

Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne et conséquences sur les ressources en eau

**ERIC SERVAT, JEAN-EMMANUEL PATUREL,
BROU KOUAMÉ, MICHEL TRAVAGLIO**

ORSTOM, Programme FRIEND AOC, 06 BP 1203, Cidex 1, Abidjan 06, Côte d'Ivoire

**HÉLÈNE LUBÈS, BERTRAND MARIEU,
JEAN-MARIE FRITSCH**

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

JEAN-MARIE MASSON

*Laboratoire Géofluides-Bassins-Eau, URA-CNRS 1767, Université Montpellier II,
Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 5, France*

Résumé Des études menées dans le cadre du programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité Climatique en AfRIque de l'ouest non sahélienne) au sein du projet FRIEND AOC ont montré que les régions non sahéliennes d'Afrique de l'ouest et centrale avaient subi depuis vingt cinq ans environ une importante fluctuation climatique. Celle-ci se traduit, comme dans les régions sahéliennes, par une baisse notable de la pluviométrie annuelle depuis la fin des années 1960 et le début des années 1970. Cette baisse de la pluviométrie a, bien entendu, de sérieuses conséquences sur les régimes d'écoulement des cours d'eau de cette région. Cette étude a permis de caractériser ces modifications et d'apporter une dimension régionale à leur interprétation tout en soulignant la diminution importante des volumes écoulés, et donc des ressources en eau disponibles, ce qui n'est pas sans conséquences tant au niveau économique qu'environnemental.

INTRODUCTION

Une série d'études menées dans le cadre du programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité Climatique en AfRIque de l'ouest non sahélienne) au sein du projet FRIEND AOC a montré que les régions non sahéliennes d'Afrique de l'ouest et centrale avaient subi depuis vingt cinq ans environ une importante fluctuation climatique (Servat *et al.*, 1996; Paturel *et al.*, 1997). Celle-ci se traduit, comme dans les régions sahéliennes situées plus au nord, par une baisse notable de la pluviométrie annuelle. Cette diminution des précipitations correspond à des ruptures dans les séries chronologiques de hauteurs annuelles précipitées. Un ensemble de méthodes statistiques a permis de les localiser à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Depuis cette date, et sur l'ensemble des régions dites "humides" d'Afrique de l'ouest et centrale, on constate des déficits pluviométriques annuels pouvant atteindre 20–25%. Bon nombre de zones de savane sont également passées d'un régime climatique "guinéen" à un régime "soudanien" plus sec.

Cette baisse de la pluviométrie a, bien entendu, de sérieuses conséquences sur les régimes d'écoulement des cours d'eaux de la zone non sahélienne d'Afrique de l'ouest et centrale. Les résultats présentés ici sont les premiers obtenus dans le cadre du volet "Ecoulements" du programme ICCARE. Ils seront complétés à très court terme par un ensemble de résultats concernant le bassin du Niger. Mais il est d'ores et déjà possible de tirer certains enseignements à valeur régionale de ces premières études de la variabilité des régimes hydrologiques.

DONNEES ET METHODES

Données

Sur l'ensemble de la région étudiée, qui couvre seize pays d'Afrique de l'ouest et centrale (Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau, Guinée, Sierra Leone, Liberia, Mali, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin, Nigeria, Cameroun, Tchad et Centrafrique), 88 bassins versants ont été sélectionnés. Aucun d'eux ne concerne le bassin du Niger qui est encore en cours de traitement à l'heure actuelle. Ces bassins versants ont été retenus pour la qualité et la continuité de leurs données dont les plus anciennes remontent généralement au début des années 1950. Les séries chronologiques disponibles ont été traitées sur la base de regroupements effectués non par pays mais par grands bassins hydrographiques. Ils constituent, de fait, trois grands ensembles:

- (a) un premier groupe de bassins versants centré sur le bassin du Sénégal à l'ouest de la zone étudiée,
- (b) un second groupe comprenant les Volta, les bassins versants des fleuves ivoiriens, togolais et béninois donc plus proches des côtes du Golfe de Guinée, et
- (c) un dernier groupe situé en Afrique centrale et comprenant les bassins du Chari-Logone, de l'Oubangui et de plusieurs cours d'eau camerounais.

Différents types de variables ont été calculés à partir des données de débits journaliers. Elles permettent d'étudier de manière assez complète les manifestations de la variabilité hydrologique et concernent les débits moyens annuels ainsi que certaines variables caractéristiques des hautes eaux et des basses eaux.

Méthodes

Les séries chronologiques des différentes variables étudiées ont été analysées à l'aide de deux méthodes statistiques: (a) le test de corrélation sur le rang et (b) le test de Pettitt (Pettitt, 1979).

L'utilisation du test de corrélation sur le rang avait pour objectif de mettre en évidence l'existence d'une tendance et donc d'un caractère non aléatoire au sein des séries chronologiques. Celles-ci ont ensuite été analysées à l'aide du test de Pettitt qui a pour objet de détecter une éventuelle rupture en moyenne dans les séries chronologiques. Ce test est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney (Lubès *et al.*, 1994). L'absence d'une rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle.

Pettitt définit la variable $U_{i,N}$:

$$U_{i,N} = \sum_{j=1}^i \sum_{j=i+1}^N D_{ij}$$

où $D_{ij} = \sin(x_i - x_j)$ avec $\sin(Z) = 1$ si $Z > 0$, 0 si $Z = 0$ et -1 si $Z < 0$.

Il propose de tester l'Hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N définie par le maximum en valeur absolue de $U_{i,N}$ pour t variant de 1 à $N - 1$.

A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par:

$$\text{prob}(K_N > k) \approx 2 \exp\left(\frac{-6k^2}{N^3 + N^2}\right)$$

Pour un risque α de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment τ où est observé K_N .

RESULTATS

Débits moyens annuels

Les séries chronologiques de débits moyens annuels, ou modules annuels, des quatre-vingt-huit bassins versants sélectionnés ont été analysées à l'aide des méthodes présentées ci-dessus.

La Fig. 1 montre, à l'évidence, le caractère non aléatoire de l'immense majorité des séries de modules annuels (72% des bassins), traduisant en cela l'existence d'une tendance. Seuls certains bassins d'Afrique centrale, plus précisément du Cameroun et de l'ensemble Togo et Bénin, présentent un caractère aléatoire. Il convient de noter, cependant, que l'ensemble des résultats enregistrés sur les bassins du Cameroun doivent être examinés avec circonspection compte tenu des nombreux aménagements réalisés sur ces cours d'eau. Il est, en effet, difficile de faire la part exacte de ce qui est lié à la présence de ces aménagements et de ce qui relève de la variabilité naturelle.

L'utilisation du test de Pettitt a permis de montrer que 63 bassins sur les 88 étudiés présentaient une rupture dans les séries chronologiques de modules annuels (cf. Fig. 2). Ce résultat très significatif qui correspond à une diminution des débits moyens annuels souligne l'importance du phénomène dans toute la sous-région. Il est intéressant de noter la très faible dispersion des dates d'occurrence de cette rupture. Sur les 63 bassins concernés, 14% présentent une rupture qui s'est produite entre 1965 et 1968, 71% entre 1969 et 1971, 6% entre 1972 et 1975 et 6% après 1975. Un bassin présente une rupture avant 1965, mais c'est un bassin qui présenterait une augmentation du module annuel, ce qui laisse planer de sérieux doutes quant à la qualité de l'ensemble des données qui lui correspondent. D'un point de vue spatial, on constate que l'essentiel des ruptures enregistrées avant 1969 le sont sur le bassin versant du Sénégal, soit dans les régions les plus occidentales et les plus

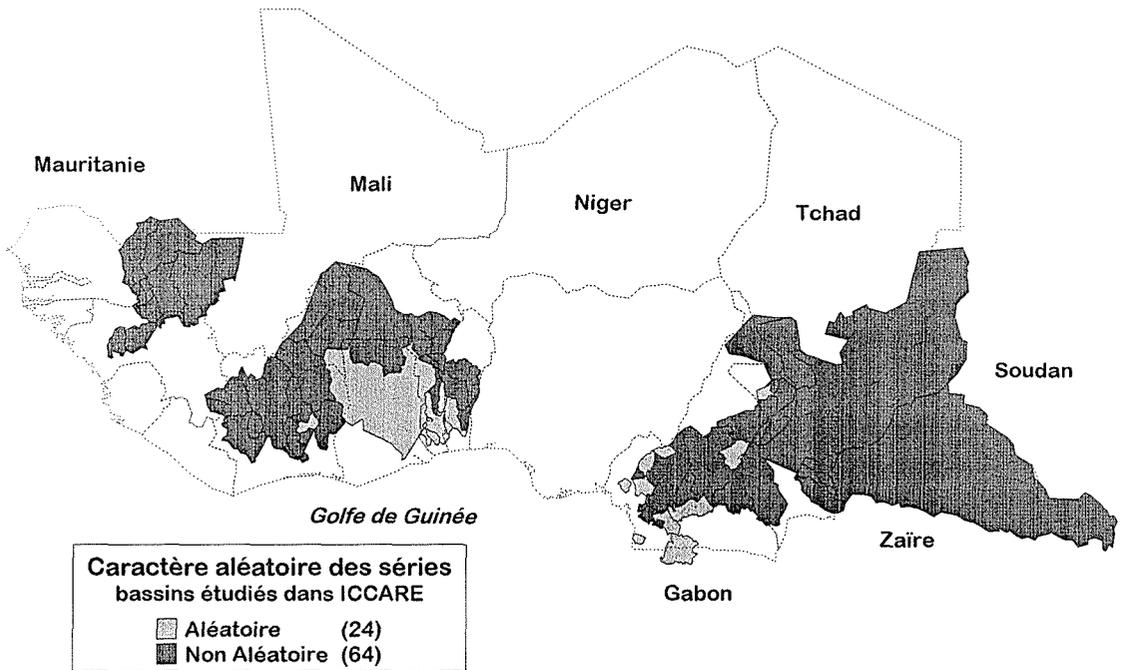


Fig. 1 Représentation cartographique du caractère aléatoire des séries de débits moyens annuels pour les bassins versants retenus dans le programme ICCARE.

septentrionales de la zone étudiée. Ceci est parfaitement conforme aux résultats de l'étude pluviométrique menée précédemment (Servat *et al.*, 1996) et qui avait révélée que les régions touchées le plus tôt par cette variabilité climatique se situait au nord-ouest de la zone étudiée. Les deux autres groupes de bassins versants, "Golfe de Guinée et Volta" d'une part "Afrique Centrale" d'autre part, ont généralement subi cette modification entre 1969 et 1971 à quelques exceptions près qui sont plus tardives.

Il est également intéressant de noter qu'en Afrique de l'ouest ce sont les régions qui présentaient la plus faible variabilité, et donc le déficit pluviométrique le plus réduit, qui ne présentent pas de ruptures dans le domaine des modules annuels. Il s'agit en particulier de certaines régions des bassins du Mono et de l'Oueme au Togo et au Bénin. Pour les mêmes raisons, certains bassins versants du Cameroun semblent ne pas avoir subi de ruptures.

S'il y a concordance avec le phénomène observé au niveau de la pluviométrie, on constate cependant que les ruptures dans les séries de débits moyens annuels sont beaucoup moins dispersées dans le temps qu'elles ne le sont pour les précipitations annuelles. Les différences qui apparaissent au niveau des cours d'eau, intégrateurs de nombreux paramètres influencés par la variabilité climatique (hauteurs précipitées, développement de la végétation, ruissellement, infiltration, recharge des nappes, évaporation, etc.), sont donc plus sensibles et détectables plus rapidement.

La Fig. 3 présente les déficits calculés pour les débits moyens annuels depuis la date de rupture estimée par le test de Pettitt. Il convient de souligner que ces déficits sont généralement extrêmement importants puisque sur les 62 bassins concernés, 52

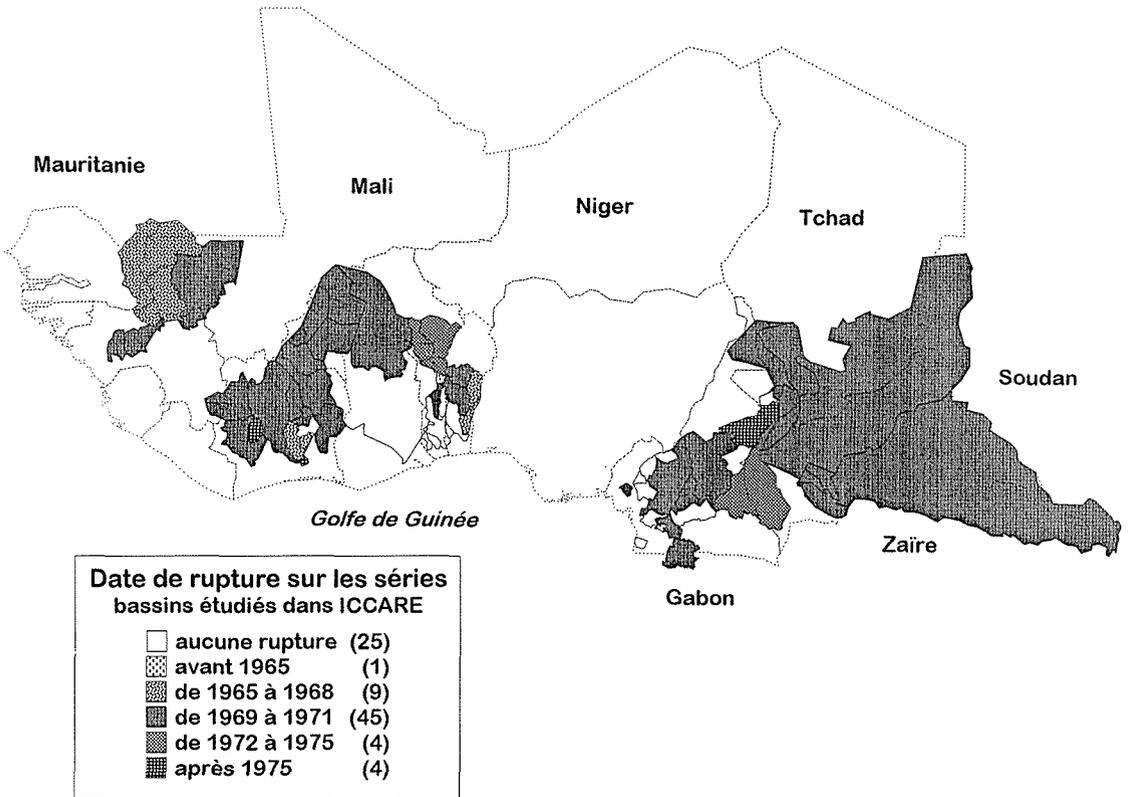


Fig. 2 Représentation cartographique de la répartition des dates de ruptures dans les séries chronologiques de débits moyens annuels.

(soit 84%) présentent un déficit supérieur ou égal à 30%, et 25 (soit 40%) un déficit supérieur ou égal à 50%. Ces chiffres montrent avec force combien les effets de la variabilité climatique mesurée sur la pluviométrie sont amplifiés au niveau des cours d'eau dont on a rappelé auparavant le rôle intégrateur. On imagine d'ores et déjà les conséquences que peuvent avoir de tels déficits sur l'exploitation des ressources en eau dans la sous-région.

Du point de vue spatial, on notera que les déficits les plus importants sont enregistrés sur le bassin du Sénégal, sur les bassins des fleuves ivoiriens et sur le bassin du Chari-Logone en Afrique centrale. L'examen de la Fig. 3 montre que, généralement, les cours d'eau prenant leur source ou dont l'alimentation se fait principalement à partir des zones de savane sont les plus touchés par ce déficit à l'inverse de ceux qui relèvent presque exclusivement des zones de forêt. On rangera dans cette dernière catégorie le bassin de l'Oubangui et la quasi totalité des bassins camerounais.

Le Tableau 1 présente quelques uns des résultats les plus significatifs en matière de débits moyens annuels. Il permet encore une fois de souligner l'importance des déficits d'écoulements enregistrés dans ces cours d'eau des régions de l'Afrique dite "humide". Ces résultats renforcent les conclusions tirées de l'étude sur la pluviométrie et confirment la réalité de la variabilité climatique subie par l'Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne, en phase avec ce qui a été décrit auparavant au Sahel.

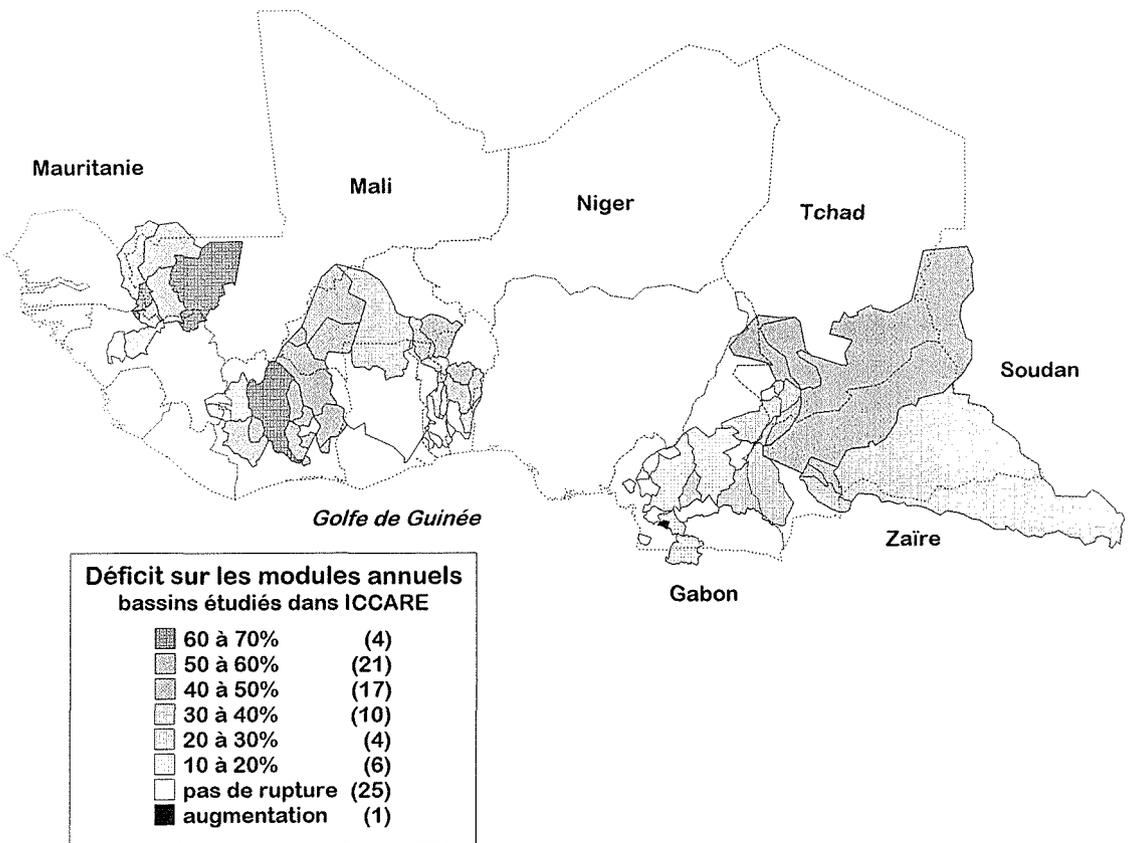


Fig. 3 Représentation cartographique des valeurs de déficits calculées de part et d'autre des dates de rupture dans les séries chronologiques de débits moyens annuels.

Autres variables caractéristiques des débits

Différents types de variables ont été définis qui concernent les débits de hautes eaux, et les débits de basses eaux:

- un ensemble de variables VCX_n (avec $n = 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90$), débits moyens maximum de n jours consécutifs,
- un ensemble de variables VCN_n (avec $n = 1, 5, 10, 20, 30, 60$ voire 90 dans certains cas) débits moyens minimum de n jours consécutifs.

Le Tableau 2 regroupe certains des résultats obtenus pour les VCX_n . D'une manière plus générale, pour l'ensemble des bassins étudiés, on notera que les différentes séries de VCX_n présentent un caractère non aléatoire. Ce résultat suit parfaitement ceux obtenus pour les débits moyens annuels. Les dates de rupture obtenues à l'aide du test de Pettitt sont, elles aussi, très comparables à ce qui avait été obtenu pour les modules annuels et confirment que c'est durant la période 1969–1971 que cette variabilité a généralement été ressentie. L'importante corrélation qui existe d'ordinaire entre débits moyens annuels et débits maximums permet d'expliquer cette forte similarité.

L'exploitation des résultats obtenus pour les VCNn est plus complexe dans la mesure où, depuis la fin des années 1960 et le début des années 1970, bon nombre de cours d'eau se trouvent à sec sur des périodes relativement longues, ce qui n'était pas le cas auparavant. De même dans certaines régions (Cameroun en particulier), certains ouvrages ont été construits dans le but de soutenir les étiages, ce qui biaise les conclusions. En première analyse, on note, cependant, et dans la droite ligne de ce qui précède, que les débits de basses eaux ont également subi d'importantes modifications à la baisse décelables dans de nombreux cas durant la période 1969-1971. Une analyse plus approfondie de ces séries chronologiques de basses eaux est en cours. Elle sera complétée par une étude des tarissements et permettra, à court terme, de préciser au mieux l'ampleur de cette variabilité dans le domaine des basses eaux.

Tableau 1 Valeurs de déficits des débits moyens annuels calculés à certaines stations hydrométriques de part et d'autre de la date de rupture.

Nom station	Bassin	Rivière	A/NA	Rupture	Déficit
Mbasso	Comoe	Comoe	NA	1971	-50%
Aniassue Pont	Comoe	Comoe	NA	1971	-56%
Ndjamena	Lac Tchad	Chari	NA	1971	-51%
Boussou	Lac Tchad	Chari	NA	1971	-51%
Tchoa	Lac Tchad	Tandjile	NA	1971	-37%
Lai	Lac Tchad	Logone	NA	1970	-39%
Eseka	Nyong	Nyong	A	1971	-18%
M'Balmayo	Nyong	Nyong	A	Rien	Rien
Sagon	Oueme	Oueme	NA	1967	-42%
Logozohe-Pont	Oueme	Klou	A	Rien	Rien
Bakel	Sénégal	Sénégal	NA	1967	-50%
Fadougou	Sénégal	Falémé	NA	1967	-58%
Oualia	Sénégal	Bakoye	NA	1971	-66%
Bangui	Zaïre	Oubangui	NA	1970	-30%
Salo	Zaïre	Sangha	NA	1975	-22%
Doume	Zaïre	Doume	NA	Rien	Rien

Tableau 2 Présence et dates des ruptures détectées dans certaines des séries chronologiques de VCX.

Nom station	Bassin	Rivière	VCX1	VCX30	VCX90
Mbasso	Comoe	Comoe	1971	1971	1971
Aniassue Pont	Comoe	Comoe	1971	1971	1971
Ndjamena	Lac Tchad	Chari	1971	1971	1971
Boussou	Lac Tchad	Chari	1971	1971	1971
Tchoa	Lac Tchad	Tandjile	Rien	1970	1970
Lai	Lac Tchad	Logone	1971	1971	1970
Eseka	Nyong	Nyong	Rien	Rien	Rien
M'Balmayo	Nyong	Nyong	Rien	Rien	Rien
Sagon	Oueme	Oueme	1965	1967	Rien
Logozohe-Pont	Oueme	Klou	Rien	Rien	Rien
Bakel	Sénégal	Sénégal	1968	1972	1972
Fadougou	Sénégal	Falémé			
Oualia	Sénégal	Bakoye	1971	1971	1971
Bangui	Zaïre	Oubangui	1975	1970	1970
Salo	Zaïre	Sangha	1971	1975	1971
Doume	Zaïre	Doume	Rien	Rien	Rien

CONCLUSION

Cette étude montre que le déficit pluviométrique observé en Afrique de l'ouest et centrale depuis plus de vingt cinq ans a de sérieuses conséquences sur l'hydraulicité des cours d'eau des zones dites "humides" au sens large. Ces régions, situées au sud du 14° parallèle, et que l'on pensait épargnées par la sécheresse, présentent des déficits d'écoulement communément supérieurs à 30% et très souvent situés au delà de 50%. Les premières analyses effectuées sur le bassin du Niger sont parfaitement conformes à l'ensemble de ces résultats.

Hautes eaux et basses eaux ont subi d'importantes modifications à la baisse. Des analyses actuellement en cours viendront prochainement compléter les conclusions tirées de cette première exploitation des résultats. Elles porteront également sur des caractéristiques de forme des hydrogrammes et sur les tarissements.

Les conséquences de cette modification sur l'exploitation des ressources en eau et sur l'environnement sont évidentes. Les projets d'aménagement doivent désormais tenir compte de cette hydraulicité déficitaire. On ne citera que l'exemple du remplissage des réservoirs et du fonctionnement des installations qui leur sont liées et qui se révèlent parfois problématiques. L'impact sur la flore, comme sur la faune, de ces débits en baisse peut également se révéler important, et il convient donc d'intégrer dorénavant cette situation dans les études environnementales entreprises.

Remerciements Les auteurs souhaitent remercier Jean François Boyer pour son importante contribution à la réalisation des chaînes de traitement informatique des données.

REFERENCES

- Hubert, P., Carbonnel, J. P. & Chaouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349-367.
- Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturol, J. E., Kouamé, B. & Boyer, J. F. (1994) Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. *Etude Bibliographique; ORSTOM Montpellier.*
- Paturol, J. E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1996) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: An integrated regional approach. A paraître dans *J. Hydrol.*
- Pettitt, A. N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statistics* **28**(2), 126-135.
- Servat, E., Paturol, J. E. & Lubès, H. (1996) La secheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche*, n°290, septembre 1996.



FRIEND'97— Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management

Edited by

Alan Gustard, Sarka Blazkova,

Mitja Brilly, Siegfried Demuth,

Julia Dixon, Henny van Lanen,

Carmen Llasat, Simon Mkhandi & Eric Servat



FRIEND'97—Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management

Edited by

ALAN GUSTARD

Institute of Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK

SARKA BLAZKOVA

T G Masaryk Water Research Institute, Podbabská 30, 160-62 Prague 6, Czech Republic

MITJA BRILLY

FAGG Hydraulics Division, University of Ljubljana, Hajdrihova 28, 61000 Ljubljana, Slovenia

SIEGFRIED DEMUTH

Department of Hydrology, University of Freiburg, Werderring 4, D-79085 Freiburg, Germany

JULIA DIXON

Institute of Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK

HENNY VAN LANEN

Department of Water Resources, Agricultural University, Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen, The Netherlands

CARMEN LLASAT

Department of Astronomy and Meteorology, University of Barcelona, Avda Diagonal 647, 08028 Barcelona, Spain

SIMON MKHANDI

Department of Civil Engineering, University of Dar es Salaam, PO Box 35131, Dar es Salaam, Tanzania

ERIC/SERVAT

Antenne Hydrologique, 06 BP 1203, Cidex 1, Abidjan 06, Côte d' Ivoire

Proceedings of the Third International Conference on FRIEND held at Postojna, Slovenia, from 30 September to 4 October 1997. The conference was convened jointly by the steering committee of the Alpine Mediterranean Hydrology (AMHY) FRIEND project with the support of other FRIEND groups: Northern European FRIEND, Southern African FRIEND, West and Central African FRIEND and the National Committee of Slovenia for the International Hydrological Programme of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) and the Operational Hydrological Programme of World Meteorological Organization (WMO). The conference was sponsored by UNESCO, WMO, the European Commission, the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) and the Ministry of Science and Technology, Republic of Slovenia.

Published by the International Association of Hydrological Sciences 1997

IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK

IAHS Publication no. 246

ISBN 1-901502-35-X

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

A catalogue record for this book is available from the British Library.

IAHS is indebted to the Institute of Hydrology, Wallingford, UK, for the support and services provided that enabled the editor-in-chief to work effectively and efficiently. IAHS is similarly indebted to the employers of the co-editors for the support they provided.

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

The Editors wish to acknowledge Penny Kisby of IAHS Press for the preparation of the camera-ready copy; the editorial assistance of the conference convenors; and the authors of the papers for their patience and cooperation during the editing process.

The camera-ready pages were assembled by Penny Kisby (IAHS Press, Wallingford, UK) using files of the edited papers provided by the Editor.