

Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale

**ERIC SERVAT, JEAN-EMMANUEL PATUREL,
BROU KOUAME, MICHEL TRAVAGLIO,
MAHAMAN OUEDRAOGO, JEAN-FRANÇOIS BOYER**

ORSTOM, Programme FRIEND AOC, 06 BP 1203, Cedex 1, Abidjan 06, Côte d'Ivoire
e-mail: eric.servat@mpl.orstom.fr

HELENE LUBES-NIEL, JEAN-MARIE FRITSCH

ORSTOM, Programme FRIEND AOC, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France

JEAN-MARIE MASSON

Laboratoire Géofluides-Bassins-Eau, URA-CNRS 1765, USTL, Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex, France

BERTRAND MARIEU

ORSTOM, Programme FRIEND AOC, LECOM, BP 84, Bamako, Mali

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. 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. La simple étude des séries chronologiques de hauteurs précipitées annuelles fait apparaître une brutale fluctuation du régime pluviométrique dans toute la région considérée, à la fin des années 1960 et au début des années 1970. D'autres variables permettant une caractérisation plus "qualitative" du phénomène ont également été étudiées. Cette diminution de la pluviométrie a de sérieuses conséquences sur les régimes d'écoulement des cours d'eau de cette région. Cette étude a permis de caractériser ces modifications et d'apporter une dimension régionale à leur interprétation tout en soulignant la diminution importante des volumes écoulés, ce qui n'est pas sans conséquences tant au niveau économique qu'environnemental.

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 & Carbonnel, 1987; Sircoulon, 1987; Hubert *et al.*, 1989; Demarrée, 1990). Cependant, plus au sud, dans des régions aux climats plus humides, la sécheresse se fait également ressentir (Sutcliffe & Knott, 1987; Nicholson *et al.*, 1988; Mahé & 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.

Au vu de ce constat, et dans le cadre du projet FRIEND AOC (Afrique de l'ouest et centrale) du 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 plus particulièrement dans la zone non sahélienne d'Afrique de l'ouest et centrale (Servat, 1994). Les résultats présentés ici en rassemblent les principaux résultats. Ils seront complétés, plus tard, par une étude de la relation pluie-débit s'appuyant sur la modélisation hydrologique, le tout devant figurer sur un CD-ROM, véritable synthèse du programme.

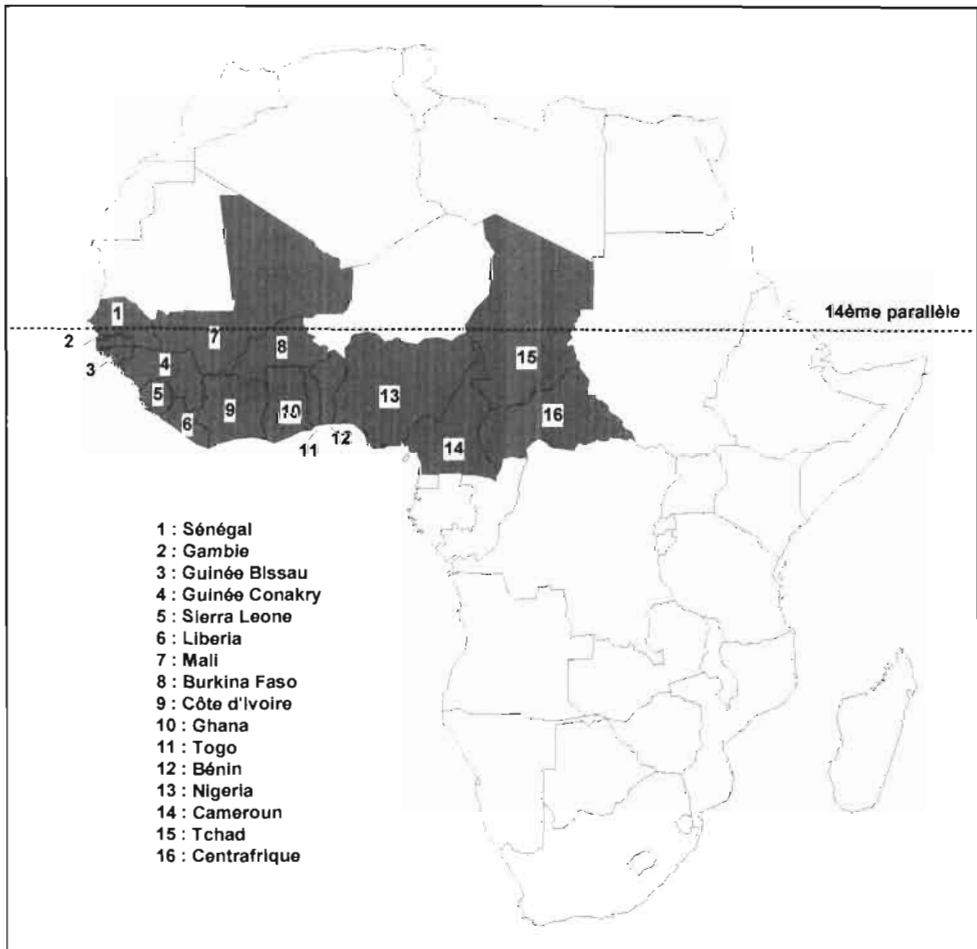


Fig. 1 Carte de situation des pays de la zone étudiée.

DONNEES ET METHODES

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, Fig. 1) ont été analysées en portant une attention particulière à la partie non sahélienne de cette zone (au sud du 14^{ème} parallèle). A l'issue de quoi 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.

Parallèlement, cent trois bassins versants ont été sélectionnés pour la qualité et la continuité de leurs données dont les plus anciennes remontent généralement au début des années 1950. Les séries chronologiques disponibles ont été traitées sur la base de regroupements effectués non par pays mais par grands bassins hydrographiques. Ils constituent, de fait, quatre grands ensembles: (a) un premier groupe de bassins versants centré sur le bassin du Sénégal à l'ouest de la zone étudiée, (b) un second groupe comprenant les Volta, les bassins versants des fleuves ivoiriens, togolais et béninois donc plus proche des côtes du Golfe de Guinée, (c) un groupe situé en Afrique centrale et comprenant les bassins du Chari-Logone, de l'Oubangui et de plusieurs cours d'eau camerounais, et (d) un dernier groupe que constitue le bassin du Niger. A partir des données de débits journaliers, des variables concernant les débits moyens annuels et certaines caractéristiques des hautes eaux et des basses eaux ont pu être élaborées.

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.

Niveau régional Au niveau régional et dans le cas de la pluviométrie, 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. A 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.

Concernant les écoulements, les représentations cartographiques sont un peu différentes. Elles proposent, par exemple, par bassins ou par sous-bassins, des représentations des valeurs de déficits enregistrées pour les écoulements ou encore les dates de rupture dans les séries chronologiques de variables étudiées.

Niveau local Au niveau local, un ensemble de méthodes de détection de ruptures dans les séries chronologiques a été mis en oeuvre. Une "rupture" peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologique étudiées. 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). Plusieurs approches ont été employées: le test de corrélation sur le rang, la méthode de Pettitt (1979), celle de Lee & Heghinian (1977), celle de Buishand (1982, 1984) et celle de Hubert *et al.* (1989). Pour les écoulements, seule la méthode de Pettitt a été utilisée.

MISE EN EVIDENCE D'UNE VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE ANNUELLE REGIONALE

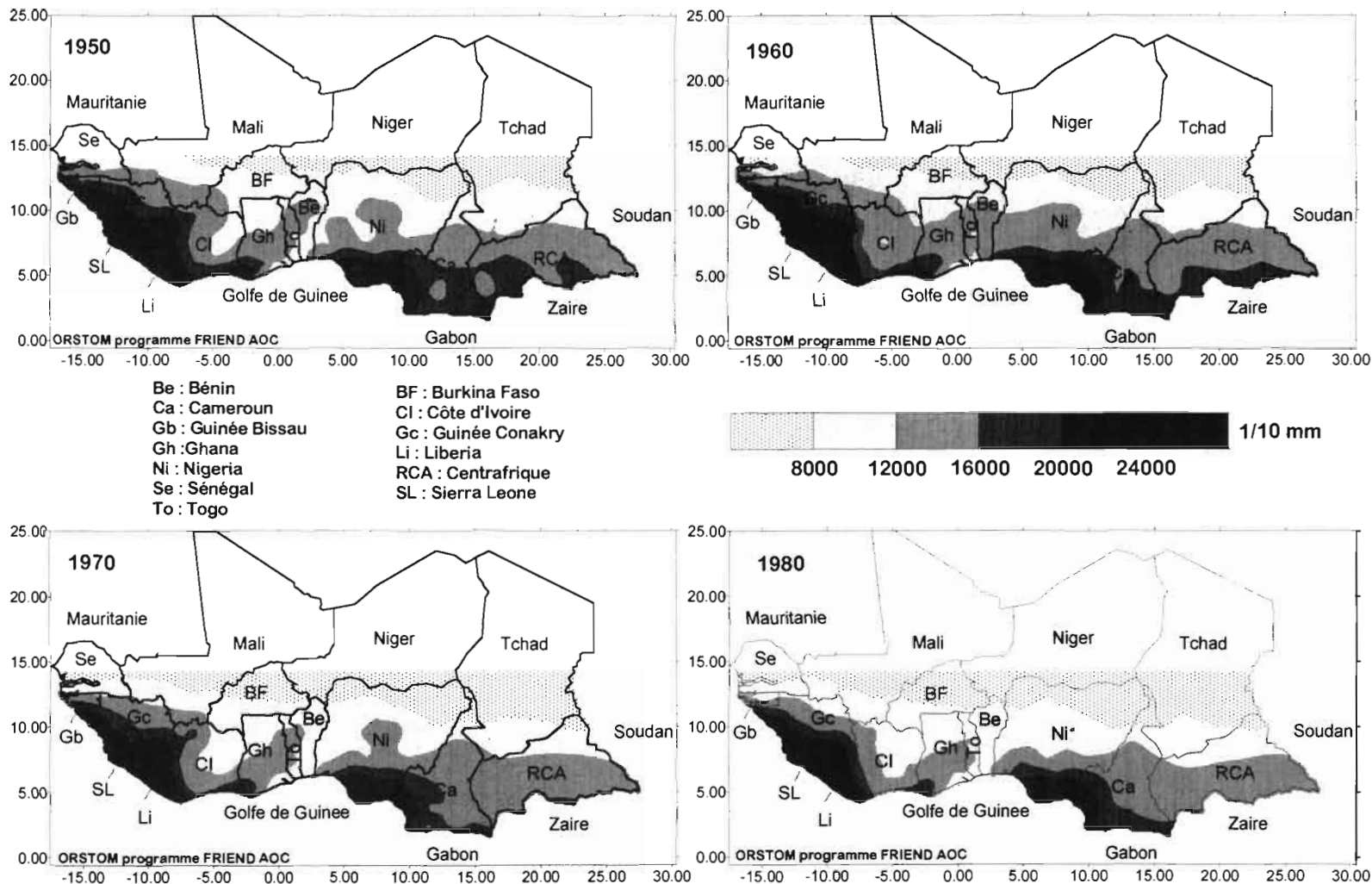
La pluviométrie annuelle en Afrique de l'ouest et centrale a notablement changé au cours des quarante dernières années comme en témoignent les cartes de pluviométrie et d'indices pluviométriques (Figs 2 et 3) dressées pour les quatre dernières décennies.

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 à 3000 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 (Fig. 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:

- (a) Dès la décennie 1970, la zone à pluviométrie inférieure à 1200 mm s'est étendue vers le sud, tendance qui s'est encore accrue durant la décennie 1980 au cours de laquelle cette zone couvrait alors près des deux tiers de la région étudiée.
- (b) Jusqu'à la fin des années 1960, l'isohyète 1600 mm apparaissait comme caractéristique d'une pluviométrie moyenne en zone forestière. Dès les années 1970, cette correspondance n'était plus systématiquement vérifiée du fait de la baisse de la pluviométrie.
- (c) Les régions à forte pluviométrie (plus de 2000 mm par an) sont également en nette régression et 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



Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique

Fig. 2 Pluviométrie moyenne annuelle durant les décennies 1950 à 1980.

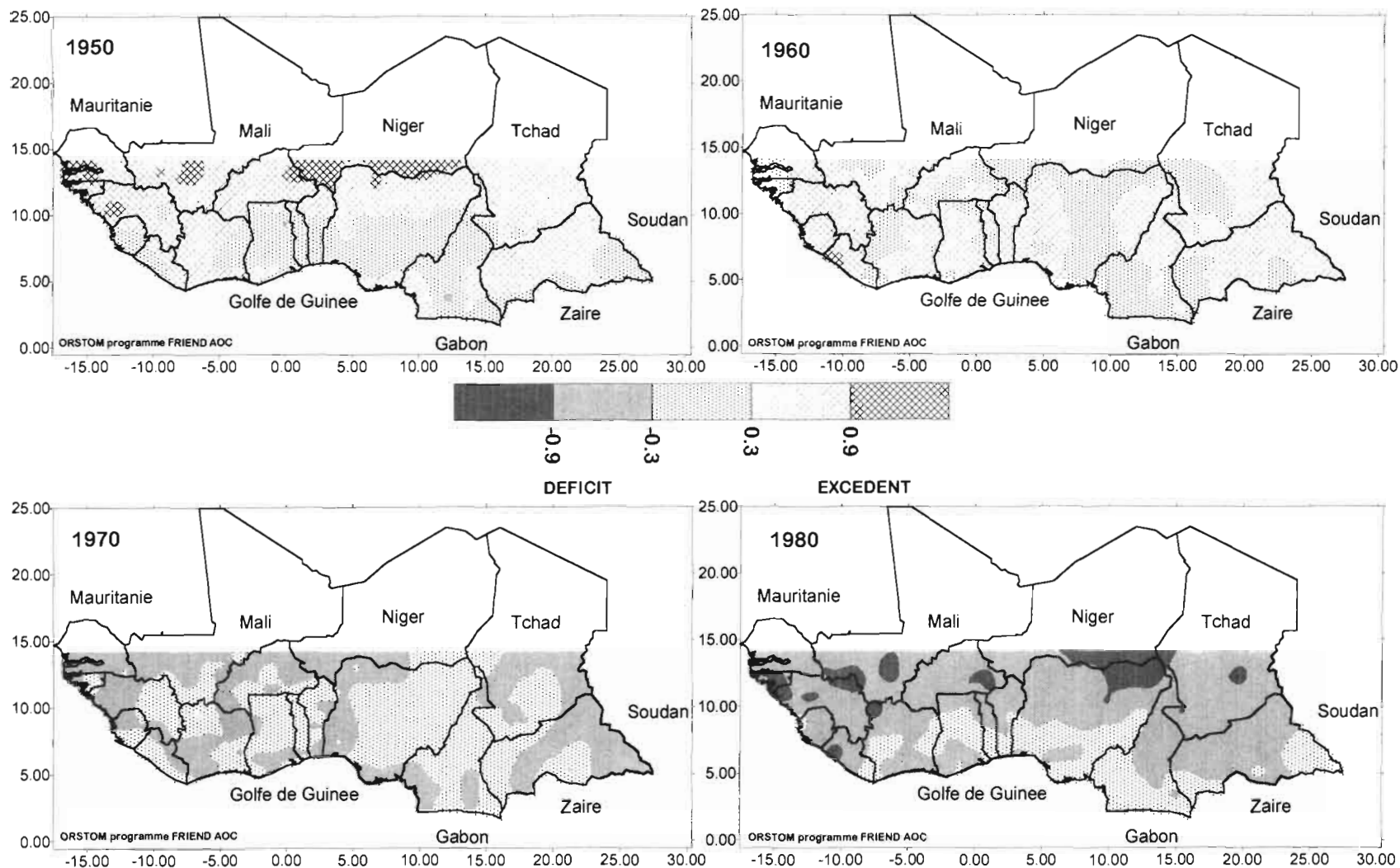


Fig. 3 Indices pluviométriques durant les décennies 1950 à 1980.

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, 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).

Ce déficit pluviométrique se fait ainsi ressentir depuis plus de deux décennies et semble même s'être accentué durant la décennie 1980. Les différentes analyses qui suivent permettent de préciser les formes de cette variabilité pluviométrique.

Tableau 1 Déficits pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture.

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.

AUTRES CARACTERISTIQUES DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE CONSTATEE

La région étudiée couvre des zones à climats différents se traduisant par la coexistence de deux régimes pluviométriques. Au nord et à l'ouest, on ne rencontre qu'une saison des pluies au cours de l'année alors que, 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 (Servat *et al.*, 1998). Sur l'ensemble des pays étudiés, seuls trois pays de l'Afrique de l'ouest bordant le Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo et Bénin) ont connu des modifications notables. 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. Celui-ci reste toutefois une zone à deux 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 saison 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.

L'analyse de la pluviométrie décadaire a, quant à elle, montré que la répartition dans le temps des quantités précipitées annuellement est désormais légèrement modifiée par rapport à 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 maximum pluviométrique. Dans la zone à deux 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. On assiste donc dans ces régions à un "renforcement" de la saison sèche qui se traduit par la disparition d'un certain nombre d'événement pluvieux habituellement enregistrés hors saison des pluies.

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.*, 1997a; Servat *et al.*, 1997). 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.

Outre ces approches univariées, qui ne se sont pas toujours révélés faciles à interpréter globalement ou à synthétiser, on a cherché à mettre en oeuvre 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. 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.

Trois groupes de postes ont été obtenus après mise en oeuvre de la méthode:

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

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. 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 confirment ceux des études univariées (Paturel *et al.*, 1997a; 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.

DÉFICIT PLUVIOMETRIQUE ACTUEL ET VARIABILITE CLIMATIQUE DURANT LE 20ème SIECLE

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 (Paturel *et al.*, 1997b).

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 a été calculé. On en déduit les conclusions suivantes:

- *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.
- *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).
- *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.

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 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.

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. La détection presque systématique, par le test de Pettitt, d'une rupture durant cette période 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.

MODIFICATION DES REGIMES DES COURS D'EAU

Débits moyens annuels

L'utilisation du test de Pettitt montre que 76 bassins sur les 103 étudiés, soit près de 74%, présentent une rupture dans les séries chronologiques de modules annuels. Ce résultat, qui correspond à une diminution des débits moyens annuels, souligne l'importance du phénomène dans toute la sous-région. Il est intéressant de noter la très faible dispersion des dates d'occurrence de cette rupture (Tableau 2, colonne 6). Sur les 76 bassins concernés, 10.5% présentent une rupture entre 1965 et 1968, 75% entre 1969 et 1971, 5% entre 1972 et 1975 et 8% après 1975. D'un point de vue spatial, on constate que l'essentiel des ruptures enregistrées avant 1969 le sont sur le bassin versant du Sénégal, soit dans les régions les plus occidentales et les plus septentrionales de la zone étudiée. Ceci est parfaitement conforme aux résultats de l'étude pluviométrique.

Les régions à faible variabilité, et donc à déficit pluviométrique réduit, ne présentent généralement pas de rupture. C'est, en particulier, le cas des bassins du Mono et de l'Oueme au Togo et au Bénin. On se trouve cependant, là, dans la zone

Tableau 2 Valeurs de déficits des débits moyens annuels calculés à certaines stations hydrométriques de part et d'autre de la date de rupture.

Nom-Poste	Bassin principal	Bassin	Rivière	A/NA	Rupture	Déficit
Mbasso	Comoe	Comoe	Comoe	NA	1971	-50%
Aniassue-Pont	Comoe	Comoe	Comoe	NA	1971	-56%
Ndjamena	Lac Tchad	Chari	Chari	NA	1971	-51%
Lai	Lac Tchad	Logone	Logone	NA	1970	-39%
Malanville	Niger	Niger	Niger	NA	1970	-43%
Niamey	Niger	Niger	Niger	NA	1970	-34%
Douna	Niger	Niger	Bani	NA	1971	-70%
Kankan	Niger	Niger	Milo	NA	1979	-36%
Eseka	Nyong	Nyong	Nyong	A	1971	-18%
M'Balmayo	Nyong	Nyong	Nyong	A	Rien	Rien
Sagon	Oueme	Oueme	Oueme	NA	1967	-42%
Logozohe-Pont	Oueme	Oueme	Klou	A	Rien	Rien
Semien	Sassandra	Sassandra	Sassandra	NA	1970	-36%
Bakel	Sénégal	Sénégal	Sénégal	NA	1967	-50%
Oualia	Sénégal	Sénégal	Bakoye	NA	1971	-66%
Dapola	Volta	Volta	Volta Noire	NA	1971	-41%
Boromo	Volta	Volta	Volta Noire	NA	1971	-46%
Bangui	Zaïre	Oubangui	Oubangui	NA	1970	-30%
Salo	Zaïre	Sangha	Sangha	NA	1975	-22%
Doume	Zaïre	Sangha	Doume	NA	Rien	Rien

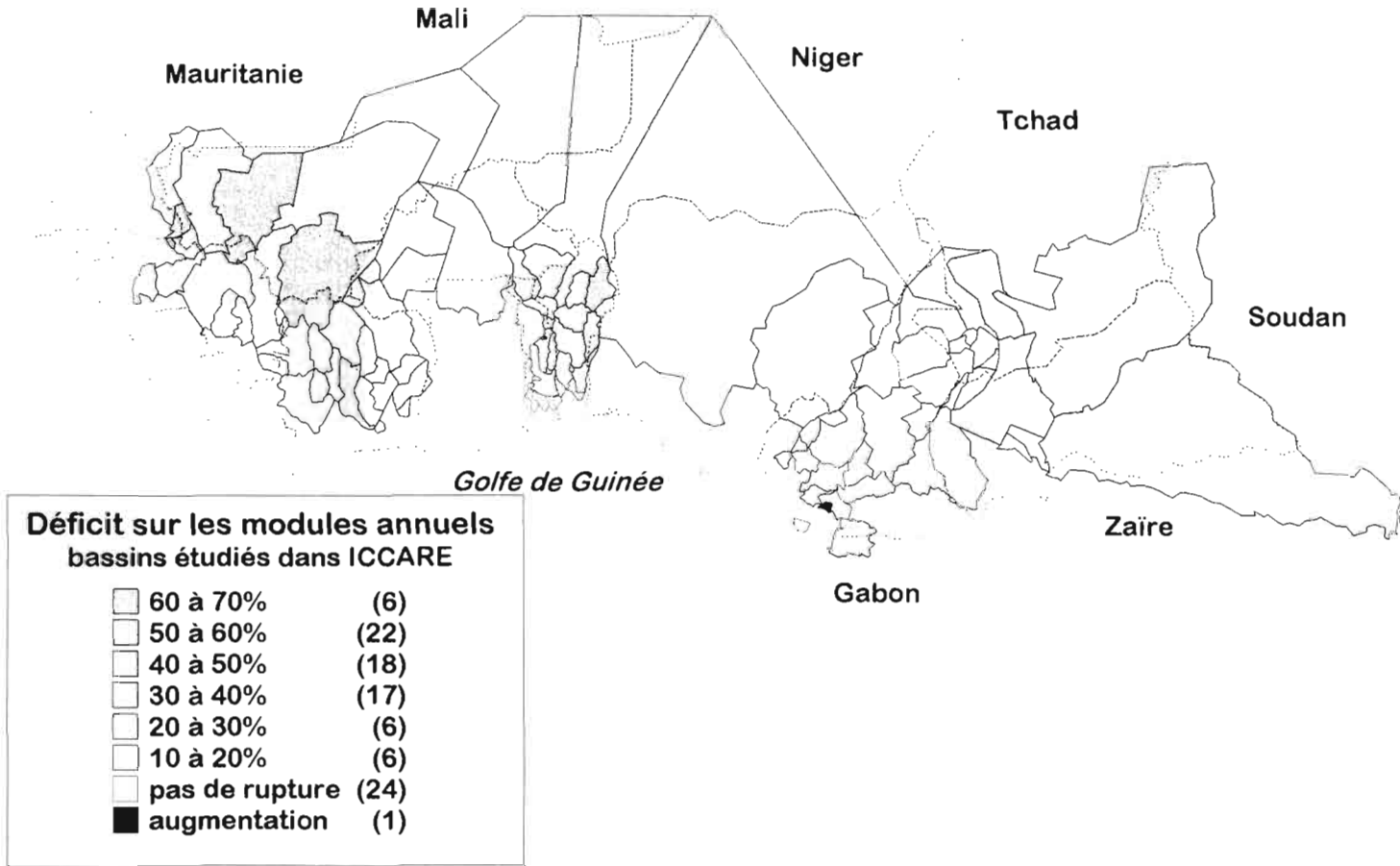


Fig. 4 Représentation cartographique des valeurs de déficits calculées de part et d'autre des dates de rupture dans les séries chronologiques de débits moyens annuels.

de limite de validité des tests utilisés (Lubès-Niel *et al.*, 1997), ce qui ne permet pas d'en tirer pour autant des conclusions définitives quant à la relation pluie-débit.

On constate donc que les ruptures dans les séries de débits moyens annuels sont moins dispersées dans le temps qu'elles ne le sont pour les précipitations annuelles. Les différences qui apparaissent au niveau des cours d'eau, intégrateurs de nombreux paramètres influencés par la variabilité climatique (développement de la végétation, ruissellement, infiltration, recharge des nappes, évaporation, etc.), sont donc plus sensibles et détectables plus rapidement.

La Fig. 4 présente les déficits calculés pour les débits moyens annuels depuis la date de rupture estimée par le test de Pettitt. Ces déficits sont souvent extrêmement importants puisque sur les 75 bassins concernés, 62 (soit 84%) présentent un déficit supérieur ou égal à 30%, et 28 (soit 37%) un déficit supérieur ou égal 50%. Ces chiffres soulignent combien les effets de la variabilité climatique mesurée sur la pluviométrie sont amplifiés au niveau des cours d'eau dont on a rappelé ci-dessus le rôle intégrateur. Du point de vue spatial, on notera que les déficits les plus importants sont enregistrés sur le bassin du Sénégal, sur les bassins des fleuves ivoiriens et sur le bassin du Chari-Logone en Afrique centrale.

Le Tableau 2 (colonne 7) présente également quelques résultats parmi les plus significatifs en matière de déficits des débits moyens annuels. Il fait, encore une fois, ressortir l'importance des déficits d'écoulements enregistrés dans ces cours d'eau des régions de l'Afrique tropicale.

Autres variables caractéristiques des débits

Des variables caractérisant (a) les débits moyens maximum de n jours consécutifs (VCX_n , avec $n = 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90$) et (b) les débits moyens minimum de n jours consécutifs (VCN_n , avec $n = 1, 5, 10, 20, 30, 60$ voire 90) ont également été étudiées.

D'une manière générale on notera que les différentes séries de VCX_n présentent, comme les débits moyens annuels, un caractère non aléatoire et que leurs dates de rupture sont également les plus fréquentes durant la période 1969-1971. L'importante corrélation existant d'ordinaire entre débits moyens annuels et débits maximums permet d'expliquer cette forte similarité.

L'exploitation des résultats obtenus pour les VCN_n est plus complexe dans la mesure où, désormais, nombre de cours d'eau se trouvent chaque année à sec sur des périodes relativement longues. On notera, cependant, que les débits de basses eaux semblent également avoir subi d'importantes modifications à la baisse durant la période 1969-1971. Une analyse plus approfondie de ces séries chronologiques de basses eaux est actuellement en cours.

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.

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 mais il se traduit généralement par 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 une confirmation quant à l'importance du phénomène.

L'examen des séries chronologiques depuis l'origine des stations a permis de restituer 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.

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'étude entreprise montre ainsi que le déficit pluviométrique observé en Afrique de l'ouest et centrale depuis plus de vingt cinq ans a de sérieuses conséquences sur l'hydraulicité des cours d'eau de cette région. Ils présentent, en effet, des déficits d'écoulement communément supérieurs à 30% et souvent situés au delà de 50%. Hautes eaux et basses eaux ont également subi d'importantes modifications à la baisse. Des analyses supplémentaires compléteront prochainement ces premières conclusions et prendront également en compte des caractéristiques de forme des hydrogrammes et les tarissements. Cependant, les conséquences de cette diminution des volumes écoulés sont d'ores et déjà évidentes au regard de l'exploitation des ressources en eau et de l'environnement. 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).

REFERENCES

- 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.* **58**, 51–69.
- Demarrée, G. (1990). An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theoret. Appl. Climatol.* **42**, 139–147.
- Hubert, P. & Carbonnel, J. P. (1987) Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol.* **95**, 165–183.
- Hubert, P., Carbonnel, J. P. & Chaouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques: application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349–367.
- 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. *Rev. Statist. Appl.* **XLVI**(1), 95–110.
- Lamb, P. J. (1982) Persistence of subsaharan drought. *Nature* **299**, 46–47.
- 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 application de tests statistique—étude bibliographique*. Rapport no. 3, ORSTOM, Montpellier, France.
- Lubès-Niel, H., Masson, J. M., Paturel, J. E. & Servat, E. (1997) Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Accepté pour publication à *Revue des Sciences de l'Eau*.
- 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 den Ven, D. Gutknecht, D. P. Loucks & K. A. Salewicz) (Proc. Vienna Symp., August 1991), 163–172. IAHS Publ. no. 201.
- Nicholson, S. E. (1985) Subsaharan rainfall 1981–84. *J. Clim. Appl. Met.* **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, Série Hydrol.* **20**(1).
- 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* (ed. by J. S. Gladwell) (Proc. Yokohama Symp., July 1993), 67–78. IAHS Publ. no. 216.
- 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* **6**(1).
- Paturel, J. E., Servat, E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997a) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea—Part 2: an integrated regional approach. *J. Hydrol.* **191**, 16–36.
- Paturel, J. E., Servat, E., Lubès-Niel, H. & Delatre, 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* **325**, série IIa, 779–782.
- Pettitt, A. N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* **28**(2), 126–135.
- Servat, E. (1994). *ICCARE—Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne—Présentation du programme*. Rapport no. 1, ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Servat, E., Paturel, J. E. & Lubès, H. (1996) La sécheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche* **290**.
- 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 1: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.* **191**, 1–15.

- Servat, E., Paturol, J. E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J. M., Travaglio, M. & Marieu, B. (1998). De la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. Soumis à *Revue des Sciences de l'Eau*.
- Sircoulon, J. (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, Série Hydrol.* XIII(2).
- Sircoulon, J. (1987) Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (ed. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987), 13-25. IAHS Publ. no. 168.
- Sutcliffe, J. V. & Knott, D. G., (1987) Historical variations in African water resources. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources Resources* (ed. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987), 463-475. IAHS Publ. no. 168.