

# Variabilité du flux solaire en Guadeloupe : Etude comparée en deux points géographiques.

Ted SOUBDHAN\*, Rudy CALIF, Frédéric DUPONT, Ruddy BLONBOU

Groupe de Recherche sur les Energies Renouvelables  
Campus de Fouillole, UAG – BP 250- 97159 Pointe à Pitre Cedex

\* (auteur correspondant : ted.soubdhan@univ-ag.fr)

**Résumé** - L'utilisation croissante de l'énergie solaire pour la production d'électricité nécessite une connaissance de plus en plus fine de la dynamique du flux solaire disponible en un lieu donné. Le flux global a été mesuré avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz en deux points de la Guadeloupe. Une comparaison de la variabilité du flux solaire mesuré ainsi qu'une étude des corrélations existant entre les deux sites sont présentées.

## Nomenclature

$P$  probabilité

$C_{xy}(\tau)$  coefficient d'intercorrélation

$R_{xy}(\tau)$  fonction d'intercorrélation

$r$  coefficient de corrélation statistique

*Symboles grecs*

$\Phi$  densité de flux solaire,  $W.m^{-2}$

$\bar{\Phi}$  densité de flux solaire moyen journalier,  $W.m^{-2}$

$\Phi'_N = \Phi_m - \tilde{\Phi}_N$  fluctuations de densité du flux solaire,  $W.m^{-2}$

$\Delta\Phi'$  amplitude des fluctuations de densité du flux solaire,  $W.m^{-2}$

$\tilde{\Phi}_N(k)$  moyenne glissante de densité du flux solaire sur une échelle de temps  $N$ , à un instant  $t=k$ ,  $W.m^{-2}$

$\Phi^* = \frac{\Phi_m}{\Phi_c}$  fraction d'énergie

$\sigma = \sqrt{(\Phi'_N)^2}$  écart type,  $W.m^{-2}$

*Indices et exposants*

c calculé

m mesuré

## 1. Introduction

L'objectif de ce travail est basé sur une étude comparative des caractéristiques statistiques de l'ensoleillement journalier reçu sur deux sites en Guadeloupe.

L'utilisation croissante de l'énergie solaire pour la production d'électricité nécessite une connaissance de plus en plus fine de la dynamique du flux solaire disponible en un lieu donné. Les panneaux solaires photovoltaïques ayant un temps de réponse très court, le courant qu'ils fournissent en sortie va suivre presque instantanément les variations du rayonnement solaire incident [1].

On observe la multiplication des sites de production d'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques raccordés au réseau électrique. L'effet de foisonnement résultant peut jouer un rôle de filtrage ou d'amplification des fluctuations de la puissance électrique totale ainsi produite. Pour une meilleure gestion du réseau de distribution électrique, une analyse des corrélations statistiques et dynamiques entre les flux solaire mesurés sur les sites de production d'électricité photovoltaïque, s'avère nécessaire.

Nous présentons dans ce travail une étude concernant deux sites de mesures d'ensoleillement global en Guadeloupe. Cette analyse a pour but, d'une part d'effectuer une classification des journées à la fois du point de vue de l'énergie reçue et de la variabilité du flux solaire au cours de la journée, pour chaque site, et d'autre part de mettre en évidence d'éventuelles corrélations statistiques et/ou dynamiques entre les deux sites.

Nous avons donc mesuré le flux solaire global avec une fréquence d'échantillonnage de 1Hz pendant une période de 9 mois, sur deux sites distants de 40 km, en Guadeloupe.

## 2. Mesures du flux solaire global

Les mesures analysées dans ce travail ont été réalisées du mois de Janvier 2006 à Octobre 2006 sur le site de Petit Canal Gros Cap, sur la côte Est de la Guadeloupe en bord de falaise (site 1), et sur le site de l'Université (site 2) en Guadeloupe (16°26'N, 61°24'W). Ces deux sites sont distants d'une quarantaine de kilomètres (voir figure 10). Le flux solaire global est mesuré sur chaque site à partir d'un pyranomètre Kipp & Zonen de type SP Lite dont le temps de réponse est inférieur à une seconde. Les mesures sont échantillonnées avec une fréquence de 1 Hz. La précision des capteurs, donnée par le constructeur, est de  $\pm 1\%$ .

Les données sont mesurées et enregistrées par une centrale d'acquisition autonome de marque Campbell Scientific de type CR1000. Sur le site de Petit-Canal les données sont stockées sur une carte mémoire de type compact flash industrielle d'une capacité de 1 Go et la centrale est alimentée par un jeu de batteries. Ce dispositif a une autonomie vérifiée de deux mois. De plus une liaison téléphonique permet de contrôler et de piloter la chaîne de mesures depuis le laboratoire. Plus de détails concernant cette chaîne de mesure sont donnés dans [3].

## 3. Analyse

Nous disposons de 195 jours de mesures du flux solaire global pour les deux sites et nous avons comparé chacune des journées à la fois du point de vue du flux solaire moyen reçu et de sa variabilité. En outre nous avons étudié les corrélations entre les deux sites sur différentes échelles de temps.

### *Energie solaire reçue*

$\overline{\Phi}_m$  est la moyenne du flux solaire mesuré entre le lever et le coucher du soleil et  $\overline{\Phi}_c$  est la valeur moyenne du flux solaire, calculée en fonction de la position géographique, du jour Julien, de l'heure et du facteur de trouble de l'atmosphère appelé coefficient de trouble de Linke  $T_1$ . Pour le calcul de  $\overline{\Phi}_c$  nous avons utilisé le modèle de Kasten qui est donné dans I. Marie-Joseph [4] et Duffin et Beckman [5]. Le facteur de trouble  $T_1$  à été choisi de manière à obtenir le meilleur accord entre le flux mesuré et le flux calculé sur les périodes sans nuage observées durant la campagne de mesure, soit  $T_1 = 4$ . Dans la littérature cette valeur de  $T_1$  correspond à un temps de type « ciel bleu clair » et est en accord avec nos observations.

Les résultats obtenus, sur l'ensemble de la période de mesure, pour les flux solaires moyens journaliers expérimentaux  $\overline{\Phi}_m$  et calculés  $\overline{\Phi}_c$  sont portés sur la figure 1 pour le site de petit canal (site 1) et sur la figure 2 pour le site de l'Université (site 2). On remarque que le flux moyen journalier calculé  $\overline{\Phi}_c$  est compris entre  $530\text{W.m}^{-2}$  et  $680\text{W.m}^{-2}$ . Pour notre échantillon, le flux moyen journalier expérimental  $\overline{\Phi}_m$ , pour les deux sites, est distribué dans un intervalle compris entre  $50\text{W.m}^{-2}$  et  $660\text{W.m}^{-2}$ .

### Variabilité du flux solaire

La variabilité du flux solaire reçu, entre le lever et le coucher du soleil, est caractérisée par l'écart type  $\sigma$  des fluctuations,  $\Phi'_N$ , autour de la moyenne glissante  $\tilde{\Phi}_N(k)$  sur une échelle de temps  $N$  qui est définie à un instant  $t=k$  par

$$\tilde{\Phi}_N(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-\frac{N-1}{2}}^{k+\frac{N-1}{2}} \Phi(i) \quad (1)$$

$$\Phi'_N = \Phi_m - \tilde{\Phi}_N \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{(\Phi'_N)^2} \quad (3)$$

La moyenne glissante  $\tilde{\Phi}_N(k)$ , qui est un filtre passe bas, rend compte principalement des variations du flux solaire sur des échelles de temps supérieures à  $N$ . Les fluctuations  $\Phi'_N$  rendent compte principalement des échelles de temps inférieures à  $N$ . Nous avons choisi de ne normer ni les fluctuations  $\Phi'_N$ , ni le paramètre  $\sigma$  de manière à mettre en évidence l'amplitude effective des fluctuations obtenues.

Nous avons effectué un premier classement des différents jours de mesure à la fois du point de vue de leur variabilité caractérisée par  $\sigma$  et du flux solaire moyen journalier normé caractérisé par :

$$\Phi^* = \frac{\overline{\Phi_m}}{\Phi_c} \quad (4)$$

Une valeur de  $\Phi^*$  proche de 1 correspond à une journée de ciel clair tandis qu'une faible valeur de ce paramètre correspond à une journée ayant une forte couverture nuageuse.

Les résultats obtenus pour  $\sigma$  montrent qu'une variabilité importante du flux solaire est mise en évidence même pour les journées où le flux radiatif reçu est proche de celui attendu en l'absence de nuage et ce pour les deux sites. Ceci est illustré sur les figures 3 et 4 où l'ensemble des résultats obtenus est représenté dans le plan  $(\Phi^*, \sigma)$ . Compte tenu du nombre d'échantillons disponibles pour l'instant nous avons divisé ce plan en 12 zones distinctes (cf figures 3 et 4) et précisé pour chacune d'elles la probabilité jointe  $P(\Phi_i^* - \Delta\Phi^* \leq \Phi^* \leq \Phi_i^* + \Delta\Phi^*, \sigma_i - \Delta\sigma \leq \sigma \leq \sigma_i + \Delta\sigma)$ . On observe une plus grande densité de points dans l'intervalle  $200 < \sigma < 300$  pour le site 2, ce qui est caractéristique d'une plus grande variabilité du flux solaire pour ce site et donc un plus grand nombre de passages nuageux. Ceci à comme conséquence que les valeurs de la fraction d'énergie  $\Phi^*$  observées pour ce dernier site sont plus faibles.

### Corrélation des deux sites de mesures

Nous avons dans un premier temps représenté sur les figures 5 et 6 la corrélation existant entre les deux sites de mesures pour les valeurs de  $\Phi^*$  d'une part et les valeurs de  $\sigma$  d'autre part. On peut constater l'existence d'une corrélation statistique marquée entre  $\Phi^*_{site1}$  et  $\Phi^*_{site2}$ , en effet le coefficient de corrélation statistique vaut  $r = 0.82$ . De plus nous avons modélisé cette corrélation par une droite des moindres carrés dont l'équation est la suivante :

$$\Phi^*_{site1} = 0.84 \Phi^*_{site2} + 0.19 \quad (5)$$

La figure 6 illustre l'évolution de l'écart type du site 1 en fonction de l'écart type du site 2.

Compte tenu de la valeur du coefficient de corrélation statistique,  $r = 0.61$ , on notera que la dispersion des points autour de la droite des moindres carrés est plus importante que dans le cas précédent.

Afin de mettre en évidence une éventuelle corrélation dynamique entre les deux sites, nous avons calculé à partir de la fonction d'intercorrélation  $R_{xy}(\tau)$ , le coefficient de corrélation  $C_{xy}(\tau)$  des fluctuations du flux solaire global des deux sites, définie de la manière suivante :

$$R_{xy}(\tau) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-\tau-1} x_{n+\tau} y_n & \tau \geq 0 \\ R_{yx}(-\tau) & \tau < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$C_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

avec x et y les fluctuations pour chacun des sites pour une journée.  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  représentent les écart types de x et y.

Ainsi pour chacun des 195 jours de mesures, nous avons déterminé la fonction d'intercorrélation pour les fluctuations des deux sites. Différentes échelles de temps ont été considérées et le seuil à partir duquel nous avons pu observer des corrélations étant 3 heures nous ne présenterons dans la suite que des résultats concernant des échelles de temps inférieures à 3 heures et celles comprises entre 3 heures et 24 heures.

La figure 7 présente l'histogramme de la probabilité des maxima des fonctions d'intercorrélation des fluctuations du flux solaire global pour les échelles de temps inférieures à 3 heures, entre les deux sites de mesure. Dans 90% des cas, le coefficient de corrélation n'excède pas 0,3 ce qui témoigne d'une absence de corrélation dynamique (figure 8) pour les échelles de temps inférieures à 3 heures, entre les deux sites. Ceci signifie une indépendance statistique des fluctuations du flux solaire global. Dans 2% des cas nous observons une corrélation entre les deux sites. Ces cas marginaux correspondent à des situations météorologiques où l'on observe un ciel uniforme (couvert ou dégagé) sur l'ensemble de la zone ou lorsque le vent à une direction dans le sens du site de Petit-Canal vers le site de l'UAG, soit une direction Nord-Est. Il existe alors dans ces cas un déphasage temporel illustré sur la figure 8. Cette courbe présente un maximum de 0,6 pour un délai temporel de 1h30.

La figure 9 montre les courbes de corrélation obtenues pour des échelles de temps comprises entre 3h et 24h pour les 195 journées de mesures. Il apparaît que sur ces échelles de temps les tendances du flux solaire global des deux sites sont corrélées.

#### 4. Conclusion

L'étude de l'ensoleillement global, mesuré en deux sites de la Guadeloupe, durant 195 jours, nous a permis d'établir un préclassement des journées de mesures, en fonction du flux solaire moyen reçu et de sa variabilité. L'analyse comparative du flux solaire global des deux sites de mesures a montré qu'en terme d'énergie moyenne reçue les deux sites sont comparables. Cependant la variabilité journalière du flux solaire mesuré sur le site de l'Université est deux fois plus importante que celle du flux mesuré sur le site de Petit Canal.

En outre, compte tenu de la localisation Nord Est du site de Petit-Canal par rapport au site de l'Université et de la direction moyenne de la vitesse du vent (Sud-Est) [3], la probabilité pour qu'il existe une corrélation entre les deux sites sur des échelles de temps inférieures à 3 heures est faible et correspond à 2% des cas.

L'objectif à terme de cette étude est de permettre la caractérisation de l'effet de foisonnement des sites de production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques. Les campagnes de mesures en cours permettront de compléter les résultats de cette étude.

### Références

- [1] R. Brundlinger, B. Bletterie, J. Brand, A nex method for the assessment of the dynamic MPP tracking performance based on high-resolution irradiation patterns, *20th European photovoltaic solar energy conference and exhibition*, (Barcelona, SPAIN 6-10 june 2005).
- [2] H. Suehrcke, P. G. McCormick, The frequency distribution of instantaneous insolation values, *Solar Energy, Volume 40, Issue 5, 1988, Pages 413-422*.
- [3] R. Calif, R. Blonbou, B. Deshaies, Wind velocity analysis for time scales smaller than one hour : application to wind energy forecast, *24<sup>th</sup> ASME WIND ENERGY Symposium*, (Reno NEVADA, 10-13 january. 2005).
- [4] I. Marie Joseph, Méthodologie appliquée à la maintenance préventive d'unités de production d'électricité en site isolé, *Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane*, Avril 2003.
- [5] J.A Duffie, W.A Beckman, *Solar Engineering of thermal process*, Ed Willey Inter Science.

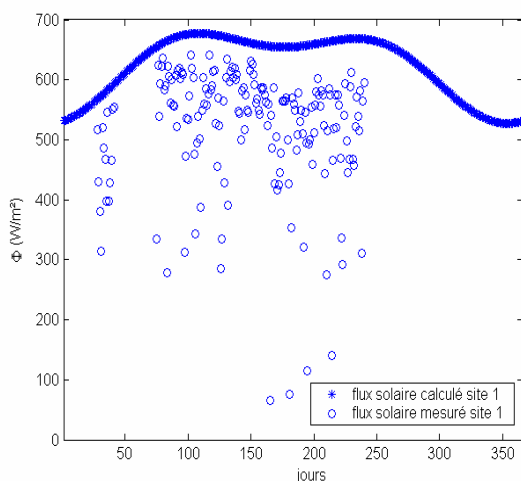


Figure 1 : Moyenne journalière des flux solaires théorique et mesuré, en fonction du jour Julien, site de petit canal (site 1)

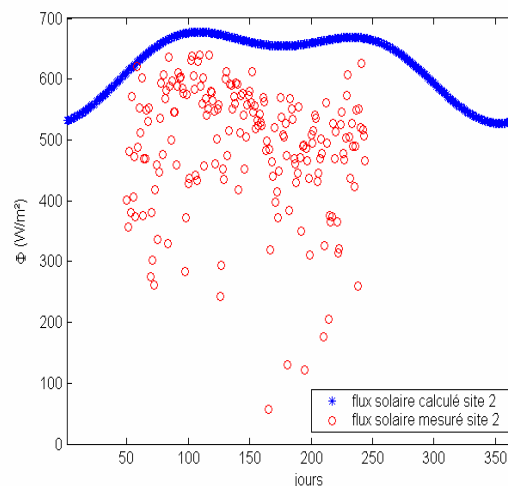


Figure 2 : Moyenne journalière des flux solaires théorique et mesuré, en fonction du jour Julien, site de l'Université (site 2)

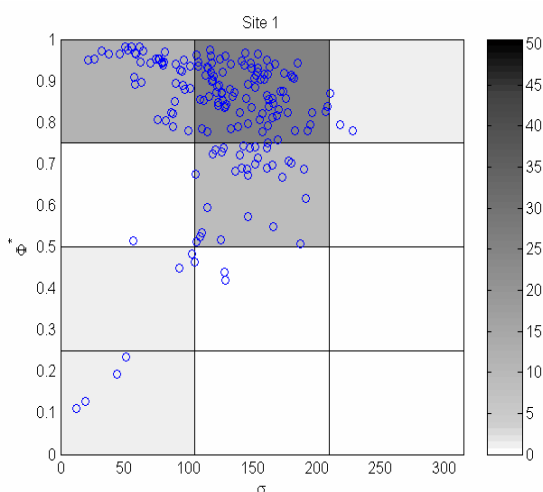


Figure 3 : Fraction d'énergie en fonction de l'écart type pour chaque journée, site 1.

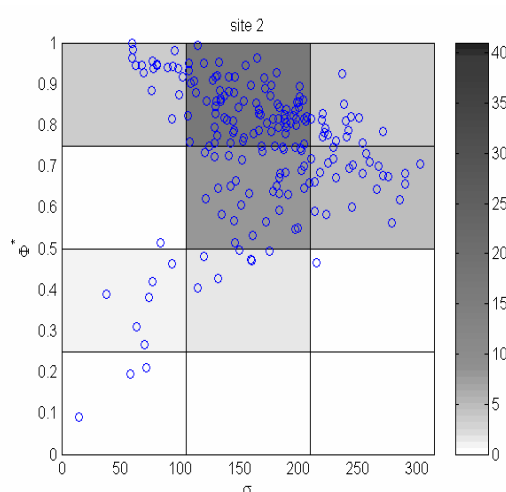


Figure 4 : Fraction d'énergie en fonction de l'écart type pour chaque journée, site 2.

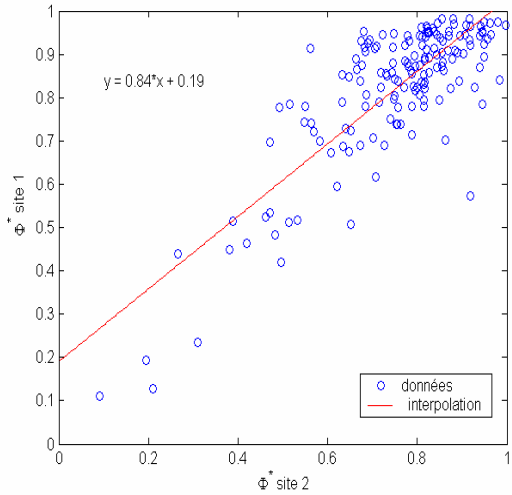


Figure 5 : Corrélation des fractions d'énergie.

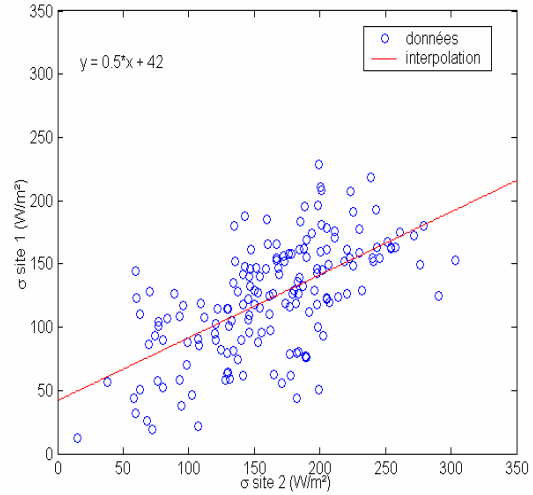


Figure 6 : Corrélation des écarts types.

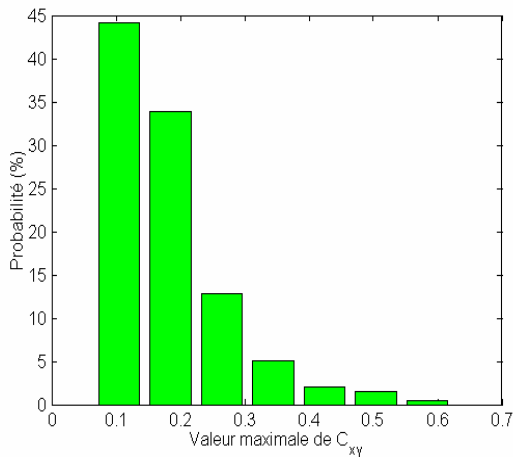


Figure 7 : Probabilité des maxima des fonctions d'intercorrélations des fluctuations du flux solaire des deux sites.

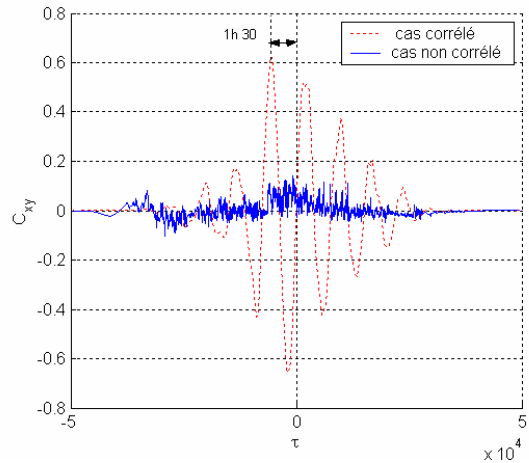


Figure 8 : Exemples de fonctions d'intercorrélations des fluctuations du flux solaire des deux sites.

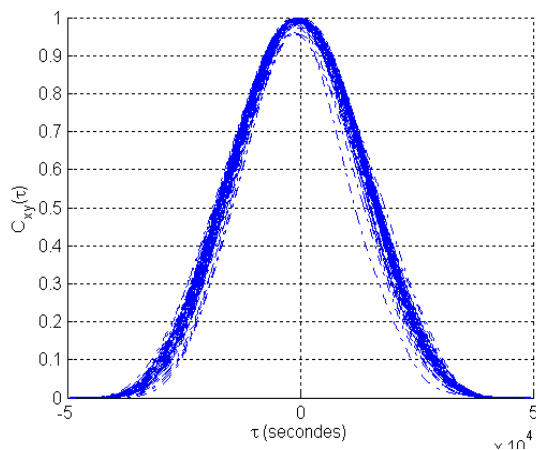


Figure 9 : Fonctions d'intercorrélations du flux solaire global des deux sites pour des échelles de temps comprises entre 3h et 24h.

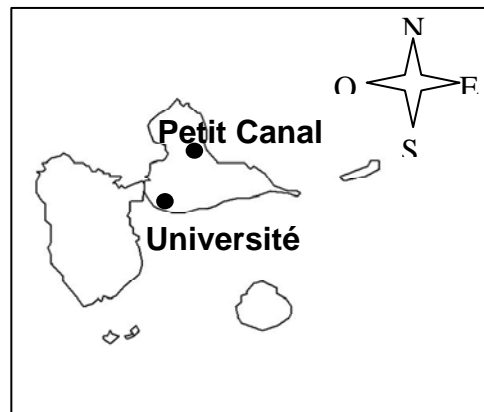


Figure 10 : Localisation des sites de mesures