

Quelques caractéristiques  
évènementielles des régimes  
pluviométriques ponctuels  
ouest-africains au cours de deux  
périodes climatologiques contrastées  
(1951-1970 et 1971-1990)  
*Application de la loi composée  
Poisson/exponentielle (LCPE)  
ou du modèle de la loi des fuites (LDF)  
aux pluies journalières*

Dominique TAPSOBA,  
Bernard BOBÉE

Hydro-Québec/CRSNG,  
ALCAN,  
Chaire en hydrologie statistique,  
INRS-ETE,  
Université du Québec,  
Canada.

L. LEBARBE

Laboratoire d'étude des transferts  
en hydrologie et environnement,  
BP 53, F38041 Grenoble Cedex 9.

E. ELGUERO

IRD, 911, avenue Agropolis,  
BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1,  
France.

La pluie n'est pas un phénomène continu. Les précipitations surviennent au cours d'événements pluvieux de durées variables se succédant suivant des intervalles de temps variables. Cette intermittence est particulièrement importante en Afrique de l'Ouest et notamment au Sahel. Dans la région de Niamey par exemple, la pluviométrie annuelle résulte d'une quarantaine d'événements. 80 % de ce total tombe en moins de 24 heures et 50 % en moins de 3 heures [1, 2]. La production et l'exploitation des ressources en eau sont conditionnées au moins autant par cette intermittence des pluies que par

leur abondance. Pour une même quantité de pluie tombée, les écoulements, la recharge des nappes et les stocks hydriques des premiers horizons du sol pourront être très différents selon la répartition temporelle des événements pluvieux. Une période sèche au cours d'une saison des pluies, même globalement excédentaire, peut avoir des conséquences catastrophiques sur le rendement d'une culture si elle survient au cours d'une phase critique de développement de la plante. Pour être complète et efficace, une caractérisation des régimes pluviométriques ne peut donc se limiter à une description statis-

## Références

1. Lebel T, Lebarbe L. Rainfall Monitoring during HAPEX-Sahel : 2. Point and areal estimation at the event and seasonal scales. *J Hydrol* 1997 ; 188-9 : 97-122.
2. Hubert P, Carboneil JP. Caractérisation fractale de la variabilité et de l'anisotropie des précipitations intertropicales. *CR Acad Sci Paris* 1988 ; t 307, série II : 909-14.
3. Lebel T, Sauvageot H, Hoepffner M, Desbois M, Guillot B, Hubert P. Rainfall estimation in the Sahel: The EPSAT-Niger Experiment. *J Hydrol Sci* 1992 ; 37 : 201-5.
4. Todorov AV. Sahel, the changing rainfall and the "normal" used for its assessment. *J Clim Appl Meteorol* 1985 ; 24 : 97-107.
5. Houndenou C, Hernandez K. Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). *Sécheresse* 1998 ; 1 : 23-34.
6. Paturel JE, Servat E, Kouamé B, Lubès H, Ouedraogo M, Masson JM. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea Part II: an integrated regional approach. *J of Hydrol* 1997 ; 191 : 16-36.
7. Babuziaux C. Étude statistique de la loi des fuites. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, 1969.
8. Epstein B. A Modified Extreme Value Problem. *Ann Math Stat* 1949 ; 20 : 99-103.
9. Ribstein P. La loi des fuites. *Cah Orstom sér Hydrol* 1983 ; 20 : 117-45.
10. Buishand TA. *Stochastic modeling of daily rainfall sequences*. Ph.D. thesis, University of Wageningen, 1977.
11. Tapsoba D. *Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest-africains et de leur récent changement*. Thèse de doctorat de l'Université Paris 11 (Orsay), 1997 ; 111 p. sans annexes.
12. Le Barbé L, Lebel T. Rainfall Monitoring during HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *J Hydrol* 1997 ; 188-9 : 43-73.

tique simple de cumul. Elle doit comporter aussi les évolutions saisonnières du nombre et de l'intensité des événements pluvieux ; c'est l'objet du travail présenté dans cet article.

Le seul réseau qui, en Afrique de l'Ouest, permette l'observation directe des événements pluvieux est le dispositif mis en place dans le cadre de l'expérience EPSAT-Niger [3]. Ce dispositif d'observation ne couvre qu'une zone de 16 000 km<sup>2</sup> et les séries de données disponibles ne sont pas suffisamment longues. On ne peut donc envisager, comme dans le cas de cette étude, une description des fluctuations du climat sur une zone aussi étendue que celle que nous avons étudiée à partir des données de ce programme.

Les réseaux nationaux de base en Afrique de l'Ouest sont constitués par des pluviomètres journaliers. Les postes, malgré leur faible densité, ont une assez bonne répartition spatiale et les chroniques disponibles sont très longues. Toutefois, on ne peut accéder directement à l'information événementielle à partir de données constituées de cumul journaliers. Dans cet article nous proposons une approche simple permettant de reconstituer en termes de distribution statistique les nombres moyens d'événements pluvieux et les hauteurs moyennes associées, à partir de ces chroniques. Cette approche repose sur l'utilisation du modèle LDF (Loi des fuites) défini par deux paramètres : le nombre moyen d'événements pluvieux par jour ( $\lambda$ ) et la hauteur moyenne par événement ( $\mu$ ). Une procédure originale présentée dans ce travail permet d'estimer convenablement ces deux paramètres. En analysant séparément les caractéristiques de la distribution des événements pluvieux au cours des années globalement « humides », de 1951 à 1970, et au cours des années globalement « sèches », de 1971 à 1990 [4], une description précise et comparative des précipitations au cours de ces années est proposée pour la zone géographique étudiée (carte).

Cette étude présente deux originalités. La première se caractérise par l'analyse de la sécheresse survenue après les années 1969-1970 en Afrique de l'Ouest sur la base de la répartition spatio-temporelle des événements pluvieux et des hauteurs par événement. Cette approche se distingue donc des approches antérieures fondées sur l'analyse des séries pluviométriques

quotidiennes [5] ou annuelles [6]. La seconde tient au fait qu'à l'instar de Houndenou et Hernandez [5] et de Paturel *et al.* [6], pour ne citer qu'eux, le présent travail décrit la sécheresse sur une zone géographique intégrant à la fois les régions sahéliennes *stricto sensu* et les régions au sud du Sahel.

## Présentation du modèle utilisé

Le modèle utilisé dans cette étude repose sur les hypothèses de la loi des fuites (LDF). Les aspects théoriques relatifs à cette loi sont présentés par Babuziaux [7]. La LDF est aussi connue, dans la littérature anglo-saxonne, sous l'appellation de loi composée Poisson/exponentielle (LCPE) [8]. Le terme LDF sera employé dans cette étude.

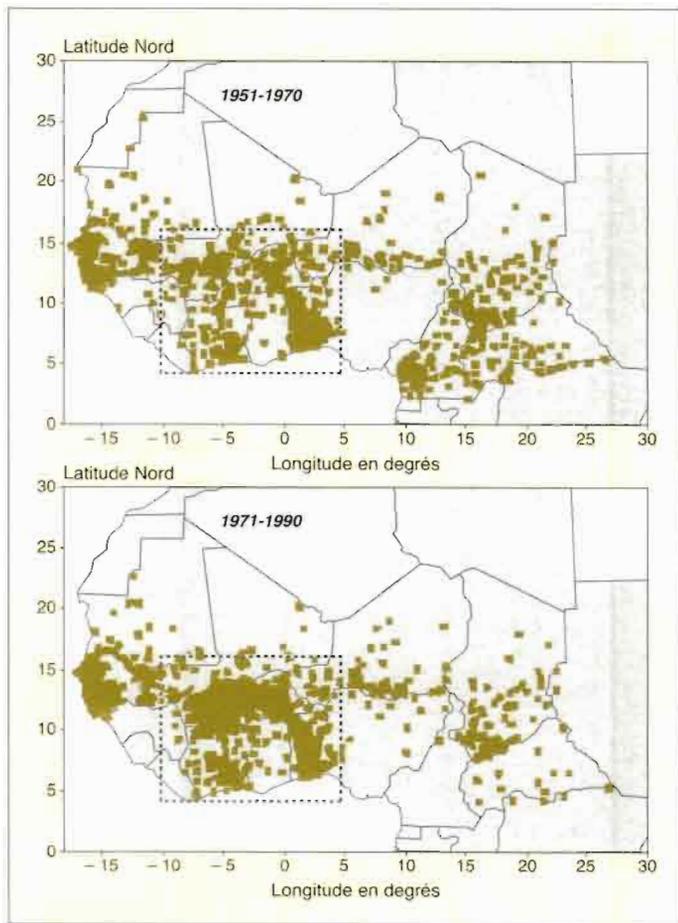
L'application de la LDF à la pluviométrie a fait l'objet de plusieurs travaux [9, 10]. La LDF ayant été déjà bien présentée dans ces différents travaux, on ne rappellera ici que les hypothèses de base sur lesquelles elle repose.

La LDF permet de décrire et de combiner deux des processus stochastiques de la pluie : celui régissant les occurrences des événements pluvieux et celui des hauteurs tombées au cours d'un événement pluvieux.

Si on suppose :

- 1) que le processus d'apparition d'un événement pluvieux est sans mémoire et ne dépend pas des occurrences des événements pluvieux passés ;
  - 2) que les hauteurs sont également indépendantes du passé ;
  - 3) et enfin, que la distribution des hauteurs par événement pluvieux suit une loi exponentielle ;
- d'après (1), les occurrences des événements pluvieux peuvent être décrites par un processus de Poisson [11] : sur toute période au cours de laquelle le processus d'apparition des événements pluvieux peut être considéré comme stationnaire, les durées entre deux événements pluvieux successifs suivent une distribution exponentielle d'espérance  $\tau$ , et le nombre d'événements pluvieux au cours d'un intervalle de temps quelconque,  $T$ , suit une loi de Poisson dont le paramètre,  $\lambda$ , est égal à  $T/\tau$ .

La LDF a été utilisée et validée pour décrire les régimes mensuels des pluies de l'Afrique de l'Ouest [12], du Bénin [13], du Niger [14] et du Burkina Faso [15].



Carte. Répartition des postes ayant un taux de lacunes inférieur à 20 % (rectangle en pointillé).

Pour mieux suivre les variations saisonnières des régimes au cours d'une année moyenne, ce modèle a été appliqué aux cumuls pluviométriques journaliers. Un régime pluviométrique sera défini en un point par deux vecteurs de 365 valeurs journalières :

- celui des  $\lambda_j$ , nombre moyen d'événements pluvieux pour le jour  $j$  ;
- celui des  $\mu_j$ , hauteur moyenne d'un événement pluvieux survenant au jour  $j$ . Ils sont calculés à partir des données disponibles pour les sous-périodes 1951-1970 et 1971-1990. Les caractéristiques de ces deux distributions sont résumées dans le tableau 1.

## Estimation des paramètres du modèle

L'estimation des paramètres du modèle s'appuie sur la seule information pluviométrique disponible que sont les cumuls journaliers des stations pluviométriques. Le problème qui se pose peut être illus-

tré par la figure 1. Selon le pouvoir de résolution offert par les instruments de mesure de la pluie, une même séquence pluvieuse enregistrée sur une période de temps donnée peut être représentée suivant trois niveaux.

- Le niveau 1 est la résolution que pourrait offrir un pluviographe. Il représenterait la « réalité » par une succession d'événements pluvieux de formes et de durées variables séparées par des intervalles variables.
- Cette « réalité » est appréhendée dans le niveau 2 par un pluviomètre journalier. Un jour pluvieux peut comporter un ou plusieurs débuts d'événements, mais il

peut également n'en comporter aucun et résulter uniquement d'événements pluvieux débutés précédemment. Les hauteurs journalières dépendent alors de la forme des événements pluvieux qui conditionne l'importance des débordements d'événements pluvieux d'un jour sur l'autre.

- Le niveau 3 représente la description que fait le modèle des deux niveaux sus-jacents considérés comme niveaux de référence dans cette approche de modélisation.

La durée des événements pluvieux est négligée dans cette étude et un jour n'est pluvieux que s'il connaît un début d'événement. Les distributions des hauteurs journalières observées ne résultent donc pas des seuls processus du modèle évoqués plus haut. Et il n'est pas possible de déduire les paramètres du modèle par l'ajustement d'une LDF dans sa définition classique [7] à ces distributions expérimentales. On peut cependant montrer que, quelle que soit la forme des événements pluvieux, l'espérance des hauteurs journalières déduite du modèle est égale à celle correspondant à la réalité [11]. Dans ces conditions, si on note  $\hat{\lambda}$  et  $\hat{\mu}$  les estimateurs respectifs de  $\lambda$  et de  $\mu$ , et  $E(h)$ , l'espérance des hauteurs journalières, on a la relation :

$$\hat{\lambda} \cdot \hat{\mu} = E(h) \quad (1)$$

Le calcul de l'un des deux paramètres est simplifié par la relation (1). Si on fait l'hypothèse que la durée d'un événement pluvieux est toujours inférieure à la journée, on peut montrer que l'on a les égalités suivantes [11] :

- Probabilité qu'un jour soit sec :

$$P_0 = \exp[-\lambda (1 + D)] \quad (2)$$

Probabilité que deux jours consécutifs soient secs :

$$P_{00} = \exp[-\lambda (2 + D)] \quad (3)$$

Tableau 1. Expression des deux lois initiales du modèle et de leurs premiers moments

Variable	Probabilité ou densité	Moyenne	Variance
Nombre $n$ , d'événements au jour $j$ (Loi de Poisson)	$Pr ob(n) = \frac{\text{Exp}(-\lambda_j) \cdot \lambda_j^n}{n!}$	$\lambda_j$	$\lambda_j$
Hauteurs $c$ , d'événements au jour $j$ (Loi exponentielle)	$f(c) = \text{Exp}(-\frac{c}{\mu_j}) \cdot \frac{dc}{\mu_j}$	$\mu_j$	$\mu_j^2$

## Références

13. Le Barbé L, Ale G, Millet B, Texier H, Borel Y, Gualde R. *Les ressources en eaux superficielles de la république du Bénin*. Montpellier : Orstom 1985.

14. Radji G. *Étude des régimes pluviométriques du Niger : caractéristiques des distributions mensuelles et variations observées au cours des 40 dernières années*. Mémoire de fin d'études d'ingénieur d'application en hydrologie, Centre régional de formation et d'application en agrométéorologie et hydrologie opérationnelle, Niamey, 1991; 53 p. + annexes.

15. Tapsoba D. *Contribution à l'étude des variations spatio-temporelles des précipitations au Burkina-Faso à partir du modèle de la loi des fuites*. Mémoire de DEA, Univ. Paris 11, 1993; 94 p.

16. Bouvier C. *Contribution à l'étude du ruissellement urbain en Afrique de l'Ouest Application à la simulation des écoulements sur petits bassins urbains*. Thèse de l'Université de Montpellier II, 1989; 313 p.

17. Ndoye ID. *Étude fréquentielle comparative de quelques caractéristiques des averses en Afrique de l'Ouest*. Mémoire d'ingénieur de l'EITARC, Montpellier, 1988.

18. Hubert P, Carbonnel JP, Chaouche A. *Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest*. *J Hydrol* 1989; 110 : 349-67.

19. Demaree GR, Nicolis C. *Onset of Sahelian drought viewed as a fluctuation induced transition*. *Quart Jour Roy Met. Soc* 1990; 116 : 221-38.

20. Hamilton RA, Archbold J. *Meteorology of Nigeria and Adjacent Territory*. *Quart J Roy Meteor Soc* 1945; 71 : 231-64.

21. Janicot S, Moran V, Fontaine B. *Sahel Droughts and ENSO dynamics*. *Geoph Res Letters* 1996; 5 : 515-8.

22. Wotling G, Mahe G, Le Barbé L, l'hote Y. *Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la Mousson africaine*. *Veille Climatologique Satellitaire* 1994; 52 : 58-73.

23. Gnamien B. *Étude des lignes de grains africaines par imagerie satellitaire*. Thèse de l'Université de Paris 7, 1990; 217 p.

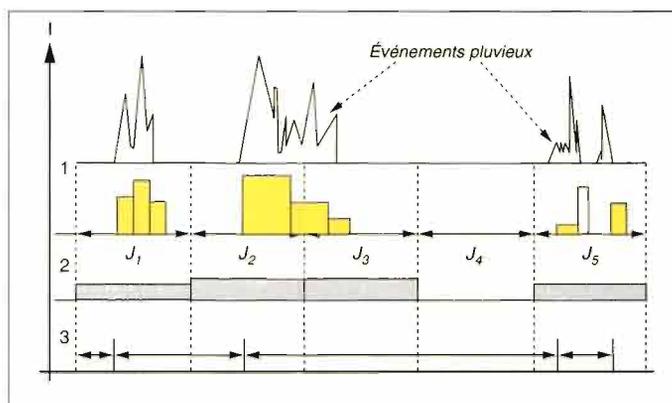


Figure 1. Une même séquence pluvieuse vue par un pluviographe (1), par des relevés quotidiens (2) et selon le modèle (3). ( $J_1 = \text{jour 1}$ ,  $J_5 = \text{jour 2...}$ ,  $l = \text{intensité}$ ).

$D$  étant l'espérance de la durée des événements pluvieux.

Si  $D$  est connu, l'expression (2) permet de prendre pour estimateur de  $\lambda$

$$\hat{\lambda} = -\ln(N_0/N)/(1+D) \quad (4)$$

où  $N_0$  est le nombre de jours secs et  $N$  le nombre total de jours.

Dans le cas contraire, en combinant les expressions (2) et (3), on obtient :

$$\hat{\lambda} = -\ln(N_{00}/N_0) \quad (5)$$

où  $N_{00}$  est le nombre de séquences de deux jours secs observées au cours de la chronique de  $N$  jours. On en déduit que

$$P_0 = (N_0/N) \text{ et } P_{00} = N_{00}/N$$

Les analyses des séries pluviographiques existantes en Afrique de l'Ouest [16-17], montrent que, sauf sur la côte, la durée moyenne des averses varie très peu sur des zones géographiques importantes. Les valeurs trouvées sont toutes comprises entre 56 et 60 mn. En raison de cette homogénéité, il suffit donc de quelques postes pluviographiques pour estimer convenablement  $D$  sur l'ensemble de la zone étudiée. Dans ce travail, la valeur adoptée comme durée moyenne d'événement est 60 mn. Le biais ainsi introduit sur l'estimation de  $\lambda$  est toujours faible. En effet, en supposant que la durée  $D$  est de 0,05 jours, les biais qui seraient causés par des erreurs de 100 et 50 %, en plus ou moins, commises sur  $D$ , sont toujours inférieurs à 5 et à 2 %, respectivement.

## Application du modèle

Les analyses des séries pluviométriques de longues durées observées en Afrique de l'Ouest mettent en évidence des ruptures de stationnarité. La plus récente se situe vers 1970 [6, 18, 19]. Nous avons donc choisi d'appliquer le modèle présenté plus haut sur deux périodes de 20 ans : 1951-1970 et 1971-1990, la faible densité des réseaux pluviométriques avant 1950 [11], ne nous permettant pas de remonter plus loin dans le temps. Cependant, la brièveté des périodes choisies ne permettait pas d'estimer les paramètres du modèle jour par jour, les variances d'estimation étant trop élevées. Pour cette raison, l'estimation des paramètres pour un jour donné est faite à partir d'une fenêtre temporelle positionnée de part et d'autre de ce jour. Le choix de la taille de cette fenêtre résulte d'un compromis entre deux contraintes antagonistes : celle d'augmenter la taille des échantillons pour minimiser la variance des estimateurs, et celle de suivre au plus près les évolutions saisonnières des paramètres.

Pour le nombre moyen d'événements pluvieux par jour, nous avons utilisé des voisinages glissants de 11 jours, intervalle sur lequel nous avons vérifié la stabilité des estimateurs par rapport à ce paramètre.

Pour un échantillon de 220 valeurs (20 années d'observations x 11 jours), les intervalles de confiance varient entre 0,04 pour un  $\lambda = 0,1$  et 0,15 pour un  $\lambda = 1$ . La plage de variation de  $\lambda$  (0,1 à 1) re-

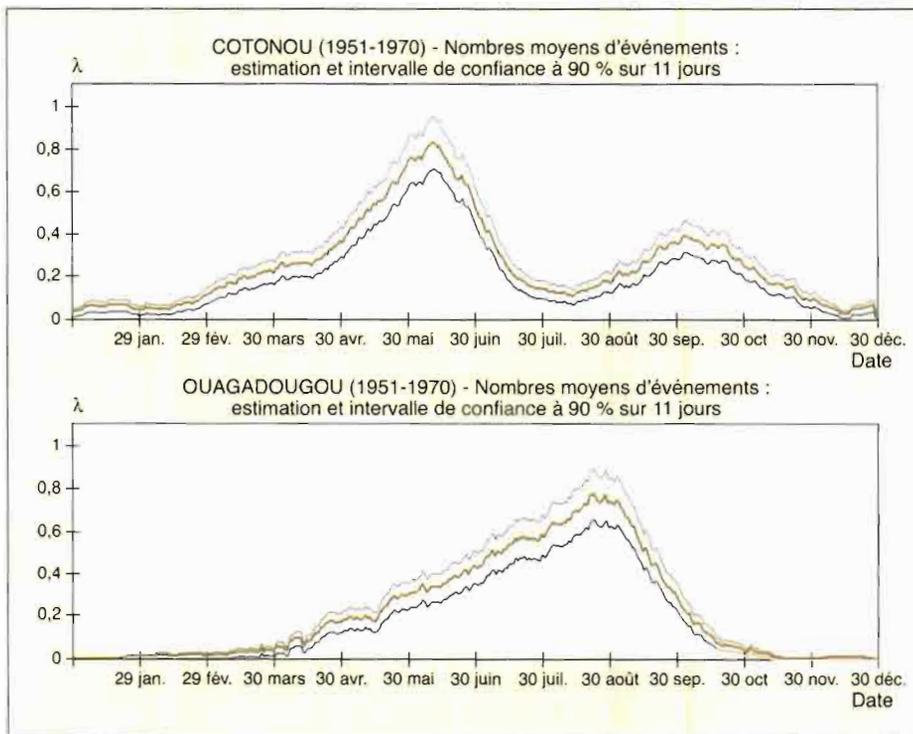


Figure 2. Intervalles de confiance sur les estimateurs obtenus par l'estimation au pas de 11 jours.

tenue encadre celle qui est observée en Afrique de l'Ouest dans le cadre de l'expérience EPSAT-Niger. Les coefficients de variation des estimateurs de  $\lambda$  et  $\mu$  étant égaux, on peut déduire les intervalles de confiance de la hauteur moyenne par événement de ceux de leur nombre.

Pour une hauteur de 12 mm, qui est l'ordre de grandeur des valeurs rencontrées en Afrique de l'Ouest, ces intervalles varieraient entre 4,6 mm pour  $\lambda = 0,1$  et 2 mm pour  $\lambda = 1$ . Sur la figure 2, pour le pas de temps de 11 jours choisi, sont indiqués les intervalles de confiance correspondants pour deux stations (Cotonou et Ouagadougou). Pour les hauteurs par événement pluvieux, la taille du voisinage d'un jour donné est choisie de façon à ce que le coefficient de variation de l'estimateur soit inférieur à 12 %. La fenêtre ne doit cependant pas excéder 40 jours ni être inférieure à 15 jours. Cette façon de procéder est justifiée par le fait que les variations saisonnières et même spatiales de la hauteur moyenne par événement sont beaucoup plus lentes que celles du nombre journalier moyen d'événements pluvieux [11]. Nous avons utilisé toutes les stations pluviomé-

triques dont nous possédions les données, et pour lesquelles les chroniques observées étaient d'au moins seize ans pour chaque période avec un taux de lacune journalier en dessous de 20 %. Trois cent trente-six postes ont été retenus pour 1951-1970 et 388 pour 1971-1990. Ces choix sont justifiés par la nécessité de disposer de postes ayant des données suffisamment complètes et offrant en même temps une couverture spatiale satisfaisante. Les emplacements de ces stations sont indiqués sur la carte. Les paramètres journaliers trouvés à ces stations ont ensuite été interpolés par krigeage [11] de grilles de  $0,1^\circ$  de résolution. Pour chaque période, l'ensemble des régimes pluviométriques ouest-africains est donc décrit par des grilles journalières pour chaque paramètre du modèle. Ces grilles constituent un outil intéressant pour l'analyse climatique car elles permettent de suivre dans l'espace et dans le temps l'évolution du nombre et des hauteurs des événements pluvieux et permettent donc une description précise des régimes pluviométriques. Elles permettent aussi de faire la part entre les effets du nombre et ceux des hauteurs et donc de préciser le déficit moyen des cumuls pluviométriques

au cours de la période sèche survenue récemment.

## Résultats

Il n'est évidemment pas possible de présenter ici l'ensemble des 1 460 grilles ou cartes (365 jours x 2 paramètres x 2 sous-périodes). Leur analyse permet de suivre la mise en place de la saison des pluies et son retrait. La résolution événementielle employée permet de préciser quelques caractéristiques des régimes pluviométriques ouest-africains que ne peut autoriser l'analyse des champs des cumuls annuels et mensuels. Une succession de cartes indiquant la répartition des nombres moyens d'événements pluvieux pour quelques jours de l'année est présentée sur la figure 3. Un gradient nord-sud est observé sur ces cartes le 10 et le 30 mai avec un maximum au sud et à la latitude moyenne de  $10^\circ$  N au niveau des reliefs guinéens. Deux zones déficitaires particulièrement importantes sont observées : une première, à l'est des reliefs guinéens, et une seconde entre la côte Togolo-Bénoise et l'Atakora. La première est connue sous le nom de « V » Baoulé. La structure des champs des nombres d'événements pluvieux change radicalement après le mois de mai. Le gradient nord-sud constaté jusque-là disparaît. Le maximum de nombres d'événements pluvieux constaté dans les massifs guinéens à la fin du mois de mai à la latitude moyenne de  $10^\circ$  N, s'étend vers l'est, entre  $11^\circ$  N et  $12^\circ$  N. Au sud, les nombres d'événements pluvieux chutent rapidement, isolant une zone sèche entre la côte et  $9^\circ$  N, tandis qu'au nord, la décroissance est plus progressive. L'orographie modifie localement ce schéma, notamment sur les monts de Guinée et sur l'Atakora. Au voisinage des reliefs, on note des nombres d'événements pluvieux plus importants. L'évolution et l'organisation générale des champs sont identiques au cours des deux périodes. On retrouve les mêmes structures au cours des deux périodes. La période 1971-1990 apparaît cependant très déficitaire par rapport à la période antérieure, comme en témoigne le décalage général des courbes d'isovaleurs vers le sud. La latitude est le principal facteur discriminant des régimes pluviométriques en

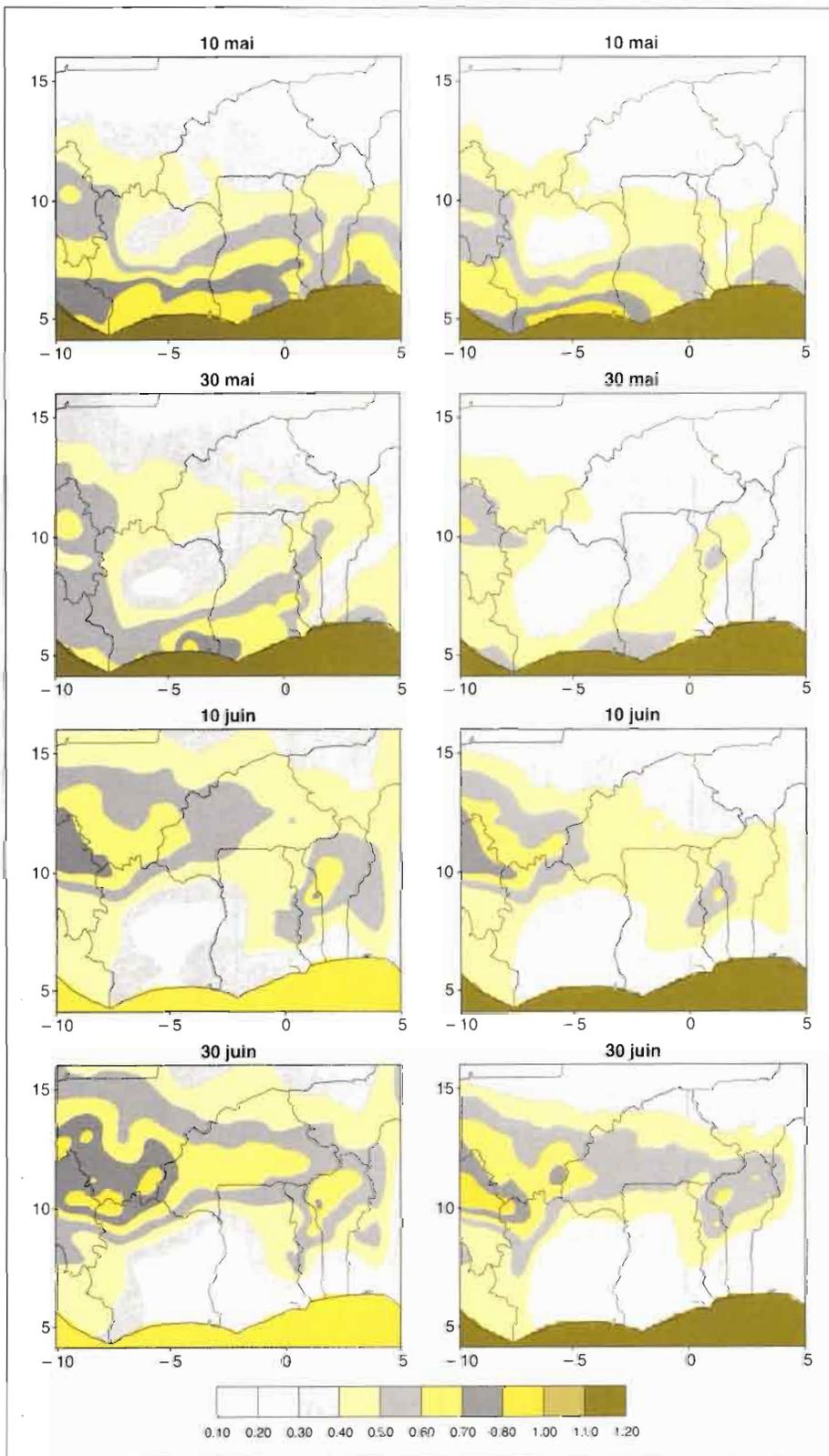


Figure 3. Cartes de la répartition des nombres moyens d'événements pour quelques jours au cours des périodes 1951-1970 [colonne de gauche] et 1971-1990 [colonne de droite].

Afrique de l'Ouest. Aussi avons-nous tenté de synthétiser une grande partie de l'information pluviométrique dispo-

nible sur toutes les cartes journalières dans des diagrammes temps/latitude donnant l'évolution des nombres

moyens journaliers d'événements et des hauteurs par événement (figure 4) suivant un transect fait à 5° O.

Analogie de la répartition des hauteurs moyennes par événement avec le schéma de Hamilton et Archbold

La structure ou le profil méridien de l'atmosphère au niveau de l'Afrique de l'Ouest ont été décrits par Hamilton et Archbold [20]. Sur ce profil, ils distinguent cinq zones, de taille variable selon la saison, correspondant chacune à un type de temps. Ils expliquent les différents régimes pluviométriques d'Afrique de l'Ouest par le flux et le reflux de l'ensemble de ce profil sur le continent. Ce profil et les différentes zones qui le constituent sont résumés dans le tableau II. Il constitue l'explication classiquement admise du passage progressif, du nord au sud, des régimes avec une seule saison des pluies (régions balayées par les zones A, B et C1) à ceux avec deux saisons séparées par une petite saison sèche (régions balayées par B, C1, C2, D).

Les évolutions des hauteurs par événements pluvieux (figure 4) correspondent assez bien au schéma « classique » de la répartition des pluies en Afrique de l'Ouest proposé par ces deux auteurs. En hiver (décembre à février), les hauteurs forment un plateau jusqu'à 400 km de la côte et chutent brutalement ensuite. Les deux périodes sont à peu près identiques. On constate cependant des maxima à des latitudes élevées, au cours des années 1971-1990, en janvier-décembre, ce qui semble indiquer une fréquence accrue des pluies « d'advections froides ». En été, on constate un bon parallélisme entre l'évolution des hauteurs et celle du profil méridien donné par Hamilton et Archbold [20]. Les hauteurs élevées sur la bande côtière du mois de juin correspondent à l'arrivée de l'EM (Équateur météorologique) sur le continent. La chute des hauteurs au sud et l'évolution de leur gradient méridien constatées ensuite, s'expliquent par la disparition de la structure verticale de l'EM et l'allure en biseau qu'il prend alors. On retrouve la zonation d'Hamilton et Archbold : du sud au nord, la zone D où les hauteurs sont très faibles, la zone C1 où les hauteurs sont maximales, la zone C2 où elles sont voisines de 12 mm, et la zone B où apparaît un gradient N-S très mar-

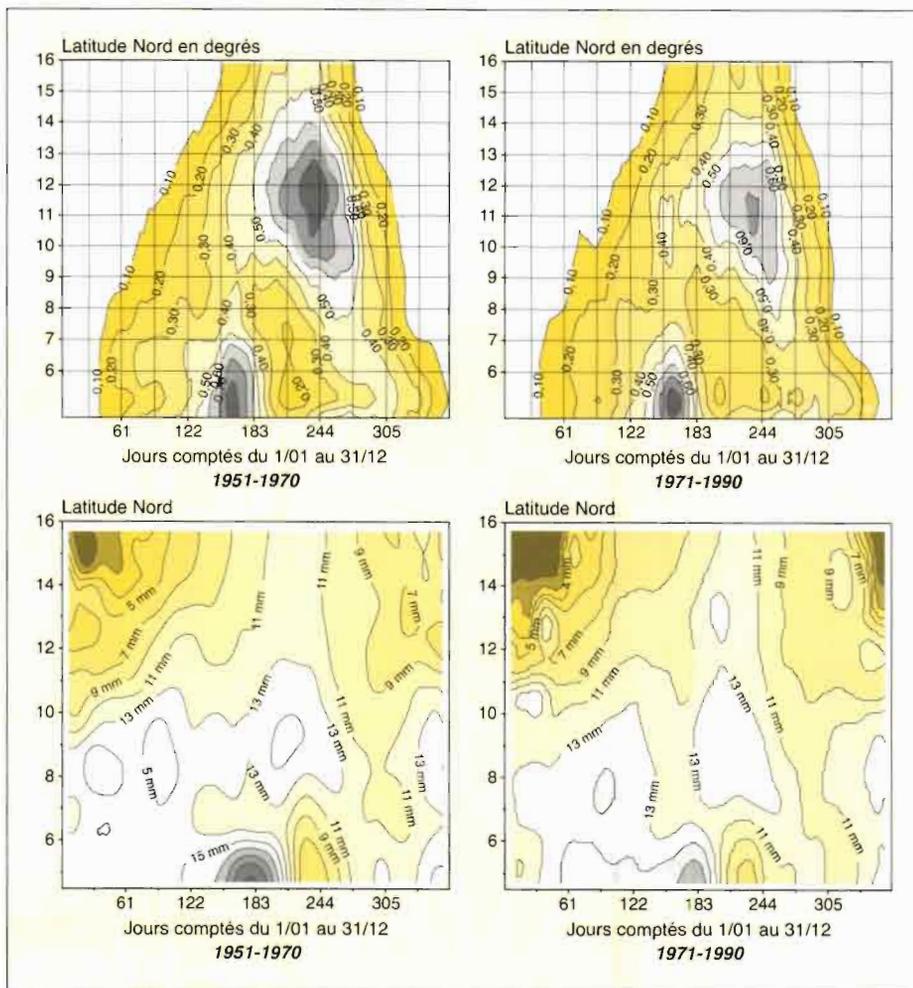


Figure 4. Diagrammes spatio-temporels des nombres d'événements (en haut) et des hauteurs d'événements (en bas) avant et après 1970.

qué en début de saison, minimal en août et augmentant ensuite. Sur cette coupe, comme sur l'ensemble de la zone d'étude, on constate après 1970, un glissement vers le sud, de l'ensemble de ces structures, d'environ 1° de latitude. Il est tentant de rapprocher ce décalage de l'évolution de la différence inter-hémisphérique de la température de surface de l'océan [21, 22] qui indique une rupture autour des années 70. Le refroidissement relatif des températures de sur-

face océanique boréale, s'accompagnerait d'une baisse de la pénétration de la mousson et pourrait également expliquer l'augmentation des pluies d'advections froides que semblent montrer nos résultats.

#### Répartition des nombres moyens d'événements pluvieux

Dans la répartition des nombres moyens d'événements par jour (figure 4), on ne

peut suivre de façon continue, comme le suppose implicitement le schéma de Hamilton et Archbold, la mise en place et le retrait de la saison des pluies. On peut identifier cinq phases :

- De décembre à avril, les pluies, exception faite des « pluies des mangues », sont essentiellement limitées au domaine côtier. Elles résultent de la convergence de flux de basses couches liées à des conditions locales.
- De mai à fin juin, la montée de l'EM va entraîner une augmentation brutale du nombre d'événements sur toute la région, se traduisant par un maximum à la date du 15 juin, très marqué au sud,

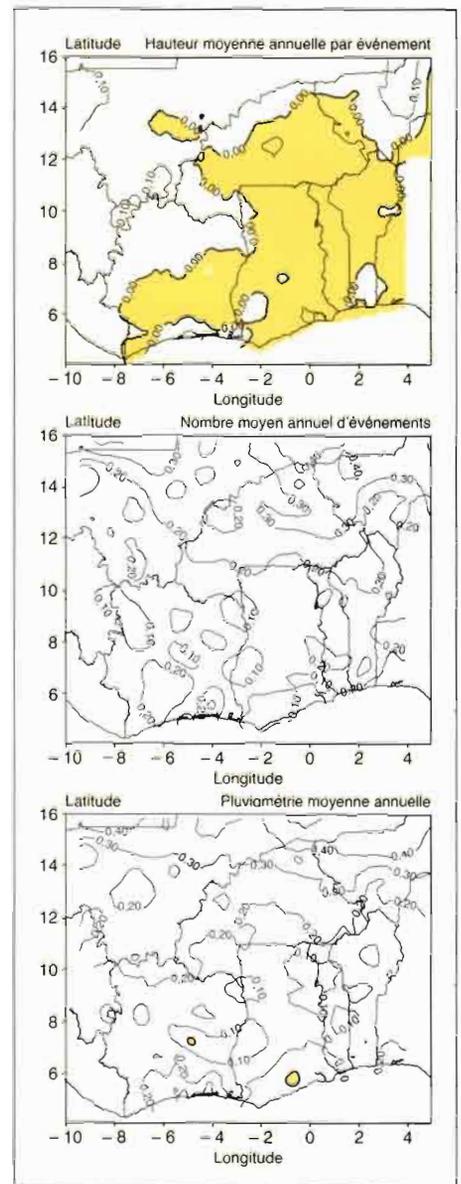


Figure 5. Déficiants relatifs entre les périodes 1951-1970 et 1971-1990.

Tableau II. Profil méridien de l'atmosphère et types de temps (d'après Gnamien [23])				
Intitulé des zones	Limite nord en mars	Limite nord en juillet	Épaisseur de la mousson	Type de temps
A				Pas de pluies
B	11° N	23° N	0 à 1 000 m	Orages isolés
C1	10° N	15° N	1 000 à 4 000 m	Lignes de grains
C2	7° N	10° N	1 000 à 4 000 m	Pluies de mousson
D		7° N	2 000 m	Petite saison sèche

à peine perceptible au nord. Les pluies sont essentiellement des pluies de mousson. À partir du 15 juin, on constate une baisse générale du nombre d'événements.

– *De juillet à fin août*, au sud va s'installer une petite saison sèche très marquée entre la côte et 9° N ; elle s'installe fin juin, mais légèrement plus tôt à 9° N que sur la côte, et sa durée croît du sud au nord. Sur la côte, elle se termine à la fin du mois d'août à 9° N. Il n'y a pas de coïncidence parfaite entre ce domaine et celui de la zone D identifiée sur les hauteurs ; elle est à la fois plus précoce et plus étendue en latitude. La contradiction n'est qu'apparente. Cela indique simplement que si les événements deviennent plus rares, ils relèvent cependant des mêmes mécanismes. On ne peut pas expliquer cette saison sèche par le flux et le reflux sur le continent des zones de Hamilton et Archbold [20]. Au nord de la zone sèche, les pluies vont reprendre sans que l'on puisse distinguer une dynamique méridienne. La répartition des nombres d'événements va se faire de part et d'autre d'un maximum entre 11° N et 12° N, qui va rester à la même place jusqu'à la fin du mois d'août. Les pluies seraient essentiellement dues aux lignes de grains dont la fréquence d'apparition est maximale à cette latitude et à cette période de l'année [23].

– *De septembre à la mi-octobre*, ce maximum va migrer vers le sud, entraînant l'arrêt progressif de la saison des pluies du nord au sud. À la mi-octobre il se situe vers 7° N ; on peut fixer à cette date la fin des lignes de grains.

– *À partir de mi-octobre*, les pluies sont limitées à la bande côtière et seraient liées aux pluies de mousson.

### Analyse du déficit à l'échelle annuelle

Les déficits relatifs des hauteurs d'événements, des nombres d'événements et des cumulés ont été cartographiés (*figure 5*).

On note que l'essentiel des déficits pluviométriques est imputable à une chute relative du nombre d'événements : 20 à 40 % au Sahel, 10 à 20 % au sud de 10° N. Les différences relatives des hauteurs d'événements sont organisées en deux grandes zones : une zone est légèrement excédentaire en moyenne de 3,5 % et, une zone ouest, déficitaire en moyenne de 5 %.

### Analyse du déficit au cours d'une saison moyenne

La répartition saisonnière des déficits entre les deux périodes ne se fait pas partout de la même façon. On peut distinguer quatre types : un correspondant au domaine spatio-temporel des pluies de mousson, deux aux domaines des lignes de grains, et le dernier au domaine de la petite saison sèche. Dans le domaine spatio-temporel balayé par les pluies de mousson, le déficit en nombres comme en hauteurs d'événements est synchrone sur l'ensemble du domaine et leur ampleur décroît rapidement du sud au nord. Dans la région des lignes de grains, de 11° N à 16° N, la répartition saisonnière du déficit en nombres d'événements est quasiment identique partout. Le maximum (0,15 événement par jour) est atteint le 15 août. Pour les hauteurs par événement, en revanche, les déficits sont plus forts au nord (1,5 mm) qu'au sud où ils sont quasi nuls. Au sud de 10° N, de la fin août au début octobre, les déficits en nombres d'événements accompagnent la migration vers le sud des lignes de grains. Les hauteurs par événement de la deuxième période sont égales ou très légèrement supérieures à celles de la première période (inférieures à 1 mm). Dans le domaine de la petite saison sèche, aux marges de la saison sèche, on observe au cours de la période récente un excédent aussi bien en nombres moyens d'événements qu'en hauteurs moyennes par événement.

## Conclusion

La distinction faite entre les effets du nombre et ceux de l'intensité des événements a permis de mieux caractériser la sécheresse après 1970. On a pu ainsi localiser dans le temps et dans l'espace, les déficits pluviométriques et préciser les indicateurs pertinents. À l'échelle annuelle, la baisse de la pluviométrie est imputable en grande partie à une chute généralisée des nombres d'événements (15 événements en moyenne), soit un déficit variant entre 20 et 40 % au Sahel et entre 10 et 20 % au sud de 10° N. Les hauteurs par événement ont, quant à elles, peu varié et pas de façon uniforme. Les différences relatives des hauteurs par événement avant et après 1970 sont organisées en deux grandes zones de part et d'autre d'une ligne d'orientation SO-NE, délimitant une zone SE légèrement excédentaire en moyenne de 3,5 % et une zone NO déficitaire en moyenne de 5 % ■

---

### Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui ont œuvré et qui continuent à œuvrer pour l'observation, la collecte et l'archivage des données pluviométriques.

---

## Résumé

Une approche stochastique fondée sur le modèle de la Loi des fuites (LDF) ou de la Loi composée Poisson exponentielle (LCPE) a été appliquée aux chroniques de pluies journalières de deux périodes climatiques contrastées en Afrique de l'Ouest : 1951-1970 et 1971-1990. Pour chacune des périodes, on a pu ainsi préciser en tout point d'un domaine géographique compris entre les latitudes 6° N et 16° N et les longitudes 10° O et 5° E, les caractéristiques de la distribution de deux composantes de la pluviométrie : le nombre moyen d'événements pluvieux par jour ( $\lambda$ ) et la hauteur moyenne par événement ( $\mu$ ). Ces deux distributions sont les paramètres du modèle. Le régime pluviométrique en un point est défini par deux vecteurs de 365 valeurs décrivant les évolutions moyennes de ces deux paramètres journaliers au cours de chaque période. La régionalisation de ces deux vecteurs facilite la constitution de grilles journalières dont l'analyse permet de décrire avec une bonne précision les régimes pluviométriques au cours de ces deux périodes. Sur le déficit pluviométrique constaté sur la zone d'étude après 1970, une chute du nombre moyen d'événements pluvieux au cœur même de la saison des pluies semble en être l'un des indicateurs explicites. La hauteur moyenne par événement pluvieux ne variant, elle, que très faiblement sur cette période sèche.

*Sujet : Hydrologie.*

## Summary

The compound Poisson exponential (LCPE) distribution was applied to daily rainfall during the two periods 1951-1970 and 1971-1990 in West Africa (0°-5° in longitude; 6°-16° in latitude). For this site and for each of these periods the distributional characteristics of two components of rainfall, the mean numbers of events per day ( $\lambda$ ) and the mean depth of events ( $\mu$ ), have been estimated. These two components constitute the parameters of the model. The analysis of these parameters allows the climatology of the regimes to be mapped over the last 40 years with a high resolution and it points out that the drought observed since 1970 is due to the decrease in the number of events within the rainy season, rather than to a change in the mean depth per event.