

Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau

GIL MAHE

IRD, UMR HydroSciences Montpellier, 01 BP 182 Ouagadougou, Burkina Faso
mahe@hydro.ird.bf

CHRISTIAN LEDUC

IRD, UMR HydroSciences Montpellier, BP 64 501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

ABOU AMANI

Centre Régional Agrhymet, BP 11011, Niamey, Niger

JEAN-EMMANUEL PATUREL, SABINE GIRARD

IRD, UMR HydroSciences Montpellier, 01 BP 182 Ouagadougou Burkina Faso

ERIC SERVAT & ALAIN DEZETTER

IRD, UMR HydroSciences Montpellier, BP 64 501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

Résumé Dans les régions soudano-sahéliennes, la dégradation des états de surface, provoquée principalement par les activités de populations croissantes induit une augmentation du ruissellement, même si les pluies diminuent. L'aspect hydrologique de ces changements est présenté ici à partir d'exemples de rivières du Burkina Faso, du Mali et du Niger. Les augmentations de débit sont observées au nord de l'isohyète 700 mm et leur amplitude est liée en partie au niveau d'activités agricoles. Au sud de cette isohyète la variabilité des écoulements suit celle des pluies, avec une zone de transition où la variabilité des écoulements mensuels montre les deux influences: une augmentation jusqu'en août, puis une diminution en fin de saison des pluies, comparé à la situation avant 1973. L'impact de la modification des relations entre états de surface, pluies et écoulements est d'une grande importance pour la conception des futurs ouvrages hydrauliques.

Mots clefs changement climatique; coefficient d'écoulement; états de surface; régime hydrologique; Sahel

Key words climatic change; runoff coefficient; surface condition; hydrological regime; Sahel

INTRODUCTION

De nombreux travaux ont montré l'existence d'une modification climatique abrupte située vers 1970, signalé par une diminution des pluies dans toute l'Afrique occidentale mais aussi, dans une moindre mesure, en Afrique centrale (Mahé *et al.*, 2001; Paturel *et al.*, 1997). Dans ces régions, les débits de la plupart des cours d'eau ont diminué de manière statistiquement significative au cours des trente dernières années (Aka *et al.*, 1996; Servat *et al.*, 1997). Cette réduction des débits est souvent plus intense, proportionnellement, que la diminution des pluies annuelles. Ceci s'explique en partie par la forte diminution du niveau des nappes et de leur contribution aux écoulements de base (Mahé *et al.*, 2000).

Ceci est d'autant plus vrai pour les cours d'eau dont une part significative de l'écoulement provient des aquifères. Quand les pluies diminuent, les apports de nappes deviennent de plus en plus faibles et les écoulements sont essentiellement constitués du ruissellement de surface. Les apports de nappes de versants temporaires ne deviennent importants qu'en milieu de saison de pluies, mais ils tarissent très vite. Leur extension se limite le plus souvent aux berges proches. Pouyaud (1987) a montré que les coefficients d'écoulements et les écoulements annuels ont augmenté sur des petits bassins versants en zone sahélienne, du fait de l'impact des variations climatiques sur la végétation et la dénudation du sol. Des investigations récentes ont montré que des bassins de taille supérieure pouvaient aussi être concernés par cette augmentation des coefficients d'écoulement.

L'AUGMENTATION DES ECOULEMENTS EN ZONE SAHELO-SOUDANIENNE

Trois cas d'augmentation à grande échelle

Sur le bassin du Nakambé à Wayen (20 800 km²) au Burkina Faso, les écoulements ont augmenté malgré la diminution des pluies observée depuis 1970 (Mahé *et al.*, 2002). Cette augmentation des débits a été reliée à l'augmentation des surfaces de sols cultivés et de sols nus aux dépens des surfaces en végétation naturelle sur le bassin depuis 30 ans. La même observation a été faite au Niger, où l'on constate une augmentation du niveau des nappes depuis 30 ans, en relation avec l'augmentation des

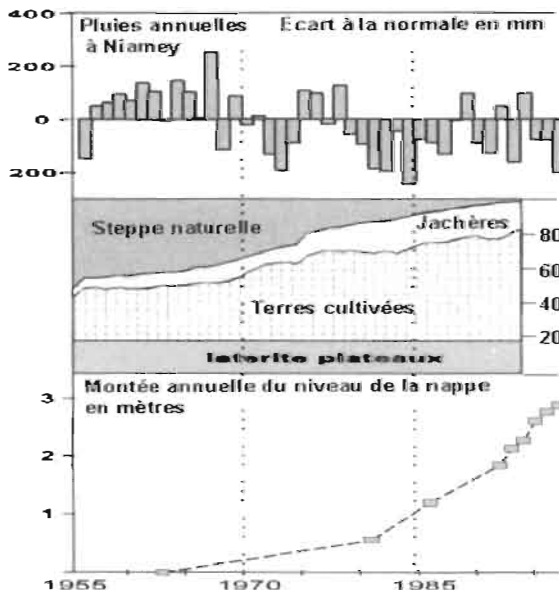


Fig. 1 De haut en bas la pluie (mm), l'occupation du sol (% de la surface totale) et le niveau de la nappe (moyenne de 50 points en mètres au dessus du niveau des années 60) entre 1955 et 1997 dans la région de Niamey (d'après Leduc *et al.*, 2001).

surfaces cultivées (Leduc *et al.*, 2001) (Fig. 1). Dans ce cas particulier du Niger, les écoulements alimentent de petites dépressions endoréiques qui sont des lieux privilégiés de recharge des nappes. L'augmentation des écoulements de surface provoque une hausse du niveau de l'eau dans les dépressions et, ainsi, une plus importante recharge des nappes.

Plus récemment encore, on a remarqué qu'à Niamey le niveau de la crue d'été a dépassé le niveau de la crue d'hiver quatre fois depuis 1984, alors que cela ne s'était jamais produit depuis le début des observations en 1923 (Amani & Nguetora, 2002). Ceci a été attribué à l'augmentation des écoulements des affluents de rive droite du fleuve Niger, venant du Burkina-Faso. La crue d'hiver est la crue d'hivernage sur la Guinée et le Mali qui se propage lentement à travers le delta intérieur du Niger au Mali pour arriver avec un décalage de plusieurs mois à Niamey. La crue d'été à Niamey correspond au passage des crues locales des petits affluents dont la surface atteint environ 100 000 km², alors que la crue principale provient d'un bassin actif de près de 500 000 km².

LES AFFLUENTS DE RIVE DROITE DU FLEUVE NIGER

Ces observations nous ont conduit à nous intéresser aux chroniques de débits des affluents de rive droite du fleuve Niger, provenant de toute la partie orientale du Burkina-Faso. Les données anciennes proviennent de Brunet-Moret *et al.* (1986). Les données récentes nous ont été fournies par la Direction de l'Hydraulique du Niger à Niamey (DRE, 2000). Dix bassins ou sous-bassins du fleuve Niger (Fig. 2, Tableau 1) sont comparés à deux bassins, le Bani à Douna au Mali, situé en région plus humide (Mahé *et al.*, 2000), et le Nakambé à Wayen, en territoire burkinabé, adjacent aux autres bassins du Niger (Mahé *et al.*, 2002).

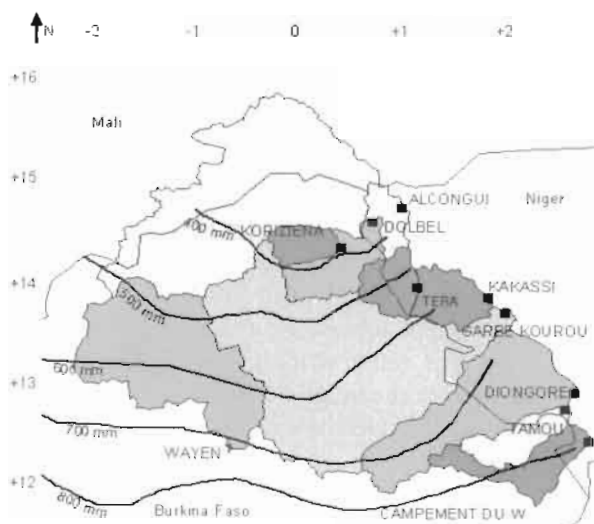


Fig. 2 Contours des bassins et isohyètes moyennes interannuelles (1960–1990).

Tableau 1 Liste des bassins et des stations utilisées.

| Rivière | Station | Système | Pluie annuelle 1955–98 mm | Surface km ² | Module avant 1972 m ³ s ⁻¹ | Module après 1972 m ³ s ⁻¹ | Coeff. d'écoul. Av. 1972 % | Coeff. d'écoul. Ap.1972 % | Ratio ap./av. 1972 % |
|-----------|--------------|---------|------------------------------------|----------------------------|--|--|--|------------------------------------|-------------------------------|
| Nakambe | Wayen | Volta | 660 | 20 800 | 6.86 | 11.9 | 1.4 | 2.9 | +108 |
| Gorouol | Alcongou | Niger | 422 | 44 850 | 10.7 | 12.3 | 1.6 | 2.2 | +40 |
| Gorouol | Koriziena | Niger | 431 | 2500 | 1.86 | 2.98 | 4.5 | 8.8 | +95 |
| Gorouol | Dolbel | Niger | 474 | 7500 | 8.32 | 8.96 | 6.6 | 8.6 | +32 |
| Dargol | Tera | Niger | 486 | 2750 | 2.96 | 3.44 | 6.2 | 8.4 | +37 |
| Dargol | Kakassi | Niger | 503 | 6940 | 4.75 | 5.96 | 3.9 | 6.2 | +57 |
| Sirba | Garbe Kourou | Niger | 634 | 38 750 | 16.7 | 22.1 | 2.0 | 3.2 | +61 |
| Goroubi | Diongore | Niger | 691 | 15 350 | 8.11 | 6.70 | 2.3 | 2.3 | 0 |
| Diamangou | Tamou | Niger | 746 | 4030 | 3.37 | 1.93 | 3.5 | 2.3 | -35 |
| Tapoa | Campement W | Niger | 785 | 5330 | 1.19 | 1.25 | 0.9 | 1.0 | +10 |
| Mékrou | Barou | Niger | (1000) | 10 500 | 38.1 | 22.3 | (11) | (7) | -33 |
| Bani | Douna | Niger | 1130 | 101 600 | 197 | 63.9 | 15.8 | 6.0 | -62 |

Les tailles des bassins de rive droite varient entre 2000 et 45 000 km². Les modules augmentent à partir de 1972 pour le bassin de la Sirba et ceux situés plus au nord. À partir du Goroubi ils diminuent vers le sud, sauf pour la Tapoa où ils augmentent légèrement. La pluie passe de 300–400 mm au nord à plus de 800 mm. Les coefficients d'écoulement augmentent nettement pour plusieurs bassins (Tableau 1, Fig. 3). Sur le bassin du Gorouol, les coefficients augmentent à la station de Dolbel; ils augmentent moins nettement à la station de Koriziena, plus à l'amont, mais la série ne démarre qu'en 1970 et les comparaisons avec les autres stations sont malaisées. Les débits à Alcongou augmentent moins progressivement qu'à Dolbel et on observe un premier pic en 1988. Par rapport à l'étude menée sur le Nakambé, on peut en déduire que la partie la plus anthropisée du bassin du Gorouol, et donc la plus soumise aux dégradations des états de surface, est la zone sud représentée par les stations de Dolbel et dans une moindre mesure de Koriziena. Pour les bassins du Dargol et de la Sirba, les écoulements augmentent nettement, dès le début des années 1970. Le coefficient d'écoulement de la Sirba augmente de 160% entre les deux périodes. Sur le bassin du Goroubi, situé plus au sud, les débits diminuent, mais les coefficients d'écoulement restent stables. La diminution d'écoulement est plus forte sur le bassin du Diamangou que sur celui de la Tapoa, mais les écoulements de la Mékrou, prenant sa source à 10°S sont aussi réduits que ceux du Bani.

Les régimes hydrologiques mensuels sont modifiés dans de nombreux cas (Fig. 4(a) et 4(b)): le pic de crue est dorénavant avancé d'un mois et survient en août plutôt qu'en septembre. Il est plus élevé, et il en est de même pour le module. Cette situation s'observe pour les rivières situées au nord de l'isohyète 600 mm. La situation est comparable à celle du Nakambé, rivière voisine au Burkina et dont le bassin est très anthropisé.

Au sud de l'isohyète 600 mm, la situation commence à changer. Pour le bassin de la Sirba, le module annuel n'augmente que légèrement. Le maximum de crue est également décalé vers août, mais la différence entre les valeurs d'août et septembre est

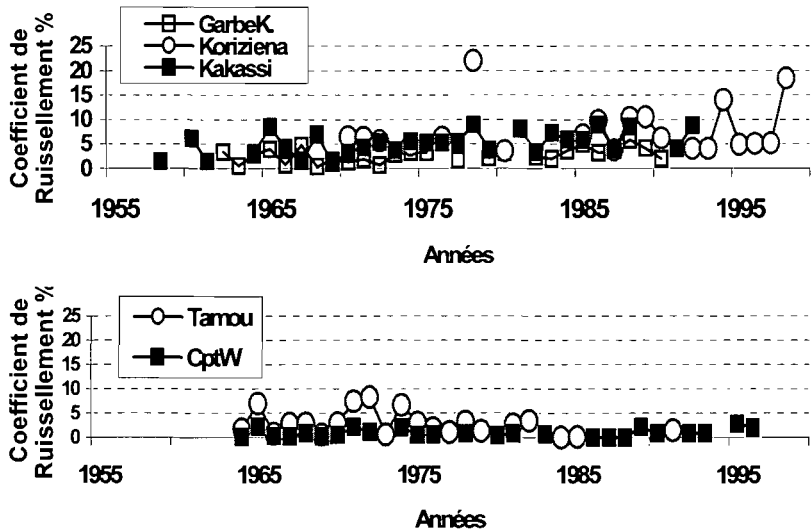


Fig. 3 Coefficients d'écoulement pour des affluents de rive droite du fleuve Niger (Fig. 2).

faible. Au sud, à partir de l'isohyète 700 mm, sur le Goroubi, on observe également le pic de crue décalé au mois d'août. Les valeurs des écoulements de septembre et d'octobre diminuent nettement, ainsi que le module annuel. Plus au sud encore, sur le Diamangou et la Mékrou, tous les débits mensuels diminuent, comme sur le Bani à Douna, au Mali, soumis à un climat similaire.

SYNTHESE ET CONCLUSION

A l'intérieur de cette zone d'étude, dans les régions à climat de type "sahélo-soudanien" au nord de 700 mm de précipitation annuelle, la baisse des pluies depuis 30 ans n'entraîne pas de diminution des écoulements comme c'est le cas dans la majorité des autres bassins situés en région plus humide. On observe bien, le long des affluents de rive droite du fleuve Niger, un passage progressif du sud au nord d'une zone de déficit d'écoulement prononcé à une zone de gain d'écoulement au cours des dernières décennies. Tout à fait au nord de notre zone, le gain d'écoulement semble s'estomper vers les régions les moins peuplées. Tous ces affluents prenant leur source au Burkina-Faso, on peut penser qu'il y a, comme pour le Nakambé, une relation directe entre l'augmentation des surfaces cultivées et des sols nus et l'augmentation des écoulements. Cela se traduit par des écoulements plus forts en début de saison des pluies et une crue annuelle centrée sur le mois d'août au lieu du mois de septembre. Ces écoulements de début de saison des pluies sont de plus en plus en plus forts et, en 1998 et 2002, on a enregistré les plus forts débits de crue d'été jamais observés à Niamey, en grande partie du fait des affluents de rive droite.

A la différence de la région endoréique de Niamey, l'augmentation des écoulements ne provoque pas de rehaussement du niveau général des nappes (Mahé *et al.*, 2002), car le réseau de drainage est bien développé et entraîne rapidement les surplus

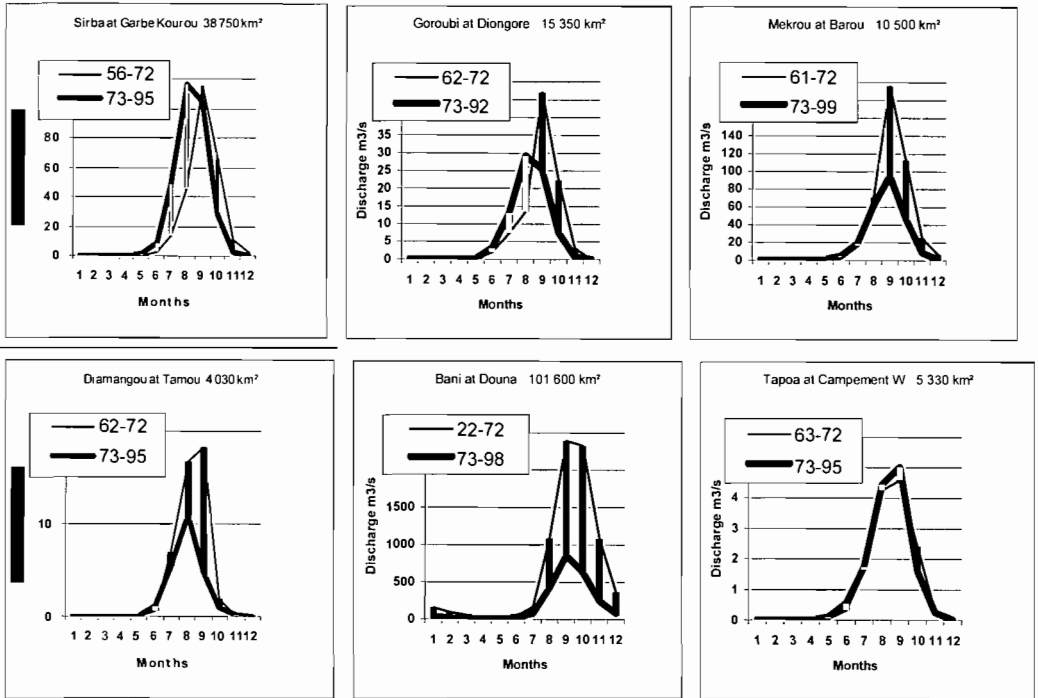


Fig. 4 (a) Régimes hydrologiques mensuels jusqu'à 1972 et après pour les affluents du Niger au Burkina-Faso. Les barres blanches (noires) indiquent un excédent durant la seconde (première) période.

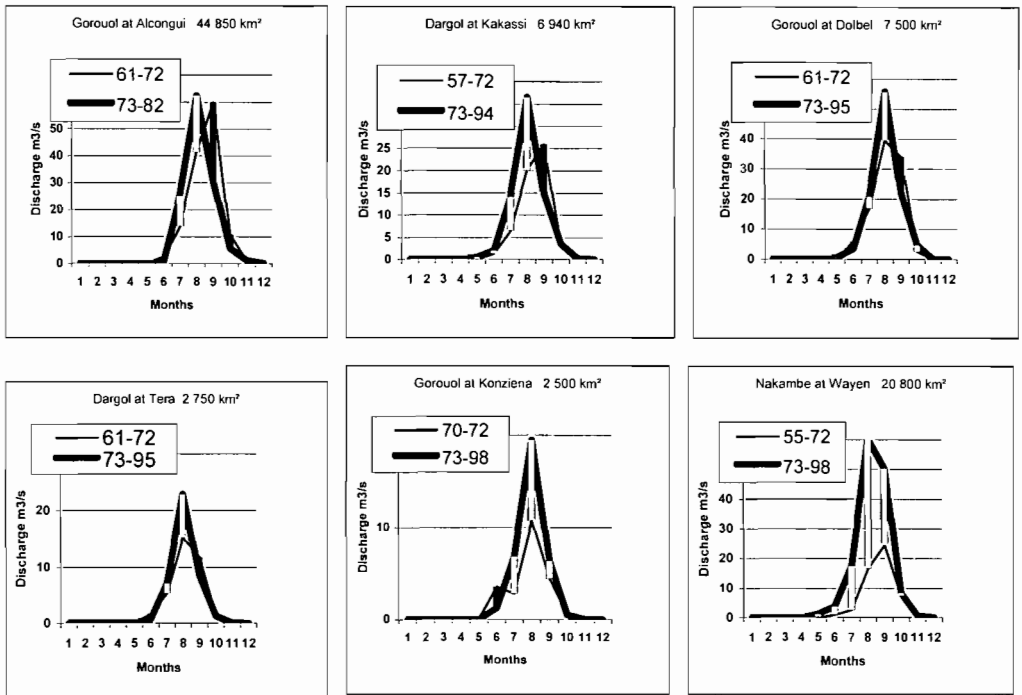


Fig. 4 (b) Idem Fig. 4(a) pour des affluents du Niger et de la Volta du Burkina Faso et du Mali.

d'écoulement aux exutoires. Par contre, ces surplus constituent des menaces sérieuses à la sécurité de nombreux ouvrages hydrauliques, construits suivant des normes obsolètes ne prenant pas en compte l'augmentation des écoulements. On peut citer le cas du barrage de Bagré au Burkina Faso, où la crue de projet a déjà été dépassée quatre fois en 10 ans de fonctionnement. Paturel *et al.* (soumis) ont bien décrit les précautions à prendre pour le calcul des fréquences de retour de crues, dans un contexte climatique changeant.

Dans les régions plus humides, au sud de l'isohyète 700 mm, les relations entre les pluies et les écoulements conservent la logique "moins de pluies, moins d'écoulement". Dans les régions de transition comme sur le bassin du Goroubi, les débits augmentent au début de la saison des pluies, mais diminuent ensuite. Vers le nord, la relation pluie-écoulement est durablement modifiée, en réponse à des modifications durables des édaphotopes. L'impact anthropique semble également très important, surtout par le biais de certaines pratiques culturelles, qui entretiennent et accélèrent la déstructuration des sols, avec pour conséquence ultime un sol nu en cas de surexploitation. L'augmentation des activités de pastoralisme est également considérée par certains comme néfaste sur le sol. Il n'existe pourtant pas beaucoup d'indices qui pourraient aider à faire la part du climat seul et de celle de l'anthropisation dans cette modification si spectaculaire des relations pluies-écoulement. Le fait que vers l'extrême nord du Burkina, peu peuplé, la tendance à l'augmentation des écoulements s'estompe pourrait indiquer que la part anthropique est importante. Nous manquons, par ailleurs, de comparaisons avec d'autres cours d'eau en zone sahélienne. La recherche de ces données constitue une priorité à l'heure actuelle afin d'apprécier l'extension régionale de ce phénomène et d'en estimer les modulations suivant les différents édaphotopes. De même, il serait utile de développer des travaux de recherche conjoints avec des pédologues sur des unités de surface représentatives.

Remerciements Nous remercions vivement les services hydrologiques et météorologiques du Burkina Faso et du Niger, FRIEND-AOC – UNESCO/PHI VI, et la Coopération Française.

REFERENCES

- Aka, A., Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturel, J. E. & Kouamé, B. (1996) Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization. *Hydrol. Sci. J.* **41**(6), 959–970.
- Amani, A. & Nguetora, M. (2002) Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In: *FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the gap between research and practice* (ed. by H. Van Lannen & S. Demuth) (Proc. Friend Conf., Cape Town, South Africa, 2002), 449–456. IAHS Pub. no. 274.
- Brunet-Moret, Y., Chaperon, P., Lamagat, J. P. & Molinier, M. (1986) *Monographie hydrologique du fleuve Niger*. Tome I: Niger supérieur; Tome II Cuvette Lacustre et Niger moyen. Coll. Monog. Hydrol. no. 8, ORSTOM, Paris, France.
- DRE (2000) *Etude des écoulements des affluents de la rive droite du fleuve Niger*. Direction des Ressources en Eau, Projet NER/98/001/01/NEX, Niamey, Niger.
- Leduc, C., Favreau, G. & Schrocter, P. (2001) Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. *J. Hydrol.* **243**, 43–54.
- 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. Paris* **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., Cres, A., Koné, F., Manga, M., Crès, F.N., Djoukam, J., Maïga, A. A. H. Ouedraogo, 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) (Proc. Friend Conf., Cape Town, South Africa, 2002), 69–76. IAHS Pub. no 274.
- 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.* (in press)
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Ouedraogo, M. & Masson, J. M., (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* **191**, 16–36.
- Pouyaud, B. (1987) Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques. In: *The influence of climate change and climate variability on the hydrologic regime and the water resources* (ed. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver symp., August 1987), 447–461. IAHS, publ. no. 168.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Travaglio, M. & Mariou, B. (1997) De la diminution des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale. *C. R. Acad. Sci., Paris*, t.325, série II a, 679–682.

IAHS Publication no. 278
ISSN 0144-7815



Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

Edited by

*Eric Servat, Wajdi Najem, Christian Leduc
& Ahmed Shakeel*





Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

Edited by

ERIC SERVAT

IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

WAJDI NAJEM

ESIB, Faculté d'Ingénierie de l'Université Saint-Joseph, BP 1514, Beyrouth, Liban

CHRISTIAN LEDUC

IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

AHMED SHAKEEL

Indo-French Centre for Groundwater Research, National Geophysical Research Institute, Uppal Road, Hyderabad 500 007, India

Papers selected for the international conference on:

Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions

held in Montpellier, France, from 1 to 4 April 2003.

This conference was jointly convened by:

UNESCO (United Nations Educational and Cultural Organization)

IAHS (International Association of Hydrological Sciences)

WMO (World Meteorological Organization)

FRIEND AMHY (Flow Regimes from International Experimental and Network Data, Alpine and Mediterranean Region)

IFR ILEE (Institut Fédératif de Recherche, Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement)

**Published by the International Association of
Hydrological Sciences 2003**

IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,
Oxfordshire OX10 8BB, UK

IAHS Publication no. 278

ISBN 1-901502-12-0

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

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

© IAHS Press 2003

This publication may be reproduced as hard copy, in whole or in part, for educational or nonprofit uses, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. As a courtesy the authors should be informed of any use made of their work. No use of this publication may be made for electronic publishing, resale or other commercial purposes without the prior written permission of IAHS Press.

The papers included in this volume have been peer reviewed and some were extensively revised before publication.

IAHS is indebted to the employers of the Editors for the invaluable support and services provided that enabled them to carry out their task effectively and efficiently.

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 papers were checked, formatted and assembled by Cate Gardner and Penny Farnell at IAHS Press, Wallingford, UK.

Publications in the series of Proceedings and Reports are available *only* from:
**IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,
Oxfordshire OX10 8BB, UK**

tel.: +44 1491 692442; fax: +44 1491 692448; e-mail: jilly@iahs.demon.co.uk