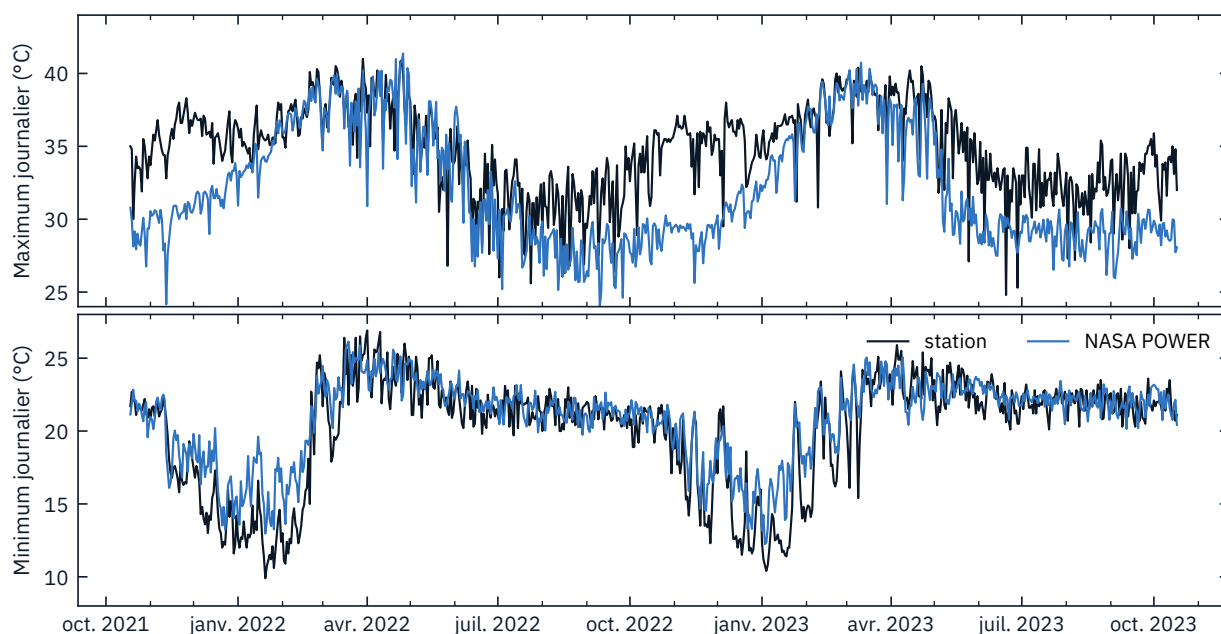




Températures de conception

Les matins froids et les après-midi chauds qui fixent la tension d'un champ photovoltaïque



Températures maximale et minimale de chaque jour à Kankan, mesurées à la station et données par NASA POWER, octobre 2021 à octobre 2023. Section 3.

Siba Kalivogui

Ingénieur efficacité énergétique

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

Données : NASA POWER, ESMAP/WAPP Kankan et Tarambaly

kumascience.com

Un matin de janvier à Kankan

Le 20 janvier 2022, à 7h36, le premier soleil atteint 102 W/m^2 sur le module d'essai de la station de Kankan. L'air est à $11,0^\circ\text{C}$ et le module à $10,6^\circ\text{C}$. Prenons un module dont la tension à vide vaut $49,5 \text{ V}$ en conditions standard, et une chaîne de trois modules, soit $148,5 \text{ V}$ à 25°C . Le calcul de vérification, qui applique cette température de $10,6^\circ\text{C}$ à la tension de fiche établie sous $1\,000 \text{ W/m}^2$, donne environ 154 V , au-dessus des 150 V admis par un régulateur courant. Ce n'est pas la tension que la chaîne avait à 7h36 sous 102 W/m^2 , qui dépend aussi de l'éclairement; c'est la borne qu'il faut comparer à la limite de l'appareil. Avec la température moyenne de Kankan, 26°C , le même calcul n'aurait rien signalé. Ce guide montre quelles températures retenir pour la conception électrique d'un champ, et ce que valent celles des bases de données.

Ce guide suppose acquis les guides 1 à 9, en particulier le guide 6. Données : NASA POWER, minima et maxima journaliers 2001-2025 aux 34 localités du RDS [1], niveau de confiance **B**; stations ESMAP/WAPP de Kankan et de Tarambaly [2], niveau **A**. Notations et unités : guide 0, section 9. Licence CC BY-NC-SA 4.0.

Table des matières

1 La tension d'un module dépend de sa température	3
2 Le module au lever du soleil	3
3 NASA POWER face aux stations	4
4 Records et percentiles	5
5 Dimensionner une chaîne	6
6 Exercices	7
7 Résumé	8
Références	9

1 La tension d'un module dépend de sa température

La tension d'un module baisse quand sa température monte, et monte quand elle baisse. Pour une température de cellule T_{cell} :

$$V_{oc}(T_{\text{cell}}) = V_{oc,STC} [1 + \beta_{V_{oc}} (T_{\text{cell}} - 25)] \quad V_{mp}(T_{\text{cell}}) = V_{mp,STC} [1 + \beta_{V_{mp}} (T_{\text{cell}} - 25)] \quad (1)$$

où V_{oc} est la tension à vide, V_{mp} la tension au point de puissance maximale, et β leurs coefficients de température, négatifs, donnés par la fiche technique. Ces relations valent sous l'éclairement de référence ; la tension à vide baisse aussi quand l'éclairement diminue, et des modèles comme celui de Sandia en tiennent compte [4]. Pour la sécurité, la pratique consiste à appliquer la température la plus basse à la tension de fiche, sans compter sur cette baisse.

Deux vérifications en découlent ; elles font partie des exigences de conception électrique d'un champ photovoltaïque [3]. La tension à vide de la chaîne, au plus froid, ne doit pas dépasser la tension continue maximale admise par l'onduleur ou le régulateur : au-delà, l'appareil peut être endommagé. La tension de puissance maximale, au plus chaud, doit rester dans la plage de suivi du point de puissance maximale : en dessous, l'appareil perd de la production. La première demande la température la plus basse du module au moment où il reçoit de la lumière ; la seconde, sa température la plus haute. La moyenne ne sert à aucune des deux.

2 La nuit, le module est plus froid que l'air ; au lever du soleil, il le rejoint

Un module exposé au ciel nocturne perd de la chaleur par rayonnement et descend sous la température de l'air. Les sondes des stations (guide 6) permettent de le mesurer sur le module d'essai.

Module d'essai et air, la nuit et au lever du soleil

La nuit (Soleil plus de 6° sous l'horizon), la face arrière du module est en moyenne 0,8 K plus froide que l'air à Kankan et 1,2 K à Tarambaly ; 5 % des minutes de nuit sont à plus de 2,5 et 2,7 K sous l'air. Le module descend à 7,4°C à Kankan et 9,6°C à Tarambaly. Dès que le plan reçoit plus de 100 W/m², sa température la plus basse vaut 10,6°C à Kankan, pour un air à 11,0, et 12,1°C à Tarambaly, pour un air à 13,4.

Source : fichiers ESMAP/WAPP, minutes | Période : oct. 2021 à oct. 2023 | Niveau de confiance **A**

Au moment où la chaîne commence à recevoir de la lumière, le module est donc proche de l'air, un peu en dessous : 0,4 K à Kankan et 1,3 K à Tarambaly dans les cas ci-dessus. Sur ces deux sites, prendre la température minimale de l'air comme température de cellule au froid a donc été un peu optimiste, de l'ordre d'un kelvin. Cet ordre de grandeur vient de la face arrière de petits modules d'essai ; il n'a pas été mesuré sur la cellule d'un module de champ et ne constitue pas une correction générale.

3 NASA POWER resserre l'écart entre le jour et la nuit

Les températures de NASA POWER viennent d'une réanalyse météorologique à maille de 0,5 sur 0,625°, soit environ 55 sur 70 km [1]. Les stations permettent de comparer ses minima et maxima journaliers aux mesures, sur 730 jours.

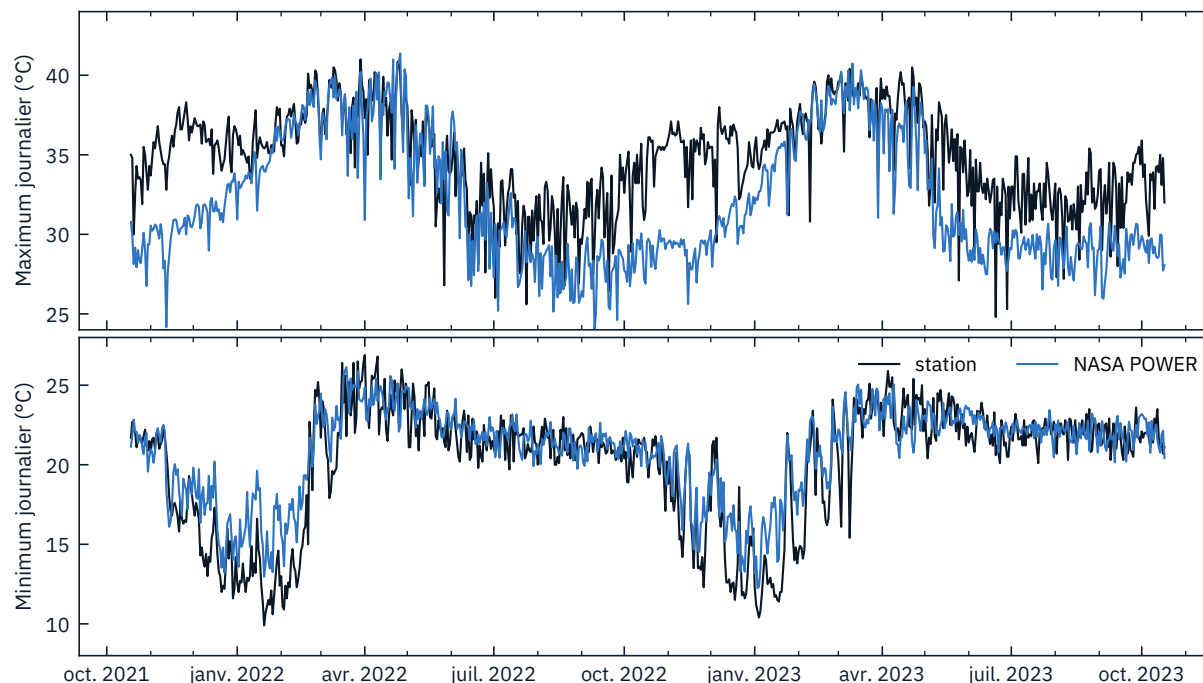


Figure 1 : Températures maximale et minimale de chaque jour à Kankan : station et NASA POWER (maille de Kankan), jours complets d'octobre 2021 à octobre 2023.

Minima et maxima journaliers, NASA POWER face aux stations

Kankan : le minimum de NASA POWER dépasse celui de la station de 0,76 K en moyenne, son maximum lui est inférieur de 2,68 K ; l'écart moyen entre maximum et minimum vaut 11,3 K pour NASA POWER et 14,7 K mesuré. Tarambaly (maille de Labé, altitude de maille 785 m, station à 860 m) : +0,75 et -1,74 K ; écart jour-nuit de 11,0 K contre 13,5 K. Sur les deux ans, la station de Kankan a mesuré un minimum de 9,9°C (20 janvier 2022) et un maximum de 41,0°C (29 mars 2022) ; NASA POWER donne 12,24 et 41,37°C sur la même période. À Tarambaly : 11,8 et 39,2°C mesurés, 13,11 et 39,74 pour NASA POWER.

Source : fichiers ESMAP/WAPP ; NASA POWER journalier | Période : oct. 2021 à oct. 2023, 730 jours par station | Niveau de confiance **B**

Sur la moyenne journalière, NASA POWER est juste à 0,1 K près aux deux stations. Sur les extrêmes, il se trompe dans le sens défavorable à la conception : ses matins sont trop doux, ses après-midi trop frais. L'écart se voit surtout d'octobre à janvier sur les maxima (figure 1). Sur ces deux ans, le minimum mesuré était plus froid de 2,3 K à Kankan et de 1,3 K à Tarambaly que celui de NASA POWER. Deux stations ne suffisent pas pour corriger les 34 localités, mais elles indiquent le sens et l'ordre de grandeur de la marge à prévoir au froid.

4 Un même épisode de froid fixe le record de 30 localités sur 34

Le Core de Kuma Science prévoit de servir, pour chaque point, le record absolu du minimum et du maximum journaliers de NASA POWER sur 2001-2025. Un record dépend d'un seul jour ; un percentile, de la queue de la distribution.

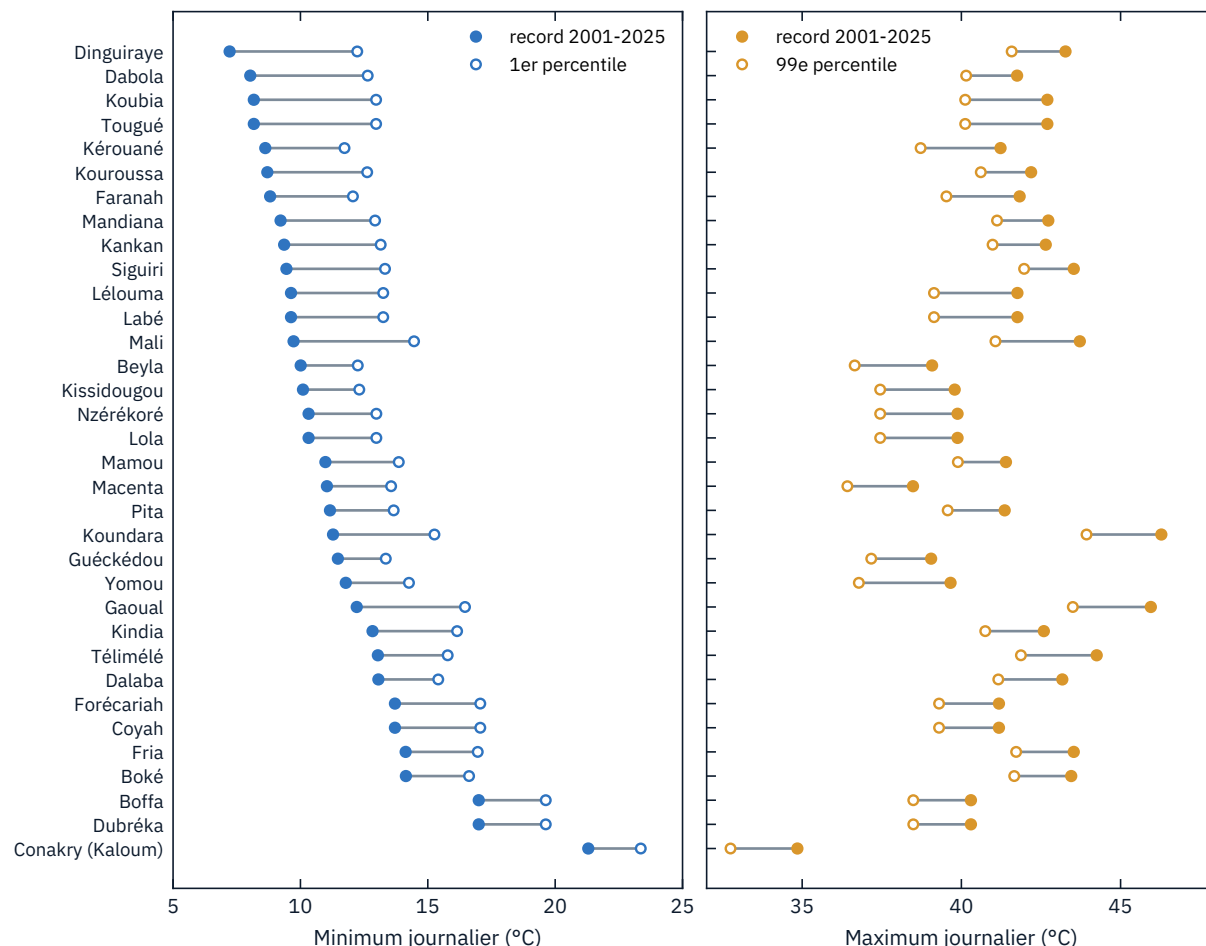


Figure 2 : Records 2001-2025 et percentiles des minima et des maxima journaliers de NASA POWER aux 34 localités du RDS, classées par record de froid.

Records et percentiles aux 34 localités

Le record de froid va de 7,22°C à Dinguiraye à 21,30°C à Conakry ; le record de chaud, de 34,85°C à Conakry à 46,28°C à Koundara. Le record de froid de 30 localités sur 34 date du 31 décembre 2012 ou du 1^{er} janvier 2013. En médiane, le record de froid est 3,18 K sous le 1^{er} percentile des minima, et le record de chaud 2,04 K au-dessus du 99^e percentile des maxima. À Kankan : record de froid 9,36°C (1^{er} janvier 2013), 1^{er} percentile 13,15°C ; record de chaud 42,65°C (27 mars 2017), 99^e percentile 40,98°C.

Source : NASA POWER journalier, T2M_MIN et T2M_MAX | Période : 2001-2025, 9 131 jours | Niveau de confiance **B**

Le froid de conception tient presque partout à un seul épisode, à la fin de 2012. Aucune des deux stations utilisées ici ne le mesurait ; l'analyse ne permet pas de dire si la réanalyse l'a bien restitué. Le record reste la valeur la plus prudente que donne la base. Le

1^{er} percentile, plus stable, est dépassé un jour sur cent : il ne convient pas à une limite de sécurité comme la tension maximale.

Erreur fréquente : la température moyenne pour la tension

La moyenne annuelle (26°C à Kankan) ne dit rien des matins de décembre et de janvier. Pour la tension à vide, prendre le minimum ; pour la tension de fonctionnement, le maximum de l'air augmenté de l'échauffement du module.

5 À Kankan, trois modules en série dépassent un régulateur de 150 V

Une chaîne sur un régulateur de 150 V

Module de fiche courante (hypothèse) : $V_{oc} = 49,5 \text{ V}$, $\beta_{V_{oc}} = -0,27 \text{ \%/K}$, $V_{mp} = 41,6 \text{ V}$, $\beta_{V_{mp}} = -0,35 \text{ \%/K}$. Trois modules en série, régulateur limité à 150 V en entrée.

Température de cellule retenue	V_{oc} module	V_{oc} chaîne
25°C (STC)	49,50 V	148,5 V
26,2°C (moyenne NASA POWER 2021-2025 à Kankan)	49,34 V	148,0 V
10,6°C (module mesuré au lever)	51,42 V	154,3 V
9,4°C (record NASA POWER à Kankan)	51,59 V	154,8 V
7,2°C (record NASA POWER à Dinguiraye)	51,88 V	155,6 V

Calcul de la ligne à 10,6°C, avec l'équation (1).

Étape 1, l'écart aux conditions standard : $10,6 - 25 = -14,4 \text{ K}$.

Étape 2, la variation de tension : $-0,27 \text{ \%/K} \times (-14,4 \text{ K}) = +3,89 \text{ \%}$.

Étape 3, le module : $49,5 \times 1,0389 = 51,42 \text{ V}$.

Étape 4, la chaîne : $3 \times 51,42 = 154,3 \text{ V}$, au-dessus de 150 V.

Le seuil se calcule à l'envers : 150 V pour trois modules font 50,0 V par module, soit $50,0/49,5 - 1 = +1,01 \text{ \%}$; il faut $1,01/0,27 = 3,7 \text{ K}$ sous 25°C. La chaîne de trois modules dépasse 150 V dès que la cellule descend sous 21,3°C dans ce calcul de vérification. À la station de Kankan, le minimum de l'air était sous ce seuil 91 % des jours de décembre à février, et 48 % des jours de l'année. Ce sont des jours où la vérification échoue, pas des jours où la chaîne a dépassé 150 V sous la lumière : la tension réelle dépend aussi de l'éclairement au moment où le module est froid. Avec deux modules en série, la tension à vide reste sous 104 V même à 7,2°C.

Au chaud, l'air de Kankan a atteint 42,65°C dans NASA POWER. Sous 1 000 W/m², un module au sol ventilé s'échauffe d'environ 25 K au-dessus de l'air, et un module intégré au toit d'environ 48 K (modèle PVsyst [5], guide 6). La cellule atteint alors 67,5 ou 90,7°C, et V_{mp} baisse de 14,9 ou 23,0 % : 35,42 ou 32,04 V par module. Combiner l'air le plus chaud et l'éclairement maximal est une hypothèse prudente : ces deux extrêmes n'arrivent pas toujours à la même heure. Les modules d'essai des stations, petits et en court-circuit, ont atteint 66,3°C à Kankan et 68,7°C à Tarambaly.

En pratique

Pour la tension maximale, partir du record de froid de la localité et garder une marge pour l'écart de NASA POWER aux minima : sur deux ans, le minimum mesuré était plus froid de 1,3 à 2,3 K aux deux stations comparées, et le module d'essai était un peu plus froid

que l'air au premier soleil. Ces deux écarts justifient une marge ; ils ne fixent pas sa valeur pour les autres localités. Afficher la température de conception et la marge retenues, et les faire valider pour le projet. Pour la tension de fonctionnement, partir du record de chaud et ajouter l'échauffement propre à la pose. Vérifier les deux bornes avec les coefficients de la fiche du module réellement installé.

6 Exercices

Exercice 1 (application)

Avec le module de l'exemple, combien de modules peut-on mettre en série sur un onduleur dont la tension continue maximale vaut 600 V, si la température de cellule la plus basse vaut 7,2°C ?

Corrigé

Étape 1, l'écart aux conditions standard : $7,2 - 25 = -17,8$ K.

Étape 2, la tension à vide d'un module : $V_{oc} = 49,5 \times (1 + (-0,0027) \times (-17,8)) = 49,5 \times 1,0481 = 51,88$ V.

Étape 3, le nombre de modules : $600/51,88 = 11,6$. On arrondit à l'entier inférieur : onze modules au plus. Vérification : $11 \times 51,88 = 570,7$ V reste sous 600 V, alors que $12 \times 51,88 = 622,6$ V le dépasse.

Exercice 2 (application)

Pourquoi le 1^{er} percentile des minima ne convient-il pas pour la tension à vide maximale ?

Corrigé

Il est franchi un jour sur cent, soit environ trois à quatre jours par an. La tension maximale est une limite de sécurité de l'appareil : elle ne doit pas être dépassée, même rarement.

Exercice 3 (application)

À Kankan, NASA POWER donne un maximum journalier inférieur de 2,68 K à la station en moyenne. Quel effet sur V_{mp} a cet écart pour un module au sol ventilé ?

Corrigé

Étape 1, l'effet sur la cellule : si l'air est sous-estimé de 2,68 K, la température de cellule calculée l'est d'autant.

Étape 2, l'effet sur la tension : avec $\beta_{V_{mp}} = -0,35$ %/K, une cellule plus froide de 2,68 K donne une tension plus haute de $0,35 \times 2,68 = 0,94$ %.

Conclusion : la tension de fonctionnement serait surestimée d'environ 1 % au chaud si l'on ne corrigait pas l'écart, ce qui compte pour vérifier que la chaîne reste dans la plage de suivi de l'onduleur.

Exercice 4 (Python)

Avec une série journalière de minima et de maxima, calculer pour chaque année le minimum et le maximum, puis le record, le 1^{er} et le 99^e percentile sur toute la période. Vérifier si le record dépend d'un seul épisode.

Corrigé

Grouper par année avec `groupby(index.year)`, puis prendre `min()` et `max()` ; les percentiles s'obtiennent avec `quantile(0.01)` et `quantile(0.99)`. À Kankan, le record de froid date du 1^{er} janvier 2013.

7 Résumé

1. La tension à vide se vérifie au minimum de température, la tension de fonctionnement au maximum ; la moyenne ne sert à aucune des deux.
2. Aux deux stations, le module d'essai est proche de l'air au lever du soleil, un peu en dessous ; la nuit, il descend sous l'air de 0,8 à 1,2 K en moyenne.
3. NASA POWER resserre l'écart jour-nuit : minima trop doux de 0,75 K, maxima trop frais de 1,7 à 2,7 K aux deux stations.
4. Dans le calcul de vérification, une chaîne de trois modules qui tient 150 V à 25°C les dépasse dès que la cellule descend sous 21,3°C.

Le guide 0, guide d'entrée de la collection, présente les données de Kuma Science et la façon de les utiliser dans ces calculs.

Références

- [1] NASA Langley Research Center, *POWER Project*, paramètres journaliers T2M, T2M_MIN et T2M_MAX (météorologie issue de la réanalyse MERRA-2). <https://power.larc.nasa.gov>
- [2] World Bank, ESMAP, WAPP, *Solar resource measurement campaign in West Africa*, stations de Kankan et de Tarambaly (Guinée), données à la minute, licence CC BY 4.0. <https://energydata.info>
- [3] CEI, *IEC 62548-1 :2023, Photovoltaic (PV) arrays, Part 1 : Design requirements*, Commission électrotechnique internationale. <https://webstore.iec.ch/en/publication/110893>
- [4] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, *Photovoltaic array performance model*, rapport SAND2004-3535, Sandia National Laboratories, 2004; présentation sur le site PVPMC. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/point-value-models/sandia-pv-array-performance-model/>
- [5] PVSyst SA, *PVSyst 7, aide en ligne*, rubrique « Array thermal losses ». <https://www.pvsyst.com/help/>



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.