



Kuma Science

Ingénierie énergétique pour l'Afrique

Guide 5 | Collection guides solaires

La Transposition

Du rayonnement horizontal des bases de données au plan incliné des modules

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 cinquième du cheminement. Il suppose acquis les guides 1 à 4 : temps solaire, position du soleil (dont l'angle d'incidence θ), grandeurs du rayonnement et ciel clair 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 problème en trois termes	3
3	Le maillon fragile : la décomposition	4
3.1	La corrélation d'Erbs	4
3.2	Le calcul sur une heure mesurée réelle	4
3.3	L'épreuve sur deux ans	4
4	La projection du direct : le facteur R_b	5
5	Le diffus incliné et le réfléchi	6
5.1	Le modèle isotrope	6
5.2	Le réfléchi	6
6	L'assemblage complet	6
7	Conclusion	7
	Références	8

1 Introduction

Toutes les bases de données donnent le rayonnement sur un plan horizontal. Aucun champ photovoltaïque n'est posé à plat. Entre la donnée et le module, il y a donc toujours un calcul : la **transposition**, qui convertit le GHI et ses composantes en éclairage du plan des modules, le POA (*Plane Of Array*). C'est la dernière étape avant l'électrique : tout ce que les guides 1 à 4 ont construit converge ici.

En Guinée, l'affaire paraît modeste : aux latitudes de 7 à 12°, l'inclinaison de référence n'est que de 10°, un plancher imposé moins par l'optimum énergétique que par l'auto-nettoyage des modules à la pluie. Mais la modestie de l'angle ne dispense pas de la chaîne complète, et cette chaîne contient l'étape la plus fragile de toute l'ingénierie solaire : deviner la part diffuse quand la base ne donne que le global.

1.1 Objectifs de ce guide

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

- écrire l'équation d'assemblage du POA et nommer ses trois termes ;
- décomposer un GHI en direct et diffus par la corrélation d'Erbs, coefficients en main ;
- projeter le direct sur un plan quelconque par le facteur R_b ;
- modéliser le diffus incliné (isotrope) et le réfléchi (albédo) ;
- dérouler le calcul complet sur une heure mesurée réelle, et connaître les limites saisonnières du maillon de décomposition.

2 Le problème en trois termes

Un plan incliné reçoit trois flux de natures différentes, et chacun se transpose à sa manière :

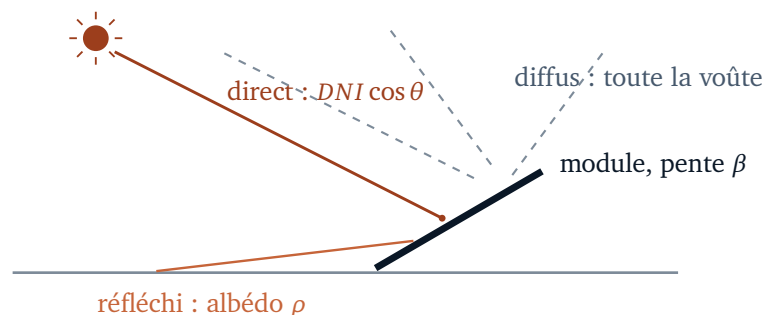


FIGURE 1 – Les trois flux qui atteignent un plan incliné : le direct, projeté par l'angle d'incidence θ du guide 2 ; le diffus, reçu de la portion de voûte céleste que le plan voit ; le réfléchi, renvoyé par le sol.

$$POA = \underbrace{DNI \cos \theta}_{\text{direct}} + \underbrace{DHI \frac{1 + \cos \beta}{2}}_{\text{diffus (isotrope)}} + \underbrace{GHI \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}}_{\text{réfléchi}} \quad (1)$$

où β est la pente du plan, θ l'angle d'incidence (équation du guide 2), et ρ l'albédo du sol. Les facteurs $\frac{1 + \cos \beta}{2}$ et $\frac{1 - \cos \beta}{2}$ sont les fractions de voûte céleste et de sol que le plan voit : à plat, tout le ciel et rien du sol ; vertical, moitié-moitié.

L'équation 1 exige de connaître DNI et DHI séparément. Or la plupart des sources, et toutes les stations à un seul pyranomètre, ne donnent que le GHI. Il faut donc d'abord *décomposer*.

3 Le maillon fragile : la décomposition

3.1 La corrélation d'Erbs

L'idée, héritée de Liu et Jordan (guide 3) : plus l'heure est claire, plus la part diffuse est faible. La corrélation de référence (Erbs, Klein et Duffie, 1982) exprime la fraction diffuse $k_d = DHI/GHI$ en fonction du seul indice de clarté k_t :

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

Le diffus et le direct s'en déduisent :

$$DHI = k_d GHI \quad DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

En pratique

Deux garde-fous d'implantation : bornez k_d dans $[0, 1]$, et surtout bornez le DNI reconstruit (par exemple à $1\,100 \text{ W/m}^2$) : près du lever et du coucher, la division par $\cos \theta_z \rightarrow 0$ fabrique sinon des valeurs absurdes à partir du moindre résidu de GHI.

3.2 Le calcul sur une heure mesurée réelle

Erbs à Kankan, 29 janvier 2023, 12h-13h UTC

L'heure claire du guide 4, telle que la station l'a mesurée : $GHI = 931,6 \text{ W/m}^2$. La chaîne des guides donne $\cos \theta_z = 0,875$ et $G_o = 1\,231 \text{ W/m}^2$, d'où :

$$k_t = \frac{931,6}{1\,231} = 0,757$$

Branche centrale de l'équation 2 :

$$k_d = 0,9511 - 0,1604(0,757) + 4,388(0,757)^2 - 16,638(0,757)^3 + 12,336(0,757)^4 = 0,178$$

$$DHI = 0,178 \times 931,6 = 165,5 \text{ W/m}^2 \quad DNI = \frac{931,6 - 165,5}{0,875} = 875,5 \text{ W/m}^2$$

Or cette station mesure aussi le direct : le pyréliomètre donne $DNI = 899,5 \text{ W/m}^2$. L'estimation à partir du seul GHI tombe à $-2,7 \%$ de la mesure. Sur cette heure d'harmattan, l'estimation tient.

3.3 L'épreuve sur deux ans

Une heure ne fait pas une validation. La figure 2 étend le test à toutes les heures de soleil franc des deux années de la station : Erbs nourri du seul GHI du pyranomètre, jugé par le pyréliomètre.

Le tableau 1 révèle la même leçon que le guide 4, en miroir. Là où le socle satellite trébuche sur l'harmattan, la corrélation statistique trébuche sur la mousson : ajustée sur des climats tempérés, elle attribue trop de direct aux ciels intermédiaires du régime nuageux tropical, jusqu'à $+13,5 \%$ sur le DNI moyen. Chaque maillon de la chaîne a sa saison fragile, et seule une mesure au sol locale permet de le savoir.

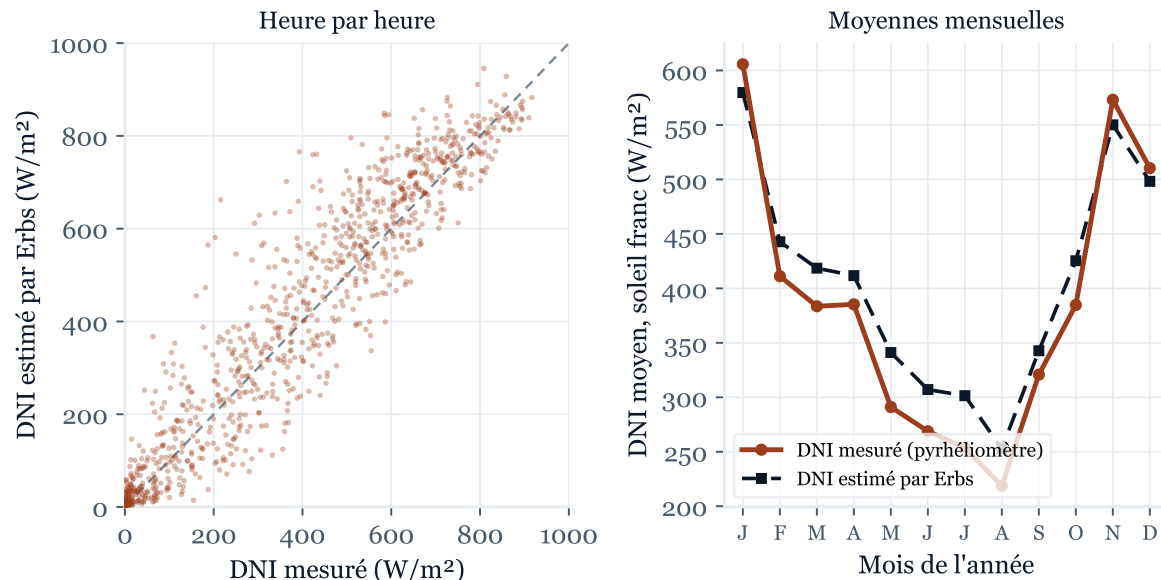


FIGURE 2 – La corrélation d’Erbs à l’épreuve du DNI mesuré de Kankan (station ESMAP/WAPP, 2021-2023, élévation $> 15^\circ$, 7 204 heures). À gauche, le nuage horaire contre la diagonale parfaite ; à droite, les moyennes mensuelles. Données reproductibles par le script d’analyse du dépôt Kuma.

Période	Biais du DNI estimé	Lecture
Harmattan (nov.-mars)	+0,4 %	quasi parfait
Intersaison (avr., mai, oct.)	+11,2 %	surestimation nette
Mousson (juin-sept.)	+13,5 %	surestimation forte
Ensemble	+6,2 %	

TABLE 1 – Biais saisonnier du DNI reconstruit par Erbs à Kankan, contre le pyréliomètre : $(\overline{DNI}_{est} - \overline{DNI}_{sol}) / \overline{DNI}_{sol}$, heures d’élévation $> 15^\circ$.

À retenir

L’erreur de décomposition pèse d’autant plus que la pente est forte : à $\beta = 10^\circ$, direct et diffus se transposent presque comme à l’horizontale et l’erreur se compense en grande partie dans l’équation 1 ; sur un tracker ou pour du concentré, elle frappe de plein fouet. La hiérarchie guinéenne : pour du PV faiblement incliné, Erbs suffit avec une incertitude connue ; pour tout le reste, mesurez le direct.

4 La projection du direct : le facteur R_b

Le direct se transpose exactement, sans modèle : c’est de la géométrie du guide 2.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad \text{d'où} \quad B_{POA} = DNI \cos \theta = (GHI - DHI) R_b \quad (4)$$

R_b dit combien le plan incliné voit mieux (ou moins bien) le soleil que l’horizontale. Il dépasse 1 quand le plan fait face au soleil bas, passe sous 1 quand le soleil est de l’autre côté.

En pratique

Même garde-fou qu'à la décomposition : au lever et au coucher, $\cos \theta_z \rightarrow 0$ fait diverger R_b . Bornez le calcul aux heures d'élévation suffisante (2 à 5°) ou plafonnez R_b ; pour les calculs au pas mensuel, utilisez le R_b moyen de Klein (1977) plutôt qu'un R_b instantané au jour moyen.

5 Le diffus incliné et le réfléchi

5.1 Le modèle isotrope

Le modèle isotrope (Liu et Jordan, 1963) suppose le diffus uniforme sur la voûte : le plan en reçoit la fraction de ciel qu'il voit, $\frac{1+\cos\beta}{2}$. À $\beta = 10^\circ$, cette fraction vaut 0,992 : le plan guinéen voit encore 99 % du ciel, et le diffus se transpose presque sans perte.

Les modèles anisotropes (HDKR ; Perez, 1990) ajoutent ce que l'isotrope ignore : le renforcement circumsolaire (le diffus est plus dense autour du disque solaire) et la bande d'horizon. Ils gagnent quelques pourcents de justesse sur les fortes pentes et par ciel clair ; à 10° de pente sous un ciel souvent voilé, l'isotrope, conservatif, est le choix d'ingénierie de Kuma Science.

5.2 Le réfléchi

Le sol renvoie ρGHI , dont le plan capte la fraction $\frac{1-\cos\beta}{2}$, soit 0,0076 à 10° : moins de 1 % du GHI même sur un sol clair. La convention Kuma retient $\rho = 0,2$, valeur des sols végétalisés et des latérites courantes ; le terme ne devient significatif que sur les fortes pentes ou les sols très réfléchissants.

6 L'assemblage complet

POA à 10° plein sud, Kankan, 29 janvier 2023, 12h-13h

Suite et fin de l'exemple : $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 0$ (plein sud), $\rho = 0,2$. La géométrie du guide 2 donne, pour cette heure ($\delta = -18,2^\circ$ par Spencer, $\omega = -5,0^\circ$) :

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta = 0,944 \quad R_b = \frac{0,944}{0,875} = 1,08$$

Les trois termes de l'équation 1, avec la décomposition d'Erbs :

$$\begin{array}{ll} \text{direct} = 875,5 \times 0,944 & = 826 \text{ W/m}^2 \\ \text{diffus} = 165,5 \times 0,992 & = 164 \text{ W/m}^2 \\ \text{réfléchi} = 931,6 \times 0,2 \times 0,0076 & = 1 \text{ W/m}^2 \end{array}$$

$$POA = 991 \text{ W/m}^2$$

Le plan incliné reçoit 991 W/m^2 là où l'horizontale recevait 932 : +6 % à cette heure. Rien d'étonnant : fin janvier, le soleil de midi est au sud ($\delta = -18^\circ$), exactement là où le plan regarde.

Ce que l'inclinaison rapporte, et quand

Le gain de janvier a son revers : autour du solstice de juin, le soleil de midi passe au *nord* du zénith (guide 2), et le même plan orienté sud lui tourne le dos, $R_b < 1$. Sur l'année guinéenne, les deux effets se compensent en grande partie : à 10° , la transposition redistribue l'énergie entre saisons plus qu'elle n'en crée. C'est pourquoi la méthode de prédimensionnement de Kuma Science travaille sur l'horizontal et applique une *marge de transposition* calibrée par le calcul horaire, plutôt qu'une transposition fine que la qualité des données d'entrée ne justifie pas toujours. L'inclinaison de 10° reste : elle draine la pluie et limite l'encrassement, et c'est d'abord pour cela qu'elle est retenue.

7 Conclusion

À retenir

1. Le POA s'assemble en trois termes : direct projeté par R_b , diffus par la fraction de voûte $\frac{1+\cos\beta}{2}$, réfléchi par $\rho \frac{1-\cos\beta}{2}$.
2. Le maillon fragile est la décomposition : Erbs (équation 2) estime le partage direct-diffus du seul k_t ; bornez ses sorties comme celles de R_b , tout ce qui divise par $\cos\theta_z$ diverge au lever et au coucher.
3. À Kankan, ce maillon est quasi exact en harmattan (+0,4 %) et surestime le direct de 13,5 % en mousson : la corrélation tempérée ne connaît pas les ciels tropicaux.
4. À 10° de pente, l'erreur de décomposition se compense largement dans l'assemblage ; sur trackers et concentration, elle frappe en entier : mesurez le direct.

La chaîne de la ressource est complète : de l'heure civile au rayonnement dans le plan des modules. Le guide 6 la branchera enfin sur la machine : rendement des modules, température, pertes système, et le productible qui en sort.

Références

1. 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.
2. B.Y.H. Liu, R.C. Jordan, « The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors », *Solar Energy*, vol. 7, n° 2, p. 53-74, 1963.
3. S.A. Klein, « Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces », *Solar Energy*, vol. 19, p. 325-329, 1977.
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.
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>



Kuma Science

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

kumascience.com | contact@kumascience.com