

# Évolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique

Water resource variations of the Atlantic river basins of Africa: the long term effects of rain shortage

J.P. BRICQUET, F. BAMBA, G. MAHE, M. TOURE et J.C. OLIVRY<sup>1</sup>

Reçu le 2 avril 1996, accepté le 22 mai 1997\*.

## SUMMARY

The extent of the current drought phenomenon in Sudano-Sahelian regions no longer needs to be proven. The study of rainfall deficits in intertropical Africa shows a global climatic degradation that has been going on for about twenty five years. These deficits concern also the humid areas of Western and Central Africa and finally all the African rivers draining the flows to the Atlantic Ocean. Various studies have shown that the current phenomenon greatly differs, in intensity and duration, from other 20th century deficit situations (SIRCOULON et OLIVRY, 1986; LAMB, 1985; NICHOLSON *et al.*, 1988). Despite very great fluctuations, which could suggest pseudocyclic variations, the current data indicate a global downward trend since 1860 (OLIVRY, 1987). Moreover, some authors have seen a statistical break in the rainfall conditions in 1970 (CARBONNEL *et al.*, 1985). The need to obtain common continual data series led us to select the period from 1950 to 1990 with its large number of operational rainfall and gauging stations (MAHE, 1993) (*Fig. 2 et 3*).

Without anticipating a continuation in this trend, or, on the contrary, a return to a humid period, the current drought will obviously have lasting consequences on some hydrological parameters. After a relative improvement of rainfall conditions, observed in 1985 and 1986 and even more recently, as shown by the evolution of the Lamb index (1985), a memory effect of the drought may be observed in the flow of the large river basins (*Fig. 2*). African drought and rainfall deficits observed over the last 25 years have important repercussions on the flow regime of rivers and especially on the annual runoff and the strength of annual floods. This phenomenon has intensified during the last ten years while, paradoxically, the rainfall deficit greatly has diminished. For instance, the upper Niger river, with the Bani river (surface basins 250,000 km<sup>2</sup>) shows an annual runoff deficit of 20% during the 70's and of 46% during the 80's and an annual rainfall deficit respectively of 15 and 20%. In the regional

1. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, ORSTOM, BP 2528, Bamako, Mali.

\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 20 mars 1998.

context of Western and Central Africa, the global runoff deficit varies from -7% to -16% for the decades 1970 and 1980 in the humid areas, and from -13% to -27% in the dry areas (deviations calculated in relation to the 1951-1990 mean values) (OLIVRY, 1993). The global annual runoff deficit during the 80's reached  $430 \text{ km}^3 \text{ year}^{-1}$  for the Atlantic African tributaries (Fig. 4 et 5; Table 1).

During the two last decades, flood hydrographs of large river basins have been greatly reduced in volume and duration; maximum values are much smaller. The flood hydrographs show lower annual maximum discharges and shorter high water seasons than during the preceding period. In the equatorial areas, with two flood periods per year, the data show that the spring floods were more affected than the autumn floods by the climatic changes (Fig. 6). A frequency study of flood maxima shows a clear break in the data series, and emphasizes the danger of flood estimations that are based on recent years only. The long-term effects of rain shortage are more marked still for the low-flow regimes and different studies have shown that, in addition to the immediate effects of the drought, a large reduction of the groundwater storage can explain the persistent fall of the hydrological resource. In the case of recession-depletion period and low flows, the memory effect of the current deficit period is particularly clear. An unusual repetition of exceptionally dry low flows can be observed, especially an abrupt change in the depletion regime, unprecedented in hydrological time series. It also may be observed that a return to more favourable climatic conditions does not involve an immediate return to the earlier hydrosystem. Figure 7 shows two representative curves of the variability of the low flows (absolute minimum daily discharge) between 1950 and 1990 for a Sudano-Sahelian basin (the Bani river) and for a tropico-equatorial basin (the Sangha river, tributary of the Congo river). It is clear that the dry regions of Africa are more affected by drought and rainfall deficits than are the humid regions, but during the last decade the low flows of the Sangha river have been halved in relation to the low flows observed before 1970 (LARAQUE *et al.*, 1996). The large deficit of the low flows was also observed on the flows of the Ubangi, Congo/Zaire, Ogowe, Sanaga, Kwilu, Bandama and Konkure rivers in the humid areas during the last decade (OLIVRY, 1993).

In the dry regions of Africa the deficit of low flows is larger still and it has been observed during the last two decades. After the annual flood and the recession, which occur especially fast as the rainy season ends, there is a classical pattern of flow drop in the rivers in this region. This corresponds to the basin aquifers draining, also called depletion. This depletion is linked to an exponential law:  $Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$  with the flow  $Q_0$  on day  $t_0$ , the flow  $Q_t$  on day  $t_t$ , and  $\alpha$ , a coefficient expressed in  $\text{days}^{-1}$ , according to the physical and geometrical characteristics of the aquifers. The studies show a significant degradation of the depletion. This phenomenon, resulting from a deterioration of the aquifers, was first noted on the Senegal river in 1983 (OLIVRY, 1987). Since then, it has been observed again and specified, in relation to all the flows in the Sudano-Sahelian region. On a regional scale, it can be considered as a likely model of the progressive decrease of flows. In the Senegal river ( $218,000 \text{ km}^2$  at Bakel), the depletion coefficient has been relatively stable for over seventy years during humid as well as dry periods. The average is  $0.0186 \text{ day}^{-1}$  and the coefficient of variation is only 0.075. With the current drought, the alteration in the pattern only becomes significant after 1975. The depletion coefficient rapidly rises, to reach values such as  $0.04 \text{ day}^{-1}$  around 1985. The Niger river ( $120,000 \text{ km}^2$  at Koulikoro and data since 1907) shows before 1975 an average coefficient of  $0.023 \text{ day}^{-1}$ . The current period shows an average coefficient over the first 8 years as being around  $0.028 \text{ day}^{-1}$  and then an abrupt increase to values as high as  $0.040 \text{ day}^{-1}$  in the beginning of the 90's. The Bani river ( $102,000 \text{ km}^2$  at Douna), tributary of the Niger river, shows a significant evolution (Fig. 8 et 9). It is easy to give many examples in the Sudano-Sahelian region and the phenomenon is still likely present in humid tropical areas, even if it is less marked.

Thus in the case of the Ubangui river at Bangui (500,000 km<sup>2</sup>); the average coefficient from 1935 to 1975 was 0.021 day<sup>-1</sup>. It has been equal to 0.025 day<sup>-1</sup> during the last fifteen years. The increase of the depletion coefficient of the Sangha river is lower, but in the equatorial regions it is often difficult to observe the depletion periods, the flows being affected by rains during a short dry season (Fig. 10). The similarity of depletions in the case of different rivers and even of streams, which was observed in the flow time series before the current period, must be emphasized. The a values of 0.02 day<sup>-1</sup> are characteristic of a low water supply deriving from small hillslope aquifers. These aquifers are typical of the intertropical African geomorphology, where there is no large groundwater reserve. A good relationship appears between the coefficients of variation of recession and of drainage (OLIVRY, 1976). According to Darcy's law, the deviations from the norm would therefore mainly correspond to the variations in the aquifers' width. The hydrogeological data showed a drop of 10 m and more of the water table above hillslope aquifers in Senegal, Mali and Burkina Faso during the 80's. Consequently, there is nothing surprising in the fact that the decrease of these small aquifers results in a comparable "hyperdepletion" in the basins of various areas affected by the same climatic hazards. A return to better sustained discharges during the dry season first requires the reconstitution of the aquifers. This cannot happen immediately, as shown by the small effect of the recent improved rainfall on depletion coefficients. There is no exact convergence between the variations of Lamb's rainfall index and those of the depletion coefficient. Through the aquifers, reactions to the low water restitution are slower; they require a response time of several years and only become effective with the accumulation of similar climatic variations. The groundwater supply deficit in rivers, considered here, which is noticeable in the dry season, is obviously also present during the flood period and this also explains the low annual runoff and the poor flood maxima we still observe despite some rainfall recovery. The "memory effect" of the drought reflects the important contribution of base flow to the flood hydrographs of large rivers. A specific stream drought, which could be referred to as a "phreatic drought", is to be added to the climatic drought with a pluriannual gap. The hydrogeological laws are such that, under good rainfall conditions, the restoration of the hydrological regime should last as long as it took to bring it to its current state of degradation.

Key words : *tropical Africa, rainfall, water resources, deficits.*

## RÉSUMÉ

Dans le contexte pluviométrique déficitaire de l'Afrique intertropicale, l'hydraulicité des fleuves soudano-sahéliens a beaucoup diminué depuis 25 ans. Les fleuves des régions humides, relativement épargnés jusqu'en 1980, montrent aussi, avec un retard de plusieurs années une hydraulicité qui baisse dans des proportions importantes, alors qu'un retour à la normale du régime des pluies paraît amorcé. Le déficit des apports est pour l'Afrique humide de 16 % pour la décennie 80 (365 km<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>), contre 7 % pour la décennie 70, et pour l'Afrique sèche de 27 % (65 km<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>) pour la décennie 80 contre 13 % pour la décennie 70. Les maximums annuels de crue sont systématiquement plus faibles dans la période récente. En régime équatorial, la crue de printemps est la plus affectée par le déficit hydrologique et la différence entre crue de printemps et crue d'automne a triplé entre les années 1950-1960 et les années 1980. L'ensemble de la région connaît des étiages exceptionnels répétés. En zone soudano-sahélienne, le tarissement s'est considérablement accéléré et montre une vidange des écoulements de base deux fois plus rapide dans la période récente. Le phénomène est également sensible en Afrique humide et traduit un amincissement des réserves souterraines dû aux effets cumulés des déficits pluviométriques et décalé dans le temps, que l'on retrouve dans la baisse du niveau piézométrique des nappes phréatiques. Un effet mémoire est donc observé sur

les écoulements de base, avec pour conséquence un appauvrissement durable des ressources hydriques. Celui-ci restera indépendant, pour un temps, d'une éventuelle amélioration des conditions climatiques, comme le montrent les observations des années les plus récentes.

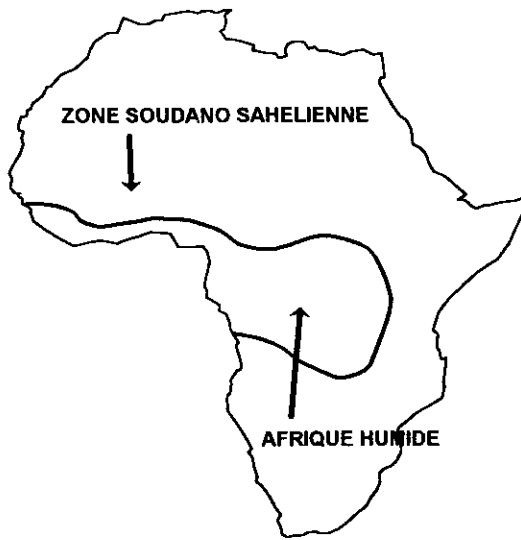
**Mots-clés :** *Afrique tropicale, précipitation, ressources en eau, déficits.*

## 1 – INTRODUCTION

Cette brève synthèse sur l'évolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique a pour objectif de replacer le contexte déficitaire des vingt-cinq dernières années par rapport à l'ensemble de la période étudiée de 1950 à 1990. Celle-ci constitue en effet, à l'exception de quelques grands fleuves observés parfois depuis le début du siècle, la période la plus longue d'observations communes sur un nombre significatif de cours d'eau d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique Centrale, dont les réseaux hydrométriques, mis en place par l'Orstom, sont depuis dix ou vingt ans gérés par les services hydrologiques nationaux. La durabilité des déficits actuels concerne d'abord les pays d'Afrique sèche de la zone soudano-sahélienne (Sénégal, Mali, Burkina-Faso, Niger et Tchad pour ne citer que les plus importants, ainsi que le nord de la Guinée et de la Côte d'Ivoire), mais aussi les pays de l'Afrique humide (les pays côtiers de la Guinée au Nigéria, pour l'Afrique de l'Ouest, et le Cameroun, le Centrafrique, le Gabon et le Congo, pour l'Afrique Centrale) (fig. 1).

Depuis plus de vingt ans, l'Afrique tropicale sèche connaît un appauvrissement constant de ses ressources en eau. Les déficits pluviométriques, marqués par une première phase aiguë dans les années 1972 et 1973, n'ont jamais cessé, même s'ils ont varié en extension et en intensité suivant les années. Une recrudescence notable de la sécheresse s'est manifestée en 1983 et 1984 et les déficits restent la règle jusqu'au début des années quatre-vingt-dix. Ceux-ci se sont exacerbés au niveau des écoulements des grands fleuves. L'ampleur géographique du phénomène et sa durée, sans équivalence connue dans les chroniques hydroclimatiques, ont conduit certains auteurs à parler de rupture climatique (CARBONNEL & HUBERT 1985).

Les mécanismes du climat de l'Afrique humide, tributaire de la façade atlantique du continent, sont les mêmes que ceux qui ont entraîné la sécheresse en Afrique soudano-sahélienne. Mais c'est seulement au cours des années quatre-vingt que l'extension de la sécheresse vers les pays plus au sud devient vraiment marquée. La raréfaction des pluies concerne les deux hémisphères et 21 pays africains sur 50 seront déclarés sinistrés en 1985 (SIRCOULON & OLIVRY 1986). Les grands fleuves de l'Afrique humide des zones tropicales et équatoriales sont à leur tour sérieusement affectés par des écoulements déficitaires. Une tendance quasi générale à la baisse est observée, celle-ci allant bien au-delà de l'irrégularité interannuelle observée à l'occasion de déficits pluviométriques annuels ponctuels. Le phénomène est alors observé aussi bien sur les fleuves soumis au régime tropical humide avec une seule saison de hautes eaux que pour les fleuves soumis au régime équatorial caractérisé par deux saisons de hautes eaux.



**Figure 1** Zones hydrologiques de l'Afrique atlantique.  
*Location of the hydrological areas in Western and Central Africa.*

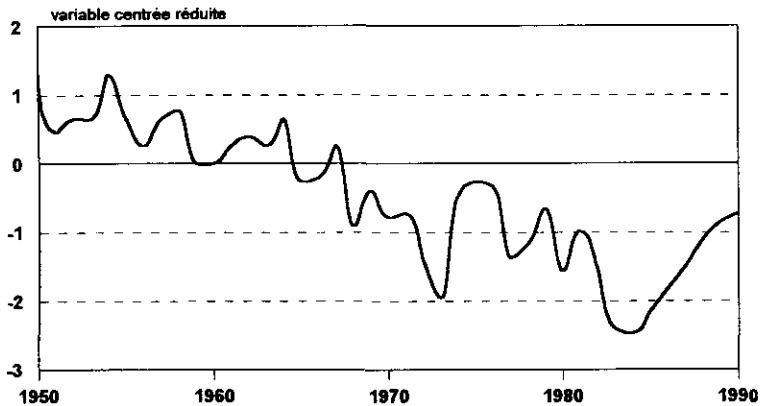
Les résultats significatifs proposés ici résument une partie des travaux de traitement et d'analyse de mesures et observations qui ont permis de quantifier l'évolution des régimes hydroclimatiques et la durabilité des déficits actuels, liée au climat mais aussi aux modifications induites par la persistance de plus faibles précipitations sur le comportement physique des bassins versants.

## 2 – DES PRÉCIPITATIONS MOINS ABONDANTES

Une première approche de l'appauvrissement des ressources en eau de l'Afrique atlantique doit être recherchée dans la péjoration climatique du régime des précipitations, celui-ci étant largement conditionné dans les régions étudiées par le flux de mousson.

Dans les régions soudano-sahéliennes, les hauteurs annuelles de précipitation montrent une tendance à la baisse particulièrement accusée dès 1968 avec des valeurs presque toujours inférieures aux moyennes. Certains indices régionaux (LAMB, 1985, NICHOLSON *et al*, 1988), définis comme de simples moyennes des précipitations mesurées sur un certain nombre de stations de référence pour différentes zones climatiques, montrent cette dégradation constante depuis vingt ans. Une amélioration récente a été observée mais reste encore très relative puisque les précipitations annuelles sont toujours déficitaires. La figure 2 actualise les travaux de S. NICHOLSON (*op. cit*) jusqu'en 1990, en considérant comme

variable le rapport de l'écart à la moyenne sur l'écart-type de la série des indices régionaux (valeurs de référence de S. NICHOLSON sur la période 1910-1980).



**Figure 2** Index pluviométrique de l'Afrique tropicale sèche de 1950 à 1990.

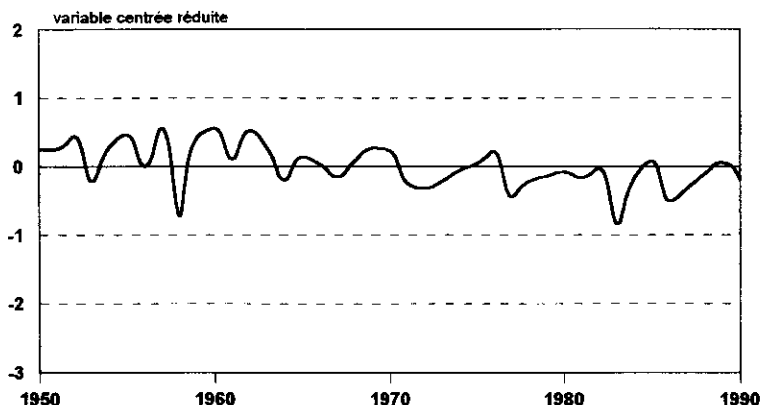
*Variations of the rainfall indice of the West Sudano-Sahelian Africa between 1950 and 1990. Moving five years means of the annual/standard deviations ratio (after MAHE, 1993).*

L'Afrique humide montre également une tendance générale à la baisse des précipitations mais avec plus de nuances spatiales. Ainsi les zones côtières très arrosées, de la Guinée au Nigeria, paraissent en phase avec ce qui est observé dans la zone soudano-sahélienne. En valeur absolue, les déficits sont très importants, ils peuvent atteindre jusqu'à 1 000 mm dans des régions de précipitations interannuelles de 2 500 à 3 000 mm. Plus à l'est, vers l'Afrique Centrale, la tendance est d'abord beaucoup moins nette en bordure de l'océan Atlantique puis s'accroît de nouveau vers l'intérieur du continent sans toutefois retrouver l'ampleur des régions nord du golfe de Guinée (fig. 3).

Cette analyse rapide a été obtenue à partir de l'étude des données de 1 000 postes pluviométriques des bassins tributaires de la façade atlantique du Sénégal à l'Angola et de l'application d'indices régionaux d'homogénéisation par zone géomorpho-climatique. Afin de supprimer le biais de la variabilité interne propre à chaque unité, les calculs portent sur les valeurs centrées et réduites des précipitations annuelles (MAHÉ, 1993).

### 3 – DES ÉCOULEMENTS DE SURFACE PLUS FAIBLES

Comme pour les précipitations, il est possible de comparer l'évolution des écoulements de surface entre les différents bassins fluviaux de l'Afrique humide et l'évolution des débits des fleuves soudano-sahéliens. L'incidence de la sécheresse est largement amplifiée dans le régime hydrologique.



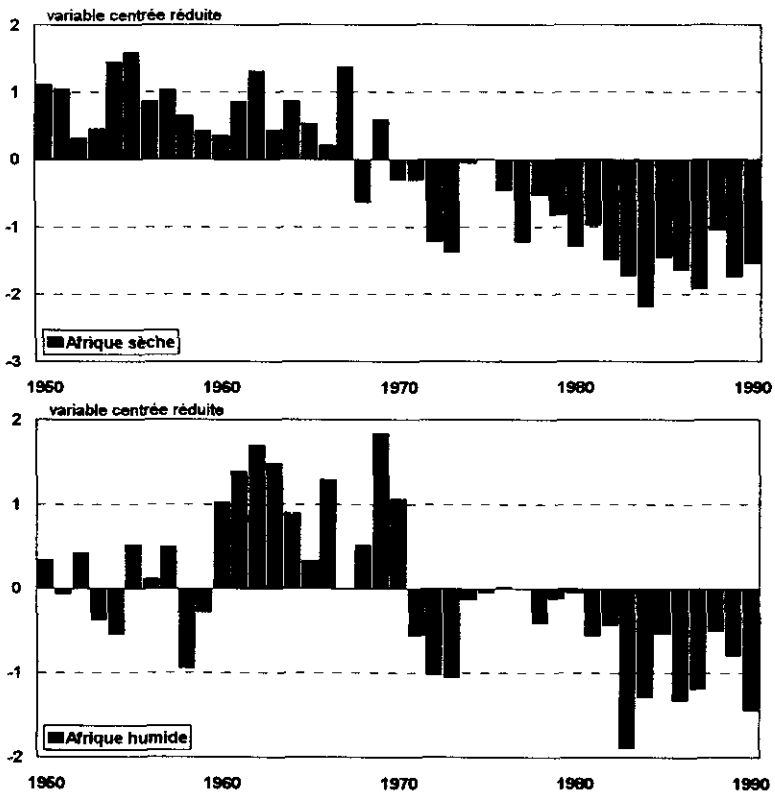
**Figure 3** Index pluviométrique de l'Afrique humide de 1950 à 1990. Moyenne mobile des écarts réduits (d'après MAHÉ, 1993).

*Variations of the rainfall indice of the humid Africa between 1950 and 1990.*

À partir des débits moyens annuels du Sénégal, du Niger et du Chari, et des hydraulicités respectives de ces fleuves (l'hydraulicité étant définie comme le rapport du débit moyen annuel sur le débit interannuel, ou module, calculé sur la période 1950-1990), on a calculé pour chaque année l'hydraulicité moyenne soudano-sahélienne depuis 1950. La variable retenue est le rapport entre la variation d'hydraulicité et l'écart-type des hydraulicités. Ceci permet de mesurer de manière comparable l'impact du changement climatique sur des bassins dont la variabilité naturelle est différente (régime équatorial, tropical de transition ou tropical sec) (fig. 4). Les fluctuations récentes montrent un effondrement catastrophique des ressources en eaux de surface. Celles-ci ont diminué de moitié sur la dernière décennie pour la zone soudano-sahélienne.

À partir des hydraulicités de grands cours d'eau tropicaux ou équatoriaux (Bandama, Kouilou, Ogooué, Oubangui, Sangha, Congo...), on a constitué un indice équivalent pour la zone humide.

La période abondante entre 1960 et 1970 marquée par les crues exceptionnelles de 1961, 1962 et 1969 a permis à certains auteurs de proposer pour l'hydraulicité de l'Afrique une tendance globale à la hausse (PROBST & TARDY, 1987). Celle-ci est largement démentie dans les faits par les décennies suivantes. La décennie 71-80 est proche de la normale avec une période largement déficitaire centrée sur 1972 et 1973. La décennie 1981-1990 connaît un appauvrissement général des écoulements notamment en 1984. Alors que le déficit des précipitations semble stabilisé, voire moins important, dans les dix dernières années, l'écoulement des fleuves continue de diminuer dans des proportions notables. Le régime hydrologique des fleuves de l'Afrique humide, comme celui de l'Afrique sèche, est directement influencé par celui des précipitations mais subit, aussi, avec un effet retard, pouvant porter sur une dizaine d'années, l'incidence du cumul de déficits pluviométriques répétés. Les effets de la déforestation (encore limitée en Afrique centrale) sur l'écoulement ne sont pas perceptibles du fait de l'ampleur des changements climatiques.



**Figure 4** Variations de l'hydraulicité (variable centrée réduite) depuis 1950 pour l'Afrique sèche et l'Afrique humide.

*Annual runoff variations since 1950 (annual deviation/standard deviation).*

#### 4 – LE DÉFICIT DES RESSOURCES EN EAU

Sur l'ensemble de l'Afrique intertropicale humide, tributaire de la façade atlantique du continent, l'écoulement annuel moyen sur quarante ans est de 2 350 milliards de m<sup>3</sup> dont 1 350 milliards pour le bassin du Congo/Zaire.

Les deux décennies déficitaires 1971-80 et 1981-1990 voient l'écoulement annuel tomber respectivement à 2190 et 1985 milliards de m<sup>3</sup>, soit - 7 et - 16 % des apports moyens (valeurs très significatives au pas de temps de la décennie). Le tableau 1 regroupe, pour les deux grandes régions hydrologiques, les volumes écoulés chaque année pour les deux dernières décennies avec indication des écarts par rapport aux moyennes établies sur 40 ans. Pour toutes les régions, l'appauvrissement des fleuves s'accroît considérablement au cours de la période 1981-1990. Durant cette période, le déficit des apports de l'Afrique centrale et du golfe de Guinée totalise 365 km<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>. Ce déficit comprend celui de



l'Afrique équatoriale :  $190 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  dont 150 pour le seul bassin du Zaïre. De la Guinée (Konkouré) au Nigeria, le déficit est de  $130 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  (contre  $75 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  pour la décennie précédente) ; en valeur relative, c'est donc 32 % des apports qui manquent à la région, entraînant de nombreuses défaillances dans le fonctionnement des aménagements hydroélectriques (en Côte d'Ivoire notamment).

**Tableau 1** Volume des apports annuels des tributaires africains de l'océan Atlantique pour les deux dernières décennies et écarts à la moyenne 1951-1990.

**Table 1** Annual runoff of the Atlantic tributaries during the two last decades and deviations versus the mean values calculated on the 1951-1990 period for the wet and dry Africa.

Volumens annuels en $\text{km}^3$					
Régions Hydrologiques	Moyenne 40 ans	Décennies 1971/80 a	Déficitaires 1981/90 b	Écart a	en % b
Afrique humide	2 350	2 190	1 985	- 7	- 16
Afrique sèche	235	205	170	- 13	- 27
Total du Sénégal au Congo	2 585	2 395	2 155	- 7	- 17

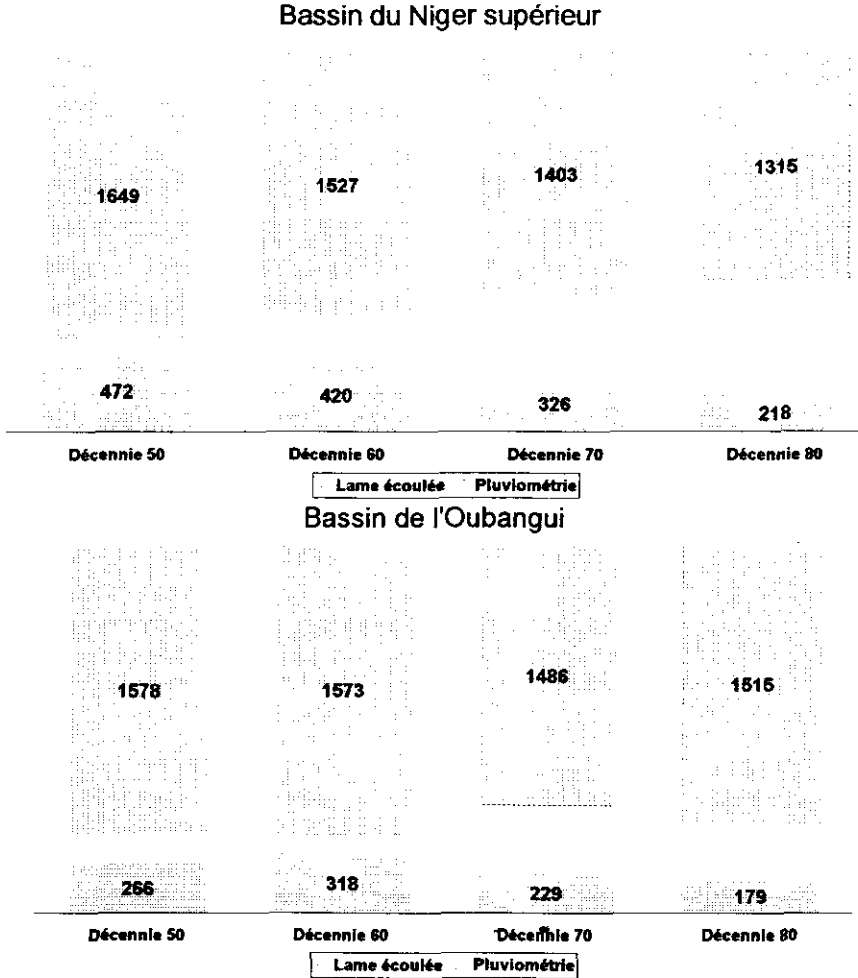
Pour compléter cette présentation de l'écoulement des eaux continentales de l'Afrique vers l'Atlantique, on a indiqué les apports des fleuves de l'Afrique sèche (Sénégal, Gambie... Niger et Bénoué...). La moyenne de  $235 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  ( $275 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  avec le système Chari, tributaire du lac Tchad), relativisée considérablement l'importance (1/10) de l'Afrique sèche par rapport à l'Afrique humide. L'appauvrissement de la ressource en eau est pour la décennie 1971-80 de  $160 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  en Afrique humide,  $30 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  en Afrique sèche (rapport de 5,3). Pour la décennie 1981-90, les valeurs sont respectivement de  $365 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  et  $65 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  (rapport de 5,8).

Cet appauvrissement a plus que doublé d'une décennie à l'autre en dépit de précipitations moins déficitaires. Le Congo-Zaïre, avec plus de 50 % des apports à l'Atlantique accuse à lui seul plus du 1/3 des pertes de la dernière décennie.

## 5 – DES CHANGEMENTS HYDROLOGIQUES SIGNIFICATIFS

Sans rentrer dans le détail de fonctionnements hydrologiques souvent calqués sur le régime des précipitations notamment en régime tropical, le suivi de certains paramètres peut permettre de préciser le caractère des changements climatiques ou le déphasage actuel entre précipitations et écoulements de surface.

La figure 5 donne deux exemples, en Afrique sèche et humide, de l'évolution des bilans hydrologiques moyens calculés par décennie. Les coefficients d'écoulement annuel diminuent sensiblement entre les décennies 1970 et 1980 pour le Niger (de 23 à 16 %) et l'Oubangui (de 15,5 à 12 %), tandis que les déficits d'écoulement restent relativement stables sur l'ensemble de la période étudiée.



**Figure 5** Exemples de bilans par décennies pour deux cours d'eau de l'Afrique sèche et humide (en mm).

*Interannual decade hydrological budget of two rivers of the dry and wet Africa (in mm).*

### 5.1 Le régime des hautes eaux

Sans que cela surprenne, la chronique des maximums annuels de crue montre en Afrique sèche comme en Afrique humide une baisse sensible calquée sur

ce qui a été décrit pour les débits moyens annuels. Les hydrogrammes de crue sont souvent tronqués (déficit de précipitations au cœur de la saison des pluies) et la saison de hautes eaux est généralement raccourcie.

Une autre approche, relative au régime des hautes eaux de l'Afrique humide, a mis en évidence en région équatoriale une évolution différente des crues de printemps et d'automne. Sur l'Ogooué (MAHÉ *et al*, 1990) comme sur la Sangha ou le Kouilou, l'évolution de la crue de printemps montre à partir de 1980 une diminution importante de son poids par rapport à la crue d'automne, plus forte, qui baisse plus modérément.

Ainsi la différence entre maximums journaliers des crues de printemps et d'automne de l'Ogooué est de l'ordre de  $1\ 000\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$  jusqu'aux années 50 puis de  $2\ 000\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$  jusqu'au milieu des années 1970 et passe à  $3\ 000\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$  dans la dernière décennie, pour un maximum d'automne ayant peu varié d'environ  $10\ 000\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$ . Le phénomène est identique sur le bassin du Kouilou à Sounda entièrement situé dans l'hémisphère sud comme le montre la figure 6. Cet amoin-

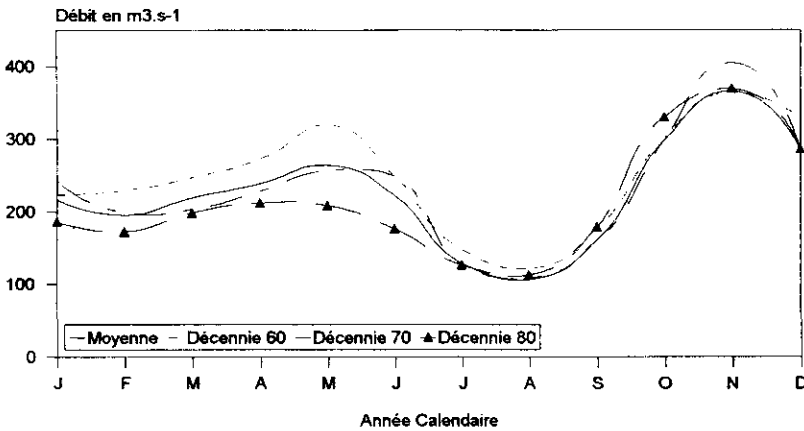


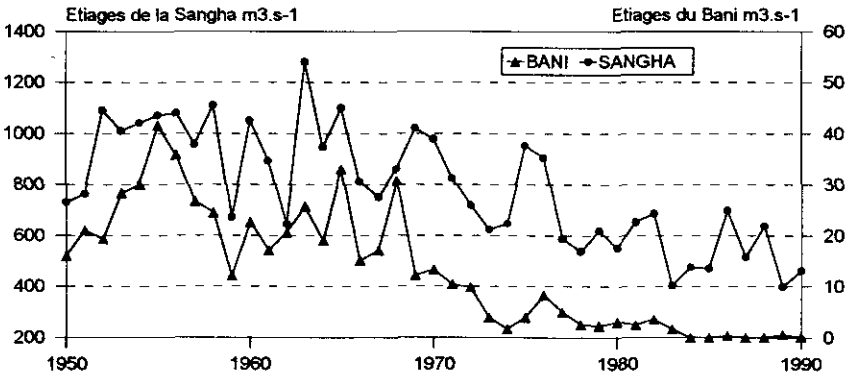
Figure 6 Évolution des hydrogrammes annuels du Kouilou à Sounda.

*Comparison of the mean annual hydrographs of the Kwilu river for different decades.*

drissement de la crue de printemps est à rattacher à de mauvaises conditions pluviogènes du flux de mousson lors de la remontée septentrionale de la zone de convergence intertropicale, anomalies corroborées par les observations des océanographes sur les températures de l'eau de mer et les upwellings côtiers équatoriaux (SERVAIN et SEVA, 1987) ; on retrouvera plus au nord ce fonctionnement dégradé lors de la crue annuelle des fleuves tropicaux.

## 5.2 Le régime des basses eaux

L'évolution des basses eaux intègre sans doute le mieux la persistance de la période déficitaire actuelle. Les étiages des fleuves soudano-sahéliens sont systématiquement les plus faibles des chroniques observées (*fig. 7*). L'écoulement a même cessé sur le Niger à Niamey en 1985 et sur le Sénégal à Bakel en 1984.



**Figure 7** Variation des débits mensuels d'étiage depuis 1950 sur deux cours d'eau d'Afrique sèche et humide.

*Variability of the low water in Sudanese and Equatorial regions. Yearly absolute minimum discharges of the Bani and Sangha rivers (after MAHÉ, 1991).*

Sans le soutien artificiel de quelques aménagements hydrauliques, ces cours d'eau ne seraient plus pérennes aujourd'hui. Depuis 1972, et de manière continue depuis 1978, les débits mensuels les plus faibles de l'Afrique humide sont inférieurs à la moyenne et décroissent régulièrement. Ce phénomène est observé tant sur les cours d'eau d'Afrique sèche que d'Afrique humide

Cette faiblesse quasi générale des étiages traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux résultant du cumul des déficits pluviométriques.

### 5.3 Le tarissement des cours d'eau

La vidange des nappes de versant, caractéristique de l'hydrogéologie de la plupart des bassins fluviaux étudiés, suit une loi de tarissement à décroissance exponentielle qu'il est d'autant plus facile d'étudier que la saison sèche est bien marquée. Cette loi s'exprime par la relation  $Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$ , où  $Q_0$  et  $Q_t$  sont les débits aux instants  $t_0$  et  $t$ , et  $\alpha$  le coefficient de tarissement qui a la dimension de l'inverse d'un temps. On a pu mettre en évidence en zone soudano-sahélienne une rupture marquée du régime du tarissement consécutive à la sécheresse (OLIVRY, 1987, OLIVRY *et al*, 1992). Le tarissement s'est considérablement accéléré depuis les années 70 conduisant à une rapide vidange des nappes ; son coefficient est passé de  $0,02 \text{ j}^{-1}$  à  $0,04 \text{ j}^{-1}$  pour le Sénégal et le Niger.

Ainsi sur le fleuve Niger à Koulikoro (bassin de  $120\,000 \text{ km}^2$ ), les données montrent un tarissement partagé entre une première période « humide » de 20 ans, avec un coefficient moyen de  $0,023 \text{ j}^{-1}$ , et la période actuelle qui, après 8 années à coefficient moyen d'environ  $0,028 \text{ j}^{-1}$ , présente une montée brutale dans l'évolution de ses coefficients de tarissement jusqu'à des valeurs de  $0,040 \text{ j}^{-1}$  au début des années 90. Les valeurs récentes ont été déduites de l'étude du Niger à Banankoro qui a conservé son régime naturel, à partir d'une corrélation entre débits de basses eaux sur la période commune antérieure à la mise en service du barrage de Sélingué sur un affluent à l'aval de Banankoro.

Dans le cas du Bani, principal affluent du Niger (102 000 km<sup>2</sup> à Douna), l'évolution du tarissement est tout aussi significative. De 1950 à 1975, le coefficient moyen est de 0,023 j<sup>-1</sup> ; il passe à 0,03 j<sup>-1</sup> à la fin des années 70 et à 0,04 j<sup>-1</sup> à la fin des années 80 (fig. 8).

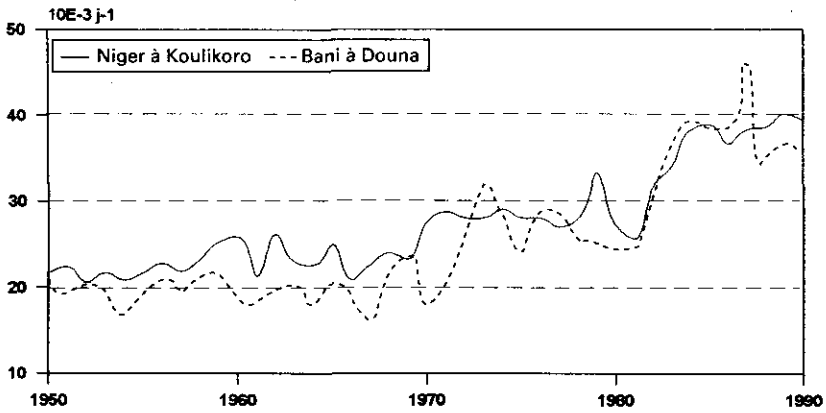


Figure 8 Évolution du coefficient de tarissement en Afrique sèche.  
*Variability of the depletion coefficients of Sudanese rivers.*

On peut multiplier les exemples dans la région soudano-sahélienne (Sénégal, Chari, Falémé..., fig. 9). On retiendra que le temps nécessaire pour que le débit

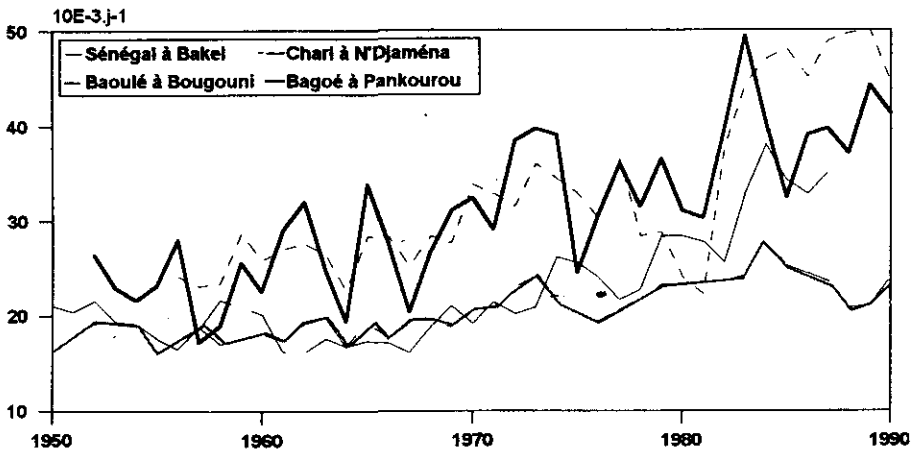
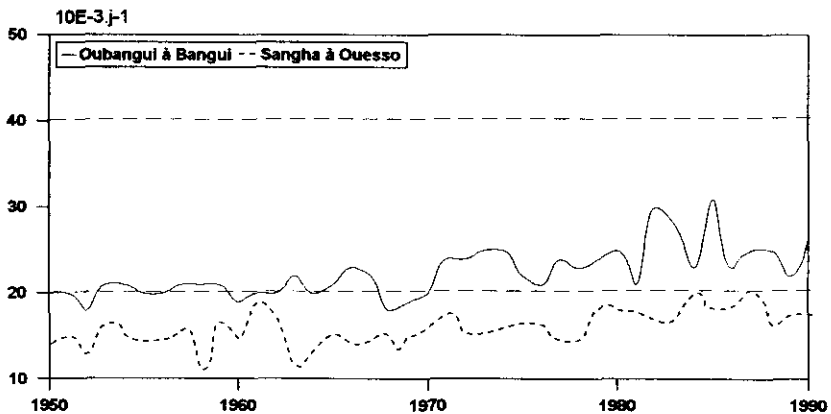


Figure 9 Évolution du coefficient de tarissement en Afrique sèche.  
*Variability of the depletion coefficients of rivers of Sudanese Africa.*

de tarissement des cours d'eau soudano-sahéliens diminue dans le rapport de 10 à 1 est passé grosso modo de 4 mois à 2 mois (OLIVRY, 1993).

Le tarissement des fleuves soumis au régime tropical humide montre à un degré moindre le même phénomène. Son coefficient a augmenté de 30 % (moyenne mobile) de 1980 à 1985 pour l'Oubangui ; la valeur maximale est 60 % plus forte que la moyenne antérieure à la sécheresse. Sur la Sangha, la valeur maximale (1987) est 40 % plus forte que la moyenne antérieure à 1972. Comme pour l'Afrique sèche, le phénomène s'accélère à partir de 1980 sur la Sangha et l'Oubangui (fig. 10).



**Figure 10** Évolution du coefficient de tarissement en Afrique humide.

*Two examples of the variability of the depletion coefficient for rivers of the Central Africa.*

Pour les fleuves équatoriaux, les débits de tarissement sont difficilement appréhendés, soit que la saison de basses eaux est réduite ou perturbée par des précipitations, soit que l'on observe des débits composites d'origines diverses. Il est probable que les aquifères de ces régions sont également affectés par le cumul de déficits des précipitations, comme cela est d'ailleurs observé en pays Batéké au Congo (LARAQUE & PANDI, 1996).

#### 5.4 Interprétation du fonctionnement des aquifères

La similitude des tarissements observés en milieu intertropical dans les chroniques de débit antérieures à la période de sécheresse doit être soulignée. Les valeurs du coefficient se situent dans la gamme de  $0,015$  à  $0,025 \text{ j}^{-1}$ , en moyenne  $0,02 \text{ j}^{-1}$ , qu'il s'agisse de grands cours d'eau drainant des bassins de taille très variable ou de petites rivières aux bassins versants très limités, pour autant que les précipitations annuelles dépassent  $1\ 000$ - $1\ 100 \text{ mm}$ . Les exceptions sont relevées, avec des tarissements plus lents, sur les bassins dont la géologie révèle de larges aquifères continus (nappes de plateaux gréseux : plateau Bateke au Congo, *pro parte* plateaux du Fouta Djallon en Guinée). Des tarissements plus rapides dans les régions moins arrosées traduisent une dégradation des aquifères.

Au Cameroun (OLIVRY, 1976), une bonne relation a pu être établie entre les variations du coefficient de tarissement moyen (compris entre 0,015 et 0,027  $j^{-1}$ ) et celles du coefficient de drainage de différents bassins étudiés. Le coefficient de drainage introduit la notion de largeur moyenne des interfluves. Des interfluves, on passe naturellement au concept de nappes phréatiques de versant.

L'alimentation des basses eaux des rivières apparaît comme principalement due au cumul des vidanges de petites nappes de versant assez semblables et caractéristiques de la géomorphologie générale de l'Afrique intertropicale ; leur recharge ne dépend que des apports par infiltration des lames d'eau précipitées. La part des échanges nappe-rivière, avec renversement du sens de l'échange entre la crue et la décrue, caractéristiques des plaines alluviales, est très secondaire du fait même de l'extension généralement limitée de ces plaines par rapport à l'ensemble des bassins versants. Ceci explique la similitude des tarissements pour des cours d'eau d'importance très variable.

D'après la loi de Darcy, le coefficient de tarissement est directement proportionnel à la conductivité hydraulique (perméabilité), à la porosité, à la surface d'échanges nappe-rivière et inversement proportionnel aux dimensions de l'aquifère. Pour un même bassin, les trois premiers termes ne varient pas ou peu, la surface d'échange nappe-rivière étant davantage liée à la largeur de la section du cours d'eau qu'à son niveau. L'augmentation considérable du coefficient de tarissement dans la période sèche correspond donc essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et donc de la largeur des nappes de versant.

La baisse importante du niveau piézométrique est une constante des observations hydrogéologiques des régions soudano-sahéliennes (PNUD-DNHE, 1989). L'augmentation considérable de l'épaisseur de la tranche aérée du sol au-dessus de la surface piézométrique ne permet pas une réalimentation facile des nappes. Les eaux infiltrées connaissent un long cheminement interstitiel qui n'aboutit pas toujours à la nappe. La zone non saturée peut piéger l'ensemble de la lame d'eau infiltrée de l'année. Celle-ci pourra être reprise par évaporation ou rester en partie en attente d'apports complémentaires des années suivantes. Ceux-ci, s'ils sont assez abondants, et donc que l'on observe de bonnes précipitations, finiront, (effets pistons successifs), par aboutir à une recharge de la nappe.

C'est dans la partie amont de la nappe de versant que l'épaisseur de la zone aérée est la plus grande et donc que les problèmes de réalimentation sont les plus cruciaux. La sécheresse en privant l'aquifère amont des apports de l'infiltration a conduit à une réduction de l'extension de la nappe de versant soit par épuisement des réserves de l'amont, soit par coupure des liaisons entre les aquifères des parties aval et amont. La recharge éventuelle de l'aquifère amont reste dépendante d'un fonctionnement hydrogéologique pluriannuel et dans la période actuelle on observe bien un effet mémoire de la sécheresse inscrit dans l'évolution des réserves souterraines.

## 6 – CONCLUSION

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 s'est bien vu

dans la faible incidence d'une meilleure pluviométrie sur le tarissement. Il n'y a pas concordance entre les variations des index pluviométriques 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.

À la sécheresse climatique se surimpose avec un décalage pluriannuel une sécheresse spécifique aux cours d'eau qu'on pourrait appeler « sécheresse d'origine phréatique ». Les lois de l'hydrogéologie sont telles que, dans de bonnes conditions de pluviosité, l'amélioration du régime de basse-eaux pourrait demander un temps comparable à celui qui a conduit à son actuelle dégradation.

Le moteur des évolutions possibles reste bien évidemment l'évolution climatique des prochaines décennies. Il convient toutefois de souligner que l'occurrence d'une situation climatique médiane conduit à pérenniser la dégradation du régime hydrologique des fleuves de la région et que dans la perspective la plus optimiste, les effets de l'actuelle sécheresse se feront encore sentir pendant plusieurs années (OLIVRY *et al*, *op. cit*).

Le déficit d'alimentation des fleuves par les nappes souterraines, apparent en saison sèche et étudié ici, est bien entendu sous-jacent en période de crue, du fait de la contribution des écoulements de base à l'hydrogramme annuel, et ceci explique aussi la faible hydraulicité et les modestes maximums de crue que l'on continue d'observer malgré une certaine reprise de la pluviosité.

Cette reprise de la pluviosité semble se confirmer dans les années quatre-vingt-dix, mais des travaux d'homogénéisation des données restent à achever pour quantifier la physionomie réelle de l'évolution hydroclimatique de cette dernière décennie du siècle. D'ores et déjà, on sait que les informations hydrologiques indiquent la persistance d'écoulements déficitaires. L'effet mémoire de la sécheresse évoqué ici paraît toujours d'actualité ; ainsi, les fortes précipitations de l'année 1994 sur le bassin du Niger (fréquence décennale) ne se sont traduites que par une crue de fréquence médiane sur le fleuve Niger, l'écoulement des autres années étant beaucoup plus modeste.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CARBONNEL, J.-P. & HUBERT, P. (1985) Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex Haute-Volta), *CR Acad. Sc. Paris*, t.301, série II, n° 13 : 941-944.
- LAMB, P. (1985) Rainfall in subsaharian West Africa during 1941-83. *Zeit. Gletscherk Glazialgeologie*, 21 : 131-139.
- LARAQUE, A. & PANDI, A. (1996). Rôle des données physiographiques dans la classification hydrologique des affluents congolais du fleuve Congo-Zaïre. *CR Acad. Sci. Paris*, t. 323, série IIa, p. 855-858.
- MAHE, G. (1993) Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *Thèse Doctorat Univ. Paris-Sud Orsay*, 438 p.
- MAHE, G., LERIQUE, J. & OLIVRY, J.-C. (1990) L'Ogooué au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évi-



- dence de variations climatiques à l'Équateur. *Hydrol. Continent. 5.2 Ed. ORSTOM Paris, 105-124.*
- NICHOLSON, S.E., KIM, J & HOOPINGARNER, J. (1988) Atlas of African rainfall and its interannual variability. *Departement of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Florida USA.*
- OLIVRY, J.-C. (1976) Régimes hydrologiques en pays bamiléké (Cameroun). *Cahiers ORSTOM Paris, série hydrologie, vol. XIII, n° 1, p. 37-71.*
- OLIVRY, J.-C. (1987) Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinitisation de la basse Casamance. (*Proc. Vancouver Symp. août 1987*) 501-512, *IAHS Publ. n° 168.*
- OLIVRY, J.C., SIRCOULON, J. et TOURE, M. (1992) The ill rivers of Africa. in Colloque ICID Impactos de variacoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regioes semi-aridos. Fortaleza (Brazil).
- OLIVRY, J.-C. (1993) Évolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale. In « l'eau, la terre et les hommes, hommage à René Frécaut ». Madeleine Griselin Ed. Presses Universitaires de Nancy. p. 181-190.
- PNUD-DNHE (1989). Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali. Programme des Nations Unies pour le Développement et Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie ; projet MLI/84/005, Bamako.
- PROBST, J.-L. & TARDY, Y. (1987) Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *J. Hydrol, 94 289-311.*
- SERVAIN, J. & SEVA, M. (1987) On relationships between tropical Atlantic sea surface temperature, wind-stress and regional precipitations indices : 1964-1984. *Ocean Air Interactions, 1 : 183-190.*
- SIRCOULON, J. & OLIVRY, J.-C. (1986) Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale. Considérations sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières. In : *Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Études Hydrauliques (CIEH). Série Hydrologie.*