



Kuma Science

Ingénierie énergétique pour l'Afrique

Guide 3 | Collection guides solaires

La Ressource Solaire

GHI, DNI, DHI : comprendre, relier et vérifier les trois grandeurs du rayonnement

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 troisième du cheminement. Il suppose acquis le guide 1 (*Le Temps Solaire*) et le guide 2 (*La Position du Soleil*) : la conversion en temps solaire et le calcul de l'angle zénithal θ_z 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 Objectifs de ce guide	3
2 Le rayonnement hors atmosphère	3
2.1 La constante solaire	3
2.2 La variation orbitale	3
2.3 Le rayonnement extraterrestre horizontal	4
3 La traversée de l'atmosphère	4
4 Les trois grandeurs du rayonnement au sol	5
4.1 La relation de fermeture	5
4.2 L'indice de clarté	5
5 La fermeture à l'épreuve des données	6
6 Où trouver les données ?	7
7 Conclusion	8
Références	9

1 Introduction

Ce guide décrit la ressource : les grandeurs qui mesurent le rayonnement au sol, la relation exacte qui les lie, et la manière de lire, et de critiquer, les données qui alimentent toute étude solaire. Les guides 1 et 2 ont établi la géométrie, où est le soleil et sous quel angle il frappe ; place à l'intensité.

Les ordres de grandeur d'abord. Hors de l'atmosphère, un mètre carré face au soleil reçoit environ 1 367 watts, toute l'année, sans un nuage pour l'en priver. Au sol à Conakry, le même mètre carré horizontal reçoit environ 1 000 watts au midi d'une belle journée d'avril, 760 en moyenne des midis de l'année, et parfois moins de 200 sous un ciel de mousson. L'ingénierie de la ressource tient dans la compréhension de cette cascade.

1.1 Objectifs de ce guide

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

- calculer le rayonnement extraterrestre pour n'importe quel jour et n'importe quel lieu ;
- définir sans ambiguïté GHI, DNI et DHI, et écrire la relation de fermeture qui les lie ;
- calculer et interpréter l'indice de clarté k_t ;
- appliquer le test de fermeture à un jeu de données, et savoir pourquoi il faut le faire ;
- choisir une source de données de rayonnement adaptée à une étude en Afrique de l'Ouest.

2 Le rayonnement hors atmosphère

2.1 La constante solaire

Constante solaire (G_{sc})

Éclairement énergétique du rayonnement solaire hors atmosphère, sur une surface normale à la direction du soleil, à la distance moyenne Terre-Soleil :

$$G_{sc} = 1\,367 \text{ W/m}^2$$

C'est la valeur de référence de l'ingénierie solaire (Duffie et Beckman). Les mesures satellitaires récentes donnent environ 1 361 W/m² ; l'écart, inférieur à 0,5 %, est sans conséquence pour les études d'ingénierie, mais sachez quelle convention votre outil utilise.

2.2 La variation orbitale

L'orbite terrestre étant elliptique (guide 1), la distance Terre-Soleil varie d'environ $\pm 1,7$ % sur l'année, et l'éclairement reçu comme l'inverse du carré de la distance, soit $\pm 3,3$ % :

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

où n est le numéro du jour de l'année. Le maximum tombe début janvier (périhélie), le minimum début juillet (aphélie) : la Terre reçoit un peu *plus* d'énergie pendant l'hiver de l'hémisphère nord.

2.3 Le rayonnement extraterrestre horizontal

Sur un plan horizontal au sommet de l'atmosphère, la projection du guide 2 s'applique déjà :

$$G_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (2)$$

G_o est le plafond physique absolu du rayonnement au sol : aucune heure mesurée ne peut le dépasser durablement. C'est la référence contre laquelle tout le reste se compare.

G_o à Conakry le 15 mars à 12h00 civile

Le guide 2 a donné $\cos \theta_z = 0,9398$ à cet instant. Avec $n = 74$:

$$G_{on} = 1\,367 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times 74}{365} \right) = 1\,367 \times 1,0097 = 1\,380 \text{ W/m}^2$$

$$G_o = 1\,380 \times 0,9398 = 1\,297 \text{ W/m}^2$$

Ce midi civil de mars, le plafond extraterrestre à Conakry est d'environ $1\,300 \text{ W/m}^2$: toute valeur mesurée au sol s'interprète par rapport à ce chiffre.

3 La traversée de l'atmosphère

Entre G_o et le sol, l'atmosphère prélève et redistribue. Deux mécanismes :

- **l'absorption** : l'ozone absorbe l'ultraviolet, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone absorbent dans l'infrarouge ; l'énergie absorbée chauffe l'atmosphère et est perdue pour le capteur ;
- **la diffusion** : les molécules d'air (diffusion de Rayleigh), les aérosols (poussières, embruns, fumées) et les nuages dévient les photons dans toutes les directions ; une partie repart vers l'espace, le reste arrive au sol *de tout le ciel* au lieu d'arriver du seul disque solaire.

Le chemin parcouru dans l'atmosphère conditionne l'ampleur de ces deux prélèvements. On le mesure par la **masse d'air** :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

$AM = 1$ quand le soleil est au zénith, 2 quand $\theta_z = 60^\circ$. (Aux très grands angles zénithaux, cette sécante diverge alors que le chemin réel reste fini du fait de la courbure de la Terre ; la correction usuelle est celle de Kasten et Young, 1989. Elle ne compte que pour un soleil à moins de 10° au-dessus de l'horizon.)

La masse d'air joue pour la Guinée

À Conakry, le soleil de midi reste toute l'année à moins de 34° du zénith : la masse d'air de mi-journée ne dépasse jamais 1,2. C'est un avantage structurel des basses latitudes : le rayonnement y traverse moins d'atmosphère qu'en Europe, où le soleil de midi d'hiver traîne à $AM \approx 3$. Le revers guinéen n'est pas le chemin, mais son contenu : vapeur d'eau côtière, poussières d'harmattan et nuages de mousson, que les guides suivants apprendront à quantifier.

4 Les trois grandeurs du rayonnement au sol

La diffusion coupe le rayonnement en deux populations de photons, et toute la métrologie solaire s'organise autour de cette coupure.

DNI, DHI, GHI

- **DNI** (*Direct Normal Irradiance*) : éclaircissement du rayonnement *direct*, celui qui arrive en ligne droite du disque solaire, mesuré sur une surface normale à cette direction (W/m^2) ;
- **DHI** (*Diffuse Horizontal Irradiance*) : éclaircissement du rayonnement *diffus*, celui qui arrive de toute la voûte céleste hors disque solaire, mesuré sur une surface horizontale (W/m^2) ;
- **GHI** (*Global Horizontal Irradiance*) : éclaircissement total reçu par une surface horizontale (W/m^2).

Une quatrième composante, le rayonnement *réfléchi* par le sol (albédo), n'atteint pas une surface horizontale ; elle entrera en jeu au guide 5 avec les plans inclinés.

4.1 La relation de fermeture

Les trois grandeurs ne sont pas indépendantes. Le direct qui frappe l'horizontale est la projection du DNI par l'angle zénithal du guide 2, et le global est la somme des deux populations :

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

Cette relation est exacte par construction : elle ne modélise rien, elle définit les grandeurs. Deux des trois suffisent, avec la géométrie, à reconstruire la troisième.

En pratique

Les instruments suivent la coupure : le **pyranomètre** (coupole vitrée, capteur horizontal) mesure le GHI ; le **pyrhéliomètre** (tube collimaté monté sur un suiveur) mesure le DNI ; un pyranomètre équipé d'une boule ou d'un anneau d'ombrage qui masque le disque solaire mesure le DHI. Les stations de référence mesurent les trois et utilisent l'équation 4 comme contrôle de cohérence permanent ; les conventions de mesure sont fixées par le guide WMO n° 8.

4.2 L'indice de clarté

Pour comparer des heures, des jours ou des sites entre eux, on rapporte le GHI à son plafond extraterrestre :

$$k_t = \frac{GHI}{G_o} \quad (5)$$

L'indice de clarté k_t (Liu et Jordan, 1960) est le pourcentage du rayonnement extraterrestre qui a survécu à la traversée. En pratique : $k_t \gtrsim 0,65$ signale une heure claire, $k_t \lesssim 0,30$ une heure couverte, entre les deux un ciel partiellement nuageux. Plus k_t est bas, plus la part diffuse est grande : cette relation, dite de décomposition, sera l'outil central du guide 5 quand il faudra estimer le diffus là où seul le GHI est disponible.

k_t au midi clair de Conakry

Le guide 2 a mesuré une enveloppe de ciel clair de $1\,012\text{ W/m}^2$ au midi d'avril à Conakry, soleil au zénith. Le même jour, $G_{on} \approx 1\,367 \times 0,992 \approx 1\,356\text{ W/m}^2$ et $\cos \theta_z \approx 1$:

$$k_t = \frac{1\,012}{1\,356} = 0,75$$

Même par ciel parfaitement clair et soleil vertical, un quart du rayonnement n'atteint pas le sol : c'est le prélèvement incompressible de l'atmosphère propre (molécules, vapeur d'eau, aérosols de fond).

5 La fermeture à l'épreuve des données

L'équation 4 est exacte pour l'atmosphère. Elle ne l'est pas pour un *jeu de données*, et c'est précisément ce qui la rend utile : appliquée à une source, elle en teste la cohérence interne. Les trois séries horaires de Conakry (GHI, DNI, DHI ; NASA POWER, 2021-2023, contrôle qualité Kuma) s'y prêtent : pour chaque heure, on calcule $\cos \theta_z$ par la chaîne des guides 1 et 2, on reconstruit $DNI \cos \theta_z + DHI$, et on compare au GHI rapporté par la même source.

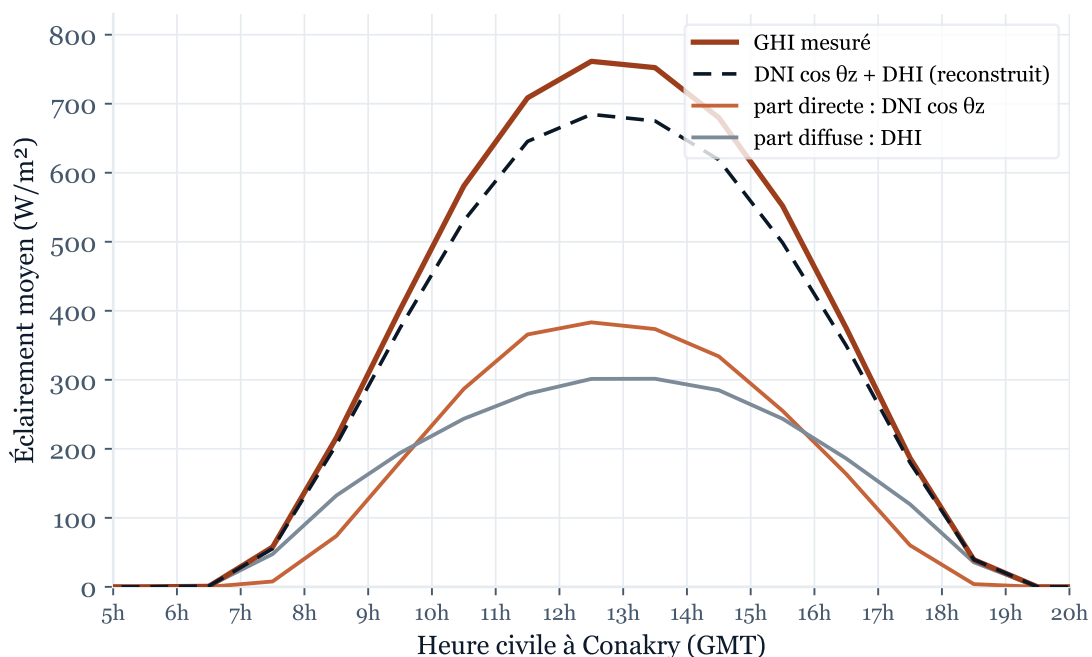


FIGURE 1 – Journée-type moyenne des composantes du rayonnement à Conakry (séries horaires NASA POWER 2021-2023, contrôle qualité Kuma). Le GHI reconstruit par la relation de fermeture (tirets) suit la forme du GHI rapporté, avec un déficit médian de 6 %. En moyenne annuelle, le diffus (301 W/m^2 au midi) pèse presque autant que le direct projeté : Conakry est un site côtier humide.

Résultat : la *forme* colle. Le reconstruit suit le rapporté du lever au coucher, la géométrie des guides 1 et 2 est validée une troisième fois. Mais l'*amplitude* révèle un déficit médian de 6 %, et le tableau 1 montre que ce chiffre global cache deux régimes très différents.

Sur les heures franchement ensoleillées, la fermeture tient à environ 4 % ; sur les heures couvertes, où le global devrait être tout entier diffus, le DHI rapporté reste 23 % sous le GHI. Chaque grandeur est restituée par sa propre chaîne d'algorithmes satellitaires, et les chaînes ne

Sous-ensemble d'heures	<i>n</i>	Résidu médian	résidu , quantile 90
Toutes (élévation > 5°)	12 490	−6,0 %	23,3 %
Ensoleillées ($DNI > 400 \text{ W/m}^2$, élév. > 15°)	4 286	−4,3 %	8,9 %
Couvertes ($DNI < 20 \text{ W/m}^2$, élév. > 15°) *	691	−23,4 %	

TABLE 1 – Résidu de fermeture $(DNI \cos \theta_z + DHI - GHI)/GHI$ sur les séries horaires de Conakry (NASA POWER, 2021-2023). * Pour les heures couvertes, le direct est nul et le résidu se réduit à l'écart entre DHI et GHI, qui devraient coïncider. Chiffres reproductibles par le script d'analyse du dépôt Kuma.

se concertent pas.

À retenir

Trois réflexes d'ingénieur découlent de ce constat :

1. **testez la fermeture** de toute source de données avant de l'utiliser : c'est le contrôle de cohérence le moins cher qui existe ;
2. **ne mélangez jamais les sources** : un GHI pris ici et un DNI pris là ne se referment pas, et l'écart se propage jusqu'au productible ;
3. **une donnée n'est pas la vérité** : l'écart de fermeture est un premier aperçu de l'incertitude des données solaires, que le guide 7 traitera en profondeur.

La moitié de l'énergie de mousson arrive en diffus

Sur les mêmes séries, la part diffuse de l'énergie reçue à Conakry vaut 39 % en harmattan et **52 % en mousson** : de juin à septembre, plus de la moitié de l'énergie solaire arrive de la voûte nuageuse, pas du disque solaire. Les conséquences d'ingénierie sont directes. Le photovoltaïque, qui convertit le diffus, continue de produire sous la mousson, c'est ce qui le rend viable partout en Guinée. Les technologies à concentration, qui ne voient que le DNI, perdent leur ressource la moitié de l'année : c'est le vrai motif de leur absence en Afrique humide, avant toute considération de coût.

6 Où trouver les données ?

Aucune étude ne commence par un instrument : elle commence par une base de données. Le tableau 2 situe les principales familles.

En pratique

Quelle que soit la source retenue : vérifiez la convention temporelle (UTC ou heure locale, début ou milieu de pas de temps, cf. guide 1), testez la fermeture (section précédente), et confrontez la série à une mesure au sol locale dès qu'une campagne existe. Ce dernier geste, le calage terrain, est l'objet du guide 8.

Source	Nature	À savoir
Station au sol (ex. réseau ESMAP/WAPP)	mesure directe, pas de temps fin	la référence quand elle existe ; rare, courte et exigeante en maintenance en Afrique de l'Ouest
NASA POWER	satellite + réanalyse, horaire, mondial, gratuit	profondeur de plus de 20 ans ; rayonnement sur une maille de 1° (météo $0,5^\circ$) ; la source des figures de ce guide
PVGIS (SARAH)	satellite Meteosat, horaire, gratuit, Europe-Afrique	meilleure résolution spatiale ; profondeur moindre ; outil de calcul en ligne intégré
CAMS Radiation	satellite + modèle atmosphérique (Copernicus), gratuit	composantes cohérentes avec un modèle de ciel clair ; l'aérosol est son point fort
Bases commerciales (Meteonorm, SolarGIS...)	satellite + modèles, payant	incertitude documentée contractuellement ; usage bancable

TABLE 2 – Familles de sources de données de rayonnement pour une étude en Afrique de l'Ouest.

7 Conclusion

À retenir

1. Hors atmosphère : $G_{sc} = 1\,367\text{ W/m}^2$, modulé de $\pm 3,3\%$ par l'orbite (équation 1), projeté par $\cos \theta_z$ (équation 2).
2. Au sol, trois grandeurs : DNI (direct normal), DHI (diffus horizontal), GHI (global horizontal), liées par la relation exacte $GHI = DNI \cos \theta_z + DHI$; l'indice $k_t = GHI/G_o$ situe chaque heure entre ciel clair ($\geq 0,65$) et couvert ($\leq 0,30$).
3. La fermeture est exacte pour l'atmosphère, pas pour les jeux de données : testez-la, et ne mélangez jamais les sources.
4. À Conakry, le diffus pèse 39 % de l'énergie en harmattan et 52 % en mousson : le photovoltaïque y garde sa ressource, les technologies à concentration la perdent la moitié de l'année.

Ce guide a décrit la ressource telle qu'elle est mesurée. Le guide 4 construira la référence qui permet de la juger : le modèle de ciel clair, cette enveloppe idéale déjà entrevue au guide 2, qui dit ce que le site *devrait* donner quand l'atmosphère est propre et sans nuage.

Références

1. J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4^e édition, Wiley, 2013.
2. 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.
3. F. Kasten, A.T. Young, « Revised optical air mass tables and approximation formula », *Applied Optics*, vol. 28, n° 22, p. 4735-4738, 1989.
4. WMO, *Guide to Instruments and Methods of Observation* (WMO-N° 8), volume I, édition 2024, Organisation météorologique mondiale, Genève.
5. NASA POWER Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
6. PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), Commission Européenne. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/
7. CAMS Radiation Service, Copernicus Atmosphere Monitoring Service. <https://atmosphere.copernicus.eu/>



Kuma Science

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

kumascience.com | contact@kumascience.com