

Procédures d'identification de « ruptures » dans des séries chronologiques – modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne

J. E. PATUREL, E. SERVAT, B. KOUAME, J. F. BOYER
Antenne Hydrologique Orstom, 06 BP 1203 Cidex 1, Abidjan 06, Côte d'Ivoire

H. LUBES NIEL
Orstom, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France

J. M. MASSON
Laboratoire Géofluides-Bassins-Eau, URA-CNRS 1765, Université Montpellier II, place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex, France

Résumé Dans le cadre du projet FRIEND-AOC, le programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne) a pour objet l'identification d'une éventuelle « rupture » dans les séries chronologiques pluviométriques et hydrométriques. L'analyse faite ici a porté sur les précipitations annuelles de quatre pays riverains du Golfe de Guinée: Bénin, Côte d'Ivoire, Ghana et Togo. Les données couvrent les décennies 1950 à 1980 incluses. Des méthodes statistiques de détection de ruptures au sein de séries chronologiques et des représentations graphiques nous ont permis de mettre en évidence une modification du comportement moyen de la pluviométrie: on observe une chute brutale de la pluviométrie autour de l'année 1970. Les représentations cartographiques montrent le net glissement des isohyètes vers le Sud et rend bien compte de la dimension régionale du phénomène de baisse du régime pluviométrique déjà observé à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest sahélienne.

Tests for detecting "discontinuities" in hydrological time series – changes in the rainfall regime in non sahelian western Africa

Abstract This paper presents the first processing and results of the research programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne). This programme is included in the FRIEND-AOC Project and attempts to identify discontinuities in rainfall and hydrometric time series. The work is based on the analysis of annual rainfalls and rainfall indices from four countries lining the Gulf of Guinea: Ivory Coast, Ghana, Benin and Togo. The study period is the four decades from the 1950s to the 1980s inclusive. Statistical tools for detecting discontinuities in data series and mapping procedures bring to light the modification of the average behaviour of the rainfall system in the region. The results reveal a sharp fall in the rainfall totals around 1970. At a regional scale, mapping the results shows a clear shift of the isohyets towards the south. This is in accordance with the findings of many hydrological studies in west Africa.

INTRODUCTION

Dans les régions soudano-sahéliennes, une tendance à la baisse de la pluviométrie et des écoulements est observée depuis plus de vingt ans (Hubert *et al.*, 1987, 1989; Sircoulon, 1987; Demarée, 1990). Plus au sud, dans les pays situés en bordure du Golfe de Guinée, les effets de cette sécheresse se font également ressentir (Sutcliffe *et al.*, 1987; Nicholson *et al.*, 1988; Mahé *et al.*, 1991; Olivry *et al.*, 1993). Une telle perturbation dans le régime des pluies, comme des écoulements, peut avoir des conséquences non négligeables voire tragiques: risque de pénaliser les projets de développement liés à l'agriculture et de nuire au bon fonctionnement des aménagements réalisés antérieurement à ces changements qualifiés *a priori* de climatiques.

La présente étude s'inscrit dans le programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'ouest non sahélienne) du projet FRIEND-AOC/UNESCO qui a pour objet d'identifier des variations d'ordre climatique en Afrique de l'Ouest non-sahélienne (Servat, 1994). La caractérisation de ces fluctuations climatiques repose sur l'analyse statistique des séries chronologiques de pluie (ou de débit) à différents sites, sur des périodes les plus longues possibles. De simples représentations graphiques peuvent également les mettre clairement en évidence. L'étude de la pluviométrie sur quatre pays qui bordent le Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Ghana, Togo et Bénin) illustrera notre propos.

METHODES STATISTIQUES DE DETECTION DE RUPTURES

Une « rupture » peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologique étudiées (Lubes *et al.*, 1994).

Le choix des méthodes retenues repose sur la robustesse de leur fondement et sur les conclusions d'une étude de simulation de séries aléatoires artificiellement perturbées (Bonneaud, 1994). Elles permettent de détecter un changement dans la moyenne de la variable traitée dans la série. A l'exception de l'approche de Pettitt, elles supposent un non-changement de la variance de la série étudiée. Ces méthodes ne sont pas toutes adaptées à la recherche de plusieurs ruptures dans une même série.

Test de Pettitt (Pettitt, 1979)

L'approche de Pettitt est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle.

La mise en oeuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (x_i) $i = 1$ à t et $t + 1$ à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$; 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$.

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

Méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee *et al.*, 1977)

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle.

Le modèle de base de la procédure est le suivant:

$$x_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \epsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases}$$

Les ϵ_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 ; t et d représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. La méthode établit la distribution de probabilité *a posteriori* de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

Statistique U de Buishand (Buishand, 1982, 1984)

La procédure de Buishand fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian.

En supposant une distribution *a priori* uniforme pour la position du point de rupture t , la statistique U de Buishand est définie par:

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (S_k^* / Dx)^2}{N(N+1)}$$

où:

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})$$

pour $k = 1, \dots, N$ et Dx désigne l'écart type de la série.

En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test.

Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (x_i) . La variable S_k , définie au-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $k(N-k)N^{-1}\sigma^2$, $k = 0, \dots, N$ sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des (x_i) . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des S_k .

Segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989)

La procédure de segmentation de séries chronologiques est quant à elle appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. Elle fournit au moyen d'un algorithme spécifique une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes au regard du test de Scheffé (Dagnélie, 1975).

REPRESENTATIONS CARTOGRAPHIQUES RETENUES POUR NOTRE ETUDE

Les représentations choisies sont:

- des courbes isohyètes interannuelles par décennie depuis 1950;
- des courbes d'isovaleurs d'indices pluviométriques. Pour évaluer les variations de la pluviométrie annuelle, Nicholson et al. (1988) a défini un indice pluviométrique qui, calculé chaque année sur la période 1950-1989, s'exprime par:

$$\frac{(x_i - \bar{x})}{s}$$

où x_i désigne la pluviométrie de l'année i , \bar{x} la pluviométrie moyenne sur la période 1950-1989 et s l'écart-type de la pluviométrie sur la période 1950-1989. Le tracé des

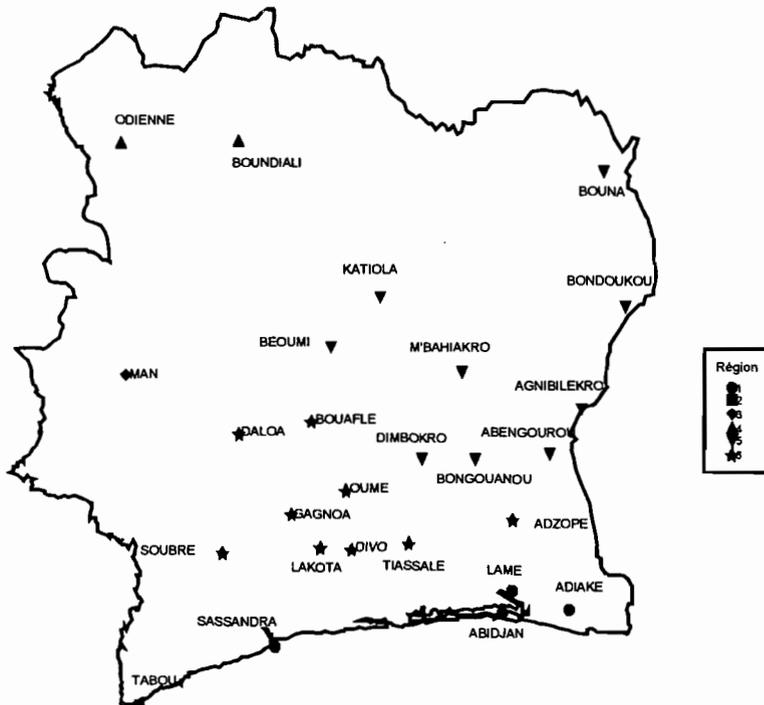
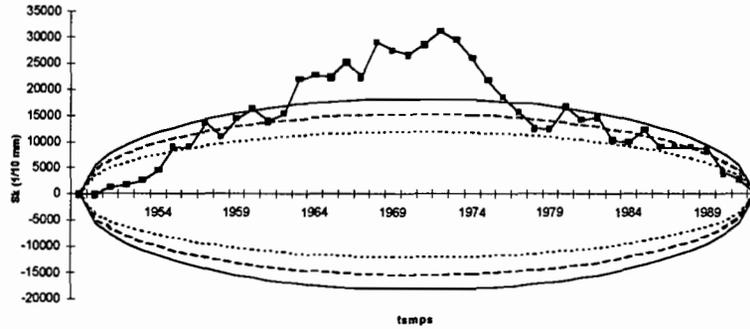
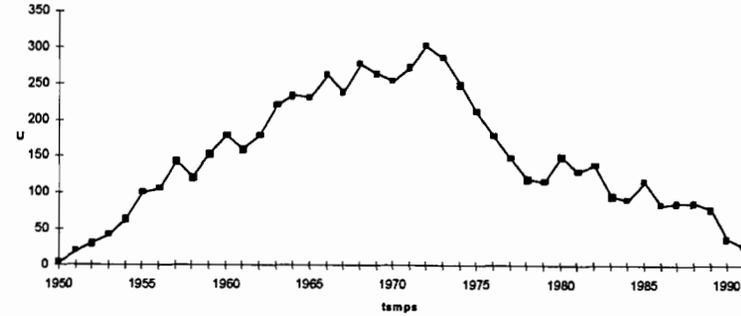


Fig. 1 Implantation des postes analysés en Côte d'Ivoire.

Ellipses de contrôle à 85, 90 et 80% - variable U de Bulshand
Cumul des hauteurs de pluie sur l'année entière - 1090005200 BOUAFLE



Evolution de la variable U du Test de Pettitt
Cumul des hauteurs de pluie sur l'année entière - 1090005200 BOUAFLE



ORSTOM / Abidjan Antenne Hydrologique
Résultats des procédures de détection de rupture dans des séries chronologiques
 Nom de la station : 1090005200 BOUAFLE
 Variable étudiée : Cumul des hauteurs de pluie sur l'année entière
 la période d'observation s'étend de 1950 à 1992
ETAPE N° 1 : vérification du caractère aléatoire des séries
 Autocorrélation test effectué
 Corrélation sur le rang test effectué
 valeur de la variable de calcul : -2.83613
 Série non aléatoire au seuil de 95%
 Série non aléatoire au seuil de 90%
 Série non aléatoire au seuil de 80%
ETAPE N° 2 : détection de ruptures
 Test de Bulshand test effectué
 rupture détectée au seuil de 10%
 rupture détectée au seuil de 5%
 rupture détectée au seuil de 1%
 Test de Pettitt test effectué
 rupture détectée dans la série
 Année supposée de rupture : 1972
 Probabilité de dépassement : 2.40E-03
 Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian test effectué
 Année supposée de rupture : 1972
 Probabilité d'une rupture : 0.315258

Segmentation de Hubert test effectué		
niveau de signification : 0.05		
Début	Fin	
1950	1972	
1973	1992	

Procédure de Lee et Heghinian - Distribution a posteriori de la position d'un changement
Cumul des hauteurs de pluie sur l'année entière - 1090005200 BOUAFLE



Fig. 2 Application des tests de détection de rupture – exemple de Bouafilé.

indices pluviométriques interannuels calculés par décennie traduit un déficit ou un excédent de la pluviométrie.

DONNEES DE L'ETUDE

Les données de pluie proviennent des réseaux pluviométriques nationaux des quatre pays concernés. Les données couvrent les décennies 1950 à 1980 incluses. Les seules stations prises en compte sont celles qui répondent à des critères de pourcentages de lacunes faibles et de longues durées d'observation. Les données traitées sont les totaux annuels précipités.

Concernant l'application des méthodes statistiques de ruptures, seuls les résultats de la Côte d'Ivoire sont présentés soient 26 postes de mesure. Les stations ont été

Tableau 1 Résultats des tests de détection de ruptures sur des stations de Côte d'Ivoire.

Station	Période d'observation	Date de rupture	Déficit exprimé en % de la moyenne
<i>Classe 1</i>			
Abidjan	1938-1992	1982	22
Adiaké	1945-1993	1982	25
Lamé	1930-1984	1968	24
Sassandra	1923-1993	1971	18
<i>Classe 2</i>			
Tabou	1935-1992	pas de rupture	
<i>Classe 3</i>			
Man	1923-1992	1966 (anomalie)	13
<i>Classe 4</i>			
Boundiali	1934-1992	1975	20
Odienné	1933-1993	1979-1982	23
<i>Classe 5</i>			
Abengourou	1920-1992	pas de rupture	
Agnibilékro	1945-1992	pas de rupture	
Béoumi	1940-1992	1963-1964	15
Bondoukou	1937-1980	pas de rupture	
Bougouanou	1948-1992	pas de rupture	
Bouna	1920-1980	pas de rupture	
Dimbokro	1922-1992	1968	13
Katiola	1949-1991	1968	22
M'Bahiakro	1945-1992	pas de rupture	
<i>Classe 6</i>			
Adzopé	1945-1992	1968	15
Bouaflé	1924-1992	1972	18
Daloa	1920-1992	1971	16
Divo	1946-1992	1972	18
Gagnoa	1930-1993	1966	12
Lakota	1945-1992	1970	25
Oumé	1945-1992	1976-1979	17
Soubré	1940-1992	1970	21
Tiassalé	1930-1982	1969 (anomalie)	17

regroupées en six classes homogènes par la méthode de classification hiérarchique ascendante (Fig. 1). La classification obtenue se rapproche de celle correspondant aux régimes pluviométriques traditionnellement identifiés en Côte d'Ivoire en fonction de l'abondance des précipitations et de leur répartition saisonnière.

Concernant les représentations graphiques, 68 postes ont été utilisés pour les différents tracés de courbes isovaleurs sur les quatre pays du Golfe de Guinée.

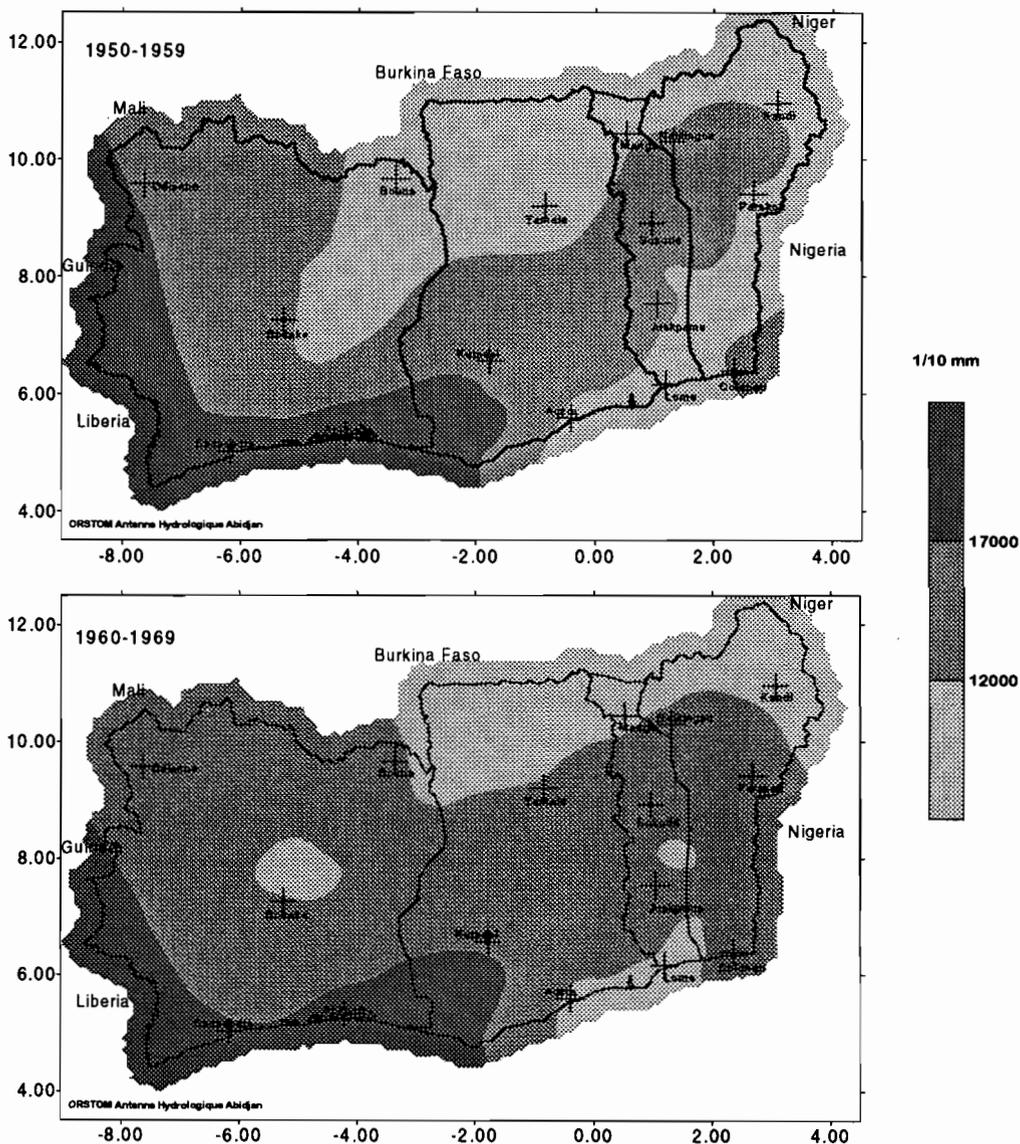


Fig. 3 Pluviométrie annuelle sur les décennies 1950 et 1960.

APPLICATION DES METHODES DE DETECTION DE RUPTURES

La station de Bouaflé est montrée comme exemple sur la période 1950-1992 (Fig. 2). Une feuille « résultats » reprend les principaux résultats des méthodes employées. Les quatre méthodes s'accordent pour détecter une « rupture » dans la série pluviométrique de cette station qui se situerait au cours de l'année 1972. Les résultats ponctuels obtenus sont interprétés d'un point de vue régional.

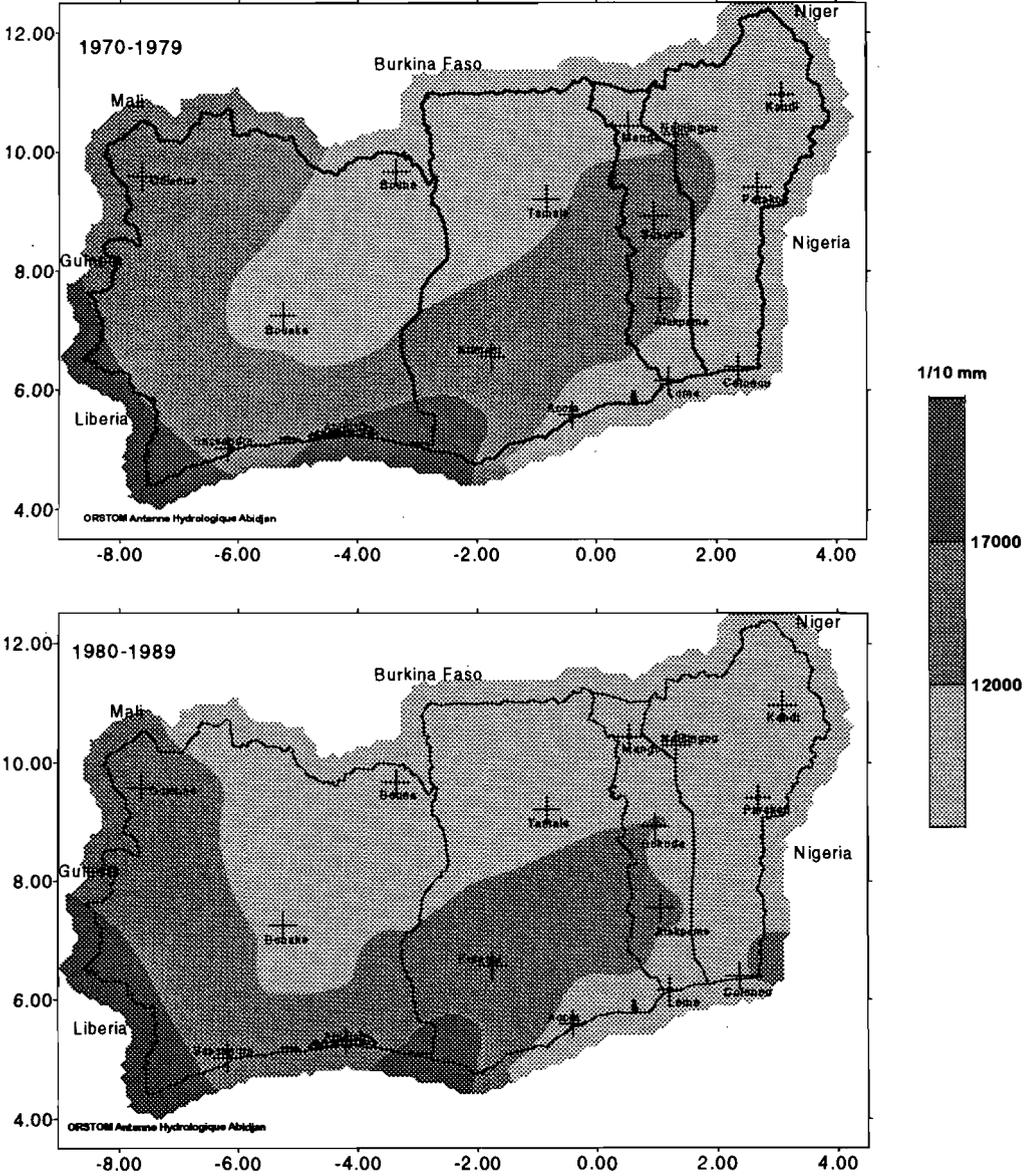


Fig. 4 Pluviométrie annuelle sur les décennies 1970 et 1980.

Dans le Tableau 1 qui synthétise les résultats, une « rupture » désigne un changement significatif de moyenne dans la série des précipitations annuelles identifié par l'ensemble des procédures appliquées. Le terme « anomalie » qualifie un changement non détecté par la totalité des tests.

Pratiquement, la totalité du territoire ivoirien a vu sa pluviométrie moyenne diminuer à l'exception de la région nord-est (Abengourou-Bongouanou) et l'extrême sud-ouest (tabou). Ces deux régions s'opposent par leur pluviométrie: la première est la région la moins arrosée alors que la seconde est la plus arrosée. Les trois stations de

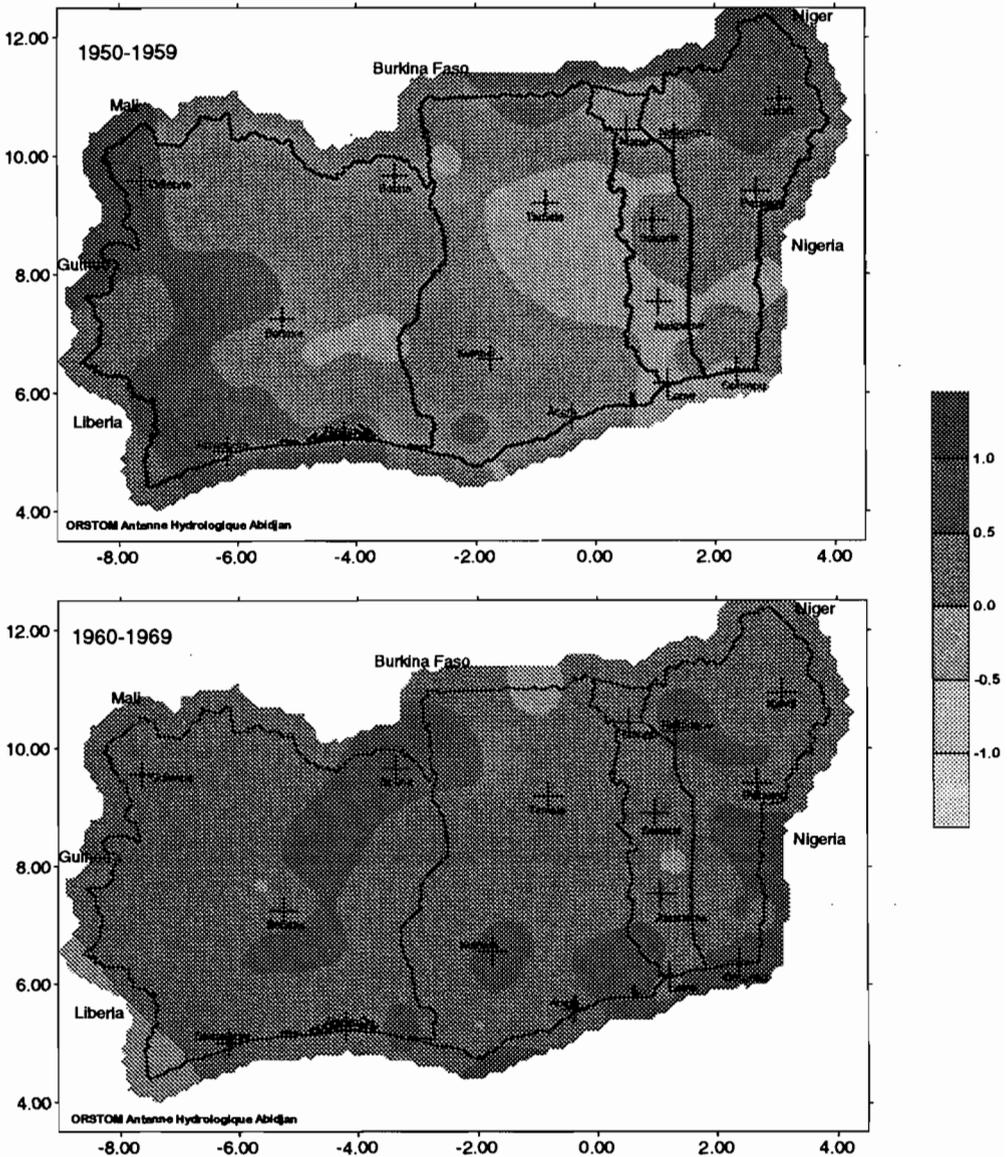


Fig. 5 Indices pluviométriques sur les décennies 1950 et 1960.

la classe 5 qui présentent une rupture sont situées en limite de la classe 6 où l'existence d'une rupture est générale.

Les dates des changements observés se situent majoritairement autour de l'année 1970. Pour quelques stations (Béoumi), ce changement est parvenu plus tôt vers 1965. Alors que pour d'autres, il n'est intervenu que vers 1980 (Abidjan).

La précision des dates est bien sûr fonction de la qualité des données et de la longueur des séries mais il semble indéniable qu'un changement (diminution) dans le

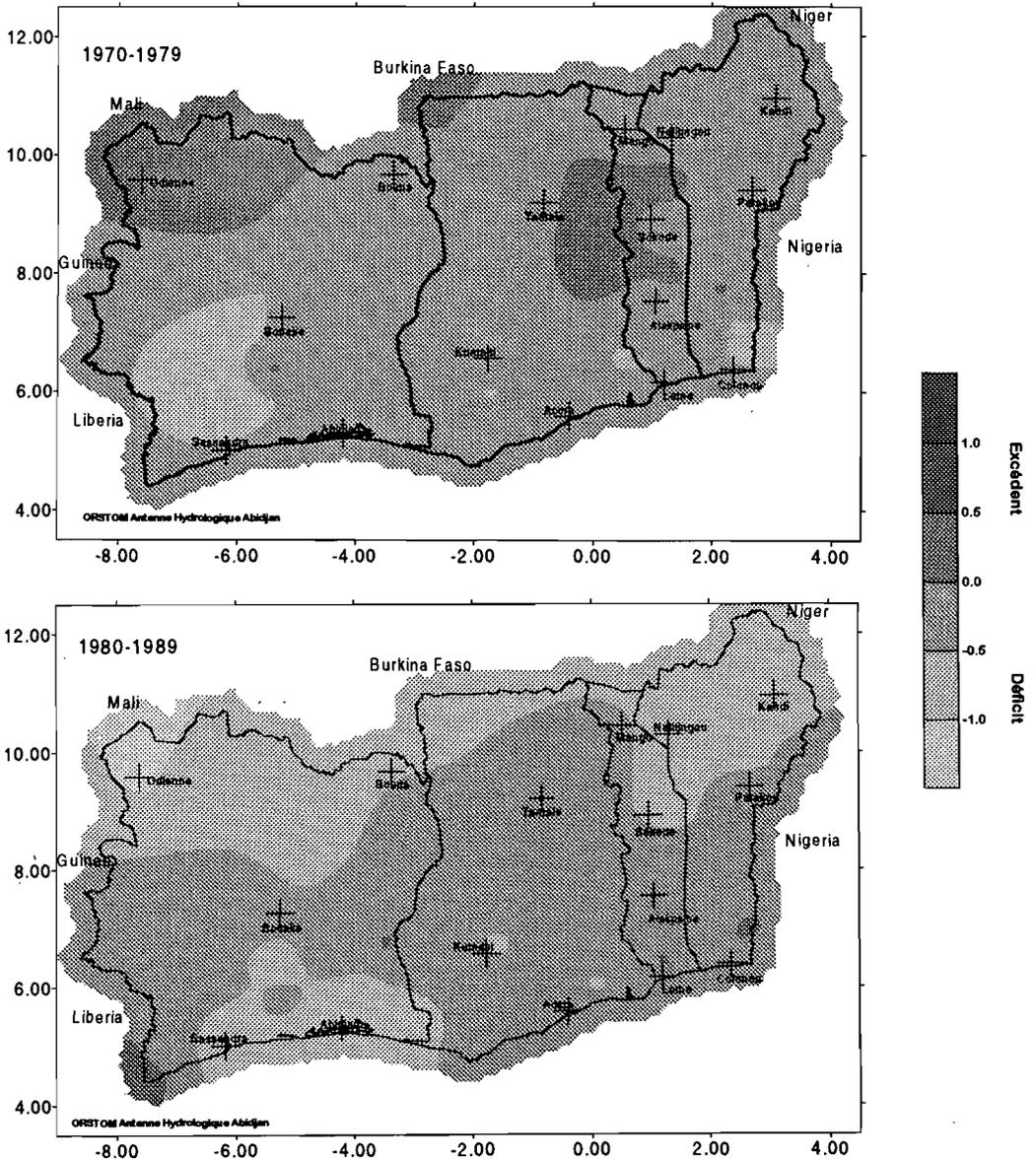


Fig. 6 Indices pluviométriques sur les décennies 1970 et 1980.

régime des précipitations annuelles ait eu lieu comme pour les pays sahéliens où l'on a parlé de phénomène de sécheresse.

REPRESENTATIONS GRAPHIQUES DES RESULTATS DE L'ETUDE

Les représentations graphiques confirment les résultats obtenus par les méthodes statistiques de détection de ruptures sur la seule Côte d'Ivoire.

Les tracés des isohyètes (Figs 3 et 4) mettent en évidence une diminution de la pluviométrie sur les quatre pays qui bordent le Golfe de Guinée. La décennie 1960 semble avoir été particulièrement arrosée. Mais dès 1970, la pluviométrie a brutalement baissé et ce phénomène a perduré durant la dernière décennie. Dorénavant seules deux régions ont une pluviométrie annuelle supérieure à 1700 mm: le sud-ouest de la Côte d'Ivoire (région de tabou) et une zone à l'ouest du Cap des trois-Pointes au Ghana. Pratiquement l'ensemble du Bénin et du Togo a une pluviométrie annuelle inférieure à 1200 mm.

Le tracé des courbes d'isovaleurs d'indices pluviométriques (Figs 5 et 6) calculés par décennie traduit également la tendance générale à la baisse de la pluviométrie annuelle à partir de la décennie 1970. Celle-ci s'est aggravée au cours de la décennie suivante: tous les pays n'ont pas été touchés de la même manière. La Côte d'Ivoire et la moitié nord du Bénin ont ressenti le plus fortement cette diminution des précipitations annuelles, en particulier dans la région d'Odienné au nord-ouest de la Côte d'Ivoire pendant la décennie 1980.

CONCLUSION

L'ensemble de ce qui précède démontre que le sentiment généralement ressenti localement d'une modification à la baisse du régime pluviométrique dans les pays riverains du Golfe de Guinée est parfaitement fondé. Cette brutale chute des précipitations à la fin de la décennie 1960, dans ces régions que l'on pensait relativement épargnées par la sécheresse, se traduit, localement, par de nettes modifications au sein des séries chronologiques d'indices pluviométriques. L'analyse régionale du phénomène montre, d'une manière générale et durant les décennies 1970 et 1980, l'important glissement vers le sud et le sud-ouest des isohyètes et l'apparition de zones extrêmement déficitaires. Ces éléments doivent, d'ores et déjà, dans ces pays non sahéliens, attirer l'attention des aménageurs et des gestionnaires (de barrages à vocation hydroélectrique ou agricole) par exemple) quant aux risques de défaillances prévisibles pour des équipements imaginés ou conçus dans un contexte climatique plus favorable.

Remerciements Nous tenons à remercier Gil Mahé et Luc Le Barbé de l'Orstom, Grégoire Alé du Service Hydrologique du Bénin et Mike Hulme de l'Université de Norwich qui ont mis à notre disposition une partie des données qui nous ont servi à réaliser cette étude.

REFERENCES

- Bonneaud, S. (1994) *Méthodes de détection des ruptures dans les séries chronologiques*. Projet de Fin d'Etudes, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Montpellier, France.
- Buishand, T. A. (1982) Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.* **50**, 11-27.
- Buishand, T. A. (1984) Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *J. Hydrol.* **73**, 51-69.
- Demarrée, G. (1990) An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theoret. Appl. Climatol.* **42**, 139-147.
- Hubert, P. & Carbonnel, J. P. (1987) Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol.* **95**, 165-183.
- Hubert, P., Carbonnel, J. P. & Chaouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349-367.
- Lee, A. F. S. & Heghinian, S. M. (1977) A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables – A Bayesian approach. *Technometrics* **19**(4), 503-506.
- Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturel, J. E., Kouamé, B. & Boyer, J. F. (1994) *Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques*. Etude Bibliographique, Orstom, Montpellier, France.
- Mahé, G. & Olivry, J. C. (1991) Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuel. In: *Hydrology for the Water Management of Large River Basins* (ed. par F. H. M. van de Ven, D. Gutknecht, D. P. Loucks & K. A. Salewicz) (Proc. Vienna Symp., August 1991), 163-172. IAHS Publ. no. 201.
- Nicholson, S. E., Kim, J. & Hoopingarner, J. (1988) *Atlas of African Rainfall and Its Interannual Variability*. Dept Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P. & Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide. In: *Hydrology in Warm Humid Regions* (ed. par J. S. Gladwell) (Proc. Yokohama Symp., July 1993), 67-78. IAHS Publ. no. 216.
- Petitit A. N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* **28**(2), 126-135.
- Servat, E. (1994) Programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne) – Présentation du Programme. Orstom, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Sircoulon, J. (1987) Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (ed. par S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987), 13-25. IAHS Publ. no. 168.
- Sutcliffe, J. V. & Knott, D. G. (1987) Historical variations in African water resources. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (ed. par S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987), 463-475. IAHS Publ. no. 168.