

Article

« De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne »

É. Servat, J. E. Paturel, H. Lubès-Niel, B. Kouamé, J. M. Masson, M. Travaglio et B. Marieu
Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 12, n° 2, 1999, p. 363-387.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705356ar>

DOI: 10.7202/705356ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne

Regarding rainfall in non sahelian western and central Africa

É. SERVAT*¹, J.E. PATUREL¹, H. LUBÈS-NIEL², BROU KOUAMÉ¹, J.-M. MASSON³, M. TRAVAGLIO¹ et B. MARIEU²

Reçu le 25 mars 1998, accepté le 05 novembre 1998**.

SUMMARY

The drought observed for more than twenty years in the sahelian countries has also affected those located more to the South with more humid climates (SUTCLIFFE and KNOTT, 1987; NICHOLSON *et al.*, 1988; MAHE and OLIVRY, 1991; OLIVRY *et al.*, 1993 PATUREL *et al.*, 1995). The decrease in rainfall and consequently that in runoff might penalise development projects linked with water supply. The ICCARE programme led by ORSTOM aimed at identifying and measuring the consequences of this climatic variability in the non-sahelian parts of the West and Central African region as a whole. The study was based on rainfall data from more than two hundred stations, break detection methods in the time series as well as cartographic tools were used.

This study allowed to highlight the manifestations of the climatic variability observed for nearly 25 years in West and Central Africa. Whereas it had been thought for a long time that the rainfall deficit was restricted to the sahelian region, this study showed that the forest covered regions were also affected and generally speaking the so-called "humid Africa".

The decrease in rainfall entails that in runoff and thus a change in water resources availability which is the cornerstone of a fairly great number of development projects. Hydrological regimes variability and possible modifications of rainfall-runoff relationship are to be the next stages of the ICCARE programme, partial results were already published (SERVAT *et al.*, 1997).

A simple study of the time series showed straightforward fluctuations of the rainfall patterns (*Figures 2 and 3*), which happened during the late sixties or the early seventies over the whole region.

1. Orstom, 06 B.P. 1203, cedex 1, Abidjan 06, Côte d'Ivoire.

2. Orstom, B.P. 5045, 34032 Montpellier cedex, France.

3. Laboratoire Géofluides-Bassins-Eau, URA-CNRS 1765, Université Montpellier II, 34095 Montpellier cedex, France.

* Correspondance. servat@adiopo.orstom.ci.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 1999.

The mapping of the time series analysis depicts a clear general trend towards a shift of the isohyets to the south-south-west from the 1950's to the 1980's. This shift reflects a sharp drop in the annual rainfall over the whole of the non-sahelian west and central Africa.

Generally speaking it appears that the zones with extreme rainfall patterns underwent the most important modifications, namely: the wettest ones from Guinea to Ivory Coast and the driest ones, bordering the sahelian region to the North of the studied area. Elsewhere changes are less drastic (SERVAT *et al.*, 1996).

The different statistical procedures applied to the series of annual rainfall showed breaks taking place during the late 1960's or the early 1970's (Figure 4), which was in keeping with what had been observed in the sahelian region. Rainfall deficits were in the order of 20% and they could reach values higher than 25% (Table 1), in particular along the Atlantic Coast or in the North, which upholds the fact that 'humid Africa' was also severely affected by the rainfall variability.

Other variables which allow a more qualitative characterisation of the phenomenon were also studied (Table 2) (Figures 5 and 6) (PATUREL *et al.*, 1997, SERVAT *et al.*, 1997). They brought complementary information about the ways the rainfall variability expresses itself. The pattern of the rainy season was slightly different from what it had been before the 1970's, its length was generally shorter either because it started later than before or because it ended earlier. Likewise, the rainfall distribution was modified, which resulted in a more 'homogeneous' pattern for the zone with only one rainy season and in a sensible change in the ratio of the rainfall heights of the two rainy seasons.

Some of the regions of the so-called "wooded" savannah saw a modification of their climate with a shift from a "guinean" climate toward a "sudanese" one. In west Africa some regions saw also a decrease of the amount of precipitation occurring outside the rainy season, which led to a strengthening of the dry season and contributed, if need be, to the perception of the phenomenon by local populations. The decrease in the number of rainy days, where it was possible to study it, was in line with the rainfall deficit.

A complementary statistical approach was carried out, it consists of a spatio-temporal study using a multidimensional exploratory analysis (KHODJA *et al.*, 1998). This led to using a multivariate test for detecting a shift in the mean value. This approach confirmed the results obtained with univariate analyses whether it is for the time location of the break (late 1960's, early 1970's) or whether for the heterogeneous character of the phenomenon both from a spatial or temporal point of view. A major characteristic of this persisting rainfall deficit seems to be the existence of two axes of heterogeneity along the north-south and east-west directions (Table 3) (Figure 7).

The survey of the rainfall time series from the origin allowed to place the drought in a historical perspective. So, it appears that, since the beginning of the century, the region underwent a succession of dry and wet periods, although it is difficult to speak of cycles. The phenomenon observed during the late 60's and the early 70's appears, however, as the most significant from a statistical point of view. Besides, the still lasting period of deficit has displayed a length and an intensity quite remarkable, in particular in the north and west sectors of the studied zone where the phenomenon presents an even more exceptional character (Figures 8,9,10 and 11).

Even though what brought about this diminution in rainfall remains, until now, unexplained, certain human activities undoubtedly contributed to the aggravation of the phenomenon. Although deforestation cannot be held entirely responsible for the drought, the fact remains that overlogging helped

to increase the rainfall deficit in numerous regions along the Atlantic coast and the Guinean gulf.

Of course, this rainfall deficit has important consequences on the availability of water resources in those regions. Agriculture, the filling of dams and therefore the hydroelectric production, to mention only a few domains, are strongly penalised by this decrease in resources.

If a real shortage is not to be feared in those regions where the quantities of precipitation remain high in absolute terms, the effects of that variability can still prove to be disastrous, as they modify the elements of a balance that is already threatened by other factors (anthropic pressure and deforestation, for example).

The ICCARE programme, which goes on with the study of the modifications of the river hydrological regimes, will give answers as to the effect of the rainfall deficit upon water resources availability.

Key-words: western and central Africa, rainfall, climate variability, drought, time series, break detection.

RÉSUMÉ

La sécheresse observée depuis plus d'une vingtaine d'années dans les pays sahéliens se fait également ressentir plus au sud dans des régions d'Afrique aux climats plus humides. Cette baisse de la pluviométrie et la diminution des apports en eau de surface qu'elle entraîne y sont de nature à pénaliser les différents projets de développements liés à l'eau. Le programme ICCARE mené par l'ORSTOM a pour objet l'identification et les conséquences de cette variabilité climatique dans l'ensemble de la zone non sahélienne d'Afrique de l'Ouest et Centrale, en s'appuyant sur les données de deux cents postes pluviométriques et sur un ensemble de méthodes alliant représentations cartographiques et procédures statistiques de détection de ruptures dans les séries chronologiques, univariées et multivariées.

La simple étude des séries chronologiques de hauteurs précipitées annuelles fait apparaître une nette et brutale fluctuation du régime pluviométrique dans toute la région considérée, à la fin des années 1960 et au début des années 1970. D'une manière générale, il apparaît que ce sont les zones à régime pluviométrique extrême qui ont subi les modifications les plus importantes : les plus arrosées (de la Guinée à la Côte d'Ivoire) et les plus arides (la bordure sahélienne au nord de la zone étudiée). Entre les deux, le phénomène est d'intensité plus nuancée. Les différentes procédures statistiques appliquées aux séries de hauteurs annuelles précipitées soulignent l'existence d'une rupture survenue à la fin des années 1960 ou au début des années 1970, et donc en phase avec ce qui a été observé et étudié au Sahel.

D'autres variables permettant une caractérisation plus « qualitative » du phénomène ont également été étudiées. Elles apportent un complément d'information quant aux manifestations de cette variabilité pluviométrique et montrent que la variabilité climatique se traduit à différents niveaux (durée des saisons des pluies, quantités précipitées hors saisons des pluies, etc.).

L'examen des séries chronologiques depuis l'origine des stations a permis de resituer l'événement observé dans une perspective historique faite d'alternances de périodes sèches et de périodes humides. Le phénomène observé à la fin des années 1960 et au début des années 1970 apparaît, cependant, comme le plus significatif du point de vue statistique.

Si les causes premières d'apparition du phénomène sont, à l'heure actuelle, encore insuffisamment expliquées, et ce même si certaines activités humaines y

ont, sans aucun doute, contribué, cette baisse de la pluviométrie a, bien entendu, des conséquences importantes sur la disponibilité des ressources en eau dans ces régions. Si la carence pure et simple n'est pas à craindre dans ces régions où les quantités précipitées restent importantes dans l'absolu, les effets de cette variabilité climatique peuvent, malgré tout, se révéler désastreux, en ce sens qu'ils modifient les données d'un équilibre déjà souvent mis à mal par ailleurs (pression anthropique et déforestation par exemple).

Mots clés : Afrique de l'ouest et centrale, pluviométrie, variabilité climatique, sécheresse, séries chronologiques, détection de ruptures.

1 – INTRODUCTION

La sécheresse observée depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'Ouest et Centrale a des conséquences souvent graves dans les pays sahéliens, ce qui explique et justifie l'intérêt constant et soutenu porté à ces régions (SIRCOULON, 1976 ; OLIVRY, 1983 ; NICHOLSON, 1985 ; HUBERT et CARBONNEL, 1987 ; SIRCOULON, 1987 ; HUBERT *et al.*, 1989 ; DEMARÉE, 1990). Cependant, plus au sud, dans des régions aux climats plus humides, la sécheresse se fait également ressentir (SUTCLIFFE et KNOTT, 1987 ; NICHOLSON *et al.*, 1988 ; MAHÉ et OLIVRY, 1991 ; OLIVRY *et al.*, 1993 ; PATUREL *et al.*, 1995). C'est un sentiment unanimement partagé, notamment, par les populations dans les pays situés en bordure du Golfe de Guinée. Les conséquences de cette sécheresse sont généralement moins sévères et moins dommageables dans ces régions plus équatoriales. La baisse de la pluviométrie et la diminution des apports en eau de surface y sont cependant de nature à pénaliser les projets de développement liés, en particulier, à l'agriculture. Le fonctionnement des aménagements issus d'études réalisées à partir de données enregistrées lors de périodes beaucoup plus favorables peut également s'en trouver gravement altéré. À titre d'exemple, une étude récente (SERVAT et SAKHO, 1995) a mis en évidence une importante instabilité de la ressource en eau dans le bassin du Sassandra (ouest et sud-ouest de la Côte d'Ivoire), particulièrement sensible depuis le début des années 1970. Les conséquences de ce phénomène se sont révélées très inquiétantes en ce qui concerne le bon fonctionnement et la rentabilité des projets envisagés dans ce cas particulier, et, plus généralement, dans le cas des ouvrages déjà réalisés. Elles se traduisent, par exemple, par des objectifs de production hydroélectrique ou d'irrigation non atteints.

Au vu de ce constat, et dans le cadre du projet FRIEND AOC (Afrique de l'Ouest et Centrale) du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO, une étude a été entreprise (programme ICCARE de l'ORSTOM) qui a pour objet l'identification et les conséquences de cette variabilité climatique dans l'ensemble de la zone non sahélienne d'Afrique de l'Ouest et Centrale (SERVAT, 1994). Les résultats présentés ici et relatifs aux différents points étudiés concernant la pluviométrie (précipitations annuelles et mensuelles, nombre annuel de jours de pluie, décalage des saisons des pluies dans le temps, etc.) constituent le premier volet de cette étude qui s'intéresse également aux écoulements et à la relation pluie-débit. On a séparé, ici, ce qui relève d'une analyse univariée d'une part et d'une analyse multivariée d'autre part. L'étude des séries longues disponi-

bles permet, enfin, de resituer la variabilité pluviométrique actuelle dans un contexte historique.

2 – DONNÉES ET MÉTHODES

2.1 Données de base

Les données de pluviométrie journalière, mensuelle et annuelle des seize pays concernés par l'étude (du Sénégal à la Centrafrique et du Mali au Cameroun, voir figure 1) ont été analysées. Seule la partie non sahélienne de cette zone (au sud du 14^e parallèle) a, cependant, été prise en considération.

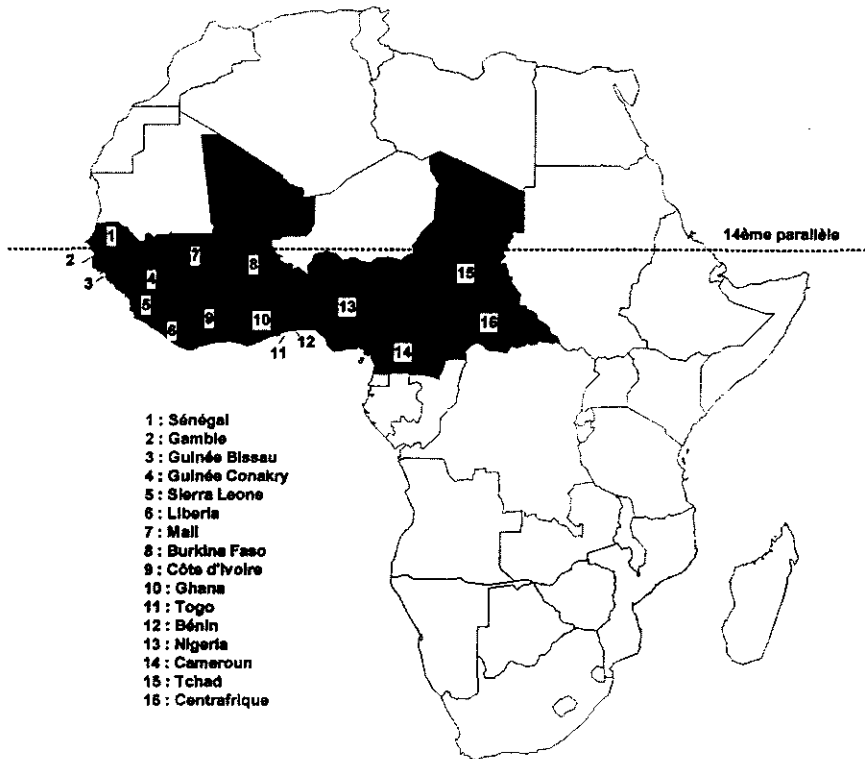


Figure 1 Carte de situation des pays de la zone étudiée.
Map showing the studied area.

La sélection des postes analysés repose sur des critères de qualité des données et de longueur des séries pluviométriques. Deux cents postes pluviométriques ont finalement été retenus avec une densité variable d'un pays à l'autre.

L'accent a été mis sur la période 1950-1989 qui permet d'encadrer au mieux le moment supposé de la fluctuation climatique, à savoir la fin des années 1960 et le début des années 1970.

2.2 Méthodes

L'extension régionale et l'intensité de cette variabilité climatique ont été étudiées à l'aide d'un ensemble de méthodes alliant représentations cartographiques et procédures statistiques de détection de ruptures dans les séries chronologiques.

2.2.1 Niveau régional

Au niveau régional, outre la classique représentation des lignes d'isovaleur telles que les isohyètes, l'évolution de certaines des variables étudiées durant les décennies 1950, 1960, 1970 et 1980 a pu être cartographiée. À cette fin, et pour chacun des postes retenus, on a déterminé un indice annuel de la variable, défini comme une variable centrée réduite (LAMB, 1982) :

$$(X_i - \bar{X})/S$$

avec

X_i : valeur de la variable étudiée à l'année i ,

\bar{X} : valeur moyenne interannuelle de la variable étudiée sur la période 1950-1989,

S : valeur de l'écart-type de la variable étudiée sur la période 1950-1989.

La cartographie des moyennes par décennie des indices annuels ainsi calculés traduit l'évolution dans le temps et dans l'espace de la variable étudiée tout en soulignant les zones tantôt déficitaires tantôt excédentaires.

2.2.2 Niveau local

Au niveau local, un ensemble de méthodes de détection de ruptures dans les séries chronologiques a été mis en œuvre. Une « rupture » peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées. Les méthodes de détection de ruptures retenues ici permettent de détecter un changement dans la moyenne de la variable traitée dans la série (LUBÈS *et al.*, 1994).

À l'exception de l'approche de PETTITT (1979) et de la segmentation de HUBERT (HUBERT *et al.*, 1989), ces méthodes supposent une absence de modification de la variance de la série étudiée. En outre, elles ne sont généralement pas adaptées à la recherche de plusieurs ruptures dans une même série.

2.2.2.1 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_t) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (x_t) $i = 1$ 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 $U_{t,N}$.

2.2.2.2 Méthode bayésienne de Lee et Heghinian (LEE et HEGHINIAN, 1977)

La méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série.

Le modèle de base de la procédure est le suivant :

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

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 , τ et δ 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.

2.2.2.3 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 :

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

où $S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2$ pour $k = 1, \dots, N$ et D_x désigne l'écart type de la série

L'hypothèse nulle du test statistique est l'absence de rupture dans la série. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test.

Outre ces différentes procédures, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (x_i) . La variable S_k , définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $k(N-k)\sigma^2$, $k = 0, \dots, N$ 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 sous l'hypothèse nulle.

2.2.2.4. *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).

3 – MISE EN ÉVIDENCE D'UNE VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE ANNUELLE RÉGIONALE

La pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale a notablement changé au cours des quarante dernières années comme en témoignent les cartes de pluviométrie et d'indices pluviométriques (*figures 2 et 3*) dressées pour les quatre dernières décennies.

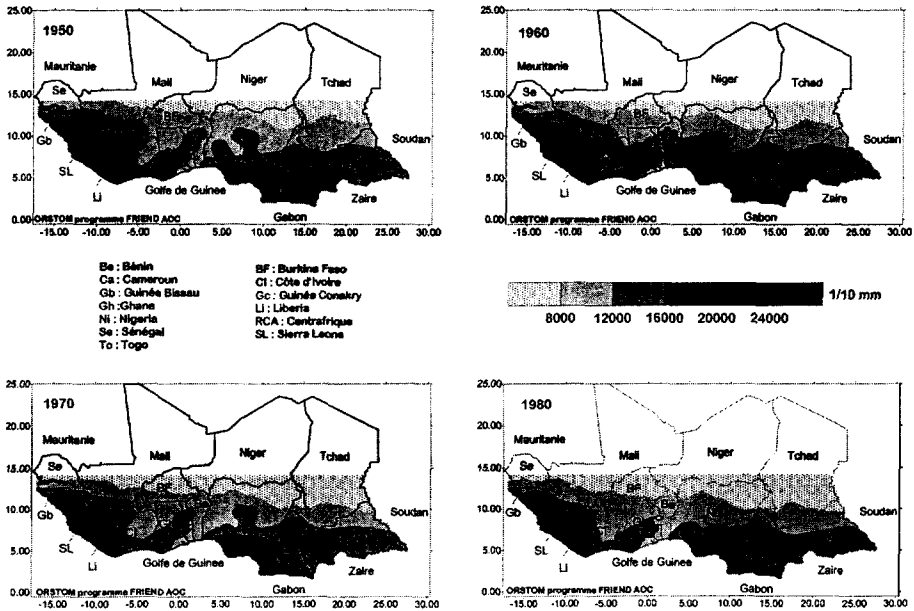


Figure 2 Pluviométrie moyenne annuelle durant les décennies 1950 à 1980.
Annual average rainfall during the decades from 1950 to 1980.

D'un point de vue général, l'analyse globale de la répartition de la pluviométrie fait apparaître un tracé des isohyètes assez irrégulier, en particulier dans les zones côtières de la façade atlantique et de l'ouest du Golfe de Guinée. Les secteurs les plus humides, avec par endroits des précipitations annuelles supérieures

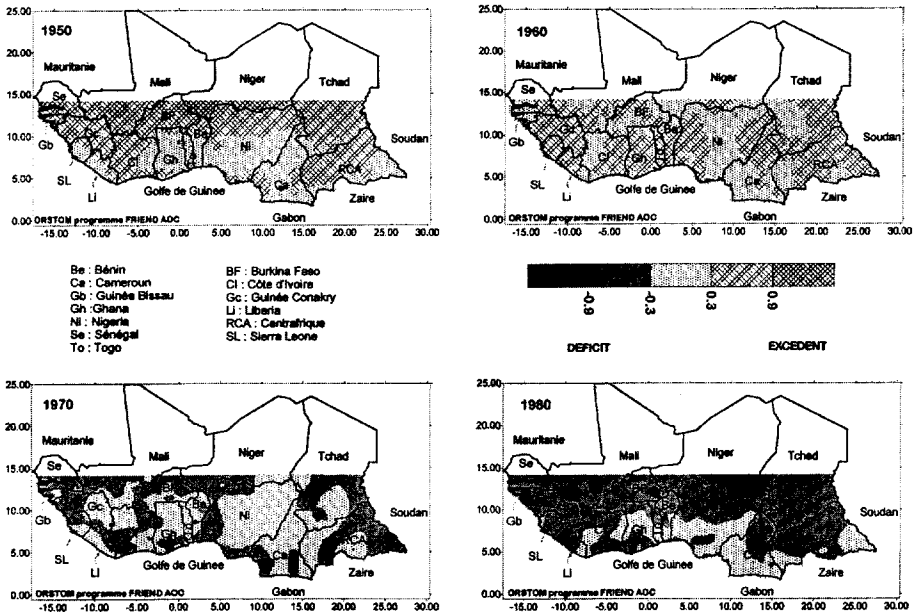


Figure 3 Indices pluviométriques durant les décennies 1950 à 1980.
Pluviometric indices during the decades from 1950 to 1980.

res à 3 000 mm, se trouvent à l'ouest, sur la côte atlantique, ainsi qu'au sud de la Côte d'Ivoire et du Nigeria. La pluviométrie des régions nord de la zone étudiée est assez uniforme, l'éloignement par rapport à l'Océan Atlantique se révélant un puissant facteur d'homogénéisation des régimes pluviométriques.

La cartographie des résultats de l'analyse des séries chronologiques (figure 2) montre une tendance générale au glissement des isohyètes vers le sud/sud-ouest, de la décennie 1950 à la décennie 1980. Cette évolution traduit une diminution nette et généralisée de la pluviométrie annuelle sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne, le phénomène étant cependant plus marqué vers l'ouest :

i) Dès la décennie 1970, la zone à pluviométrie inférieure à 1 200 mm s'est étendue vers le sud, signe d'un important déficit pluviométrique. Cette tendance s'est encore accrue durant la décennie 1980 au cours de laquelle cette zone couvrirait alors près des deux tiers de la région étudiée. Certaines régions de savane arborée ont ainsi vu leur régime climatique modifié, passant d'un régime « guinéen » à un régime « soudanais ».

ii) Jusqu'à la fin des années 1960, l'isohyète 1 600 mm apparaissait comme caractéristique d'une pluviométrie moyenne en zone forestière. Dès les années 1970, cette correspondance n'était plus systématiquement vérifiée, en particulier dans les forêts tropicales du sud de la Côte d'Ivoire, du Cameroun et de Centrafrique. Cette baisse de la pluviométrie s'est encore accentuée durant la décennie 1980.

iii) Les régions à forte pluviométrie (plus de 2000 mm par an) sont également en nette régression. Elles ont même totalement disparu en certains endroits.

Cette variabilité pluviométrique semble donc être apparue à la fin de la décennie 1960 et au début de la décennie 1970. Ce que confirment les études réalisées à l'aide des tests de rupture au sein des séries chronologiques de pluviométrie annuelle. En règle générale, les différentes procédures soulignent, en effet, l'existence d'une rupture survenue à cette période (*figure 4*), en phase avec ce qui a été observé au Sahel. Les postes pluviométriques pour lesquels une rupture a pu être détectée sont plus nombreux à l'ouest qu'à l'est (SERVAT *et al.*, 1996). Les déficits pluviométriques constatés avoisinent fréquemment les 20 à 25 % (*tableau 1*).

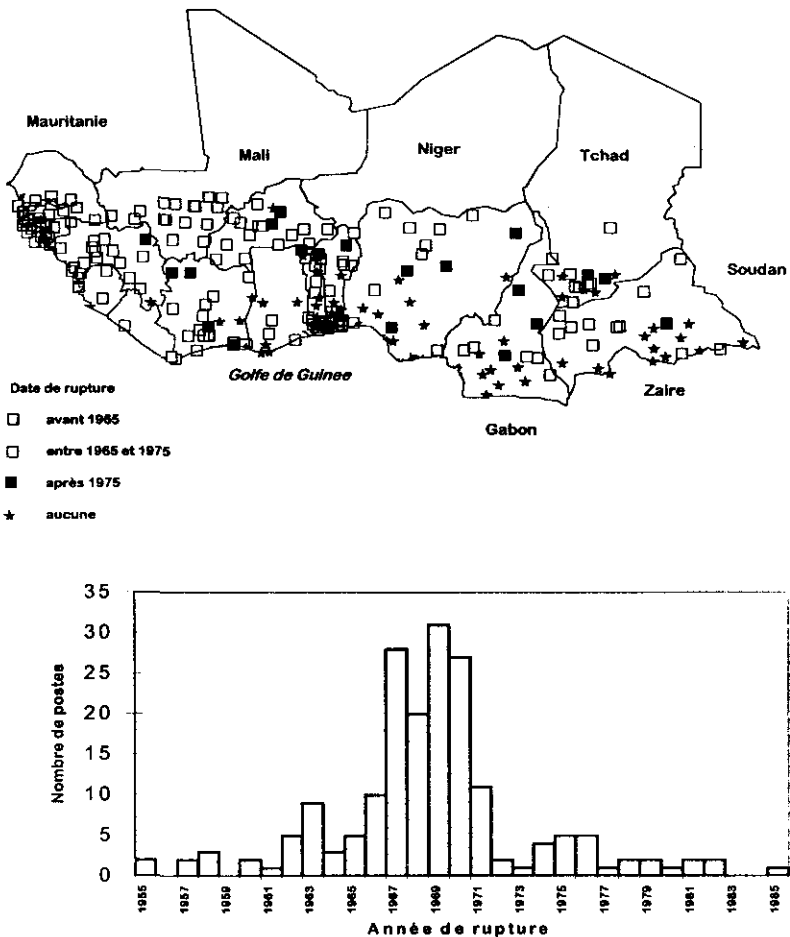


Figure 4 Localisation dans le temps et dans l'espace des ruptures observées dans les séries chronologiques de pluviométrie annuelle.

Location in time and space of the breakpoints observed in the annual rainfall time series.

Tableau 1 Déficits pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture.
Table 1 Average rainfall deficits observed with respect to the date of the breakpoint.

Pays	Déficit (en %)	Période de rupture
Bénin	19	1968-1970
Burkina Faso	22	1968-1971
Cameroun	16	1969-1971
Centrafrique	17	1968-1969
Côte d'Ivoire	21	1966-1971
Ghana	19	1968-1969
Guinée	20	1969-1970
Guinée Bissau	22	1967-1969
Liberia	25	(*)
Mali	23	1967-1970
Nigeria	19	1967-1970
Sénégal-Gambie	25	1967-1969
Sierra Leone	13	(*)
Tchad	20	1970-1971
Togo	16	1968-1970

(*) : nombre de stations insuffisant pour définir la période de rupture la plus probable

Ce déficit pluviométrique se fait ainsi ressentir depuis plus de deux décennies et semble même s'être accentué durant la décennie 1980. Certains, tels JANICOT et FONTAINE (1997), proposent d'expliquer en partie le phénomène en soulignant le lien qui existe entre variabilité des précipitations en Afrique « guinéenne » et variabilités des températures de surface de l'océan Atlantique. Par ailleurs, il est intéressant de noter, en Côte d'Ivoire par exemple, la coïncidence et la concomitance entre la baisse de la pluviométrie dans le sud forestier d'une part et la déforestation et la mise en culture de cette région d'autre part. Si à l'heure actuelle, cette constatation, soulignée par des travaux récents (BROU YAO *et al.*, 1998) est insuffisante pour aboutir à des conclusions définitives, elle est, cependant, conforme au consensus qui semble se dégager aujourd'hui à propos de l'influence humaine sur le climat (HOUGHTON, 1996).

Les différentes analyses qui suivent permettent de préciser les formes de cette variabilité pluviométrique.

4 – ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE CONSTATÉE À L'AIDE D'UNE APPROCHE UNIVARIÉE

Dans le cas des pays anglophones (Ghana, Liberia, Nigeria et Sierra Leone), certaines variables n'ont pu être élaborées et donc étudiées car les données n'étaient disponibles qu'au pas de temps mensuel.

La région étudiée couvre des zones à climats différents se traduisant par des régimes pluviométriques eux-mêmes différents. L'influence de la latitude y est prépondérante et permet de classer du sud vers le nord :

i) Le climat équatorial qui s'étend au sud du Cameroun et au sud-ouest de la Centrafrique. Il se caractérise par une pluviométrie pratiquement permanente durant toute l'année même si le profil pluviométrique annuel présente une alternance de saisons humides et de saisons moins humides. Le climat que l'on retrouve le long du Golfe de Guinée, de la Sierra Leone à la partie la plus occidentale de Côte d'Ivoire, s'en rapproche beaucoup.

ii) Le climat tropical humide qui est proche du climat équatorial. Les précipitations sont abondantes mais elles sont entrecoupées de 2 saisons sèches (globalement, « grande saison sèche » entre décembre et avril et « petite saison sèche » en août-septembre). Ce type de climat se retrouve de la Guinée à la Centrafrique et le long du Golfe de Guinée de la Côte d'Ivoire au Nigeria.

iii) Le climat tropical sec (qu'il soit de type guinéen ou soudanien) se caractérise par une saison sèche qui s'allonge. La petite saison sèche n'existe plus. Ce climat couvre toute la partie Nord (au-dessus du 10^e parallèle) de la région étudiée.

Deux types de régimes pluviométriques coexistent donc dans cette région. Au nord et à l'ouest, on ne rencontre qu'une saison des pluies au cours de l'année alors qu'en bordure du Golfe de Guinée et plus à l'est on en rencontre deux. La limite entre ces deux secteurs est assez floue et il est apparu nécessaire de définir entre eux une zone qualifiée d'intermédiaire. L'évolution des zones à 1 saison des pluies, des zones à 2 saisons des pluies et des zones intermédiaires durant les décennies 1950, 1960, 1970 et 1980 a été cartographiée à partir des données observées (figure 5). Sur l'ensemble des pays étudiés, seuls 3 pays de l'Afrique de l'Ouest bordant le Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo et Bénin) ont connu des modifications notables. En Afrique Centrale, on ne note rien de réellement significatif. Durant les décennies 1950 et 1960, la zone à 1 saison des pluies s'est étendue progressivement vers le sud en direction du littoral du Golfe de Guinée. En Côte d'Ivoire, au Togo et au Bénin, la limite de cette zone s'est déplacée vers le sud d'une centaine de kilomètres de la décennie 1950 à la décennie 1980. Le littoral reste toutefois une zone à 2 saisons des pluies. La zone que l'on a qualifiée d'intermédiaire a connu son extension maximale durant la décennie 1960, particulièrement pluvieuse dans l'ensemble de la sous-région.

Parallèlement, le déroulement des saisons des pluies semble dorénavant un peu différent de ce qui était observé précédemment. L'analyse des dates de début et de fin de saison des pluies dans les zones à une comme à deux saisons des pluies montre que l'une de ces saisons, voire les deux, a, en effet, une durée plus courte qu'auparavant. C'est parfois lié au fait que la saison des pluies débute plus tardivement, parfois au fait qu'elle s'arrête plus précocement, sans qu'il soit cependant possible de généraliser. De même, le moment auquel cette modification s'est opérée ne peut être déterminé avec précision. Ce relatif raccourcissement des durées de saisons des pluies s'inscrit cependant très logiquement dans le cadre de la baisse de la pluviométrie constatée dans toute la zone.

L'analyse de la pluviométrie décadaire a, quant à elle, montré que la répartition dans le temps des quantités précipitées annuellement est désormais un peu différente de ce qu'elle était préalablement. Dans la zone à 1 saison des pluies, les décades les plus pluvieuses semblent apparaître plus précocement qu'auparavant et la saison des pluies apparaît comme plus homogène autour de ce maxi-

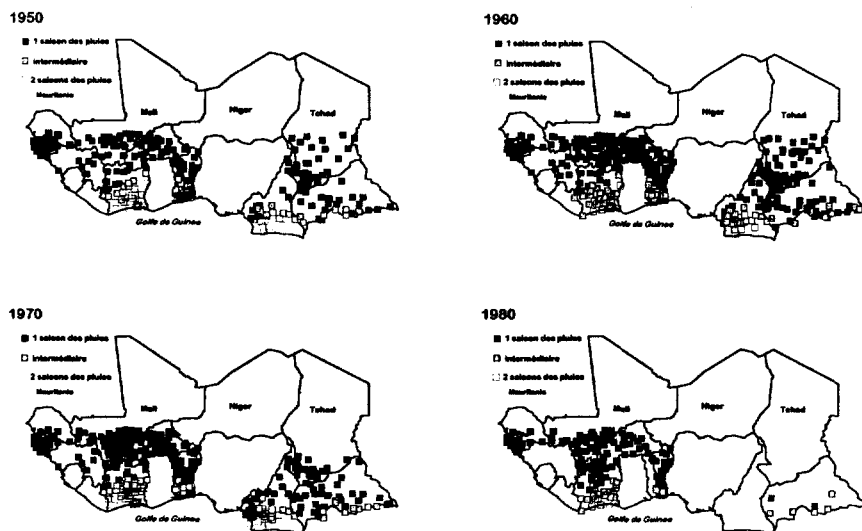


Figure 5 Évolution des zones à 1 saison des pluies, 2 saisons des pluies et des zones intermédiaires durant les décennies 1950 à 1980.

Changes in zones with one wet season, in zones with two wet seasons, and in intermediate zones over the time period from 1950 to 1980.

num pluviométrique. Dans la zone à 2 saisons des pluies, la pluviométrie enregistrée au cours des saisons pluvieuses a considérablement varié au cours des dernières décennies tout en ayant globalement diminué. Ce que l'on observe très nettement pour la première saison ou « grande saison des pluies » alors que la pluviométrie de la seconde saison ou « petite saison des pluies » a, quant à elle, beaucoup fluctué. Elle semblerait même avoir été relativement forte durant la décennie 1980, comparativement à ce que l'on observait auparavant, modifiant ainsi « l'équilibre pluviométrique » précédemment établi.

L'étude réalisée sur les pluies « hors saisons des pluies » montre que, si leur distribution dans le temps apparaît inchangée, les hauteurs précipitées correspondantes ont, en revanche, fortement diminué. Ce phénomène est plus marqué en Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement à l'ouest du Ghana, qu'en Afrique Centrale. Dans les zones à une saison sèche, la diminution des quantités précipitées se manifeste dès la fin de la décennie 1960. On assiste donc dans ces régions à un « renforcement » de la saison sèche qui se traduit par la disparition d'un certain nombre d'événements pluvieux habituellement enregistrés hors saison des pluies. Dans les zones à deux saisons sèches, les changements concernent particulièrement la « grande saison sèche ». Celle-ci a vu son cumul pluviométrique diminuer considérablement, le littoral est de la Côte d'Ivoire étant la région la plus touchée. À l'inverse, la petite « saison sèche » n'a pas connu de changements très prononcés.

On observe également que, durant les dernières décennies, le nombre annuel de jours de pluie a diminué fortement en Afrique de l'Ouest et de façon moindre

en Afrique Centrale (PATUREL *et al.*, 1997 a ; SERVAT *et al.*, 1997). Il est, cependant, difficile d'être très précis car les données disponibles de ce type ne couvrent pas exactement l'ensemble de la région étudiée. C'est encore une fois autour de l'année 1970 que l'apparition du phénomène, qui concorde généralement avec la baisse constatée des précipitations annuelles, est la plus fréquente (figure 6).

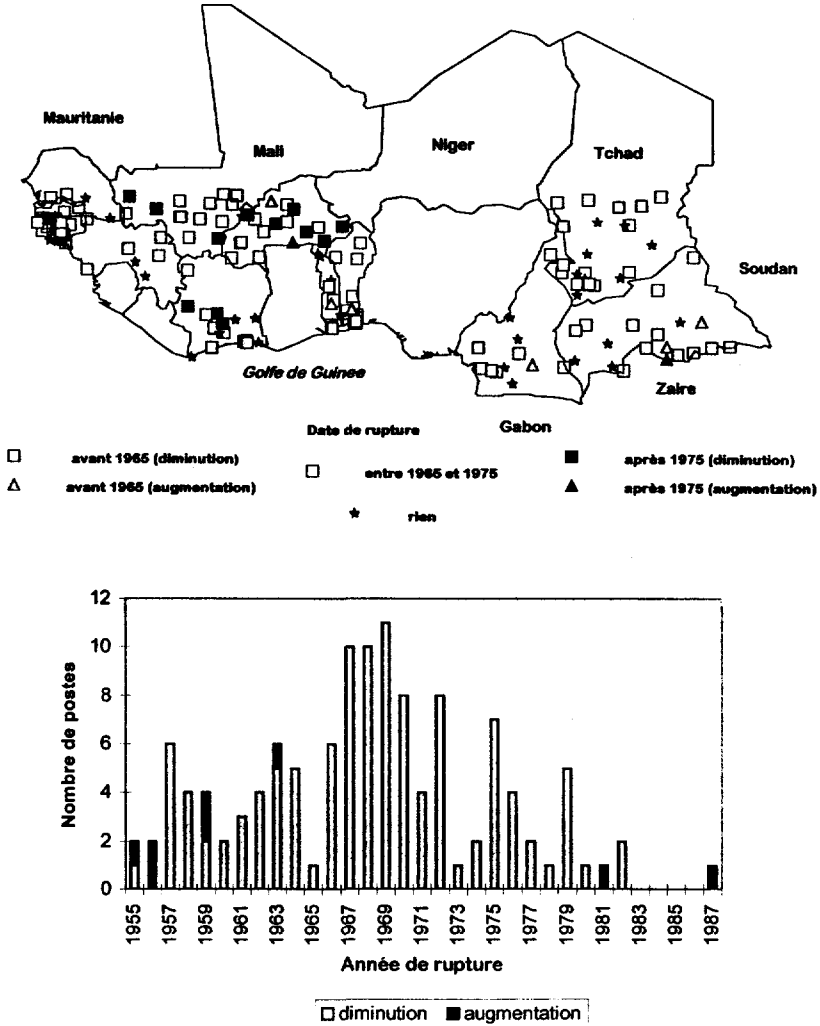


Figure 6

Localisation dans le temps et dans l'espace des ruptures observées dans les séries chronologiques de nombre de jours de pluie annuels.

Location in time and space of the breakpoints observed in the time series of the number of rainy days per year.

Par ailleurs, on note que la distribution de la pluviométrie journalière n'a apparemment pas varié au cours des dernières décennies. On constate, en effet, que, partout où des données journalières étaient disponibles, la baisse de la pluviométrie annuelle semble avoir uniformément affecté toutes les « catégories » de pluviométrie journalière, des plus faibles au plus importantes. Néanmoins, quelques ruptures et tendances peuvent être observées en certains endroits à la fin de la décennie 1960 ou au début de la décennie 1970, traduisant peut-être un changement qui se révélerait plus net à l'échelle de l'événement pluvieux. Ce type de données, relevant de la pluviographie, n'était malheureusement pas accessible d'un point de vue régional, n'autorisant pas, de ce fait, une étude à des pas de temps plus fins.

5 – ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE CONSTATÉE À L'AIDE D'UNE APPROCHE MULTIVARIEE

L'ensemble des approches univariées réalisées dans le cadre du programme ICCARE, et dont les résultats viennent d'être exposés, montrent clairement que l'Afrique de l'Ouest a subi dans les années 60-70 des modifications climatiques importantes. Les tests statistiques mis en œuvre sur chaque site de mesure, pour les différentes variables étudiées, concluent généralement à des ruptures « en moyenne » sur la plupart des stations de cette région.

Cependant, les résultats obtenus ponctuellement, par poste et par variable, ne se sont pas toujours révélés faciles à interpréter globalement ou à synthétiser. C'est la raison pour laquelle, s'appuyant sur les travaux de SEN et SRIVASTAVA (1973) et SRIVASTAVA et CARTER (1983), on a alors cherché à mettre en œuvre une analyse spatio-temporelle généralisée au cas multivarié (KHODJA *et al.*, 1998). Cette approche permet ainsi, d'une part, de détecter des ruptures climatiques caractérisées par plusieurs variables pluviométriques et, d'autre part, de répartir spatialement les postes ayant subi des changements similaires sur une période commune.

D'un point de vue pratique, préalablement à l'étude de détection de rupture, il convient de résumer l'information brute au moyen d'une méthode d'analyse des données exploratoire et multidimensionnelle qui permet de constituer des groupes de postes à l'intérieur desquels sont mis en évidence des comportements similaires. La méthode exploratoire utilisée est STATIS (LAVIT, 1988). Il s'agit d'une analyse conjointe de plusieurs tableaux quantitatifs, pour lesquels est recherchée, entre autres, une structure commune appelée « interstructure ». On réalise alors une Analyse en Composantes Principale classique afin d'obtenir une représentation des stations.

Dans le cas présent, du fait du nombre important de données manquantes, des pays comme le Nigeria ou le Ghana n'ont pas pu être pris en compte. Quatre variables quantitatives au pas de temps annuel ont été considérées pour chacune des stations pluviométriques retenues : cumul des pluies, nombre annuel de jours de pluie, durée de la saison des pluies et hauteur précipitée durant la saison sèche.

La figure 7 présente les trois groupes de postes obtenus après mise en œuvre de la méthode :

- i) groupe I : Togo, Bénin et sud de la Côte d'Ivoire,
- ii) groupe II : Cameroun, Centrafrique et Burkina Faso,
- iii) groupe III : Guinée Conakry, Guinée Bissau, Mali et Sénégal.

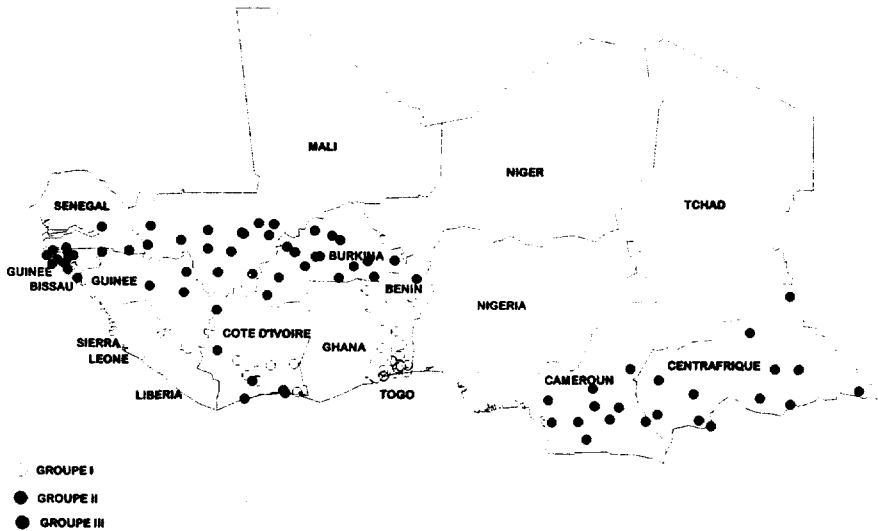


Figure 7 Cartographie des résultats issus de la mise en œuvre de la méthodologie d'analyse multivariée.

Map showing the results of the multivariate statistical analysis.

L'organisation spatiale des postes fait nettement apparaître une répartition nord-sud d'une part et est-ouest d'autre part malgré l'absence de données sur le Ghana et le Nigeria. La carte obtenue résume donc les comportements pluviométriques de l'ensemble des stations de la zone étudiée entre 1950 et 1980, tels qu'ils peuvent être décrits à l'aide des quatre variables hydrologiques retenues. Il est ainsi possible d'associer à chaque groupe de postes pluviométriques des caractéristiques communes pour lesquelles on pourra chercher à mettre en évidence des ruptures « en moyenne ».

Le test de rupture « en moyenne » et l'estimation du point de rupture s'effectuent sur les séries des moyennes intergroupes pour chaque variable. Les résultats sont regroupés dans le tableau 2. Ils confirment ceux des études univariées (PATUREL *et al.*, 1997 a ; SERVAT *et al.*, 1997), à savoir l'existence de ruptures « en moyenne » dans les années 1960 et 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale. Les ruptures détectées en 1967 et 1969 confirment le début d'une période déficitaire ; celle détectée pour le groupe I (Togo, Bénin et quelques stations du sud de la Côte d'Ivoire) en 1962 ne traduit qu'un déficit peu significatif. En outre, cette étude spatio-temporelle multivariée permet de proposer une organisation des postes pluviométriques, sur toute la durée de l'étude, qui traduit des comportements et des variations climatiques communs.

Tableau 2 Valeur de la statistique S et année estimée de rupture dans le cas de l'approche multivariée.**Table 2** Value of the S statistic and breakpoint year estimated from the multivariate statistical analysis.

	Valeur de la statistique S	Année estimée de la rupture
groupe I	0.3	1962
groupe II	0.44	1969
groupe III	0.69	1967

La valeur à partir de laquelle on rejette H_0 avec $\alpha = 5\%$ étant égale à 0,2967, on conclut à l'existence d'une rupture en moyenne sur les groupes I, II et III respectivement en 1962, 1969 et 1967. C'est le groupe III qui présente la rupture la plus significative.

6 – DÉFICIT PLUVIOMÉTRIQUE ACTUEL ET VARIABILITÉ CLIMATIQUE DURANT LE XX^e SIÈCLE

En se basant sur l'étude des longues séries observées, il est possible de situer la période actuelle de pluviométrie déficitaire dans une perspective historique et de mieux évaluer ainsi l'importance réelle de cette évolution climatique récente. Si la plupart de ces séries de référence ne remontent qu'au début du siècle, voire aux années 1920, l'antériorité de cette information permet néanmoins d'apprécier l'alternance des périodes sèches et humides et donc de mieux caractériser le déficit actuel, y compris dans un contexte régional (PATUREL *et al.*, 1997 b).

6.1 Représentations graphiques et analyse cartographique

La période qui va de 1925 (+/- 5 ans) à 1990 a été retenue comme période de référence car commune à tous les postes étudiés et présentant une forte densité d'information. Sur l'ensemble de cette période et pour chacun des postes étudiés, l'indice pluviométrique annuel défini plus haut (LAMB, 1982) a été calculé.

Les résultats ont été reportés en figure 8, en rangeant les postes pluviométriques par longitude croissante. On peut en déduire les conclusions suivantes :

- i) la période 1936-1950 est déficitaire. Ce caractère est plus marqué entre 0° et 4°E (soit au Togo et au Bénin) et il s'estompe de part et d'autre, en particulier à l'ouest,
- ii) la période 1951-1968 est excédentaire. Ce caractère est légèrement plus marqué à l'ouest de la zone étudiée (soit à l'ouest de la Côte d'Ivoire),
- iii) la période 1969-aujourd'hui est très nettement déficitaire. Ce caractère s'observe sur l'ensemble de la zone, mais plus encore à l'ouest.

Les résultats ont ensuite été reportés en figure 9 en rangeant les stations par latitude croissante. On y observe la même succession de périodes déficitaires et excédentaires :

- i) la période 1936-1950 est déficitaire, et principalement le long du Golfe de Guinée,
- ii) la période 1951-1968 est nettement excédentaire,
- iii) la période 1969-aujourd'hui est déficitaire, caractère très marqué au-delà de 8°N.

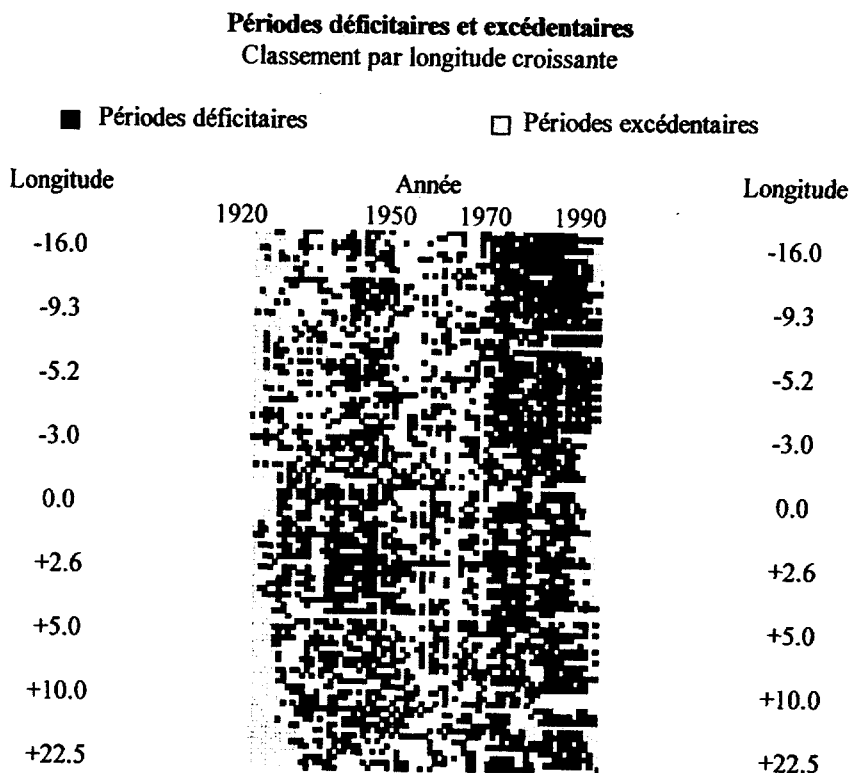


Figure 8 Visualisation des périodes déficitaires et excédentaires en fonction de la longitude du poste de mesure
Depiction of the periods of rainfall deficits or rainfall excess as a function of the longitude of the monitoring station.

La figure 10 présente une cartographie régionale de la moyenne par décennie des indices pluviométriques. On observe alors :

- i) des zones ponctuellement déficitaires durant les décennies 1930 et 1940 ; les valeurs des indices sont, cependant, faibles en valeur absolue,
- ii) des zones excédentaires durant les décennies 1950 et 1960 ; d'abord observé dans le nord ce caractère se généralise à l'ensemble de la région au cours des années 1960,
- iii) des zones déficitaires durant les décennies 1970 et 1980 ; ce caractère s'accroît au cours de la décennie 1980 et apparaît très marqué au-delà de 10°N et de 5°W. Les valeurs des indices y sont élevées en valeur absolue.

L'examen des données antérieures à la période de référence, disponibles pour quelques postes uniquement, révèle un épisode déficitaire entre 1910 et 1922 et un autre, excédentaire, entre 1922 et 1936. Les différentes représentations utilisées, et particulièrement la figure 10, soulignent donc l'existence d'une alternance de périodes sèches et humides depuis le début du siècle, sans, pour autant, que l'on puisse parler de cycle compte tenu de sa forte irrégularité.

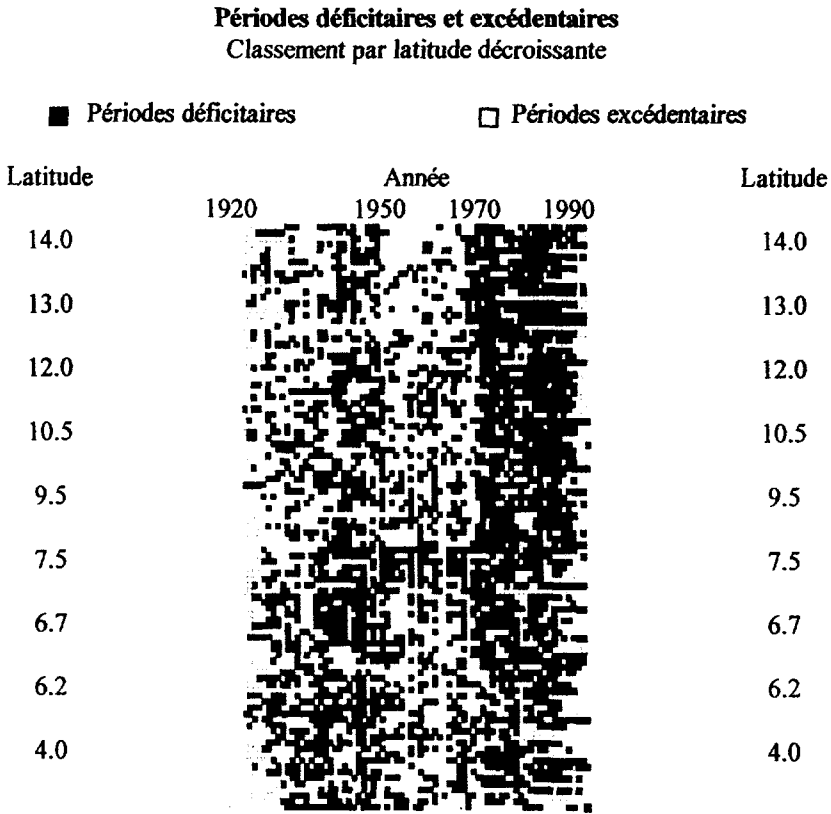


Figure 9 Visualisation des périodes déficitaires et excédentaires en fonction de la latitude du poste de mesure
Depiction of the periods of rainfall deficits or rainfall excess as a function of the latitude of the monitoring station.

6.2 Analyse statistique

Le test de PETTITT a été appliqué à chacune des séries chronologiques étudiées. Les résultats montrent qu'une rupture (c'est-à-dire, ici, une diminution de la pluviométrie annuelle) y est détectée majoritairement entre 1960 et 1979. Le tableau 3 présente la probabilité associée à la statistique du test calculé pour chacun des postes. Les niveaux de signification les plus élevés se situent à l'ouest de 5°W de longitude et au nord de 8 à 10°N de latitude, ce que montre la figure 11 sur laquelle ces niveaux de signification ont été reportés. Dans 5 cas, la rupture a été signalée autour des années 1940. Les 6 postes pour lesquels le test révèle une augmentation de la pluviométrie annuelle sont isolés les uns des autres et leurs résultats ne traduisent donc en rien un comportement régional.

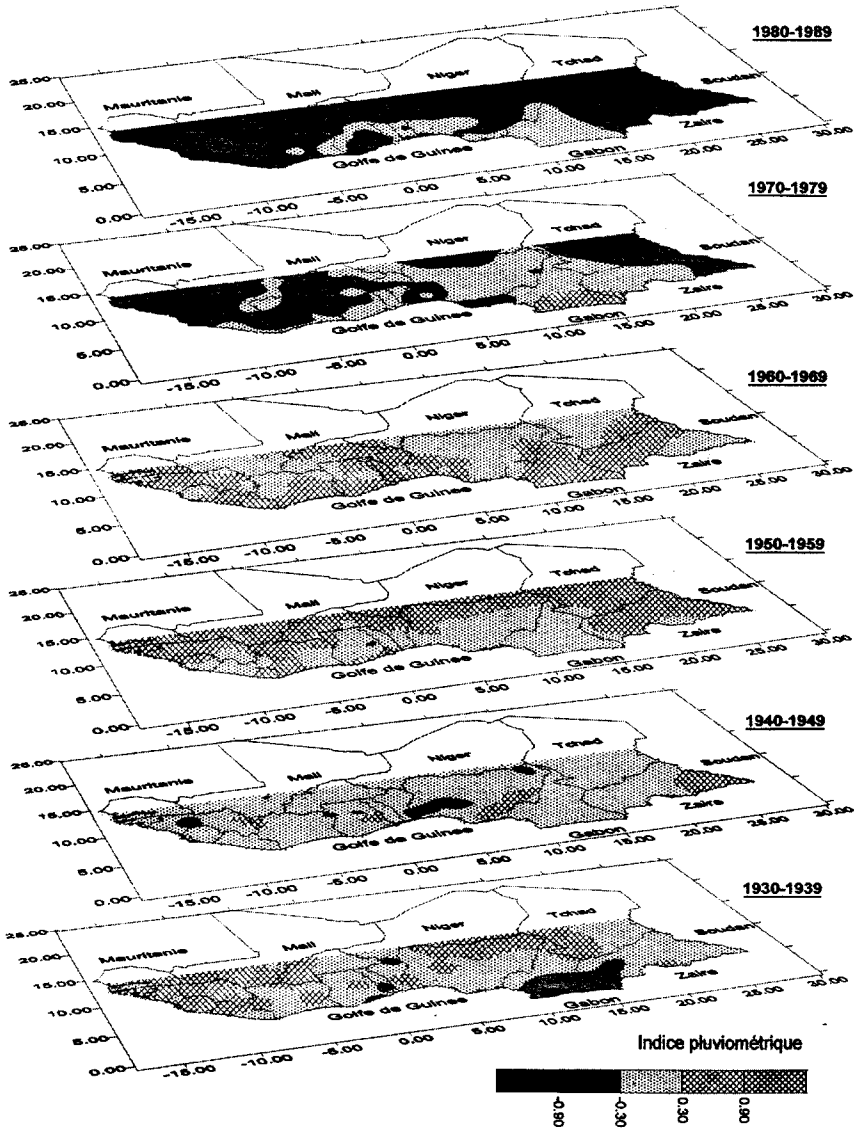


Figure 10 Évolution des indices pluviométriques de la décennie 1930 à la décennie 1980.

Changes in the pluviometric indices from 1930 to 1980.

La détection presque systématique d'une rupture durant la période 1960-1979 par le test de Pettitt renforce l'idée qui fait de la période déficitaire actuelle la plus intense connue par la région depuis le début du siècle. Le test ne pouvant, en effet, signaler qu'une rupture, celle-ci correspond à l'évolution jugée la plus significative.

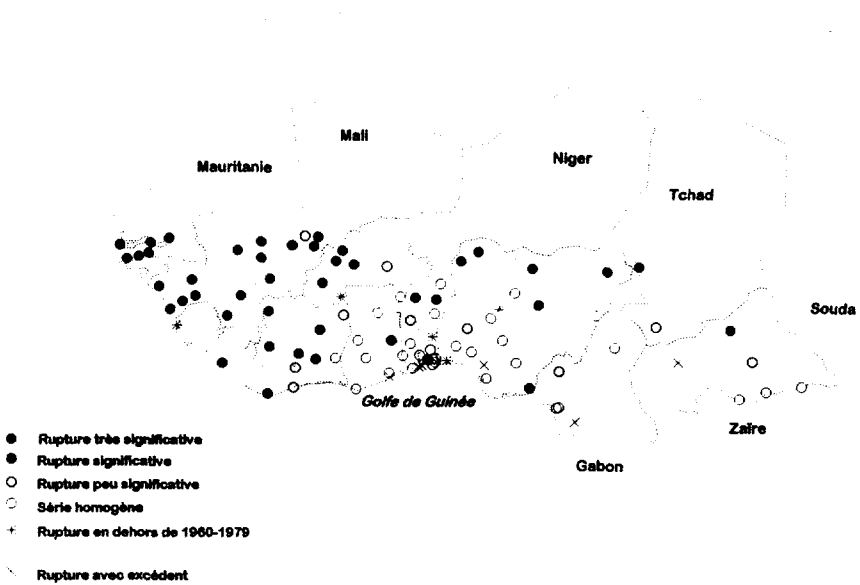


Figure 11 Niveaux de signification des résultats du test de Pettitt.
Levels of significance of the results of the Pettitt statistical test.

Tableau 3 Probabilité associée au test de Pettitt. Rupture entre 1960 et 1979.

Table 3 Probability associated with the Pettitt statistical test between 1960 and 1970.

Probabilité associée	Classe	Dénombrement
< 1 %	rupture très significative	32
entre 1 et 5 %	rupture significative	10
entre 5 et 20 %	rupture peu significative	11
> 20 %	série homogène	32
< 5 %	excédent pluviométrique	6
< 1 %	rupture très significative en dehors de la période 1960-1979	5

Par ailleurs, il n'a pas été possible d'identifier une relation systématique à l'échelle interannuelle entre les phénomènes ENSO (QUINN *et al.*, 1987 ; MORON, 1994) et la succession des périodes sèches et humides observée en Afrique de l'Ouest et Centrale. Seule la concomitance entre l'ENSO très important observé en 1982-1983 et une année particulièrement déficitaire enregistrée dans cette région en 1983 a pu être mise en évidence.

Néanmoins, la prise en compte, à l'avenir, des grands modes de la variabilité climatique pourra, à n'en pas douter, apporter des éléments d'explication importants quant aux variations spatio-temporelles de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale, sahélienne et non sahélienne.

7 – CONCLUSION

Cette étude a permis d'identifier les manifestations de la variabilité climatique observée depuis près de vingt cinq ans maintenant en Afrique de l'Ouest et Centrale. Alors qu'on l'a longtemps cru cantonné au Sahel, cette analyse a montré que le déficit pluviométrique a également touché les régions forestières et, plus généralement, l'Afrique dite « humide ».

Cette baisse de la pluviométrie a, bien entendu, des conséquences sur les régimes des cours d'eau et donc sur la disponibilité des ressources en eau, clé de la réussite de bon nombre de projets de développement. La variabilité des régimes hydrologiques, ainsi que l'étude des éventuelles modifications de la relation pluie-débit, font l'objet des deux phases suivantes du programme ICCARE, dont certains résultats ont d'ores et déjà été publiés (SERVAT *et al.*, 1997).

Force est de constater que la simple étude des séries chronologiques de hauteurs précipitées annuelles fait apparaître une nette et brutale fluctuation du régime pluviométrique dans toute la région considérée, à la fin des années 1960 et au début des années 1970.

La cartographie des résultats de l'analyse des séries chronologiques montre une tendance générale au glissement des isohyètes vers le sud/sud-ouest, de la décennie 1950 à la décennie 1980. Cette évolution traduit une diminution nette et généralisée de la pluviométrie annuelle sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne.

D'une manière générale, il apparaît que ce sont les zones à régime pluviométrique extrême qui ont subi les modifications les plus importantes : les plus arrosées (de la Guinée à la Côte d'Ivoire) et les plus arides (la bordure sahélienne au nord de la zone étudiée). Entre les deux, le phénomène est d'intensité plus nuancée.

Les différentes procédures statistiques appliquées aux séries de hauteurs annuelles précipitées soulignent l'existence d'une rupture survenue à la fin des années 1960 ou au début des années 1970, et donc en phase avec ce qui a été observé et étudié au Sahel. Les déficits pluviométriques correspondants sont de l'ordre de 20 %. Ils atteignent parfois des valeurs supérieures à 25 %, notamment sur la côte atlantique ou dans le nord, confirmant ainsi que l'Afrique « humide » a, elle aussi, été sévèrement touchée par cette variabilité pluviométrique.

D'autres variables permettant une caractérisation plus « qualitative » du phénomène ont également été étudiées. Elles apportent un complément d'information quant aux manifestations de cette variabilité pluviométrique.

Il apparaît ainsi que le déroulement des saisons des pluies est légèrement différent de ce qu'il était avant la décennie 1970. Les saisons des pluies sont généralement plus courtes, soit parce qu'elles commencent plus tard, soit parce qu'elles finissent plus tôt. De même, les quantités précipitées durant les saisons des pluies ont désormais une répartition qui s'est trouvée modifiée. Cela se traduit par une pluviométrie plus homogène (zone à 1 saison des pluies) ou par une variation sensible du rapport des hauteurs précipitées des deux saisons des pluies. Certaines régions de savane arborée ont ainsi vu leur régime climatique modifié, ce qui se traduit par le passage d'un régime « guinéen » à un régime « soudanais ».

Certaines régions de la zone, et plus particulièrement en Afrique de l'Ouest, ont également vu une diminution des précipitations enregistrées hors saison des pluies. Ce phénomène marque un « renforcement » de la saison sèche qui contribue, tout à la fois, à la baisse des précipitations annuelles et à la nette perception du phénomène par les populations. La diminution du nombre annuel de jours de pluie, là où elle a pu être étudiée, est un corollaire vérifié du déficit pluviométrique observé.

Une approche statistique complémentaire a été mise en œuvre qui consiste en une étude spatio-temporelle des données à l'aide d'une méthode d'analyse exploratoire multidimensionnelle. Celle-ci a ensuite conduit à l'utilisation d'un test multivarié de détection de ruptures en moyenne. Cette approche confirme les résultats des analyses univariées, tant du point de vue des dates de rupture (fin des années 1960, début des années 1970) que de l'hétérogénéité spatiale et temporelle du phénomène. L'existence de deux axes privilégiés d'hétérogénéité, le premier nord-sud et le second est-ouest, apparaît, en effet, comme l'une des caractéristiques majeures de ce déficit pluviométrique persistant.

L'examen des séries chronologiques depuis l'origine des stations a permis de resituer l'événement observé dans une perspective historique. Il apparaît ainsi que, depuis le début du siècle, la région a connu une succession de périodes sèches et humides, sans que l'on puisse toutefois parler de cycles. Le phénomène observé à la fin des années 1960 et au début des années 1970 apparaît, cependant comme le plus significatif du point de vue statistique. Cette période déficitaire, toujours d'actualité, présente, en outre, une durée et une intensité tout à fait remarquables. En particulier dans les secteurs ouest et nord de la zone étudiée, où le phénomène revêt un caractère exceptionnel, ce qui n'est sans doute pas le cas plus à l'est.

Si les causes premières d'apparition de cette baisse de la pluviométrie et de ses conséquences restent, à l'heure actuelle, insuffisamment expliquées, certaines activités humaines ont, sans aucun doute, contribué à accentuer le phénomène. En effet, si la déforestation ne peut pas être tenue comme cause principale de la sécheresse, la surexploitation de la forêt dans bon nombre de régions bordant l'Océan Atlantique et le Golfe de Guinée a très certainement participé à accroître les déficits pluviométriques.

Cette baisse de la pluviométrie a, bien entendu, des conséquences importantes sur la disponibilité des ressources en eau dans ces régions. L'agriculture, l'alimentation des retenues et la production hydroélectrique, entre autres, sont fortement pénalisées par cette diminution des ressources. Les conséquences de ce phénomène sont donc très inquiétantes en ce qui concerne le bon fonctionnement et la rentabilité des projets déjà réalisés ou envisagés.

Si la carence pure et simple n'est pas à craindre dans ces régions où les quantités précipitées restent importantes dans l'absolu, les effets de cette variabilité climatique peuvent, malgré tout, se révéler désastreux, en ce sens qu'ils modifient les données d'un équilibre déjà souvent mis à mal par ailleurs (pression anthropique et déforestation par exemple).

Le programme ICCARE qui se poursuit par l'étude des modifications intervenues au sein des régimes hydrologiques permettra d'apporter certaines réponses quant à l'incidence de ce déficit pluviométrique sur la disponibilité des ressources en eau.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Jean-François BOYER et Mahaman OUEDRAOGO pour leur contribution à la réalisation de cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BROU YAO T., SERVAT E., PATUREL J.E., 1998. Activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. In : Conférence Internationale ABIDJAN'98 – Water resources variability in Africa during the 20th century. 16-19 novembre 1998, Abidjan, Côte d'Ivoire. *IAHS Publ. n° 252*
- BUISHAND T.A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, vol. 58, pp. 11-27, 1982.
- BUISHAND T.A., 1984. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, vol. 58, pp. 51-69, 1984.
- DAGNÉLIE P., 1975. Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Volume II. Les Presses Agronomiques de Gembloux. 459 pp.
- DEMARRÉE G., 1990. An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theor Appl Climatol*, 42 : 139-147.
- HOUGHTON J., 1996. Danger Signal. *Our Planet – The UNEP Magazine for Sustainable Development*. Vol. 7, n° 5, 9-11, 1996.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 95 : 165-183, 1987.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P., CHAOUCHÉ A., 1989. Segmentation des séries hydro-météorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, vol. 110, pp. 349-367, 1989.
- JANICOT S., FONTAINE B., 1997. Évolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et températures de surface de la mer (1945-1994). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t.324, série II a, p. 785 à 792, 1997.
- KHODJA H., LUBÈS-NIEL H., SABATIER R., MASSON J.M., SERVAT E., PATUREL J.E., 1998. Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante : Les tests de permutations. *Revue de Statistique Appliquée*, 1998, XLVI(1), 95-110.
- LAMB P.J., 1982. Persistence of subsaharan drought. *Nature*, vol. 299, september, 46-47, 1982
- LAVIT C., 1988. Analyse conjointe de tableaux quantitatifs. Éditions Masson, 1988.
- 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*, vol. 19, n° 4, pp. 503-506, 1977.
- LUBÈS H., MASSON J.M., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAMÉ B., BOYER J.F., 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques-Etude bibliographique. Rapport n° 3. ORSTOM, Montpellier, France, 1994.
- 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 (Proc Vienne Symposium August 1991). *IAHS Publ n° 201*, 163-172.
- MORON V., 1994. « Variabilité des précipitations en Afrique Tropicale au Nord de l'Equateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'Atmosphère. » Thèse

- de Doctorat. Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 1994.
- NICHOLSON S.E., 1985. Subsaharan rainfall 1981-84. *JCAM*, 24, 1388-1391.
- NICHOLSON S.E., KIM J., HOOPINGARNER J., 1988. Atlas of African rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA.
- OLIVRY J.C., 1983. Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux Iles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX, n° 1, 1983.
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., MAHÉ G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide. In: Hydrology of Warm Humid Regions (Proc Yokohama Symposium July 1993). *IAHS Publ. n° 216*, 67-78.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAMÉ B., BOYER J.F., LUBÈS H., MASSON J.M., 1995. Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, Vol. 6, n° 1, mars 1995.
- PATUREL J.E., SERVAT E., LUBES H., KOUAMÉ B., OUEDRAOGO M., MASSON J.M., 1997a. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea – Part two: an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191 (1997), 16-36.
- PATUREL J.E., SERVAT E., LUBES-NIEL H., DELATTRE M.O., 1997b. Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t.325, série II a, p. 779 à 782.
- PETTITT A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, n° 2, pp. 126-135, 1979.
- QUINN W.H., NEAL V.T., 1987. El Nino Occurrences Over the past Four and a Half Centuries. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, N° C13, 14,449-14,461, December 15, 1987.
- SEN A.K., SRIVASTAVA M.S., 1973. On multivariate tests for detecting change in mean. *Sankhya Ser. A* 35, 173-185, 1973.
- SERVAT E., 1994. ICCARE-Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne-Présentation du programme. Rapport n° 1. ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1994.
- SERVAT E., SAKHO M., 1995. Instability of water resources and management of a planned water system in non sahelian West Africa. The case of the Sassandra catchment basin in Ivory Coast. *Hydrological Sciences Journal*. Volume 40, Number 2, April 1995: 217-230.
- SERVAT E., PATUREL J.E., LUBÈS H., 1996. La sécheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche*, n° 290, Septembre 1996.
- SERVAT E., PATUREL J.E., LUBES H., KOUAMÉ B., OUEDRAOGO M., MASSON J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea – Part one: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191 (1997), 1-15.
- SIRCOULON J., 1976. Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses « 1913 » et « 1940 ». *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 2, 1976.
- SIRCOULON J., 1987. Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du XX^e siècle. In: The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources (Proc Vancouver Symposium August 1987). *IAHS Publ n° 168*, 13-25.
- SRIVASTAVA M.S., CARTER M., 1983. An Introduction to Applied Multivariate Statistics, Elsevier Science Publishing, 1983.
- 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 (Proc Vancouver Symposium August 1987). *IAHS Publ n° 168*, 463-475.