

Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux: extrêmes et paradoxes

GIL MAHE, JEAN CLAUDE OLIVRY & ERIC SERVAT

*IRD/UMR Hydrosociences Montpellier, Case MSE, Université Montpellier 2,
F-34095 Montpellier, France*

gil.mahe@msem.univ-montp2.fr

Résumé Les pluies ont diminué en Afrique de l'Ouest depuis 35 ans, entraînant une diminution des écoulements dépassant parfois plus de 60%. Cette baisse amplifiée des écoulements s'explique par une diminution du débit de base, provoquée par le cumul des déficits pluviométriques annuels. Toute l'Afrique sub-saharienne est concernée, sauf au nord des isohyètes 700–800 mm annuels, où les écoulements des rivières sahéliennes augmentent depuis 1970, comme au Burkina Faso et au Niger (+35% à +108%). Nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'un phénomène continental, d'abord influencé par le changement climatique, puis accéléré par la dégradation d'origine humaine des états de surface. Les conséquences sont extrêmes: étiages très rudes et abaissement du niveau des nappes dans les régions humides; et paradoxales: augmentation des coefficients d'écoulement au Sahel, provoquant des crues plus fortes et causant des dommages à des infrastructures sous-dimensionnées. Il est urgent de revoir les normes hydrologiques au Sahel.

Mots clés Afrique de l'Ouest; changement climatique; coefficient d'écoulement; débit; pluie; Sahel

Sensitivity of West-African rivers to climatic and environmental changes: extremes and paradoxes

Abstract Rainfall decreased for 35 years in West Africa, leading to a reduction of runoff of sometimes >60%. This amplified reduction of runoffs is explained by a reduction of the baseflow, consequence of the cumulative deficit of annual rainfall. All the Sub-Saharan Africa is concerned, except north of the 700–800 mm annual precipitation line, where runoff increased since 1970 for the Sahelian rivers, as in Burkina-Faso and Niger (+35 to +108%). We assume that it is a continental scale phenomenon, primarily influenced by climate change, then accelerated by the anthropogenically driven land cover degradation. The consequences are extreme: very low flows and reduction of the groundwater table level in the humid regions; and paradoxal: increased runoff coefficients in Sahel, causing higher peak flows and damaging under-dimensionned equipment. The hydrological normal in Sahel needs to be urgently revised.

Key words West Africa; climate change; runoff coefficient; runoff; rainfall; Sahel

INTRODUCTION

L'Afrique de l'Ouest et Centrale connaît depuis 35 ans de profonds changements climatiques caractérisés principalement par une diminution généralisée des pluies de 5–20% suivant les régions. Cette diminution entraîne dans la majorité des cas une

diminution des écoulements. On propose dans ce papier une synthèse de l'évolution des relations pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale, à la faveur de résultats récents montrant une augmentation des écoulements en région sahélienne, en dépit de la diminution des pluies.

CHOIX DES BASSINS ETUDIÉS

Pour cette étude nous nous sommes appuyés sur les données de 31 bassins versants fournis par les Services Nationaux des pays concernés (Fig. 1, Tableau 1), documentés sur un site Web développé au laboratoire Hydrosociences de Montpellier (SIEREM, 2004). Nous avons choisi pour la majorité des bassins versants étudiés une station proche de l'exutoire, afin de couvrir le plus de territoire possible. Pour certains grands fleuves (Niger, Sanaga) nous avons choisi plusieurs sous-bassins, à la fois pour améliorer la couverture spatiale du sous-continent par les bassins étudiés et pour disposer de bassins avec des séries de données récentes. Dans une étude antérieure Mahé & Olivry (1999) ont étudié l'évolution des écoulements en distinguant une Afrique "sèche" d'une Afrique "humide". Mahé *et al.* (2001) ont étudié l'évolution de la pluie dans les mêmes régions. Paturel *et al.* (1997) et Servat *et al.* (1997) ont étudié également de façon détaillée les relations pluie-débits dans cette portion du continent africain. Une étude récente (Mahé *et al.*, 2005) a montré également la singularité de l'évolution récente des régimes hydrologiques des cours d'eau sahéliens. A la suite de

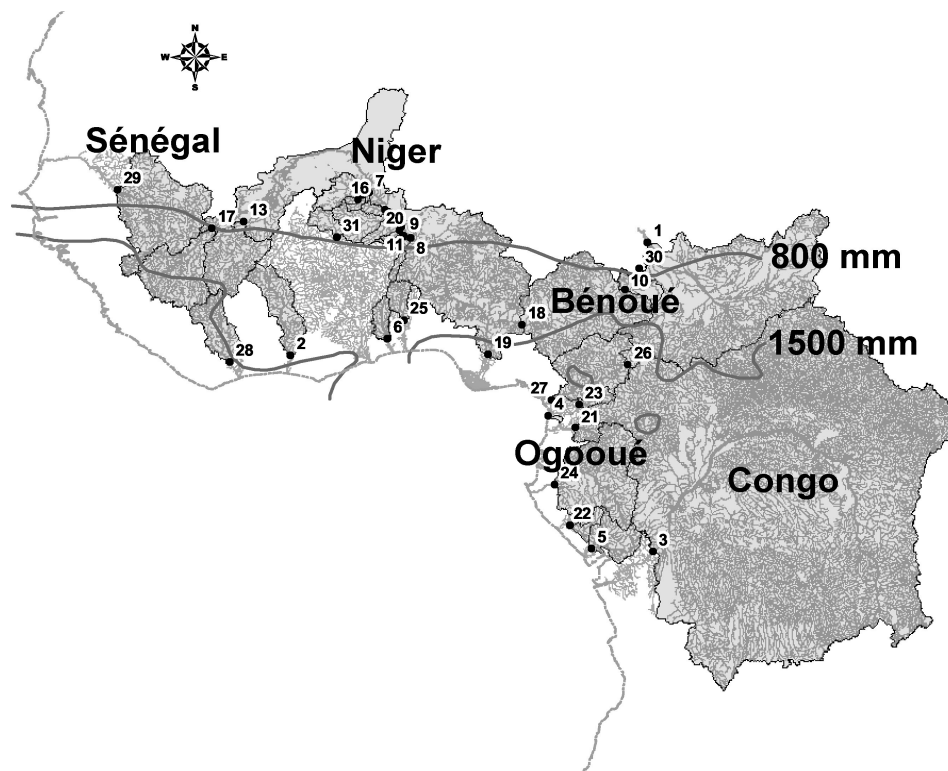


Fig. 1 Situation des bassins, les numéros sont renseignés dans le Tableau 1. En gras les isohyètes 800 et 1500 mm annuels (moyenne 1951–1989).

Tableau 1 Liste des rivières et des bassins utilisés dans cette étude, et groupe climatique.

Numéro	Bassin	Rivière	Station	Superficie (km ²)	Année début	Année fin	Groupe
1	Chari	Chari	Ndjamena	600083	1934	1998	Soudano-guinéen
2	Comoé	Comoé	Mbasso	75517	1951	1986	Soudano-guinéen
3	Congo	Congo	Brazzaville	2951692	1902	1998	Congo
4	Kienké	Kienké	Kribi	1533	1955	1992	Equatorial
5	Kouilou	Kouilou	Sounda	55078	1951	1985	Equatorial
6	Mono	Mono	Tététou	20492	1951	1985	Soudano-guinéen
7	Niger	Gorouol	Alcongui	42444	1961	1991	Sahélien
8	Niger	Mékrou	Barou	10666	1961	1999	Soudano-guinéen
9	Niger	Diamangou	Tamou	3839	1963	1990	Soudano-guinéen
10	Niger (Bénoué)	Mayo Kébi	Cossi	25093	1955	2000	Soudano-guinéen
11	Niger	Tapoa	Campement W	4997	1963	1995	Soudano-guinéen
12	Niger	Goroubi	Diongoré	15739	1964	1992	Sahélien
13	Niger	Bani	Douna	101226	1922	2000	Soudano-guinéen
14	Niger	Dargol	Kakassi	7460	1957	2000	Sahélien
15	Niger	Gorouol	Koriziéna	2886	1970	1998	Sahélien
16	Niger	Gorouol	Dolbel	7515	1961	1996	Sahélien
17	Niger	Niger	Koulikoro	120332	1907	2000	Soudano-guinéen
18	Niger	Bénoué	Makurdi	303637	1955	1995	Soudano-guinéen
19	Niger	Niger	Onitsha	1388334	1950	1987	Soudano-guinéen
20	Niger	Sirba	Garbé Kourou	38868	1956	1990	Sahélien
21	Ntem	Ntem	Ngoazik	18100	1953	1991	Equatorial
22	Nyanga	Nyanga	Tchibanga	5580	1951	1982	Equatorial
23	Nyong	Nyong	Mbalmayo	13522	1951	2000	Equatorial
24	Ogooué	Ogooué	Lambaréné	205418	1930	1989	Equatorial
25	Ouémé	Ouémé	Pont de Savé	23476	1951	1984	Soudano-guinéen
26	Sanaga	Lom	Bétaré Oya	11100	1951	1993	Soudano-guinéen
27	Sanaga	Sanaga	Edéa	133276	1944	1980	Soudano-guinéen
28	Sassandra	Sassandra	Soubré	62177	1951	1986	Soudano-guinéen
29	Sénégal	Sénégal	Bakel	220800	1904	2000	Soudano-guinéen
30	Lac Tchad	Mayo Tsanaga	Bogo	1535	1966	1998	Sahélien
31	Volta	Nakambe	Wayen	20241	1955	1998	Sahélien

ces études, nous choisissons de diviser le sous-continent en trois grandes régions hydro-climatiques (Fig. 1): la région "sahélienne", au nord de l'isohyète annuelle

800 mm; la région “soudano-guinéenne”, entre 1500 et 800 mm annuels, sachant que vers les Monts de Guinée les pluies dépassent 2000 mm sur les hauts bassins, toujours en régime tropical; et la région “équatoriale” au sud de 1500 mm annuels. Il s’agit d’une division simplifiée pour les besoins de l’étude. Le nombre de bassins étudiés dans les régions sahéliennes est très limité. Nous avons ainsi conservé la majorité des données disponibles pour cette région, raison pour laquelle on y trouve les séries les plus courtes, et parfois sur des bassins emboîtés. Mais on peut noter que malgré tout le nombre de bassins est suffisant pour couvrir une zone importante allant du Burkina Faso au Cameroun.

D’autres bassins et sous-bassins pourraient être utilisés, mais si nous ne les avons pas retenus c’est soit parce qu’ils n’apportent à notre avis rien de plus dans la couverture géographique et dans la représentativité spatiale de la variation d’écoulement, soit parce qu’ils auraient nécessité beaucoup de travail de critique et de reconstitution (on pense notamment aux rares données de la façade guinéenne). Enfin, le fleuve Congo, constitue une région à lui tout seul.

QUALITE DES DONNEES

Les données de pluie utilisées proviennent d’études antérieures, à partir de fichiers établis soit avec les chercheurs locaux, soit à partir de la base de données de la Climatic Research Unit (CRU) de l’Université d’East Anglia à Norwich (New *et al.*, 2000). Les données de débit sont traitées directement par les services nationaux à partir de la fin des années 80, et l’étaient par l’Orstom (IRD) auparavant. Certaines données manquantes pour des mois de saison sèche ont été reconstituées afin de tirer le meilleur parti des séries de données observées. Les années pour lesquelles il manquait au moins une valeur mensuelle en période de crue n’ont pas été utilisées. Les débits annuels sont calculés par moyenne de tous les débits journaliers. Sur la Fig. 2 les séries sont présentées en valeurs centrées et réduites et sont lissées sur six ans, pour faciliter la comparaison.

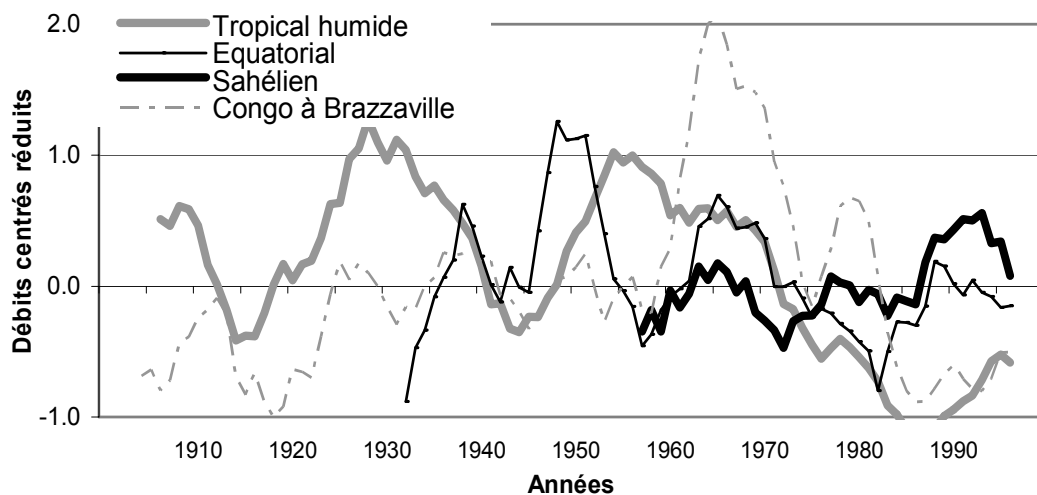


Fig. 2 Variations des écoulements pour les quatre grandes zones hydro-climatiques, de 1901 à 2000.

EVOLUTION DES DEBITS DE 1900 A 2000

Les débits en Afrique soudano-guinéenne présentent une forte variabilité interannuelle, et sont inférieurs à la moyenne du siècle depuis 1970. En Afrique Centrale la variabilité est d'amplitude similaire, mais la diminution des années 80 est moins prolongée et suivie d'un retour à une période de débits proches de la normale. On n'observe peu ou pas de rivières qui présentent des "ruptures" dans les séries de débits depuis 1970 en Afrique Centrale (Liéno *et al.*, 2005). Dans les régions sahéliennes on observe paradoxalement pour certains cours d'eau sahéliens une augmentation des écoulements, sensible dès les années 1980 et présentant des maximums durant la décennie 1990, alors que les pluies y sont très déficitaires depuis 1970 (L'Hôte *et al.*, 2002, 2003; Daï *et al.*, 2004).

On peut remarquer que cette évolution des écoulements se superpose assez bien avec les prévisions d'évolution des ressources en eau produites à partir du modèle de climat du Hadley Center (HadCM3) (IPCC, 2003) pour le siècle à venir.

L'évolution des débits du Congo montre à la fois une grande variabilité et une absence de rupture marquée à la baisse, alors que les débits sont exceptionnellement élevés au début des années 1960. Les bassins affluents au Congo proviennent de régions climatiques très diverses, sous influence atlantique mais aussi indienne, dont la conjonction des maximums saisonniers ne s'effectue pas toujours à la même date, ce qui est une source de variabilité importante. L'étude des affluents de rive droite du fleuve Congo, sous régime préférentiellement atlantique a été réalisée et montre une rupture dans les séries des sous-bassins les plus au nord (Oubangui, Sangha), alors que les sous-bassins purement équatoriaux varient peu dans le temps (Laraque *et al.*, 2001).

VARIABILITE DES PLUIES

Les pluies varient de manière très importante en Afrique de l'Ouest soudano-guinéenne et sahélienne, avec une sécheresse prolongée depuis 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale (non équatoriale) en général. En Afrique équatoriale, le déficit de pluie est plus ponctuel, même s'il est marqué par endroit, surtout durant les années 80.

Une étude des pluies depuis 1900 pour tous les bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale est en cours, elle devra permettre d'établir les bilans hydrologiques depuis un siècle pour tous les bassins. Nous disposons cependant d'études antérieures sur certains bassins et sur le Sahel depuis le début du siècle, et sur toute la région depuis 1950 (Bricquet *et al.*, 1997; Mahé *et al.*, 2001) qui nous renseignent sur l'évolution des pluies, en confirment la variabilité des débits (Fig. 3). On notera que la diminution des pluies est du même ordre de grandeur au Sahel qu'en région soudano-guinéenne.

RELATIONS PLUIE-DEBIT: EXTREMES ET PARADOXES

Afrique équatoriale

En Afrique équatoriale les déficits d'écoulement et de pluie sont proportionnels. Le déficit de pluie n'est pas assez prolongé pour que cela ait des répercussions durables

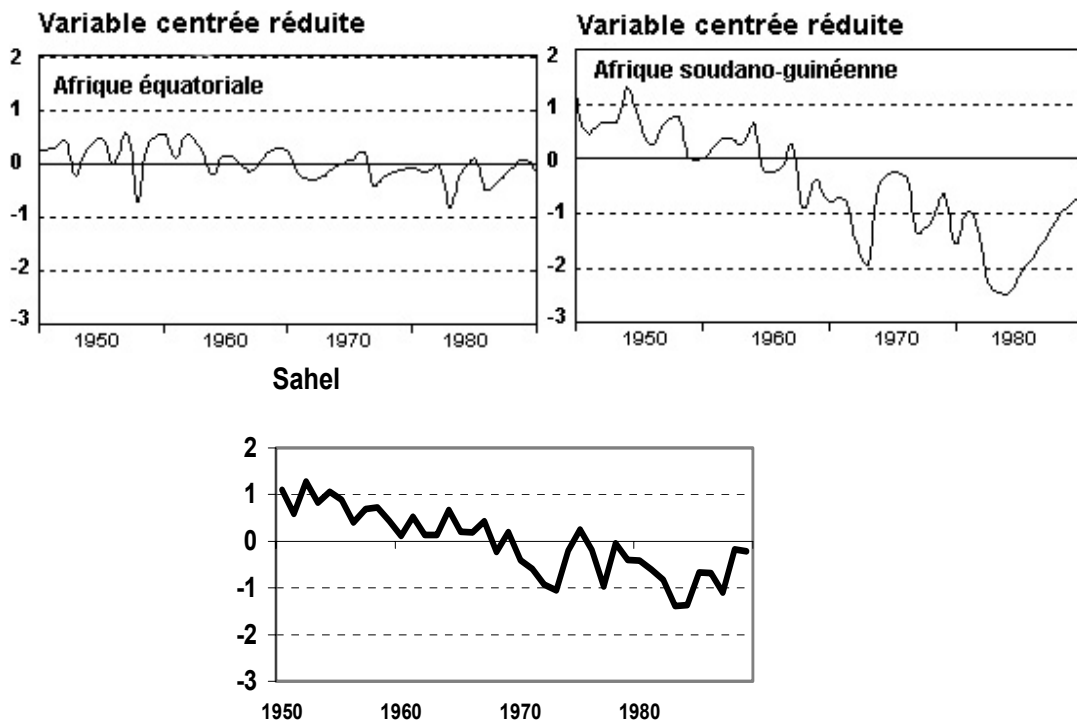


Fig. 3 Variation des pluies en Afrique équatoriale et en Afrique soudano-guinéenne (d'après Bricquet *et al.*, 1997) et au Sahel (L'Hôte *et al.*, 2002).

sur les régimes hydrologiques et les ressources en eau à long terme pour une majorité de bassins. Si l'on s'intéresse plus finement à la répartition des pluies au cours des saisons des pluies boréales et australes, on observe dans certains cas des modifications qui peuvent être à l'origine de changements de régimes hydrologiques importants à l'équateur (Mahé *et al.*, 1990). Ainsi, au long des années 1960 de chroniques de débit de l'Ogooué au Gabon, fleuve équatorial, on observe un inversement de l'importance des crues saisonnières, la crue australe étant de plus en plus faible, et la boréale ne diminuant pas.

Afrique soudano-guinéenne (tropicale humide)

Dans ce groupe on trouve des rivières du nord du golfe de Guinée, où la pluviométrie moyenne peut être supérieure à 1500 mm annuels, du fait de zones de pluviométrie atteignant 2000 mm sur les hauts bassins, et où la diminution des débits est importante, mais parfois encore proportionnelle à la diminution des pluies, et présente une forte variabilité interannuelle durant les années 1950 et 1960 en particulier. On y trouve aussi les rivières situées entre les isohyètes moyennes annuelles 800 et 1500 mm, qui présentent pour une très grande majorité des déficits d'écoulement très supérieurs aux déficits de pluie. Après 1970 le déficit de pluie est de l'ordre de 15% en moyenne, un peu inférieur à celui observé au Sahel (20%). Les écoulements peuvent diminuer eux jusqu'à 60% (cas du Bani à Douana, tableau 2). Olivry *et al.* (1993) et Mahé *et al.* (2000), ont montré que dans le cas de ces rivières, à la diminution des écoulements

Tableau 2 Coefficients d'écoulement de rivières sahéniennes et soudano-guinéennes, avant et après 1972, ratio, et ratio de pluie sur les bassins avant et après 1972.

Rivière	Station	Groupe	Coeff. d'écoul. av. 1972 (%)	Coeff. d'écoul. ap. 1972 (%)	Ratio ap./av. 1972 (%)	Pluie ap./av. 1972 (%)
Nakambe	Wayen	Sahélien	1.4	2.9	108	-19
Gorouol	Koriziena	Sahélien	4.5	8.8	95	-18
Gorouol	Dolbel	Sahélien	6.6	8.6	32	-20
Gorouol	Alcongui	Sahélien	1.6	2.2	40	-18
Dargol	Tera	Sahélien	6.2	8.4	37	-20
Dargol	Kakassi	Sahélien	3.9	6.2	57	-19
Sirba	Garbe	Sahélien	2	3.2	61	-17
	Kourou					
Goroubi	Diongore	Sahélien	2.3	2.3	0	-13
Diamangou	Tamou	Sahélien	3.5	2.3	-35	-14
Tapoa	Campement W	Soudano-guinéen	0.9	1	10	-14
Mékrou	Barou	Soudano-guinéen	11.5	7.3	-37	-8
Bani	Douna	Soudano-guinéen	15.8	6	-62	-16

directs, en proportion de celle des pluies, s'ajoute une diminution lente et durable des ressources en eaux souterraines, qui se traduit par une augmentation des vitesses de tarissement et une diminution du niveau moyen des nappes ((Mahé *et al.*, 2000, 2002). Dans certains cas extrêmes, comme celui du haut Niger et du Bani, cette perturbation des régimes hydrologiques constitue un problème majeur, qu'il faut prendre en compte dans les politiques de développement (Paturel *et al.*, 2003).

Afrique sahénienne

Le cas des rivières sahéniennes constitue un paradoxe contre intuitif: les écoulements augmentent depuis 1970 alors que les pluies diminuent (Tableau 2), et diminuent même un peu plus que dans les régions plus humides (20–25%). Ceci constitue notamment un écueil important en modélisation hydrologique, qui nous oblige actuellement à nous intéresser à l'évolution de l'occupation des sols et des états de surface, qui sous ce climat déterminent les conditions d'écoulement. Les apports de nappe sont par ailleurs négligeables. Mahé *et al.* (2005), synthétisent les travaux les plus récents sur ce sujet en Afrique sub-saharienne, qui associent tous l'augmentation des écoulements à une diminution de la couverture végétale naturelle, au profit de zones cultivées et dégradées liées en grande partie aux activités humaines, dont l'aptitude au ruissellement est très supérieure. On remarque dans le Tableau 2 que les bassins où la présence humaine est la plus faible (Gorouol à Alcongui, Dargol à Tera (sous-bassin du Dargol, non tracé sur la carte) sont aussi ceux où le coefficient d'écoulement a le moins augmenté, ce qui peut nous conduire à penser que le changement durable du climat au Sahel a un impact important sur les équilibres

biologiques qui semble se traduire par une dégradation naturelle des états de surface, amplifiée par les activités humaines.

CONCLUSION

L'étude des débits et des pluies depuis le début du siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale permet de mettre évidence plusieurs traits majeurs de l'évolution du climat et son impact sur les régimes hydrologiques de grands bassins fluviaux. En Afrique équatoriale, bien qu'il ne semble pas y avoir de changement durable des précipitations, les régimes hydrologiques subissent des variations brutales, mais courtes dans le temps, et peuvent également être plus profondément perturbés au niveau saisonnier. En Afrique soudano-guinéenne le déficit de pluie est important et continu depuis bientôt 35 ans, et les écoulements y sont considérablement diminués, du fait d'un impact à long terme du déficit de pluie qui fait baisser le niveau des ressources en eaux souterraines, dont le déficit d'apport s'ajoute à celui des pluies pour produire des diminutions d'écoulement amplifiées. Au Sahel, la dégradation des états de surface est à l'origine d'une augmentation de l'aptitude à l'écoulement des sols, probablement amplifiée par les activités humaines, qui provoquent une augmentation des écoulements. Cependant, les données sur les bassins sahéliens sont trop peu nombreuses et il est nécessaire de développer des programmes de mesure sur des bassins sahéliens pour vérifier amplement cette hypothèse.

Remerciements Nous remercions vivement toutes les Directions Nationales d'hydrologie et de météorologie des pays africains qui travaillent à la maintenance des réseaux indispensables au suivi de l'environnement, et qui ont accepté de nous fournir des données les plus récentes possibles. Nous remercions également l'UNESCO et le Ministère Français des Affaires Etrangères pour leur soutien au programme FRIEND-AOC.

REFERENCES

- Bricquet J.P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry J.C. (1997). Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau* **3**, 321–337.
- Dai A., Lamb P. J., Trenberth K. E., Hulme M., Jones P. D. & Xie, P. (2004) The recent Sahel drought is real. *International J. Climate* **24**(11), 1323–1331.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2003) Third assessment report. WMO, UNEP.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. & Triboulet, J. P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000; the drought still goes on. *Hydrol. Sci. J.* **47**(4), 563–572.
- L'Hôte, Y., Mahé G. & Somé B. (2003) The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. Reply to discussion. *Hydrol. Sci. J.* **48**(3), 493–496.
- Laraque, A., Mahé, G., Orange, D. & Marieu, B. (2001) Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the twentieth century. *Hydrol. Sci. J.* **45**(1), 104–117.
- Liéno, G., Mahé, G., Servat E., Lubès-Niel, H., Olivry, J. C., Sighomnou, D., Ekodeck, G. E., Paturel, J. E. & Dezetter, A. (2005) Changements des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun: un impact du changement climatique en zone équatoriale? Assemblée Générale AISH, Foz de Iguazu, Brésil, Avril 2005 (à paraître).
- Mahé, G., Lérique, J. & Olivry, J. C. (1990) L'Ogooué au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évidence de variations climatiques à l'équateur. *Hydrologie Continentale* **5**(2), 105–124.

- Mahé, G. & Olivry, J. C. (1999) Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *C. R. Acad. Sci. Ser. Ila* **328**, 621–626.
- Mahé, G., Olivry, J. C., Dessouassi, R., Orange, D., Bamba, F. & Servat, E. (2000) Relations eaux de surface—eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad. Sci. Ser. Ila* **330**, 689–692.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J. C. & Wotling, G. (2001) Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa: 1951–1989. *Hydrol. Sci. J.* **46**(2), 211–226.
- Mahé G., Dray, A., Paturel, J. E., Crès, A., Koné, F., Manga, M., Crès, F. N., Djoukam, J., Maïga, A. H., Ouédraogo, M., Conway, D. & Servat, E. (2002) Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina. In: *FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the Gap Between Research and Practice* (ed. by H. van Lannen & S. Demuth), 69–76. (Proc. Friend Conf., Cape Town, South Africa). IAHS Publ. 274. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Mahé, G., Paturel, J. E., Servat, E., Conway, D. & Dezetter, A. (2005) Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina Faso. *J. Hydrol.* **300**(1–4), 33–43.
- New, M. G., Hulme, M. & Jones, P. D. (2000) Representing 20th century space-time climate variability. II: Development of 1901–1996 monthly terrestrial climate fields. *J. Climate* **13**, 2217–2238.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P. & Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? In: *Hydrology of Warm Humid Regions* (ed. by J. S. Gladwell) (Proc. Symp. Yokohama, Japon, Juillet 1993), 67–78. IAHS Publ. 216. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Paturel, J. E., Servat, E., Kouamé, B., Lubes, H., Ouédraogo, M. & Masson, J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part II: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* **191**, 16–36.
- Paturel, J. E., Ouédraogo, M., Servat, E., Mahé, G., Dezetter, A. & Boyer, J. F. (2003) The concept of hydropluviometric normal in West and central Africa in a context of climatic variability. *Hydrol. Sci. J.* **48**(1), 125–137.
- Servat, E., Paturel, J. E., Lubes, H., Kouame, B., Ouédraogo, M. & Masson, J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.* **191**, 1–15.
- SIEREM (2004) Système d'Information Environnemental pour les Ressources en Eau et leur Modélisation. Hydrosiences, Montpellier, France. <http://www.hydrosiences.org>.