

Dimensions fractales de l'occurrence de pluie en climat soudano-sahélien

Pierre HUBERT (1), Jean-Pierre CARBONNEL (2)

RÉSUMÉ

L'occurrence de pluie relative à une station, définie comme l'ensemble des périodes pluvieuses observées en cette station, est considérée comme un objet fractal inclus dans l'espace unidimensionnel du temps. La dimension de cet objet, comprise entre 0 et 1, est estimée par la méthode du comptage de boîtes. Deux séries issues de deux stations en climat soudano-sahélien, l'une journalière d'une durée de 45 ans, l'autre horaire d'une durée de 6 mois, ont été analysées selon ce protocole. On constate une opposition très marquée entre l'échelle de temps allant de quelques heures à quelques jours et l'échelle de temps allant de quelques jours à quelques mois dont la dimension est proche de 0,8.

MOTS-CLÉS : Précipitation — Fractal — Série chronologique — Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

FRACTAL DIMENSIONS OF RAINFALL OCCURRENCE IN A SOUDANO-SAHELIAN CLIMATE

Rainfall occurrence related to a particular location, defined as the set of rainy periods observed, is regarded as a fractal object belonging to the 1-D space of time. The dimension of this object is bounded by 0 and 1, and is estimated using the box counting method. Two Soudano-Sahelian pluviometric time series have been analysed according to that process. The first series is a 45 year daily record while the second is a 6 month hourly one. A marked difference between short time scale (some hours to some days) and large time scale (some days to some months) is noted, the rainfall occurrence dimensions of the later being about 0.8.

KEY WORDS : Rainfall — Fractal — Time series — West Africa.

INTRODUCTION

En un lieu donné, la pluie est un phénomène intermittent. On exprime ainsi le fait que l'on peut observer en ce lieu au cours du temps une succession d'états secs et pluvieux. États secs et pluvieux doivent être définis ; ils ne peuvent l'être rigoureusement que relativement à une aire, à un intervalle de temps et à un seuil de précipitations. Un intervalle de temps sera dit pluvieux pour une aire donnée si une quantité d'eau météorique supérieure à un seuil donné a été précipitée sur cette aire pendant l'intervalle de temps considéré.

Le pluviomètre permet de définir avec précision une aire d'observation qui se confond avec sa surface de collecte (400 cm² en général). Ce type d'appareil est habituellement relevé quotidiennement à 8 heures. On peut alors déterminer l'état de périodes successives de 24 heures, état sec lorsque la hauteur d'eau recueillie est inférieure à un seuil donné (ce seuil est souvent choisi égal à 0,1 mm), état pluvieux dans le cas contraire. Le pluviographe permet d'atteindre, pour une aire de collecte également bien définie (400 cm² ou 2 000 cm²), une meilleure résolution temporelle mais il s'agit d'un matériel relativement onéreux et quoique (ou parce que) automatique il nécessite l'intervention d'un personnel qualifié.

(1) CIG Ecole des Mines de Paris, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau.

(2) CNRS, URA 1367, Laboratoire de Géologie Appliquée, Université P. et M. Curie, 4, Place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05, France.

MÉTHODOLOGIE

Nous avons utilisé dans cette étude aussi bien des données pluviographiques (dépouillées selon un pas de temps horaire) que des données pluviométriques journalières. Nous ne nous sommes pas préoccupés ici de la hauteur ou de l'intensité des précipitations, mais seulement de leur présence ou de leur absence attestées par des mesures pluviométriques ou pluviographiques. Pour chaque station considérée, la période d'observation (qui peut aller de quelques mois à plusieurs dizaines d'années selon les séries) a donc été découpée en une succession d'états secs et pluvieux. On trouvera sur la figure 1 une représentation graphique d'un tel découpage pour 45 années (de 1922 à 1966) d'observations journalières réalisées à la station de Dédougou (Burkina Faso) dont on trouvera les coordonnées sur le tableau I.

TABLEAU I
Localisation des stations étudiées

	Longitude Ouest degré.minute	Latitude Nord degré.minute
Dédougou	3.29	12.28
Ouagadougou-ORSTOM	1.31	12.22

Cette représentation fait apparaître l'occurrence de la pluie comme un ensemble disjoint, composé de périodes élémentaires traduites sur notre figure par des segments supportés par l'axe représentatif du temps. Géométriquement, cet ensemble évoque le résultat obtenu après un certain nombre d'itérations dans le processus générateur d'une poussière de Cantor à partir d'une barre. Ce type d'objet est devenu classique depuis les travaux de MANDELBROT (1975, 1977) qui ont introduit la notion d'objet fractal et de dimension fractale (dimension de Hausdorff-Besicovitch) dans les sciences de la nature. Cette ressemblance nous a incités à tenter de quantifier en termes dimensionnels l'occurrence de la pluie sur un intervalle de temps.

Cette présentation ne doit cependant pas nous faire oublier qu'un phénomène complexe tel que la précipitation ne se résume pas à occurrence ou non-occurrence. Il y a déjà dans notre définition de l'occurrence de pluie une notion de seuil (0,1 mm pour les données pluviométriques, 0,2 mm pour les données pluviographiques) qui renvoie bien sûr à celle d'intensité. Au-delà, la dépendance de la dimension d'un ensemble sur la valeur de son seuil de référence, notée par exemple par SCHERTZER et LOVEJOY (1984), a amené de nombreux auteurs (HALSEY *et al.*, 1986 ; SCHERTZER et LOVEJOY, 1984 ; 1987) à rejeter en pratique dans ce type d'étude la notion d'objet fractal au profit de celle de champ multifractal. Le phénomène étudié est alors représenté par une hiérarchie de fractals correspondant aux régions, de plus en plus ténues, sur lesquelles le champ dépasse des seuils de plus en plus élevés ou sur lesquelles les moments statistiques d'ordres de plus en plus élevés divergent. Dans cette perspective la présente étude s'intéresse à l'estimation d'une dimension fondamentale mais très particulière, celle des faibles seuils ou des moments d'ordre 0. Elle est donc préliminaire, devant nécessairement se poursuivre par l'étude du champ pluviométrique pour toute une gamme de seuils d'intensité.

Nous avons abordé le problème de l'estimation d'une dimension fractale grâce à la méthode du comptage de boîtes (HENTSCHEL et PROCCACCIA, 1983 ; LOVEJOY, SCHERTZER et TSONIS, 1987). Étant donné un objet de dimension fractale D , inclus dans un espace de dimension euclidienne E , si on réalise un maillage de cet espace en boîtes de côté a (selon la valeur $E = 1, 2$ ou 3 , les boîtes seront des segments, des carrés ou des cubes), le nombre N de boîtes nécessaires pour recouvrir l'objet fractal considéré est une fonction de a telle que :

$$\text{Log} [N(a)] = - D \text{Log} [a] + K \quad (K = \text{constante})$$

Dans le cas de l'ensemble que nous nous proposons d'étudier, qui est inclus dans un ensemble de dimension 1, les boîtes sont réduites à des segments et la dimension fractale de l'occurrence de pluie sera donc nécessairement comprise entre 0 et 1. $N(a)$ étant déterminé pour différentes valeurs de a , D pourra être estimé comme l'opposé de la pente de la régression de N en a tracée sur un diagramme Log-Log. Nous avons dans ce travail échantillonné N pour des valeurs de a égales à des puissances successives de 2. Les a étant ici nécessairement entiers, cette procédure nous permet d'obtenir selon l'axe logarithmique des a les points régulièrement espacés les plus rapprochés qu'il soit.



FIG. 1. — 45 années d'observations pluviométriques journalières à Dédougou (Burkina Faso). Chaque ligne correspond à une année d'observations. La première ligne, en trait plein, permet d'apprécier la longueur totale de l'année du 1^{er} janvier au 31 décembre. Sur les lignes suivantes représentant les années 1922 à 1966, seules les journées pluvieuses ont été soulignées par un tracé

ETUDE D'UNE SÉRIE JOURNALIÈRE

Nous avons d'abord tenté d'attribuer selon cette méthode une dimension fractale à l'occurrence de pluie de la station de Dédougou pour laquelle nous disposons d'une longue chronique continue d'observations journalières. Nous avons considéré une séquence de $2^{14} = 16\ 384$ jours consécutifs (soit près de 45 ans) débutant le 1^{er} janvier 1922. Nous avons reporté sur le tableau II et sur la figure 2 les résultats de 15 comptages réalisés pour des maillages de la séquence temporelle considérée selon des segments dont les longueurs sont les termes d'une progression géométrique de premier terme 1 et de raison 2 (1 à 16 384 jours). On constate sur la figure 2 que les points représentatifs des comptages 4 à 8 d'une part, 9 à 15 d'autre part sont alignés.

TABLEAU II
Dédougou (Burkina Faso)

N°	Taille de boîte (jours)	Nombre de boîtes
1	2** 0= 1	2679
2	2** 1= 2	2272
3	2** 2= 4	1667
4	2** 3= 8	1051
5	2** 4= 16	610
6	2** 5= 32	348
7	2** 6= 64	202
8	2** 7= 128	120
9	2** 8= 256	64
10	2** 9= 512	32
11	2**10= 1024	16
12	2**11= 2048	8
13	2**12= 4096	4
14	2**13= 8192	2
15	2**14=16384	1

D=0.79

r=-0.999

D=1.00

r=-1.000

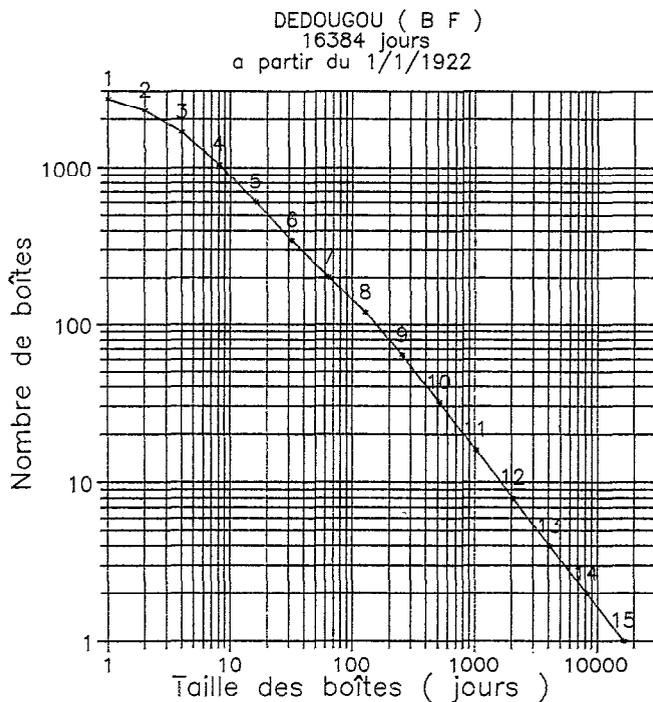


FIG. 2. — Diagramme permettant de calculer les dimensions fractales de l'occurrence de pluie à Dédougou pour une échelle de temps allant de 1 à 16 384 jours

L'alignement des points 9 à 15 selon une droite de pente -1 est trivial. En effet, pour une échelle de temps supérieure ou égale à $2^{**}8 = 256$ jours, tout intervalle de temps est pluvieux puisqu'on y a observé au moins une journée pluvieuse. L'occurrence de pluie à cette échelle de temps se confond donc avec l'axe du temps et sa dimension fractale est égale à 1.

L'alignement des points 4 à 8, selon une droite de pente $-0,79$, est plus intéressant. Il confère à l'occurrence de pluie, pour une échelle de temps allant de $2^{**}3 = 8$ à $2^{**}7 = 128$ jours une structure autosimilaire dont la dimension fractale est égale à $0,79$. Cette structure et sa dimension peuvent être rapprochées de la place qu'occupe la saison des pluies dans l'année en Afrique soudano-sahélienne soit environ 7 mois sur 12, s'étendant d'Avril à Octobre. Le schéma de la figure 3, qui illustre cette position, peut être considéré comme le générateur d'une poussière de Cantor (MANDELBROT, 1975) dont la dimension serait égale à $\text{Log}7/\text{Log}12$ soit $0,783$, valeur très proche de celle de la dimension qui vient d'être déterminée empiriquement.

Segment initial

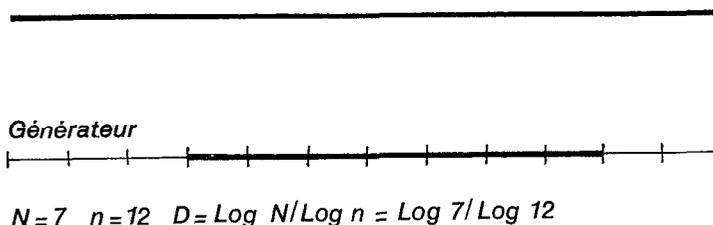


FIG. 3. — Générateur d'une poussière de Cantor de dimension $\text{Log } 7 / \text{Log } 12$. A chaque étape de la génération de la poussière, chaque segment initial est divisé en $n = 12$ segments élémentaires. Seuls $N = 7$ segments élémentaires joueront, à l'étape suivante, le rôle de segment initial

Alors que la région soudano-sahélienne a connu au cours de ce siècle une succession de phases sèches et humides (CARBONNEL, HUBERT et CHAOUCHE, 1987 ; HUBERT, CARBONNEL et CHAOUCHE, 1989), cette dimension apparaît comme stable au cours du temps. Nous avons en effet calculé la dimension fractale de l'occurrence de pluie pour une échelle de temps allant de 8 à 128 jours relative à quatre périodes contrastées de $2^{**}12 = 4096$ jours (tabl. III). On retrouve partout un excellent alignement des points représentatifs des comptages (coefficient de corrélation toujours supérieur à $0,999$ en valeur absolue).

TABLEAU III
Phases climatiques contrastées à Dédougou (Burkina Faso)

Debut de la séquence de 4096 jours	Nature de la période	Dimension fractale D
1° Janvier 1924	Humide	0.77
1° Janvier 1937	Sèche	0.78
1° Janvier 1953	Humide	0.78
1° Janvier 1969	Sèche	0.77

Cette permanence de la dimension fractale de l'occurrence de pluie est en accord avec les résultats de CHAOUCHE (1988) qui a montré que les bornes de la saison des pluies n'avaient pas été modifiées au cours de ce siècle alors que la hauteur des précipitations subissait d'importantes fluctuations. Au-delà, puisque cette dimension fractale vaut pour des échelles de temps descendant jusqu'à quelques jours, on peut en conclure que l'organisation au cours de la saison des pluies des épisodes météorologiques pluvio-gènes n'a pas subi de modifications notables alors que se succédaient phases climatiques sèches et humides. Ce sont donc les processus qui sont à l'origine de la productivité des épisodes pluvio-gènes qui seraient à l'origine des fluctuations pluviométriques observées.

Nous noterons enfin sur la figure 2 que la valeur absolue de la pente de la relation $\text{Log}[n(a)]$ fonction de $\text{Log}[a]$ diminue pour les faibles valeurs de a . Sans attribuer à ce fait de signification particulière nous retiendrons cependant que la pente de la droite déterminée par les points représentatifs des deux premiers comptages est égale à $-0,24$.

ETUDE D'UNE SÉRIE HORAIRE

Afin d'aborder l'étude de la structure de l'occurrence de pluie à faible échelle de temps nous nous sommes intéressés à une série horaire, obtenue grâce au dépouillement des pluviogrammes de la saison des pluies de 1986 enregistrés à la station ORSTOM de Ouagadougou (Burkina Faso) dont on trouvera les coordonnées sur le tableau I. Nous avons considéré une séquence $2^{**}12 = 4\,096$ heures consécutives (soit environ 170 jours) débutant le 1^{er} mai 1986 à 0 h. Les résultats de 13 comptages, pour des maillages de la séquence considérée selon des segments dont la longueur varie de 1 à 4 096 heures suivant une progression géométrique de raison 2, ont été reportés sur le tableau IV et sur la figure 4. On peut remarquer deux alignements distincts, celui des points représentatifs des comptages 3 à 6 d'une part, celui des points représentatifs des comptages 10 à 13 d'autre part.

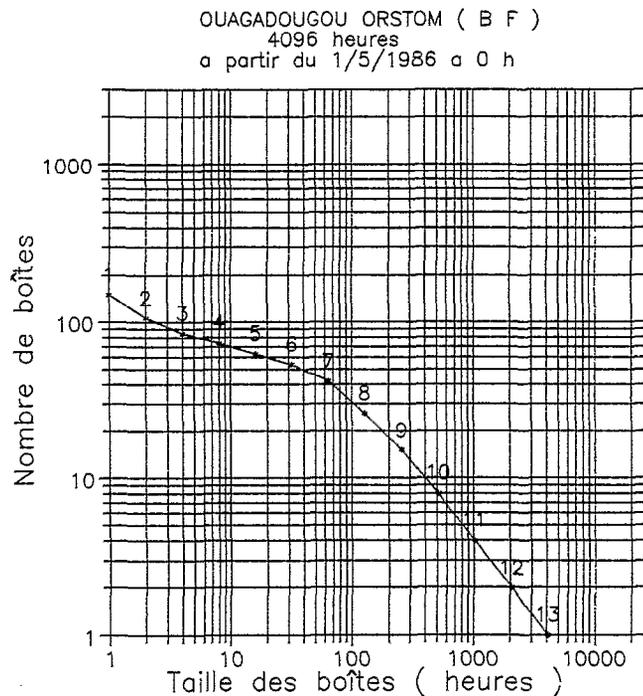


FIG. 4. — Diagramme permettant de calculer les dimensions fractales de l'occurrence de pluie à Ouagadougou-ORSTOM pour une échelle de temps allant de 1 à 4 096 heures

TABLEAU IV
Ouagadougou-ORSTOM (Burkina Faso)

N°	Taille de boîte (heures)	Nombre de boîtes	
1	2** 0= 1	150	
2	2** 1= 2	106	
3	2** 2= 4	85	} D=0.22 r=-0.999
4	2** 3= 8	74	
5	2** 4= 16	63	
6	2** 5= 32	54	
7	2** 6= 64	42	} D=0.74
8	2** 7= 128	26	
9	2** 8= 256	15	
10	2** 9= 512	8	} D=1.00 r=-1.000
11	2**10=1024	4	
12	2**11=2048	2	
13	2**12=4096	1	

Ce dernier alignement, de pente -1 , est trivial. Il correspond encore une fois à une saturation de l'espace disponible par l'occurrence de pluie pour des échelles de temps allant de $2^{*9} = 512$ à $2^{*12} = 4\,096$ heures, soit de 20 à 170 jours environ alors que la période étudiée se situe entièrement à l'intérieur de la saison des pluies.

Par contre, l'alignement des points représentatifs des comptages 3 à 6 est un élément nouveau. Il évoque l'existence d'une structure autosimilaire de l'occurrence de pluie, de dimension 0,22, pour une échelle de temps allant de 4 à 32 heures. Il est intéressant de se souvenir ici de la valeur de la pente, égale à $-0,24$, de la droite joignant les points représentatifs des comptages 1 et 2 (24 et 48 heures) de la série journalière de Dédougou (fig. 2). On retrouve, pour deux séries chronologiques très différentes, des alignements de pentes voisines pour des échelles de temps analogues. Il serait bien sûr tentant d'interpréter les deux premiers points représentatifs des comptages de la série de Dédougou comme l'amorce d'un nouveau régime, dont on pourrait apprécier le développement jusqu'à l'échelle de 4 heures à travers les comptages de la série de Ouagadougou-ORSTOM. Il est sans doute prématuré de le faire. La conversion des données pluviographiques de la station ORSTOM de Ouagadougou, antérieure à cette étude, nous pose en effet quelques problèmes, en particulier en ce qui concerne l'utilisation de la méthode du comptage de boîtes (LAVALLÉE *et al.*, 1989) et on peut craindre à ce niveau une interférence provenant de la dimension, vraisemblablement faible, des fortes intensités de pluies observables à petite échelle de temps. Il conviendra, pour poursuivre cette étude, de revenir aux enregistrements pluviographiques originaux.

Nous noterons par ailleurs que la pente de la droite ajustée, sur la figure 4, à partir des points représentatifs des comptages 7 à 9 (64 à 256 heures, soit environ 3 et 10 jours) est égale à $-0,74$. Sans appartenir à la zone de saturation évoquée plus haut, ces deux points se situent dans la zone d'autosimilarité (8 à 128 jours) de l'occurrence de pluie de dimension fractale 0,79 mise en évidence sur la série journalière de Dédougou, dont nous voyons ici une trace.

Nous nous intéresserons enfin aux deux premiers points de la figure 4, relatifs aux plus petites échelles de temps étudiées (1 et 2 heures). Ils montrent un redressement de la courbe représentant le nombre de boîtes nécessaires au recouvrement de l'occurrence de pluie en fonction de la taille des boîtes, qui devrait s'accroître à plus petite échelle. En effet, dès que la taille de boîte devient inférieure à la durée de l'épisode pluvieux le plus court, la division par deux de la taille de boîte conduit à multiplier par deux le nombre de boîtes pluvieuses. On atteindrait alors de nouveau une succession de points alignés selon une droite de pente -1 , traduisant un nouveau régime de saturation, à très petite échelle de temps cette fois.

CONCLUSIONS

Le résultat principal de cette étude préliminaire portant sur deux séries banales de mesures réalisées en climat soudano-sahélien nous semble être la mise en évidence du caractère fractal de l'occurrence de pluie pour une échelle de temps allant de quelques jours à quelques mois et l'estimation de la dimension (proche de 0,8) de cette occurrence. Ce résultat doit être rapproché de ceux de TESSIER *et al.* (1988 ; 1989) qui, utilisant des données très différentes puisqu'il s'agit des accumulations quotidiennes, sur 3 ans au seuil de 0,1 mm, des quelques 8 000 stations du réseau de l'OMM, déterminent également une dimension fractale de l'ordre de 0,8 pour des échelles de temps allant de 1 à 240 jours.

La génération de séries synthétiques de succession d'états secs et pluvieux est généralement la première étape de la génération de séries pluviométriques synthétiques. La modélisation de l'occurrence de pluie a ainsi fait l'objet de nombreuses recherches, souvent fondées sur l'utilisation des chaînes de Markov (MASSON, 1977). Depuis que BUIHAND (1978) et WAYMIRE et GUPTA (1981) ont proposé à ce propos un état de l'art de nouveaux développements ont pu être notés (SMITH et KARR, 1985 ; FAFOULA-GEORGIU et LETTENMAIER, 1987 ; TSAKIRIS, 1988). Les caractérisations fractales ont elles aussi fait l'objet de tentatives de simulations, qu'il s'agisse de champs fractals (LOVEJOY et SCHERTZER, 1986 ; WILSON, LOVEJOY et SCHERTZER, 1986 ; CHLÈS, 1988) ou multifractals (SCHERTZER et LOVEJOY, 1987 ; 1988 ; WILSON, LOVEJOY et SCHERTZER, 1988). Elles sont sans doute susceptibles de nourrir des méthodes alternatives aux méthodes aujourd'hui classiques. Cette caractérisation, esquissée ici à partir de deux séries de mesures, doit cependant, comme la caractérisation fractale de la variabilité spatiale et de l'anisotropie des champs de précipitations (HUBERT et CARBONNEL, 1988), continuer à être validée à travers l'étude de nombreuses séries temporelles issues de contextes climatiques variés.

BIBLIOGRAPHIE

- BUISHAND (T.A.), 1978. — Some remarks on the use of daily rainfall models, *Journal of Hydrology*, 36 : 295-308.
- CARBONNEL (J.P.), HUBERT (P.), CHAOUCHE (A.), 1987. — Sur l'évolution séquentielle de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest, *CRAS*, 305, série II : 625-628.
- CHAOUCHE (A.), 1988. — Structure de la saison des pluies en Afrique Soudano-Sahélienne, Thèse, Ecole des Mines de Paris.
- CHILÈS (J.P.), 1988. — Fractal and geostatistical methods for modeling of a fracture network, *Mathematical Geology*, 20 : 631-654.
- FOUFOULA-GEORGIU (E.), LETTENMAIER (D.P.), 1987. — A Markov renewal model for rainfall occurrences, *Water Resources Research*, 23 : 875-884.
- HALSEY (T.C.), JENSEN (M.H.), KADANOFF (L.P.), PROCCACIA (I.), SHRAIMAN (B.I.), 1986. — Scaling measures and singularities, *Phys. Rev. A*, 33 : 1141.
- HENTSCHEL (H.G.E.), PROCCACIA (I.), 1983. — The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors, *Physica*, 8D : 435-444.
- HUBERT (P.), CARBONNEL (J.P.), 1988. — Caractérisation fractale de la variabilité et de l'anisotropie des précipitations intertropicales, *CRAS*, série II : 909-914.
- HUBERT (P.), CARBONNEL (J.P.), CHAOUCHE (A.), 1989. — Segmentation des séries hydrométéorologiques, application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest, à paraître dans *Journal of Hydrology*.
- LAVALLÉE (D.), SCHERTZER (D.), LOVEJOY (S.), 1989. — On the determination of the codimension function, *Nonlinear Variability in Geophysics 1*, SCHERTZER and LOVEJOY eds, Kluwer Academic Press, Amsterdam (sous presse).
- LOVEJOY (S.), SCHERTZER (D.), 1986. — Scale invariance, symmetries, fractals and stochastic simulations of atmospheric phenomena, *Bulletin of the AMS*, 67 : 21-32.
- LOVEJOY (S.), SCHERTZER (D.), TSONIS (A.A.), 1987. — Functional box-counting and multiple elliptical dimensions in rain, *Science*, 235 : 1036-1038.
- MANDELBROT (B.B.), 1975. — Les objets fractals, forme, hasard et dimension, Paris, 192 p.
- MANDELBROT (B.B.), 1977. — The fractal geometry of nature, San-Francisco, 461 p.
- MASSON (J.M.), 1977. — Persistance des états pluvieux en fonction de leur durée, analyse de 52 années d'enregistrements pluviométriques à Montpellier Bel Air, *Cah. ORSTOM, série Hydrol.*, vol. 14, n° 2 : 173-189.
- SCHERTZER (D.), LOVEJOY (S.), 1984. — On the dimension of atmospheric motions, *Turbulence and chaotic phenomena in fluids*, T. Tatsumi ed., North-Holland : 505-508.
- SCHERTZER (D.), LOVEJOY (S.), 1987. — Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling and multiplicative processes, *J. Geophys. Res.*, 92, D8 : 9693-9714.
- SCHERTZER (D.), LOVEJOY (S.), 1988. — Multifractal simulations and analysis of clouds by multiplicative processes, *Atmospheric Research*, 21 : 337-361.
- SMITH (J.A.), KARR (A.F.), 1985. — Statistical inferences for point processes models of rainfall, *Water Resources Research*, 21 : 73-79.
- TESSIER (Y.), LOVEJOY (S.), SCHERTZER (D.), 1988. — Multifractal analysis of global rainfall from 1 day to 1 year, *Nonlinear Variability in Geophysics 2*, abstract volume, Paris.
- TESSIER (Y.), LOVEJOY (S.), SCHERTZER (D.), 1989. — Multifractal analysis of global rainfall from 1 day to 1 year, *European Geophysical Society XIV General Assembly*, abstract volume, Barcelonna.
- TSAKIRIS (G.), 1988. — Stochastic modelling of rainfall occurrences in continuous time, *Hydrological Sciences — Journal — des Sciences Hydrologiques*, 33 : 437-447.
- WAYMIRE (E.), GUPTA (V.K.), 1981. — The mathematical structure of rainfall representations. 1. A review of the stochastic rainfall models ; 2. A review of the theory of point processes ; 3. Some applications of the point process theory to rainfall processes. *Water Resources Research*, 17 : 1261-1294.
- WILSON (J.), LOVEJOY (S.), SCHERTZER (D.), 1986. — An intermittent wave packet model of rain and clouds, 2nd conf on satellite meteor. and remote sensing, AMS, Boston : 233-236.
- WILSON (J.), LOVEJOY (S.), SCHERTZER (D.), 1988. — Physically based cloud modeling by multiplicative processes, *Nonlinear Variability in Geophysics 1*, SCHERTZER et LOVEJOY Eds, Kluwer Academic Press, Amsterdam (sous presse).

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 26 avril 1989.