



Kuma Science

Ingénierie énergétique pour l'Afrique

Guide 6 | Collection guides solaires

Le Productible

Des heures équivalentes au kilowattheure : ce qu'un kilowatt-crête produit vraiment en Guinée

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 sixième du cheminement. Il suppose acquis les guides 1 à 5 : la chaîne complète de la ressource, de l'heure civile au plan des modules, 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	Objectifs de ce guide	3
2	La puissance crête et les conditions STC	3
3	Les heures équivalentes plein soleil	3
4	Le ratio de performance	4
5	Le poste dominant : la température	4
5.1	La température de cellule	4
5.2	Le coefficient de température	4
6	Le productible des villes guinéennes	5
7	Dimensionner au mois défavorable	6
8	Conclusion	7
	Références	8

1 Introduction

Un module vendu « 550 watts » n’a jamais produit 550 watts à Kankan, et n’en produira jamais. Sa puissance est définie dans des conditions de laboratoire qui n’existent nulle part en Guinée : un fort éclairement *et* une cellule fraîche à 25°C, deux conditions qui ne sont jamais réunies sous le climat guinéen. La bonne question n’est donc jamais « combien de watts ? », mais : **combien de kilowattheures par an, pour chaque kilowatt-crête installé ?** Ce nombre, le productible spécifique, est la sortie de toute la chaîne construite depuis le guide 1, et l’entrée de toute décision économique.

1.1 Objectifs de ce guide

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

- expliquer ce que mesurent les conditions STC et la puissance crête ;
- convertir une irradiation en heures équivalentes plein soleil et en énergie idéale ;
- décomposer le ratio de performance, et calculer son poste dominant en Guinée : la température de cellule ;
- estimer le productible spécifique des villes guinéennes à partir des normales climatologiques ;
- dimensionner un champ au mois défavorable, selon la méthode de Kuma Science.

2 La puissance crête et les conditions STC

Conditions standard de test (STC) et puissance crête

La puissance d’un module photovoltaïque est mesurée en laboratoire sous trois conditions simultanées : un éclairement de 1 000 W/m², un spectre de masse d’air $AM = 1,5$ (guide 3), et une température de *cellule* de 25°C. La puissance obtenue est la puissance crête, notée en watts-crête (Wc). Le kilowatt-crête (kWc) est l’unité de compte de toute l’ingénierie photovoltaïque : les prix, les rendements de chantier et les productibles se rapportent à lui.

Un module moderne convertit 20 à 22 % de l’éclairement reçu : compter environ 5 m² de modules par kWc. Le rendement précis importe peu au calcul d’énergie : la puissance crête l’intègre déjà. C’est elle, et non la surface, qui entre dans tout ce qui suit.

3 Les heures équivalentes plein soleil

L’irradiation journalière d’un site (guide 3) s’exprime en kWh/m² par jour. La rapporter à l’éclairement STC de 1 kW/m² lui donne une lecture lumineuse :

$$HEP = \frac{H_{\text{jour}} [\text{kWh/m}^2]}{1 [\text{kW/m}^2]} \quad [\text{h/j}] \quad (1)$$

Les heures équivalentes plein soleil compressent la journée réelle, avec son matin faible et son midi fort, en un nombre d’heures fictives à exactement 1 000 W/m². Un site à $HEP = 5,6$ h/j recevrait autant d’énergie qu’un laboratoire STC allumé 5h36 par jour. L’énergie *idéale* d’un champ s’écrit alors simplement :

$$E_{\text{idéale}} = P_c \times HEP \quad [\text{kWh/j}, \text{ pour } P_c \text{ en kWc}] \quad (2)$$

4 Le ratio de performance

L'énergie réelle est toujours inférieure à l'idéale. Le quotient des deux est le ratio de performance, la note globale de l'installation :

$$PR = \frac{E_{\text{réelle}}}{P_c \times HEP} \quad \Rightarrow \quad E_{\text{réelle}} = P_c \times HEP \times PR \quad (3)$$

Le PR agrège toutes les pertes de la chaîne réelle : température de cellule, encrassement, câblage, conversion de l'onduleur, disparités entre modules, indisponibilités. En climat guinéen, un système bien conçu et entretenu tient un PR de 0,75 à 0,80 ; la convention de pré-dimensionnement de Kuma Science retient **0,75**, valeur volontairement prudente. Le tableau 1 situe les ordres de grandeur poste par poste.

Poste de perte	Ordre de grandeur
Température de cellule	11 à 13 % (tableau 2)
Encrassement (poussières, saison sèche)	2 à 5 %
Onduleur (rendement européen)	2 à 4 %
Câblage DC et AC	1 à 3 %
Disparités et vieillissement initial	1 à 3 %

TABLE 1 – Postes principaux du ratio de performance en Guinée. La température domine : elle pèse autant que tous les autres postes réunis.

5 Le poste dominant : la température

5.1 La température de cellule

Un module en plein soleil convertit un cinquième de l'éclairement et encaisse le reste en chaleur. Sa température de cellule se modélise par la relation NOCT :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \times G \quad (4)$$

où T_a est la température d'air, G l'éclairement du plan des modules (W/m^2), et $NOCT$ la température nominale de fonctionnement du module, donnée par sa fiche technique (typiquement 44 à 46°C ; ce guide retient 45). Sous 800 W/m^2 , un module s'échauffe donc d'environ 25 K au-dessus de l'air.

5.2 Le coefficient de température

La puissance d'un module décroît linéairement avec la température de cellule :

$$\frac{\Delta P}{P} = \gamma (T_c - 25) \quad (5)$$

avec γ le coefficient de puissance de la fiche technique, de $-0,29 \text{ \%/K}$ pour les meilleures technologies actuelles à $-0,45 \text{ \%/K}$ pour les modules courants. Ce guide retient $\gamma = -0,40 \text{ \%/K}$.

Le dérating thermique à Kankan

La température d'air diurne moyenne mesurée à Kankan (T2M horaire, 2001-2023, heures 10h-16h) vaut $T_a = 31,9^\circ\text{C}$. Sous $G = 800 \text{ W/m}^2$:

$$T_c = 31,9 + \frac{45 - 20}{800} \times 800 = 56,9^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = -0,40 \times (56,9 - 25) = -12,7 \%$$

Un module « 550 Wc » en plein soleil de Kankan est en réalité une machine d'environ 480 W. Ce n'est pas un défaut d'installation : c'est la physique du silicium chaud, et elle est irréductible sans refroidissement.

Le paradoxe du soleil chaud

« Plus de soleil, donc plus de production » n'est vrai qu'à moitié : le même soleil qui éclaire les modules les chauffe, et la chaleur reprend 11 à 13 % de ce que la lumière donne (tableau 2). C'est pourquoi un kWc produit à peine plus à Kankan qu'à Labé, plus fraîche en altitude, malgré un ciel comparable, et pourquoi les fiches techniques se comparent d'abord par leur γ : en Guinée, chaque centième de %/K gagné rapporte toute l'année.

6 Le productible des villes guinéennes

La figure 1 et le tableau 2 rassemblent la chaîne complète pour les six villes pilotes du corpus Kuma : heures équivalentes mensuelles des normales climatologiques 1991-2020, mois défavorable, température diurne mesurée, dérating thermique, et productible spécifique à $PR = 0,75$.

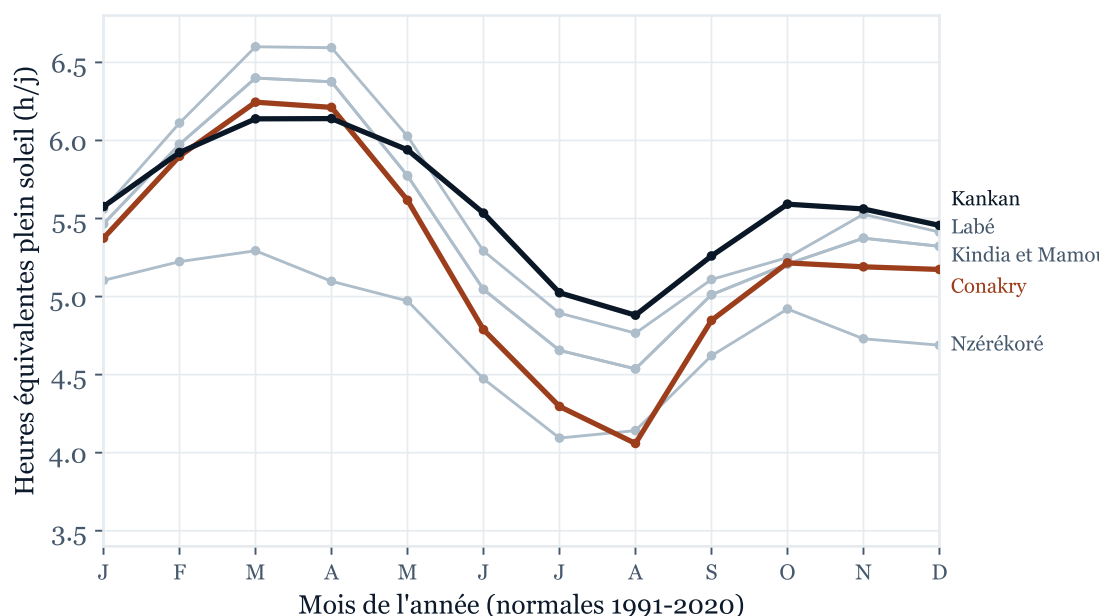


FIGURE 1 – Heures équivalentes plein soleil mensuelles des six villes pilotes (normales GHI NASA POWER 1991-2020, séries mensuelles du corpus Kuma). Kindia et Mamou partagent une seule courbe : voir le tableau 2.

Ville	HEP an. (h/j)	Mois défav.	HEP défav. (h/j)	T_a diurne (°C)	Dérating therm.	E à PR 0,75 (kWh/kWc/an)
Conakry	5,24	août	4,06	28,5	-11,4 %	1 435
Kindia *	5,43	août	4,54	30,7	-12,3 %	1 486
Mamou *	5,43	août	4,54	29,9	-11,9 %	1 486
Labé	5,60	août	4,77	29,7	-11,9 %	1 532
Kankan	5,59	août	4,88	31,9	-12,7 %	1 529
Nzérékoré	4,78	juillet	4,09	28,7	-11,5 %	1 309

TABLE 2 – La chaîne du productible aux six villes pilotes. HEP : normales 1991-2020 ; T_a diurne : T2M horaire 2001-2023, 10h-16h ; dérating par les équations 4 et 5. * Kindia et Mamou tombent dans la même maille de la climatologie NASA POWER : leurs HEP sont identiques *par construction*, vérification faite à la source ; seule leur température, issue de séries distinctes, les distingue. L' HEP annuelle est la moyenne simple des douze normales mensuelles ; chaque colonne est arrondie depuis les valeurs pleines du calcul, non depuis les colonnes précédentes du tableau. Données reproductibles par le script d'analyse du dépôt Kuma.

Le tableau appelle plusieurs remarques.

- **la saisonnalité est nuageuse, pas astronomique** : le mois défavorable est août partout (juillet à Nzérékoré), au cœur de la mousson, alors que la durée du jour y est maximale (guide 2) ; le creux vient des nuages, pas du soleil ;
- **le pays est plus homogène qu'on ne le dit** : 1 309 à 1 532 kWh/kWc/an, 17 % d'écart entre la ville la plus arrosée (Nzérékoré) et la plus favorable (Labé) : partout en Guinée, le photovoltaïque a sa ressource ;
- **la maille satellite a des limites** : Kindia et Mamou, à 92 km l'une de l'autre, piémont contre plateau du Fouta-Djalon, sont indiscernables pour la climatologie. Les distinguer vraiment demanderait des mesures locales : c'est l'affaire du guide 8.

7 Dimensionner au mois défavorable

Un système autonome doit couvrir le besoin *toute l'année*, donc passer le mois le plus pauvre. La méthode de pré-dimensionnement de Kuma Science dimensionne sur le mois défavorable des normales :

$$P_c = \frac{B_{\text{jour}}}{HEP_{\text{defavorable}} \times PR} \quad (6)$$

où B_{jour} est le besoin journalier en kWh.

Un dispensaire à Kankan

Besoin journalier estimé : $B_{\text{jour}} = 6,0$ kWh/j (éclairage, réfrigérateur de vaccins, petit matériel). À Kankan, $HEP_{\text{defavorable}} = 4,88$ h/j (août, tableau 2), et $PR = 0,75$:

$$P_c = \frac{6,0}{4,88 \times 0,75} = 1,64 \text{ kWc}$$

Soit trois modules de 550 Wc (1,65 kWc). Dimensionné pour août, le champ produira un excédent le reste de l'année, jusqu'à un quart de plus au pic de mars (6,14 h/j contre 4,88) : c'est le prix, assumé, de l'autonomie de saison des pluies, et l'excédent sec trouvera toujours preneur.

En pratique

L'équation 6 dimensionne le *champ*. Le stockage, lui, se dimensionne sur les jours d'autonomie exigés et la profondeur de décharge des batteries, un calcul distinct qui déborde ce guide. Retenez la séparation : le champ se calcule sur le mois défavorable, le stockage sur les mauvais jours consécutifs.

8 Conclusion

À retenir

1. La puissance crête est une convention de laboratoire (1 000 W/m², cellule à 25°C) : aucun module ne la tient sur le terrain guinéen.
2. Le productible s'écrit $E = P_c \times HEP \times PR$: les heures équivalentes portent la ressource, le *PR* porte les pertes.
3. La température est le poste dominant du *PR* guinéen : cellules à 53-57°C en plein soleil, 11 à 13 % de puissance rendus à la chaleur.
4. Les six villes pilotes tiennent entre 1 309 et 1 532 kWh/kWc/an à $PR = 0,75$; le mois défavorable est partout un mois de mousson.
5. Le champ se dimensionne au mois défavorable (équation 6) ; le stockage se dimensionne à part, sur les jours d'autonomie.

Tous les chiffres de ce guide sortent de données : normales climatologiques, températures mesurées, conventions explicites. Mais aucune donnée n'est exacte, et chaque maillon des guides 3 à 6 a montré ses écarts. Le guide 7 affronte la question qui fait la différence entre une estimation et une étude : *de combien peut-on se tromper, et comment le dire honnêtement ?*

Références

1. CEI, *IEC 61724-1 : Photovoltaic system performance, Part 1 : Monitoring*, Commission électrotechnique internationale, 2021.
2. E. Skoplaki, J.A. Palyvos, « On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations », *Solar Energy*, vol. 83, n° 5, p. 614-624, 2009.
3. J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4^e édition, Wiley, 2013.
4. NASA POWER Data Access Viewer (normales climatologiques 1991-2020 et T2M horaire).
<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