Télédétection, 2006, vol. 5, n°4, p. 299-306
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

ANALYSE DE LA DIMENSION FRACTALE DES ÉCHOS RADAR EN ALGÉRIE, FRANCE ET SÉNÉGAL

Boualem HADDAD[1]*, Leila SADOUKI[1], Henri SAUVAGEOT[2] et Abd El Hamid ADANE[1]

[1] *Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène (U.S.T.H.B.),*
Faculté d'Électronique et d'Informatique,
B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie.
Téléphone : 00 213 21 24 79 52, poste 830 ; courriel : h_boualem@hotmail.com

[2] *Université Paul Sabatier, Observatoire Midi Pyrénées, Laboratoire d'Aérologie,*
14 avenue Édouard Belin, 31400 Toulouse, France.
Téléphone : 00 33 5 62 40 61 02 ; courriel:sauh@aero.obs-mip.fr

(Soumis le 30 mai 2005 ; révisé le 10 novembre 2005 ; accepté le 22 juin 2006)

Cet article porte sur l'analyse de la dimension fractale des échos radar, à savoir les échos de précipitations et les échos du sol. Des images collectées dans les régions de Sétif (Algérie), Bordeaux (France) et Dakar (Sénégal) ont été considérées. En outre, des données radar prises au cours des inondations d'Alger du 9 et 10 novembre 2001 et qui ont été à l'origine d'une catastrophe naturelle ont été analysées. Pour ce faire, les approches Aire/Périmètre et Box counting ont été appliquées pour quantifier l'irrégularité et la fragmentation des contours des échos de précipitations et des échos du sol. La distribution des tailles des cellules ont été aussi étudiées en considérant le coefficient de Korcak. Le présent travail montre que la dimension fractale des échos de précipitations, qui vaut 1,38 ± 0,05 pour Sétif, 1,36 ± 0,03 pour Bordeaux et 1,35 ± 0,04 pour Dakar est invariante dans le temps et dans l'espace, quel que soit l'événement, le type de climat et de précipitations. Nous pouvons alors considérer ce paramètre comme universel. L'analyse du coefficient de Korcak qui est égal respectivement pour les précipitations et les échos du sol à 0,90 ± 0,11 et 1,57 ± 0,11 pour Sétif, 1,22 ± 0,07 et 1,67 ± 0,09 pour Bordeaux et 1,31 ± 0,05 et 065 ± 0,08 pour Dakar montre que ce paramètre prend des valeurs différentes pour les deux types d'échos considérés. Il peut être alors utilisé pour l'identification des échos du sol. Par contre, la dimension fractale ne peut pas servir comme facteur discriminant entre les deux types d'échos pour les trois sites considérés. En outre, pour des seuils de facteurs de réflectivités supérieurs à 40 dBZ, on obtient d'autres dimensions fractales plus faibles, donnant ainsi un caractère multifractal aux précipitations.

Mots clés : *dimension fractale ; méthode aire/périmètre ; méthode de box-counting ; coefficient de Korcak ; échos de précipitations ; échos du sol.*

STRUCTURE ANALYSIS OF RADAR ECHOES FOR THE SÉTIF (ALGERIA), BORDEAUX (FRANCE) AND DAKAR (SENEGAL) REGIONS

This paper deals with the analysis of the fractal dimension of radar echoes, namely precipitation and ground echoes. Radar images collected in the Sétif (Algeria), Bordeaux (France) and Dakar (Senegal) regions were considered. Moreover, radar data acquired during the floods recorded in Algiers on November 9 and 10, 2001, which was at the origin of a natural disaster, were also analysed. The perimeter/area and box counting approaches are applied to quantify the irregularity and fragmentation of precipitation and ground echo contours. The distribution of the cell sizes were also studied using the Korcak parameter. The present paper shows that the precipitation echo fractal dimension is equal to 1.38 ± 0.05 for Sétif, 1.36 ± 0.03 for Bordeaux and 1.35 ± 0.04 for Dakar respectively, and that is invariant in time and space, whatever the event, climate and precipitation type. Therefore, this parameter can be considered as universal. The analysis of the Korcak parameter for precipitation and ground echoes, which is equal to 0.90 ± 0.11 and 1.57 ± 0.11 for Sétif, 1.22 ± 0.07 and 1.67 ± 0.09 for Bordeaux and 1.31 ± 0.05 and 0.65 ± 0.08 for Dakar shows that this parameter takes different values for the two types of echoes considered. The Korcak parameter can hence be used in the identification of ground echoes. On the other hand, the fractal dimension cannot be used as a discriminating factor between the two types of echoes for the three sites under study. Moreover, for the reflectivity factor thresholds higher than 40 dBZ, we obtain other weaker fractal dimensions, thus giving a multifractal character to the precipitation.

Keywords : *fractal dimension ; perimeter/area method ; box-counting method ; Korcak parameter ; precipitation echoes ; ground echoes.*

1. INTRODUCTION

De nos jours, le radar météorologique est l'outil le plus utilisé à travers le monde pour l'estimation des précipitations. En effet, il a l'avantage unique d'assurer une couverture continue dans l'espace et dans le temps des zones de précipitations. Le radar météorologique reçoit des signaux provenant de cibles diverses se trouvant à l'intérieur de son faisceau. On observe alors des échos provenant des précipitations qui sont souvent mélangés à des échos parasites causés par la surface terrestre. Ces derniers réduisent considérablement les performances du radar en induisant des erreurs dans l'estimation des précipitations et dans l'identification des nuages. Il est alors impératif de bien caractériser les échos du sol en vue de les éliminer.

Lors de cette dernière décennie, les modèles hydrologiques les plus performants, obtenus à partir de la paramétrisation des champs de précipitations, sont ceux qui associent les variations spatio-temporelles des précipitations. Des études ont montré que la structure des précipitations possède divers types d'organisation et dépend des processus atmosphériques responsables du développement des nuages (Aida, 1977 ; Gabella *et al.* , 2000 ; Joseph, 1985). Une des notions de discussion de la structure des précipitations est la notion « fractale ». Rappelons qu'une fractale est en général une forme non régulière qui apparaît inchangée quand on l'examine à différentes résolutions ou échelles. Ce terme a été utilisé la première fois par Mandelbrot (1974) pour décrire le chaos qui règne dans les phénomènes naturels.

Une discussion intéressante concerne l'universalité de la dimension fractale. Divers régimes climatologiques présentent des types de nuages ayant des caractéristiques spatiales et temporelles différentes. Il semblerait alors naturel de s'attendre à ce que des structures si distinctes présentent des caractéristiques fractales différentes.

Actuellement, l'approche fractale est employée dans plusieurs disciplines, notamment en hydrologie et dans les sciences de l'atmosphère. Par exemple, Kuo *et al.* (1993) ont utilisé cette technique pour caractériser les nuages Cirrus observés à partir d'images satelittales. Cahalan et Joseph (1989) ont appliqué le même concept pour analyser les nuages de la couche limite subtropicale. Gotoh et Fujii (1998) ont employé la dimension fractale pour étudier l'influence du vent sur les propriétés microphysiques des nuages Cumulus. Très récemment, Féral et Sauvageot (2002) ont identifié les supercellules des nuages convectifs sévères en montrant que leur dimension fractale est nettement inférieure à celle des cellules ordinaires.

Le degré de fragmentation des objets est aussi un paramètre intéressant dans l'étude de l'organisation ou de la structure d'un échantillon donné. Ainsi, la loi empirique de Korcak s'avère une technique adéquate pour décrire la distribution des tailles des cellules ou d'objets dans la nature. Par exemple, Korvin (1992) a montré que la fragmentation de la roche peut être représentée par la théorie de Korcak. Hyslip et Vallejo (1997) ont étudié la distribution des tailles de grains de sable et ont conclu qu'elle suit la même théorie. Lawford (1996) a utilisé les variations du paramètre de Korcak pour examiner les changements significatifs observés dans les champs de précipitations.

Dans cet article, une série d'images enregistrées dans trois sites radar différents a été utilisée en vue de l'analyse de la dimension fractale et du paramètre de Korcak des échos de précipitations et des échos du sol Il s'agit d'images collectées lors des inondations d'Alger du 9 et 10 novembre 2001 et au cours du mois de janvier 2001 par le radar de Sétif, d'images prises par le radar de Bordeaux durant l'année 1996 et d'images enregistrées par le radar de Dakar au cours de la période s'étalant entre les mois de juin et septembre de l'année 1997. Pour ce faire, deux techniques de calcul de la dimension fractale ont été appliquées aux images radar. Il s'agit des approches aire/périmètre et box-counting. Les questions auxquelles nous essaierons de répondre dans cet article sont les suivantes : la dimension fractale est-elle identique pour les trois régions où prévalent des climats différents et comment se comporte-t-elle au cours d'un événement exceptionnel ? Peut-elle être utilisée comme critère discriminant entre les échos de précipitations et les échos du sol ? Comment varie le coefficient de Korcak des échos radar pour ces trois régions ? Les précipitations ont elles un caractère monofractal ou multifractal ?

2. CONCEPTS DE BASE

D'après Mandelbrot (1983), une des caractéristiques principales de tout objet est sa dimension fractale. Elle correspond à un nombre qui quantifie le degré d'irrégularité et de fragmentation d'un ensemble géométrique ou d'un objet naturel, et qui se réduit, dans le cas des objets de la géométrie usuelle d'Euclide, à leurs dimensions usuelles.

2.1. La dimension fractale

La dimension fractale des nuages et des précipitations a été analysée par plusieurs auteurs à tra-

vers l'approche aire/périmètre (PtA) (Lovejoy, 1982 ; Rhys and Waldvogel, 1986 ; Kuo et *al.*, 1993 ; Cahalan and Joseph, 1989 ; Lawford, 1996 ; Benner and Curry, 1998 et d'autres auteurs). L'approche aire/périmètre utilise la relation (Mandelbrot, 1983) :

$$P = C \bullet S^{D/2} \qquad 1$$

où P et S désignent respectivement le périmètre et l'aire de l'écho. C'est une constante et D représente la dimension fractale (valeur supérieure ou égale à 1).

La valeur de D caractérise l'irrégularité du contour de l'écho. Théoriquement, elle vaut 1 pour des contours lisses et réguliers tels que le rectangle ou le cercle. La dimension fractale des nuages peut dépasser dans certains cas la valeur 2.

Pour appliquer l'approche aire/périmètre, nous avons d'abord segmenté et ensuite codifié les différentes régions de précipitations contenues dans l'image. Puis, nous avons comptabilisé, pour chaque zone codifiée, le nombre de pixels recouvrant sa surface (S) et le nombre de pixels qui constitue son périmètre (P).

Les propriétés des nuages et des précipitations peuvent être illustrées en utilisant la dimension des boîtes. Cette technique considère le nombre N(N) de boîtes de taille NxN nécessaires pour couvrir complètement le contour ou la surface. Ce nombre varie comme une fonction de N sous la forme $N(N) \sim N^{-D}$ (Schertzer and Lovejoy, 1997).

La méthode des boîtes ou box-counting consiste d'abord en la génération de l'image contour. Puis, nous avons décomposé l'image obtenue en des boîtes de taille [N x N]. Cette opération est répétée pour différentes valeurs de N (N = 2, 4, 8,…, 512). Le nombre de boîtes N_P varie en fonction de N selon la loi $N_P(N) = C' \bullet N^{-D_P}$ où D_P désigne la dimension box-counting périmètre.

La même procédure est utilisée pour déterminer le nombre de boîtes nécessaires pour remplir la surface N_s qui varie selon la loi $N_s(N) = C' \bullet N^{-D_s}$

La dimension fractale aire/périmètre vaut alors (Lovejoy and Schertzer, 1990)

$$D_B = \frac{2D_p}{D_s} \qquad 2$$

2.2. Le coefficient de Korcak

Korcak (1938) a étudié la distribution des îles et a établi une relation empirique du type $N(A) \sim a^{-b}$ où N(A) est le nombre d'îles ayant une taille A supérieure à une valeur donnée a, et b, une constante égale à 0,5 (Hyslip and Vallejo, 1997). Mandelbrot a ensuite repris le travail de Korcak et a montré que le paramètre b varie et qu'il est supérieur à la valeur 0,5. La distribution de la taille des îles a été alors présentée sous forme d'une loi en puissance (Mandelbrot, 1983) :

$$F(S) = C \bullet S^{-K/2} \qquad 3$$

où F(S) désigne la fréquence d'occurrence d'objets dont la surface est supérieure ou égale à un seuil S, C est une constante et K est le paramètre de Korcak. Le coefficient de Korcak ne décrit pas l'irrégularité de l'objet, mais nous renseigne sur la distribution des cellules. D'après Lawford (1996), lorsque la valeur de K est petite, c'est à dire comprise entre 0,5 et 0,8, il y a généralement un très large écho et quelques petites cellules. Par contre, lorsque les tailles de cellules sont du même ordre de grandeur et que le nombre est élevé, les valeurs de K sont alors fortes et varient entre 1,3 et 2.

3. BANQUE DE DONNÉES ET TECHNIQUE D'ANALYSE

Notre banque de données est composée de 10 052 images prises à Bordeaux, de 5 799 images collectées à Sétif et de 1 024 images enregistrées à Dakar. Les spécifications techniques de ces trois radars sont indiquées dans le tableau 1. Toutes les images sont enregistrées suivant le mode P.P.I. (Plan Position Indicator). Elles sont représentées selon le format 512 x 512 pixels avec une résolution de 1 km par pixel. Le nombre de niveaux de gris codant chaque pixel de ces images est de 52 pour Bordeaux, 16 pour Sétif et 256 pour Dakar.

TABLEAU 1. Caractéristiques techniques des radars. *Radar technical characteristics*

Site radar	Bordeaux-Merignac	Dakar-Yoff	Sétif
Longueur d'onde (cm)	10	5,3	5,5
Puissance crête (kW)	500	250	250
Fréquence de répétition (Hz)	300	250	250
Durée de l'impulsion (µs)	2	3	4
Ouverture du faisceau (3 dB) (°)	1,8	1,3	1,1

Le radar de Bordeaux est situé au niveau de l'aéroport de Bordeaux Mérignac. Il est installé sur une tour à 70 m d'altitude et constitue un élément du réseau radar français opérationnel géré par Météo-France. Ses coordonnées géographiques sont 44 ° 52 ' N et 0 ° 30 ' O. La région de Bordeaux est plutôt plane. À l'intérieur d'un rayon de 150 km autour du radar, l'altitude est en dessous de 200 m, à l'exception de la zone nord-est, où l'on rencontre le premier contrefort du Massif Central situé à une distance du radar légèrement supérieure à 130 km et culminant à 400 m. Plus loin, au sud, à une distance de 200 km du radar, se présentent les Pyrénées qui s'élèvent à 3 000 m d'altitude. Les images radar sont en grande partie contaminées par les échos fixes causés par la zone industrielle de Bordeaux. Le climat de la région de Bordeaux est océanique et les conditions climatiques sont généralement homogènes. La plupart des phénomènes pluvieux observés dans cette région sont des perturbations cycloniques frontales régionales. L'intensité moyenne annuelle des précipitations est d'environ 800 mm. Les images sont collectées toutes les cinq minutes.

Le radar installé près de la ville de Sétif, à 36 ° 11 ' N, 5 ° 25 ' E et 1 700 m d'altitude, est l'un des sept radars du réseau météorologique algérien. La région de Sétif fait partie des hauts plateaux de l'Algérie. Plusieurs obstacles terrestres existent autour du radar et les échos du sol les plus proches sont produits par la zone industrielle de la ville de Sétif. Au-delà de l'horizon, les obstacles terrestres produisent plusieurs échos parasites. Par exemple, au sud-ouest, à 60 km du radar, on trouve les montagnes du Djurdjura qui atteignent 2 300 m d'altitude. Au sud-est, à 40 km du radar, on rencontre les monts des Bibans avec 1 417 m de hauteur. Au nord-est, à une distance plus courte (environ 30 km), les monts des Babors s'élèvent à 2 004 m d'altitude. Le climat de Sétif est continental. En hiver, les perturbations atmosphériques proviennent principalement du nord-ouest. En été, on observe des masses nuageuses arrivant surtout du sud-est. L'intensité moyenne annuelle de précipitations est de 400 mm dans la région. Les images considérées dans cette étude sont celles qui sont collectées quotidiennement toutes les quinze minutes durant le mois de janvier 2001. La base de données de Sétif inclut l'épisode des inondations d'Alger. La situation météorologique particulière du 9 et 10 novembre 2001 a engendré des pluies dévastatrices sur les hauteurs de la ville d'Alger. Les mesures effectuées dans les stations météorologiques de la zone affectée montrent que les quantités de pluie enregistrées constituent des records. En effet, les relevés existant dans les archives météorologiques indiquent que de telles quantités n'ont jamais été mesurées en ce point depuis plus d'un siècle. Au poste d'observation météorologique de Bouzaréah, situé sur les hauteurs d'Alger, à 344 mètres d'altitude, on a enregistré une quantité de pluie égale à 261 mm durant une période de 18 heures (entre 18h00 le 9 novembre et 12h00 le 10 novembre). Notons que plus de la moitié de cette quantité, c'est à dire 132 mm, a été collectée sur une période de 6 heures (06h00 à 12h00). La situation météorologique du 9 et 10 novembre a été caractérisée par une infiltration d'air froid sur l'Espagne, puis sur le golfe de Gibraltar (Haddad *et al.,* 2003).

Le radar de Dakar est installé sur une tour à 300 m d'altitude au niveau de l'aéroport de Yoff, à l'est de Dakar. Ses coordonnées géographiques sont 14 ° 34 ' N et 17 ° 29 ' O. Ce radar travaille durant les périodes pluviales uniquement. Le climat de Dakar est sahélien. Les chutes de pluie ont souvent lieu durant la période s'étalant entre juillet et septembre. L'intensité moyenne des précipitations varie entre 300 mm à Saint Louis et 1 500 mm à Cap Skirring (Nzeukou and Sauvageot, 2002). Les images radar disponibles pour cette étude ont été enregistrées toutes les dix minutes durant la période juin-septembre 1997.

Les échos de précipitations considérés sont ceux dont la surface est supérieure ou égale à 64 x 64 km². Afin de ne considérer que les échos de précipitations, un prétraitement des images radar a été effectué au préalable. Celui-ci consiste à éliminer les échos du sol en utilisant l'approche texturale (Haddad *et al.*, 2004). Une banque de données d'images prises par temps clair caractérisant les échos du sol a été aussi considérée.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Nous nous sommes d'abord intéressés aux images radar collectées durant l'événement exceptionnel du 9 et 10 novembre 2001. La valeur de D est obtenue en ajustant le nuage de points décrivant le logarithme du périmètre en fonction du logarithme de la surface par une fonction linéaire (figure 1). Dans le cas de Sétif, nous obtenons une droite d'équation : $\mathrm{Ln}(P) = 0{,}69 \bullet \mathrm{Ln}(S) + 0{,}31$. En vertu de l'équation 1, la valeur 1,38 désigne la dimension fractale des échos de précipitations observés au cours de cet événement. La valeur du coefficient de corrélation exprimant la qualité de notre ajustement vaut 0,98. De même, nous avons considéré la dimension fractale de chaque écho enregistré au cours des 48 heures d'observation. On trouve qu'en moyenne, D est égal à $1{,}38 \pm 0{,}05$.

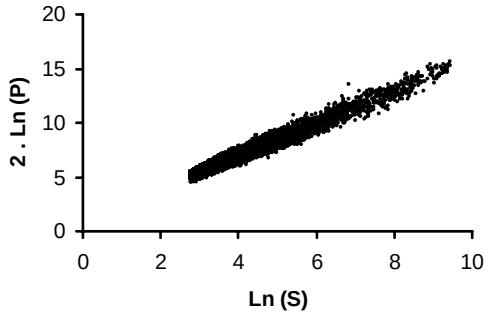


FIGURE 1. Représentation des couples de valeurs (Ln(S), 2xLn(P)) lors de l'événement extrême du 9 et 10 novembre 2001. *Representation of the value couples (Ln(S), 2xLn (P)) during the extreme event of November 9 and 10, 2001.*

Sur la figure 2, on montre les variations de D, estimées heure par heure, durant les 48 heures de la catastrophe. On constate que la dimension fractale oscille entre 1,25 et 1,50. Les valeurs de D sont les plus basses les premières heures (3-6h) et en soirée (21-24 h) pour la première journée, et la matinée (4–10h) pour la seconde journée.

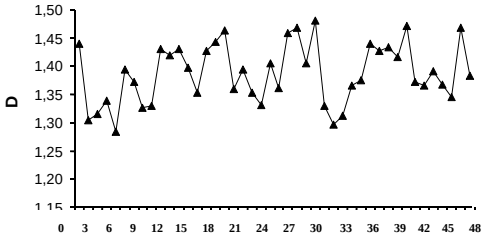


FIGURE 2. Valeurs de la dimension fractale D obtenues heure par heure lors de l'événement extrême du 9 et 10 novembre 2001. *Fractal dimension D values obtained hour by hour during the extreme event of November 9 and 10, 2001*

Sur la figure 3, on trouve la surface occupée par les échos de précipitations durant les 48 heures d'observation. Pour la journée du 9 novembre 2001, les plus fortes valeurs sont enregistrées au cours de la période s'étalant entre 13h00 et 21h00. Quant à la journée du 10 novembre, les plus larges échos sont observés entre 14h00 et 16h00. On constate que les figures 2 et 3 n'évoluent pas de la même façon. On déduit alors que la surface des échos n'influe pas sur la valeur de la dimension fractale.

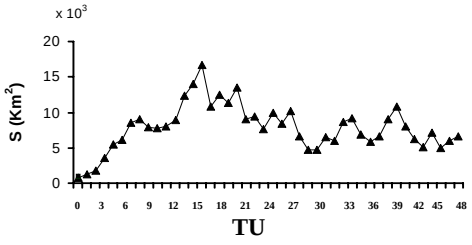


FIGURE 3. Surfaces des échos de précipitations obtenues heure par heure lors de l'événement extrême du 9 et 10 novembre 2001. *Precipitation echo areas obtained hour by hour during the extreme event of November 9 and 10, 2001*

Sur la figure 4a, on donne le logarithme du nombre de boîtes N_p nécessaires pour couvrir le contour en fonction du logarithme de l'inverse de la taille des boîtes N. L'équation du type $\text{Ln}(N_p) = 1{,}27 \bullet \text{Ln}(1/N) + 1{,}19$ décrivant l'ajustement du nuage de points est obtenue avec un coefficient de corrélation égal à 0,97. La dimension D_s est obtenue en procédant de la même manière mais cette fois-ci en comptabilisant le nombre de boîtes nécessaires pour remplir la surface ; celle-ci est égale à 1,86**.** La dimension de box-counting D_B est égale à 1,36 et elle est donc pratiquement identique à celle obtenue en appliquant l'approche aire/périmètre (PtA). Sur la figure 4b, on voit les variations de la dimension D_B durant les inondations d'Alger, qui varie comme précédemment pour D entre 1,15 et 1,50. Les valeurs de D_B tendent à augmenter de 3h00 à 19h00 le 9 novembre, puis à diminuer à partir de cette heure jusqu'à 4h00 le lendemain. À partir de cet instant, les valeurs de D_B croissent jusqu'à 13h00 pour décroître à nouveau.

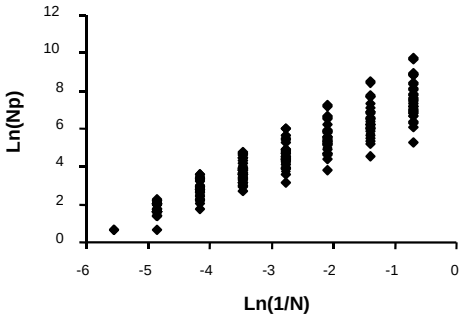


FIGURE 4A. Représentation des couples (Ln(1/N), Ln(Np)) lors de l'événement extrême du 9 et 10 novembre 2001.*Representation of the couples (Ln(1/N), Ln(NP)) during the extreme event of November 9 and 10, 2001.*

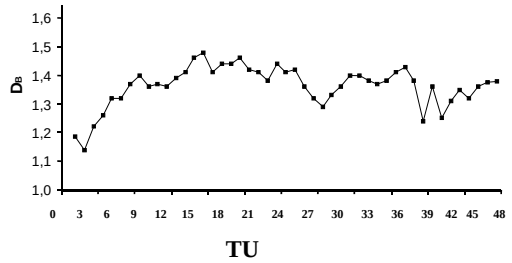


FIGURE 4B. Valeurs de la dimension box-counting DB obtenues heure par heure lors de l'événement extrême du 9 et 10 novembre 2001. *Box-counting dimension DB obtained hour by hour during the extreme event of November 9 and 10, 2001.*

Nous avons aussi considéré les images radar collectées au cours du mois de janvier 2001. Des pluies stratiformes et convectives ont été observées au cours de ce mois. Nous avons relevé des taux de précipitation inférieurs à 0,2 mm/h pour certaines situations et dépassant 10 mm/h pour d'autres. Les deux techniques de calcul présentées dans cette étude ont été appliquées pour calculer la dimension fractale des échos de précipitations collectées au cours de ce mois. Sur les figures 5a et 5b, on présente les variations de la dimension fractale D et du coefficient de Korcak K pour cette période.

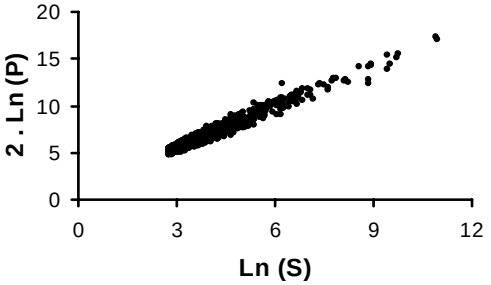


FIGURE 5A. Variation des couples de valeurs (Ln(S), 2xLn(P)) pour le mois de janvier 2001 à Sétif. *Variation of the value couples (Ln (S), 2xLn (P)) for January 2001 in Sétif.*

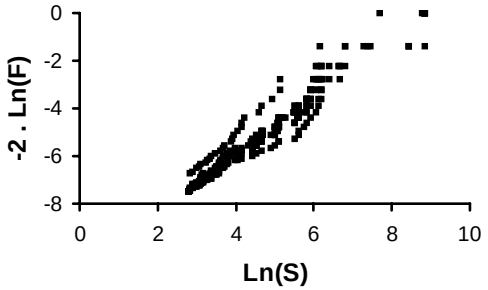


FIGURE 5B. Variation des couples de valeurs (Ln(F), Ln(S)) pour le mois de janvier 2001 à Sétif. *Variation of the value couples (Ln(f), Ln(S)) for January 2001 in Sétif.*

Pour étudier l'influence du climat sur la structure des précipitations, nous avons analysé les dimensions fractales et les paramètres de Korcak. Le tableau 2a donne les valeurs des paramètres D et K pour les trois sites étudiés.

TABLEAU 2A. Dimensions fractales D et paramètres de Korcak K des précipitations pour Sétif, Bordeaux et Dakar. *Fractal dimensions D and Korcak parameters K for precipitation for Sétif , Bordeaux and Dakar*

Site radar	Dimension fractale	Paramètre de Korcak
Sétif	1,38 ± 0,05	0,90± 0,11
Bordeaux	1,36 ± 0,03	1,22± 0,07
Dakar	1,35 ± 0,04	1,31± 0,05

Ces résultats montrent que la dimension fractale est invariante quels que soient le site et la nature des précipitations. Ils sont identiques à ceux publiés par Lovejoy (1982) et Rhys et Waldvogel (1986) pour des images prises au Canada, Cahalan et Joseph (1989) pour des images enregistrées en Israël ou Féral et Sauvageot (2002) pour la France qui proposent des dimensions fractales égales respectivement à 1,35, 1,36, 1,35 et 1,35. L'analyse des résultats de cette présente étude montre que la dimension fractale est indépendante du climat et du lieu géographique. Ce résultat est en bon accord avec l'hypothèse de Rhys et Waldvogel (1986) selon laquelle la dimension

fractale est la même pour tous les types de nuages. Nous avons aussi constaté que le paramètre de Korcak est influencé par le nombre d'échos. L'analyse du nombre et des tailles des cellules montre que les valeurs fortes de K sont obtenues pour un nombre élevé d'échos et des tailles proches les unes des autres.

Nous avons aussi étudié l'influence du taux de précipitation sur la dimension fractale. Pour le site de Sétif (Algérie), on a un niveau de reflectivité tous les quatre (4) dBZ. La dimension fractale D demeure inchangée jusqu'à 36 dBZ. Au-delà de cette valeur, le nombre d'échos chute sensiblement et les surfaces des échos diminuent considérablement. On obtient une valeur moyenne $D = 1{,}20 \pm 0{,}07$. Pour le site de Bordeaux (France), on aboutit aux mêmes conclusions avec une valeur moyenne $D = 1{,}23 \pm 0{,}03$. Le radar de Dakar permet une étude plus fine car l'image est codée sur 256 niveaux de reflectivité. Deux autres dimensions fractales ont été obtenues. Celles-ci sont égales respectivement à $1{,}21 \pm 0{,}05$ à partir de 42 dBZ et à $1{,}15 \pm 0{,}08$ à partir de 48 dBZ. Ceci peut s'expliquer par le fait que les lignes de grains sont composées d'une partie stratiforme et d'une partie convective, très actives et caractérisées par une intensité pouvant atteindre 150 mm/h. Ce résultat montre que la dimension fractale des échos de précipitations pour les 3 sites étudiés varie avec le seuil. On déduit donc que les précipitations ont un caractère multifractal. Ceci est en accord avec les résultats publiés par Hubert et Carbonnel (1989), Lovejoy et Schertzer (1990), Olsson (1996) et Schertzer et Lovejoy (1997).

De même, nous avons analysé la dimension fractale et le paramètre de Korcak des échos du sol. Comme les deux approches donnent des résultats similaires, l'approche aire/ périmètre a été retenue dans ce cas. Les valeurs D et K pour les 3 sites sont présentés dans le tableau 2b. Ces valeurs montrent que les échos du sol observés dans les régions de Sétif et Bordeaux présentent des contours plus irréguliers que les échos de précipitations. Comme la région de Dakar est plane, la valeur de D est naturellement basse. De plus, la valeur de D la plus forte est obtenue pour la région des hauts plateaux algériens. On peut expliquer cela par le fait que cette région compte beaucoup d'obstacles et de reliefs montagneux autour du radar. En outre, nous notons des différences significatives pour les valeurs de K entre les échos du sol et les précipitations. Ce paramètre peut alors servir pour identifier les échos parasites dans les images radar pour les 3 sites étudiés. Les fréquences d'occurrence F_d de la dimension fractale sont calculées pour les échos du sol et des échos de précipitations et sont ensuite comparées.

TABLEAU 2B. Dimensions fractales D et paramètres de Korcak K des échos du sol pour Sétif, Bordeaux et Dakar. *Fractal dimensions D and Korcak parameters K for ground echoes for Sétif, Bordeaux and Dakar*

Site radar	Dimension fractale	Paramètre de Korcak
Sétif	$1{,}58 \pm 0{,}18$	$1{,}57 \pm 0{,}11$
Bordeaux	$1{,}51 \pm 0{,}12$	$1{,}67 \pm 0{,}09$
Dakar	$1{,}35 \pm 0{,}04$	$0{,}65 \pm 0{,}08$

À titre d'illustration, sur la figure 6, on présente les histogrammes des dimensions fractales D des échos de précipitations collectés pendant la période de janvier 2001 et des échos en provenance de la surface terrestre enregistrés dans cette région. Nous observons un chevauchement important entre les deux distributions. Nous pouvons alors conclure que la dimension fractale ne peut pas être utilisée comme paramètre discriminant entre les deux types d'échos pour cette région. Pour l'approche de box-counting, on obtient aussi un chevauchement des histogrammes des échos de précipitations et des échos du sol. Des résultats identiques sont obtenus pour deux autres sites.

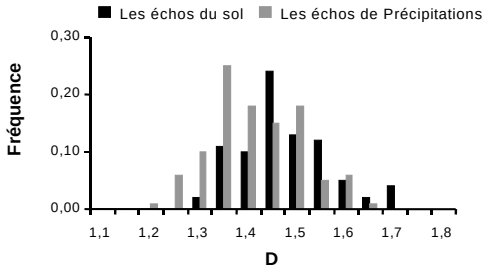


FIGURE 6. Histogrammes de la dimension fractale D des échos du sol et des échos de précipitations. *Fractal dimension histograms of the ground and precipitation echoes.*

5. CONCLUSION

Les propriétés structurales des échos radar ont été étudiées en analysant la dimension fractale et le coefficient de Korcak. D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que :

1. la dimension fractale des échos de précipitations est invariante dans l'espace et dans le temps et notre résultat confirme ceux publiés dans la littérature ;
2. les deux techniques utilisées dans cette étude, à savoir l'approche aire/périmètre ou box-counting donnent des résultats similaires ;
3. les surfaces des échos n'influent pas sur la dimension fractale ;
4. l'analyse des valeurs du paramètre de Korcak pour les trois sites montre que ce paramètre peut servir à l'identification des échos du sol ;
5. la dimension fractale des précipitations varie selon le seuil choisi, traduisant ainsi le caractère multifractal des précipitations ;
6. bien que les valeurs de la dimension fractale soient différentes pour les échos du sol et les échos de précipitations, ce paramètre ne peut pas être utilisé comme facteur discriminant entre les deux types d'échos.

Dans un avenir prochain, nous entamerons l'analyse multifractale des échos radar. Nous disposerons alors d'une étude plus complète de la structure des précipitations et des échos parasites en provenance de la surface terrestre. Tous ces résultats peuvent contribuer à une meilleure modélisation des champs de précipitations et à la mise au point d'une technique puissante d'élimination des échos parasites qui améliorera les performances des radars météorologiques non cohérents.

Références

Aida, M. (1977) Scattering of solar radiation as a function of cloud dimensions and orientation. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, vol. 17, p. 303-310.

Benner, T.C. and Curry, J. A. (1998) Characteristics of small tropical cumulus clouds and their impact on the environment. Journal of Geophysical Research, vol. 102, D22, p. 28753-28767.

Cahalan. R. F. and Joseph, J. H. (1989) Fractal statistics of clouds fields. Monthly Weather Review, vol. 117, p. 261-272.

Féral, L. and Sauvageot, H. (2002) Fractal identification of supercell storms. Geophysical Research Letter, vol. 29, n° 14, p. 1-4.

Gabella, M., Pavone, S. and Perona, G. (2000) Errors in the estimate of the fractal correlation dimension of raindrop spatial distribution. Journal of Applied Meteorology, vol. 40, n° 3, p. 664-668.

Gotoh, K. and Fujii, Y. (1998) A fractal dimension analysis on the cloud shape parameters of cumulus over land. Journal of Applied Meteorology, vol. 37, n° 10, p. 1283-1292.

Haddad, B., Sadouki, L., Adane, A. et Sauvageot, H. (2003) Analyse de la dimension fractale des échos de précipitations : cas des inondations d'Alger. Les Publications de l'Association Internationale de Climatologie, vol. 15, p. 386-391.

Haddad, B., Adane, A., Sauvageot, H., Sadouki, L. and Naili, R. (2004) Identification and filtering of rainfall and ground radar echoes using textural features. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, n° 21, p. 4641-4656.

Hubert, P. and Carbonnel, J. P. (1989) Dimension fractale de l'occurrence de pluie en climat Soudano-Sahelien. Hydrologie Continentale, vol. 4, p. 3-10.

Hyslip, J. P. and Vallejo, L. E. (1997) Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. Engineering Geology, vol. 48, p. 231-244.

Joseph. J. H. (1985) The role of cloud field morphology in weather and climate studies. Israel Journal of Earth Sciences, vol. 34, p. 96-106.

Korcak, J. (1938) Deux types fondamentaux de distribution statistique. Bulletin de l'Institut International de Statistique, vol. 3, p. 295-299.

Korvin, G. (1992) Fractal models in the earth sciences. Les Editions Internationales Elsevier, Amsterdam, 191 p.

Kuo, K. S., Welch, R. M., Wegner, R. C., Engelstad, M. A. and Sengupta, S. K. (1993) The three-dimensional structure of cumulus clouds over the ocean. 1. Structural Analysis. Journal of Geophysical Research, vol. 98, p. 20685-20711.

Lawford, R. G. (1996) Temporal Variations in the Scaling Properties of Rain Echoes During the Development of a Cold Low in Saskatchewan. Journal of Applied Meteorology, vol. 35, p. 796-809.

Lovejoy, S. (1982) Area-Perimeter relation for rain and cloud. Science, vol. 216, p. 185-187.

Lovejoy, S. and Schertzer, D. (1990) Multifractal, universality classes satellite and radar measurements of clouds and rain fields. Journal of Geophysical Research, vol. 95, p. 2021-2034.

Mandelbrot, B. B. (1974) Intermittent turbulence in self-similar cascades: divergences of high moments and dimension of the carrier. Journal of Fluid Mechanics, vol. 62, n° 2, p. 331-350.

Mandelbrot, B. B. (1983) The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman and Company, New York, 424 p.

Nzeukou, A. and Sauvageot, H. (2002) Distribution of rainfall parameters near the coasts of France and Senegal. Journal of Applied Meteorology, vol. 41, p. 69-82.

Olsson, J. (1996) Validity and applicability of a scale-independent, multifractal relationship for rainfall. Atmospheric Research, vol. 42, p. 53-65.

Rhys, F. S. and Waldvogel, A. (1986) Fractal shape of hail clouds. Physical Review Letters, vol. 56, p. 784-787.

Schertzer, D. and Lovejoy, S. (1997) Universal Multifractals Do Exist! : Comment on " A Statistical Analysis of Mesoscale Rainfall as a Random Cascade ". Journal of Applied Meteorology, vol. 36, p. 1296-1303.