



Kuma Science

Ingénierie énergétique pour l'Afrique

Guide 2 | Collection guides solaires

La Position du Soleil

Calculer la hauteur et l'azimut du soleil pour n'importe quel lieu, à n'importe quel instant

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 deuxième du cheminement. Il suppose acquis le guide 1, *Le Temps Solaire* : la conversion de l'heure civile en temps solaire y est établie et n'est pas répétée 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 Pourquoi ce guide ?	3
1.2 Objectifs de ce guide	3
2 Les angles de la position du soleil	4
3 La déclinaison solaire	4
3.1 D'où vient la déclinaison ?	4
3.2 Les formules	5
4 L'angle horaire	6
5 La hauteur du soleil	6
5.1 La formule fondamentale	6
5.2 Le soleil de midi et le passage au zénith	6
6 L'azimut solaire	7
7 Lever, coucher et durée du jour	8
8 La trajectoire du soleil dans le ciel	9
9 La vérification sur les données de Conakry	9
10 Vers la surface inclinée : l'angle d'incidence	10
11 Conclusion	11
Références	12

1 Introduction

Deux jours par an, à Conakry, un piquet vertical ne projette aucune ombre à midi solaire : le soleil passe exactement au zénith, à la verticale du lieu. C'est un phénomène que personne ne peut observer en Europe, et il n'a rien d'une curiosité : il découle directement des lois qui décrivent la position du soleil dans le ciel, et il gouverne la quantité d'énergie qu'un panneau reçoit.

Le guide 1 a établi *quand* le soleil passe au méridien d'un lieu. Ce guide établit *où* il se trouve dans le ciel à chaque instant : sa hauteur au-dessus de l'horizon et sa direction. Ces deux angles commandent tout le reste de la chaîne de calcul solaire : l'énergie interceptée par une surface, l'orientation optimale d'un champ de modules, l'ombrage entre rangées, les heures de lever et de coucher.

1.1 Pourquoi ce guide ?

Ce guide vous apprend à calculer la position du soleil, pour n'importe quel lieu et n'importe quel instant, avec les formules de référence de l'ingénierie solaire. À la fin, vous saurez dire où est le soleil à Conakry, Kankan ou Bamako un 15 mars à midi, sans autre outil qu'une calculatrice, et vous saurez vérifier vos résultats sur les données mesurées.

Pourquoi c'est important en Afrique

Toute l'Afrique de l'Ouest est en zone intertropicale : le soleil y passe au zénith deux fois par an, sa trajectoire de midi bascule du sud au nord au fil des saisons, et la durée du jour varie peu. Ces trois particularités changent les règles d'implantation apprises dans les manuels écrits pour l'Europe ou l'Amérique du Nord : l'inclinaison optimale est faible, l'orientation ne va pas de soi en juin, et le stockage se dimensionne sur des journées presque constantes. Tout cela se lit dans les angles calculés dans ce guide.

1.2 Objectifs de ce guide

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

- nommer et définir les six angles qui décrivent la position du soleil ;
- calculer la déclinaison solaire pour n'importe quel jour de l'année ;
- calculer la hauteur et l'azimut du soleil pour n'importe quel lieu et n'importe quel instant ;
- calculer les heures de lever et de coucher du soleil et la durée du jour ;
- écrire l'angle d'incidence du rayonnement direct sur une surface inclinée quelconque.

2 Les angles de la position du soleil

La position du soleil vue d'un point de la Terre se décrit avec une poignée d'angles. Les trois premiers sont des *entrées* : ils situent l'observateur et l'instant. Les trois suivants sont des *sorties* : ils situent le soleil dans le ciel.

Les six angles fondamentaux

- φ (latitude) : position nord-sud du lieu, $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, positive dans l'hémisphère nord ;
- δ (déclinaison solaire) : angle entre la direction du soleil et le plan de l'équateur, $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$, fonction du jour de l'année ;
- ω (angle horaire) : position du soleil dans sa course journalière, 15° par heure, nul au midi solaire ;
- α_s (hauteur ou altitude solaire) : angle entre la direction du soleil et le plan horizontal ;
- θ_z (angle zénithal) : angle entre la direction du soleil et la verticale, complément de la hauteur : $\theta_z = 90^\circ - \alpha_s$;
- γ_s (azimut solaire) : direction horizontale du soleil, comptée depuis le sud, négative vers l'est (matin), positive vers l'ouest (après-midi).

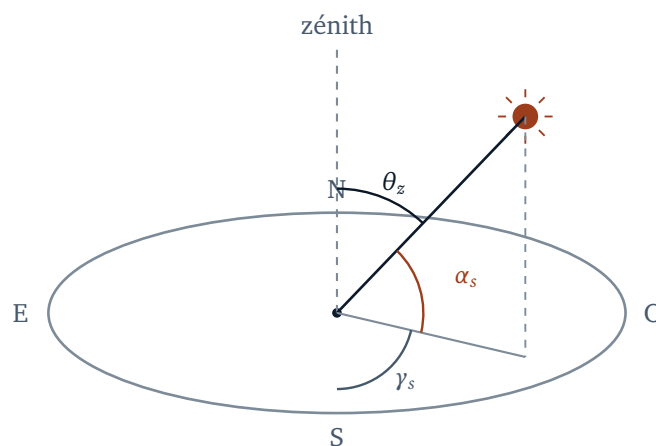


FIGURE 1 – Les angles vus par l'observateur : hauteur α_s au-dessus de l'horizon, angle zénithal θ_z depuis la verticale, azimut γ_s compté depuis le sud dans le plan horizontal (ici un soleil d'après-midi, $\gamma_s > 0$).

Deux autres angles décriront plus loin la surface qui reçoit le rayonnement : sa pente β et son azimut γ (section 10).

3 La déclinaison solaire

3.1 D'où vient la déclinaison ?

L'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de son orbite : il est incliné d'environ $23,45^\circ$ et garde une direction fixe dans l'espace. Au fil de l'orbite, l'hémisphère nord se trouve donc tantôt penché vers le soleil (juin), tantôt à l'opposé (décembre). Vu de la Terre, tout se passe comme si la direction du soleil oscillait de part et d'autre du plan de l'équateur : c'est la déclinaison δ .

Déclinaison solaire (δ)

Angle entre la direction du soleil et le plan de l'équateur terrestre, compté positivement vers le nord : $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$. Elle vaut $+23,45^\circ$ au solstice de juin, 0° aux équinoxes (vers le 21 mars et le 23 septembre), $-23,45^\circ$ au solstice de décembre. Elle dépend du jour de l'année, pas du lieu, et sa variation dans une journée est négligeable pour les calculs d'ingénierie.

3.2 Les formules

La formulation précise est celle de Spencer (1971), une série de Fourier sur l'angle $B = (n-1) \times \frac{360}{365}$ déjà rencontré au guide 1 (erreur maximale $0,03^\circ$) :

$$\delta = \frac{180}{\pi} (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \quad (1)$$

Pour un calcul rapide ou une vérification, la formule approchée de Cooper (1969) suffit souvent :

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365} (284 + n)\right) \quad (2)$$

En pratique

Implantez Spencer dans vos codes de calcul et servez-vous de Cooper comme garde-fou : si les deux valeurs s'écartent de plus d'un demi-degré, cherchez l'erreur (le plus souvent une confusion degrés/radians). Attention, dans l'équation 1, B doit être en radians si votre implantation de sinus et cosinus attend des radians.

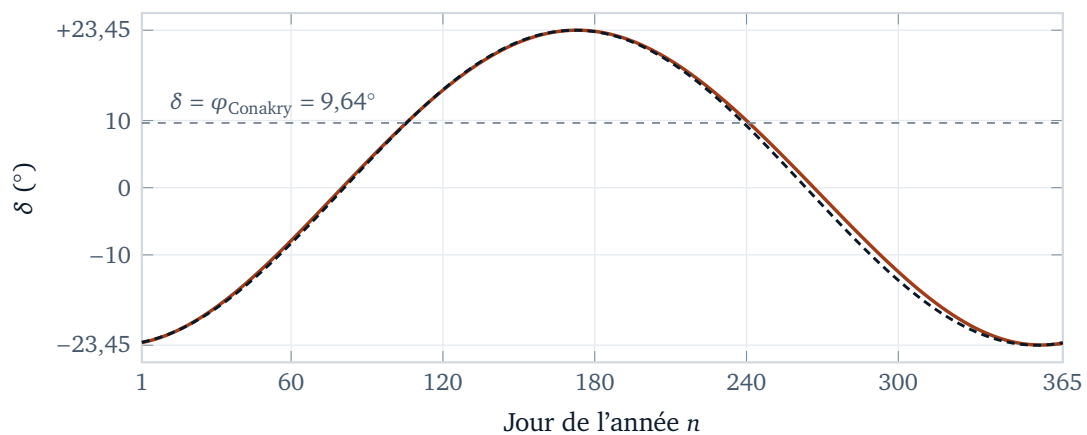


FIGURE 2 – Déclinaison solaire au fil de l'année : Spencer (équation 1, trait plein) et Cooper (équation 2, tirets), indiscernables à cette échelle. La ligne pointillée marque la latitude de Conakry : aux deux intersections, le soleil de midi passe au zénith (section 5).

Déclinaison du 15 mars ($n = 74$)

Cooper : $\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365}(284 + 74)\right) = 23,45 \sin(353,1^\circ) = -2,82^\circ$.

Spencer : avec $B = 73 \times \frac{360}{365} = 72,00^\circ$ (1,2566 rad), l'équation 1 donne $\delta = -2,44^\circ$.

Les deux formules s'accordent à $0,4^\circ$ près : l'implantation est saine. La valeur de Spencer est retenue pour la suite.

4 L'angle horaire

La Terre tourne de 360° en 24 heures : le soleil balaie donc 15° par heure d'est en ouest. L'angle horaire repère cette course par rapport au midi solaire :

$$\omega = (T_s - 12) \times 15 \quad [^\circ] \quad (3)$$

où T_s est le temps solaire en heures, calculé au guide 1. L'angle ω est négatif le matin, nul au midi solaire, positif l'après-midi : -45° à 9h00 solaire, $+45^\circ$ à 15h00 solaire.

Angle horaire à Conakry le 15 mars à 12h00 civile

Le guide 1 a établi que le 15 mars à 12h00 civile, il est $T_s = 10,93$ h (10h56) en temps solaire à Conakry. Donc :

$$\omega = (10,93 - 12) \times 15 = -16,0^\circ$$

Le soleil est encore à l'est du méridien, à un peu plus d'une heure du midi solaire.

5 La hauteur du soleil

5.1 La formule fondamentale

La hauteur du soleil se déduit des trois angles d'entrée par la relation la plus importante de ce guide :

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (4)$$

L'angle zénithal en est le complément, ce qui donne la forme équivalente $\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$.

À retenir

L'équation 4 est le pivot de toute la géométrie solaire : trois entrées (φ le lieu, δ le jour, ω l'instant), une sortie (la hauteur du soleil). Toutes les grandeurs des guides suivants, de l'irradiance sur un plan incliné au productible, en héritent.

5.2 Le soleil de midi et le passage au zénith

Au midi solaire, $\omega = 0$ et l'équation 4 se réduit à :

$$\alpha_{s, \text{midi}} = 90^\circ - |\varphi - \delta| \quad (5)$$

La hauteur de midi est maximale quand $\delta = \varphi$: le soleil passe alors exactement au zénith. Cela n'est possible que si $|\varphi| \leq 23,45^\circ$, c'est-à-dire entre les tropiques.

Le soleil au zénith, deux fois par an

Toute ville située entre les tropiques voit le soleil au zénith de midi deux fois par an, aux deux dates où la déclinaison croise sa latitude (figure 2). Aux mêmes dates, un panneau posé à plat reçoit le rayonnement direct de midi sous incidence parfaitement normale. Le tableau 1 donne ces dates pour les villes guinéennes et quelques capitales de la région. En juin, la déclinaison (+23,45°) dépasse la latitude de toutes ces villes : le soleil de midi passe alors *au nord* du zénith, un fait que la section 8 rend visible et qui piège les habitudes d'implantation importées des latitudes tempérées.

Ville	Latitude	Premier passage	Second passage
Nzérékoré, Guinée	7,76° N	10 avril	3 septembre
Conakry, Guinée	9,64° N	15 avril	29 août
Kindia, Guinée	10,06° N	17 avril	28 août
Kankan, Guinée	10,39° N	18 avril	27 août
Labé, Guinée	11,32° N	20 avril	24 août
Bamako, Mali	12,64° N	24 avril	20 août
Niamey, Niger	13,51° N	27 avril	18 août
Dakar, Sénégal	14,69° N	1 ^{er} mai	14 août
Abidjan, Côte d'Ivoire	5,35° N	4 avril	10 septembre

TABLE 1 – Dates de passage du soleil au zénith de midi ($\delta = \varphi$, déclinaison de Spencer). Plus la ville est proche de l'équateur, plus les deux dates s'écartent des solstices.

Hauteur du soleil à Conakry le 15 mars à 12h00 civile

Données : $\varphi = 9,641^\circ$, $\delta = -2,44^\circ$ (exemple précédent), $\omega = -16,0^\circ$.

$$\sin \alpha_s = \sin(9,641) \sin(-2,44) + \cos(9,641) \cos(-2,44) \cos(-16,0) = 0,9398$$

$$\alpha_s = 70,0^\circ \quad \theta_z = 90 - 70,0 = 20,0^\circ$$

À l'heure où la montre affiche midi, le soleil est déjà haut (70°) mais pas encore à son maximum du jour : au midi solaire (12h54 civile), l'équation 5 donnera $\alpha_{s,midi} = 90 - (9,64 + 2,44) = 77,9^\circ$.

6 L'azimut solaire

La hauteur ne suffit pas : pour orienter un champ de modules ou calculer un masque d'ombrage, il faut la direction horizontale du soleil. L'azimut γ_s est compté depuis le sud, négatif vers l'est, positif vers l'ouest. La formulation de Duffie et Beckman s'écrit :

$$\gamma_s = \text{signe}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \varphi} \right) \right| \quad (6)$$

Le facteur $\text{signe}(\omega)$ traduit une évidence physique : le soleil est à l'est du méridien avant le midi solaire, à l'ouest après.

En pratique

Une forme plus simple sert de vérification : $\sin \gamma_s = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos \alpha_s}$. Calculez l'azimut par l'équation 6, revérifiez-le par cette forme : si les deux valeurs divergent, l'erreur est en général dans le quadrant (le sinus seul ne distingue pas γ_s de $180^\circ - \gamma_s$). Aux heures et dates où le soleil passe au nord du zénith (section 5), l'argument du $\cos^{-1}$ de l'équation 6 peut dépasser 1 en valeur absolue par simple arrondi numérique : bornez-le dans $[-1, 1]$ avant d'en prendre l'arc cosinus.

Azimut du soleil à Conakry le 15 mars à 12h00 civile

Suite de l'exemple précédent : $\theta_z = 20,0^\circ$, $\varphi = 9,641^\circ$, $\delta = -2,44^\circ$, $\omega = -16,0^\circ$.

$$\cos \gamma'_s = \frac{\cos(20,0) \sin(9,641) - \sin(-2,44)}{\sin(20,0) \cos(9,641)} = 0,5932 \Rightarrow \gamma'_s = 53,6^\circ$$

Avec $\text{signe}(\omega) = -1$: $\gamma_s = -53,6^\circ$, le soleil est au sud-est. Vérification : $\sin \gamma_s = \frac{\sin(-16,0) \cos(-2,44)}{\cos(20,0)} = -0,805$, soit $\gamma_s = -53,6^\circ$. Les deux formes concordent.

7 Lever, coucher et durée du jour

Au lever et au coucher, la hauteur du soleil est nulle. En posant $\alpha_s = 0$ dans l'équation 4, l'angle horaire du coucher ω_s vérifie :

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta \quad (7)$$

Le lever a lieu à $-\omega_s$, le coucher à $+\omega_s$, d'où, en temps solaire :

$$T_{s,\text{lever}} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad T_{s,\text{coucher}} = 12 + \frac{\omega_s}{15} \quad \text{durée du jour} = \frac{2\omega_s}{15} \quad (8)$$

La conversion en heure civile passe par la formule du guide 1, appliquée en sens inverse.

Lever et coucher à Conakry le 21 juin ($n = 172$)

$\delta = 23,45^\circ$ (solstice), $\varphi = 9,641^\circ$:

$$\cos \omega_s = -\tan(9,641) \tan(23,45) = -0,0737 \Rightarrow \omega_s = 94,2^\circ$$

$$T_{s,\text{lever}} = 12 - \frac{94,2}{15} = 5,72 \text{ h} = 5\text{h}43 \quad T_{s,\text{coucher}} = 18\text{h}17 \quad \text{durée} = 12\text{h}34$$

Conversion en heure civile (guide 1) : la correction de longitude vaut +54,3 minutes et $E = -1,3$ minute ce jour-là, soit 55,6 minutes à ajouter : lever à **6h39**, coucher à **19h13** heure civile.

Des journées presque constantes

À Conakry, la durée du jour ne varie que de 11h26 (fin décembre) à 12h34 (fin juin) : une amplitude d'à peine 1h08 sur l'année, là où la même formule donne à Paris de 8h02 à 15h58. Pour l'ingénieur, c'est une simplification précieuse : la fenêtre de production solaire est stable toute l'année, et le dimensionnement du stockage n'a pas à absorber de longues nuits d'hiver. La saisonnalité de la production guinéenne viendra d'ailleurs : non pas de l'astronomie, mais de la couverture nuageuse de la mousson, objet des guides suivants.

8 La trajectoire du soleil dans le ciel

En traçant la hauteur en fonction de l'azimut pour tous les instants d'une journée, on obtient la trajectoire apparente du soleil. La figure 3 la montre pour Conakry à trois dates clés.

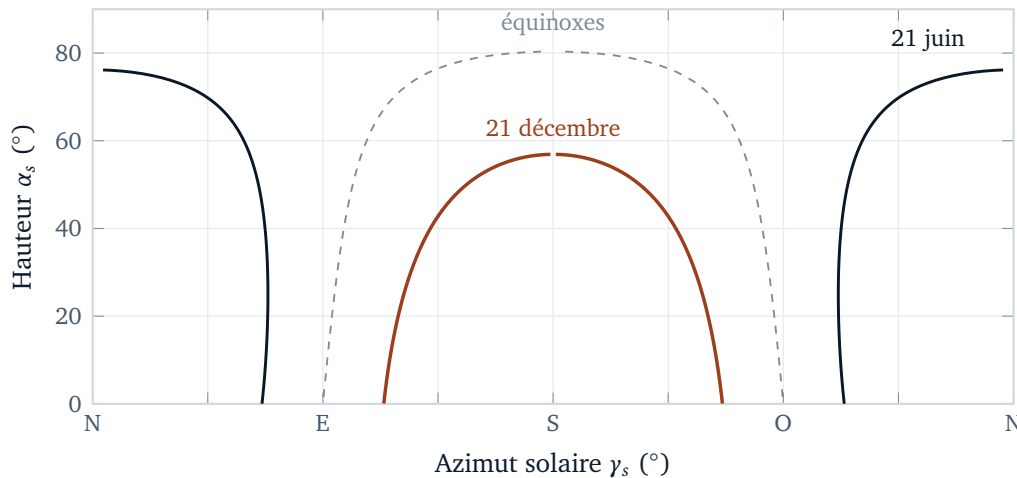


FIGURE 3 – Trajectoires du soleil dans le ciel de Conakry ($\varphi = 9,64^\circ$ N), tracées avec les équations 4 et 6. Le 21 décembre, le soleil culmine à 57° plein sud. Aux équinoxes, il frôle le zénith (80°). Le 21 juin, il se lève au nord-est, culmine à 76° *plein nord*, et se couche au nord-ouest : la trajectoire est passée de l'autre côté du zénith.

La bascule de juin est la conséquence pratique la plus contre-intuitive de la zone intertropicale : un champ de modules orienté plein sud tourne le dos au soleil de midi pendant plusieurs semaines autour du solstice de juin. À faible latitude, l'inclinaison des modules étant elle-même faible, la perte reste modérée ; le guide 5 la chiffrera précisément avec les outils de la transposition.

9 La vérification sur les données de Conakry

Le guide 1 a vérifié l'heure du pic sur les mesures. Le même jeu de données (GHI horaire NASA POWER de Conakry, contrôlé qualité) permet de vérifier la formule de la hauteur. Le principe : par ciel clair, l'irradiance globale horizontale suit essentiellement $\cos \theta_z$, l'angle zénithal calculé par l'équation 4. On construit donc, pour deux mois contrastés, l'*enveloppe de ciel clair* des mesures (quantile 95 du GHI de chaque heure du jour sur le mois) et on la compare au profil calculé $\tau \cdot \cos \theta_z$, où τ est un facteur d'échelle atmosphérique unique par mois.

La figure 4 montre l'accord : heure par heure, du matin au soir, l'enveloppe mesurée suit le cosinus calculé à quelques pourcents près, pour les deux mois. En avril, mois du premier passage au zénith, l'enveloppe de midi atteint $1\,012\text{ W/m}^2$ avec un soleil exactement vertical ; en décembre, le soleil de midi reste à 33° du zénith et l'enveloppe plafonne à 906 W/m^2 . Le rapport mesuré des deux midis (0,90) est proche du rapport géométrique $\cos 33^\circ = 0,84$; l'écart résiduel vient de l'atmosphère, plus sèche et plus transparente en décembre qu'en avril. Cet écart n'est pas un défaut de la vérification : c'est la première apparition de la transmittance atmosphérique, la grandeur que les guides 3 et 4 mettront en équations.

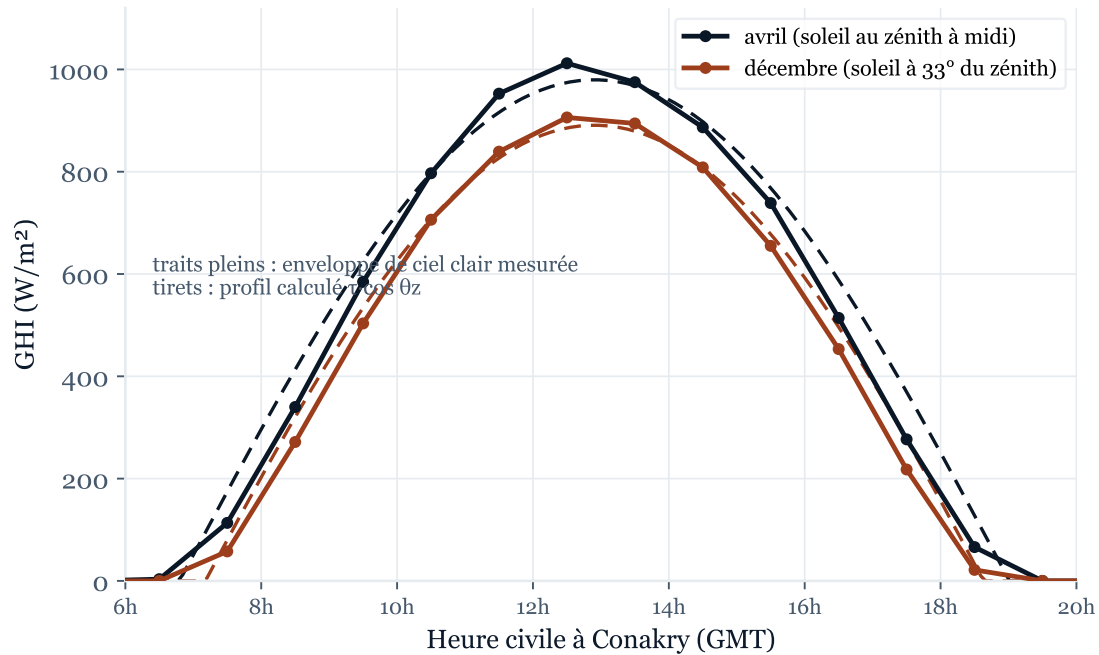


FIGURE 4 – Enveloppe de ciel clair du GHI mesuré à Conakry (quantile 95 par heure, données horaires NASA POWER 2021-2023, contrôle qualité Kuma) et profil calculé $\tau \cos \theta_z$ pour décembre et avril. τ est un facteur d'échelle atmosphérique unique par mois.

10 Vers la surface inclinée : l'angle d'incidence

Les panneaux ne sont presque jamais horizontaux. Une surface se décrit par deux angles : sa pente β (angle avec l'horizontale, 0° pour un plan posé à plat, 90° pour un mur) et son azimut γ (direction vers laquelle elle fait face, même convention que l'azimut solaire). L'angle d'incidence θ est l'angle entre le rayonnement direct et la normale à la surface :

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (9)$$

Deux cas particuliers servent de garde-fous : pour une surface horizontale ($\beta = 0$), $\theta = \theta_z$; pour une surface orientée plein sud ($\gamma = 0$) l'expression se développe en $\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta$: tout se passe comme si la surface était horizontale à la latitude $\varphi - \beta$.

À retenir

Si $\cos \theta < 0$, le soleil éclaire la surface par l'arrière : le rayonnement direct intercepté est nul. Un code de calcul doit borner $\cos \theta$ à zéro, faute de quoi il fabrique de l'énergie négative, ou pire, la retransche du productible.

L'angle d'incidence clôt la géométrie : on sait désormais où est le soleil et sous quel angle il frappe une surface quelconque. Ce qui manque encore, c'est l'*intensité* du rayonnement qui arrive, et sa décomposition en part directe et part diffuse : c'est l'objet du guide 3.

11 Conclusion

À retenir

1. Trois angles d'entrée (φ , δ , ω) suffisent à calculer la position complète du soleil (α_s , θ_z , γ_s).
2. La déclinaison se calcule par Spencer (équation 1), se vérifie par Cooper, et ne dépend que du jour de l'année.
3. La formule pivot est $\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$; à midi, $\alpha_{s, \text{midi}} = 90^\circ - |\varphi - \delta|$.
4. Entre les tropiques, le soleil passe au zénith deux fois par an (à Conakry : 15 avril et 29 août) et culmine au *nord* autour du solstice de juin.
5. Le lever et le coucher se déduisent de $\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta$; à Conakry la durée du jour ne varie que de 11h26 à 12h34.
6. Sur une surface inclinée, l'angle d'incidence (équation 9) ferme la chaîne géométrique ; borner $\cos \theta$ à zéro quand le soleil passe derrière la surface.

Le guide 3 quittera la géométrie pour la ressource : que vaut le rayonnement qui arrive, comment se décompose-t-il en direct et diffus, et comment lire les données de GHI, DNI et DHI qui alimentent toute étude solaire.

Références

1. J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4^e édition, Wiley, 2013.
2. J.W. Spencer, « Fourier series representation of the position of the Sun », *Search*, vol. 2, n° 5, p. 172, 1971.
3. P.I. Cooper, « The absorption of radiation in solar stills », *Solar Energy*, vol. 12, n° 3, p. 333-346, 1969.
4. ASHRAE, *ASHRAE Handbook, Fundamentals*, chapitre 14 : Climatic Design Information, 2021.
5. NASA POWER Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>



Kuma Science

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

kumascience.com | contact@kumascience.com