



Kuma Science

Ingénierie énergétique pour l'Afrique

Guide 8 | Collection guides solaires

Le Calage Terrain

Marier vingt ans de satellite à deux ans de mesure au sol, et savoir enfin où l'on est

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 huitième et dernier du cheminement. Il suppose acquis les guides 1 à 7, et particulièrement le budget d'incertitude du guide 7, dont il attaque la composante dominante.

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 Ce que chacun sait faire	3
3 La campagne de mesure	4
4 La méthode de calage	4
4.1 Apparié, puis mesurer l'écart	4
4.2 Le facteur de calage	4
5 Le cas réel : Kankan, trois sources contre une station	5
6 Le calage appliqué, et ce qu'il change vraiment	6
6.1 La portée d'un calage	6
7 Conclusion	7
Références	8

1 Introduction

Un pixel de la climatologie satellite couvre plus de dix mille kilomètres carrés ; un pyranomètre voit le champ où il est posé. Entre les deux, il y a l'aérosol que le satellite sous-corrige, le nuage qu'il place à côté, le microclimat de vallée qu'il ignore : quelques pourcents systématiques, invisibles au contrôle qualité du guide 7, et qui pèsent sur vingt-cinq ans de décisions. Le guide 7 l'a montré : la composante *source* domine le budget d'incertitude guinéen. Ce dernier guide montre le geste qui la réduit : le **calage terrain**, ou comment une campagne de mesure au sol, même courte, transfère sa vérité aux vingt ans d'archive satellite.

1.1 Objectifs de ce guide

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

- attribuer leurs rôles respectifs au satellite et à la station ;
- spécifier une campagne de mesure au sol digne de ce nom ;
- apparier deux séries, calculer MBD et RMSD, et en tirer un facteur de calage ;
- lire le cas réel de Kankan, trois sources contre une station ;
- appliquer le calage au P50/P90 d'une étude, et comprendre ce qu'il change vraiment.

2 Ce que chacun sait faire

Le satellite et la station ne sont pas rivaux : ils savent des choses différentes.

	Satellite / réanalyse	Station au sol
Profondeur	20 à 40 ans, sans trou	1 à 3 ans le plus souvent
Représentativité	maille de quelques dizaines à une centaine de km	le point exact du projet
Vérité locale	biais systématiques (aérosol, microclimat)	la référence, si l'instrument est tenu
Coût et logistique	gratuit, immédiat	campagne, maintenance, gardiennage
Rôle dans l'étude	la <i>forme</i> du climat et les statistiques longues	la <i>valeur</i> vraie sur le recouvrement

TABLE 1 – Les rôles complémentaires. Le calage consiste à corriger la profondeur de l'un par la vérité de l'autre.

À retenir

La station ne remplace jamais le satellite : deux ans de mesure ne disent rien de la variabilité trentenaire (guide 7). Le satellite ne remplace jamais la station : vingt ans de pixel ne disent pas la vérité du site. La valeur naît du *recouvrement* : la période où les deux regardent le même ciel.

3 La campagne de mesure

Le calage vaut ce que vaut la mesure au sol. Les pratiques de référence sont celles des campagnes ESMAP de la Banque mondiale, dont la station de Kankan est un exemplaire, et dont les données sont publiées en accès libre sur le catalogue ouvert de la Banque mondiale (energydata.info) :

- **l'instrument** : pyranomètre thermopile de classe A (norme ISO 9060), monté horizontal, contrôlé en usine ; un pyréliomètre sur suiveur si le direct compte (guides 4 et 5 : en zone d'harmattan, il compte) ;
- **l'entretien** : le nettoyage quotidien de la coupole est la variable cachée de toute campagne tropicale ; une semaine de poussière fabrique un faux biais de plusieurs pourcents, ce qu'on cherche justement à mesurer ;
- **la durée** : couvrir chaque saison au moins une fois, donc douze mois minimum ; deux ans, comme à Kankan, séparent le biais systématique de l'aléa d'une année ;
- **le contrôle qualité** : les tests du guide 7 appliqués au fil de l'eau, pour que les pannes et dérives ne dorment pas dans la série.

Le coût contre le gain

Une campagne d'un à deux ans coûte une fraction de point de pourcentage d'un projet de centrale, gardiennage compris. Le guide 7 a chiffré le gain : resserrer la composante source du budget d'incertitude vaut plusieurs pourcents de productible bancable. Il n'existe pas, dans toute la chaîne solaire, de meilleur rapport entre l'argent dépensé et l'incertitude retirée. La rareté des stations en Afrique de l'Ouest n'est pas une fatalité technique : c'est un retard d'investissement, que des réseaux comme ESMAP/WAPP ont commencé à combler.

4 La méthode de calage

4.1 Appariement, puis mesurer l'écart

Sur le recouvrement, chaque instant commun forme une paire (satellite, sol). Deux métriques résument leur désaccord :

$$MBD = \overline{x_{sat} - x_{sol}} \quad \quad \quad RMSD = \sqrt{\overline{(x_{sat} - x_{sol})^2}} \quad (1)$$

exprimées aussi en relatif (divisées par la moyenne sol). Le **MBD** est le biais systématique : ce que le calage peut corriger. Le **RMSD** contient en plus l'erreur aléatoire heure par heure (nuages décalés, scintillement du pixel) : ce que le calage ne corrigera jamais, mais qui se moyenne sur les agrégats longs. Toujours les calculer *par saison* : les guides 4 et 5 ont montré que les biais guinéens sont saisonniers par nature.

4.2 Le facteur de calage

La forme la plus robuste du calage est aussi la plus simple :

$$k = \frac{\overline{GHI_{sol}}}{\overline{GHI_{sat}}} \quad \text{puis} \quad GHI_{cal}(t) = k \times GHI_{sat}(t) \quad (2)$$

appliquée à tout l'historique satellite, y compris hors recouvrement. Des méthodes plus fines existent (facteurs mensuels, régressions mesure-corrélation-prédiction) ; elles exigent plus de recouvrement pour ne pas ajuster du bruit, et la doctrine Kuma commence toujours par le facteur global assorti de son diagnostic saisonnier.

5 Le cas réel : Kankan, trois sources contre une station

La figure 1 superpose, sur les deux années de la campagne, la station ESMAP/WAPP et les deux grandes sources gratuites co-localisées : le satellite NASA POWER et la réanalyse ERA5-Land.

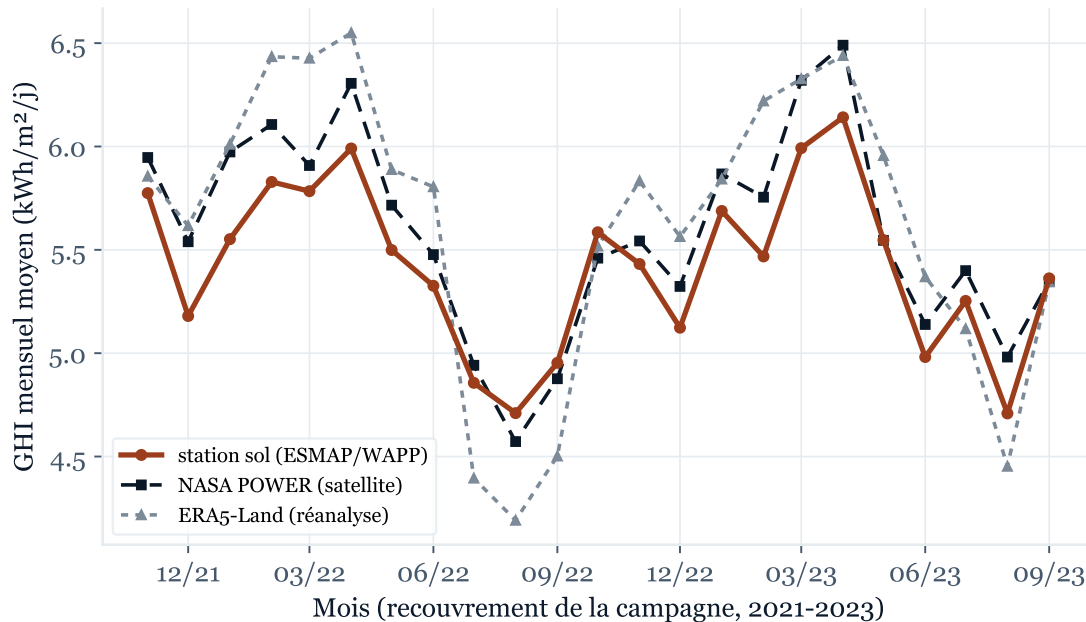


FIGURE 1 – GHI mensuel moyen à Kankan sur le recouvrement de la campagne (oct. 2021 - oct. 2023, 730 jours appariés) : station sol contre satellite et réanalyse. Données reproductibles par le script d'analyse du dépôt Kuma.

Source	Global	Harmattan	Mousson	Intersaison
NASA POWER (satellite)	+2,8 %	+4,4 %	+1,5 %	+1,9 %
ERA5-Land (réanalyse)	+3,8 %	+7,7 %	-2,5 %	+4,8 %

TABLE 2 – Biais relatif (source – sol, rapporté au sol) du GHI journalier à Kankan par saison, sur les 730 jours appariés. La note de calage du dépôt Kuma retrouve les mêmes chiffres au pas horaire (+2,8 % global, +4,3 % harmattan) et y ajoute la dispersion : RMSD de 11,8 % en harmattan contre 26,1 % en mousson.

Ce que le face-à-face enseigne, maintenant, en trois temps.

Le biais d'harmattan était attendu. Le satellite lit +4,4 % trop haut en saison sèche : c'est la sous-correction d'aérosol déjà rencontrée au guide 4 sur le ciel clair CAMS, retrouvée ici sur une source indépendante et en toutes conditions de ciel. En zone de poussières, le satellite flatte systématiquement la ressource, et seul le sol le prouve.

La mousson pose un problème d'une autre nature. Biais faible (+1,5 %) mais dispersion horaire double (RMSD 26 % contre 12 %) : le satellite place mal les nuages convectifs heure par heure, sans se tromper en moyenne. Pour un productible annuel, c'est bénin ; pour une étude d'intégration réseau au pas horaire, c'est rédhibitoire sans mesure locale.

La hiérarchie des sources est locale. ERA5-Land, excellente réanalyse par ailleurs, fait pire que le satellite à Kankan, avec un biais qui *change de signe* entre saisons : aucun classement universel des sources ne dispense de l'épreuve locale. C'est l'écart inter-source du guide 7, transformé ici en verdict par la station.

6 Le calage appliqué, et ce qu'il change vraiment

Le dispensaire de Kankan, épilogue

Le facteur de calage mesuré vaut $k = 0,972$: les vingt ans d'archive satellite de Kankan, et tout ce qui en découle, doivent être lus 2,8 % plus bas. Le productible du guide 6 devient :

$$E_{P50}^{cal} = 1\,529 \times 0,972 = 1\,487 \text{ kWh/kWc/an}$$

et le budget d'incertitude du guide 7 se resserre, la composante source passant de 5 à 2 % (résidu : représentativité de deux ans de recouvrement et dérive possible du biais) :

$$\sigma_{tot} = \sqrt{2^2 + 1,4^2 + 2^2 + 3^2} = 4,4 \% \quad E_{P90}^{cal} = 1\,487 \times (1 - 1,282 \times 0,044) \approx 1\,404 \text{ kWh/kWc/an}$$

Le résultat mérite un regard honnête : le P90 n'a pas bougé (1 404 contre 1 405). Le guide 7 espérait le remonter en resserrant la barre, mais la mesure a aussi révélé que le P50 était flatté de 2,8 % : les deux effets se sont compensés, presque exactement. Le calage n'a donc rien « rapporté » ? Il a tout changé : l'engagement P90 repose désormais sur un P50 vrai et une barre étroite, au lieu d'un P50 optimiste corrigé par une barre large. Le premier se défend devant un financeur et se vérifie en exploitation ; le second n'était qu'un équilibre de hasard. Et si le biais local avait été négatif, le calage aurait révélé du productible caché : on ne le sait qu'en mesurant.

6.1 La portée d'un calage

Un facteur de calage vaut pour son climat, pas pour sa seule parcelle : le biais d'aérosol d'armattan est régional, et une station en cale raisonnablement les environs climatiquement semblables. Mais le guide 6 a montré la limite inverse : Kindia et Mamou, indiscernables pour la maille satellite, ne seront départagées que par des mesures locales. D'où la logique de *réseau* : quelques stations bien choisies, une par grand régime climatique, calent un pays. C'est le programme de recherche de Kuma Science : caractériser jusqu'où un calage se transporte, d'une ville à l'autre, en Guinée. Les notes techniques publiées sur kumascience.com en portent les premiers résultats, et vous avez désormais tous les outils pour les lire.

7 Conclusion

À retenir

1. Satellite et station ont des rôles, pas des rangs : la profondeur de l'un, la vérité locale de l'autre ; le calage les marie sur leur recouvrement.
2. Une campagne digne de ce nom : classe A, nettoyage quotidien, douze mois minimum, QC au fil de l'eau.
3. MBD par saison pour le biais corrigeable, RMSD pour l'aléa qui ne l'est pas ; puis le facteur k appliqué à tout l'historique.
4. À Kankan : +2,8 % de biais satellite (+4,4 en harmattan, signature aérosol), ERA5-Land pire et de signe instable ; la hiérarchie des sources est locale.
5. Le calage ne gonfle pas les promesses : il remplace un chiffre flatté à barre large par un chiffre vrai à barre étroite ; c'est exactement ce qu'un engagement exige.

Huit guides, une chaîne complète : l'heure vraie du soleil (guide 1), sa position dans le ciel (2), les grandeurs du rayonnement (3), la référence de ciel clair (4), le passage au plan des modules (5), le kilowattheure produit (6), l'incertitude qui l'encadre (7) et la mesure qui l'ancre au sol (8). Chaque formule a été donnée avec ses coefficients, chaque figure tirée de données réelles, chaque modèle éprouvé contre la Guinée mesurée. La collection s'arrête ici parce que c'est ici que commence l'autre versant : les notes techniques et les travaux de recherche de Kuma Science, sur kumascience.com, qui prolongent ces huit briques vers les questions ouvertes de la ressource solaire ouest-africaine. Bonne route.

Références

1. 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>
2. M. Sengupta et al., *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications*, 3^e édition, NREL/ESMAP, 2021.
3. WMO, *Guide to Instruments and Methods of Observation* (WMO-N° 8), volume I, édition 2024, Organisation météorologique mondiale, Genève.
4. ISO, *ISO 9060 :2018 : Énergie solaire, spécification et classification des instruments de mesure du rayonnement solaire*, Organisation internationale de normalisation.
5. Kuma Science, *Calage GHI Kankan : caractérisation du biais satellite et Calage DNI Kankan*, notes de calage du dépôt kuma-data-core. <https://kumascience.com/>
6. NASA POWER Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
7. Copernicus Climate Change Service, *ERA5-Land hourly data*. <https://cds.climate.copernicus.eu/>



Kuma Science

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

kumascience.com | contact@kumascience.com