

Modèle de Chaînes de MARKOV d'Ordre Un pour le Dimensionnement de Systèmes Photovoltaïques

Classification de Journées de Rayonnement Solaire

M. Muselli, P. Poggi, G. Notton et A. Louche

Université de Corse, URA CNRS 2053 - Systèmes Physiques de l'Environnement
Route des Sanguinaires, 20000 Ajaccio, France

1. INTRODUCTION

Les systèmes photovoltaïques représentent la solution économique et technologique souvent la plus rentable pour électrifier les sites isolés. Dans cette étude, nous développons une méthodologie de classification de « journées types » d'irradiation globale afin d'élaborer un générateur de données journalières d'irradiation indispensable pour le dimensionnement de systèmes PV. Cette méthode a été expérimentée pour deux stations météorologiques en Corse (Vignola 41°55'N, 8°39'E et Campo del'Oro 41°55'N, 8°44'E) distantes de 10 km environ. Plusieurs études ont porté sur le problème de la classification de journées types [1,2] mais elles présentaient les inconvénients d'utiliser un grand nombre de paramètres que l'on peut obtenir difficilement en un point quelconque à la surface du globe. Dans ce travail, nous proposons d'utiliser une méthodologie de classification nécessitant la définition de paramètres discriminants simples basés seulement sur les profils de l'indice de clarté horaire $kt(h)$. Une méthode de classification usuelle (agrégation de Ward) de ces paramètres discriminants couplée à des analyses factorielles discriminantes permet de déterminer le nombre de groupes (ou classes) représentant les différentes informations météorologiques incluses dans les séries climatiques. Enfin, un modèle de Markov d'ordre 1 est utilisé pour construire des séquences de classes journalières de l'irradiation globale pour pouvoir dimensionner des systèmes PV sur des sites dépourvus de tout apport énergétique.

2. PARAMETRES DISCRIMINANTS ET DONNEES D'IRRADIATION

Les paramètres discriminants sont construits à partir des irradiances horaires globales sur un plan horizontal mesurées aux deux stations sur la même période (1448 journées d'acquisition). Elles sont modélisées sur un plan incliné à partir de modèles usuels de la littérature [3, 4]. Les paramètres discriminants sont les suivants [5] :

- Indices de clarté horaire $kt(h)$ et journaliers $KT(d)$ construits à partir des irradiances horaires et journalières de l'irradiation globale :

$$kt(h) = I(h) / I_0(h) \quad \text{et} \quad KT(d) = H(d) / H_0(d) \quad (1)$$

- Intégrale du profil de l'indice de clarté horaire S_2 indiquant l'état de perturbation de l'irradiation globale au cours de la journée :

$$S_2 = \sum_h [kt(h+2) - (2 \times kt(h+1)) + kt(h)]^2 \quad (2)$$

- Indice de clarté moyen mensuel k_{tm} représentant la valeur moyenne de l'indice de clarté horaire pour un mois donné m et un angle d'inclinaison de l'irradiation β :

$$k_{tm} = \overline{kt(h,m,\beta)} \quad (3)$$

Le paramètre discriminant nommé SI représente le nombre d'heures pour un jour donné où l'indice de clarté $kt(h)$ est inférieur au seuil ktm .

3. METHODE DE CLASSIFICATION

La méthodologie de classification et les premiers résultats relatifs à une étude précédente ont été décrits dans un premier travail [6]. Dans cette étude, nous présentons uniquement les principales caractéristiques de la méthode et les outils mathématiques utilisés. Nous proposons de ranger les journées d'irradiations globales en utilisant la méthode d'agrégation de Ward par un calcul de distance euclidienne pour déterminer la différence entre les échantillons. Cette méthode permet une représentation graphique de la classification progressive. L'histogramme 'niveau' permet de localiser les ruptures de niveau caractérisant la classification dans le sens de l'inertie. Cette méthode est validée par des analyses discriminantes qui rangent les échantillons journaliers dans des classes afin de vérifier le dendrogramme issu de la méthode de Ward. La classification basée sur 3 classes de temps météorologiques présente dans tous les cas (quelque soient le site et l'angle de mesure des irradiations) le meilleur pourcentage d'événements classés. Les classes présentent des moyennes distinctes et des écarts-types faibles et caractérisent trois types d'informations météorologiques : Classe I pour des conditions de ciel clair, Classe II pour des conditions de ciel partiellement nuageux et Classe III pour des conditions de ciel opaque.

4. CHAINES DE MARKOV D'ORDRE UN

Un modèle stochastique basé sur une chaîne de Markov de type $(X_n, n = 1, 2, 3)$ est considéré. Si $X_n = i$ alors le processus est dit à état i au temps n . Nous supposons que si le processus est dans l'état i , une probabilité p_{ij} existe telle que ce processus sera dans l'état j au temps $n + 1$. Ainsi, la distribution conditionnelle d'un futur état X_{n+1} est indépendante des états passés mais dépendante seulement de l'état présent X_n . Pour synthétiser des séquences de l'irradiation globale, un simulateur de données a été construit. Pour le premier jour, il effectue un tirage aléatoire d'une variable aléatoire ε l'intervalle $[0; 1]$ et ce nombre aléatoire est comparé à la fonction de répartition Fp_i construite à partir des probabilités marginales p_i des données expérimentales. Pour les autres jours, une nouvelle variable ε' est construite sur le même processus et comparée à la fonction de répartition des probabilités conditionnelles Fp_{ij} , ainsi la classe C pour un jour donné est définie par :

- pour le premier jour :

$$\varepsilon \leq \sum_{i=1}^C p_i = Fp_i \quad (4)$$

- pour les autres jours :

$$\varepsilon' \leq \sum_{i=1}^C p_{ij} = Fp_{ij} \quad (5)$$

RESULTATS

5.1 Matrices des probabilités marginales p_i

Après avoir vérifié la dépendance et la stationnarité de la chaîne de Markov d'ordre un, nous avons comparé pour chaque angle et chaque site, une séquence simulée de classes journalières d'irradiation avec les données expérimentales. La figure 1 présente les probabilités marginales expérimentales et simulées obtenues à partir du simulateur markovien. Nous

observons une bonne corrélation entre données expérimentales et simulées compte tenu des valeurs faibles des coefficients statistique (Tableau 1). En conclusion, le simulateur élaboré dans ce travail est capable de reconstituer avec une bonne précision la matrice de probabilité marginale des données expérimentales quelque soient l'angle d'inclinaison des irradiations et le site de mesure.

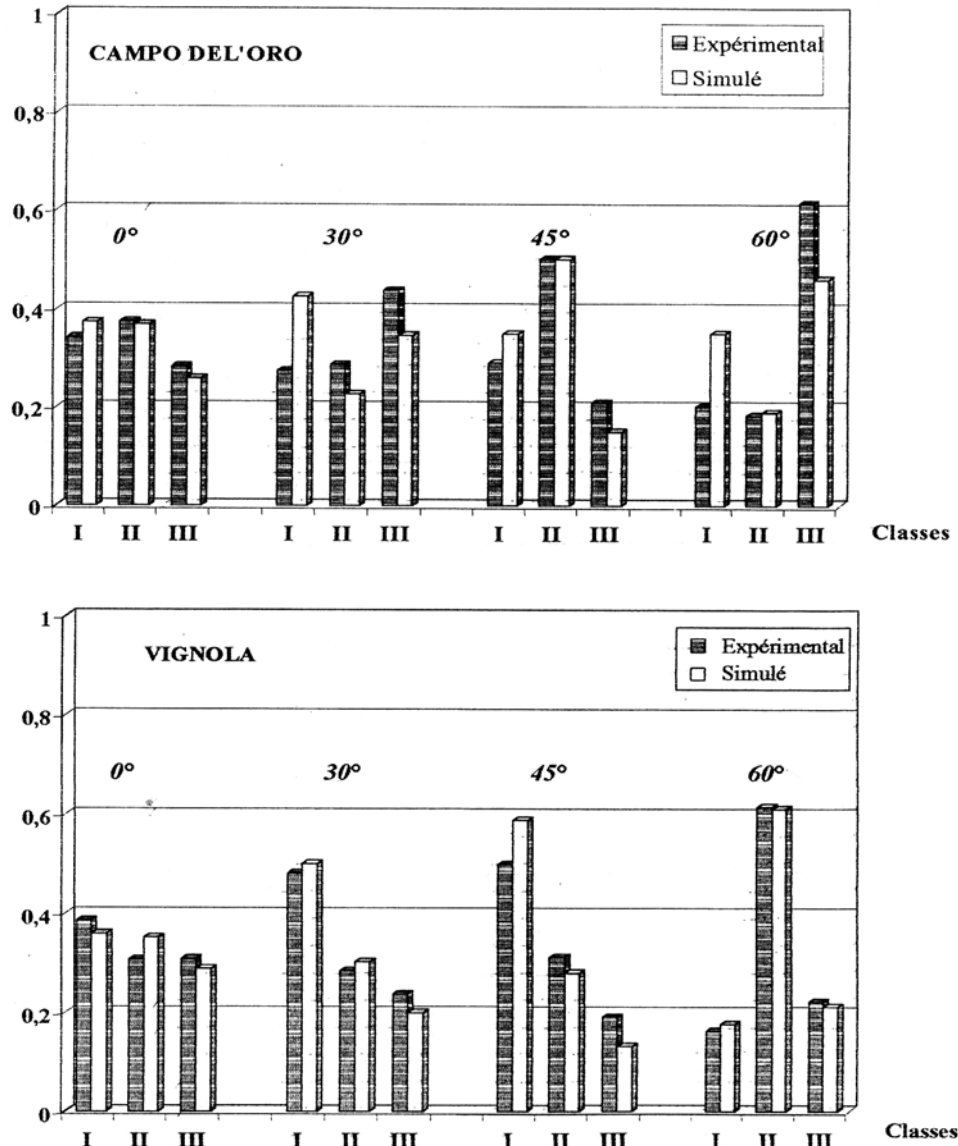


Fig. 1: Probabilités marginales expérimentales et simulées par le générateur markovien

Tableau 1: MBE Mean Bias Error (probabilités marginales p_i)

	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III
CAMPO DEL'ORO			
0°	+0,030	-0,005	-0,025
30°	+0,151	-0,060	-0,091
45°	+0,059	-0,000	-0,060
60°	+0,149	0,005	-0,154

VIGNOLA			
0°	-0,0260	+0,045	-0,019
30°	+0,019	+0,018	-0,037
45°	+0,090	-0,031	-0,059
60°	+0,014	-0,004	+0,010

5.2 Matrices des probabilités de transition p_{ij}

La probabilité de transition définie par $p_{ij} = \text{probabilité} \{X_{n+1} = j | X_n = i\}$; $n > 0, i, j > 0$ est maintenant étudiée. Pour chaque site et chaque angle, le tableau 2 présente les matrices expérimentales et simulées des probabilités de transition. Quatre coefficients statistiques comparent les résultats (MBE = Mean Bias Error, RMSE = Root Mean Square Error, RMBE = Relative Mean Bias Error et CC = Coefficient de Corrélation).

Tableau 2: Matrices de probabilités conditionnelles expérimentales et simulées

Con.	Expérimentales	simulées	MBE	RMSE	RMBE	CC
Campo del'Oro (0°)	$\begin{bmatrix} 0,723 & 0,217 & 0,060 \\ 0,179 & 0,486 & 0,335 \\ 0,100 & 0,416 & 0,484 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,750 & 0,224 & 0,026 \\ 0,150 & 0,478 & 0,372 \\ 0,147 & 0,424 & 0,429 \end{bmatrix}$	0,000	0,033	-2,15%	0,987
Campo del'Oro (30°)	$\begin{bmatrix} 0,985 & 0,015 & 0,000 \\ 0,012 & 0,721 & 0,267 \\ 0,002 & 0,173 & 0,825 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,989 & 0,011 & 0,000 \\ 0,012 & 0,905 & 0,083 \\ 0,006 & 0,048 & 0,946 \end{bmatrix}$	0,000	0,105	-	0,977
Campo del'Oro (45°)	$\begin{bmatrix} 0,850 & 0,136 & 0,014 \\ 0,072 & 0,697 & 0,231 \\ 0,036 & 0,533 & 0,431 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,863 & 0,127 & 0,010 \\ 0,076 & 0,723 & 0,201 \\ 0,065 & 0,631 & 0,304 \end{bmatrix}$	0,000	0,056	3,12%	0,983
Campo del'Oro (60°)	$\begin{bmatrix} 0,918 & 0,079 & 0,003 \\ 0,075 & 0,748 & 0,177 \\ 0,005 & 0,049 & 0,946 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,927 & 0,073 & 0,000 \\ 0,110 & 0,732 & 0,158 \\ 0,009 & 0,055 & 0,936 \end{bmatrix}$	0,000	0,016	4,26%	0,999
Vignola (0°)	$\begin{bmatrix} 0,671 & 0,182 & 0,147 \\ 0,265 & 0,393 & 0,342 \\ 0,146 & 0,378 & 0,476 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,668 & 0,263 & 0,069 \\ 0,187 & 0,438 & 0,375 \\ 0,187 & 0,359 & 0,454 \end{bmatrix}$	0,000	0,052	0,17%	0,981
Vignola (30°)	$\begin{bmatrix} 0,770 & 0,160 & 0,070 \\ 0,272 & 0,427 & 0,301 \\ 0,140 & 0,364 & 0,496 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,770 & 0,200 & 0,030 \\ 0,220 & 0,480 & 0,300 \\ 0,250 & 0,280 & 0,470 \end{bmatrix}$	0,000	0,056	1,64%	0,961
Vignola (45°)	$\begin{bmatrix} 0,822 & 0,143 & 0,035 \\ 0,220 & 0,493 & 0,287 \\ 0,108 & 0,448 & 0,444 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,845 & 0,140 & 0,015 \\ 0,230 & 0,508 & 0,262 \\ 0,204 & 0,419 & 0,377 \end{bmatrix}$	0,000	0,043	1,14%	0,983
Vignola (60°)	$\begin{bmatrix} 0,745 & 0,246 & 0,009 \\ 0,062 & 0,752 & 0,186 \\ 0,016 & 0,508 & 0,476 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,800 & 0,200 & 0,000 \\ 0,043 & 0,756 & 0,201 \\ 0,042 & 0,541 & 0,417 \end{bmatrix}$	0,000	0,035	3,59%	0,993

Nous observons une bonne corrélation entre données expérimentales et simulées. Ainsi, le modèle markovien permet une simulation simple de séquences de l'irradiation journalière globale horizontale ou inclinée. Le simulateur est capable de reconstituer des séries de «journées types» qui présentent les mêmes propriétés statistiques que les données expérimentales. Nous proposons alors cette méthodologie statistique pour l'étude du prédimensionnement de systèmes PV en sites isolés.

5.3 Dimensionnement de systèmes photovoltaïques

Avant d'étudier le dimensionnement des systèmes proprement dits, nous proposons de vérifier si la méthodologie élaborée conserve sur un plan énergétique, les propriétés statistiques de l'irradiation globale, en calculant l'énergie solaire reçue (Fig. 2) sur la période complète (1448 jours) à partir de 3 méthodes utilisant :

- Cas N°1 : les données expérimentales enregistrées aux stations; l'énergie résultante sera notée $E\{d\}$

- Cas N°2 : les séquences expérimentales de «journées types» déterminées à partir de la classification de Ward et des paramètres discriminants; l'énergie résultante sera notée $E\{d,C(\text{real})\}$

- Cas N°3 : les séquences simulées de «journées types» construites à partir du processus markovien élaboré dans ce travail; l'énergie résultante sera notée $E\{d,C(\text{sim})\}$

Pour les deux derniers cas, l'énergie globale en kWh est calculée par :

$$E_{\text{period}} = \sum_d H_0(d) \times \overline{K T_C} \quad \text{avec } C = \{I, II, III\} \quad (6)$$

où $H_0(d)$ est l'énergie globale extra-terrestre pour le jour considéré et $\overline{K T_C}$ est l'indice de clarté moyen journalier de la classe C calculé pour les différents cas.

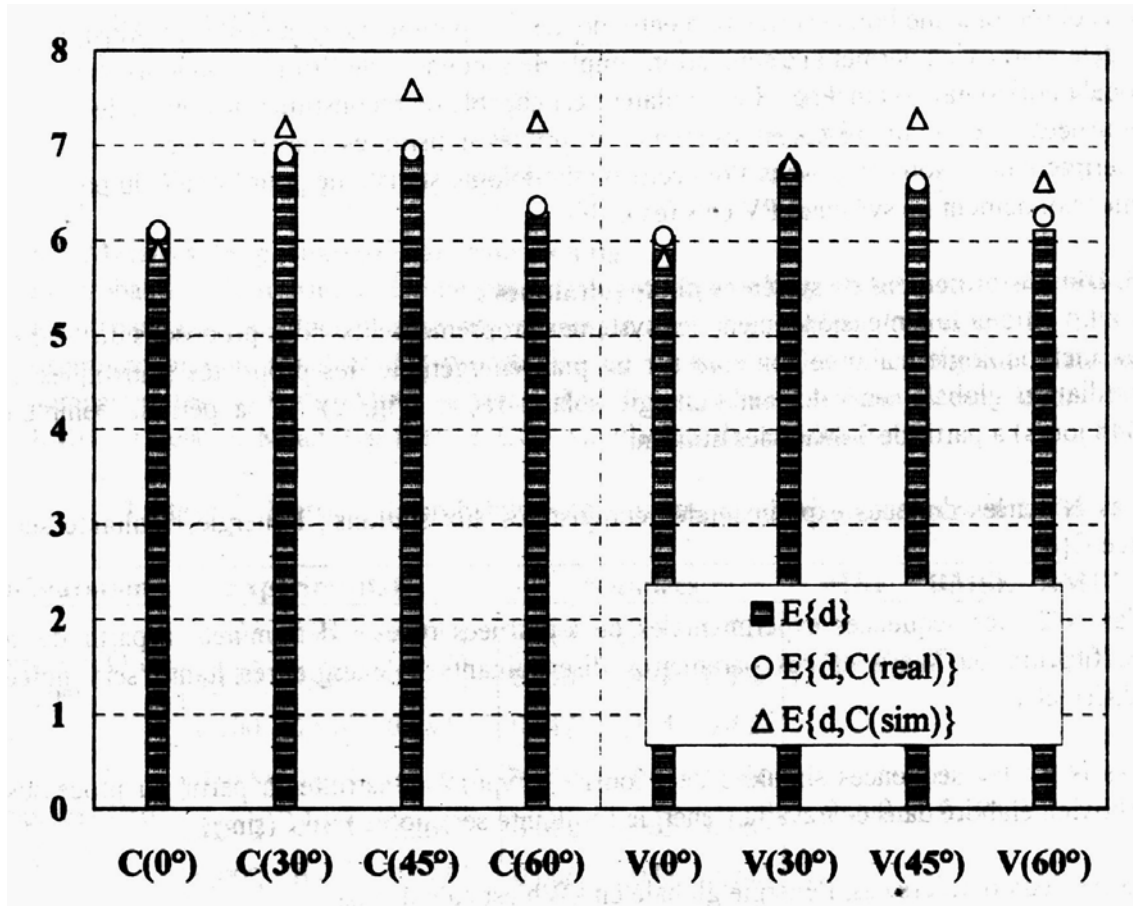


Fig. 2: Irradiation solaire globale sur la période complète (10^3 kWh)

Nous pouvons observé sur la figure 2 :

une bonne corrélation entre $E\{d\}$ et $E\{d,C(\text{real})\}$ correspondant aux cas N°1 et 2. Ainsi, la classification basée sur le choix des paramètres discriminants et de la méthode de Ward, permet de conserver les propriétés statistiques de la donnée expérimentale sur une longue période (presque 4 ans), une bonne corrélation entre $E\{d\}$ et $E\{d,C(\text{sim})\}$ correspondant aux cas N°1 et 3, ce qui confirme l'efficacité du simulateur à construire des séquences de «journées types» possédant les caractéristiques des données sources.

Nous avons comparé le coût du kWh obtenu par un système PV composé d'un champ de module de 0,1 kW, d'un stockage de batteries de 1,44 kWh sachant que ces batteries sont remplacées tous les 5 ans sur une durée de vie du système estimée à 20 ans

$$LEC(\$/\text{kWh}) = \frac{\text{Invest} + \text{Maint} + \text{Replac}}{\text{FA} \times E_C} \quad (7)$$

où Invest, Maint et Replac représentent les parts d'investissement, de maintenance et de remplacement des sous-systèmes, FA le facteur d'actualisation et E_C l'énergie annuelle produite par le système.

Nous avons alors observé entre les trois cas des erreurs relatives RMBE sur les coûts du kWh assez faibles comprises entre -13,6% et +3,9% caractérisant la fiabilité de la méthodologie globale.

6. CONCLUSION

Dans ce papier, une méthodologie est élaborée afin de dimensionner des systèmes autonomes en sites isolés à partir de séquences de «journées types» de l'irradiation globale. Cette méthode utilise le couplage d'un processus de classification et d'une chaîne de Markov d'ordre un. Un simulateur de données a été construit pour élaborer les séquences afin de calculer les matrices de probabilités marginales et conditionnelles. Ces dernières ont présentées une bonne corrélation avec les matrices issues des données expérimentales. Le dimensionnement de systèmes PV a été abordé par le calcul du coût du kWh déterminé à partir des données réelles et simulées. Cette méthode a conduit à des résultats prometteurs dans la mesure où elle est capable de conserver et de reproduire les propriétés statistiques et stochastiques de la donnée expérimentale avec une bonne précision.

REFERENCES

- [1] E. Aranovitch, C. Gandino and D. Gillaert, Colloque Météorologie et Energies Renouvelables, Valbonne, pp. 315-338, 1984.
- [2] F. Fabero, M. Alonso-Abella and F. Chenlo, Proc. of the 14th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelone, pp. 2299-2302, 1997.
- [3] L.E. Hay and J.A. Davies, First Canadian Solar Radiation Data Workshop, 59, pp. 59-72, 1980.
- [4] J.F. Orgill and K.T.G. Hollands, Solar Energy, 19-4, pp. 357-359, 1977.
- [5] M. Iqbal, '*An Introduction to Solar Radiation*', Academic Press, 1983.
- [6] M. Muselli, P. Poggi, P. Notton and A. Louche, '*Classification of Typical Meteorological Days from Global Irradiation Records and Comparison between two Mediterranean Coastal Sites in Corsica Island*', Energy Conversion and Management, 2000, In Press.