

Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali)

J. P. BRIQUET, G. MAHE, F. BAMBA

Laboratoire d'Hydrologie, Centre Orstom, BP 2528, Bamako, Mali

J. C. OLIVRY

Laboratoire d'Hydrologie, Centre Orstom, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé Depuis une vingtaine d'années, le bassin du fleuve Niger et ceux des principaux cours d'eau africains sont soumis à un déficit pluviométrique important. La chronique des débits enregistrés à Koulikoro (120 000 km²) montre une décroissance persistante des écoulements. Cependant la baisse des pluies n'est que de 20% en valeur moyenne décennale entre 1951/1960 et 1981/1989, alors que celle des écoulements est de 55%. Si les conditions du ruissellement superficiel ont été peu modifiées durant la sécheresse, l'écoulement souterrain a lui fortement diminué comme l'indique l'augmentation du coefficient de tarissement. La réduction des modules annuels et des maximums de crue peut être logiquement reliée à la diminution des apports souterrains. Cette hypothèse est confirmée en 1994: des pluies de 15% supérieures à la moyenne 1951-1989 (fréquence vicennale) ne produisent qu'une crue moyenne tant en pointe qu'en module. Par rapport à la moyenne de cinq années de pluies équivalentes sur le bassin versant, la lame écoulée est plus faible de 28% en 1994/1995, tandis que le coefficient de tarissement reste élevé, et supérieur à la normale.

Recent climatic changes and modification of the hydrological regime of the Niger river at Koulikoro (Mali)

Abstract Over the last 20 years, the Niger river basin as well as all the other African rivers has experienced a serious shortage of rainfall. For the Niger river at the station of Koulikoro (120 000 km²) the time series of runoff shows a continuing diminution. However, considering the decadal mean values, precipitation was reduced by 20% between 1951/1960 and 1981/1989, while the runoff decrease was 55% during the same period. The flood flows were not altered during the recent drought, but the baseflows strongly decreased as indicated by the increase of the recession coefficient. The reduction both the of mean annual discharges and of the values of the maximum peak flows can be assumed to be a result of the reduction of the baseflow. That hypothesis was verified in 1994: 15% higher rainfalls, compared to the 1951-1989 mean (return period of 20 years), only produced a mean level annual discharge and maximum peak flood. In comparison with the mean value calculated for the past five years for the same annual rainfall, the depth of runoff was 30% lower in 1994/1995, and the recession coefficient remained high, above the inter-annual mean.

INTRODUCTION

Depuis plus de 20 ans, l'Afrique connaît une baisse constante de ses ressources en eau de surface. Malgré un retour à une pluviosité plus proche de la normale à la fin de la dernière décennie, les écoulements de surface ne paraissent pas suivre la même tendance aussi bien en Afrique de l'ouest qu'en Afrique centrale (Olivry *et al.*, 1993). La relation pluie-débit est plus profondément modifiée pour les fleuves tropicaux que pour les fleuves équatoriaux. Olivry (1993) fait l'hypothèse que le changement durable de la relation pluie-débit est dû à une réduction de l'écoulement de base.

Avec l'exemple du fleuve Niger à Koulikoro, station historique de l'Afrique de l'ouest, nous nous proposons de vérifier cette hypothèse à l'occasion de la saison des pluies 1994 qui a été généralement excédentaire dans toute l'Afrique de l'ouest.

BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU NIGER A KOULIKORO SUR LA PERIODE 1951-1989

Caractéristiques physiques du bassin

Le Niger est le troisième fleuve d'Afrique par sa longueur. Il s'étend de 8°30' à 14°N et de 7°30' à 11°30'O (Fig. 1).

Il prend sa source vers 800 m d'altitude, sur le versant nord de la Dorsale guinéenne. L'altitude maximale du bassin est légèrement supérieure à 1500 m, alors qu'à Koulikoro, l'altitude est de 290 m. Cinquante pour cent du bassin se trouve compris entre 400 et 500 m d'altitude.

Issu du massif du Fouta Djallon, le Niger est constitué par quatre branches mères (Fig. 1): le Tinkisso, le Niger lui-même ou Djoliba, le Niandan, et le Milo.

Après son arrivée en territoire malien, le fleuve est grossi par le Sankarani (5, Fig. 1) dont le bassin versant, d'origine essentiellement guinéenne, a une superficie de 35 000 km². Cet affluent est régulé depuis 1984 par le barrage de Sélingué dont la retenue a une capacité de 2 milliards de m³ (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Les écoulements mesurés depuis cette date à Koulikoro sont donc influencés par ce barrage. Aussi, nous pourrions être amenés à utiliser les données du Niger à Banankoro, station située à l'amont de la confluence Sankarani-Niger et qui possède un régime naturel non influencé.

A Koulikoro le fleuve suit un régime tropical de transition (Rodier, 1964), la superficie de son bassin est de 120 000 km² et sa longueur de 570 km. L'année hydrologique débute le 1 mai. Le débit d'étiage est assez soutenu et la période de hautes eaux prolongée sur plusieurs mois. Les principales caractéristiques du bassin sont données dans le Tableau 1 pour la période 1951-1990.

Pluviométrie

Méthodologie de calcul des précipitations annuelles Les précipitations annuelles sont calculées suivant une méthode automatique décrite par Mahé (1993) et Mahé *et al.* (1994), sur la base d'un fichier de données annuelles couvrant la période 1951-1989, et

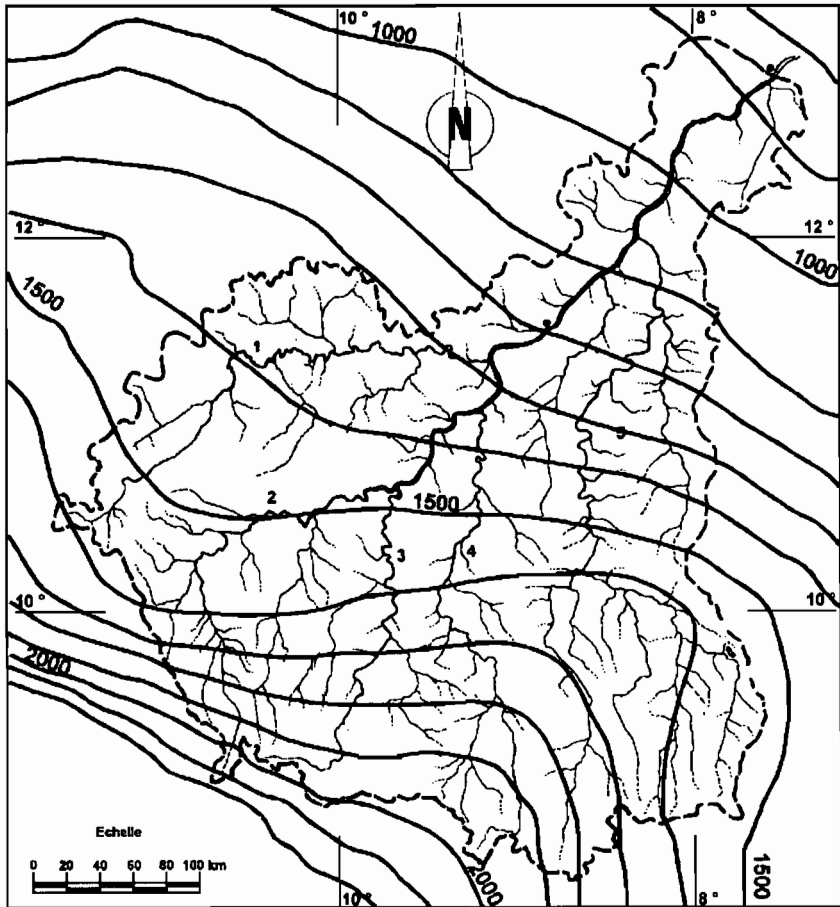


Fig. 1 Bassin versant du Niger à Koulikoro et isohyètes interannuelles moyennes 1951-1989.

constitué essentiellement de valeurs observées mais également de valeurs reconstituées par la Méthode du Vecteur Régional (MVR) (Cochonneau *et al.*, 1993; Wotling *et al.*, 1995). A partir des données aux stations, des grilles de valeurs interpolées sont calculées par méthode spline (pas de 1 degré). Les valeurs aux points de grille situés à l'intérieur des limites géographiques du bassin versant sont moyennées pour obtenir la lame précipitée. Mahé *et al.* (1994), montrent que les valeurs obtenues par cette méthode sont très proches de celles obtenues par la méthode des polygones de Thiessen.

Tableau 1 Caractéristiques du bassin versant du Niger à Koulikoro.

Superficie	Longueur	Module	Minimum mensuel	Maximum mensuel	Volume écoulé	Pluviométrie	Ke	K3
(km ²)	(km)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(km ³)	(mm)	(%)	
120 000	570	1360	18,5	8030	42,9	1445	24,7	2,65

Tableau 2 Valeurs de retour des maximums de crue, des modules, des étiages en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ et de la pluviométrie en mm.

	Fréquence de retour sèche				Médiane	Fréquence de retour humide			
	100	50	20	10		2	10	20	50
Maximum	2260	2675	3300	3850	4290	7735	8290	8910	9320
Module	329	600	753	958	1360	1770	2000	2190	2510
Etiage	15,8	23,6	29,2	37,8	61,8	101	131	162	242
Pluviométrie	1087	1175	1225	1291	1440	1589	1678	1753	1893

Pluviométrie sur le bassin et évolution sur la période 1951-1989 La pluviométrie annuelle moyenne sur le bassin versant (Fig. 1) s'élève à 1 445 mm sur la période 1951-1989. Les isohyètes pour la période vont de 850 mm vers Koulikoro à plus de 2100 mm sur le massif guinéen. Les valeurs extrêmes ont été calculées pour les deux années les plus sèches et les plus humides. La pluviométrie maximale observée sur la période est de l'ordre de 1750 mm (1951 et 1954, période de retour de l'ordre de la cinquantennale humide, Tableau 2), avec des isohyètes de 1000-2400 mm. La pluviométrie minimale est de l'ordre de 1190 mm (1983 et 1984, période de retour de l'ordre de la cinquantennale sèche, Tableau 2), avec des isohyètes de 600 à 1850 mm.

Depuis 1950, les totaux annuels évoluent suivant une tendance décroissante (Fig. 2 et Tableau 3): la moyenne de la première décennie de 1951 à 1960 est de 10% plus élevée que la moyenne 1951-1989, entre 1961 et 1970 l'excédent moyen est de 4%, entre 1971 et 1980, le déficit est également de 4%, et durant la dernière décennie le déficit passe à 10%. Ces déficits sont relativement modestes en comparaison de ceux observés dans les régions voisines d'Afrique de l'ouest. De fait, dans l'est de la Guinée, où se situe l'essentiel du haut bassin du Niger, la diminution pluviométrique des deux dernières décennies a été très atténuée (Mahé & Citeau, 1993; Mahé et al., 1995).

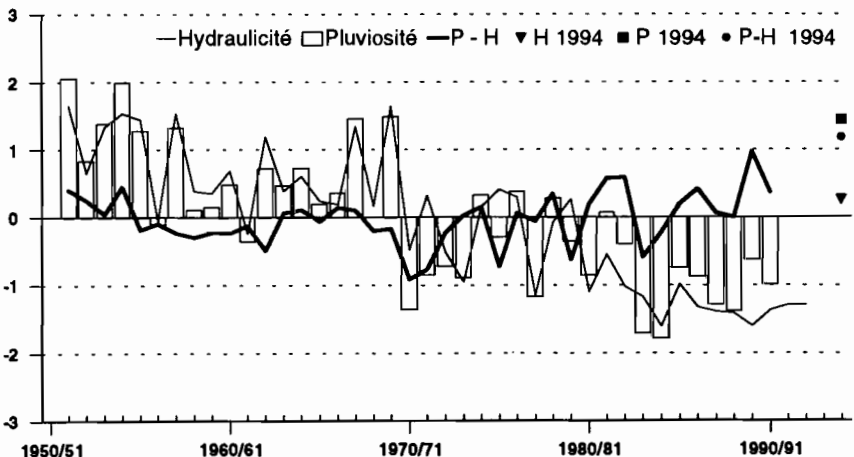


Fig. 2 Variation de l'hydraulicité et de la pluviosité du Niger à Koulikoro (variables centrées réduites) pour la période de référence et 1994.

Tableau 3 Valeurs de pluviométrie et d'écoulement par décennie sur le bassin du Niger.

	Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)	Ke (%)
Décennie 50	1590	472	28,6
Décennie 60	1503	420	27,5
Décennie 70	1380	327	23,3
Décennie 80	1294	212	16,1

Écoulements

Jusqu'à une période récente, on a pensé que la variabilité de l'écoulement annuel constituait, par l'intégration spatiale du régime des précipitations qu'il suppose sur l'ensemble d'un bassin versant, un paramètre de choix dans l'étude des fluctuations climatiques (Olivry 1983; 1987). De fait, les déficits pluviométriques se sont largement répercutés, et généralement amplifiés, dans l'écoulement des bassins fluviaux au point que dans la période la plus récente les paramètres hydrologiques ne sont plus en phase avec la variation pluviométrique annuelle (Fig. 2).

Les débits, comme la pluviométrie, diminuent depuis 1950 et se répartissent globalement autour de trois paliers de valeurs décroissantes. Le premier couvre la période 1951/1952 à 1969/1970: les modules sont presque toujours au-dessus de la moyenne depuis 1951. Le second couvre la décennie 70 jusqu'en 1981/1982, période pendant laquelle des débits très faibles apparaissent mais, pour certaines années, la moyenne est légèrement dépassée. Depuis la crue de 1982/1983 les modules sont chaque année inférieurs aux valeurs minimales des années 1970.

Soulignons qu'après le « *minimum minimorum* » de 1984, le module le plus bas sur le Niger est observé en 1989.

Les fluctuations récentes montrent que la ressource en eaux de surface a diminué de moitié sur la dernière décennie (Tableau 3). Le régime hydrologique du Niger, comme les fleuves d'Afrique intertropicale, est directement influencé par celui des précipitations et subit aussi, avec un effet retard, l'incidence du cumul de déficits pluviométriques.

Les valeurs caractéristiques ont été calculées sur la série complète des débits du Niger à Koulikoro, de 1907 à 1994 (Tableau 2). Le débit maximum journalier a été observé en 1925, avec une fréquence de retour de plus de 100 ans. Le minimum journalier, enregistré en 1980, a également une période de retour de 100 ans. Les modules extrêmes excédentaires et déficitaires (1967-1970; 1989-1990) ont des périodes de retour d'environ 50 ans.

Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique pour le bassin versant du Niger à Koulikoro est présenté par décennies sur le Tableau 3. Entre la première et la dernière décennie, la différence de pluviométrie est de 20%, la différence d'écoulement de 55%. Cette tendance persistante à la baisse doit être soulignée car elle montre une dégradation durable du système hydrologique malgré un retour assez sensible à de meilleures précipitations.

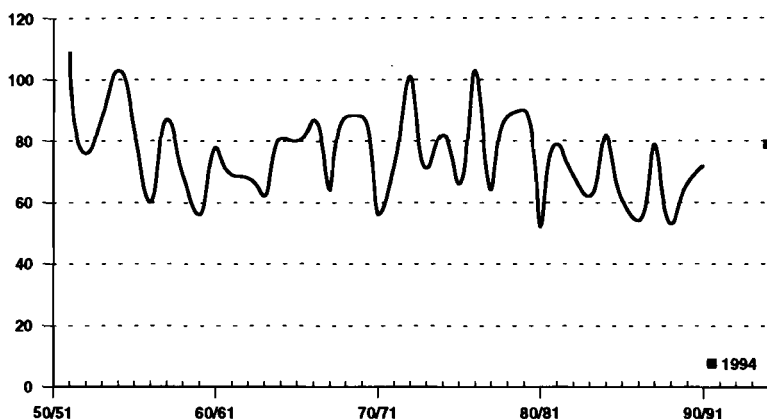


Fig. 3 Variation du nombre de jours pour lesquels le débit est supérieur à la moitié du débit maximal.

D'après Pouyaud (1987), sur des petits bassins versants de superficie inférieure à 500 km² où l'écoulement est constitué presque exclusivement de ruissellement superficiel, les caractéristiques de l'écoulement ne sont pas modifiées par la diminution de la pluviométrie.

Pour le Niger à Koulikoro, on considère le nombre de jours pour lesquels le débit est supérieur à la moitié du débit maximal comme une variable en relation principalement avec l'écoulement superficiel. Cette variable ne suit pas de tendance régulière pour la période et produit des valeurs identiques pour des décennies de pluviométrie totalement différentes (Fig. 3). Par conséquent, la diminution des maximums de crue, qui suit la même tendance décroissante que celle des modules, semble peu en liaison avec le décalage observé dans la relation pluie-débit.

Il faut donc chercher préférentiellement dans l'écoulement de base, provenant des stockages souterrains, l'origine de la modification du régime du fleuve.

Tarissement

Après transfert à la station d'observation des écoulements rapides (ruissellements), on observe à partir d'un certain stade de la décrue de l'hydrogramme annuel, une décroissance régulière des débits ou phase de tarissement. Celle-ci correspond à la période où la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau de la région.

Pour les cours d'eau tropicaux, cette décroissance des débits est représentée par une loi exponentielle (loi de Maillet):

$$Q_i = Q_o e^{-\alpha(t_i - t_o)}$$

avec Q_i et Q_o , débits aux instants t_i et t_o exprimés en jours, et α , coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère qui a la dimension de l'inverse d'un temps.

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime

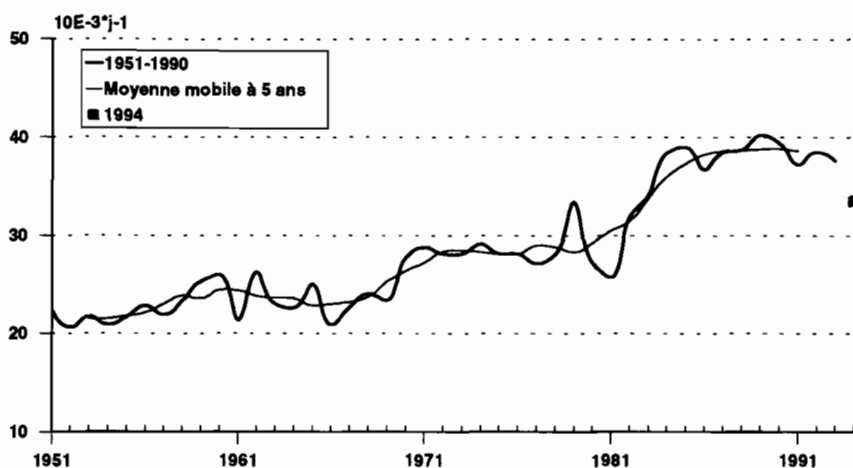


Fig. 4 Evolution du coefficient de tarissement α du Niger à Koulikoro.

hydrologique tropical. L'étude des coefficients de tarissement montre jusqu'aux années 1972/1973 une relative régularité des valeurs avec un coefficient moyen de $0,023 \text{ jour}^{-1}$ (Olivry *et al.*, 1995). Dans la période actuelle, après 8 années à coefficient moyen d'environ $0,028 \text{ jour}^{-1}$, on observe une montée brutale dans l'évolution des coefficients de tarissement jusqu'à des valeurs de $0,040 \text{ jour}^{-1}$ au début des années 1990. Les valeurs récentes ont été déduites de l'étude du Niger à Banankoro qui a conservé son régime naturel (Fig. 4).

Cet affaiblissement des étiages traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux résultant du cumul des déficits pluviométriques.

COMPARAISON DE LA SAISON 1994/1995 PAR RAPPORT A LA MOYENNE DES ANNEES ANTERIEURES

Pluviométrie

En 1994 la crue du Niger a atteint une cote inégalée depuis de nombreuses années, bien qu'à peine supérieure à la normale du siècle. Ceci nous a amené à considérer les pluies sur le bassin, malgré la difficulté à regrouper des données complètes sur l'année 1994. La moitié des postes environ a pu être obtenue. Les précipitations pour 1994 sont présentées à quatre postes du bassin sur la Fig. 5. Pour Bamako au nord du bassin, le total est de 1250 mm, soit un excédent de plus de 20% par rapport à la moyenne 1951-1989. A Bougouni dans le centre est, le total de 1350 mm correspond à un surplus pluviométrique de 15%. Les données incomplètes de la Guinée laissent entrevoir elles aussi une pluviométrie supérieure à la moyenne. A Siguiri dans le centre ouest, le total annuel peut être estimé aux alentours de 1600 mm, soit 25-30% d'excédent. Enfin à Kankan, dans le centre du bassin, le total peut être estimé à environ 1750 mm, soit 10-15% d'excédent. Nous n'avons pas reçu d'informations sur l'extrême sud du bassin. Les mois d'août et de septembre sont excédentaires à très excédentaires aux quatre postes présentés, mais également dans la majeure partie des autres stations. C'est

équivalente », moyenne de ces 5 années et qui donne un total pluviométrique de 1660 mm. Il est certain que ces 5 années n'ont pas été hydrologiquement strictement identiques, ni entre elles ni par rapport à la saison 1994/1995. Nous utilisons ce procédé à simple titre de comparaison, pour situer empiriquement l'année pluviométrique 1994 par rapport au reste de la série. L'année équivalente obtenue est donc seulement un aperçu de ce que pourrait être le comportement hydrologique moyen d'une année pluviométrique de type 1994 (pluviométrie très supérieure à la moyenne), à supposer que l'« événement 1994 » soit suffisamment comparable à ceux de l'année équivalente. Il s'agit bien là d'un exercice qualitatif et non quantitatif. Ce premier aperçu des variations du régime du fleuve Niger doit bien entendu appeler à une étude approfondie sur la variabilité de la ressource en eau sur le bassin, et sur son évolution depuis le début du siècle.

Écoulement

Le maximum de crue a été de $5800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, légèrement supérieur à la moyenne 1951-1990 ($5200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Il s'agit là de la plus forte crue observée depuis 1979 ($5930 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et de la quatrième en importance depuis les années déficitaires 1972 et 1973 (1974, $6300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; 1975, $6890 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; 1979 déjà citée). La crue de 1994/1995 (Fig. 6), avec un module de $1430 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, est une crue moyenne, à peine supérieure à la normale ($1360 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). L'hydraulicité est de 1,05 alors que la pluviosité est de 1,15. Il y a donc là une variation importante de la relation pluie-débit puisqu'une pluviométrie moyenne de fréquence quasi vicennale ne produit plus qu'un écoulement médian.

Bilan

Le bilan de la crue 1994/1995 est résumé dans le Tableau 4. La saison 1994/1995 est comparée à la moyenne 1951-1990 et à une « année équivalente ». Le coefficient d'écoulement de la crue 1994 est inférieur de 9% par rapport à la moyenne 1951-1990 pour une pluviométrie supérieure de 15%. Par rapport à « l'année équivalente », le coefficient d'écoulement est inférieur de 30% et le coefficient de tarissement supérieur de 50%.

Tableau 4 Comparaison de la saison 1994/1995 avec 1951-1990 et la moyenne des années de pluviométrie équivalente.

	1951-1990	1994/1995	Pluviométrie équivalentes
Pluviométrie (mm)	1445	1670	1660
Lame écoulée (mm)	357	376	537
Coefficient d'écoulement (%)	24.7	22.5	32.3
Tarissement (an)	28.5	33.5	22.2

CONCLUSIONS

La saison des pluies 1994/1995 de fréquence vicennale humide, après une très longue période de déficit pluviométrique, illustre de façon exceptionnelle les changements dans la relation pluie-débit pour le Niger et plus généralement les fleuves d'Afrique tropicale. Les coefficients de tarissement, traduisant un effet mémoire de la sécheresse actuelle, restent à des valeurs très supérieures à celles observées en période humide avant 1970.

Le retour à des débits plus soutenus en saison sèche suppose d'abord la reconstitution des aquifères. Celle-ci ne peut-être immédiate et cela se voit bien dans la faible incidence d'une meilleure pluviométrie sur le tarissement. Il n'y a pas concordance entre les variations de l'indice pluviométrique et celles du coefficient de tarissement. Du fait même des aquifères, les réactions sont plus lentes dans la restitution des basses-eaux; elles nécessitent un temps de réponse de plusieurs années et ne sont effectives qu'avec le cumul de variations climatiques de même sens.

REFERENCES

- Brunet-Moret, Y., Chaperon, P., Lamagat, J. P. & Molinier, M. (1986) *Monographie hydrologique du fleuve Niger*; tome I: *Niger supérieur*; tome II: *Cuvette lacustre et Niger moyen*. Coll. Monogr. Hydrol. no. 8, Orstom, Paris.
- Cochonneau, G., Hiez, G., Sechet, P. & L'Hôte, Y. (1993) *MVR 1.5. Logiciel pour la critique, l'homogénéisation et la synthèse d'observations pluviométriques*. Collection LOGOrstom, Paris.
- Mahé, G. (1993) *Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes*. Coll. Etudes et Thèses. Orstom, Paris.
- Mahé, G. & Citeau, J. (1993) Relation océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatologique Satellitaire* 44, 34-54.
- Mahé, G., Delclaux, F. & Crespy, A. (1994) Elaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin versant de l'Ogooué au Gabon). *Hydrol. Cont.* 9, 2.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J. C. & Wotling, G. (1995) A new regional approach of the interannual rainfall fluctuations in West and Central Africa, from 1951 to 1989. (Soumis à *Global and Planetary Change*).
- Olivry, J. C. (1983) Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux Iles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. Orstom, Sér. Hydrol.* 20(1), 47-70.
- Olivry, J. C. (1987) Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. In: *The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (ed. par S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987), 501-512. IAHS Publ. no. 168.
- Olivry, J. C. (1993) De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. In: *Journées hydrologiques de Grenoble: Centenaire Maurice Pardé (22-24 septembre 1993)*.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P. & Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? In: *Hydrology in Warm Humid Regions* (ed. par J. S. Gladwell) (Proc. Yokohama Symp., July 1993), 67-78. IAHS Publ. no. 216.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P., Bamba, F. & Diarra, M. (1995) Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In: *Actes du colloque PEGI-GBF* (novembre 1993), 251-266. Coll. Colloques et Séminaires, Orstom, Paris.
- Pouyaud, B. (1987) Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques. In: *The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (ed. par S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987). IAHS Publ. no. 168.
- Rodier, J. (1964) *Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo*. Mémoire no. 6, Orstom, Paris.
- Wotling, G., Mahé, G., L'Hôte, Y. & Le Barbé, L. (1995) Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine. *Veille Climatologique Satellitaire* 52, 58-73.