

Classification des Eclairements Solaires à l'Aide de l'Analyse Fractale

Samia Harrouni¹ et Abdelbaki Maafi^{1,2}

¹ Equipe d'Instrumentation Solaire et de Modélisation / LINS
Faculté de Génie Electrique, USTHB B.P.32, El-Alia, 16111 Alger

² Membre Associé Centre International de Physique Théorique Abdus-Salam
AS-ICTP, Strada Costiera, 1134014 Trieste-Italie

Résumé – Cet article concerne la modélisation fractale des éclairements solaires dans le but de quantifier leurs fluctuations aléatoires et réaliser leur classification en fonction de l'état du ciel. La mise au point de la modélisation a été effectuée à l'aide de mesures de l'éclairement global réalisées à un pas de temps de 10 minutes dans les sites de Tahifet et d'Imehrou situés dans le grand sud Algérien. Les résultats obtenus montrent que la combinaison de la dimension fractale et de l'indice de clarté comme critères de classification permet d'aboutir à 3 types de temps dans les sites considérés qui sont : ciel clair, ciel partiellement couvert et ciel couvert.

Abstract – This paper deals with the modelling of daily solar irradiances measured with a time step of 10 minutes at Tahifet and Imehrou located in the south of Algeria by using fractals. The aim is to estimate the fractal dimensions in order to perform daily solar irradiances classification. Indeed, the estimated fractal dimension \hat{D} and the clearness index K_T are used as classification criteria. The obtained results show that these criteria lead to three classes which are : clear sky, partially cloudy sky and overcast sky.

Mots clés : Dimension fractale - Classification - Eclairement solaire.

1. INTRODUCTION

Cet article s'intéresse à la modélisation fractale des éclairements solaires dans le but de quantifier leurs fluctuations aléatoires et réaliser leur classification en fonction de l'état du ciel (ciel clair, ciel couvert, etc.). La modélisation des fluctuations aléatoires du rayonnement solaire a déjà fait l'objet de plusieurs études publiées dans la littérature. Ces dernières se basent pour la plupart, sur les processus aléatoires. Les approches Markoviennes en particulier, ont largement contribué à cette modélisation. En effet, elles ont permis la mise au point de modèles du rayonnement solaire capables de reproduire ses caractéristiques à travers le monde avec des précisions acceptables. A titre d'exemple, il y a lieu de citer les travaux de B.J.Brinkworth [1], de B.Bartoli et al.[2], de R.Lestienne et al.[3], de R.J.Aguiar et al.[4] et de A.Maafi [5]. Les travaux de ce dernier ont traité indirectement le problème de la classification des insolation et des irradiations journalières en les reliant aux états du ciel: ciel clair, ciel couvert, etc....[5,6]. D'autres méthodes statistiques ont été utilisées pour la classification des journées en des cas types tel que la classification automatique [7], l'analyse des corrélations [8] et la méthode de Ward [9]. Des études plus récentes s'intéressent à la modélisation du caractère aléatoire du rayonnement solaire en utilisant les réseaux de neurones [10,11] et l'analyse fractale [8,12-13]. En plus du caractère inédit de ces nouvelles approches, ces études visent à évaluer l'apport de ces formalismes dans la description du caractère fluctuant du rayonnement solaire. C'est dans cet esprit que s'inscrit ce travail puisqu'il présente un modèle qui permet de quantifier les fluctuations du rayonnement solaire à partir de l'estimation de sa dimension fractale. La mise au point de ce modèle a été effectuée à l'aide de mesures de

l'éclairement solaire réalisées à un pas de temps de 10 minutes dans les sites de Tahifet et d'Imehrou situés dans le grand sud algérien.

L'application de cette modélisation concerne la classification des signaux d'éclairement à l'aide de la dimension fractale. Cette classification aboutit à la détermination de types de temps: ciel clair, ciel partiellement couvert, ciel couvert, etc., utiles pour le dimensionnement et l'analyse des performances des systèmes énergétiques solaires [8,12-13]. En réalité, cette question a été largement traitée dans la littérature mais elle a été abordée sans faire appel à l'analyse fractale [5,14-16].

Notre méthode de classification est basée sur la détermination des seuils de la dimension fractale des signaux d'éclairement solaire pour aboutir à des groupements homogènes des journées selon l'état du ciel. Le choix d'une méthode de seuillage au lieu d'une méthode statistique est dicté par le critère principal qui est la dimension fractale. En effet, les méthodes statistiques bien qu'elles diffèrent par les paramètres utilisés comme critères de classification, la plus part d'entre elles utilisent une distance métrique tel que la distance euclidienne afin d'établir l'écart d'homogénéité entre deux journées. Ceci ne peut être appliqué à la dimension fractale vue qu'une journée pluvieuse et une autre ensoleillée peuvent avoir la même dimension fractale comme il sera montré dans cet article.

Notre méthode de classification présente aussi l'avantage de ne pas nécessiter la condition de stationnarité comme c'est le cas pour les approches Markoviennes cités plus haut. Ces méthodes recourent alors à d'autres techniques afin de rendre le rayonnement solaire stationnaire tel que la transformée gaussienne et l'utilisation des fractions de la variable solaire au lieu de la variable elle même.

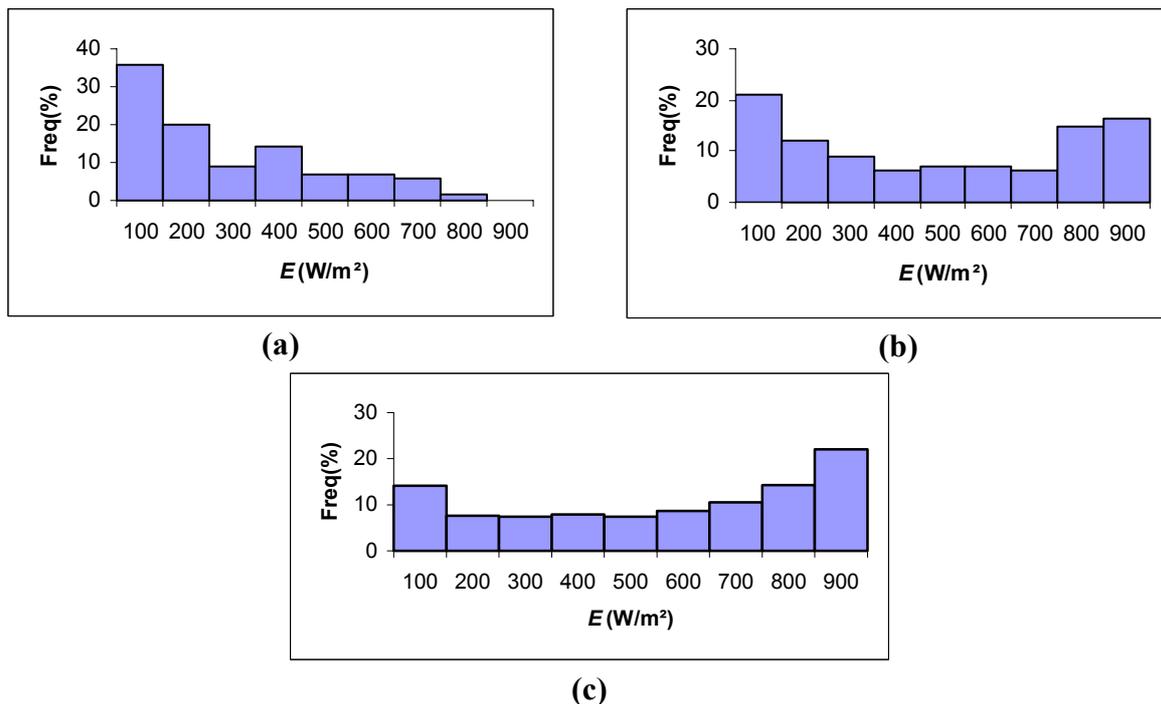


Fig.1: Exemples d'histogrammes des éclairagements obtenus à l'échelle de la minute (Tahifet)
 (a) :Journée du 20 Mars 1992, (b) :Journée du 28 Novembre 1992 et (c) :Journée du 20 Juin 1992

2. BANQUE DE DONNEES

Elle est constituée des éclairagements globaux, enregistrées au cours de l'année 1992 sur un plan incliné de 10° par rapport au plan horizontal dans deux sites qui sont Tahifet (latitude =

22°53' N, longitude = 6° E et altitude = 1400 m) et Imehrou (latitude = 26°N, longitude = 8°50'E et altitude = 600).

L'éclairément global a été mesuré au moyen d'une cellule photovoltaïque au silicium mono- cristallin, et enregistré à l'aide d'une chaîne automatique de mesure avec un pas d'acquisition de 10 minutes.

Nous représentons dans la figure 1, des exemples d'histogrammes des éclairéments journaliers les plus fréquents.

3. FORMULATION DU MODELE

La figure 2 représente un exemple de signal d'éclairément journalier dont on veut déterminer la dimension fractale. La modélisation consiste d'abord à recouvrir ce signal par des rectangles de longueur $\Delta\tau$ et de largeur $|E(t_n+\Delta\tau)-E(t_n)|$.

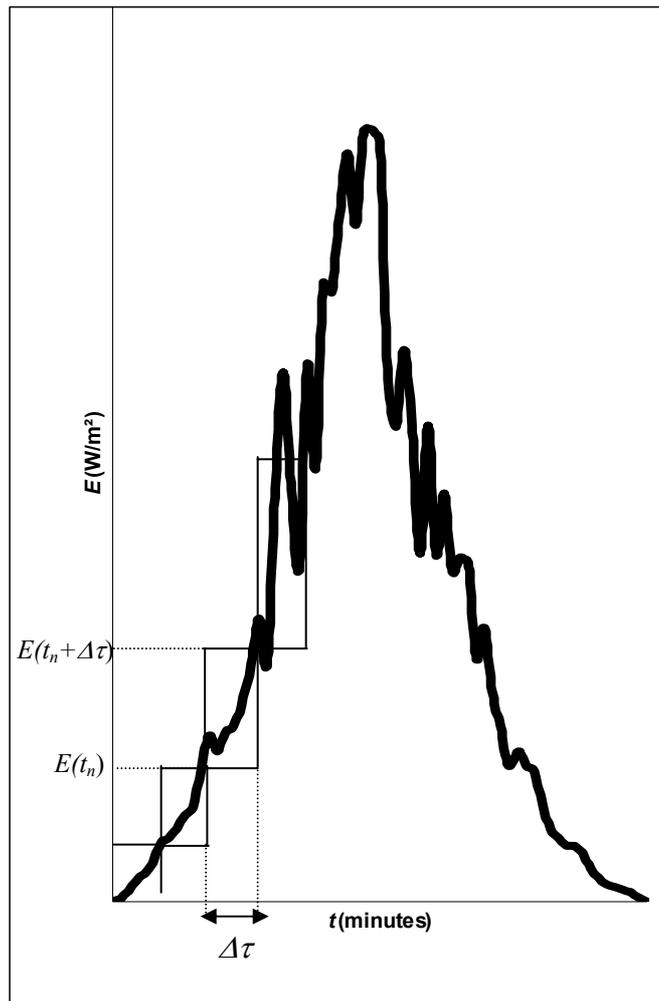


Fig.2: Recouvrement d'une courbe d'éclairément par des rectangles

Ensuite, il faudrait calculer la surface $S(\Delta\tau)$ de cette courbe recouverte en utilisant la relation suivante:

$$S(\Delta\tau) = \sum_{t_n=0}^{N-1} \Delta\tau \cdot |E(t_n + \Delta\tau) - E(t_n)| \quad (1)$$

N représente la taille du signal à étudier, $E(t_n)$ est l'éclairement global à l'instant t_n et $|E(t_n + \Delta\tau) - E(t_n)|$ est la variation de l'éclairement pendant l'intervalle $\Delta\tau$.

Etant donné que les éclairements solaires dont on dispose sont des signaux discrets, la dimension de Minkowski-Bouligand a été utilisée pour mesurer leurs fluctuations [17].

Bouligand a défini la dimension fractale D comme suit:

$$D = 2 - \lambda(S) \quad (2)$$

$\lambda(S)$ est appelé facteur de similitude et il représente l'ordre infinitésimal de la surface $S(\Delta\tau)$. Il est défini par :

$$\lambda(S) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\text{Ln}(S(\Delta\tau))}{\text{Ln}(\Delta\tau)} \quad (3)$$

Ln est le logarithme népérien. En remplaçant $\lambda(S)$ par sa valeur dans la relation (2) on obtient:

$$D = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left[2 - \frac{\text{Ln}(S(\Delta\tau))}{\text{Ln}(\Delta\tau)} \right] \quad (4)$$

Les propriétés du logarithme permettent de mettre la relation (4) sous la forme suivante:

$$D = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left[\frac{\text{Ln}\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right)} \right] \quad (5)$$

La dimension fractale est alors déduite de la relation suivante en utilisant la méthode des moindres carrés :

$$\text{Ln}\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right) \cong D \cdot \text{Ln}\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right) + \text{constante} \quad (6)$$

avec $\Delta\tau \rightarrow 0$

Pour déterminer la dimension fractale D qui représente la pente de la droite (6), il faudrait utiliser différents intervalles de temps $\Delta\tau$ et mesurer les surfaces $S(\Delta\tau)$ correspondantes.

Rappelons que dans l'analyse fractale, le recouvrement des signaux se fait à l'aide de cercles concentriques [17]. Cependant dans notre cas, nous avons choisi le rectangle comme élément géométrique pour le recouvrement du signal d'éclairement. De cette manière, il est possible de relier chaque point de l'axe des temps au point correspondant de l'axe des éclairements et réaliser ainsi le recouvrement du signal sans perte d'information.

4. MISE EN ŒUVRE DU MODELE

L'estimation de la dimension fractale décrite dans le paragraphe 3 a été traduite sous forme d'algorithme schématisé par l'organigramme de la figure 3. Compte tenu des hypothèses, $\Delta\tau$ qui représente la largeur des rectangles utilisés pour le recouvrement du signal devrait varier de 1 à $N/2$. Pour tester cet algorithme, nous l'avons appliqué à plusieurs signaux d'éclairements solaires de différentes allures (régulières, irrégulières et faiblement irrégulières) sélectionnées tout au long de l'année 1992. Les dimensions fractales obtenues ne

correspondaient pas à l'allure des courbes étudiées. En effet, ces dimensions se rapprochaient de la valeur 2 quelque soit l'allure du signal considéré. Rappelons que, la dimension fractale d'un signal régulier tend vers l'unité alors que celle d'un signal caractérisé par d'intenses fluctuations se rapproche de 2 [8, 12-13, 17, 19].

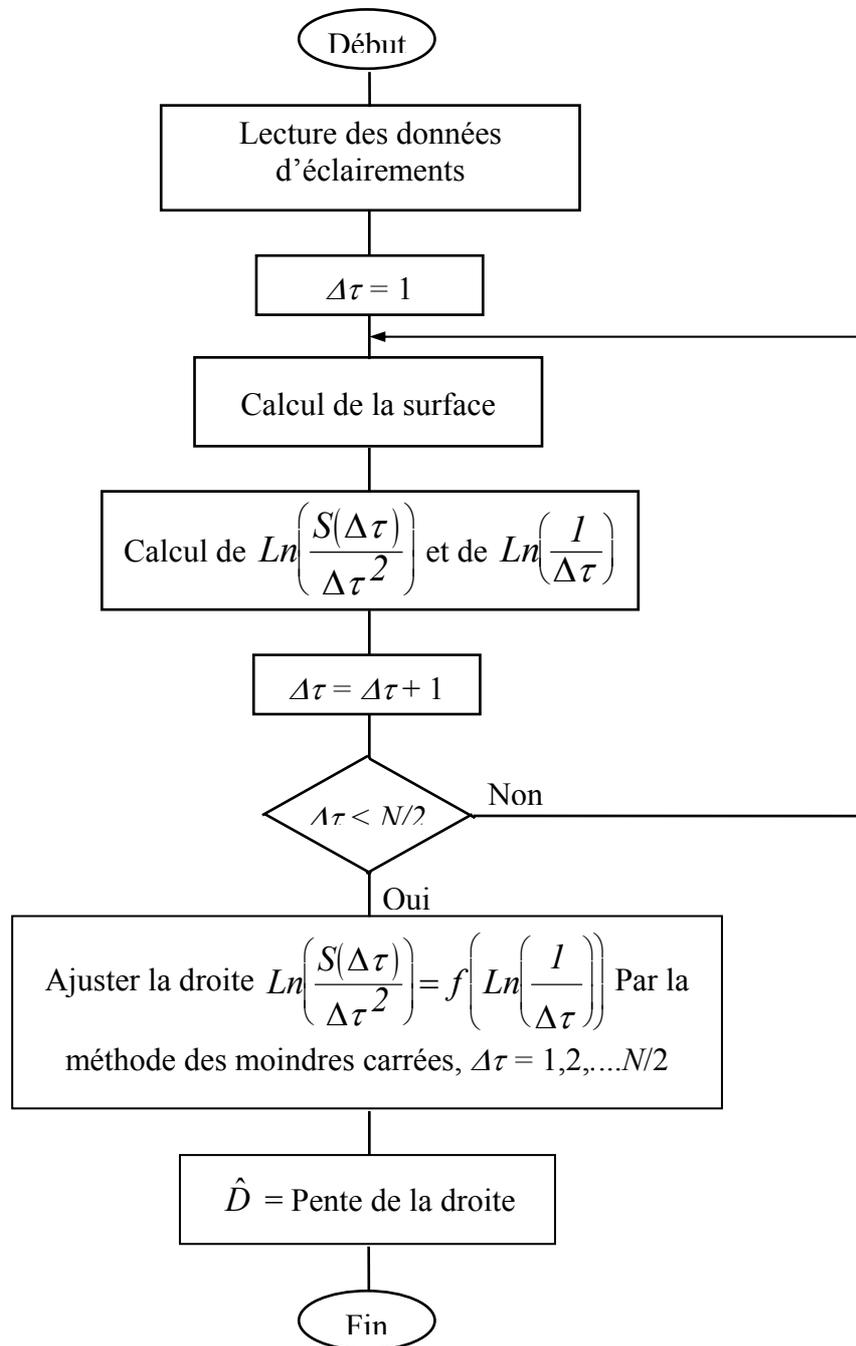


Fig.3: Organigramme d'estimation de la dimension fractale.

Compte tenu du fait que $\Delta\tau$ est le seul paramètre conditionnant les résultats du modèle, nous avons conclu que sa plage de variation n'a pas été bien adaptée au cas traité. En effet, une bonne estimation de la dimension fractale nécessite un bon ajustement de la droite

$$\text{Ln}\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right) = f\left(\text{Ln}\left(\frac{I}{\Delta\tau}\right)\right).$$

Pour cela, le nombre de points constituant la droite est important. Ce nombre est fixé par $\Delta\tau_{max}$ qui est l'intervalle de temps maximum utilisé pour le recouvrement du signal. L'expérience montre que $\Delta\tau_{max}$ nécessaire à une bonne estimation de la dimension fractale dépend de plusieurs paramètres dont la taille N du signal à étudier. Ce paramètre ne doit pas être trop faible pour ne pas biaiser l'ajustement de la droite, il ne doit pas également dépasser $N/2$. Aussi, nous avons procédé à la détermination de $\Delta\tau_{max}$ expérimentalement pour les signaux étudiés. Pour cela, nous avons commencé l'application de l'algorithme de la détermination de la dimension fractale avec $\Delta\tau_{max}=10$, c'est à dire un très petit intervalle que nous avons ensuite incrémenté progressivement de 1 jusqu'à atteindre $\Delta\tau_{max} = N/2$. Le $\Delta\tau_{max}$ choisi est celui qui donne une dimension fractale en accord avec l'allure des signaux. Cette procédure appliquée à des éclairissements réguliers, des éclairissements irréguliers et des éclairissements faiblement irrégulier nous a permis de fixer $\Delta\tau_{max}$ à 15.

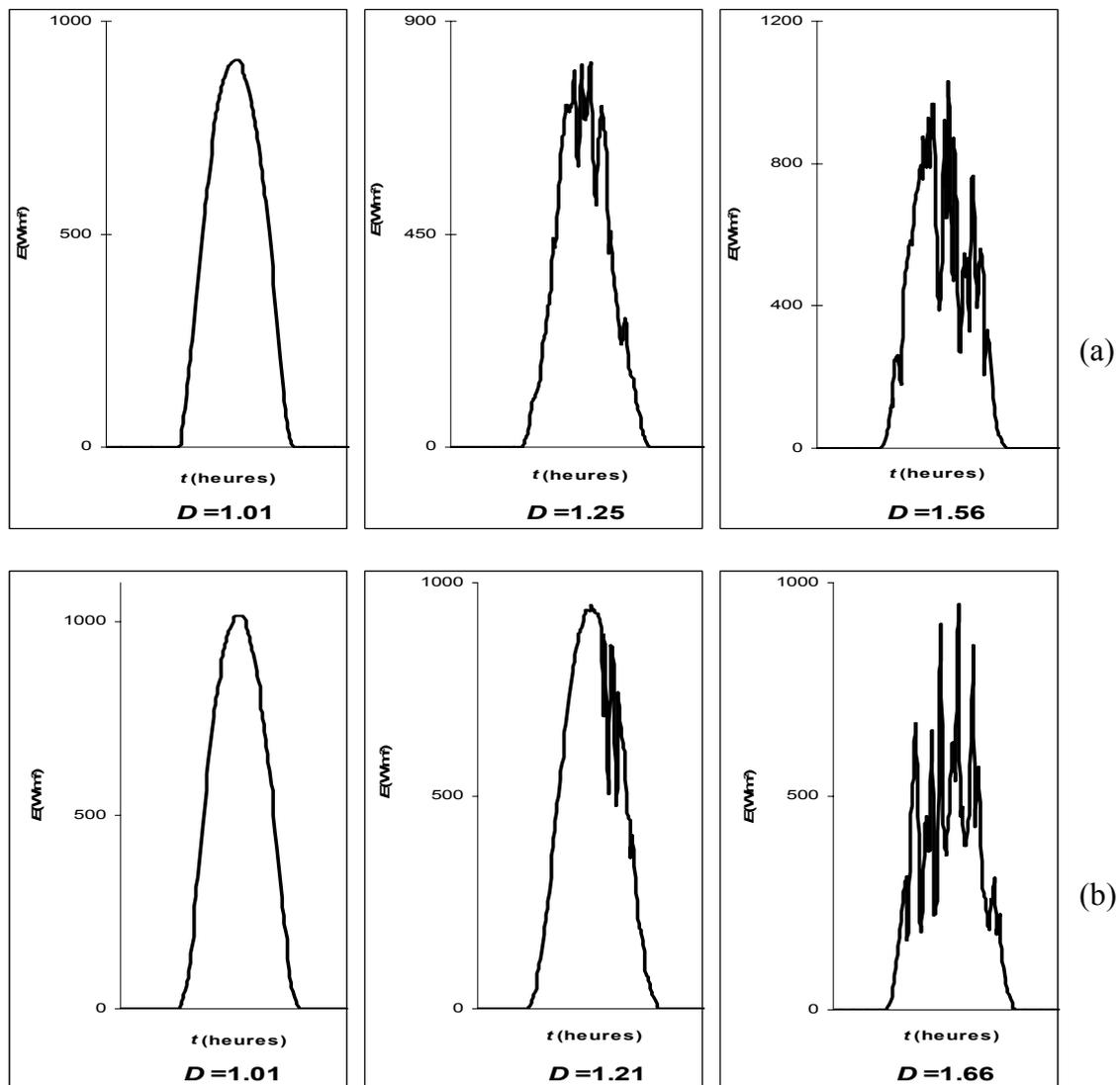


Fig.4: Exemples de signaux d'éclairissement avec leurs dimensions fractales
(a) pour Tahifet et (b) pour Imehrou

En adoptant cette valeur pour $\Delta\tau_{max}$, nous avons estimé les dimensions fractales pour l'ensemble des signaux d'éclairissement étudiés. Une partie des résultats obtenus est illustrée par la figure 4 qui représente des éclairissements solaires de différents aspects avec leurs dimensions

fractales pour les deux sites étudiés. La figure 4 montre qu'il y a concordance entre l'allure des signaux et la dimension fractale estimée qui leur correspond.

5. TRAITEMENT FRACTAL DES ECLAIREMENTS

Les éclairnements journaliers de Tahifet et d'Imehrou ont été traités afin d'estimer leurs dimensions fractales. L'algorithme utilisé à cet effet est celui de la figure 3 dans lequel $\Delta\tau_{max}$ a été fixé à 15 et N à 60. Les résultats obtenus sont regroupés dans la figure 5.

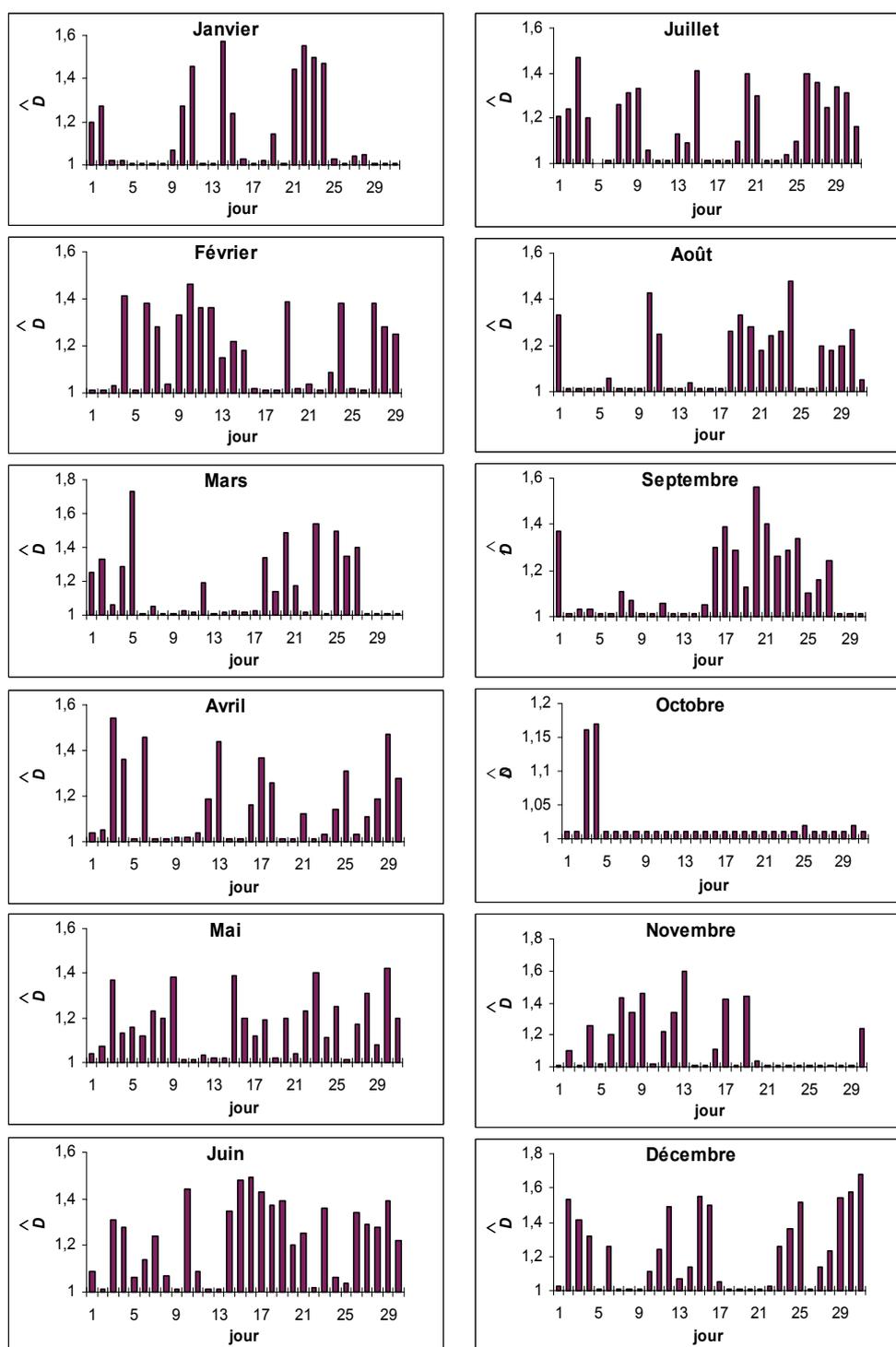


Fig. 5-a: Dimensions fractales d'éclairissements journaliers à Tahifet

La dimension fractale estimée \hat{D} varie de 1 à 1.73 traduisant ainsi l'existence d'éclairements journaliers réguliers et fluctuants. Une analyse statistique sommaire de \hat{D} permet d'observer son évolution moyenne au cours de l'année et de comparer les deux sites.

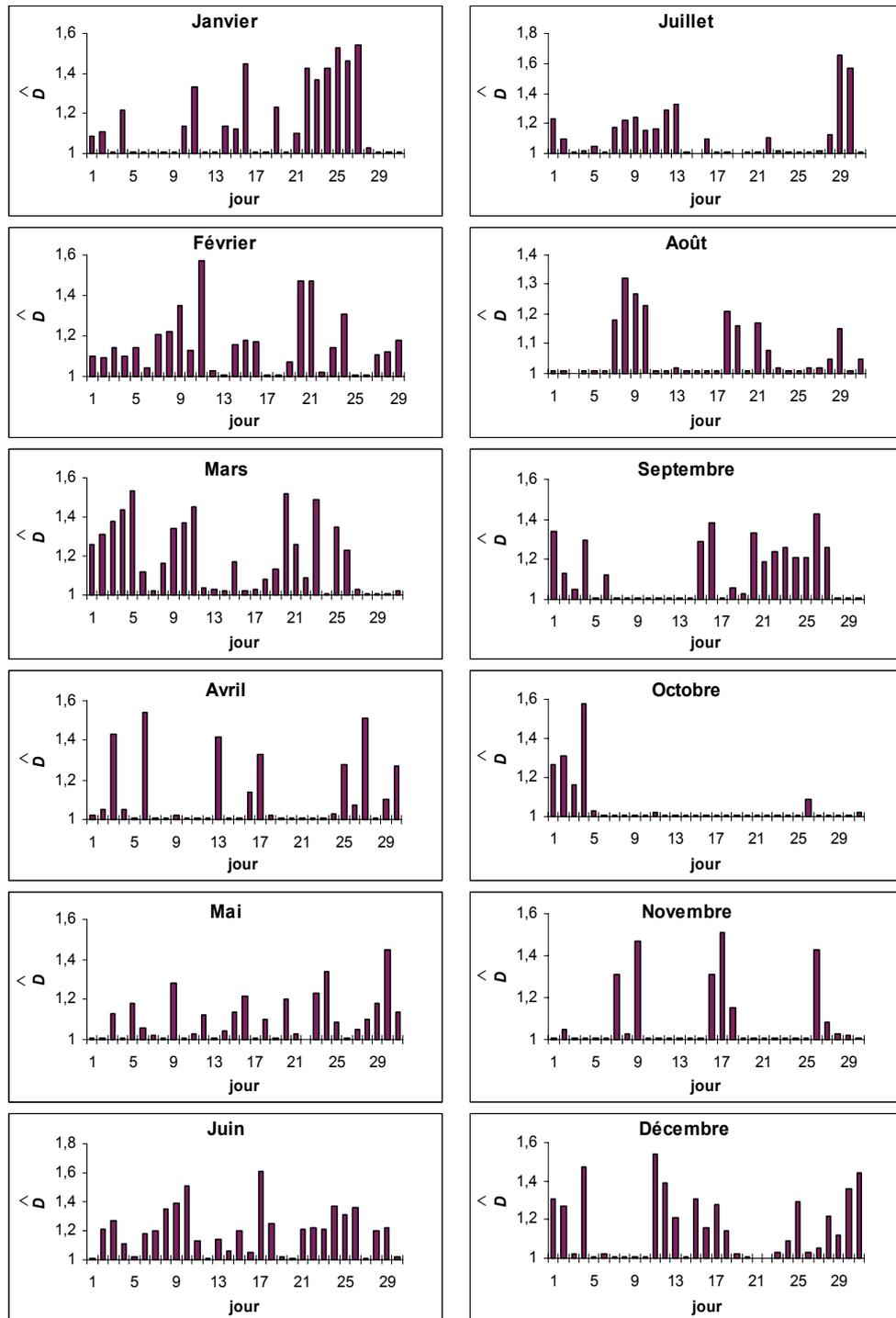
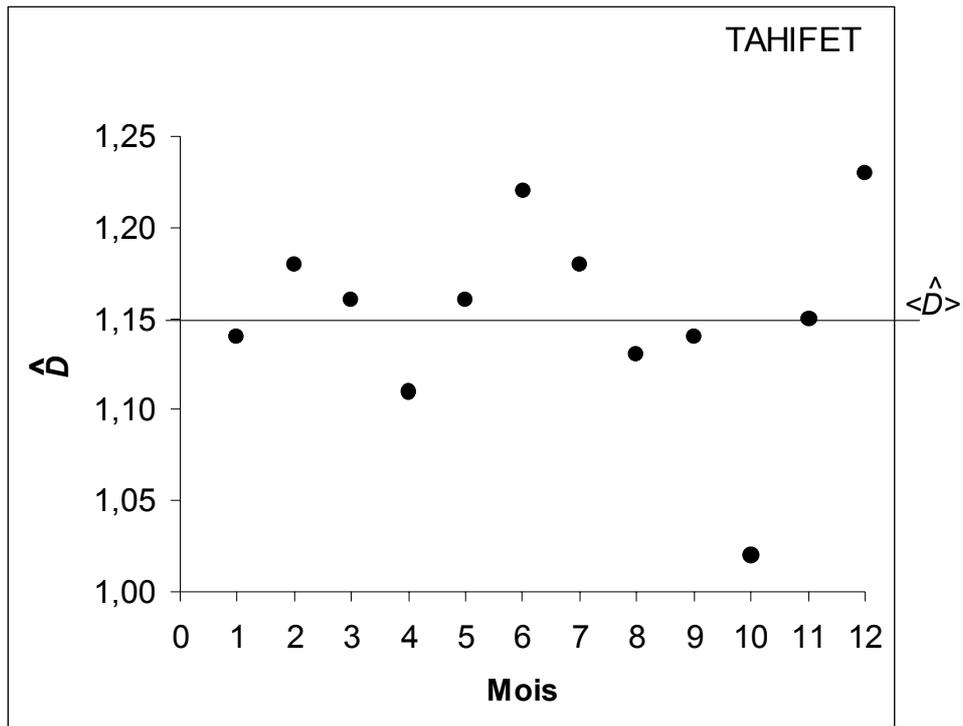
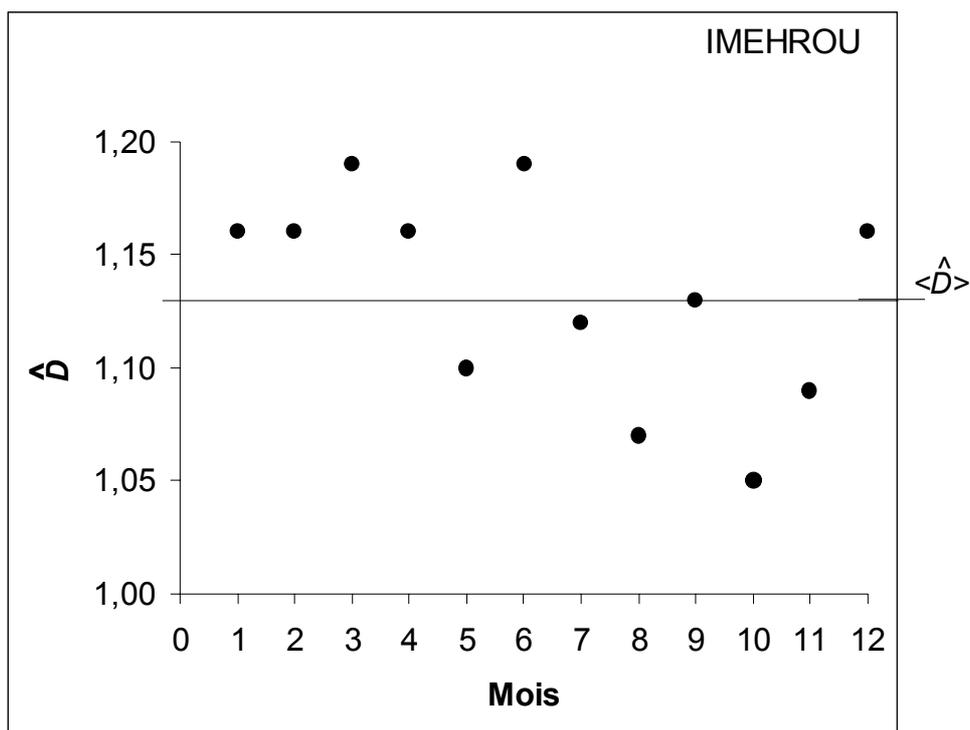


Fig. 5-b: Dimensions fractales d'éclairement journaliers à Imehrou

En effet, la figure 6 donne l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle de \hat{D} pour les deux sites. En utilisant la moyenne journalière de \hat{D} établie sur toute l'année, il est possible de dire que les éclairements solaires d'Imehrou et de Tahifet subissent les mêmes fluctuations.



(a)



(b)

Fig. 6: Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de la dimension fractale estimée \hat{D} . (a)Tahifet et (b) Imehrou

Cependant, l'analyse de \hat{D} mois par mois permet de conclure que l'éclairement à Imehrou est plus fluctuant que celui de Tahifet. Cette analyse permet également de détecter les mois où les fluctuations de l'éclairement sont les plus intenses -Juin et Décembre pour Tahifet et Mars

et Juin pour Imehrou- et ceux où ces éclairagements sont très réguliers -Octobre pour les deux sites-. Ces informations combinées aux moyennes mensuelles de K_T permettent d'affiner le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. En effet, les anomalies dans le fonctionnement des systèmes photovoltaïques installés dans ces sites apparaissent au cours de ces mois [13].

Il y a excès d'énergie en Octobre et le stockage est sollicité beaucoup plus en Juin et Décembre pour Tahifet [13].

La dimension fractale quantifie les fluctuations des éclairagements globaux journaliers. Ces fluctuations sont étroitement liées aux conditions atmosphériques et par conséquent à l'état du ciel. Une dimension fractale voisine de l'unité caractérise un ciel clair sans nébulosité. Par contre, une dimension \hat{D} voisine de 1.73 traduit un ciel perturbé certainement avec des passages nuageux. D'où l'idée d'exploiter cette dimension fractale pour réaliser une classification des éclairagements qui traduit l'état du ciel.

6. CLASSIFICATION DES ECLAIREMENTS

La dimension fractale estimée \hat{D} est un critère de base pour réaliser la classification des éclairagements et aboutir à des types de journées, c'est à dire, journée à ciel clair, journée à ciel couvert, journée à passage nuageux, etc.

Cependant, nos investigations ont montré les limites de ce critère puisque nous avons pu détecter des journées à ciel couvert et des journées à ciel clair ayant la même dimension fractale. Ceci n'est pas en contradiction avec les résultats obtenus. Rappelons à cet effet, que \hat{D} mesure le degré de fluctuations des éclairagements et non la quantité d'énergie produite par ces derniers. Aussi, afin de mettre au point notre méthode de classification nous avons associé à \hat{D} , l'indice de clarté K_T défini par le rapport entre l'irradiation journalière et sa valeur maximale enregistrée au cours de l'année 1992. Ensuite, nous avons établi l'algorithme de classification suivant qui se base sur des seuils de \hat{D} et de K_T :

$$\begin{array}{ll}
 \text{Classe 1} & 1 < \hat{D} \leq \hat{D}_1 \quad \text{et} \quad K_T \geq 0.5 \\
 \text{Classe 2} & \hat{D}_1 < \hat{D} \leq \hat{D}_2 \quad \text{et} \quad K_T \geq 0.5 \\
 \text{Classe 3} & \left\{ \begin{array}{l} \hat{D} > \hat{D}_2 \\ \text{ou} \\ \hat{D} \leq \hat{D}_2 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad K_T < 0.5
 \end{array} \tag{7}$$

\hat{D}_1 et \hat{D}_2 sont les seuils de \hat{D} des différentes classes.

Ainsi, les seuils de \hat{D} sont de nouveaux paramètres à déterminer pour réaliser la classification des éclairagements.

A cet effet, nous avons utilisé une méthode empirique et une autre statistique. L'approche empirique consiste à construire pour chaque jour de l'année l'histogramme des éclairagements reçus chaque 10 minutes. L'examen minutieux de l'ensemble des histogrammes obtenus permet de distinguer 3 types d'histogrammes prépondérants qui sont:

- les histogrammes en forme de L,
- les histogrammes en forme de U,
- les histogrammes en forme de J.

En identifiant les relations de classification (8) aux trois types d'histogrammes, nous avons pu déterminer les seuils de \hat{D} et de K_T correspondant aux 3 classes suivantes:

- Classe 1 / Histogramme L / Journée à ciel clair:

$$\hat{D} \leq 1.10 \text{ et } K_T \geq 0.5$$

- Classe 2 / Histogramme U / Journée faiblement perturbée:

$$1.10 < \hat{D} \leq 1.25 \text{ et } K_T \geq 0.5$$

- Classe 3 / Histogramme J / Journée perturbée:

$$\begin{cases} \hat{D} > 1.25 \\ \text{ou} \\ \hat{D} \leq 1.25 \text{ et } K_T < 0.5 \end{cases}$$

La méthode statistique consiste à choisir les seuils à partir de la fonction de distribution cumulative (FDC) des dimensions fractales. Ainsi, les deux seuils correspondent respectivement aux dimensions fractales qui donnent les valeurs suivantes à la fonction cumulative $F(x)$:

$$F(x) = \frac{Max - Min}{3} \text{ et } F(x) = \frac{2(Max - Min)}{3}$$

Max et Min sont le maximum et le minimum de $F(x)$ respectivement.

Le Tableau 1 regroupe les seuils de la dimension fractale obtenus avec les deux méthodes. Nous remarquons que les seuils empiriques et statistiques sont très proches puisque l'écart maximum observé est de 7%. Pour classer les journées de l'année des deux sites étudiés nous avons opté pour les seuils statistiques.

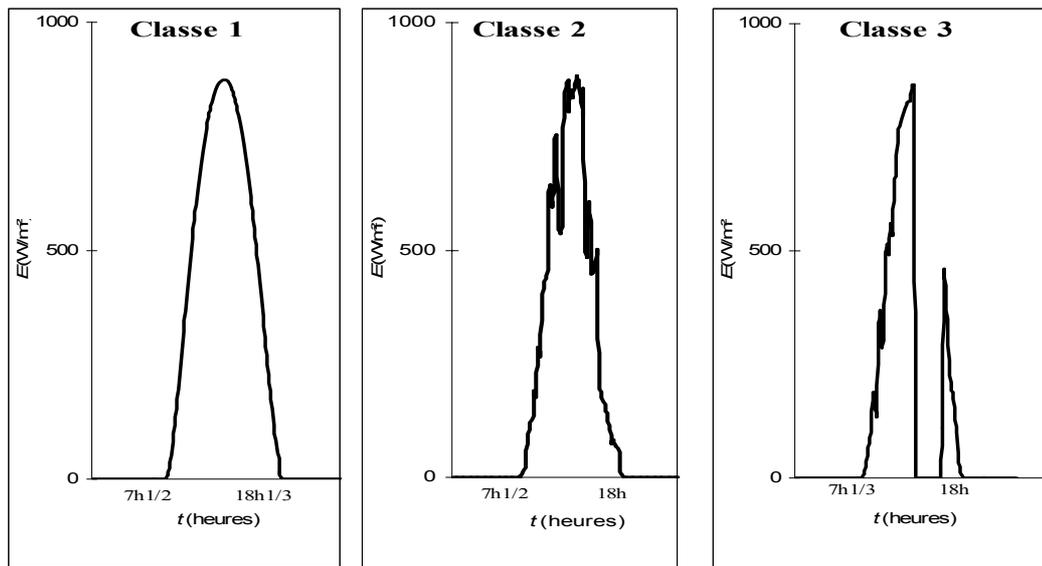
Tableau 1 : Seuils de la dimension fractale obtenus avec les 2 méthodes : la méthode de la fonction cumulative et la méthode empirique

Site	Tahifet		Imehrou	
	\hat{D}_1	\hat{D}_2	\hat{D}_1	\hat{D}_2
Seuil de \hat{D}				
Méthode de FDC	1.13	1.32	1.12	1.28
Méthode empirique	1.10	1.25	1.10	1.25

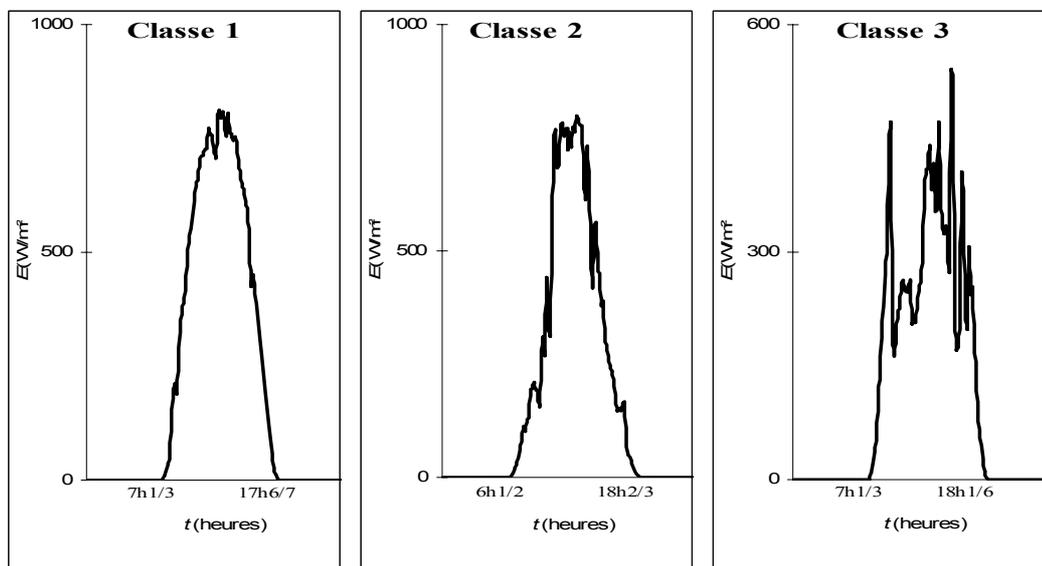
Dans la figure 7, nous avons représenté des exemples de journées appartenant à chaque classe obtenue et ceci pour les deux sites. Le Tableau 2 donne la répartition des classes pour l'année. Ainsi, la classe 1 est prépondérante pour les deux sites étudiés. La classe 2 est la même pour les deux sites alors que la classe 3 est plus importante pour Tahifet. Ceci traduit la pré-éminence des journées à ciel clair dans les deux sites. Les journées faiblement et fortement perturbées ont la même fréquence à Tahifet mais elles ont des fréquences de se produire légèrement différentes pour Imehrou. Nous remarquons que ces résultats ne sont pas en bon accord avec ceux déduits à partir de l'analyse statistique de \hat{D} (paragraphe 5), puisque l'éclairement à Tahifet se présente comme étant le plus perturbé 43% de journées partiellement ou totalement couvertes contre 37% pour Imehrou. Ceci est dû à l'introduction de l'indice de clarté comme un deuxième critère de classification.

Tableau 2: Pourcentages des journées constituant chaque classe

Site	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Tahifet	57%	20%	23%
Imehrou	63%	19%	18%



(a)



(b)

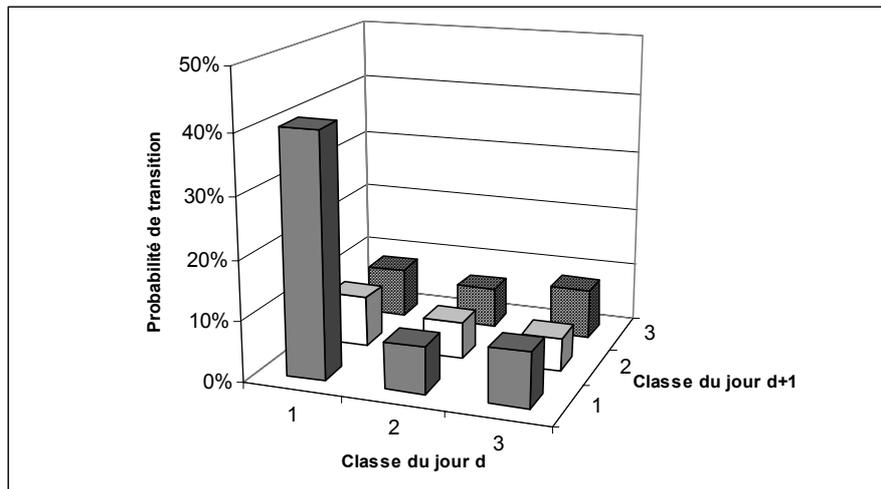
Fig. 7: Exemples de journées appartenant aux trois classes obtenues
 a) Tahifet- b) Imehrou

D'autre part et afin de valider la classification établie, nous avons calculé pour chaque classe la moyenne $\langle \hat{D} \rangle$ et l'écart type σ de la dimension fractale, ces paramètres sont résumés par le Tableau 3.

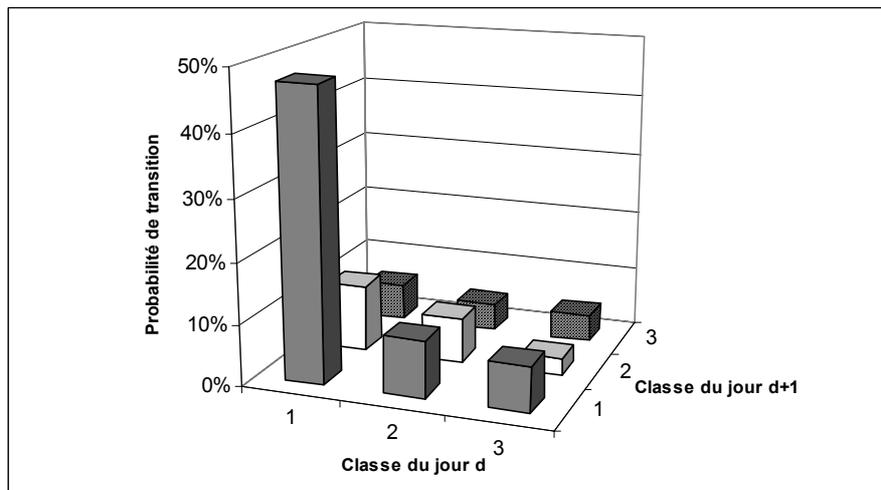
Ces propriétés statistiques montrent que la méthode de classification présentée a permis d'aboutir à des groupements homogènes des journées étudiées vue que l'écart type de \hat{D} est de 3% pour les classes 1 et 2. La valeur un peu plus importante de cet écart type pour la classe 3 (10%) est due au fait que cette classe contient des journées pluvieuses dont le signal d'éclairment a une forme régulière donc une dimension fractale proche de 1 comme déjà expliqué.

Tableau 3: Paramètres statistiques de la dimension fractale des différentes classes

Site	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
TAHIFET	$\langle \hat{D} \rangle$	σ	$\langle \hat{D} \rangle$	σ	$\langle \hat{D} \rangle$	σ
	1.03	0.03	1.23	0.05	1.42	0.10
IMEHROU	$\langle \hat{D} \rangle$	σ	$\langle \hat{D} \rangle$	σ	$\langle \hat{D} \rangle$	σ
	1.03	0.03	1.19	0.05	1.41	1.10



(a)



(b)

Fig. 8: Probabilité de transition entre les journées d et $d+1$
a) Tahifet- b) Imehrou

Ces résultats ont été confirmés par la probabilité de transition entre les journées d et $d+1$. En effet, dans la figure 8 nous avons représenté pour Tahifet et Imehrou la transition de probabilité appelée aussi la probabilité conditionnelle i/j de la classe j au jour $d+1$ quand au jour d la classe était i . Nous remarquons que l'effet de persistance est dominant puisque la somme des probabilités de transition des classes $1/1$, $2/2$ et $3/3$ est majoritaire.

7. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons montré qu'il est possible de réaliser une classification intéressante des éclairagements solaires à l'aide de l'analyse fractale. Cependant, la méthode adoptée dans ce travail est basée sur un savoir-faire expérimental qui a été mis en évidence lors de la détermination de $\Delta\tau_{max}$. Une approche plus rigoureuse basée sur les techniques d'optimisation pourrait être utilisée.

D'autre part, la méthode de classification proposée dans cet article ne peut être utilisée qu'avec des données d'éclairément solaire mesurées à un pas de temps fin nécessaires pour la détermination de la dimension fractale de ces signaux.

Dans la classification réalisée, le paramètre K_T permet de distinguer deux classes uniquement et c'est grâce à \hat{D} qu'une 3^{ème} classe a été définie. Aussi, la complémentarité entre \hat{D} et K_T est très importante. En effet, à titre d'exemple, la figure 9 représente l'évolution de l'éclairément journalier d'une journée pluvieuse. La dimension fractale estimée \hat{D} vaut 1.23 et l'indice de clarté K_T est égal à 0.4 pour cette journée.

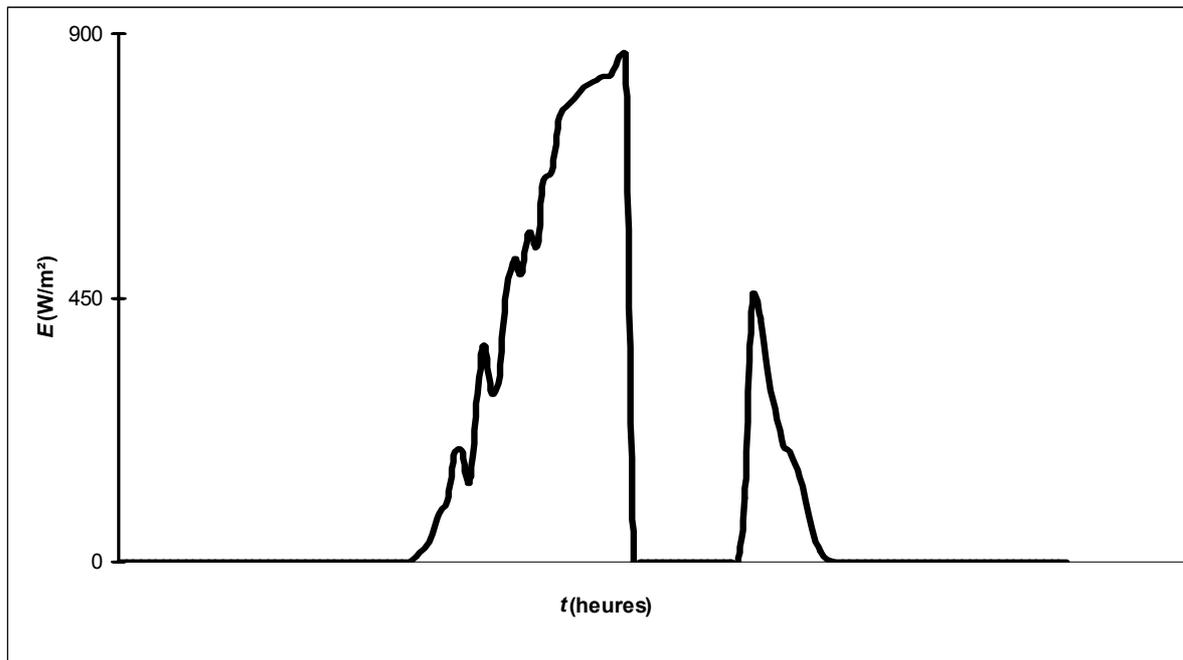


Fig. 9: Exemple de journée pluvieuse avec une allure assez régulière

En utilisant uniquement \hat{D} , l'éclairément de cette journée appartiendra à la classe 2. A l'aide de K_T , il serait classé dans la classe 3. Ce n'est qu'en utilisant les 2 paramètres que l'on arrive à affiner le classement. La validation de la méthode de classification a été réalisée en confrontant, chaque jour, le résultat de la classification et l'observation. Une bonne concordance a été obtenue. Cependant, la classification développée dans ce travail a été appliquée à des sites caractérisés par des climats qui ne sont pas très perturbés. Il serait

intéressant de tester cette méthode dans des sites proches de la méditerranée caractérisés par de fortes perturbations climatiques. Ce travail a mis les bases théoriques à une classification des éclairments à l'aide de l'analyse fractale mais, il mérite d'être approfondi compte tenu des résultats intéressants qu'il a permis d'obtenir.

NOMENCLATURE

E	Eclairment solaire global (W/m^2)
$\Delta\tau$	largeur des rectangles utilisés pour le recouvrement du signal (mn)
$S(\Delta\tau)$	surface du signal recouvert par des rectangles de largeur $\Delta\tau$ ($W/m^2 \cdot mn$)
N	taille du signal d'éclairment
D	Dimension fractale théorique
$\lambda(S)$	facteur de similitude
$\Delta\tau_{max}$	Largeur maximale des rectangles utilisés pour le recouvrement du signal (mn)
\hat{D}	Dimension fractale estimée
K_T	Indice de clarté

REFERENCES

- [1] B. J. Brinkworth, "Autocorrelation and stochastic modelling of insolation sequences", Solar Energy, Vol.19, p.343, 1977
- [2] B. Bartoli, B. Coluzzi, V. Cuomo, M. Francesca and S. Serio, " Autocorrelation of daily global solar radiation ", Il Nuovo Cimento, Vol.4C, p.113, 1981
- [3] R. Lestienne, Ph. Bois et Ch. Obled, " Analyse temporelle et cartographie de la matrice stochastique pour le modèle Markovien dans le midi de la France ", La Météorologie, Vol.17, p.83, 1979
- [4] R. J. Aguiar, M. Collores-Pereira and J. P. Conde, " Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition Matrices ", Solar Energy, Vol.40, p.269, 1988
- [5] A. Maafi, " Mise en évidence d'aspects physiques du modèle Markovien du premier ordre à deux états en météorologie solaire : Application à la conversion photovoltaïque ", Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, 1991
- [6] A. Maafi, " Markov-Models in discrete time for solar radiation ", IMACS-IEEE, Proc.Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Nabeul-Hammamet (Tunisia), Vol.2, p.319, April 1-4, 1998
- [7] Guessoum, S. Boubekeur and A. Maafi, " A global irradiation model using radial basis function neural networks ", In Renewable Energy, Energy, Efficiency, Policy and the Environment, edited by A.A.M. Sayigh, published by Elsevier Sciences Ltd., Oxford (UK), Proc.5th WREC, Florence (Italy), Part IV, p.2533, September 20-25, 1998
- [8] A. Sfetsos and A. H. Coonick, " Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques ", Solar Energy, Vol.68, p.169, 2000
- [9] A. Louche, G. Notton, P. Poggi et G. Simonnot, " Classification of direct irradiation days in view of energetic applications ", Solar Energy, Vol.46, p.255, 1991.
- [10] A. Maafi and S. Harrouni, " Measuring the fractal dimension of solar irradiance in view of PV systems performance analysis ", Proc.6th WREC, Brighton (UK), Part IV, p.2032, 1-7 July, 2000

- [11] S. Harrouni, " *Traitement de signaux_hélio-électriques résultant du monitoring des systèmes photovoltaïques* ", Thèse de Magister en Electronique, option Rayonnement Atmosphérique, USTHB, Janvier 2000.
- [12] S. Barbaro, G. Cannata, S. Coppolino, C. Leone and Sinagra, " *Correlation between relative sunshine and state of the sky* ", Solar Energy, Vol.26, p.537, 1981
- [13] M. Bida and J. F. Kreider, " *The suitability of the two and three state models for representing actual distributions in the prediction of stand-alone photovoltaics systems performance* ", Proc.of the A.S.E.S Annual Meeting, p.157, Portland (OR), 1987
- [14] M. Hussein and D. Siddique, " *On Correlating the relative sunshine duration with the state of the sky* ", Solar and Wind Technology, Vol.7, p.237, 1981
- [15] A. Maafi, " *Tilted surfaces iso-radiation maps for Algeria* ", In Renewable Energy, Climatic Change, Energy and the Environment, Edited by A.A.M.Sayigh published by Elsevier Sciences Ltd., Oxford (UK), Proc 3th WREC, Reading (UK), Part III, p.2339, September 11-16, 1994,
- [16] P. Maragos and F. K. Sun, " *Measuring the fractal dimension of signals: morphological covers and iterative optimization* ", IEEE Transaction on Signal Processing, Vol.41, p.108, 1993
- [17] Jens Feder, " Fractals ", Plenum Press – New York, 1988