



Kuma Science

Ingénierie énergétique pour l'Afrique

Guide 7 | Collection guides solaires

Qualité et Incertitude

De combien peut-on se tromper, et comment le dire honnêtement

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 septième du cheminement. Il suppose acquis les guides 1 à 6, et particulièrement les écarts mesurés en chemin : la fermeture imparfaite du guide 3, le socle aérosol du guide 4, la décomposition saisonnière du guide 5. Ce guide leur donne un cadre.

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 contrôle qualité des séries	3
2.1	Pourquoi un tri algorithmique	3
2.2	Les tests de plausibilité	3
2.3	Les niveaux de confiance	4
3	Borner ce qui sort : les composantes de l'incertitude	4
3.1	La règle de combinaison	4
4	La composante qui se mesure : la variabilité interannuelle	4
5	P50, P90 : les deux chiffres d'une étude	5
6	Conclusion	6
	Références	7

1 Introduction

Ce guide traite des deux disciplines qui séparent l'estimation de l'étude : le **contrôle qualité**, qui trie ce qui entre, et l'**incertitude quantifiée**, qui borne ce qui sort. Le besoin se constate en une expérience : demandez le gisement solaire de Kankan à trois sources sérieuses, vous recevrez trois chiffres différents, et aucun ne sera « faux ». Les guides précédents l'ont montré pièce par pièce : un triplet satellite qui ne se referme pas à 6 % près (guide 3), un socle ciel clair qui lit 12 % trop haut en harmattan (guide 4), une corrélation de décomposition qui dérive de 13 % en mousson (guide 5). Une étude qui livre un productible sans dire de combien il peut se tromper n'est pas une étude : c'est un chiffre sans marge, que la première année d'exploitation suffira à démentir.

1.1 Objectifs de ce guide

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

- appliquer les tests de plausibilité physique de référence à une série de rayonnement, et comprendre ce qu'ils garantissent, et ce qu'ils ne garantissent pas ;
- distinguer les niveaux de confiance d'une donnée, du terrain au modèle ;
- inventorier les composantes d'incertitude d'un productible et les combiner en quadrature ;
- calculer un P50 et un P90, et savoir lequel des deux se signe.

2 Le contrôle qualité des séries

2.1 Pourquoi un tri algorithmique

Le corpus horaire de Kuma Science dépasse six millions de points : aucune relecture humaine ne valide de tels volumes. Le contrôle qualité (QC) est donc algorithmique, et sa doctrine tient en une phrase : *automatiser la plausibilité physique, sans jamais prétendre fabriquer la vérité.*

2.2 Les tests de plausibilité

La référence mondiale est le jeu de tests du réseau BSRN (Long et Dutton), que la doctrine Kuma reprend verbatim. Les familles de tests, appliquées dans cet ordre :

- **limites physiquement possibles** : chaque grandeur est bornée par la géométrie des guides 2 et 3 ; pour le GHI, la borne BSRN s'écrit $GHI \leq 1,5 S_a \mu_0^{1,2} + 100 \text{ W/m}^2$, où S_a est la constante solaire corrigée de la distance Terre-Soleil et $\mu_0 = \cos \theta_z$ (forcé à 0 sous l'horizon) ; une limite « extrêmement rare », plus serrée ($1,2 S_a \mu_0^{1,2} + 50$), signale les valeurs suspectes sans les condamner ;
- **cohérence entre grandeurs** : la fermeture du guide 3, comparée avec tolérance ; un triplet qui diverge au-delà du raisonnable est signalé ;
- **cohérence temporelle** : pas de saut impossible d'une heure à l'autre, pas de valeur figée qui trahit un capteur bloqué.

À retenir

Le QC répond à une seule question : « cette valeur est-elle *physiquement possible* ici et à cet instant ? ». Une série peut passer tous les tests et rester biaisée de 10 % : un biais plausible est invisible au QC. C'est pourquoi le QC *plafonne* la confiance, il ne l'élève pas.

2.3 Les niveaux de confiance

La doctrine éditoriale de Kuma Science étiquette chaque série d'un niveau de confiance qualitatif, distinct de l'incertitude chiffrée :

Niveau	Ce qu'il exige	Exemple du corpus
A	mesure au sol, ou série calée sur elle	station ESMAP/WAPP de Kankan
B	source satellite ou modèle, validée QC	horaire NASA POWER des 6 villes
C	grandeur dérivée indirecte	indicateurs recalculés en chaîne

TABLE 1 – Niveaux de confiance éditoriaux du corpus Kuma. Aucun test algorithmique ne produit un A : le niveau A est réservé au régime terrain, objet du guide 8.

3 Borner ce qui sort : les composantes de l'incertitude

L'incertitude d'un productible annuel n'est pas un nombre tombé du ciel : c'est la somme organisée des faiblesses de chaque maillon. Quatre composantes dominant, chacune rencontrée dans les guides précédents :

1. **la source de ressource** : biais et bruit de la base de données (satellite en confiance B : quelques pourcents sur le GHI annuel ; les guides 3 et 4 en ont montré les mécanismes) ;
2. **la variabilité interannuelle** : même parfaitement mesuré, le climat d'une année n'est pas celui de la moyenne (section 4 : elle se mesure) ;
3. **la chaîne de modèles** : décomposition, transposition (guide 5), et leurs dérivées saisonnières ;
4. **le système** : l'écart entre le *PR* supposé et le *PR* tenu (encrassement réel, indisponibilités, vieillissement).

3.1 La règle de combinaison

Des composantes indépendantes ne s'additionnent pas : elles se combinent en quadrature,

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \quad (1)$$

La conséquence pratique est l'arithmétique la plus utile de ce guide : la composante dominante écrase les autres. Réduire un poste de 3 % à 1 % ne sert à rien tant qu'un poste de 5 % subsiste ; c'est lui qu'il faut attaquer, et lui seul.

4 La composante qui se mesure : la variabilité interannuelle

Une composante au moins ne se suppose pas : trente années de climatologie mensuelle stockée (1991-2020) permettent de calculer la HEP annuelle de chaque année, et de mesurer l'aléa climatique, année par année.

Le verdict est l'une des meilleures nouvelles de toute la collection : le coefficient de variation interannuel tient entre **1,3 et 1,4 %** dans les six villes. Là où les climats tempérés vivent avec 3 à 5 % d'aléa annuel, le gisement guinéen est d'une stabilité remarquable : l'année la plus sombre des trente ne coûte que 3 à 4 % de la moyenne. En Guinée, le risque tient aux données et aux modèles bien plus qu'au climat, et ce sont des composantes que l'ingénieur peut travailler.

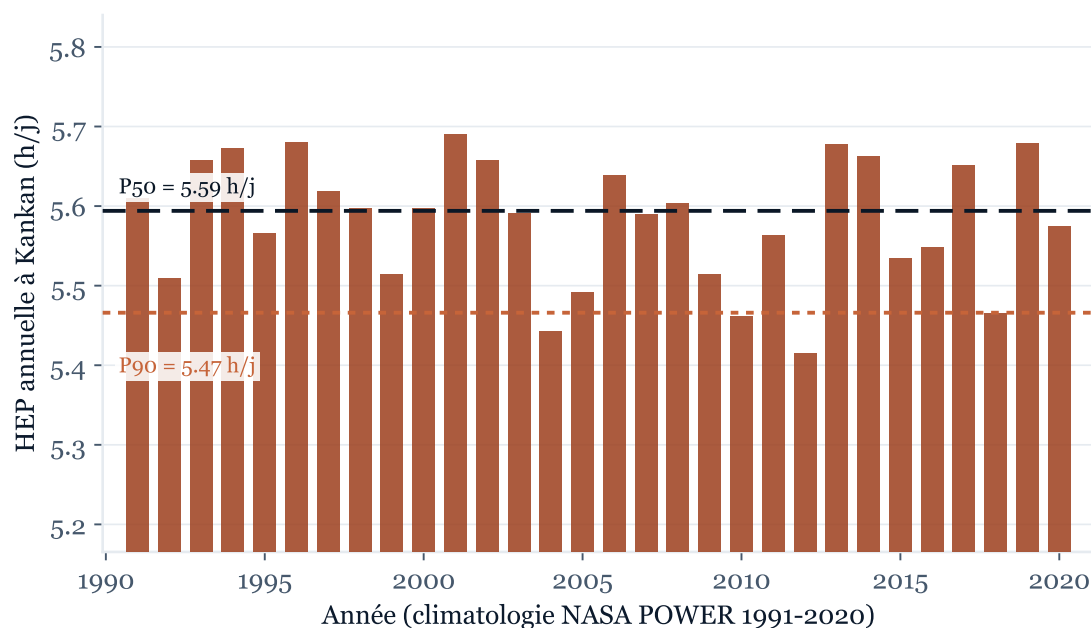


FIGURE 1 – Trente années de HEP annuelle à Kankan (climatologie mensuelle NASA POWER 1991-2020, séries du corpus Kuma), avec les seuils P50 et P90 empiriques. L'année la plus pauvre (2012, 5,42 h/j) ne s'écarte que de 3 % de la médiane.

Ville	HEP moy. (h/j)	σ (h/j)	CV	P90 empirique (h/j)	P90 gaussien (h/j)
Conakry	5,24	0,067	1,3 %	5,16	5,15
Kindia	5,42	0,077	1,4 %	5,34	5,33
Mamou	5,42	0,077	1,4 %	5,34	5,33
Labé	5,59	0,076	1,4 %	5,51	5,49
Kankan	5,58	0,079	1,4 %	5,47	5,48
Nzérékoré	4,78	0,066	1,4 %	4,71	4,69

TABLE 2 – Variabilité interannuelle de la HEP aux six villes pilotes, sur les 30 années 1991-2020. Le P90 gaussien ($\overline{HEP} - 1,282 \sigma$) reproduit le P90 empirique à mieux que 1 % : l'hypothèse normale est ici légitime. L'HEP annuelle est ici pondérée par la longueur des mois, d'où des écarts de 0,01 h/j environ avec la moyenne simple du guide 6. Données reproductibles par le script d'analyse du dépôt Kuma.

5 P50, P90 : les deux chiffres d'une étude

P50 et P90

Le PX est la valeur de productible dépassée avec une probabilité de X %. Le **P50** est l'estimation centrale : une année sur deux fera mieux. Le **P90** est l'estimation prudente : neuf années sur dix feront mieux. Sous hypothèse gaussienne :

$$P90 = P50 \times (1 - 1,282 \sigma_{tot})$$

avec σ_{tot} l'incertitude relative combinée de l'équation 1. Un financeur prête sur le P90 ; un vendeur parle du P50. Savoir lequel on lit est la première compétence de lecture d'une étude.

Le dispensaire de Kankan, du P50 au P90

Reprenons le champ du guide 6 : $E_{P50} = 1\,529$ kWh/kWc/an à Kankan ($PR = 0,75$). Budget d'incertitude, composante par composante :

source satellite (confiance B)	5 %	ordre de grandeur, à caler (guide 8)
variabilité interannuelle	1,4 %	mesurée, tableau 2
chaîne de modèles ($\beta = 10^\circ$)	2 %	guide 5 : l'erreur se compense à faible pente
système (PR tenu)	3 %	retour d'exploitation courant

$$\sigma_{tot} = \sqrt{5^2 + 1,4^2 + 2^2 + 3^2} = 6,3 \%$$

$$E_{P90} = 1\,529 \times (1 - 1,282 \times 0,063) = 1\,529 \times 0,919 \approx 1\,405 \text{ kWh/kWc/an}$$

La lecture d'ingénieur : le budget est écrasé par la composante source (5 % sur 6,3 %). Une campagne de mesure au sol qui la ramènerait à 2 % ferait passer σ_{tot} à 4,4 % et remonterait le P90 à environ 1 445 kWh/kWc/an : *trois pourcents de productible bancable gagnés sans poser un seul module*. C'est l'argument économique du guide 8.

L'écart inter-source, l'incertitude du pauvre

Sans station au sol, une composante reste mesurable : faire tourner *plusieurs* sources satellites sur le même site (NASA POWER, SARAH, CAMS) et regarder leur désaccord. Cet écart inter-source ne mesure pas le biais commun à toutes, il en donne un *plancher* : si deux sources sérieuses divergent de 8 %, prétendre connaître le site à 3 % est une illusion. C'est la doctrine du corpus Kuma en l'absence de terrain : chaque série satellite porte son écart aux autres comme première barre d'incertitude, en attendant le calage sol qui, seul, donne la confiance A.

6 Conclusion

À retenir

1. Le QC trie l'entrée : plausibilité physique (bornes BSRN, fermeture, continuité), automatisée et versionnée ; il plafonne la confiance à B, il ne fabrique jamais un A.
2. L'incertitude de sortie se décompose : source, climat, modèles, système ; les composantes indépendantes se combinent en quadrature, et la dominante écrase les autres.
3. En Guinée, la variabilité interannuelle est minuscule (CV 1,3-1,4 % mesuré sur 30 ans) : le risque vient des données, pas du ciel.
4. P50 pour l'estimation centrale, P90 pour l'engagement ; à Kankan, le dispensaire du guide 6 tient 1 405 kWh/kWc/an en P90.
5. Sans terrain, l'écart inter-source donne le plancher d'incertitude ; avec terrain, tout change : c'est le guide 8.

Toute la collection converge vers une conclusion : le levier le plus rentable d'une étude solaire guinéenne n'est ni un meilleur module ni un meilleur logiciel, c'est une meilleure *donnée*. Le guide 8, dernier du cheminement, montre comment une campagne de mesure au sol, même courte, cale les vingt ans de satellite et transforme un P90 timide en engagement solide.

Références

1. C.N. Long, E.G. Dutton, *BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0*, Baseline Surface Radiation Network (BSRN), AWI/WRMC.
2. JCGM, *Évaluation des données de mesure : guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)*, JCGM 100 :2008, BIPM.
3. 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 (incertitude et scénarios de dépassement P50/P90).
4. Kuma Science, *Doctrine de contrôle qualité algorithmique des séries horaires et Modélisation de l'incertitude dans le Core*, notes méthodologiques du dépôt kuma-data-core. <https://kumascience.com/>
5. NASA POWER Data Access Viewer (climatologie mensuelle 1991-2020). <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