



Kuma Science

Ingénierie énergétique pour l'Afrique

Guide 4 | Collection guides solaires

Le Ciel Clair

Modéliser le rayonnement d'un ciel sans nuage, la référence de toute étude solaire

Siba Kalivogui

Ingénieur efficacité énergétique

Énergie solaire | Juillet 2026 | v1.0 | CC BY-NC-SA 4.0

kumascience.com

Avant-propos

Ce document fait partie de la collection Kuma Science, une initiative portée par la diaspora africaine pour transmettre l'ingénierie de l'énergie solaire appliquée aux réalités du continent.

La collection s'adresse aux étudiants en ingénierie et aux jeunes ingénieurs qui veulent maîtriser la chaîne de calcul solaire, du mouvement du Soleil jusqu'au productible d'une installation. Les guides forment un cheminement : chacun établit les notions que le suivant suppose acquises, et l'ensemble amène le lecteur au niveau où les publications scientifiques de Kuma Science deviennent lisibles.

Le niveau visé est celui d'une formation d'ingénieur. Les concepts sont construits progressivement, mais sans simplifier la physique : chaque grandeur est définie, chaque formule est justifiée et reste vérifiable à la main. Surtout, les exemples ne sont pas des cas d'école importés : ils sont menés sur des villes africaines réelles et, chaque fois que c'est possible, sur les séries de mesures que Kuma Science exploite pour ses travaux.

Ce guide est le quatrième du cheminement. Il suppose acquis les guides 1 à 3 : temps solaire, position du soleil et grandeurs du rayonnement (GHI, DNI, DHI, indice de clarté) y sont établis et ne sont pas répétés ici.

Licence Creative Commons BY-NC-SA 4.0. Vous êtes libre de partager et d'adapter ce document à condition de créditer Kuma Science.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	À quoi sert un modèle de ciel clair ?	3
1.2	Objectifs de ce guide	3
2	L'atmosphère claire et la turbidité	3
3	Les modèles de ciel clair	4
3.1	Les modèles empiriques simples	4
3.2	Les modèles à turbidité	4
3.3	Les modèles physiques	5
4	Détecter les heures claires	5
5	Le modèle à l'épreuve de Kankan	6
6	Le cas du DNI, et ce que la recherche ajoute	7
7	Conclusion	8
	Références	9

1 Introduction

Deux journées sans le moindre nuage, à Kankan, ne donnent pas la même énergie. Fin janvier, sous un ciel d'harmattan chargé de poussières sahéliennes, le midi plafonne vers 900 W/m² ; début avril, l'air lavé et le soleil au zénith, il frôle les 1 000. Le nuage n'explique rien ici : c'est l'atmosphère *claire* elle-même qui varie. Pour juger une mesure, caler un produit satellite ou dimensionner sur des bases sûres, il faut donc une référence : ce que le site donnerait ce jour-là, à cette heure-là, si le ciel était sans nuage. C'est le rôle du modèle de ciel clair.

Ce guide construit cette référence, la met à l'épreuve de la seule vraie station de mesure au sol du corpus guinéen, et montre deux surprises que seules les données révèlent.

1.1 À quoi sert un modèle de ciel clair ?

Quatre usages, du plus simple au plus exigeant :

- **plafond de vraisemblance** : une mesure horaire très au-dessus du ciel clair est suspecte ; c'est un pilier du contrôle qualité des séries ;
- **détection des heures claires** : isoler les heures sans nuage d'une série, préalable à tout calage fin (section 4) ;
- **socle des produits satellite** : les bases comme CAMS calculent d'abord un ciel clair, puis le dégradent par les nuages vus du satellite ; la qualité du socle borne celle du produit ;
- **indice de ciel clair** : rapporter la mesure au modèle ($k_c = GHI/GHI_{cs}$) sépare l'effet des nuages de la géométrie, mieux que le k_t du guide 3 qui mélange les deux.

1.2 Objectifs de ce guide

À la fin de ce document, vous serez capable de :

- expliquer ce qui atténue le rayonnement par ciel sans nuage, et résumer cette atténuation par la turbidité de Linke ;
- choisir un modèle de ciel clair adapté au besoin, du plus simple au plus physique, et le calculer ;
- comprendre le principe de la détection des heures claires ;
- confronter un modèle à des mesures au sol et interpréter les écarts, y compris la sur-irradiance des ciels de mousson.

2 L'atmosphère claire et la turbidité

Le guide 3 a inventorié les préleveurs : molécules (diffusion de Rayleigh), ozone, vapeur d'eau, aérosols. Par ciel sans nuage, tous restent actifs, et deux d'entre eux varient fortement d'un jour à l'autre : la vapeur d'eau et les aérosols. Plutôt que de suivre chaque constituant, l'ingénierie solaire les résume d'un seul nombre.

Turbidité de Linke (T_L)

Nombre d'atmosphères propres et sèches (Rayleigh pures) qu'il faudrait empiler pour atténuer le rayonnement direct autant que l'atmosphère réelle du moment. $T_L = 2$ décrit un air très pur de montagne, 3 à 4 un air rural ordinaire, 5 à 7 un air urbain pollué ou chargé de poussières. En saison d'harmattan, l'Afrique de l'Ouest atteint couramment ces valeurs hautes : la turbidité y est une variable de premier ordre, pas un raffinement.

La turbidité est le paramètre d'entrée des modèles de la famille intermédiaire (section suivante). Faute de mesure locale, on la prend dans des climatologies mensuelles mondiales, établies par télédétection : c'est précis en moyenne, et c'est là que les surprises locales se logent.

3 Les modèles de ciel clair

Trois familles, par ordre de complexité croissante.

3.1 Les modèles empiriques simples

Une régression sur la seule hauteur du soleil. Le plus connu est celui de Haurwitz (1945) :

$$GHI_{cs} = 1\,098 \cos \theta_z e^{-0,059/\cos \theta_z} \quad (1)$$

Aucun paramètre local : ni turbidité, ni altitude. C'est l'ordre de grandeur en trois touches de calculatrice, et un excellent garde-fou d'implantation.

Haurwitz au midi d'avril à Kankan

Mi-avril, le soleil de midi passe au zénith à Kankan (guide 2, passage du 18 avril) : $\cos \theta_z \approx 1$.

$$GHI_{cs} = 1\,098 \times 1 \times e^{-0,059} = 1\,035 \text{ W/m}^2$$

L'enveloppe mesurée au sol ce mois-là (section 5) vaut 990 W/m² : le modèle le plus fruste du répertoire tombe à moins de 5 % de la mesure, sans rien connaître du site. Retenez l'ordre de grandeur : *un midi tropical clair, c'est le millier de watts par mètre carré.*

3.2 Les modèles à turbidité

La famille de référence de l'ingénierie : la hauteur du soleil, l'altitude du site et la turbidité de Linke en entrées. Le représentant standard est le modèle d'Ineichen et Perez (2002) :

$$GHI_{cs} = c_1 G_{on} \cos \theta_z e^{-c_2 AM (f_{h1} + f_{h2} (T_L - 1))} \quad (2)$$

où AM est la masse d'air du guide 3 (corrigée de la pression du site) et où les quatre coefficients ne dépendent que de l'altitude h du site, en mètres :

$$\begin{aligned} f_{h1} &= e^{-h/8000} & c_1 &= 0,868 + 5,09 \times 10^{-5} h \\ f_{h2} &= e^{-h/1250} & c_2 &= 0,0387 + 3,92 \times 10^{-5} h \end{aligned} \quad (3)$$

Les deux échelles d'altitude (8 000 et 1 250 m) séparent les rôles : l'atmosphère moléculaire s'amincit lentement avec l'altitude, la couche chargée en aérosols et en vapeur d'eau beaucoup plus vite. L'exponentielle principale dit l'essentiel : chaque atmosphère de Linke supplémentaire multiplie l'extinction, et le chemin AM en est l'exposant. La formulation d'origine comporte en outre un petit terme d'enrichissement $e^{0,01 AM^{1,8}}$, de l'ordre de +1 % : pvlib l'omet par défaut, et ce guide suit pvlib, dont sortent les figures.

Le calcul complet : Kankan, 15 avril, midi solaire

Kankan est à $h = 377$ m. Les coefficients de l'équation 3 valent :

$$f_{h1} = e^{-377/8000} = 0,954 \quad f_{h2} = e^{-377/1250} = 0,740$$

$$c_1 = 0,868 + 5,09 \times 10^{-5} \times 377 = 0,887 \quad c_2 = 0,0387 + 3,92 \times 10^{-5} \times 377 = 0,0535$$

Au midi solaire du 15 avril, le soleil est au zénith (guide 2) : $\cos \theta_z = 1,000$, et la masse d'air corrigée de la pression vaut $AM = 0,96$ (l'altitude enlève 4 % d'atmosphère). La climatologie donne $T_L = 5,95$ pour avril à Kankan, et $G_{on} = 1\,356 \text{ W/m}^2$ ($n = 105$).

$$GHI_{cs} = 0,887 \times 1\,356 \times 1,000 \times e^{-0,0535 \times 0,96 \times (0,954 + 0,740 \times 4,95)} \approx 950 \text{ W/m}^2$$

(pvlib donne 951 : l'écart tient aux arrondis intermédiaires). La mesure au sol, elle, donnera 990 (tableau 1). Notez la turbidité : la climatologie de Kankan s'étend de 4,8 en décembre à 6,2 en juillet, des valeurs d'air chargé toute l'année ; à $T_L = 2$, air de montagne pur, le même calcul donnerait environ 1 100 W/m².

En pratique

Personne n'implante ces coefficients à la main : la bibliothèque libre pvlib les fournit, avec la climatologie mondiale de turbidité intégrée. Trois lignes de Python suffisent :

```
loc = pvlib.location.Location(10.38, -9.30, altitude=377)
cs = loc.get_clearsky(instants, model="ineichen")
```

C'est ce calcul, exactement, qui produit la courbe « modèle » de la figure 1 plus bas.

3.3 Les modèles physiques

Au sommet, les codes de transfert radiatif alimentés par l'état réel de l'atmosphère vu des satellites : aérosols, vapeur d'eau, ozone heure par heure. McClear, le socle du service Copernicus CAMS, en est l'exemple canonique. Ils ne demandent aucune mesure locale, mais héritent des forces et des faiblesses de leurs intrants satellitaires ; la section 6 montre ce que cela signifie en zone d'harmattan.

4 Détecter les heures claires

Comparer un modèle ou caler un produit satellite exige d'isoler d'abord, dans la série mesurée, les heures effectivement sans nuage. À l'œil, sur une courbe journalière, c'est évident : une journée claire est une cloche lisse. La détection automatique formalise cette intuition : l'algorithme de référence (Reno et Hansen, 2016) compare la mesure au modèle de ciel clair sur une fenêtre glissante, et exige la conjonction de plusieurs critères : niveau proche du modèle, variabilité faible, pentes semblables, courbure régulière. Un nuage isolé casse au moins l'un des quatre.

En pratique

La méthode est conçue pour des mesures à la minute : à ce pas, le passage d'un nuage se voit dans la variance. Sur des moyennes horaires, l'essentiel du signal de variabilité est lissé, et la détection perd sa finesse. C'est la raison pour laquelle les travaux de calage de Kuma Science détectent les heures claires sur le GHI minute de la station, jamais sur l'horaire.

5 Le modèle à l'épreuve de Kankan

Kankan, en Haute-Guinée, est le seul site du corpus guinéen équipé d'une vraie station de mesure au sol : un pyranomètre du réseau ESMAP/WAPP (Banque mondiale), entretenu et contrôlé, deux années pleines de données horaires validées. Face à lui, le modèle d'Ineichen avec la climatologie mondiale de turbidité, sans aucun ajustement local. La figure 1 organise la confrontation.

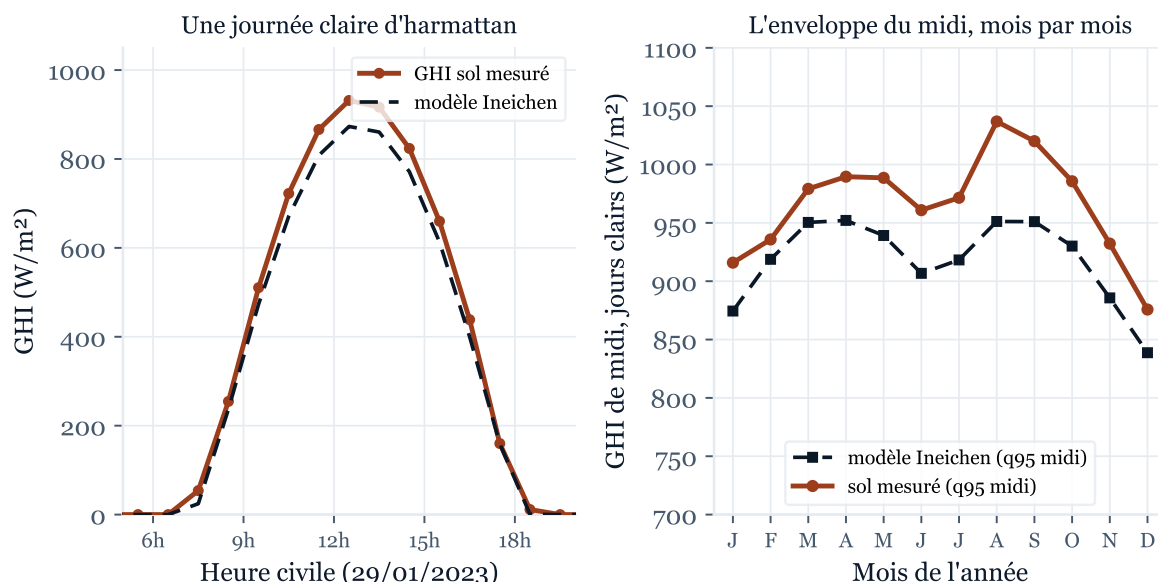


FIGURE 1 – Le ciel clair à l'épreuve de la station sol de Kankan (GHI horaire ESMAP/WAPP, 2021-2023, contrôle qualité Kuma ; modèle Ineichen, turbidité climatologique, sans ajustement local). À gauche : la journée la plus claire de janvier, heure par heure. À droite : quantile 95 du GHI de midi, mois par mois, mesure contre modèle.

Ce que la confrontation montre, de la lecture la plus rassurante à la plus subtile :

Le tableau 1 donne les nombres exacts derrière le panneau de droite : c'est sur ces valeurs que se fondent les trois lectures qui suivent.

Mois	Sol, q95 du midi (W/m ²)	Modèle Ineichen (W/m ²)	Écart
Janvier	916	874	+4,7 %
Février	936	919	+1,9 %
Mars	979	950	+3,0 %
Avril	990	952	+3,9 %
Mai	989	939	+5,3 %
Juin	961	907	+6,0 %
Juillet	972	918	+5,8 %
Août	1 037	951	+9,0 %
Septembre	1 020	951	+7,3 %
Octobre	986	930	+6,0 %
Novembre	932	886	+5,3 %
Décembre	876	839	+4,4 %

TABLE 1 – Quantile 95 du GHI de midi à Kankan, mois par mois : mesure sol (station ESMAP/WAPP, 2021-2023) contre modèle d'Ineichen (équation 2, turbidité climatologique). Ce sont les données du panneau de droite de la figure 1, reproductibles par le script d'analyse du dépôt Kuma.

Le modèle prédit une vraie journée. Le panneau de gauche montre le 29 janvier 2023, jour-

née d'harmattan sans nuage : du lever au coucher, la cloche mesurée suit la cloche calculée, à environ 6 % près au midi. Un modèle nourri d'une simple climatologie mondiale prédit correctement une journée particulière à Kankan, et la forme en double bosse du panneau de droite, héritée du double passage au zénith du guide 2, est fidèlement reproduite.

L'harmattan est dans la climatologie. De décembre à février, la turbidité climatologique du modèle plonge, et l'enveloppe mesurée plonge avec elle (875 W/m² au midi de décembre contre près de 1 000 en avril). L'atténuation par les poussières sahéliennes n'est pas un phénomène exotique oublié des modèles : elle est climatologiquement connue, et le modèle la restitue à quelques pourcents près.

L'excès d'août n'est pas du ciel clair. D'août à septembre, l'enveloppe mesurée dépasse le modèle de 7 à 9 %, jusqu'à 1 037 W/m² au cœur de la saison des pluies. Ce n'est qu'un paradoxe apparent : le quantile 95 des midis d'un mois de mousson ne capture pas des ciels clairs, rares à cette saison, mais des ciels *morcelés* : le sol reçoit alors le direct par une trouée *plus* le diffus renvoyé par les flancs éclairés des cumulus. Cette sur-irradiance peut brièvement dépasser le ciel clair, et même, à l'échelle de la minute, approcher le rayonnement extraterrestre.

À retenir

1. Un modèle de ciel clair à climatologie mondiale prédit l'enveloppe d'un site guinéen à environ 5 % sans aucune donnée locale : c'est la référence la moins chère et la plus robuste qui existe.
2. En climat de mousson, un quantile haut n'est *pas* un détecteur de ciel clair : la sur-irradiance des nuages morcelés le contamine. La détection rigoureuse (section 4) n'est pas un luxe.
3. La sur-irradiance est aussi un fait de dimensionnement : les onduleurs voient passer des pointes au-dessus du ciel clair, et les écrêtages se comptent en heures de mousson, pas en théorie.

6 Le cas du DNI, et ce que la recherche ajoute

Tout ce qui précède portait sur le GHI. Pour le rayonnement *direct*, l'enjeu est plus rude : l'aérosol éteint le faisceau en ligne droite, sans la compensation partielle du diffus qui adoucit le GHI. Une même erreur de turbidité pèse donc deux à trois fois plus sur le DNI clair que sur le GHI clair. C'est le talon d'Achille des socles satellitaires en zone d'harmattan.

Les travaux de Kuma Science l'ont mesuré à Kankan : sur les heures détectées claires (au pas minute, méthode de la section 4), le socle ciel clair DNI du service CAMS lit **+12,6 % trop haut en harmattan**, contre +0,3 % en mousson : la signature d'une sous-estimation de la charge en poussières, précisément dans la saison où le direct est roi. La note technique publique du dépôt Kuma (*Clear-sky DNI Kankan : socle ciel clair vs traitement nuages*) détaille la méthode et les chiffres ; ce guide vous a donné tous les outils pour la lire.

Conséquence d'ingénierie

Pour le photovoltaïque, qui vit du global, le ciel clair satellite est un socle sain à quelques pourcents près. Pour toute technologie à concentration, qui vit du direct, un DNI satellite non calé sur une mesure au sol locale surestime la ressource de l'ordre de 10 % dans la saison même qui devait la fournir : de quoi transformer un projet rentable sur le papier en contre-performance. En zone d'harmattan, *pas de DNI sans station*.

7 Conclusion

À retenir

1. Le ciel clair est la référence : plafond de vraisemblance, socle satellite, détecteur d'heures claires, dénominateur de l'indice k_c .
2. La turbidité de Linke résume l'atmosphère claire d'un nombre ; en Afrique de l'Ouest, l'harmattan en fait une variable de premier ordre.
3. Trois familles de modèles : Haurwitz pour l'ordre de grandeur, Ineichen-Perez à turbidité pour l'ingénierie courante, les socles physiques (McClear) pour les chaînes satellite.
4. À Kankan, le modèle à climatologie mondiale tient l'enveloppe à $\approx 5\%$; l'excès apparent de mousson est la sur-irradiance des ciels morcelés, pas du ciel clair.
5. Le DNI clair est l'endroit où tout se joue : $+12,6\%$ de biais de socle en harmattan mesuré à Kankan ; en zone de poussières, le DNI exige une mesure au sol.

Le guide 5 quittera l'horizontale : à partir du GHI et de sa décomposition direct-diffus, il calculera ce que reçoit un plan incliné, l'étape qui sépare la donnée de ressource du productible d'un champ réel.

Références

1. P. Ineichen, R. Perez, « A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient », *Solar Energy*, vol. 73, n° 3, p. 151-157, 2002.
2. 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.
3. B. Haurwitz, « Insolation in relation to cloudiness and cloud density », *Journal of Meteorology*, vol. 2, p. 154-166, 1945.
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. 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, p. 884, 2018.
6. ESMAP, *Campagne de mesure du rayonnement solaire en Afrique de l'Ouest (réseau WAPP)*, Banque mondiale ; données de la station de Kankan en accès public sur le catalogue ouvert de la Banque mondiale. <https://energydata.info/dataset/guinea-solar-radiation-measurement-data>
7. Kuma Science, *Clear-sky DNI Kankan : socle ciel clair vs traitement nuages*, note technique du dépôt kuma-data-core. <https://kumascience.com/>



Kuma Science

Des recherches d'ingénierie sur les
vrais défis énergétiques de l'Afrique.

kumascience.com | contact@kumascience.com