

Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa (1951–1989)

Évaluation des apports en eau douce à l'Atlantique depuis les côtes de l'Afrique intertropicale (1951–1989)

Gil Mahé^a, Jean-Claude Olivry^b

^a IRD and Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, United Kingdom

^b IRD – Hydrologie, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France

(Received 22 February 1999, accepted after revision 3 April 1999)

Abstract — Yields of freshwater flowing into the Atlantic Ocean from West and Central Africa are computed from the data series of 33 rivers, between 1951 and 1989. It also takes into account water yields originating from coastal catchments, which represent 25 % of the water yield and 19 % of the 7.6 million square kilometers of total surface area studied. The total annual water yield to the Atlantic Ocean is about 2 700 billion cubic meters. During the period 1971–1989, total yield fell by 17.6 % as compared to the 1951–1970s average. Runoff deficit has been decreasing since 1951 in West Africa, but not in Central Africa. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

West Africa / Central Africa / freshwater / Atlantic Ocean / runoff deficit

Résumé — Les apports en eau douce à l'Atlantique depuis l'Afrique de l'Ouest et centrale sont calculés sur la période 1951–1989, à partir des données de 33 fleuves, en prenant aussi en compte les apports des bassins versants côtiers, qui représentent 25 % du total annuel et 19 % des 7,6 millions de kilomètres carrés de la surface totale. L'apport annuel total à l'Atlantique est de 2 700 milliards de mètres cubes. Durant la période 1971–1989, les apports diminuent de 17,6 % par rapport à la moyenne 1951–1970. Le déficit d'écoulement diminue depuis 1951 en Afrique de l'Ouest, mais pas en Afrique centrale. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

Afrique de l'Ouest / Afrique centrale / eau douce / océan Atlantique / déficit d'écoulement

Version abrégée (voir p. 625)

1. Location and origin of data

From the North of Senegal to the South of Angola, rivers which flow into the Atlantic Ocean drain a surface of about 7.6 million square kilometers (*figure 1*). For 33 rivers, it is possible to use or extrapolate annual series for the period 1951 to 1989. The surface area covered by these 33 rivers occupies 81 % of the total surface area, with the Congo river basin alone representing 46 % of the total surface area (*table 1*). The discharge values used in this

study come from a variety of sources: National Hydrological Services, private corporations, and ORSTOM. For most of the rivers the yearly values of runoff are taken from daily or monthly runoffs. For 68 % of the 33 basins' surface we used observed data available from 1951 to 1989 (*table 1*). We reconstructed certain missing daily, monthly, or yearly values. Details regarding such calculations are found in Mahé (1993). For Angola, we found only average runoffs in a reference book (Angola, 1974), allowing us to only show decadal variations.

Note communicated by Georges Pédro.

* Correspondence and reprints.
g.Mahé@uea.ac.uk

C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / *Earth & Planetary Sciences*
1999, 328, 621–626

621



Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B* 19056 Ex : 1

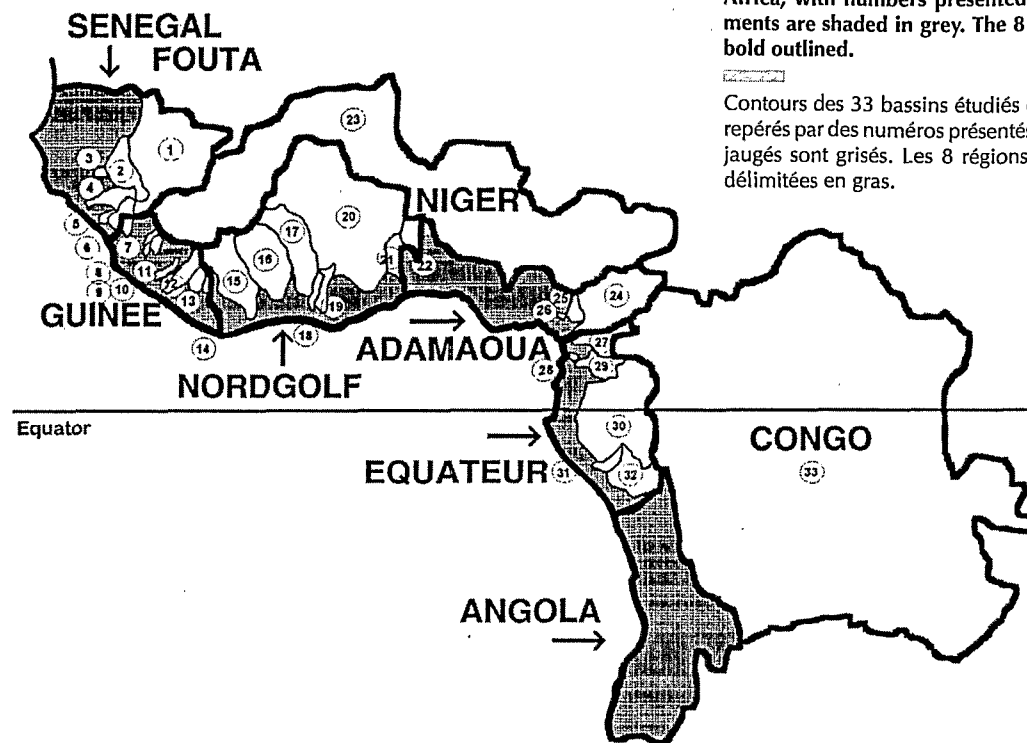


Figure 1. Contours of the 33 basins studied in West and Central Africa, with numbers presented in table I. The ungauged catchments are shaded in grey. The 8 major hydroclimatic regions are bold outlined.

Contours des 33 bassins étudiés en Afrique de l'Ouest et centrale, repérés par des numéros présentés dans le tableau I. Les bassins non jaugés sont grisés. Les 8 régions hydroclimatiques majeures sont délimitées en gras.

2. The ungauged catchments

Ungauged catchments cover 19 % of the total surface (1.5 million square kilometers). They are found particularly along the coastal bands (figure 1) where rainfall is often more abundant than in the interior of the continent. To take into consideration coastal specificities for reconstructing runoff time series for ungauged catchments we have chosen a method inspired by Olivry (1986), using the relationship between total annual rainfall and specific runoff values. This demonstrated a correlation between rain and specific runoffs, applicable to cases of annual rainfall of at least 1 500 mm, and showed runoff coefficients of up to 70 % for rains of 3.5 m per year. Due to these higher runoff coefficients, as compared to continental regions, these ungauged catchments represent a considerable yield of freshwater. The transposition of Olivry's relationship to regions other than those of the Cameroonian coast is subject to caution due to differences in climatic conditions, but, as we used that method, with few exceptions, for regions with over 1 500 mm precipitation per year (from the Guinean Mountains to the Gabonese and Congolese coasts) (L'Hôte and Mahé, 1996), the conditions of optimal utilization of this relation between rain and runoff are thus largely met. From the relationship described by Olivry the specific runoffs can be deduced. Runoff is then calculated from the areas of the ungauged catchments and their annual rainfall.

The annual rainfall values for each basin during the 1951–1989 period are calculated through spline interpolation, based on annual rainfall data sets from about 900 rainfall stations covering the total surface. Details of the

method are described in Mahé et al. (1994) and Wotling et al. (1995). Thus, we have precipitation time series for the 33 individual basins and for ungauged catchments, with the specific variability of coastal precipitation being preserved in the constructed data series.

3. Analysis of results

We have grouped the rivers, including the ungauged catchments, into eight regional entities (figure 1, table I). Two of them are individual basins of the Niger and the Congo rivers. We also grouped these eight regions into two global regions of West and Central Africa (Senegal–Fouta, Guinea, Nordgolf, Niger and Adamaoua for West, and Equatorial and Congo for Central). On table II are displayed the annual fresh water yields to the ocean from 1951 to 1989, and precipitations over West and Central Africa. Primary and secondary maxima and minima show the major climatic events.

We first observe high values before 1970 and low ones afterwards. This finding is strongly apparent to the west of the mouth of the Niger River, but becomes less so to the south of the Sanaga River. The statistical tests for detection of rupture years in chronological series (Pettitt, Lee and Heghinian, Hubert); (Hubert et al., 1998, Chronostat, 1998), gives 1970 as the most probable rupture year for most of the discharge series and for the total yields (table II). For the Congo and Equatorial regions, the series are assumed to be random ones (according to the rank correlation results, not shown), with two rupture years in 1959 and 1970, consistent with Hubert and Carbonnel (1993) results over the 1902–1989 time series; and for the Equa-

Table 1. The 33 rivers studied during the period 1951–1989. Surfaces of basins and ungauged catchments as compared to total surface area of 7.6 million km², and observation period before reconstruction.

Les 33 fleuves étudiés durant la période 1951–1989 et leur période d'observation avant reconstruction. Les surfaces des bassins et des bassins non jaugeés sont exprimées en pourcents de la surface totale.

Region	N°	River	Gauging site	Basin surface (km ²)	% of total surface	Observation period
Senegal–Fouta	1	Senegal	Bakel	218 000	2.83	1951–1989
Senegal–Fouta	2	Gambie	Kouloumbou	42 200	0.55	1951–1989
Senegal–Fouta	3	Casamance	Kolda	3 700	0.05	1967–1986
Senegal–Fouta	4	Corubal	Saltinho Amont	23 800	0.31	1977–1989
Senegal–Fouta	5	Fatala	Bindan	5 100	0.07	1971–1986
Senegal–Fouta	6	Konkoure	Amaria	16 200	0.21	1951–1989
Senegal–Fouta		Ungauged catchments		230 000	3.00	
Guinea	7	Kolente	Tassin	6 600	0.09	1954–1980
Guinea	8	Rokel	Bumbuna	4 000	0.05	1970–1978
Guinea	9	Pampana	Matatota	2 400	0.03	1972–1977
Guinea	10	Sewa	Jaiama	6 900	0.09	1972–1977
Guinea	11	Mano	Mano Mines	5 500	0.07	1951–1979
Guinea	12	St Paul	Mount Coffe	21 400	0.28	1958–1978
Guinea	13	St John	St John Falls	11 400	0.15	1958–1978
Guinea	14	Cestos	Sawolo	4 600	0.06	1960–1979
Guinea		Ungauged catchments		120 000	1.60	
Nordgolf	15	Sassandra	Gaoulou	70 600	0.92	1953–1986
Nordgolf	16	Bandama	Daboitié	60 000	0.78	1951–1985
Nordgolf	17	Comoe	Mbasso	70 500	0.92	1951–1986
Nordgolf	18	Bia	Ayamé	10 000	0.13	1951–1989
Nordgolf	19	Tano	Alenda	16 000	0.21	1956–1978
Nordgolf	20	Volta	Senchi Halcrow	394 000	5.11	1951–1979
Nordgolf	21	Mono	Tététo	20 500	0.27	1952–1988
Nordgolf	22	Oueme	Pont de Savé	23 600	0.31	1951–1984
Nordgolf		Ungauged catchments		210 000	2.70	
Niger	23	Niger	Onitsha	1 100 000	14.28	1951–1989
Adamaoua	24	Sanaga	Edéa	132 000	1.71	1951–1980
Adamaoua	25	Wouri	Yabassi	8 200	0.11	1951–1984
Adamaoua	26	Mungo	Mundame	2 400	0.03	1952–1984
Adamaoua		Ungauged catchments		215 000	2.8	
Equatorial	27	Nyong	Dehane	26 400	0.34	1951–1984
Equatorial	28	Kienke	Kribi	1 100	0.01	1956–1983
Equatorial	29	Ntem	Nyabessan	26 300	0.34	1951–1984
Equatorial	30	Ogooue	Lambaréné	203 000	2.64	1951–1989
Equatorial	31	Nyanga	Tchibanga	12 400	0.16	1954–1982
Equatorial	32	Kouilou	Sounda	56 600	0.73	1952–1985
Equatorial		Ungauged catchments		150 000	2.00	
Congo	33	Congo	Brazzaville	3 550 000	46.08	1951–1989
Angola		Ungauged catchments		551 000	7.00	

torial region the Buishand test rejects the hypothesis of a rupture year in the series (not shown). The discharge series from Equatorial Africa thus show a far smaller decrease than that observed in West Africa.

4. Minima and maxima

Primary minima are observed for all regions in 1983 or 1984. Almost all rivers experience a minimum between 1982 and 1987, except the Sanaga (Adamaoua), the Nyanga and the Kouilou (Equatorial). 1983 was the year when every value of normalized runoff was negative. It was the driest year in West and Central Africa since the beginning of the century (Sircoulon, 1989). For all regions, freshwater yields to the Atlantic Ocean have been 34 % less than the average from 1951–1989, which represents a decrease of about 900 billion cubic meters. This value corresponds to total annual runoff from all of West Africa from Senegal to the Cameroonian Mountains in a normal year.

The runoffs are so weak for the years 1981–1989 that the minima of the 1970s are not highlighted on the *table*, but each river experiences a minimum of runoff between 1972 and 1973. Secondary minima are displayed between the 1980s, 1958 and 1972. From the Equatorial region to the Nordgolf region, 1958 is a year of marked deficits, and the occurrence of primary minima (Kouilou, Nyanga, Mono, Oueme). In 1958, runoff deficits are observed only to the south of the Sewa River in northern Sierra Leone, at 10° N latitude. Since 1970, the only rivers which have experienced at least four years of greater-than-average runoffs are the Kouilou, the Nyanga, the Ogooue, the Kienke, and the Nyong in the Equatorial region; and also the Benoue, the Oueme, the Mono and the Comoe in the Nordgolf region. During the last decade, the runoffs of the Senegal–Fouta region were more than twice as weak as during the decade 1951–1960. The situation is the same for the Nordgolf region. For the Niger and Guinea regions, this same decrease is only one-third as great. It is also notice-

Table II. Annual volumes of freshwater yield to the Atlantic Ocean, by hydroclimatic regions in millions of cubic meters per year (except for Angola, by decades). The two rightmost columns are annual precipitation in millimetres for Central Africa (Congo + Equatorial region) and West Africa (Senegal-Fouta + Guinea + Nordgolf + Niger + Adamaoua). Primary and secondary maxima (bold italic *M* and small italic *M*). Primary and secondary minima (bold underlined and regular underlined). Framed values are for statistically determined rupture years.

Volumes annuels d'apports en eau douce à l'Atlantique, par régions hydroclimatiques, en millions de mètres cubes par an (excepté pour l'Angola, par décennies). Les deux colonnes de droite donnent les précipitations en millimètres pour l'Afrique centrale (Congo + Équateur) et pour l'Afrique de l'Ouest (Sénégal-Fouta + Guinée + Nordgolf + Niger + Adamaoua). Premier et second maximum (italique gras *M* et italique *M*). Premier et second minimums (gras souligné et souligné). Les années de rupture statistique des séries sont encadrés.

Years	Adamaoua	Congo	Equatorial	Guinea	Nordgolf	Niger	Senegfou	Angola	Total	P _{central}	P _{west}
1951	288	1 290	372	309	210	229	125	87	2 910	1 629	1 565
1952	261	1 309	369	268	203	189	120	87	2 810	1 607	1 556
1953	281	1 180	322	275	195	208	111	87	2 660	1 573	1 494
1954	287	1 202	274	288	164	260	148 ^M	87	2 710	1 606	1 594 ^M
1955	376^M	1 400	330	319^M	253	273^M	147	87	3 190	1 665	1 584
1956	275	1 340	334	264	95	179	130	87	2 700	1 640	1 328
1957	370 ^M	1 340	326	291	203	253	137	87	3 010	1 697	1 599^M
1958	212	<u>1 122</u>	<u>216</u>	256	<u>65</u>	153	154^M	87	2 270	1 409	1 372
1959	255	<u>1 164</u>	309	250	156	168	120	87	2 510	<u>1 607</u>	1 450
1960	335	1 467	359	257	188	225	94	87	3 010	1 669	1 410
1961	229	1 517	375	233	98	165	129	94	2 840	1 726 ^M	1 327
1962	344	1 766^M	387 ^M	314 ^M	187	232	123	94	3 450^M	1 741^M	1 467
1963	342	1 618	365	297	305^M	225	125	94	3 370^M	1 662	1 501
1964	285	1 539	374	276	135	203	147	94	3 050	1 582	1 402
1965	286	1 356	351	255	140	196	136	94	2 810	1 592	1 412
1966	292	1 533	398^M	267	141	217	<u>117</u>	94	3 060	1 618	1 454
1967	286	1 331	316	246	114	187	148	94	2 720	1 637	1 482
1968	303	1 479	315	298	279 ^M	217	71	94	3 060	1 574	1 459
1969	345	1 656 ^M	358	288	158	264 ^M	114	94	3 280	1 704	1 534
1970	283	1 520	384	215	151	205	89	94	2 940	1 542	1 284
1971	234	1 281	287	195	126	181	77	80	2 460	1 561	1 298
1972	<u>194</u>	1 221	263	218	93	158	56	80	2 280	1 490	1 212
1973	203	1 186	297	159	97	127	68	80	2 220	1 518	1 154
1974	275	1 246	306	198	123	185	92	80	2 510	1 556	1 325
1975	250	1 303	313	236	113	186	99	80	2 580	1 566	1 374
1976	252	1 347	334	235	93	159	83	80	2 580	1 535	1 365
1977	203	1 429	333	220	108	153	51	80	2 580	1 539	1 151
1978	262	1 372	273	244	99	187	85	80	2 600	1 513	1 385
1979	277	1 426	305	216	166	188	64	80	2 720	1 561	1 314
1980	260	1 296	314	187	128	177	61	80	2 500	1 565	1 287
1981	237	1 284	292	196	109	173	72	83	2 440	1 517	1 273
1982	228	1 227	301	175	68	147	64	83	2 290	1 616	1 205
1983	<u>173</u>	1 123	<u>214</u>	<u>109</u>	<u>39</u>	<u>109</u>	<u>50</u>	83	1 900	1 498	1 025
1984	208	1 047	343	163	69	<u>110</u>	<u>48</u>	83	2 070	1 581	1 164
1985	234	1 224	347	175	133	145	<u>67</u>	83	2 410	1 631	1 255
1986	213	1 158	297	<u>112</u>	82	131	55	83	2 130	1 552	1 091
1987	215	1 221	324	<u>139</u>	103	129	57	83	2 270	<u>1 485</u>	<u>1 183</u>
1988	245	1 233	358	176	122	166	79	83	2 460	<u>1 667</u>	1 252
1989	274	1 309	335	244	160	205	69	83	2 680	1 647	1 283
Average	266	1 335	325	232	140	186	97	86	2 670	1 592	1 356

able in the Adamaoua region, but much less perceptible in the Congo and Equatorial regions.

No maxima are observed after 1969. The maxima are divided between two decades, 1951–1960 and 1961–1970. For the Senegal Fouta region and for the Niger, the main period for maxima is the decade 1951–1960. By contrast, for the Equatorial and Congo regions and for the Nordgolf region, between the Oueme and the Comoe, the maxima are concentrated in the decade 1961–1970. Only in the Equatorial region do we observe primary maxima during 1981–1989 for the Nyanga, the Kienke, and the Nyong. The Mungo and the Wouri present secondary maxima in 1982. The maximum of runoff is recorded in 1962/1963.

5. Runoff deficit

Figure 2 illustrates the relationship between precipitation and discharge over the years 1951–1989 for West and Central Africa. The runoff deficit is the difference between precipitation and discharge, it is often compared to actual evapotranspiration. Values were similar for West and Central regions at the beginning of the 1950s. Runoff deficit then decreased for both regions, with lower values for West Africa. During the 1981–1989 period, values increased for Central Africa, back up to 1200 mm as at the beginning of the data series, but for West Africa the decrease continued.

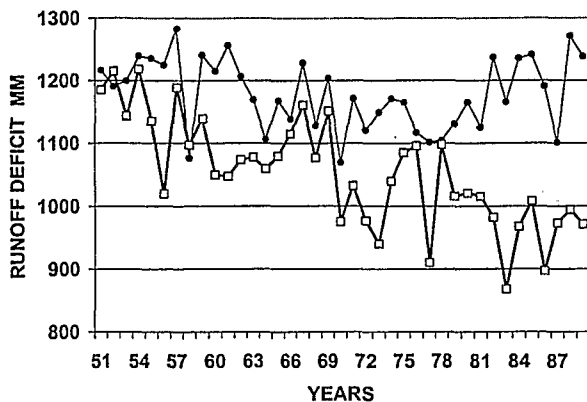


Figure 2. Runoff deficit (precipitation minus discharge) in millimetres per year (1951 to 1989). Black dots: West Africa (Senegal – Fouta + Guinea + Nordgolfe + Niger + Adamaoua), white squares: Central Africa (Congo + Equatorial region).

Déficits d'écoulement (précipitations moins écoulement) en millimètres par jour (1951 à 1989). Points noirs : Afrique de l'Ouest (Sénégal–Fouta + Guinée + Nordgolfe + Niger + Adamaoua) ; Afrique centrale (Congo + Équateur) : carrés blancs.

6. Conclusion

Each year approximately 2 700 billion cubic meters of freshwater enter the Atlantic Ocean between Senegal and

Angola. About half of that amount comes from the Congo River. The main rupture year is 1970 for runoff series and 1969 for rainfall series. The decrease in freshwater yields during the last decade is considerable, with a 17.6 % average annual decrease between 1971 and 1989 as compared to 1951–1970. This decrease is also not equal throughout Central and West Africa: small in the Adamaoua region, and very small in the Equatorial region and in Angola. In West Africa, the decrease in freshwater yields becomes greater as one advances from Cameroon to the northwest (Guinea, Mali, Senegal, Mauritania). During the decade 1981–1989, the yields from the Senegal–Fouta region fell by more than half in comparison to their average value during the 1951–1960 decade. As a result, runoff changed, with a fall in groundwater reserves, and a decrease in discharge during both the dry and the rainy seasons. This phenomenon is the intensification of depletion, as described by Olivry et al. (1993), Bricquet et al. (1997) and Mahé et al. (1998). It is not only the Sahelian countries but the whole of West and Central Africa which have suffered runoff depletion since the 1970s or the 1980s. Even if it is less noticeable, the climate seems to have changed already in Central Africa; as seen for several equatorial rivers, the spring peak flood has decreased considerably since 1930 or 1950 (Mahé et al., 1990, Bricquet et al., 1997).

Version abrégée

Situation et origine des données

L'étude concerne tous les fleuves tributaires de l'Atlantique entre le fleuve Sénégal et le sud de l'Angola, drainant une surface de 7,6 millions de kilomètres carrés (figure 1), sur la période 1951–1989, et se base sur les données de 33 fleuves qui occupent 81 % de la surface totale, dont 46 % pour le seul bassin du Congo (tableau I). Les données observées couvrent l'essentiel de la période (séries complètes pour 68 % de la surface des fleuves) (tableau I). Pour l'Angola nous n'avons trouvé que des débits moyens décennaux, présentés dans une compilation (Angola, 1974).

Les bassins non jaugés

Les bassins versants non jaugés, estuaires des grands fleuves et bandes côtières, occupent 19 % de la surface totale. Pour tenir compte des spécificités des écoulements côtiers pour les bassins non jaugés, nous avons utilisé une méthode inspirée d'Olivry (1986), qui relie les pluies et les débits spécifiques pour des bassins de pluie supérieure ou égale à 1 500 mm, ce qui est le cas pour la majorité des bassins versants côtiers (L'Hôte et Mahé, 1996). Il montre des coefficients d'écoulement qui peuvent atteindre 70 % pour des pluies de 3,5 m par an. À partir de cette relation, on peut déduire les débits spécifiques, puis les débits, connaissant les surfaces des bassins non jaugés et leurs pluies annuelles.

Ces dernières sont calculées par interpolation sur un fichier de données d'environ 900 stations pour la période 1951–1989, couvrant tous les bassins étudiés (Mahé et al., 1994 ; Wotling et al., 1995).

Analyse des résultats

Nous avons groupé les bassins en 8 grandes régions hydro-climatiques (figure 1, tableau I), dont deux sont les bassins des fleuves Niger et Congo. Nous avons nommé un groupe Afrique de l'Ouest (Sénégal–Fouta, Guinée, Nordgolfe, Niger et Adamaoua) et un autre Afrique centrale (Équateur et Congo). Le tableau II présente les apports annuels à l'océan et les précipitations sur l'Afrique de l'Ouest et centrale. Les premiers et seconds maximums et minimums font apparaître les événements climatiques majeurs. À l'ouest de l'embouchure du Niger, on observe des valeurs plus élevées avant 1970 qu'après, ce qui est moins visible au sud de la Sanaga. Les tests statistiques de détection de rupture dans des séries chronologiques (Pettitt, Lee and Heghinian, Hubert) (Hubert et al., 1998 ; Khronostat, 1998), indiquent une rupture en 1970 pour les écoulements (tableau II), en 1969 pour les pluies.

Minimums et maximums

Les premiers minimums sont observés en 1983 et 1984, avec au moins un minimum pour tous les fleuves entre 1982 et 1987 (sauf pour trois d'entre eux). L'année 1983 est la plus sèche du

siècle (Sircoulon, 1989). La diminution totale d'écoulement est de 34 % par rapport à la moyenne 1951-1989. Les débits des années 1980 sont si faibles que les minimums secondaires s'y inscrivent également, et que les minimums des années 1972 et 1973 n'apparaissent pas dans le tableau, pour ce qui concerne les fleuves d'Afrique de l'Ouest. Pour les fleuves d'Afrique centrale, les minimums secondaires sont observés en 1958. Depuis 1970, les débits des fleuves de la région Équateur ont beaucoup moins baissé que ceux des autres régions. À l'opposé, les débits des fleuves de la région Sénégal-Fouta sont plus de deux fois plus faibles durant les années 1980 que pendant la période 1951-1960. Le déficit est presque aussi grand pour la région Nordgolf, et il est d'un tiers pour le Niger et la région Guinée.

Les maximums se situent principalement entre 1951 et 1960 en Afrique de l'Ouest, et entre 1961 et 1970 en Afrique centrale. Aucun maximum régional n'est observé après 1969, mais les fleuves Nyanga, Kienke et Nyong (région Équateur) connaissent leurs premiers maximums durant les années 1980. Mungo et Wouri présentent des maxima secondaires en 1982 (région Adamaoua).

Le déficit d'écoulement

Souvent comparé à l'évaporation réelle, c'est la différence entre les précipitations et les débits. Les valeurs (figure 2) sont assez semblables entre l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique centrale

Acknowledgements. We are very grateful to the National Hydrological Services of West and Central African countries for assistance with the creation of our database.

7. References

Angola 1974. *Collectanea de estudos hidrologicos*, Direcção-Geral de obras publicas e comunicações, Grupo de trabalho para o decenio hidrologico internacional, Lisboa, 400 p.

Bricquet J.-P., Bamba F., Mahé G., Toure M. and Olivry J.-C. 1997. Évolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique, *Revue des Sciences de l'eau*, 3, 321-337

Hubert P. et Carbonnel J.-P. 1993. Segmentation des séries annuelles de débits de grands fleuves africains, *Bulletin de liaison du CIEH*, 92 (avril), 3-10

Hubert P., Servat E., Patrel J.-E., Kouame B., Bendjoudi H., Carbonnel J.-P. et Lubes-Niel H. 1998. La procédure de segmentation, dix ans après, in : Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. and Hulme M. (Eds.), *Water Ressources Variability in Africa during the 20th Century*, Proceedings de la conférence Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, Pub. AISH No. 252, 289-295

Kronostat 1.0 1998. *Logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques*, ORSTOM-Projet Friend AOC/Équipe Hydrologie, UMRGEB, Université Montpellier-II, École des Mines de Paris, Éditions ORSTOM

L'Hôte Y. and Mahé G. 1996. *Afrique de l'Ouest et centrale, précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). Échelle 1/6 000 000*, Collection des cartes ORSTOM, Éditions ORSTOM

Mahé 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, Université Paris-Sud-Orsay/ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Éditions ORSTOM, 438 p.

durant les années 1950. La diminution est continue depuis pour l'Afrique de l'Ouest, alors que, pour l'Afrique centrale, les valeurs augmentent à nouveau à partir de 1982.

Conclusion

Environ 2 700 milliards de mètres cubes d'eau douce se déversent chaque année dans l'océan Atlantique depuis les côtes africaines intertropicales ; près de la moitié provient du fleuve Congo. La diminution des apports en eau douce à l'océan durant la période « sèche » 1971-1989 est de 17,6 % par rapport à la moyenne 1951-1970. La diminution des écoulements est faible dans la région Adamaoua et très faible dans les régions Équateur et Angola. Elle croît en Afrique de l'Ouest, depuis le Cameroun jusqu'au Sénégal. Une conséquence de cette diminution des pluies et écoulements en Afrique de l'Ouest a été la modification des régimes hydrologiques, principalement par une réduction des apports en eaux souterraines à l'hydrogramme annuel (Olivry et al., 1993 ; Bricquet et al., 1997 ; Mahé et al., 1998). La diminution des écoulements est très forte dans les régions Sénégal-Fouta et Niger, mais est également très sensible dans toute l'Afrique de l'Ouest. Elle est moins remarquable dans les régions équatoriales humides, mais on a déjà noté que plusieurs rivières d'Afrique centrale avaient vu se modifier leurs régimes hydrologiques, depuis 1930 ou 1950, par une diminution des débits de crue de printemps (Mahé et al., 1990 ; Bricquet et al., 1997).

Mahé G., Lérique J. and Olivry J.-C. 1990. L'Ogooué au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évidence de variations climatiques à l'équateur, in: *Hydrologie Continentale*, Éditions ORSTOM, Paris, vol. 5, No. 2, 105-124

Mahé G., Delclaux F. and Crespy A. 1994. Élaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin-versant de l'Ogooué au Gabon). *Hydrologie continentale*, Éditions ORSTOM, Paris, vol. 9, No. 2, 169-180

Mahé G., Dessouassi R., Cissoko B. and Olivry J.-C. 1998. Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna, in: Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. and Hulme M. (Eds.): *Water Ressources Variability in Africa during the 20th Century*, Proceedings de la conférence Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, Pub. AISH No. 252, 289-295

Olivry J.-C. 1986. Fleuves et rivières du Cameroun, *Thèse d'Etat*, MESRES-ORSTOM, Collection « Monographies hydrologiques ORSTOM », No. 9, Paris, 733 p., 360 tableaux, 2 cartes

Olivry J.-C., Bricquet J.-P. and Mahé G. 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ?, in : Gladwell J.S. (Ed.), *Hydrology of warm humid regions*, 4^e Assemblée AISH, Yokohama, AISH pub. n° 216, 67-78

Sircoulon J. 1989. Bilan hydropluviométrique de la sécheresse 1968-1984 au Sahel et comparaison avec des sécheresses des années 1910 à 1916 et 1940 à 1949, in: *Les hommes face aux sécheresses : Nordeste brésilien, Sahel africain*, 107-114

Wotling G., Mahé G., L'Hôte Y. and Le Barbe L. 1995. Analyzing the space-time variability of annual rainfall linked to the African monsoon using regional vectors, *Veille Climatique Satellitaire*, Éditions ORSTOM-Météo-France, 52, 58-73