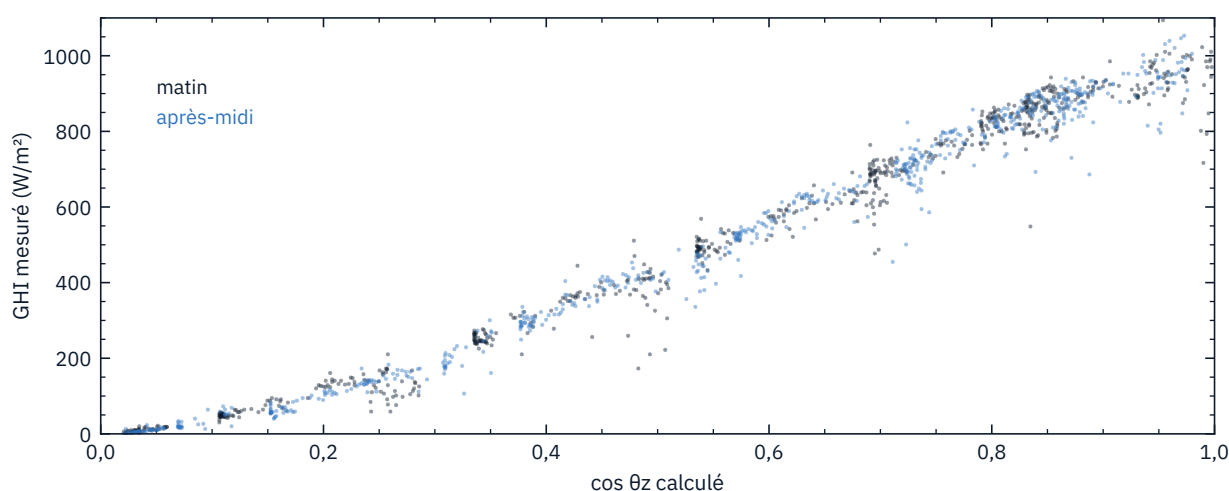




# La position du Soleil

Hauteur, azimut, lever et coucher, calculés pour la Guinée et vérifiés sur la mesure au sol



GHI mesuré au sol à Kankan en fonction du cosinus de l'angle zénithal calculé, pour les 110 journées les plus claires d'octobre 2021 à octobre 2023. Noir : heures du matin ; bleu : heures de l'après-midi. Section 9.

## Siba Kalivogui

Ingénieur efficacité énergétique

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

Données : RDS Guinée 2.0.1, ESMAP/WAPP Kankan

kumascience.com

## Un piquet sans ombre

Le 17 avril, à 12h37 à la montre, un piquet planté bien droit à Kankan ne projette plus d'ombre. Le Soleil est à la verticale. Le 21 décembre, il culminait à  $56^\circ$  au-dessus de l'horizon sud ; le 21 juin, il culminera au nord. Toute la Guinée vit ce basculement deux fois par an, entre le 9 et le 23 avril puis entre le 20 août et le 3 septembre selon la latitude. Ce guide explique comment le calculer, heure par heure et lieu par lieu.

Ce guide suppose acquis le calcul du temps solaire (guide 1). Coordonnées : référentiel des localités du RDS Guinée 2.0.1 ([doi:10.5281/zenodo.21051754](https://doi.org/10.5281/zenodo.21051754)). Mesure au sol : station ESMAP/WAPP de Kankan, confiance **A**. Notations et unités : guide 0, section 9. Licence CC BY-NC-SA 4.0.

## Table des matières

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Pourquoi la position du Soleil compte</b>    | <b>3</b>  |
| <b>2 Les angles qui situent le Soleil</b>         | <b>3</b>  |
| <b>3 La déclinaison</b>                           | <b>4</b>  |
| <b>4 L'angle horaire</b>                          | <b>5</b>  |
| <b>5 La hauteur du Soleil</b>                     | <b>5</b>  |
| <b>6 L'azimut du Soleil</b>                       | <b>6</b>  |
| <b>7 Lever, coucher et durée du jour</b>          | <b>7</b>  |
| <b>8 Le Soleil passe au nord en juin</b>          | <b>9</b>  |
| <b>9 La géométrie face à la mesure de Kankan</b>  | <b>9</b>  |
| <b>10 L'angle d'incidence sur un plan incliné</b> | <b>11</b> |
| <b>11 Exercices</b>                               | <b>12</b> |
| <b>12 Résumé</b>                                  | <b>14</b> |
| <b>Références</b>                                 | <b>15</b> |

## 1 Pourquoi la position du Soleil compte

Les positions du Soleil commandent l'énergie qu'un panneau reçoit. L'irradiance directe sur une surface est proportionnelle au cosinus de l'angle entre le rayon solaire et la normale à la surface. Hauteur et azimut du Soleil entrent donc dans tous les calculs des guides suivants, du ciel clair à la transposition vers le plan des modules, au productible et à l'ombrage entre rangées.

Le guide donne les formules de la hauteur, de l'azimut, du lever et du coucher, et de l'angle d'incidence sur un panneau. Il les applique aux localités guinéennes, puis les compare aux mesures de la station de Kankan.

## 2 Les angles qui situent le Soleil

Trois angles décrivent le lieu et l'instant. Trois autres décrivent la position du Soleil qui en résulte.

### Angles d'entrée

- Latitude  $\varphi$  : position nord-sud du lieu, positive au nord.
- Déclinaison  $\delta$  : angle entre la direction du Soleil et le plan de l'équateur. Elle dépend du jour de l'année et varie entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ .
- Angle horaire  $\omega$  : rotation de la Terre depuis le midi solaire,  $15^\circ$  par heure, négatif le matin.

### Angles de sortie

- Hauteur  $\alpha_s$  : angle entre la direction du Soleil et le plan horizontal.
- Angle zénithal  $\theta_z$  : angle entre la direction du Soleil et la verticale,  $\theta_z = 90^\circ - \alpha_s$ .
- Azimut  $\gamma_s$  : direction horizontale du Soleil, comptée depuis le sud, négative vers l'est et positive vers l'ouest.

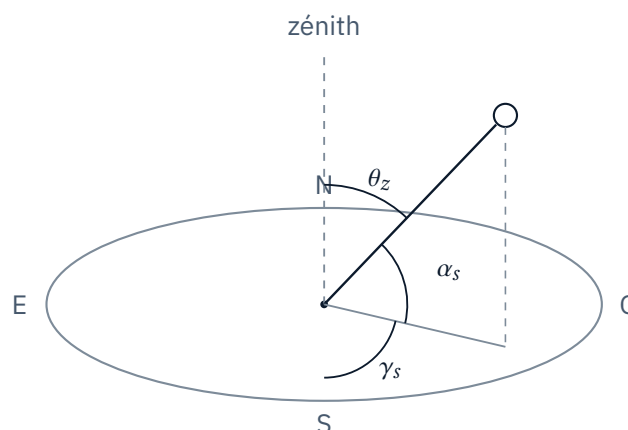


Figure 1 : Hauteur  $\alpha_s$ , angle zénithal  $\theta_z$  et azimut  $\gamma_s$  d'un Soleil d'après-midi ( $\gamma_s > 0$ ), vus par un observateur placé au centre du plan horizontal.

La pente  $\beta$  et l'azimut  $\gamma$  d'une surface complètent la liste à la section 10.

## 3 La déclinaison

### 3.1 Origine

L'axe de rotation de la Terre fait un angle de  $23,4^\circ$  avec la perpendiculaire au plan de son orbite, et garde une direction fixe dans l'espace. Au fil de l'année, l'hémisphère nord penche vers le Soleil en juin et s'en détourne en décembre. Vue de la Terre, la direction du Soleil oscille de part et d'autre de l'équateur. Elle atteint  $+23,45^\circ$  au solstice de juin, s'annule aux équinoxes et descend à  $-23,45^\circ$  au solstice de décembre. La déclinaison ne dépend que de la date. Sa variation au cours d'une journée, inférieure à  $0,4^\circ$ , se néglige en ingénierie.

### 3.2 Formules

La série de Spencer, fondée sur le même angle  $B = (n - 1) 360/365$  que l'équation du temps du guide 1, donne la déclinaison à  $0,03^\circ$  près :

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

La formule de Cooper, plus simple, sert de contrôle :

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

Les deux s'écartent de moins de  $1,4^\circ$  sur l'année; l'écart maximal tombe à la mi-octobre (figure 2).

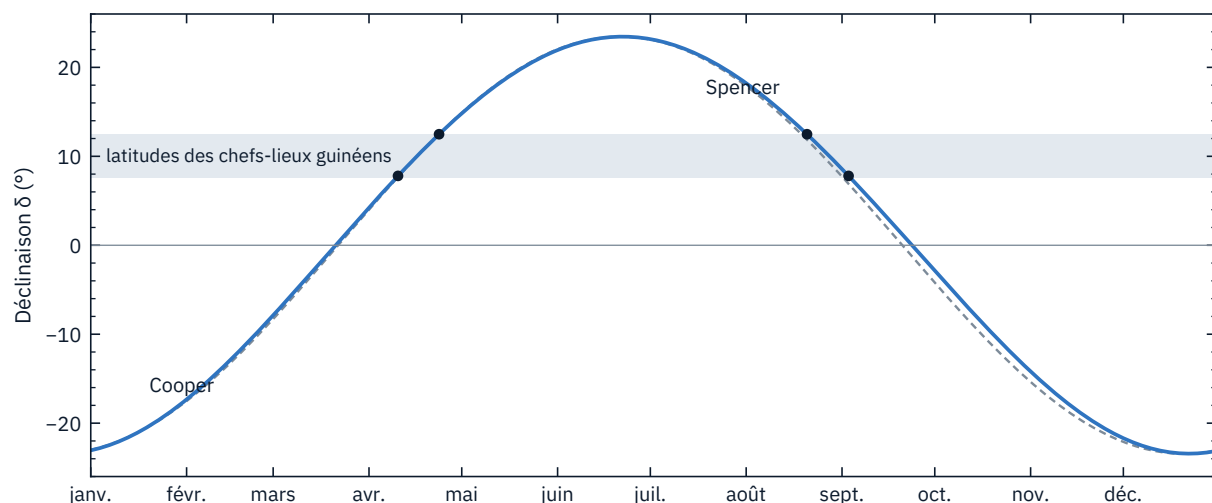


Figure 2 : Déclinaison solaire selon Spencer (trait plein) et Cooper (tirets). La bande grise couvre les latitudes des 34 localités du RDS Guinée, de Yomou ( $7,57^\circ$  N) à Koundara ( $12,48^\circ$  N). Les points marquent les passages au zénith à ces deux extrémités.

#### Déclinaison du 15 mars

Le 15 mars correspond à  $n = 74$  et à  $B = 72,00^\circ$ . L'équation 1 donne  $\delta = -2,44^\circ$ . L'équation 2 donne  $23,45 \sin(353,1^\circ) = -2,82^\circ$ . L'écart de  $0,38^\circ$  reste dans la marge attendue. La valeur de Spencer est retenue pour la suite.

**Erreur fréquente : les unités de B**

Dans l'équation 1, les coefficients s'appliquent à des cosinus et sinus de  $B$ ; le facteur  $180/\pi$  convertit le résultat final en degrés. Si l'implantation mélange degrés et radians, les deux formules s'écartent de plusieurs degrés. Un écart supérieur à  $1,4^\circ$  entre Spencer et Cooper signale presque toujours cette confusion.

## 4 L'angle horaire

L'angle horaire traduit le temps solaire  $T_s$  (en heures) en rotation terrestre :

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

Il vaut  $-45^\circ$  à 9h00 solaire, zéro au midi solaire et  $+45^\circ$  à 15h00 solaire.

**Angle horaire à Kaloum le 15 mars à 12h00**

Le guide 1 a établi que ce jour-là, à 12h00 civile, le temps solaire vaut 655,5 minutes, soit  $T_s = 10,925$  h à Kaloum. D'où  $\omega = 15 \times (10,925 - 12) = -16,1^\circ$ . Le Soleil a encore un peu plus d'une heure de course avant le méridien.

## 5 La hauteur du Soleil

### 5.1 Formule

La hauteur se déduit des trois angles d'entrée :

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

Cette relation est la plus utilisée de la collection. Les guides 3 à 8 en dépendent tous.

**Hauteur du Soleil à Kaloum le 15 mars à 12h00**

Avec  $\varphi = 9,509^\circ$ ,  $\delta = -2,44^\circ$  et  $\omega = -16,1^\circ$  :

$$\sin \alpha_s = \sin 9,509 \sin(-2,44) + \cos 9,509 \cos(-2,44) \cos(-16,1) = 0,9396$$

d'où  $\alpha_s = 70,0^\circ$  et  $\theta_z = 20,0^\circ$ .

### 5.2 Le Soleil de midi

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

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

À Kaloum le 15 mars,  $\alpha_{s,\text{midi}} = 90 - (9,51 + 2,44) = 78,1^\circ$ , atteinte à 13h04 civile (guide 1). Le 21 décembre, le Soleil de midi y culmine à  $57,1^\circ$  au sud; le 21 juin, à  $76,1^\circ$  au nord.

### 5.3 Le passage au zénith

La hauteur de midi atteint  $90^\circ$  le jour où la déclinaison égale la latitude. Ce cas n'existe qu'entre les tropiques, et il se produit deux fois par an, une fois quand la déclinaison monte vers le solstice de juin, une fois quand elle redescend. La figure 3 donne la date du premier passage pour chaque sous-préfecture guinéenne ; le tableau 1 donne les deux dates pour quelques localités.

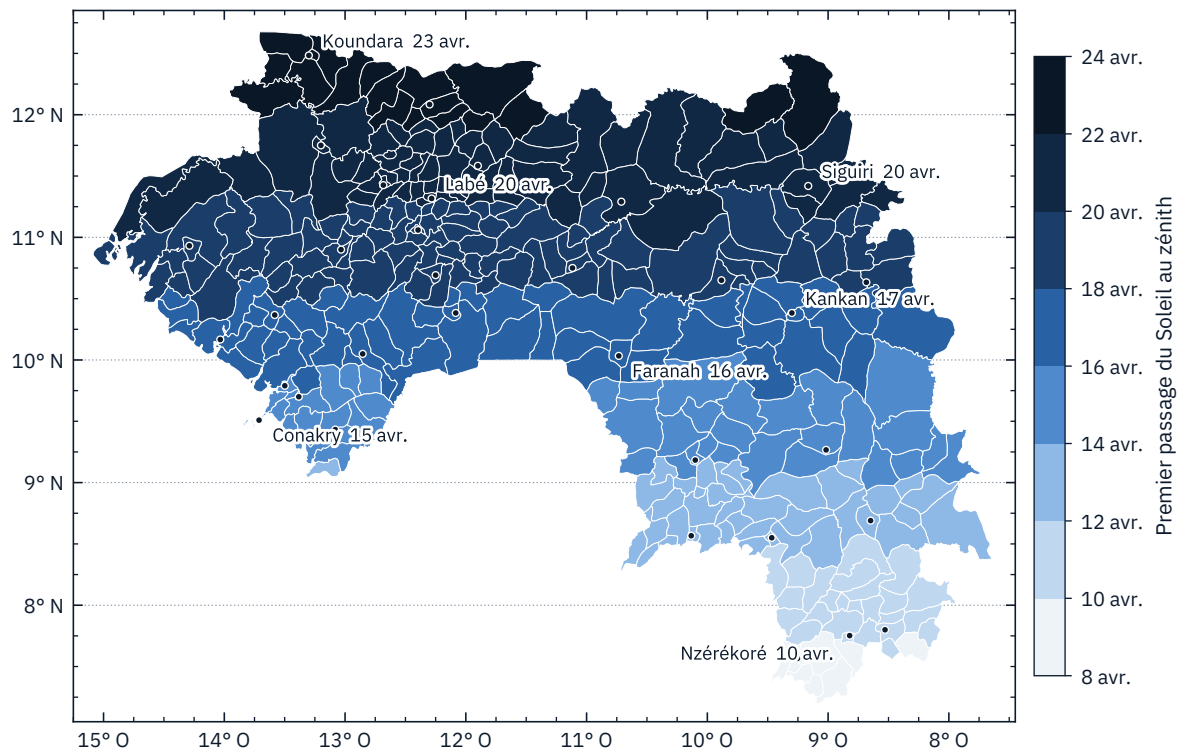


Figure 3 : Date du premier passage du Soleil au zénith, par sous-préfecture (latitude du centre de chaque sous-préfecture, déclinaison de Spencer). Une classe de couleur couvre deux jours. Le second passage se déduit par symétrie autour du solstice de juin. Limites : COD-AB Guinée, niveau 3 (OCHA).

Du 23 avril au 20 août, la déclinaison dépasse la latitude de toute la Guinée. Le Soleil de midi passe alors au nord du zénith, ce qui a une conséquence directe sur l'orientation des panneaux (section 10).

## 6 L'azimut du Soleil

L'azimut donne la direction horizontale du Soleil, utile pour orienter un champ de modules ou tracer un masque d'ombrage. Duffie et Beckman l'écrivent :

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

Le facteur  $\text{signe}(\omega)$  place le Soleil à l'est le matin et à l'ouest l'après-midi.

| Localité   | Latitude | Premier passage | Second passage            |
|------------|----------|-----------------|---------------------------|
| Nzérékoré  | 7,75° N  | 10 avril        | 3 septembre               |
| Kaloum     | 9,51° N  | 15 avril        | 29 août                   |
| Faranah    | 10,03° N | 16 avril        | 27 août                   |
| Kankan     | 10,38° N | 17 avril        | 26 août                   |
| Boké       | 10,93° N | 19 avril        | 25 août                   |
| Labé       | 11,32° N | 20 avril        | 24 août                   |
| Siguiri    | 11,42° N | 20 avril        | 23 août                   |
| Koundara   | 12,48° N | 23 avril        | 20 août                   |
| Abidjan    | 5,36° N  | 3 avril         | 9 septembre               |
| Freetown   | 8,48° N  | 12 avril        | 1 <sup>er</sup> septembre |
| Bamako     | 12,64° N | 24 avril        | 20 août                   |
| Dakar      | 14,69° N | 30 avril        | 13 août                   |
| Nouakchott | 18,09° N | 12 mai          | 1 <sup>er</sup> août      |

Table 1 : Dates de passage du Soleil au zénith en 2026 (déclinaison de Spencer). Selon l'année, les dates peuvent varier d'un jour.

#### Azimut du Soleil à Kaloum le 15 mars à 12h00

Avec  $\theta_z = 20,0^\circ$ , l'argument de l'arc cosinus vaut

$$\frac{\cos 20,0 \sin 9,509 - \sin(-2,44)}{\sin 20,0 \cos 9,509} = 0,5857,$$

soit  $54,1^\circ$ . Comme  $\omega < 0$ ,  $\gamma_s = -54,1^\circ$  : le Soleil est au sud-est.

La relation  $\sin \gamma_s = \sin \omega \cos \delta / \cos \alpha_s$  donne  $-0,8105$ , soit le même angle.

#### Erreur fréquente : le quadrant

La relation en sinus ne distingue pas  $\gamma_s$  de  $180^\circ - \gamma_s$ . Elle échoue donc dès que le Soleil passe au nord, ce qui arrive en Guinée d'avril à août. L'équation 6 n'a pas ce défaut. Son argument peut sortir de l'intervalle  $[-1, 1]$  par arrondi numérique quand le Soleil est proche du zénith. Il faut donc le borner avant de prendre l'arc cosinus.

## 7 Lever, coucher et durée du jour

### 7.1 Horizon géométrique

En posant  $\alpha_s = 0$  dans l'équation 4, on obtient l'angle horaire du coucher  $\omega_s$  :

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

Le lever a lieu à  $12 - \omega_s/15$  et le coucher à  $12 + \omega_s/15$  en temps solaire. La durée du jour vaut  $2\omega_s/15$  heures.

### Lever et coucher à Kaloum le 21 juin

Le 21 juin ( $n = 172$ ),  $\delta = 23,45^\circ$ . Alors  $\cos \omega_s = -\tan 9,509 \tan 23,45 = -0,0727$  et  $\omega_s = 94,17^\circ$ . Le lever solaire tombe à 5h43 et le coucher à 18h17, soit un jour de 12h33.

Pour repasser en heure civile, on ajoute la correction de longitude (54,85 min) et on retranche l'équation du temps ( $E = -1,32$  min), soit 56,2 minutes. Le lever tombe à 6h40 et le coucher à 19h13.

## 7.2 Horizon apparent

Les éphémérides publiées ne donnent pas ces heures-là. Elles définissent le lever comme l'apparition du bord supérieur du disque, et tiennent compte de la réfraction atmosphérique, qui relève l'image du Soleil d'environ un demi-degré à l'horizon. Les deux effets reviennent à placer l'horizon à  $\alpha_s = -0,833^\circ$  :

$$\cos \omega'_s = \frac{\sin(-0,833^\circ) - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \quad (8)$$

À Kaloum le 21 juin, le lever apparent tombe à 6h36 et le coucher apparent à 19h17, soit un jour de 12h41, huit minutes de plus que le jour géométrique.

### En pratique

Pour un calcul d'énergie, l'horizon géométrique suffit. Aux heures du lever, l'irradiance est trop faible pour peser sur un bilan journalier. Pour comparer un calcul à un almanach ou à une application météo, il faut l'horizon apparent, sans quoi l'écart atteint 4 minutes au lever et autant au coucher.

## 7.3 Des journées presque égales

| Localité | Latitude | Jour le plus court | Jour le plus long |
|----------|----------|--------------------|-------------------|
| Lola     | 7,80° N  | 11h33              | 12h27             |
| Kaloum   | 9,51° N  | 11h27              | 12h33             |
| Kankan   | 10,38° N | 11h24              | 12h36             |
| Koundara | 12,48° N | 11h16              | 12h44             |
| Paris    | 48,85° N | 8h02               | 15h58             |

Table 2 : Durée du jour géométrique extrême sur l'année (équation 7). Le jour apparent est plus long de 7 à 8 minutes en Guinée.

En Guinée, l'écart entre le jour le plus court et le plus long va de 54 minutes à Lola à 1h28 à Koundara (tableau 2), contre près de huit heures à Paris. Cette variation reste faible. La durée du jour n'est pas pour autant la durée de production utile : les premières et les dernières heures, avec un Soleil bas, apportent peu d'énergie, et la nébulosité réduit la production bien davantage que la durée du jour. Les guides 3 et 4 abordent ces effets.

## 8 Le Soleil passe au nord en juin

Un diagramme solaire réunit hauteur et azimut sur une seule figure. Le ciel y est vu d'en haut. Le centre correspond au zénith, le bord du cercle à l'horizon, le nord est en haut et l'est à droite. La figure 4 le donne pour Kankan, avec les heures civiles.

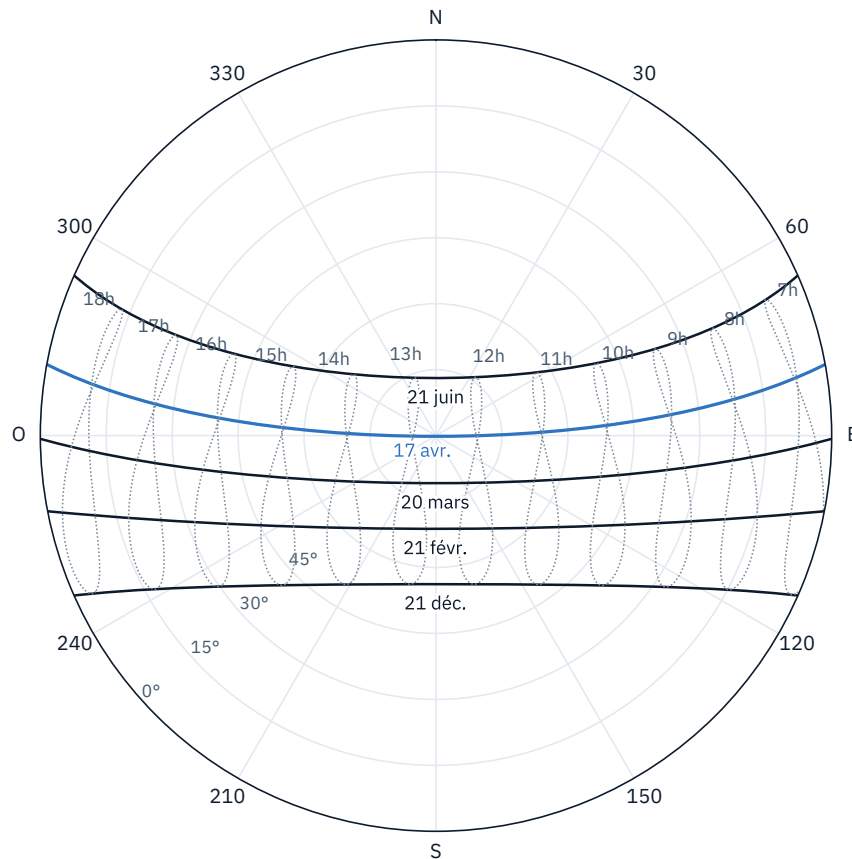


Figure 4 : Diagramme solaire de la station de Kankan (10,36° N, 9,30° O, heure civile UTC+0). Traits pleins : course du Soleil à cinq dates ; en bleu, le 17 avril, jour du passage au zénith. Pointillés : position du Soleil à chaque heure civile pleine au fil de l'année. Leur forme en huit vient de l'équation du temps. Cercles concentriques : hauteur du Soleil, de 0° au bord à 90° au centre.

Trois lectures en ressortent. Le 21 décembre, le Soleil reste au sud toute la journée. Le 17 avril, il passe par le zénith. Le 21 juin, il se lève à 23,8° au nord de l'est, passe au nord du zénith et se couche au nord-ouest. Les pointillés montrent aussi qu'à 12h00 civile le Soleil est toujours à l'est du méridien à Kankan, où le midi solaire tombe entre 12h21 et 12h51 (guide 1).

## 9 À Kankan, matin et après-midi deviennent symétriques par ciel clair

Une série de mesures permet de contrôler indirectement une géométrie solaire. Par ciel dégagé, le GHI suit de près le cosinus de l'angle zénithal. Si la géométrie est juste, une heure du matin et une heure de l'après-midi qui ont le même  $\cos \theta_z$  reçoivent le même rayonnement.

## 9.1 Journées claires et indice de clarté

On retient les 110 journées les plus claires des deux années de mesure de Kankan, celles dont l'indice de clarté journalier dépasse 0,654, soit 1 318 heures de jour. Pour chaque heure, on calcule deux grandeurs :

- la moyenne de  $\cos \theta_z$  sur l'heure, calculée minute par minute, puisqu'une valeur horaire résume toute l'heure (guide 1, section 8). Le cosinus pris au centre du pas donne presque le même résultat ;
- l'indice de clarté horaire  $k_t = \text{GHI}/(\text{G}_{on} \cos \theta_z)$ , rapport entre le rayonnement mesuré et le rayonnement reçu au sommet de l'atmosphère.

$\text{G}_{on}$  est le rayonnement extraterrestre sur un plan normal, qui varie de +3,4 à -3,3 % autour de la constante solaire  $G_{sc} = 1\,361 \text{ W/m}^2$  au fil de l'année [5]. Le guide 3 le détaille.

On compare ensuite les heures du matin et de l'après-midi, avec la géométrie complète et avec une géométrie simplifiée, fréquente dans les tableurs, qui prend directement l'heure de l'horodatage pour le temps solaire.

## 9.2 Ce que change la convention horaire

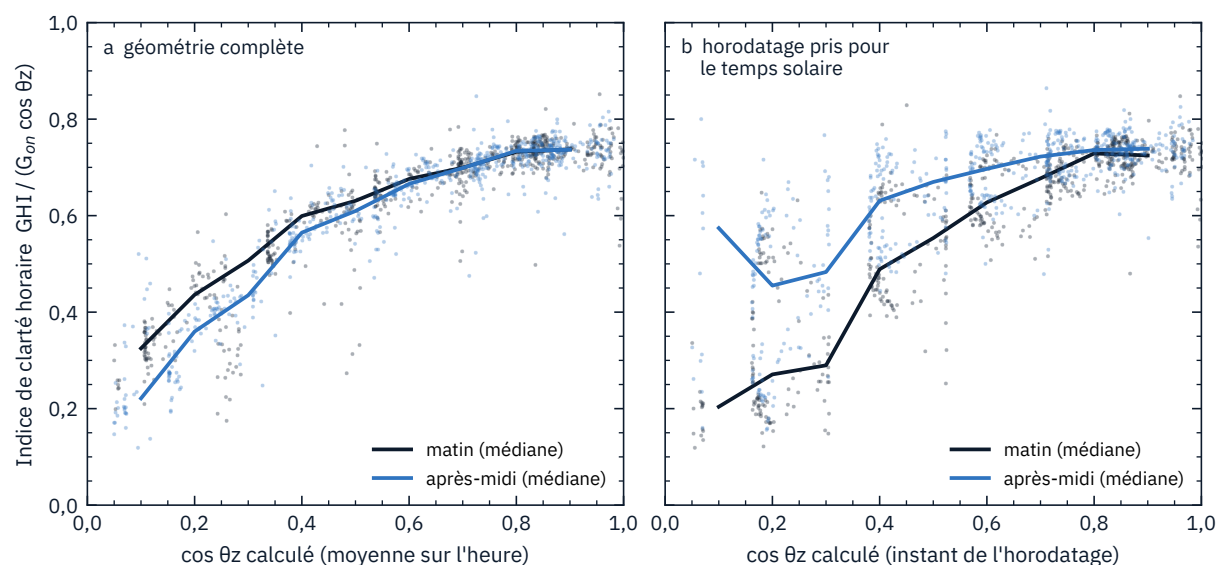


Figure 5 : Indice de clarté horaire mesuré à Kankan en fonction du cosinus de l'angle zénithal, pour les 110 journées les plus claires. Points : heures du matin (noir) et de l'après-midi (bleu). Courbes : médianes par tranche de 0,1. (a) Géométrie complète. (b) Heure de l'horodatage prise pour le temps solaire.

### Symétrie matin et après-midi à Kankan

Avec la géométrie complète, au-dessus de  $\cos \theta_z = 0,3$ , les indices de clarté médians du matin et de l'après-midi diffèrent de moins de 0,013. Ils montent de 0,57 à 0,74 quand le Soleil s'élève.

Avec la géométrie simplifiée, entre  $\cos \theta_z = 0,1$  et 0,3, le matin affiche 0,28 et l'après-midi 0,46. Entre 0,3 et 0,5, 0,48 et 0,63.

Source : station ESMAP/WAPP de Kankan (Banque mondiale), agrégation horaire Kuma Science | Période : oct. 2021 à oct. 2023, 110 jours clairs | Niveau de confiance **A**

Sur cet échantillon de journées claires, la géométrie complète ramène l'écart entre les indices médians du matin et de l'après-midi sous 0,013 au-dessus de  $\cos \theta_z = 0,3$ . Ce résultat est cohérent avec la géométrie calculée ; il ne dispense pas de vérifier la convention d'horodatage de toute autre série. La géométrie simplifiée crée une dissymétrie artificielle. Elle commet deux erreurs de sens opposé. Elle ignore les 37 minutes de retard du midi solaire à Kankan, et elle place l'instant de calcul au début du pas au lieu de son centre, soit 30 minutes trop tôt. À Kankan, les deux se compensent en partie. Il reste un décalage de quelques minutes, auquel l'équation du temps ajoute jusqu'à un quart d'heure selon la saison. Il suffit à placer le Soleil trop haut le matin et trop bas l'après-midi quand il est proche de l'horizon.

Aux très faibles hauteurs, sous  $\cos \theta_z = 0,15$ , les deux branches s'écartent un peu même avec la géométrie complète. La réponse angulaire du pyranomètre, l'horizon réel autour de la station et le trajet très long dans l'atmosphère pèsent alors davantage que la géométrie.

---

### À retenir

Pour contrôler la convention horaire d'une série inconnue, comparer par ciel clair l'indice de clarté du matin et de l'après-midi à même  $\cos \theta_z$ . Une dissymétrie qui grandit près de l'horizon signale un décalage entre l'horodatage et le temps solaire.

---

## 10 L'angle d'incidence sur un plan incliné

### 10.1 Formule

Un panneau se décrit par sa pente  $\beta$  ( $0^\circ$  à plat,  $90^\circ$  pour un mur) et par son azimut  $\gamma$ , direction vers laquelle il fait face, avec la même convention que  $\gamma_s$  : 0 au sud,  $180^\circ$  au nord. L'angle d'incidence  $\theta$  entre le rayon direct et la normale au panneau vérifie :

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

Pour un plan horizontal,  $\theta = \theta_z$ . Pour un plan orienté plein sud, l'expression devient  $\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta$  : le plan se comporte comme un plan horizontal situé à la latitude  $\varphi - \beta$ .

#### Erreur fréquente : l'incidence arrière

Quand  $\cos \theta < 0$ , le Soleil éclaire le panneau par l'arrière et le rayonnement direct intercepté est nul. Un code qui ne borne pas  $\cos \theta$  à zéro produit une énergie négative et la retranche du productible.

### 10.2 Le plan orienté au sud en juin

Entre fin avril et fin août, le Soleil de midi passe au nord du zénith en Guinée. Un panneau incliné vers le sud lui tourne alors le dos au milieu de la journée. La figure 6 mesure l'effet à Kankan, en géométrie pure. Elle compare le rayonnement extraterrestre reçu en un mois par un plan incliné et par un plan horizontal.

Le plan incliné de  $10^\circ$  vers le sud reçoit 9,3 % de moins que le plan horizontal en juin, et 14,5 % de plus en décembre. Sur l'année, il gagne 1,4 %. Incliné de  $15^\circ$ , il perd 14,7 %

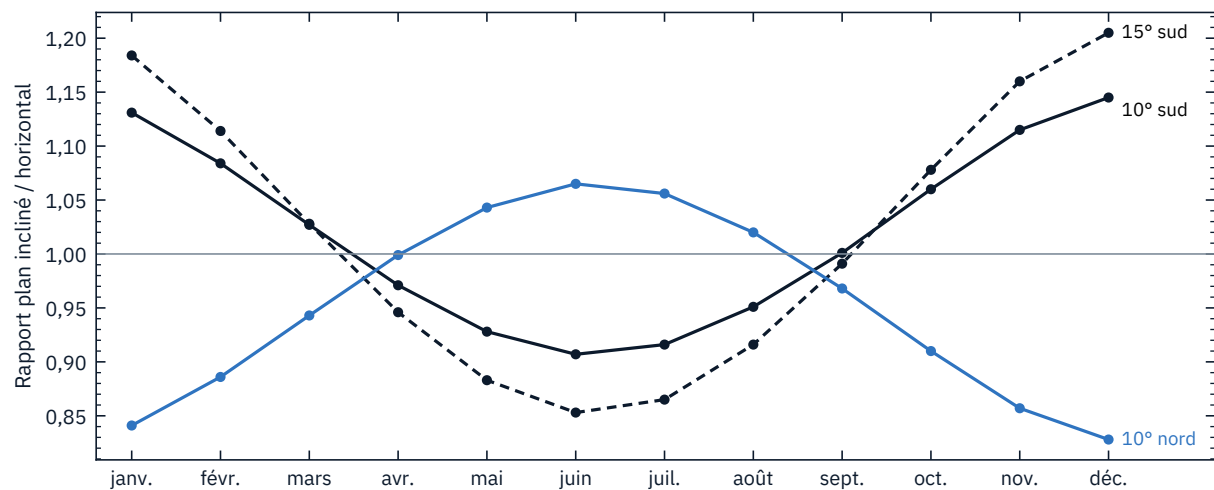


Figure 6 : Rapport, mois par mois, entre le rayonnement extraterrestre reçu par un plan incliné et par un plan horizontal à Kankan, pour trois orientations. Calcul géométrique (équation 9 intégrée minute par minute), sans atmosphère.

en juin et gagne 1,1 % sur l'année. Le même plan de 10° tourné vers le nord gagne 6,5 % en juin mais perd 4,3 % sur l'année.

Ces rapports décrivent le rayonnement au sommet de l'atmosphère, sans nuages ni diffus. Ils montrent l'effet géométrique : un plan orienté au sud perd de mai à août et gagne d'octobre à février. Ils ne suffisent pas à choisir une orientation. Au sol, une part du rayonnement arrive diffuse, de tout le ciel, et la nébulosité de juin à septembre réduit la part directe. Le choix d'une pente et d'une orientation dépend aussi du site, des masques, de l'entretien et du profil de consommation. Le guide 5 reprend la question avec les mesures de Kankan.

## 11 Exercices

### Exercice 1 (application)

Calculer la déclinaison du 21 juin ( $n = 172$ ) avec la formule de Cooper.

Corrigé

Étape 1, l'angle :  $284 + 172 = 456$ , puis  $360 \times 456/365 = 449,75^\circ$ , soit  $449,75 - 360 = 89,75^\circ$ .

Étape 2, le sinus :  $\sin 89,75^\circ = 0,99999$ , pratiquement 1.

Étape 3 :  $\delta = 23,45 \times 0,99999 = 23,45^\circ$ . Le 21 juin est le jour où la déclinaison atteint son maximum. Spencer donne la même valeur à  $0,01^\circ$  près.

### Exercice 2 (application)

Quelle est la hauteur du Soleil de midi à Labé ( $11,317^\circ$  N) le 21 décembre ( $\delta = -23,42^\circ$ ) ? De quel côté du zénith se trouve-t-il ?

Corrigé

On applique l'équation 5 avec  $\varphi = 11,317^\circ$  et  $\delta = -23,42^\circ$ .

Étape 1, l'écart :  $\varphi - \delta = 11,317 - (-23,42) = 34,74^\circ$ .

Étape 2, la hauteur :  $\alpha_{s, \text{midi}} = 90 - 34,74 = 55,3^\circ$ .

Étape 3, le côté : la déclinaison ( $-23,42^\circ$ ) est inférieure à la latitude ( $11,317^\circ$ ), le Soleil culmine donc

au sud du zénith.

### Exercice 3 (application)

Avec la formule de Cooper, trouver les jours de passage du Soleil au zénith à Siguiri (11,419° N).

Corrigé

Le Soleil passe au zénith à midi quand  $\delta = \varphi$ .

Étape 1, le sinus cherché :  $\sin(360(284 + n)/365) = 11,419/23,45 = 0,4870$ .

Étape 2, les deux angles :  $\arcsin 0,4870 = 29,14^\circ$ , et l'autre angle de même sinus vaut  $180 - 29,14 = 150,86^\circ$ . Comme  $284 + n$  dépasse 365, on ajoute un tour :  $389,14^\circ$  et  $510,86^\circ$ .

Étape 3, les jours :  $284 + n = 365 \times 389,14/360 = 394,55$ , d'où  $n = 110,5$ ; et  $284 + n = 365 \times 510,86/360 = 517,95$ , d'où  $n = 234,0$ .

Étape 4, les dates : le jour 110 est le 20 avril, le jour 234 le 22 août. Le premier passage tombe donc le 20 ou le 21 avril, le second le 22 août. Spencer donne le 20 avril et le 23 août.

### Exercice 4 (application)

À Kaloum le 21 juin, dans quelle direction le Soleil se lève-t-il ?

Corrigé

Étape 1, les données : le 21 juin,  $\delta = 23,45^\circ$ , donc  $\sin \delta = 0,398$ . À Kaloum,  $\varphi = 9,51^\circ$ , donc  $\cos \varphi = 0,986$ .

Étape 2, la simplification : au lever, le Soleil est sur l'horizon,  $\theta_z = 90^\circ$ , donc  $\cos \theta_z = 0$  et  $\sin \theta_z = 1$ . L'équation 6 se réduit à  $\cos \gamma_s = -\sin \delta / \cos \varphi$ .

Étape 3, le calcul :  $\cos \gamma_s = -0,398/0,986 = -0,404$ , soit  $|\gamma_s| = \arccos(-0,404) = 113,8^\circ$ .

Étape 4, le signe : le matin,  $\omega < 0$ , donc  $\gamma_s = -113,8^\circ$ . L'azimut est compté depuis le sud, négatif vers l'est :  $-90^\circ$  est l'est, et  $-113,8^\circ$  se trouve  $23,8^\circ$  au nord de l'est.

### Exercice 5 (Python)

Avec le fichier `data/localites.csv` du RDS Guinée, calculer la hauteur du Soleil à 12h00 civile le 15 mars dans les 34 localités. Laquelle a le Soleil le plus haut à cet instant, et pourquoi n'est-ce pas la plus proche de l'équateur ?

Corrigé

Il faut combiner le guide 1 (temps solaire, donc  $\omega$ ) et l'équation 4. Lola arrive en tête avec  $75,0^\circ$ , devant Nzérékoré ( $74,9^\circ$ ) et Yomou ( $74,7^\circ$ ). Yomou est la plus proche de l'équateur, mais elle est  $0,7^\circ$  plus à l'ouest que Lola. À 12h00 civile, son Soleil est plus loin du méridien. La plus basse est Koundara ( $68,4^\circ$ ), au nord-ouest.

### Exercice 6 (pour aller plus loin)

Refaire la figure 5 en ne corrigeant que l'un des deux défauts de la géométrie simplifiée : soit la longitude et l'équation du temps, soit le centre du pas horaire. Le résultat s'améliore-t-il ?

Corrigé

Il se dégrade fortement. Entre  $\cos \theta_z = 0,1$  et  $0,3$ , corriger seulement la longitude et l'équation du temps donne  $0,77$  le matin et  $0,10$  l'après-midi ; corriger seulement le centre du pas donne  $0,12$  et  $0,87$ . Les deux erreurs se compensaient en partie, et n'en corriger qu'une laisse l'autre entière. Les deux corrections vont ensemble.

## 12 Résumé

1.  $\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$ ; à midi,  $\alpha_{s,\text{midi}} = 90^\circ - |\varphi - \delta|$ .
2. En Guinée, le Soleil de midi passe au nord du zénith entre fin avril et fin août.
3. Pour comparer un calcul à un almanach, prendre l'horizon apparent ( $-0,833^\circ$ ); pour un calcul d'énergie, l'horizon géométrique suffit.

Le guide 3 passe de la géométrie au rayonnement. Il part de ce qui arrive au sommet de l'atmosphère pour décrire ce qui en reste au sol, direct et diffus.

## Références

- [1] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4<sup>e</sup> édition, Wiley, 2013, chapitres 1 et 2.
- [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] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, 2<sup>e</sup> édition, Willmann-Bell, 1998, chapitre 15.
- [5] G. Kopp, J. L. Lean, « A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L01706, 2011.
- [6] Kuma Science, *Référentiel de données solaires de la Guinée (RDS)*, version 2.0.1, 2026, licence CC BY 4.0. [doi:10.5281/zenodo.21051754](https://doi.org/10.5281/zenodo.21051754).
- [7] World Bank, ESMAP, WAPP, *Solar resource measurement campaign in West Africa*, station de Kankan (Guinée), 2021-2023, licence CC BY 4.0. <https://energydata.info>.
- [8] OCHA, *Guinée : limites administratives (COD-AB)*, niveau 3, Humanitarian Data Exchange. <https://data.humdata.org>.



## 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.