

## Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989

**F. GAUTIER, H. LUBES-NIEL**

*Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex 1, France*

**R. SABATIER**

*Laboratoire de Physique Moléculaire et Structurale, Faculté de Pharmacie, Université Montpellier I, F-34060 Montpellier Cedex 1, France*

**J. M. MASSON**

*Laboratoire Géofluides-Bassins-Eau, UMR-CNRS 5569, Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 5, France*

**J. E. PATUREL & E. SERVAT**

*Antenne Hydrologique ORSTOM, BP 1203 Cidex 1, Abidjan 06, Côte d'Ivoire*

**Résumé** L'Afrique de l'Ouest non sahélienne a connu autour des années 1970 une variabilité du régime pluviométrique. Pour étudier cette variabilité, des séries chronologiques de totaux précipités, de durées des saisons des pluies, de hauteurs de pluie en saison sèche de nombres de jours de pluie ont été constitués au pas de temps annuel entre 1950 et 1989, soumises à plusieurs tests statistiques de détection de rupture. Pour caractériser la variation spatio-temporelle du phénomène étudié, les résultats des tests ont été traités par des analyses des correspondances multiples. Il ressort qu'une modification du régime pluviométrique s'est manifestée dès 1966 essentiellement au Sénégal et en Guinée Bissau, puis en Guinée Conakry, au Mali, au Burkina Faso et au nord du Bénin. La façon dont la Côte d'Ivoire, le Togo et le sud du Bénin ont été atteints s'est révélée beaucoup plus variable. Le Cameroun et la République Centrafricaine n'ont été que très faiblement ou pas du tout touchés.

### **Study of the rainfall regime variability in non-Sahelian West Africa from 1950 to 1989**

**Abstract** In the countries around the Guinea Gulf, the rainfall regime has varied since the end of the 1960s. To specify some characteristics of this variability, time series of annual amount of precipitation, rainy season duration, amount of precipitation in dry seasons, and number of rainy days have been generated with a one-year time step from 1950 to 1989. Statistical procedures have been used to test the presence of a shift in the mean. To characterize the change in space and in time, the results of the tests have been synthesized using multiple correspondence analyses. This study reveals that the rainfall regime began to change around 1966 in Senegal and Guinea Bissau, and then in Guinea, Mali, Burkina Faso and the northern part of Benin. The Ivory Coast, Togo and the south of Benin have been affected to various degrees. In Cameroon and the Central African Republic, the change is not uniform or has been slight.

## INTRODUCTION

Le programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'ouest non sahélienne) a pour finalité d'identifier des variations climatiques en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne en vue d'analyser leurs

conséquences sur la gestion des ressources en eau. La zone d'étude couverte par le programme comprend seize pays situés entre les longitudes 18°W et 28°E et les latitudes 2° et 14°N: Sénégal, Gambie, Guinée Bissau, Guinée Conakry, Sierra Leone, Libéria, Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin, Nigéria, Cameroun, République Centrafricaine, Tchad, Burkina Faso et Mali. La Fig. 1 présente la région étudiée. Le 14ème parallèle sépare la zone sahélienne au nord de la zone humide non sahélienne au sud. Il coïncide avec les courbes isohyètes moyennes interannuelles de 700 à 850 mm qui sont généralement considérées comme la limite sud du Sahel par les hydrologues (Ribstein, 1990).

L'évolution climatique des dernières décennies a déjà fait l'objet de nombreuses études notamment en zone sahélienne (Morel, 1993) mais aussi plus au sud en



Fig. 1 Présentation de la zone d'étude.

Afrique de l'Ouest non sahélienne (Sutcliffe & Knott, 1987; Nicholson *et al.*, 1988; Mahé & Olivry, 1991; Olaniran, 1991). Toutes ces études ont validé l'hypothèse d'une baisse sensible des ressources en eau à partir du début des années 1970. Des travaux sont menés par ailleurs pour tenter de comprendre quels mécanismes sont à la base de cette variabilité climatique (Janicot *et al.*, 1995).

Les résultats obtenus par le programme ICCARE à partir des traitements statistiques et cartographiques de séries chronologiques de précipitations annuelles s'étendant sur la période 1950–1989 ont déjà été publiés (Servat *et al.*, 1996). Ils mettent en évidence une diminution des précipitations qui s'est installée dès les années 1960 et au début de la décennie suivante très nettement en Guinée, au Libéria, en Sierra Leone, au Mali et au Burkina Faso, et qui s'est amplifiée à l'ouest et dans les régions nord proches du Sahel au cours des années 1980. Durant la décennie 1980, cette baisse pluviométrique s'est également généralisée à l'est du Golfe de Guinée avec des amplitudes variables, le Togo, le Bénin, le Nigéria et la République Centrafricaine se révélant moins affectés par le phénomène.

Mais la variabilité du régime pluviométrique n'est pas nécessairement caractérisée par la seule variation des totaux pluviométriques annuels même si le plus souvent celle-ci en reste la manifestation la plus sensible. Cette variabilité peut aussi concerner un changement dans la fréquence des pluies, dans l'amorçage ou l'arrêt des précipitations pendant les saisons humides, ou encore dans la sévérité des saisons sèches. C'est ainsi que des séries chronologiques au pas de temps annuel portant sur des variables telles que le nombre annuel de jours de pluie, les dates de début et de fin des saisons humides, la durée des saisons humides, et la hauteur des précipitations en saison sèche ont été constituées lorsque les données nécessaires, journalières et décadaires, étaient disponibles. Ces séries ont ensuite été soumises à un certain nombre de tests statistiques univariés de stationnarité et plus particulièrement de détection de ruptures.

Les résultats obtenus sur chaque site de mesure et pour chacune des variables étudiées ont été exploités par des analyses statistiques multivariées afin de regrouper des stations aux comportements similaires et de présenter une carte permettant d'identifier et de "localiser" les modifications survenues.

## LES DONNEES

Sur un total de près de 200 stations de mesure utilisées dans l'étude des précipitations annuelles, seules 123 ont permis de constituer sur la période 1950–1989 des séries chronologiques fiables au pas de temps annuel portant sur les variables nombre annuel de jours de pluie et hauteur des précipitations en saison sèche. Il ne reste plus que 104 stations disponibles lorsque la variable durée des saisons humides (ou dates de début et de fin des saisons humides) est prise en considération. Ces séries sont en effet élaborées à partir de données journalières ou décadaires dont le pourcentage de lacunes s'avère souvent totalement rédhibitoire pour une analyse correcte.

Avec la prise en compte de l'ensemble de ces variables supplémentaires la zone d'étude se réduit alors à onze pays, Ghana, Libéria, Sierra Leone, Nigéria et Tchad

n'étant plus pris en compte. Ces contraintes font donc apparaître deux ensembles, à l'ouest du Bénin malgré l'absence d'information au Ghana, et à l'est du Nigéria. Il s'ensuit que l'analyse requise ne pourra être interprétable spatialement qu'au sein de ces deux grands ensembles géographiques disjoints sans qu'une synthèse soit réellement possible au niveau de la couverture totale de la zone. Malgré tous les efforts mis en œuvre, il n'a pas été possible en effet de recueillir, ne serait-ce que jusqu'en 1989, les données qui spécialement au Ghana et au Nigéria auraient permis de considérer la zone d'étude dans son intégralité. L'acquisition des données postérieures à 1989 est plus délicate encore que celle des années antérieures, et l'information disponible depuis 1989 est trop parcellaire pour pouvoir dès à présent être intégrée dans les analyses.

## LES TESTS DE RUPTURE UNIVARIÉS

Les tests univariés d'homogénéité des séries temporelles ou de détection de rupture en moyenne qui ont été mis en œuvre dans le programme ICCARE ont déjà été décrits dans d'autres articles (Aka *et al.*, 1996). Nous ne ferons ici que rappeler leur fondement.

Le test de corrélation sur les rangs (Kendall & Stuart, 1943; WMO, 1966) est un test non paramétrique qui teste l'homogénéité d'une série temporelle avec pour hypothèse alternative celle d'une tendance.

Le test de Pettitt (Pettitt, 1979), également non paramétrique examine l'existence d'une rupture à un instant inconnu de la série à partir d'une formulation dérivée de celle du test de Mann-Whitney (Dagnélie, 1970).

Ce test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne et, si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, il propose une estimation de la date de rupture.

La statistique de Buishand (Buishand, 1982, 1984) est dérivée d'une formulation originale donnée par Gardner (1969) pour établir un test bilatéral de rupture en moyenne à un instant inconnu. Le test de Buishand est paramétrique, supposant normalité de la série, non autocorrélation et constance de la variance de part et d'autre du point de rupture éventuel. Ce test est performant pour détecter une rupture en milieu de série, mais il ne fournit pas d'estimation du point de rupture.

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee & Heghinian, 1977; Bruneau & Rassam, 1983) est une approche paramétrique qui requiert une distribution normale des variables étudiées. Elle fait l'hypothèse d'une rupture en moyenne à un instant inconnu. La distribution *a priori* de l'instant de la rupture est uniforme, et compte tenu de cette information et des données, la méthode produit la distribution de probabilité *a posteriori* de l'instant de la rupture.

La procédure de segmentation non paramétrique de séries hydrométéorologiques (Hubert & Carbonnel, 1987; Hubert *et al.*, 1989) est adaptée à la recherche de multiples changements de moyenne dans la série. Son principe est de "découper" la série en plusieurs segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s) par

application du test de Scheffé (Kendall & Stuart, 1943) qui repose sur le concept de contraste (Dagnélie, 1970).

Appliqués à chaque site de mesure et variable par variable, ces tests donnent des résultats généralement concordants du moins au niveau de la reconnaissance d'une hétérogénéité dans la série, même si les estimations des ruptures en moyenne données par plusieurs tests diffèrent parfois de quelques années.

### **LES RESULTATS DES TESTS UNIVARIÉS (Servat *et al.*, 1997; Paturel *et al.*, 1997)**

Une baisse très significative des pluies annuelles de l'ordre de 20% et plus en moyenne s'est manifestée dès le début de la décennie 1960, puis au cours de la décennie 1970 à l'ouest et au nord de la zone d'étude, et s'est amplifiée ensuite au cours des années 1980 en s'étendant avec une amplitude moindre à l'est du Togo.

Le nombre annuel de jours de pluie a lui aussi enregistré une baisse notable au cours des décennies 1960 et 1970 dans les deux Guinées, au Mali et au Burkina Faso tandis que sur le reste de la zone quelques changements sporadiques, et parfois à la hausse, ne permettent pas de mettre en évidence, sur des régions bien définies, une modification commune et nette.

Par contre la baisse des précipitations en saison sèche semble être plus générale avec des manifestations plus ou moins marquées, la partie ouest de la zone (ouest du Ghana) étant toujours la plus touchée par le phénomène.

Il faut préciser que, selon le régime pluviométrique, une ou deux saisons sèches sont à prendre en compte dans l'année. En effet deux types de régimes coexistent sur la région étudiée. Le nord et l'ouest ne connaissent qu'une saison des pluies au cours de l'année alors qu'en bordure du Golfe de Guinée et plus à l'est deux saisons doivent être considérées. Dans les zones à une saison sèche, la diminution des quantités précipitées est importante dès la fin de la décennie 1960. Dans les zones à deux saisons sèches, les changements concernent particulièrement la seconde saison sèche ou "grande saison sèche". Celle-ci a vu son cumul pluviométrique diminuer fortement et c'est sur le littoral est de la Côte d'Ivoire que le phénomène est le plus marqué. Par contre la première saison sèche n'a pas connu de changement très prononcé.

Les résultats relatifs au début et à la fin des saisons des pluies sont plus délicats à exposer dans la mesure où une incertitude non négligeable accompagne la définition même donnée à ces dates. Au sein d'une période fixe définie par région pluviométrique et encadrant la saison des pluies, nous avons retenu les dates correspondant respectivement à un taux précipité de 10% et 90% de la hauteur totale de la saison pour caractériser début et fin de chaque période humide. La durée de la saison est alors estimée par l'intervalle compris entre ces deux dates.

Les procédures statistiques précédentes ne mettent pas en évidence des réponses susceptibles de caractériser des groupes de stations selon un critère de proximité géographique. Les changements observés ne sont pas nets. Tous les cas de figures se présentent et quelle que soit la zone à une ou deux saisons des pluies seule une

tendance au raccourcissement d'une ou des deux saisons peut être notée; son existence est parfois concomitante avec celle observée sur la baisse des précipitations annuelles.

## **SYNTHESE: APPROCHE MULTIVARIEE**

Les conclusions des études univariées qui ont été présentées à la section précédente intègrent une interprétation "qualitative et subjective" des résultats ponctuels des tests mis en œuvre variable par variable.

L'approche dite multivariée consiste à produire une réponse *a priori* plus synthétique et plus objective à la question de la modification du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne tel qu'il est décrit au travers de plusieurs variables.

L'Analyse des Correspondances Multiples (ACM) nous a semblé être une technique descriptive appropriée pour apporter cette réponse (Gautier, 1996). Elle s'attache à étudier les liaisons entre plusieurs caractères qualitatifs après recours à une mise sous forme disjonctive des variables (Bouroche & Saporta, 1980).

Les données soumises ici à une telle analyse sont par station (ligne du tableau disjonctif) et par recodage de la variable: soit "série homogène" soit "année de rupture 19..". Par station et par variable donc, les résultats des cinq tests utilisés ont été préalablement confrontés pour qu'une décision unique soit prise vis à vis de l'homogénéité ou non de la série étudiée. Comme nous l'avons souligné précédemment les discordances entre les tests ne sont qu'occasionnelles, et nous avons pu vérifier sur les rares cas non concordants que la caractérisation rupture ou non-rupture des quelques stations concernées ne remet pas en question les conclusions générales qui seront énoncées.

### **Le principe de l'ACM**

L'ACM s'effectue sur un tableau disjonctif complet (exemple Tableau 1) portant les stations (lignes) et les années (colonnes) groupées entre 1950 et 1989 par périodes d'au moins trois ans encadrant les dates de rupture éventuelles, et ce pour toutes les variables considérées, chaque colonne étant dédoublée pour indiquer la caractéristique soit "rupture" soit "non-rupture" selon un codage binaire respectif en 1 et en 0.

L'ACM permet de dégager des proximités entre colonnes, c'est-à-dire des proximités de points moyens de modalités représentant plusieurs individus (Saporta, 1990). La lecture de ces proximités découle de la réduction et de la représentation de l'information (inertie) contenue dans le tableau à analyser dans un espace comportant un faible nombre de dimensions. Le nuage de points représentant les stations est ensuite interprété selon les directions d'inertie maximale.

L'ACM regroupe donc ici des stations qui vis à vis de chacune des variables n'ont pas exactement la même réponse aux tests de rupture, mais qui globalement ont

**Tableau 1** Exemple de tableau de données soumises à l'ACM (cas de deux variables).

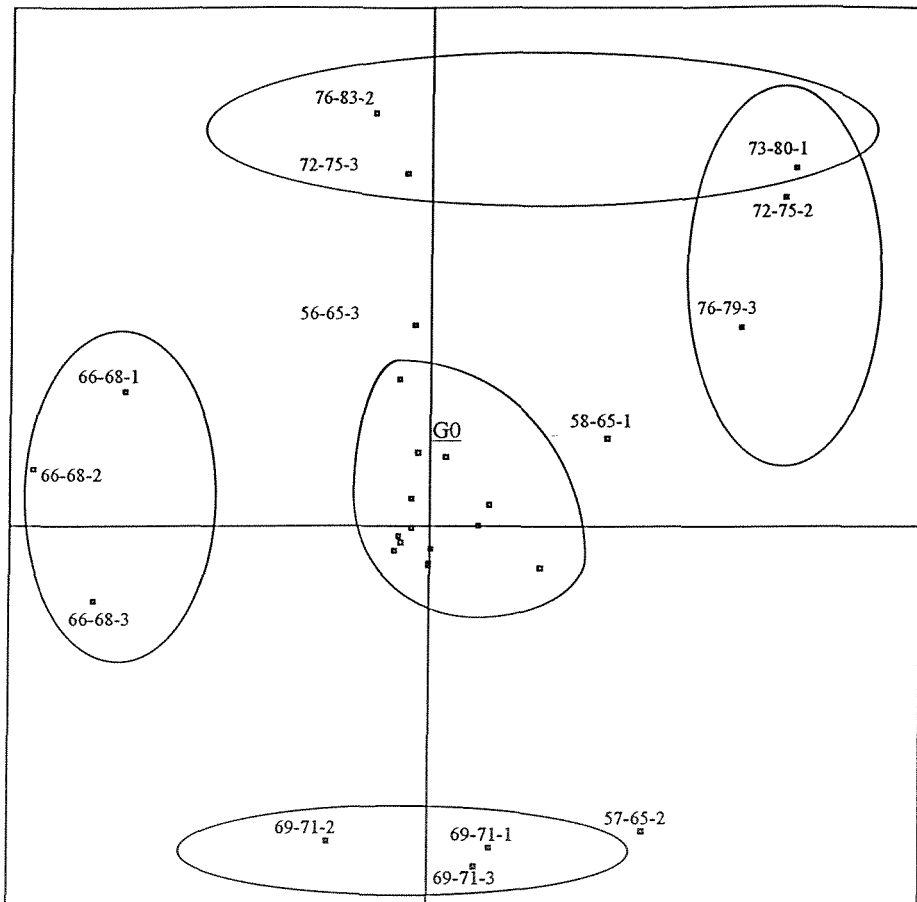
Variable 1								Variable 2					
1950-1955	1950-1955	1956-1959	1956-1959	1960-1964	1960-1964	...	1983-1989	1983-1989	1950-1957	1950-1957	...	1985-1989	1985-1989
Rupture	Non-rupture	Rupture	Non-rupture	Rupture	Non-rupture		Rupture	Non-rupture	Rupture	Non-rupture		Rupture	Non-rupture
0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1

Autant de lignes que de stations.

un comportement suffisamment proche sur un ensemble réduit de modalités pour être apparentées. De fait deux stations seront jugées semblables si elles sont proches dans l'espace vectoriel formé par les modalités des variables.

### Première analyse

**Résultats statistiques** Dans un premier temps seuls les résultats relatifs aux variables: hauteur annuelle des précipitations, nombre annuel de jours de pluie et hauteur des pluies en saison sèche ont été soumis à une ACM. 123 stations ont fait l'objet de cette étude. Pour les stations à deux saisons des pluies, seule la grande saison sèche a été considérée.



G0 : modalités sans rupture

xx-yy-n : période de rupture xx-yy, variable numéro n

n = 1 : hauteur annuelle des précipitations

n = 2 : hauteur des pluies en saison sèche

n = 3 : nombre de jours de pluie dans l'année

G0 : categories without shift

xx-yy-n : shift period xx-yy, variable number n

n = 1 : annual amount of precipitation

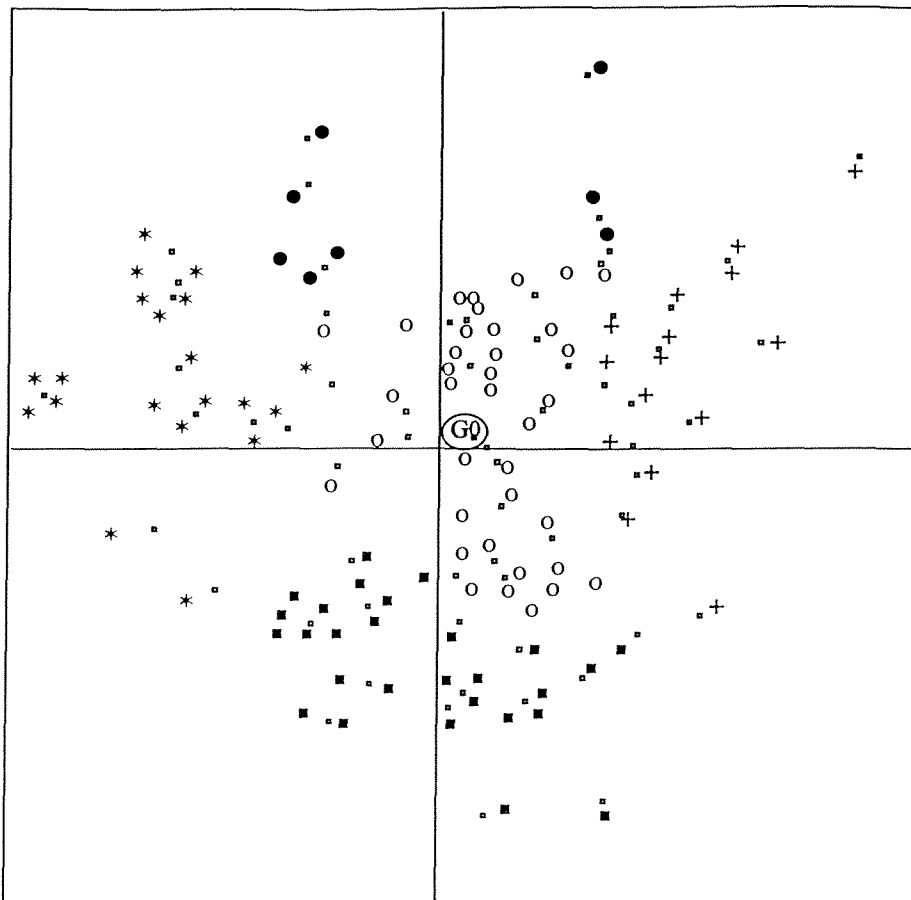
n = 2 : amount of precipitation in dry season

n = 3 : number of rainy days per year

Fig. 2 Représentation des variables dans le premier plan factoriel.

L'ACM ainsi réalisée donne une inertie de 24.57% pour le premier plan factoriel qui sera seul interprété. Ce pourcentage d'information expliquée par l'ACM est très satisfaisant. Le premier axe factoriel (axe horizontal) oppose les années de rupture 1966–1968 pour les trois variables aux années de rupture 1973–1980 pour la variable hauteur annuelle des précipitations, 1972–1975 pour la variable hauteur des pluies en saison sèche, et 1976–1979 pour le nombre annuel de jours de pluie.

Le deuxième axe (axe vertical) met quant à lui en opposition les années de rupture 1969–1971 pour les trois variables, aux années de rupture 1973–1980 pour la variable hauteur annuelle des précipitations, 1976–1983 pour la hauteur des pluies en saison sèche, et 1972–1975 pour le nombre annuel de jours de pluie. La Fig. 2 donne une représentation des variables dans le premier plan factoriel.



- \* : groupe 1/ group 1
- : groupe 2/ group 2
- + : groupe 3/ group 3
- : groupe 4/ group 4
- G○ : groupe 5/ group 5
- : groupe 6/ group 6

Fig. 3 Représentation des stations dans le premier plan factoriel.

La représentation des stations dans le premier plan factoriel donnée par la Fig. 3, fait apparaître quatre groupes distincts, chacun d'eux étant en rapport avec les années données par la Fig. 2. L'axe horizontal isole et oppose deux groupes. Le premier (appelé groupe 1 par la suite) est composé de vingt stations qui ont un comportement proche, rupture dans leur série chronologique dans les années 1966–1968. Le deuxième groupe (appelé groupe 3) rassemble quinze stations présentant une rupture dans les années postérieures à 1972.

L'axe vertical sépare également les stations en deux groupes opposés. Le premier (appelé groupe 2) regroupe une trentaine de stations ayant une rupture dans les années 1969–1971, le deuxième (appelé groupe 4) formé de huit stations est caractérisé par une rupture entre les années 1973 et 1983.

Un cinquième groupe (appelé groupe 5) peut être identifié dans le plan factoriel de l'analyse correspondant aux seize stations regroupées autour du point origine du plan factoriel. Ce groupe ne présente aucune rupture quelle que soit la variable pluviométrique considérée.

De nombreuses stations enfin ne peuvent être réparties dans aucun des groupes cités, soit parce que seule une des trois variables présente une rupture, soit parce que la date de rupture est antérieure à l'année 1965, période n'ayant pas une représentation significative dans le plan factoriel. Ces stations sont regroupées sous l'appellation de groupe 6.

**Interprétation cartographique (cf. Fig. 4) (a) à l'ouest du Bénin** Le groupe 1, caractérisé par des ruptures sur les trois variables entre les années 1966–1968, se compose essentiellement de stations de Guinée Bissau et du Sénégal; les rares stations du nord-ouest de la Guinée Conakry en font également partie ainsi que trois stations du Mali qui apparaissent plus isolées géographiquement.

Le groupe 2, caractérisé par des ruptures sur les trois variables entre les années 1969–1971, est défini essentiellement par des stations de Guinée Bissau (région côtière) et du Sénégal, ainsi que de Guinée Conakry, du Mali, de l'ouest Burkinabé et du Bénin.

Les groupes 3 et 4 présentent des comportements très voisins puisque les stations de ces deux groupes sont caractérisées par des ruptures dans les années postérieures à 1972. Les deux groupes ont la même réponse pour la variable hauteur annuelle des précipitations avec des ruptures dans les années 1973 à 1980. La différence entre les deux ensembles se situe au niveau des deux autres variables avec pour le groupe 3 des ruptures identifiées respectivement sur la variable hauteur des pluies en saison sèche dans les années 1972–1975, et sur le nombre annuel de jours de pluie entre les années 1976 et 1979, tandis que pour le groupe 4 les ruptures décelées sur les variables hauteur des pluies en saison sèche et nombre annuel de jours de pluie se situent respectivement dans les années 1976–1983 et 1972–1975. Le noyau du super-groupe constitué par ces deux groupes est situé au Burkina Faso et à l'est du Mali. Quelques stations de Côte d'Ivoire appartiennent aussi à cet ensemble.

Les stations qui composent le groupe 5, stations dites "homogènes" vis à vis des trois variables, sont situées en Côte d'Ivoire, au Togo et au sud du Bénin. Les

- 1 : Mali /Mali
- 2 : Burkina Faso / Burkina
- 3 : Tchad / Chad
- 4 : République Centrafricaine / Central African Republic
- 5 : Cameroun / Cameroon
- 6 : Nigeria / Nigeria
- 7 : Bénin / Benin
- 8 : Togo / Togo
- 9 : Ghana / Ghana
- 10 : Côte d'Ivoire / Ivory Coast
- 11 : Liberia / Liberia
- 12 : Sierra Leone / Sierra Leone
- 13 : Guinée Conakry / Guinea
- 14 : Guinée Bissau / Guinea Bissau
- 15 : Gambie / Gambia
- 16 : Sénégal / Senegal

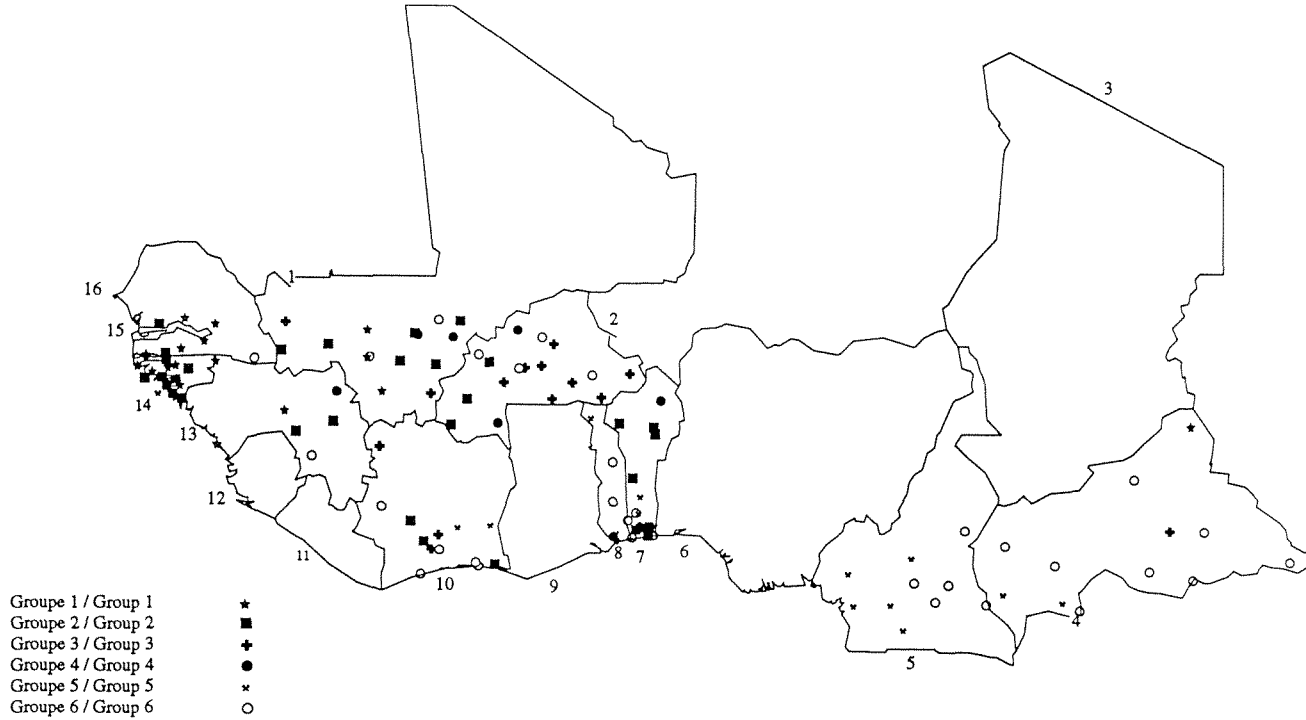


Fig. 4 Cartographie des résultats.

stations du groupe 6 sont plus dispersées sur l'ensemble de la région puisqu'elles témoignent d'un comportement particulier vis à vis des variables et des années.

(b) à l'est du Nigéria Hormis deux stations appartenant l'une au groupe 1, l'autre au groupe 3, les autres stations des deux pays concernés, Cameroun et République Centrafricaine se répartissent entre les groupes 5 (pas de rupture identifiée) et 6 (comportement particulier).

**Synthèse et discussion** Il ressort de cette première analyse trois zones principales:

- l'ensemble Cameroun-République Centrafricaine qui n'a pas été touché par un changement de régime pluviométrique (tel que celui-ci a été décrit par les trois variables étudiées), jugé significatif par les tests statistiques mis en œuvre;
- la Guinée Bissau, le Sénégal, et l'ouest de la Guinée Conakry caractérisés par une variation de régime pluviométrique dans les années 1966-1971, auxquels viennent s'ajouter dans un premier temps le sud du Mali et l'est de la Guinée Conakry affectés d'une manière moins simultanée, les ruptures étant identifiées dès 1966 à certains postes et après 1972 à d'autres, et dans un deuxième temps le Burkina Faso et le nord du Bénin touchés par un changement après 1969;
- la Côte d'Ivoire, le Togo et la moitié sud du Bénin qui regroupent des stations pour lesquelles des ruptures ont pu être identifiées ou non, et constituent par conséquent une sous-zone partiellement et irrégulièrement touchée par un changement.

## Deuxième analyse

Une deuxième analyse a été réalisée en tenant compte d'une quatrième variable, la durée de la saison des pluies. Pour les stations à deux saisons des pluies seule la deuxième saison a été considérée car elle permettait de donner des poids voisins aux différentes modalités de la variable.

L'analyse ne tient plus compte que de 104 stations. La nouvelle variable est représentée par deux modalités, la première dite "rupture" si la synthèse des tests appliqués a conduit à l'identification d'une rupture entre les années 1965 et 1975, et la deuxième qui lui est complémentaire dite "non-rupture". La période 1965-1975 qui est un facteur discriminant des deux modalités est celle sur laquelle le changement pressenti est recherché, en phase avec celui identifié en zone sahélienne (Hubert & Carbonnel, 1987; Hubert *et al.*, 1989; Demarée, 1990).

L'ACM donne une inertie de 23.80% pour le premier plan factoriel, pourcentage suffisant pour permettre une interprétation.

La représentation des variables sur l'axe horizontal est la même que précédemment. L'axe vertical oppose désormais les années de rupture 1969-1971 pour les trois premières variables et la modalité "rupture" de la nouvelle variable aux années de rupture 1976-1983 pour la variable hauteur des pluies en saison sèche et 1972-1975 pour le nombre annuel de jours de pluie.

La représentation des stations dans le premier plan factoriel ne révèle pas de modifications significatives par rapport à la première analyse et la cartographie des résultats est interprétée de la même façon.

## CONCLUSION ET DISCUSSION

L'analyse statistique de séries chronologiques de données hydrologiques au pas de temps annuel est un outil d'identification de variations climatiques.

Autour des années 1970 l'Afrique de l'Ouest non sahélienne, en phase avec un phénomène observé plus au nord, semble avoir été soumise à une modification de son régime pluviométrique qui se traduit le plus manifestement par une diminution des quantités précipitées dans l'année. La caractérisation de ces changements passe par la définition de variables quantitatives appropriées pour décrire le régime des précipitations. La pertinence du choix qui a été fait dans le cadre du programme ICCARE quant aux variables hauteur annuelle précipitée, nombre annuel de jours de pluie, durée de la saison des pluies, et hauteur des pluies en saison sèche, est sûrement discutable mais il repose pour beaucoup sur la nature, la quantité et la qualité des données pluviométriques disponibles, données issues des réseaux météorologiques ou hydrologiques nationaux des pays de la zone concernée.

Les chroniques établies à partir de ces données ont été soumises à des tests statistiques d'homogénéité des séries et de détection de rupture. Les tests ont été choisis à l'issue d'une étude bibliographique (Lubès *et al.*, 1994) qui a permis de retenir des tests déjà utilisés dans des études du type de celle d'ICCARE, et bien décrits au niveau de leurs fondements et de leurs conditions d'application. La puissance et la robustesse de ces tests ont fait récemment l'objet d'une étude par simulation, dont les résultats sont en cours de publication, qui révèle que ce n'est qu'à partir d'un taux de rupture en moyenne supérieur à 15%, et dans les conditions d'application requises, que la puissance estimée dépasse 40%. L'ensemble de ces tests respecte le risque de première espèce ici pris égal à 10%. Les résultats des tests mis en œuvre site par site et variable par variable, doivent donc être présentés avec réserve. L'interprétation de ces résultats pour l'ensemble des variables et à l'échelle de la zone n'est pas aisée. Pour faciliter la lecture globale des résultats dans un espace structuré nous avons eu recours à une analyse des correspondances multiples. En effet cette technique a pour avantage de faire ressortir les comportements dominants, et ce résumé d'information est adapté aux réserves émises sur les performances des tests statistiques mais aussi aux particularismes de certaines stations vis à vis des variables, particularismes qui sont peut-être réels mais non expliqués ou qui peuvent être imputables à la qualité des données par exemple.

Deux analyses ont été réalisées, l'une portant sur les variables: hauteur annuelle des précipitations, nombre annuel de jours de pluie et hauteur des pluies en saison sèche, l'autre prenant en compte également la variable durée de la saison des pluies. Les deux analyses ont conduit aux mêmes interprétations au niveau des deux ensembles géographiques disjoints composant la zone d'étude, le premier à l'ouest du

Bénin, le deuxième incluant Cameroun et République Centrafricaine.

Ces analyses font apparaître qu'une modification du régime pluviométrique défini par les variables prises en compte s'est manifestée dès 1966 essentiellement au Sénégal et en Guinée Bissau puis s'est déplacée progressivement plus à l'est touchant la Guinée Conakry, le Mali puis le Burkina Faso et le nord du Bénin. La façon dont la Côte d'Ivoire, le Togo et le sud du Bénin ont été atteints s'est révélée beaucoup plus variable. Le Cameroun et la République Centrafricaine ont une réponse globale très nuancée qui témoigne soit d'une absence réelle de changement soit d'une manifestation non généralisée et de faible amplitude. Les années avancées quant à l'origine du phénomène et à son déplacement progressif de la côte ouest vers l'intérieur des terres jusqu'au Burkina Faso sont aussi à considérer avec prudence dans la mesure où nous avons pu observer sur des séries chronologiques simulées avec une rupture à un instant fixé que les tests statistiques détectaient le changement avec généralement une incertitude de plusieurs années autour de la position exacte.

Malgré toutes les réserves que nous avons tenu à rappeler les conclusions dont nous faisons état sont conformes à d'autres résultats mis en évidence par ailleurs. Nous pensons en particulier à une étude à paraître prochainement (Khodja *et al.*, à paraître) réalisée sur les mêmes variables que celles utilisées ici en ayant recours à une analyse exploratoire multidimensionnelle et à un test multivarié de détection de rupture en moyenne. Cette approche directement multidimensionnelle a permis de répartir les stations ayant subi des changements similaires selon une cartographie qui, du moins à l'ouest du Bénin, est conforme à celle obtenue ici. Seuls le Cameroun et la République Centrafricaine apparaissent plus franchement affectés par le phénomène, et ceci dès le début des années 1970, que ce que nous avons pu mettre en évidence ici.

Mais quels que soient les types de développements mis en œuvre il faut déplorer l'hétérogénéité de la répartition spatiale des stations qui reste un élément majeur préjudiciable, les techniques statistiques ou cartographiques les plus sophistiquées ne pouvant s'affranchir de l'unique source d'information objective que représentent les données.

Toutes les analyses multivariées ont été réalisées sous le logiciel ADE-4 (Analyse de Données Ecologiques), développé par le CNRS de l'Université Lyon 1 (Chessel & Doledec, 1995).

## REFERENCES

- Aka, A. A., Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturel, J. E. & Kouamé, B. (1996) Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization. *Hydrol. Sci. J.* **41**(6), 959-970.
- Bouroche, J. M. & Saporta, G. (1980) *L'Analyse des Données*. Collection Que sais-je? Presses Universitaires de France, Paris.
- Bruneau, P. & Rassam, J. C. (1983) Application d'un modèle bayésien de détection de changements de moyennes dans une série. *Hydrol. Sci. J.* **28**, 341-354.
- Buishand, T. A. (1982) Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.* **58**, 11-27.
- Buishand, T. A. (1984) Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *J. Hydrol.* **73**, 51-69.
- Chessel, D. & Doledec, S. (1995) ADE Version 4.0: Hypercard® Stacks and QuickBasic® Microsoft® library for the Analysis of Environmental Data. User's manual. Université Lyon 1, France.
- Dagnélie, P. (1970) *Théorie et Méthodes Statistiques* (vol. 2). Les Presses Agronomiques de Gembloux.

- Demarée, G. (1990) An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theor. Appl. Climatol.* **42**, 139–147.
- Gardner, L. A. (1969) On detecting changes in the mean of normal variates. *Ann. Math. Statist.* **40**, 116–126.
- Gautier, F. (1996) Analyse multivariée de résultats de tests de détection de rupture sur des séries chronologiques de données pluviométriques. Application à la représentation spatio-temporelle sur l'Afrique de l'Ouest non sahélienne. *DESS Méthodes statistiques des industries agricoles, agroalimentaires et pharmaceutiques, Université Montpellier II, France.*
- 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. & Chauouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349–367.
- Janicot, S., Fontaine, B. & Moron, V. (1995) Global sea surface temperature variability associated with West African rainfall anomaly types. Application to seasonal forecast of Sahel rainfall. In: *6th Int. Meeting on Statistical Climatol.* (19–23 June 1995, Galway, Ireland).
- Kendall, S. M. & Stuart, A. (1943) (1977 edn) *The Advanced Theory of Statistics* (Three volumes). Charles Griffin, London, UK.
- Khodja, H., Lubès-Niel, H., Sabatier, R., Masson, J. M., Servat, E. & Paturel, J. E. (à paraître) Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante: Les tests de permutation. *Revue de Statistique Appliquée.*
- 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, Rapport 3, Programme ICCARE. 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. by 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.
- Morel, R. (1993) L'atlas agroclimatique des pays du CILSS. *Veille Climatique Satellitaire* **45**, 37–45.
- Nicholson, S. E., Kim, J. & Hoopingartner, J. (1988) *Atlas of African Rainfall and its Interannual Variability*. Dept of Meteorol., Florida State Univ., Tallahassee, Florida, USA.
- Olaniran, O. J. (1991) Evidence of climatic change in Nigeria based on annual series of rainfall of different daily amounts, 1919–1985. *Climatic Change* **19**, 319–341.
- Paturel, J. E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès-Niel, H., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part II: an integrated regional approach. *J. Hydrol.* **191**, 16–36.
- Pettitt, A. N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* **28**(2), 126–135.
- Ribstein, P. (1990) Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Thèse Montpellier II, France.
- Saporta, G. (1990) *Probabilités analyse des données et statistique*. Editions Technip, Paris.
- Servat, E., Paturel, J. E. & Lubès, H. (1996) La sécheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche* **290**, 24–25.
- Servat, E., Paturel, J. E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.* **191**, 1–15.
- Sutcliffe, J. V. & Knott, D. G. (1987) Historical variations in African water resources. In: *The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (ed. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg)(Proc. Vancouver Symp., August 1987), 463–475. IAHS Publ. no. 168.
- WMO (World Meteorological Organization) (1966) Climatic change. Report of a working group of the Commission for Climatology. *WMO 195, TP 100, Tech. Note no. 79, WMO, Geneva, Switzerland.*

Reçu 6 novembre; accepté 17 avril 1998