

N° 10
BAPBA6/1

ISSN
1251-8050

Relations eaux de surface–eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali

Gil Mahé^a, Jean-Claude Olivry^b, Robert Dessouassi^c, Didier Orange^d, Fatogoma Bamba^d, Eric Servat^b

^a IRD 01 BP 182 Ouagadougou 01, Burkina Faso

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

^c Direction de l'hydraulique, BP 385, Cotonou, Bénin

^d IRD – Lecom, Laboratoire des eaux continentales de l'Orstom au Mali, BP 84, Bamako, Mali

Reçu le 3 janvier 2000 ; accepté le 4 avril 2000

Présenté par Georges Pédro

Abstract – Surface water and groundwater relationships in a tropical river of Mali. The annual average of the groundwater levels in 27 wells is connected to the annual climate impact on the groundwater resources in the Bani river basin (Douna, 101 600 square kilometers). The groundwater level variations are well correlated to rainfall variations, and for the lowest levels of groundwater, the runoff stops in the dry season at Douna. The humid year of 1994 caused a rise in the groundwater level to the same level as 1981, together with a reduction of the depletion coefficient. But the runoff is still weak, showing that the rainfall–runoff relationships are modified over the long term. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Bani river / Mali / discharges / low flows / groundwater

Résumé – La moyenne annuelle des niveaux piézométriques de 27 puits est représentative de l'impact annuel du climat sur les ressources en eaux souterraines du bassin du Bani (Douna, 101 600 km²). Les variations du niveau de la nappe sont bien corrélées avec les variations de pluie, et les années d'étiage nul à Douna correspondent aux niveaux de nappe les plus bas de la série de 15 années d'observations. L'excédent pluviométrique de 1994 fait remonter la nappe au niveau de 1981, en concordance avec un coefficient de tarissement faible, mais les écoulements restent faibles, indiquant une relation pluie–débit durablement modifiée. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Bani / Mali / débits / tarissements / eaux souterraines

1. Introduction

La plupart des études sur la variabilité du climat décrivent la variabilité des pluies ou des écoulements, avec peu de liens entre les deux [4, 6, 9, 10, 14, 16]. Pour établir ce lien entre les pluies et les écoulements, une première étape a consisté à analyser les étiages donnant accès aux coefficients de tarissement. Olivry et al. [15] et Bricquet et al. [2] ont observé une correspondance entre l'augmentation du coefficient de tarissement de cer-

taines rivières ouest-africaines et une vidange plus précoce et plus rapide de leurs nappes. Une autre possibilité est d'étudier le lien entre étiages et nappes par l'intermédiaire des niveaux piézométriques. À partir d'un suivi piézométrique, parfois hebdomadaire, de plusieurs dizaines de puits (*figure 1*) mis en place à partir de 1981 par la Direction nationale de l'hydraulique du Mali, nous comparons ici les séries de pluie, débit et piézométrie, afin d'analyser les relations entre ces trois paramètres.

* Correspondance et tirés à part : mahe@hydro.ird.bf



Fonds Documentaire IRD
Cote : B* 22210 Ex : 7

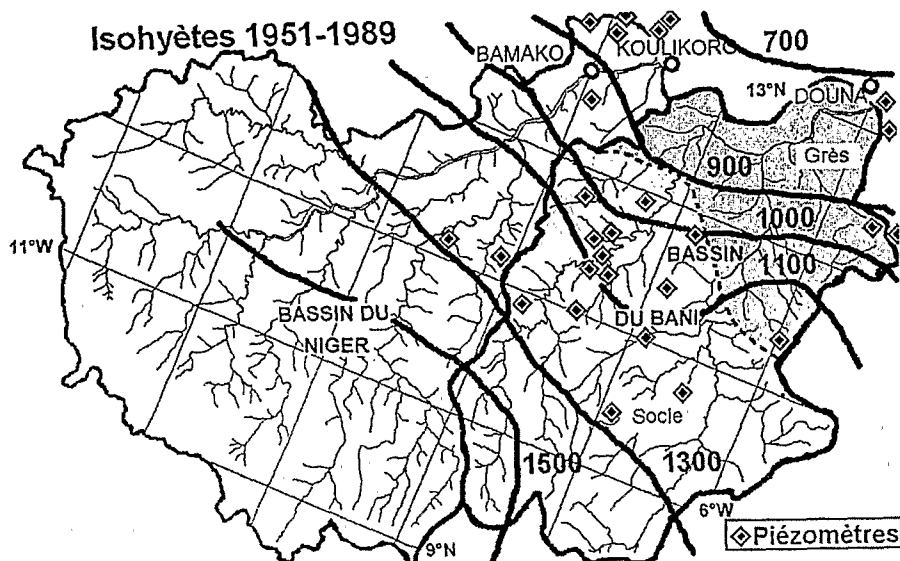


Figure 1. Bassin versant du Bani à Douana (101 600 km²). Hydrologie et unités géologiques. Les granito-gneiss birrimiens en grisé clair (« socle », sud-ouest), l'Infracambrien schisto-gréseux en gris plus foncé (« grès », nord-est).

Figure 1. The Bani river catchment at Douana (101 600 km²). Hydrology and geological units. In pale grey the 'Birrimien' formation (granites, gneisses) ('socle', southwestward), in dark grey the sandstones of the Infracambrian ('grès', northeastward).

2. Variabilité des ressources en eau du Bani à Douana de 1922 à 1997

Situé pour 85 % dans le Sud du Mali, le bassin versant du Bani à Douana (101 600 km²) est le principal affluent du Niger au Mali. La diminution persistante des pluies depuis 1970 a entraîné des conséquences rapides et durables sur les débits, qui ont baissé de 80 % depuis 1950. Les aquifères sont de type fissuré à faible perméabilité (figure 1) : le socle Birrimien cristallin et métamorphique (60 %, 15 puits) et l'Infracambrien schisto-gréseux (40 %, 12 puits). Les pluies moyennes annuelles (figure 1) vont de 700 à 1 600 mm, du nord au sud. La crue débute en juin et est maximale entre la mi-septembre et le début octobre. L'étiage se situe en avril ou en mai. Olivry et al. [15] ont montré l'augmentation du coefficient de tarissement du Bani à Douana, qui correspond à une vidange plus précoce et plus rapide des nappes. Pour l'extrême Sud-Ouest du bassin, situé en territoire ivoirien, Savané et Sangaré [18] indiquent un niveau maximal des nappes en fin de saison des pluies 1993 inférieur de plusieurs mètres à celui de la fin de saison des pluies 1976, ce qui corrobore les observations faites au Mali. Les lames précipitées sur le bassin sont calculées depuis 1922 (figure 2). L'année 1994 est exceptionnelle, car on observe un excédent de pluie de 7 % par rapport à la normale, et un total annuel qui n'avait pas été dépassé depuis 1966. L'écoulement est déficitaire de 2 %, mais c'est la plus forte valeur observée depuis 1970.

Les années de rupture statistique des séries temporelles ont été calculées par le logiciel Khronostat [11], par application des tests de Lee et Heghinian, de Pettitt, de Buishand et de la méthode de Hubert [7, 12, 17]. Sur la période 1922–1997, le logiciel donne comme année de rupture 1970 pour les débits (–68 % après 1970) et 1969 (1954 en second) pour les pluies (–18 % après 1969).

Les mêmes dates ont été obtenues sur les séries de valeurs régionales de pluies et débits d'Afrique de l'Ouest et centrale [8, 13]. La série des déficits d'écoulement (différence entre pluie et lame écoulée) présente, selon trois tests (hormis la méthode de Hubert), une rupture en 1954. Le graphique des pluies par rapport aux lames écoulées (figure 3) met en évidence trois familles de points, selon les périodes définies précédemment : 1922–1954, 1955–1969, 1970–1997. On comparera uniquement les périodes les plus récentes, car près de la moitié des débits d'avant 1950 sont reconstitués. On note que, pour une même pluie, la droite de régression donne une lame écoulée plus faible durant la période récente que durant la période 1955–1969.

3. Variation du niveau des nappes, relation avec les eaux de surface

3.1. Tarrisements

Nous avons utilisé la méthode de détermination des coefficients décrite dans Bamba et al. [1]. Le coefficient

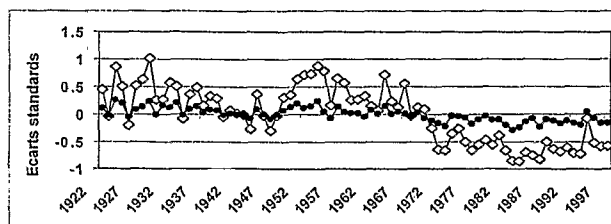


Figure 2. Pluies annuelles (ronds noirs) et lames écoulées annuelles (losanges blancs) sur le bassin versant du Bani à Douana de 1922 à 1997, en écarts centrés réduits.

Figure 2. Standardized mean annual departure series of rainfall (black circles) and depth of runoff (white diamonds) for the Bani river at Douana over the period 1922–1997.

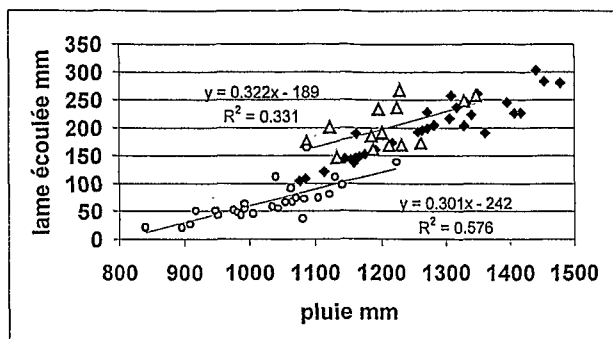


Figure 3. Pluies et lames écoulées pour trois périodes définies par les tests de rupture statistique dans les séries : 1922–1954 (losanges), 1955–1969 (triangles), 1970–1997 (ronds).

Figure 3. Rainfall and depth of runoff for three periods according to the results of the statistical tests of rupture in the series: 1922–1954 (diamonds), 1955–1969 (triangles), 1970–1997 (circles).

de tarissement est proportionnel à la vitesse de vidange de la nappe. Il augmente en période de sécheresse. Les débits de janvier, formés presque exclusivement par les eaux des nappes, diminuent depuis 1951 dans le même temps où le coefficient de tarissement augmente (figure 4). À partir des coefficients de tarissement, Olivry et al. [15] ont posé l'hypothèse d'une diminution des ressources souterraines qui contribuerait à la modification apparente des relations pluie/débit, qu'on observe sur beaucoup d'autres rivières de la région [1].

3.2. Nappes

À partir des données piézométriques de 27 puits, nous étudions les niveaux minimaux et les dates d'occurrence des niveaux maximaux, qui correspondent aux maximums de débit de base. Sur ces 27 puits, 20 sont situés à l'intérieur ou dans les environs immédiats des limites du bassin, et 7 sont un peu plus éloignés, mais disposés dans des formations identiques et soumis à des conditions climatiques similaires. Tous les puits ont des niveaux minimaux au-dessus de la cote du zéro de l'échelle limnimétrique du Bani à Douna, ce qui signifie

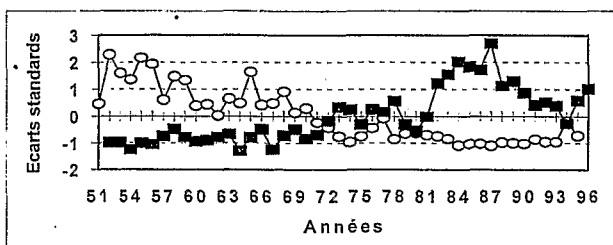


Figure 4. Coefficients de tarissement du Bani à Douna (carrés) (en $j^{-1} \times 1000$), et débits de janvier (ronds) (en écarts centrés réduits).

Figure 4. Standardized departure series of depletion coefficients (squares) (in $d^{-1} \times 1000$) and monthly runoffs for January (circles) for the Bani at Douna.

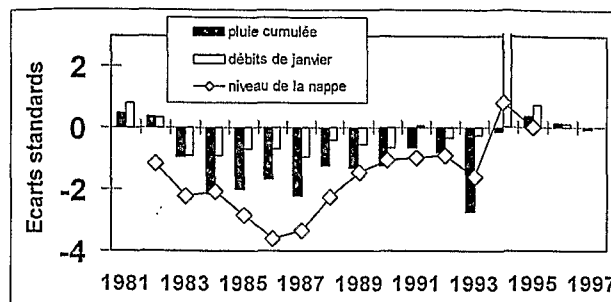


Figure 5. Débits de janvier du Bani à Douna, cumul des précipitations annuelles sur le bassin, et cumul des fluctuations interannuelles de niveau de la nappe (en valeurs centrées réduites).

Figure 5. January runoffs for the Bani river at Douna, sum of the annual rainfall over the basin, and sum of the interannual fluctuations of the groundwater level (standardized departure values).

qu'ils sont tous potentiellement en charge vis-à-vis de la rivière. Les variations du niveau de la nappe sont représentées par le cumul interannuel des écarts centrés réduits des amplitudes annuelles de fluctuation du niveau de la nappe (figure 5). Sur cette figure sont portés également les écarts centrés réduits des débits de janvier, ainsi que les cumuls interannuels des écarts centrés réduits des précipitations annuelles sur le bassin, de 1981 à 1997. La courbe des débits de janvier est remarquablement corrélée avec celle des pluies.

Le minimum piézométrique sur la période est atteint en 1986/1987, qui n'est pas l'année la plus déficitaire en pluie sur le Bani (1993 en déficit cumulé), mais qui se trouve à la fin d'un épisode très sec de plusieurs années. Le minimum a été également observé en 1987 au Burkina-Faso sur des piézomètres de la région de Ouagadougou [3]. Le coefficient de tarissement maximal à été atteint en 1987 (figure 4), puis s'est stabilisé au début de la décennie 90. En 1994, le coefficient retrouve une valeur plus faible, le débit de janvier est le plus élevé de la série et, à la fin de l'étiage 1994–1995, le niveau de la nappe est remonté plus haut qu'au début de la série. La recharge des nappes du Bani et la réponse hydrologique se réalisent avec rapidité. Mais le débit du Bani a été en 1994–1995 de 2 % inférieur à sa normale 1922–1997, tandis que le débit de janvier de la crue 1994–1995 reste très inférieur à celui des années précédant 1970. Une seule année de pluies excédentaires a suffi apparemment à effacer la trace des 15 années les plus sèches du siècle dans les nappes du Bani. Mais le niveau piézométrique a recommencé à diminuer rapidement en 1995 (même niveau qu'en 1981), ainsi que les débits d'étiage, en liaison sans doute avec une faible capacité de stockage des aquifères du Sud Mali.

On peut noter à titre de comparaison que la situation hydrologique a été similaire en 1994 sur le bassin du Niger à Koulikoro, mitoyen de celui du Bani et situé dans un contexte géologique et climatique proche (figure 1). Après 25 ans de déficits, on y a observé en 1994 un excédent de pluie de +15 %, qui n'a donné lieu qu'à

une crue de +5 % supérieure à la normale en 1994–1995, les années suivantes ayant montré une nette diminution des écoulements, comme pour le Bani. Ceci indique que la diminution du coefficient d'écoulement du Bani durant les dernières décennies n'est pas un phénomène isolé, mais régional, et laisse supposer, pour le bassin du Niger également, une influence importante de la variabilité interannuelle des écoulements souterrains dans l'élaboration des hydrogrammes annuels.

On notera enfin que ces résultats concernent des milieux tropicaux humides où les cours d'eau sont quasi-pérennes. Il n'est pas possible de les comparer aux résultats obtenus par Favreau et Leduc [5] sur les aquifères en région sahélienne de la république du Niger, où ces auteurs observent une augmentation récente du niveau des nappes autour des zones endoréiques par un effet probable d'augmentation du coefficient de ruissellement.

4. Conclusion

On a mis en évidence le fait que la sévérité accrue des étiages durant les périodes de déficit pluviométrique

est bien reliée à une diminution généralisée du niveau des nappes, pour le Bani à Douna sur la période 1981–1995. Les variations du niveau des nappes superficielles (de versant) sont tout à fait en accord avec celles des débits de basses eaux et du coefficient de tarissement. Dans les aquifères fissurés du Bani, les échanges semblent rapides entre nappe et eaux de surface. Ainsi, en 1994, le déstockage des nappes semble très important dans la même année hydrologique (écoulement retardé ou débit de base), mais l'existence d'un déstockage plus lent, de quantités d'eau plus faibles semble apparaître au cours des deux années suivantes au moins (1995 et 1996). Cette diminution du niveau des nappes est à l'origine d'une modification profonde de l'hydrogramme annuel par un déficit chronique d'apport en eaux souterraines à l'élaboration de la crue annuelle, le stock d'eaux souterraines étant insuffisamment renouvelé par des pluies systématiquement plus faibles qu'avant 1970. Afin de modifier durablement le nouvel équilibre hydrologique du bassin versant, il faudrait une succession de plusieurs années de pluies très supérieures à la normale du siècle pour retrouver les caractéristiques hydrologiques d'avant 1970.

Remerciements. Les auteurs remercient très vivement le Service hydrologique malien (DNHE) pour les données piézométriques, ainsi que le projet Friend-AOC (Unesco).

Références

- [1] Bamba F., Mahé G., Bricquet J.-P., Olivry J.-C., Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la Cuvette Lacustre, in : Fritsch J.-M., Paturel J.-E., Servat E. (éds), Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques : nouveaux visages de l'hydrologie régionale en Afrique, *Proceedings* des XII^{es} journées hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, France, CD-Rom Orstom, 1996, 26 p.
- [2] Bricquet J.-P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry J.-C., Évolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique, *Revue des Sciences de l'Eau* 3 (1997) 321–337.
- [3] Burkina-Faso, Politique et stratégies en matière d'eau, ministère de l'Environnement et de l'Eau, république du Burkina-Faso, 1998.
- [4] Demarée R.G., Nicolis C., Onset of the Sahelian drought viewed as a fluctuation induced transition, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 16 (1990) 221–238.
- [5] Favreau G., Leduc C., Fluctuations à long terme de la nappe phréatique du Continental Terminal près de Niamey (Niger) entre 1956 et 1997, in : Servat E., Hugues D., Fritsch J.-M., Hulme M. (éds), *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, in : *Proceedings* de la conférence Abidjan'98, Orstom/AISH/Unesco, AISH n° 252, 1998, pp. 253–258.
- [6] Fontaine B., Bigot S., West African rainfall deficits and sea surface temperatures, *Int. J. Climatol.* 13 (1993) 271–285.
- [7] Hubert P., Carbonnel J.-P., Chaouche A., Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest, *J. Hydrol.* 110 (1989) 349–367.
- [8] Hubert P., Carbonnel J.-P., Segmentation des séries annuelles de débits de grands fleuves africains, *Bulletin de liaison du CIEH* 92 (avril) (1993) 3–10.
- [9] Hulme M., Rainfall Changes in Africa: 1931–1960 to 1961–1990, *Int. J. Climatol.* 12 (1992) (1931) 685–699.
- [10] Janicot S., Spatiotemporal variability of West African rainfall. Part I : Regionalization and typings, *J. Climate* 5 (5) (1992) 489–497.
- [11] Khronostat 1.0, Logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques, Orstom éd., 1998.
- [12] Lubes-Niel H., Masson J.-M., Paturel J.-E., Servat E., Variabilité climatique et statistique. Étude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques, *Revue des Sciences de l'Eau* 3 (1998) 383–408.
- [13] Mahé G., Olivry J.-C., Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa, *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa* 328 (1999) 621–626.
- [14] Moron V., Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933–1990), *Int. J. Climatol.* 14 (1994) 325–341.
- [15] Olivry J.-C., Bricquet J.-P., Mahé G., Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ?, in : Gladwell J.S. (éd.), *Hydrology of warm humid regions, Proceedings of the AISH Symposium, Yokohama, Japan, IAHS n° 216, 1993, pp. 67–78.*
- [16] Paturel J.-E., Servat E., Delattre M.-O., Lubes-Niel H., Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique, *Hydrolog. Sci. J.* 43 (6) (1998) 937–946.
- [17] Pettitt A.N., A non-parametric approach to the change point problem, *Appl. Stat.-J. Roy. St. C* 28 (2) (1979) 126–135.
- [18] Savané I., Sangaré Y., Évolution climatique de la région nord-ouest de la Côte-d'Ivoire de 1935 à 1992 et son influence sur la réserve d'eau souterraine et sur l'agriculture, in : Premier atelier scientifique du projet Friend-AOC, Cotonou, Documents Techniques en Hydrologie, PHI-V n° 16 (1997) 127–146.