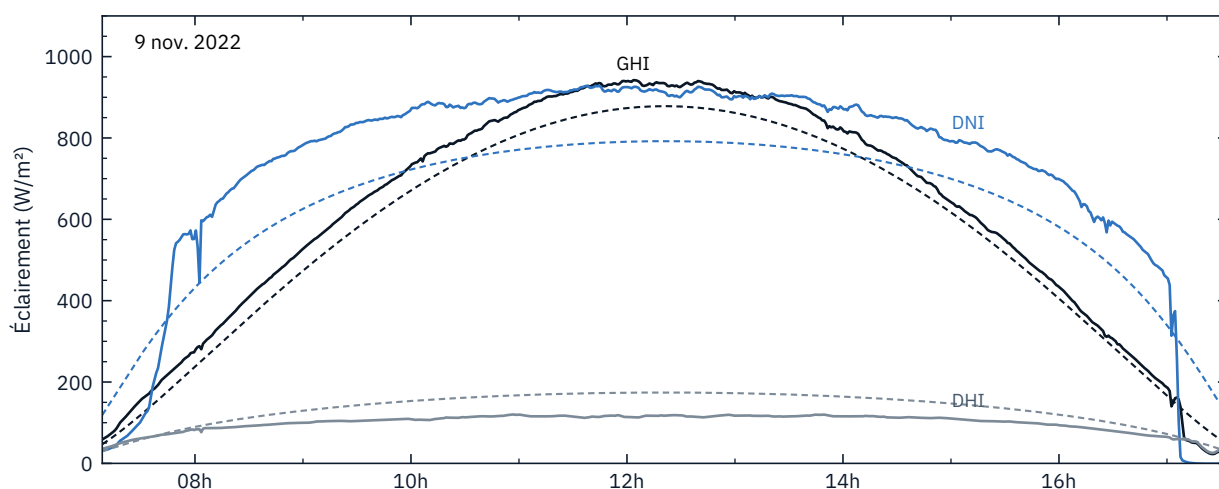




Le ciel clair

Ce que le sol recevrait sans nuages, et ce qu'en retirent les aérosols



Kankan, 9 novembre 2022 : GHI, DNI et DHI mesurés à la minute (traits pleins) et modèle de ciel clair d'Ineichen et Perez (tirets). Sections 3 et 5.

Siba Kalivogui

Ingénieur efficacité énergétique

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

Données : ESMAP/WAPP Kankan et Tarambaly, CAMS

kumascience.com

Deux journées sans nuages

Le 9 novembre 2022 et le 8 mars 2022, le ciel de Kankan est resté dégagé toute la journée. Le rayonnement global de midi est presque le même : 942 W/m^2 le premier jour, 958 W/m^2 le second. Le reste diffère. Le 9 novembre, le rayonnement direct atteint 928 W/m^2 et le diffus de midi 117 W/m^2 . Le 8 mars, le direct plafonne à 655 W/m^2 et le diffus monte à 325 W/m^2 . Entre les deux dates, l'air s'est chargé de poussière. Ce guide explique comment décrire un ciel clair, comment le repérer dans une série de mesures, et ce que les modèles en disent en Guinée.

Ce guide suppose acquis les guides 1 à 3. Données : stations ESMAP/WAPP de Kankan et de Tarambaly, mesures à la minute d'octobre 2021 à octobre 2023, niveau de confiance **A**; DNI du service CAMS à Kankan, niveau **B**. Calculs avec la bibliothèque pvlib [6]. Notations et unités : guide 0, section 9. Licence CC BY-NC-SA 4.0.

Table des matières

1 À quoi sert un modèle de ciel clair	3
2 La turbidité de Linke	3
3 Deux modèles de ciel clair	3
4 Repérer les minutes claires	4
5 Les modèles face à la mesure	5
6 La turbidité effective	7
7 La sur-irradiance	8
8 Exercices	9
9 Résumé	10
Références	11

1 À quoi sert un modèle de ciel clair

Un modèle de ciel clair calcule le rayonnement qu'un site recevrait à un instant donné si aucun nuage ne s'interposait. Il sert à quatre usages dans la suite de la collection :

- fixer une enveloppe plausible pour le contrôle de qualité d'une série : une valeur très supérieure au ciel clair est suspecte, sauf exception décrite à la section 7 ;
- repérer les instants clairs d'une série de mesures (section 4) ;
- définir l'indice de ciel clair $k_c = \text{GHI}/\text{GHI}_{cs}$, qui mesure l'effet des nuages indépendamment de la hauteur du Soleil ;
- servir de base à certaines méthodes qui estiment le direct et le diffus à partir du seul global ; celle du guide 5, la corrélation d'Erbs, s'appuie plutôt sur l'indice de clarté.

2 La turbidité de Linke

Sans nuages, l'atmosphère atténue encore le rayonnement : diffusion par les molécules d'air, absorption par l'ozone et la vapeur d'eau, diffusion et absorption par les aérosols. La turbidité de Linke résume cette atténuation en un seul nombre.

Turbidité de Linke T_L

Nombre d'atmosphères propres et sèches qu'il faudrait empiler pour atténuer le rayonnement direct autant que l'atmosphère réelle. $T_L = 1$ correspond à une atmosphère sans vapeur d'eau ni aérosol. Les valeurs usuelles vont d'environ 2 pour un air de montagne très pur à plus de 6 dans une atmosphère chargée de poussière ou d'humidité.

Faute de mesure sur place, on prend la turbidité dans une climatologie mondiale. Celle de Remund et al. [3], fournie avec pvlib, donne une valeur par mois et par maille d'environ 10 km. À Kankan, elle varie de 4,7 en janvier à 6,1 en juillet ; à Tarambaly, de 4,5 en décembre à 5,8 en juillet et septembre.

3 Deux modèles de ciel clair

3.1 Le modèle de Haurwitz

Le modèle le plus simple ne dépend que de l'angle zénithal [1] :

$$\text{GHI}_{cs} = 1\,098 \cos \theta_z \exp\left(-\frac{0,057}{\cos \theta_z}\right) \quad (1)$$

en W/m^2 . Il ne tient compte ni de l'altitude, ni de la turbidité, et ne donne que le global.

3.2 Le modèle d'Ineichen et Perez

Le modèle d'Ineichen et Perez [2] utilise la masse d'air AM du guide 3, corrigée ici de la pression du site, l'altitude h en mètres et la turbidité de Linke :

$$GHI_{cs} = c_{g1} G_{on} \cos \theta_z \exp(-c_{g2} AM (f_{h1} + f_{h2}(T_L - 1))) \quad (2)$$

avec $c_{g1} = 5,09 \times 10^{-5} h + 0,868$, $c_{g2} = 3,92 \times 10^{-5} h + 0,0387$, $f_{h1} = e^{-h/8000}$ et $f_{h2} = e^{-h/1250}$.
Le direct normal s'écrit, dans sa forme principale :

$$DNI_{cs} = b G_{on} \exp(-0,09 AM (T_L - 1)), \quad b = 0,664 + \frac{0,163}{f_{h1}} \quad (3)$$

et le diffus se déduit par la relation de fermeture du guide 3.

GHI de ciel clair à Kankan le 9 novembre 2022 à 12h20

À la station ($h = 375$ m), le Soleil est à $62,7^\circ$ de hauteur : $\cos \theta_z = 0,8887$ et $AM = 1,076$. La climatologie donne $T_L = 4,97$ et le rayonnement extraterrestre vaut $G_{on} = 1\,393$ W/m². Les coefficients valent $c_{g1} = 0,8871$, $c_{g2} = 0,0534$, $f_{h1} = 0,9542$ et $f_{h2} = 0,7408$. D'où

$$GHI_{cs} = 0,8871 \times 1\,393 \times 0,8887 \times \exp(-0,0534 \times 1,076 \times (0,9542 + 0,7408 \times 3,97)) = 878 \text{ W/m}^2.$$

La station mesure 935 W/m² à cet instant, et un DNI de 913 W/m² contre 792 W/m² pour le modèle. Ce jour-là, l'air était plus pur que la moyenne climatologique de novembre.

3.3 Les modèles physiques

Les services satellitaires utilisent des modèles de ciel clair fondés sur un calcul de transfert radiatif. McClear, celui du service CAMS [4], prend en entrée les aérosols, la vapeur d'eau et l'ozone analysés chaque jour par le système de prévision européen. Il suit en principe l'atmosphère réelle plutôt qu'une moyenne climatologique. La section 5 le confronte à la mesure de Kankan.

4 Repérer les minutes claires

Pour tester un modèle de ciel clair, il faut d'abord isoler les instants sans nuages. La méthode de Reno et Hansen [5] compare, sur des fenêtres glissantes de dix minutes, la série mesurée au modèle : niveau moyen, maximum, longueur de la courbe, régularité de la pente. Une minute est déclarée claire si ces critères restent dans des tolérances fixées. La figure 1 montre le résultat sur une journée de mars à Kankan, claire le matin et nuageuse l'après-midi.

Minutes et heures claires

Avec le Soleil à plus de 15° de hauteur, la méthode retient 99 815 minutes claires à Kankan, dont 66 % de novembre à mars et 10 % de juin à septembre, et 120 616 à Tarambaly. En comptant comme claire une heure dont au moins 85 % des minutes le sont, on obtient 1 000 heures à Kankan et 1 544 à Tarambaly.

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

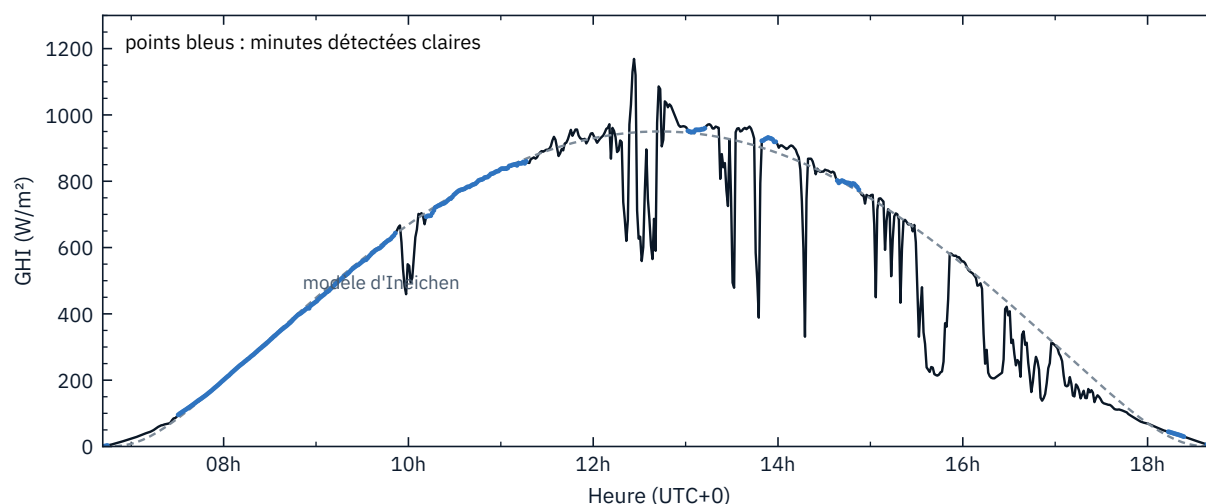


Figure 1 : GHI mesuré à Kankan le 26 mars 2022, à la minute (trait noir), et modèle d'Ineichen et Perez (tirets). Points bleus : minutes retenues comme claires par la méthode de Reno et Hansen, appliquée avec les tolérances par défaut de pvlib.

Erreur fréquente : tester le GHI sur des minutes choisies grâce au GHI

La détection exige que le GHI mesuré reste proche du GHI du modèle. Sur les minutes retenues, l'écart entre les deux est donc limité par construction, et il ne mesure pas la qualité du modèle. En revanche, le DNI et le DHI n'interviennent pas dans la détection. Leurs écarts au modèle constituent un test indépendant.

5 En saison sèche, par ciel clair, les modèles surestiment le direct et sous-estiment le diffus

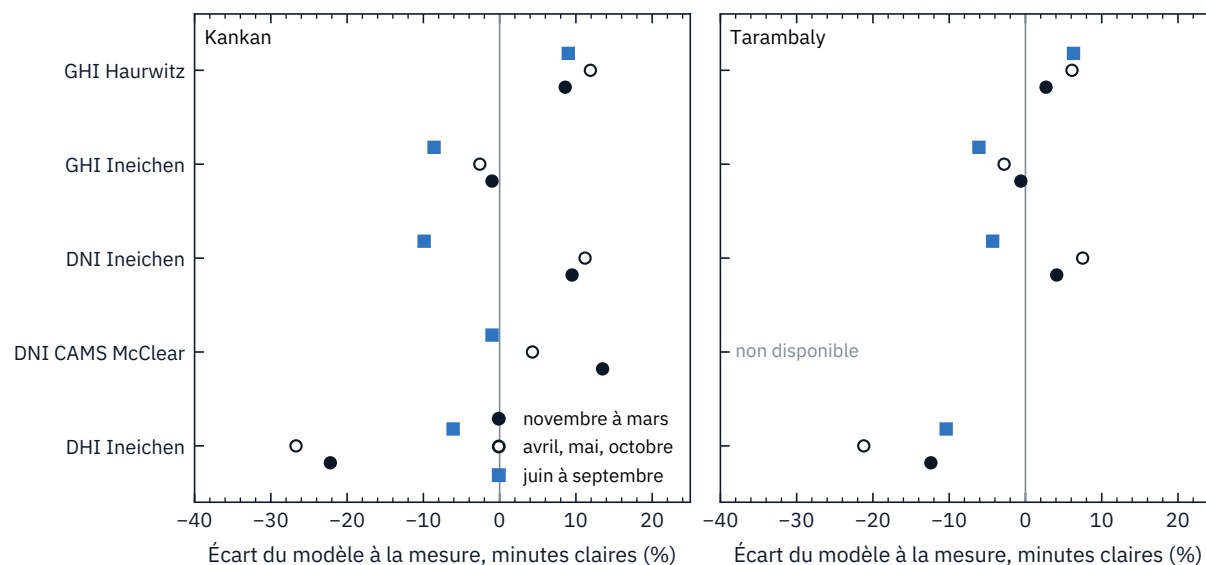


Figure 2 : Écart relatif entre modèle et mesure sur les minutes claires (hauteur du Soleil supérieure à 15°), par saison. DNI CAMS McClear : heures claires de Kankan, seule station couverte par la série CAMS disponible.

Écarts des modèles sur les minutes claires

Le modèle d'Ineichen et Perez, avec la climatologie de Linke, surestime le DNI de 7,8 % à Kankan et de 4,0 % à Tarambaly. À Kankan, l'écart atteint 9,5 % de novembre à mars et 11,2 % en avril, mai et octobre. Il sous-estime le DHI de 22 % à Kankan et de 15 % à Tarambaly.

Le modèle de Haurwitz surestime le GHI de 9,5 % à Kankan et de 3,8 % à Tarambaly.

Sur les 1 000 heures claires de Kankan, le DNI de ciel clair McClear de CAMS dépasse la mesure de 10,3 % (13,5 % de novembre à mars); celui d'Ineichen et Perez, de 7,2 % sur les mêmes heures.

Source : fichiers ESMAP/WAPP à la minute; CAMS Radiation, pas horaire | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **B**

En saison sèche, le modèle d'Ineichen et Perez répartit mal le rayonnement entre direct et diffus. Il place trop d'énergie dans le faisceau direct et pas assez dans le ciel, ce qu'on attend d'une atmosphère plus chargée en aérosols que ne le suppose le modèle. Le global, lui, reste proche de la mesure, comme l'avait montré le 8 mars 2022 (figure 3). McClear, dont seul le DNI est disponible ici, le surestime aussi. Il n'utilise pas une climatologie mais des aérosols analysés au jour le jour; il surestime pourtant le DNI davantage qu'Ineichen et Perez en saison sèche à Kankan.

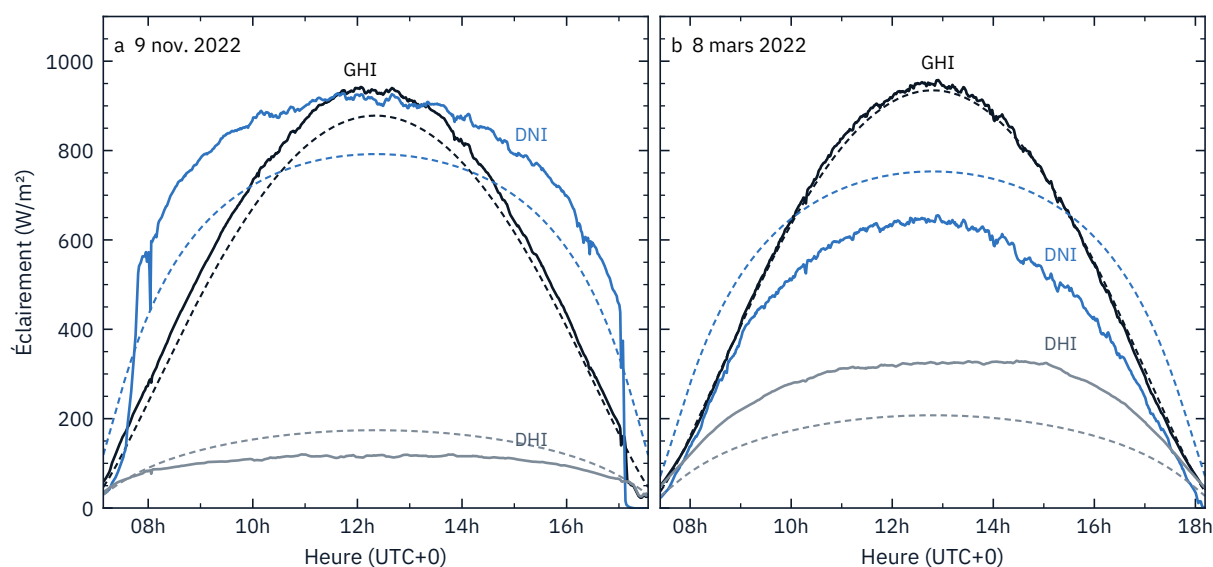


Figure 3 : GHI, DNI et DHI mesurés à la minute à Kankan (traits pleins) et modèle d'Ineichen et Perez (tirets), un jour d'air pur (a) et un jour chargé de poussière (b). Le saut du DNI peu après le lever et sa chute avant le coucher en (a) correspondent vraisemblablement aux arbres que le rapport d'installation signale à l'est et à l'ouest de la station.

De juin à septembre, les écarts changent de signe. Le modèle sous-estime le DNI de 10 % à Kankan. Ce résultat repose sur peu de minutes, prises dans les éclaircies d'un ciel nuageux; l'air y est lavé par les pluies, mais la sélection elle-même peut favoriser les instants les plus lumineux. Il faut le lire avec prudence.

6 À Kankan, de février à avril, la turbidité effective déduite des mesures dépasse la climatologie de 1,4 à 1,6

L'équation 3 se retourne. Connaissant le DNI mesuré par ciel clair, on obtient la turbidité de Linke qui l'explique :

$$T_L = 1 + \frac{1}{0,09 AM} \ln \frac{b G_{on}}{DNI} \quad (4)$$

Appliquée à chaque minute claire, elle donne une turbidité effective déduite des mesures : la valeur qui, introduite dans le modèle d'Ineichen et Perez, reproduit le DNI mesuré. Aucun instrument de la station ne mesure la turbidité elle-même. On la compare à la climatologie de Remund (figure 4).

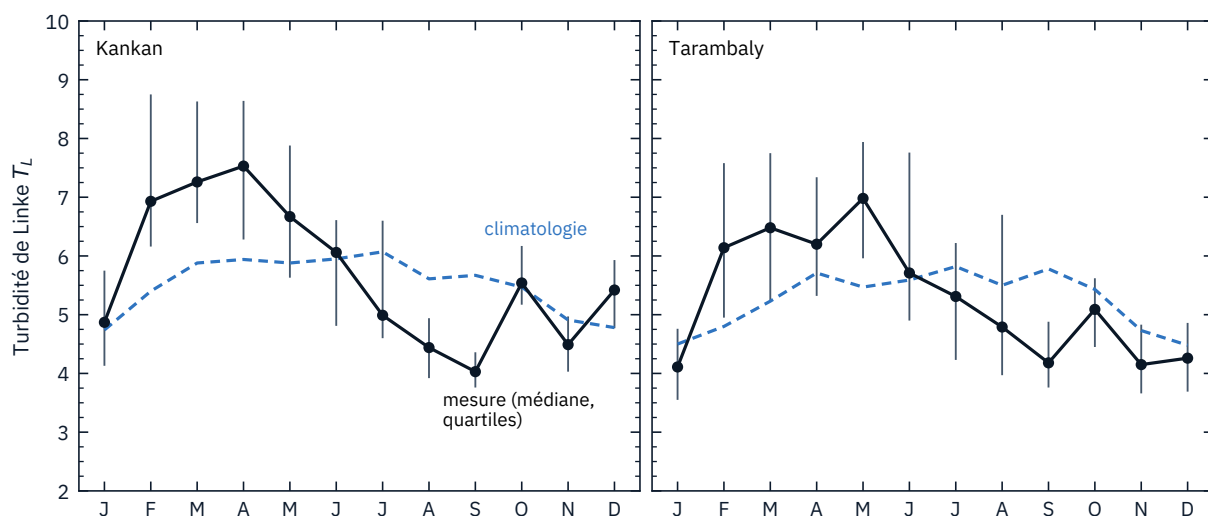


Figure 4 : Turbidité de Linke effective déduite du DNI mesuré sur les minutes claires (médiane mensuelle et quartiles, hauteur du Soleil supérieure à 15°), et climatologie de Remund fournie avec pvlib (tirets).

Turbidité de Linke effective

À Kankan, la médiane mensuelle vaut 6,9 à 7,5 de février à avril, soit 1,4 à 1,6 de plus que la climatologie. En novembre et en janvier, elle reste proche de la climatologie (4,5 et 4,9). À Tarambaly, elle vaut 6,1 à 7,0 de février à mai, contre 4,8 à 5,7 pour la climatologie. Le 9 novembre 2022, la turbidité médiane à Kankan est de 3,6 ; le 8 mars 2022, de 7,9.

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

Les quartiles montrent que la turbidité varie fortement d'un jour à l'autre à l'intérieur d'un même mois, de 6,2 à 8,8 à Kankan en février. Une climatologie mensuelle ne peut pas représenter cette variabilité. Les valeurs basses d'août et de septembre à Kankan (4,0 à 4,4) reposent sur peu de minutes et appellent la même prudence qu'à la section précédente.

À retenir

Pour une étude qui dépend du rayonnement direct en saison sèche (système à concentration, suiveur, calcul de pertes par ombrage), vérifier la turbidité utilisée contre une mesure locale ou contre une série d'aérosols. À Kankan et à Tarambaly, d'octobre 2021 à octobre 2023, la turbidité effective a dépassé la climatologie mondiale de février à avril.

7 Sous des nuages morcelés, le sol reçoit parfois plus que par ciel clair

Un nuage épais proche du disque solaire peut réfléchir vers le sol une part du rayonnement qu'il intercepte, pendant que le disque reste dégagé. Le diffus s'ajoute alors à un direct presque intact, et le global dépasse la valeur de ciel clair. La figure 5 montre toutes les minutes de Kankan face au modèle.

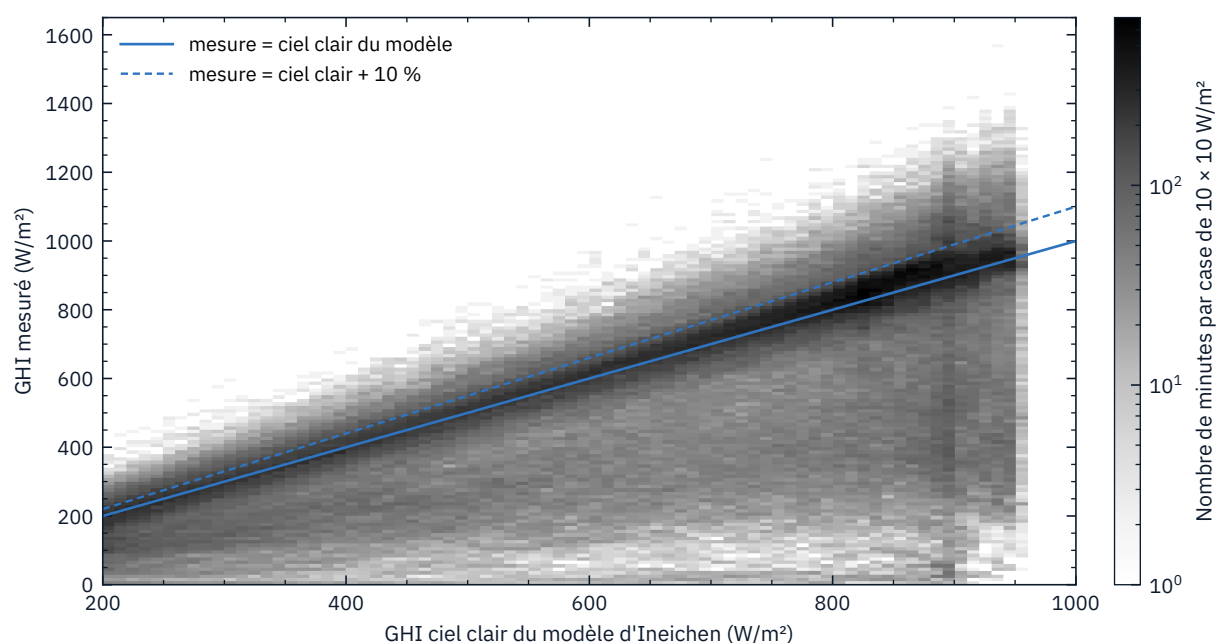


Figure 5 : GHI mesuré à Kankan face au GHI de ciel clair d'Ineichen et Perez, toutes les minutes où le Soleil est à plus de 15° de hauteur (432 799 minutes). Densité en échelle logarithmique.

Minutes au-dessus du ciel clair

Avec le Soleil à plus de 15°, le GHI dépasse de plus de 10 % le modèle de ciel clair pendant 13,9 % des minutes à Kankan et 11,2 % à Tarambaly. Il dépasse même le rayonnement extraterrestre horizontal pendant 361 minutes à Kankan, dont 307 de juillet à septembre, et 626 à Tarambaly. Le maximum de Kankan, 1 590 W/m², est mesuré le 18 septembre 2022 à 12h34, pour un ciel clair de 944 W/m² et un extraterrestre de 1 337 W/m² ; à cette minute, le direct (914 W/m²) et le diffus (669 W/m²) se referment sur le global.

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

Les minutes au-dessus de 110 % du modèle ne sont pas toutes dues aux nuages. Une partie vient de journées plus pures que la climatologie (section précédente), où le modèle

sous-estime le ciel clair lui-même. Les minutes au-dessus du rayonnement extraterrestre, en revanche, sont compatibles avec un renforcement par les nuages, qu'une journée plus pure ne suffit pas à produire. Au maximum de Kankan, les trois instruments concordent, ce qui appuie cette interprétation.

À Kankan, les épisodes au-dessus de 110 % du modèle durent 3 minutes en médiane, et moins de 14 minutes dans 90 % des cas. Ils ne disparaissent pas tous dans les moyennes horaires : 543 heures sur 7 892 dépassent encore le modèle de plus de 10 %. Ces épisodes comptent pour deux raisons. Une méthode de détection doit les écarter, ce que font les critères de Reno et Hansen. Un onduteur ou une protection dimensionnés sur le seul ciel clair peuvent les subir.

8 Exercices

Exercice 1 (application)

Calculer le GHI de Haurwitz pour $\theta_z = 20^\circ$, puis pour $\theta_z = 60^\circ$.

Corrigé

On applique l'équation 1.

Pour $\theta_z = 20^\circ$: $\cos 20^\circ = 0,9397$; l'exposant vaut $-0,057/0,9397 = -0,0607$ et $\exp(-0,0607) = 0,9411$; d'où $1\,098 \times 0,9397 \times 0,9411 = 971 \text{ W/m}^2$.

Pour $\theta_z = 60^\circ$: $\cos 60^\circ = 0,5$; l'exposant vaut $-0,057/0,5 = -0,114$ et $\exp(-0,114) = 0,8923$; d'où $1\,098 \times 0,5 \times 0,8923 = 490 \text{ W/m}^2$.

Quand le Soleil descend de 20 à 60° d'angle zénithal, le cosinus divise le rayonnement par 1,9 et la traversée plus longue de l'atmosphère retire 5 % de plus.

Exercice 2 (application)

À Tarambaly ($h = 860 \text{ m}$), calculer f_{h1} , f_{h2} et le coefficient b de l'équation 3. Comparer à Kankan.

Corrigé

Étape 1 : $860/8\,000 = 0,1075$, d'où $f_{h1} = e^{-0,1075} = 0,898$.

Étape 2 : $860/1\,250 = 0,688$, d'où $f_{h2} = e^{-0,688} = 0,503$.

Étape 3 : $0,163/0,898 = 0,181$, d'où $b = 0,664 + 0,181 = 0,845$.

Étape 4, Kankan ($h = 375 \text{ m}$) : $f_{h1} = e^{-0,0469} = 0,954$ et $b = 0,664 + 0,163/0,954 = 0,835$. L'altitude réduit l'épaisseur d'atmosphère; à turbidité égale, le modèle donne un peu plus de direct à Tarambaly.

Exercice 3 (application)

Par ciel clair à Kankan, on mesure un DNI de 650 W/m^2 avec $G_{on} = 1\,395 \text{ W/m}^2$ et $AM = 1,10$. Quelle turbidité de Linke effective en déduit-on ($b = 0,835$)?

Corrigé

On applique l'équation 4.

Étape 1, le direct sans atténuation : $b G_{on} = 0,835 \times 1\,395 = 1\,164,8 \text{ W/m}^2$.

Étape 2, le rapport au direct mesuré : $1\,164,8/650 = 1,792$, et $\ln 1,792 = 0,583$.

Étape 3, le dénominateur : $0,09 \times 1,10 = 0,099$.

Étape 4 : $T_L = 1 + 0,583/0,099 = 1 + 5,89 = 6,9$. Cette valeur est typique de février à avril à Kankan.

Exercice 4 (application)

Un DNI de 700 W/m^2 tombe sous un angle zénithal de 30° , avec un diffus de 150 W/m^2 . Quel est le global ? Si le modèle de ciel clair donne 950 W/m^2 , quel est l'indice de ciel clair ?

Corrigé

Étape 1, le direct horizontal : $\cos 30^\circ = 0,866$, et $700 \times 0,866 = 606 \text{ W/m}^2$.

Étape 2, le global : $\text{GHI} = 606 + 150 = 756 \text{ W/m}^2$ (fermeture du guide 3).

Étape 3, l'indice de ciel clair : $k_c = 756/950 = 0,80$. Le ciel donne 80 % de ce qu'il donnerait sans nuages selon le modèle.

Exercice 5 (Python)

Avec pvlib, appliquer `detect_clearsky` au GHI à la minute d'une station, puis calculer la part des minutes claires, mois par mois. Dans quel mois est-elle la plus faible ?

Corrigé

Calculer d'abord la position du Soleil et le ciel clair (`get_solarposition`, `lookup_linke_turbidity`, `ineichen`), puis la détection. À Kankan, la part des minutes claires est la plus faible en août.

Exercice 6 (pour aller plus loin)

Refaire la figure 4 en remplaçant la climatologie de Remund par la turbidité effective déduite des mesures, puis recalculer l'écart du modèle au DNI et au DHI. Que devient l'écart sur le DHI ?

Corrigé

Question ouverte. Ajuster la turbidité corrige le DNI par construction, puisqu'elle en est déduite. L'écart résiduel sur le DHI indique si la forme du modèle, et pas seulement sa turbidité, convient à une atmosphère poussiéreuse.

9 Résumé

1. Un modèle de ciel clair se teste sur le DNI et le DHI des minutes claires, pas sur le GHI qui a servi à les choisir.
2. À Kankan, le modèle d'Ineichen et Perez surestime le direct de 7,8 % et sous-estime le diffus de 22 % par ciel clair ; la climatologie de Linke y sous-estime la turbidité de février à avril.
3. Sous des nuages morcelés, le global peut dépasser le ciel clair, et même le rayonnement extraterrestre, pendant quelques minutes.

Le guide 5 passe du plan horizontal au plan incliné des modules, en estimant le direct et le diffus quand seul le global est connu.

Références

- [1] B. Haurwitz, « Insolation in relation to cloudiness and cloud density », *Journal of Meteorology*, vol. 2, p. 154-166, 1945.
- [2] P. Ineichen, R. Perez, « A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient », *Solar Energy*, vol. 73, n° 3, p. 151-157, 2002.
- [3] J. Remund, L. Wald, M. Lefèvre, T. Ranchin, J. Page, « Worldwide Linke turbidity information », *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, Göteborg, 2003.
- [4] M. Lefèvre et al., « McClear : a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions », *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, p. 2403-2418, 2013.
- [5] M. J. Reno, C. W. Hansen, « Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements », *Renewable Energy*, vol. 90, p. 520-531, 2016.
- [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 d'installation, 2021-2023, licence CC BY 4.0. <https://energydata.info>.
- [8] Copernicus Atmosphere Monitoring Service, *CAMS solar radiation time-series*, Atmosphere Data Store.



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.