

Extraction du motif cyclique sur des signaux d'ensoleillement par la méthode MTSA.

MOHAMMED TELIDJANE¹, FRÉDÉRIC BONNARDOT¹, MOHAMED ELBADAOU¹, GHANEM MARRAKCHI²

¹ Laboratoire d'analyse des signaux et des processus industriels

¹ Université de Lyon, F-42023 St-Etienne,

France, Université de St Etienne,

¹ Jean Monnet, F-42000, St Etienne, France. LASPI, F-42334, IUT de Roanne, France.

² Laboratoire Telecom Claude Chappe

² Université de Lyon, F-42023 St-Etienne,

France, Université de St Etienne,

Jean Monnet, F-42000, St Etienne, France.

LT2C, F-42000, Telecom St Etienne, France.

¹ mohammed.telidjane@univ-st-etienne.fr, ¹ frederic.bonnardot@univ-st-etienne.fr,

¹ mohamed.elbadaoui@univ-st-etienne.fr, ² ghanem.marrakchi@univ-st-etienne.fr.

Résumé – Le but de ce travail est de présenter une nouvelle méthode d'estimation du motif répétitif journalier de l'ensoleillement. La particularité de l'ensoleillement est la modulation d'amplitude dans sa forme d'onde due à l'effet de la saisonnalité. Cependant, cette modulation rend difficile l'estimation du motif répétitif. La méthode proposée dans ce travail appelée MTSA est composée de trois parties : normalisation de signal d'ensoleillement, estimation de la moyenne synchrone et filtrage de Wiener. Les résultats obtenus utilisant cette méthode montrent une bonne séparation du motif répétitif journalier et de la partie résiduelle pour l'ensoleillement et ce dernier est un phénomène cyclo stationnaire à l'ordre 2. Cette approche cyclostationnaire offre des perspectives pour le diagnostic des panneaux photovoltaïques

Abstract - The aim of this work is to present a new method to estimate the daily repetitive pattern of irradiance. The particularity of the irradiance is the amplitude modulation in the waveform due to the effect of seasonality. However, the repetitive pattern could not be well estimated. The method proposed in this work called MTSA is composed of three parts: irradiance normalization signal, estimation of time synchronous average and filtering Wiener. The results obtained using this method show good separation of the daily repetitive pattern and the residual signal of irradiance.

1 Introduction

La cyclostationnarité a été utilisée dans divers domaines tels que les télécommunications [1], le diagnostic des machines mécaniques [2] et les signaux biomécaniques [3]. Les concepts de base du traitement du signal supposent la stationnarité. Dans le cas réel, la plupart des processus étudiés sont non stationnaires. De nombreuses études ont montré que de tels procédés présentent des motifs répétitifs, comme le montre l'analyse de leurs signaux temporels. Ce pourrait être le cas pour les signaux météorologiques [4] et des processus connexes comme les panneaux photovoltaïques. La cyclostationnarité est un sous-ensemble des processus non-stationnaires qui disposent de statistiques périodiques.

Dans de nombreuses applications de traitement du signal, il est très intéressant d'étudier les différentes composantes d'un processus séparément. Ces composantes peuvent physiquement être liées à différentes sources individuelles. Une tâche importante est de séparer les parties déterministes périodiques et aléatoires d'un processus cyclostationnaire. Différentes techniques existent pour faire une telle séparation : par exemple, la méthode de prédiction linéaire, la méthode Self Adaptive Noise Cancellation (SANC) [5], la

méthode de procédure d'édition cepstral [6] et la méthode de la moyenne synchrone temporelle (TSA) [7].

La particularité de signaux météorologiques est une modulation d'amplitude dans leur forme d'onde en raison de l'influence de la saisonnalité. Cela rend difficile l'estimation de la partie déterministe périodique. Par conséquent, un nouveau procédé a été développé afin d'extraire le motif répétitif. Cette méthode est appelée Moyenne Synchrone Temporelle Modifiée (MTSA). Cette technique est composée de trois parties : la normalisation du signal, la moyenne temporelle synchrone, et de filtrage de Wiener.

Dans une première partie, nous rappelons les concepts de la cyclostationnarité. Nous présentons ensuite dans une deuxième partie la particularité des signaux météorologiques. Ces signaux présentent des difficultés pour l'estimation de la composante périodique. Nous proposons dans une troisième partie, une nouvelle méthode MTSA permettant de les contourner. Une quatrième montre les applications.

2 Cyclostationnarité

Un processus stochastique $\{x(t)\}$ est cyclostationnaire à l'ordre 1 (CS1) si son moment d'ordre 1 est périodique avec une période T_0 .

$$E\{x(t+T_0)\}=E\{x(t)\} \quad (1)$$

En pratique cette quantité est obtenue par l'estimation de la moyenne synchrone (MS) calculée sur une réalisation échantillonnée $x(n)$ définie par [7] :

$$MS(n) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} x(n + i \cdot T_0) \quad (2)$$

Où K est le nombre de cycle et T_0 le nombre d'échantillons associés à un cycle.

La moyenne synchrone représente la partie déterministe périodique et le signal $x(n)$ peut être décomposé sous la forme:

$$x(n) = TSA(n) + r(n) \quad (3)$$

Où $r(n)$ est appelé signal résiduel.

Selon Gardner [8], le processus $\{x(t)\}$ est cyclostationnaire à l'ordre 2 (CS2) si son moment d'ordre 2 est périodique avec une période T_0 pour tous t et décalage τ . Le moment d'ordre 2 est la fonction. $R_x(t+T_0, \tau) = R_x(t, \tau)$. Puisque la cette fonction est périodique, elle peut être décomposée en série de Fourier :

$$R_x(t, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_x^{n/T_0}(\tau) e^{j2\pi(n/T_0)t} \quad (4)$$

Où les coefficients de Fourier sont définis par:

$$R_x^{n/T_0} \triangleq \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi(n/T_0)t} dt \quad (5)$$

3 La particularité des signaux météorologiques

La figure 1 représente l'évolution temporelle de l'ensoleillement de la ville de Roanne (France) obtenue par la base de donnée Helioclim-3 database (© Transvalor / MINES ParisTech / Armines – HelioClim-3v4 – Nov. 2014) [9].

L'ensoleillement est composé de motifs répétitifs annuels créés par l'effet de la saisonnalité (figure 1), des motifs répétitifs journaliers créés par l'alternance jour et nuit (figure 2) et une partie aléatoire engendrée par les passages nuageux.

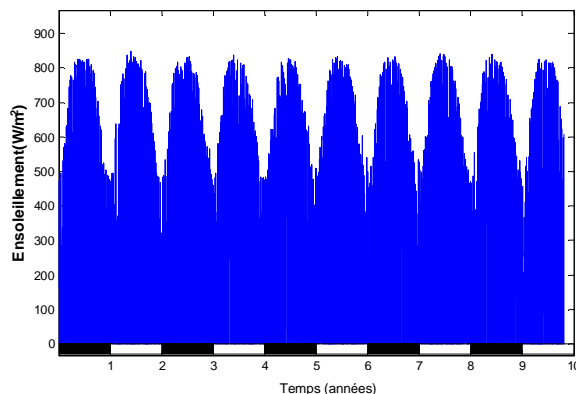


Figure 1 : Ensoleillement de Roanne 2004-2010

La figure 2 montre un agrandissement de la figure 1 ainsi qu'une estimation de la moyenne synchrone calculée sur une période de 1 jour. Bien que le cycle journalier apparaisse clairement, le motif semble varier différemment chaque jour (il peut être considéré comme une modulation d'amplitude d'un signal cyclostationnaire). Cela rend difficile l'extraction du motif répétitif par la moyenne synchrone représentée en rouge sur la figure 2.

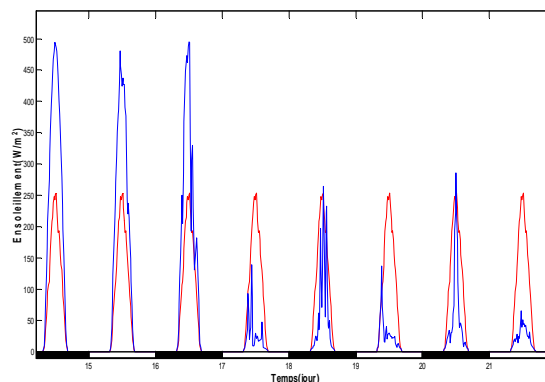


Figure 2 : Signal ensoleillement (bleu), Moyenne synchrone (rouge).

Un cycle d'un an étant trop important pour faire du diagnostic des panneaux PV, nous nous intéressons dans cette étude seulement à l'estimation du motif journalier.

Afin d'estimer ce motif répétitif journalier modulé (effet de la saisonnalité), nous proposons une méthode appelée MTSA.

4 Moyenne Synchrone Temporelle Modifiée (MTSA)

Soit le vecteur \underline{X}_c représentant les T_0 échantillons du signal $x(n)$ associés au jour c :

$$\underline{X}_c = [x(c \cdot T_0) \ x(c \cdot T_0 + 1) \ \dots \ x[(1 + c) \cdot T_0 - 1]]^T \quad (6)$$

Cette méthode consiste tout d'abord à normaliser chaque mesure journalière \underline{X}_c par la valeur maximale observée le jour c :

$$\underline{X}_{nc} = \frac{\underline{X}_c}{\max(\underline{X}_c)} \quad (7)$$

Ensuite, une moyenne synchrone \underline{kn}_c permettant de faire ressortir le motif journalier normalisé associé au jour c est calculée. Cette moyenne synchrone ne prend en compte que les 31 jours du mois associés au jour c :

$$\underline{kn}_c = \frac{1}{31} \sum_{j=0}^{30} \underline{Xn}_{(j+31 \cdot \lfloor \frac{c}{31} \rfloor)} \quad (8)$$

où $\lfloor \frac{c}{31} \rfloor$ correspond à l'arrondi par défaut de $c/31$ soit le numéro du mois-1 associé au jour c .

La limitation du nombre de cycles (31) pour le calcul de cette moyenne synchrone « locale » permet d'être moins sensible aux effets de la saisonnalité. On permet alors au motif normalisé \underline{kn}_c de varier d'un mois à l'autre.

On peut alors grâce à un filtre de Wiener [10] décomposer notre signal en un motif répétitif \underline{k}_c lié au motif normalisé \underline{kn}_c par un filtre h et une partie résiduelle $t(n)$ comme montré sur la figure 3. Ce filtre est un algorithme LMS qui permet de minimiser l'erreur entre \underline{k}_c et $t(n)$ en agissant sur les coefficients du filtre chaque jour.

$$\underline{h}_n = [h_{n0} \ h_{n1} \ h_{n2} \ \dots \ h_{pn}] \quad (10)$$

$$\underline{h}_{n+1} = \underline{h}_n + \mu \cdot \underline{kn}_i \cdot t(n) \quad (11)$$

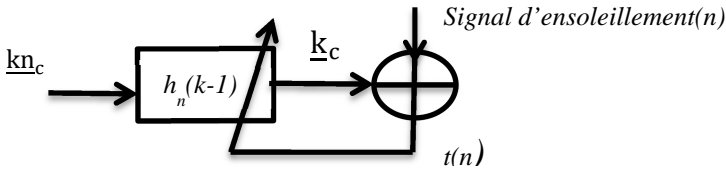


Figure. 3 : Wiener filter.

Le signal d'ensoleillement a été enregistré de l'année 2004 au 2010 avec une période d'échantillonnage de 15 minutes. La moyenne évolutive était choisie dans ce travail afin d'autoriser les variations de ce motif plutôt que d'aligner les motifs par rééchantillonnage.

5 Application sur les signaux météorologiques

Nous avons appliqué la méthode MTSA sur les signaux météorologique. La figure 4 montre la décomposition du signal météorologique (bleu) en un motif répétitif (rouge) et un signal résiduel (vert).

Le signal résiduel présente toujours des pics qui sont liés au passage des nuages qui est un phénomène aléatoire. On sépare donc bien le motif répétitif (figure 3 rouge) lié au jour des phénomènes météorologiques aléatoires.

A titre comparatif, la figure 5 montre la partie résiduelle (bleu) obtenue en utilisant la moyenne synchrone classique (équation 3). On peut voir que son amplitude est bien plus grande par rapport au résiduel obtenu par la méthode MTSA (vert). Cela est justifié par le calcul de la valeur efficace des deux résiduels $74 \text{ (W/m}^2\text{)}$ pour le résiduel obtenu par la MS et $37 \text{ (W/m}^2\text{)}$ pour le résiduel obtenu par la MTSA.

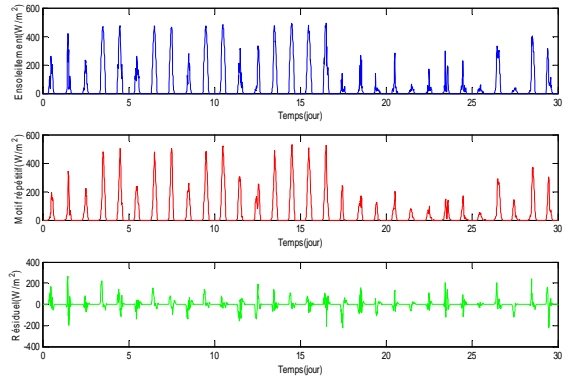


Figure 4 : Signal brut (bleu), Motif répétitif (rouge) , résiduel vert.

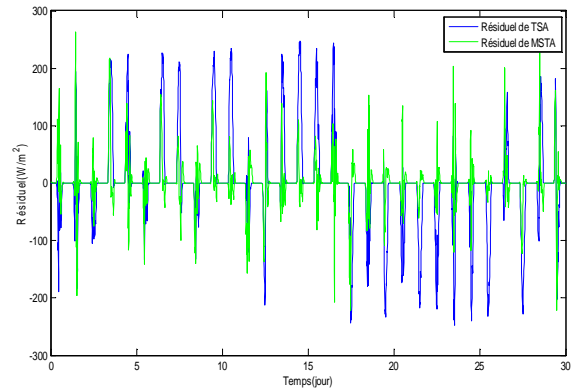


Figure 5 : Résiduel obtenu par MTSA(vert), Résiduel obtenu par MS (bleu)

Le spectre estimé par le calcul de la FFT des deux résiduels (figure 6), montre que les deux méthodes suppriment bien tous ce qui est périodique au jour (valeur zéro de l'amplitude du spectre dans la fréquence cyclique et ses harmoniques). Par contre, la méthode de la MS ne permet pas de supprimer les modulations d'amplitude liées à l'effet de la saisonnalité (présence des pics autour de la fréquence cyclique journalière et ses harmoniques). La méthode MTSA élimine bien l'effet de cette modulation.

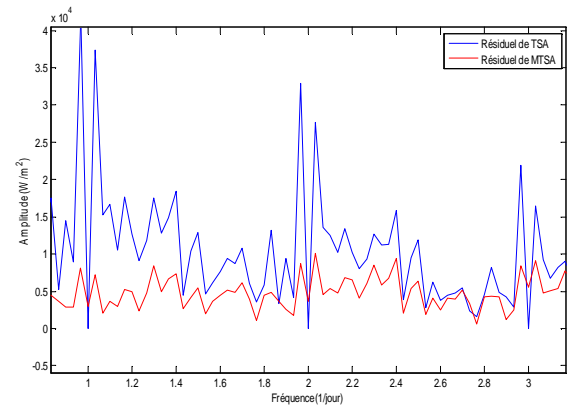


Figure 6 : Résiduel obtenu par MTSA(vert), Résiduel obtenu par MS (bleu)

Le signal résiduel obtenu par la méthode MTSA (figure 5) est privé d'une partie périodique (moyenne synchrone du résiduel égale à zéro). Néanmoins, ce

signal peut contenir des composantes dont le moment d'ordre 2 (fonction d'autocorrélation) est périodique. Pour montrer ces périodicités cachées ou CS2, la fonction d'autocorrélation est appliquée sur le signal résiduel (figure 7 et 8).

Ces figures montrent deux fréquences cycliques sur la fonction d'autocorrélation qui correspondent à $\alpha_1=1$ (1/année) et $\alpha_2=1$ (1/jour). Ces fréquences sont la fréquence cyclique annuelle liée à l'effet de la saisonnalité et la fréquence cyclique journalière engendrée par l'alternance jour et nuit respectivement.

Puisque le signal est CS, la fonction d'autocorrélation $R_x(t,\tau)$ est périodique dans le temps et la fonction d'autocorrélation cyclique $R_x^\alpha(\tau)$ est discrète sur l'axe des fréquences cycliques et continue sur l'axe de décalage τ . Le rapport entre les fréquences cycliques annuelles et journalières est grand. Donc, deux autocorrélations cycliques avec différentes échelles et résolution sont calculées.

Les harmoniques de la fonction d'autocorrélation cyclique sont observées sur la fonction d'autocorrélation journalière et pas sur l'annuelle. Ceci est expliqué par le nombre limité de cycles annuels (7 ans) en comparant par le nombre élevé de cycles journaliers ($365*7$).

Selon ces résultats, l'ensoleillement est un phénomène CS2.

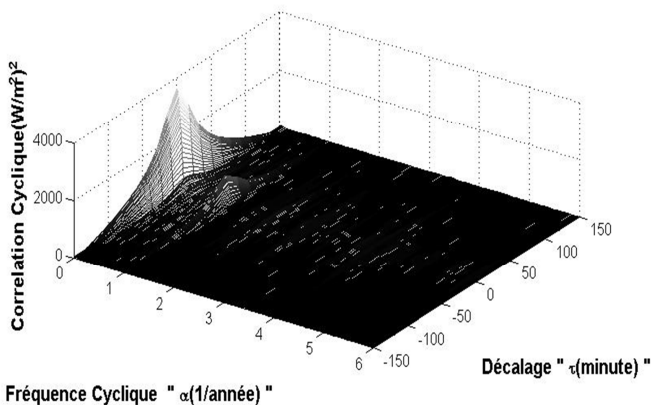


Figure 7: Fonction d'autocorrélation cyclique annuelle de l'ensoleillement en fonction de τ et α .

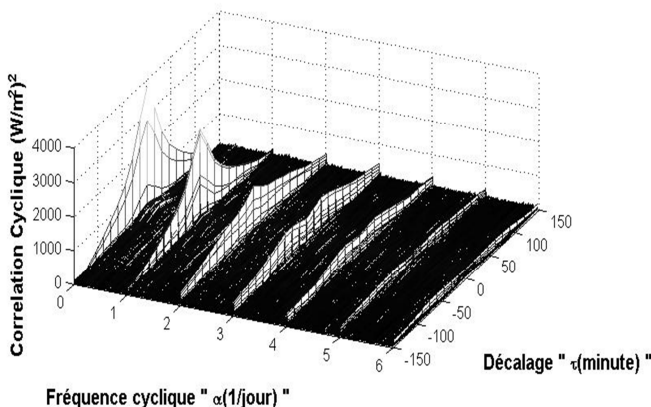


Figure 8 : Fonction d'autocorrélation cyclique journalière de l'ensoleillement en fonction de τ et α .

6 Conclusion

Dans ce travail nous avons présenté l'application de la méthode MTSA pour la séparation du motif répétitif et de la partie résiduelle du signal d'ensoleillement. La particularité de ce signal est la modulation d'amplitude de sa forme d'onde temporelle due à l'effet de la saisonnalité, ce qui rend difficile l'estimation du motif répétitif. Les résultats de ce travail montrent que la méthode MTSA donne de bons résultats pour la séparation de ces deux composantes pour le signal d'ensoleillement par rapport à la MS classique. Cette méthode n'est pas forcément parfaite mais réduit certains problèmes liés à la moyenne synchrone.

La fonction d'autocorrélation appliquée sur la partie résiduelle présente des périodicités à l'ordre 2 (CS2) de l'ensoleillement. Nous envisageons d'appliquer cette approche cyclostationnaire pour le diagnostic des panneaux photovoltaïques.

7 Références

- [1] W.A. Gardner, "Cyclostationarity in Communications and Signal Processing," IEEE Press, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., New York, 1994, pp. 1–90. (Chapter 1). R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.
- [2] M. Lamraoui, M. Thomas, and M. El Badaoui, "Cyclostationarity approach for monitoring chatter and tool wear in high speed milling," Mechanical Systems and Signal Processing., vol. 44, no. 1–2, pp. 177–198, 2014.
- [3] S. Maiz, M. El Badaoui, J. Leskow and C. Servière, "Subsampling-based method for testing cyclostationarity: Application to biomechanical signals," The 8th IEEE International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WoSSPA'13), pp. 243–248, 2013.
- [4] J.P. Huang. and G. R. North, "Cyclic spectral analysis fluctuations in a GCM simulation," Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 53, No3, pp. 370–379, 1996.
- [5] J. Antoni and R. B. Randall, "Unsupervised noise cancellation for vibration signals: Part I - Evaluation of adaptive algorithms," Mech. Syst. Signal Process., vol. 18, pp. 89–101, 2004.
- [6] R. B. Randall and N. Sawalhi, "A New Method for Separating Discrete Components from a Signal," Sound Vib., no. May, pp. 6–9, 2011.
- [7] F. Bonnardot and M. El Badaoui, "Etude de la fatigue d'un coureur, de l'instrumentation à l'analyse vibratoire," 10ème Congrès Français d'Acoust., pp. 12–16, 2010.
- [8] W.A. Gardner and A. Napolitano, "Cyclostationarity: Half a century of research," Signal Processing., vol. 86, pp. 639–697, 2006.

[9] The Helioclim-3 database, available on: www.soda-is.com.

[10] K. C. Gryllias, J. Antoni, and M. El-Tabach, "Vibroacoustic Source Separation using an Improved Cyclic Wiener Filter," *Surveillance. 7 Int. Conf.*, pp. 1–9, 2013.