

Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali

GIL MAHE

ORSTOM, BP 84, Bamako, Mali

e-mail: mahe@lecom.malinet.ml

ROBERT DESSOUASSI

Direction de l'Hydraulique, BP 385, Cotonou, Bénin

BANDIA CISSOKO

Direction de l'Hydraulique, BP 62, Bamako, Mali

JEAN-CLAUDE OLIVRY

ORSTOM, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé Nous avons étudié les fluctuations interannuelles des niveaux piézométriques minimums sur 30 puits du bassin versant du Bani à Douna au Mali, installés à partir de 1981 dans les deux aquifères du Socle et de l'Infracambrien schisto-gréseux. La moyenne annuelle sur la surface du bassin des niveaux minimums est représentative de l'impact annuel du climat sur les ressources en eaux souterraines du bassin. Les variations du niveau de la nappe sont bien corrélées avec les variations de pluie, et les années de débit d'étiage nul à Douna correspondent aux années de niveau de nappe le plus bas de la série de 15 années d'observations. L'effet de la bonne année piézométrique 1994 est très sensible sur le niveau de la nappe, avec une remontée au niveau de 1981, ce qui est concordant avec le coefficient de tarissement le plus bas depuis 1982.

INTRODUCTION

Situé à 85% dans le sud du Mali, le bassin versant du Bani à la station de Douna (101 600 km²), principal affluent du Niger au Mali, reçoit en moyenne environ 1200 mm de précipitations annuelles. La diminution persistante des pluies depuis 1970 a eu des conséquences rapides et durables sur les débits qui ont baissé de 80% depuis 1950. Olivry *et al.* (1993a) ont montré l'augmentation du coefficient de tarissement du Bani à Douna qui correspond à une vidange plus précoce et plus rapide des nappes. Ce phénomène a été décrit également pour d'autres cours d'eau de l'Afrique tropicale par Bricquet *et al.* (1997), Orange *et al.* (1997), Laraque *et al.* (1996).

La Direction Nationale de l'Hydraulique au Mali a mis en place à partir de 1981 plusieurs dizaines de puits qui permettent un suivi piézométrique parfois hebdomadaire. Nous comparons les séries de pluie, débit et piézométrie, afin d'analyser les relations entre ces trois paramètres depuis 1981.

LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DU BANI A DOUNA

Pluies, écoulements et eaux souterraines

Les lames précipitées sur le bassin sont calculées depuis 1924 (Soumaguel, 1996) (Fig. 1(a)). La diminution des pluies depuis 1970 atteint 30% par rapport à la moyenne du siècle. Les débits baissent beaucoup plus, jusqu'à -84% sur la même période. La différence entre pluie annuelle et lame écoulée diminue entre 1951 et 1995 (Fig. 1(b)). La crue débute en juin et est maximum entre mi-septembre et début octobre. L'étiage est observé en avril ou mai (Fig. 2). Les aquifères sont de type

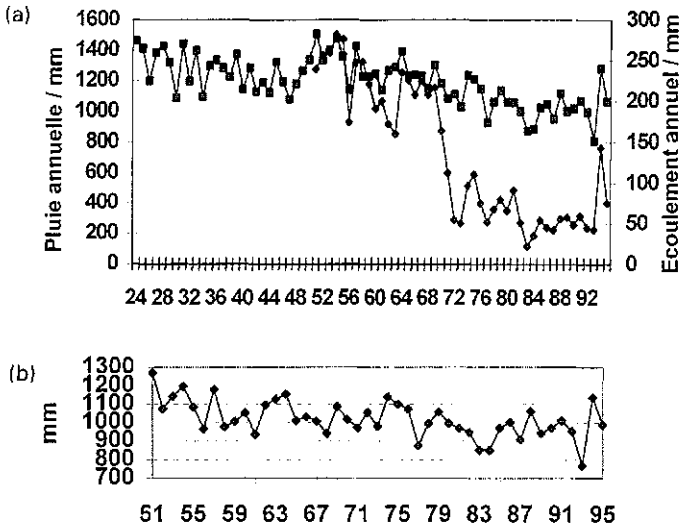


Fig. 1(a) Pluies annuelle (ronds) et lames écoulées annuelles (losanges) sur le bassin versant du Bani à Douna de 1924 à 1995. (b) Différence entre pluies annuelles et lames écoulées annuelles sur le bassin versant du Bani à Douna de 1951 à 1995, en mm.

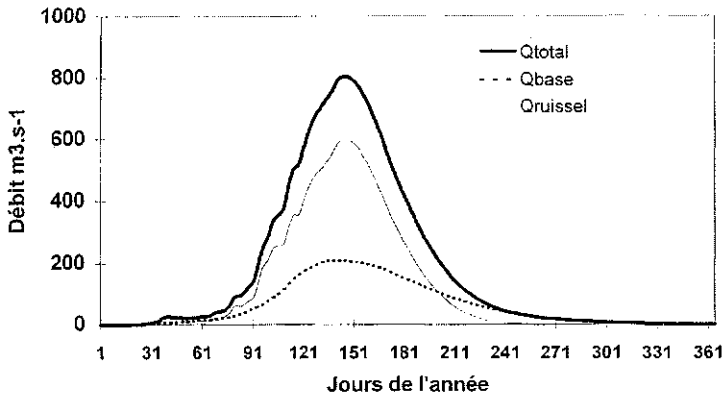


Fig. 2 Hydrogramme moyen journalier du Bani à Douna: écoulement total (trait épais), écoulement de base (trait moyen tireté) et ruissellement (trait fin), sur la période 1984-1996. L'hydrogramme débute en mai.

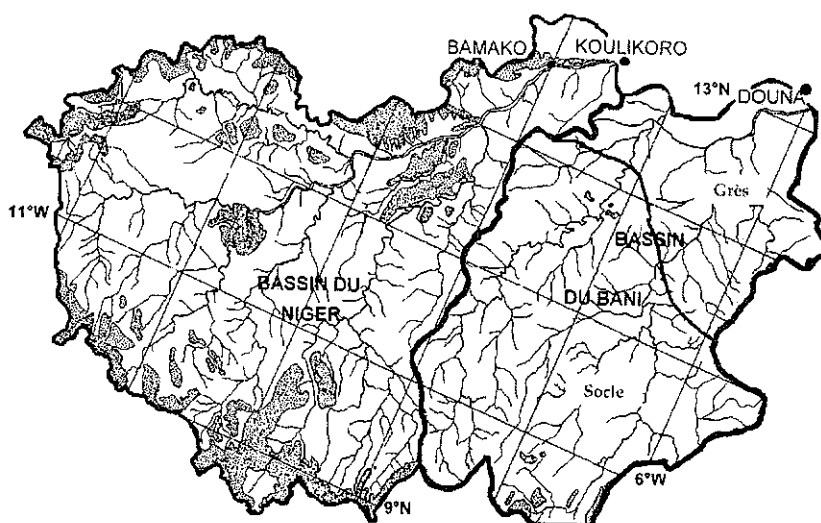


Fig. 3 Bassin versant du Bani à Douna (101 600 km²). Hydrographie et unités géologiques. Le socle birrimien est en grisé clair, partie sud-est, l'Infracambrien schisto-gréseux en gris plus foncé. A l'ouest du Bani se trouve le bassin du Niger, ici représenté à la station de Koulikoro.

fissuré à faible perméabilité (Fig. 3): le Socle Birrimien cristallin et métamorphique (60%) et l'Infracambrien schisto-gréseux (40%). Les zones de stockage sont irrégulièrement réparties et de capacité assez faible (BRGM, comm. pers.). Les taux d'infiltration moyens sont inférieurs à 20% de la pluie brute, légèrement supérieurs dans l'Infracambrien (où il pleut moins) que dans le socle (où il pleut plus) (Dessouassi, 1997). L'évapotranspiration varie du nord au sud entre 1260 et 1850 mm an⁻¹ (Dessouassi, 1997). La moyenne 1951–1990 est de 1530 mm (Diabaté, 1995).

Période 1981–1996

Pour le Bani à Douna, c'est la période de pluies et d'écoulements les plus faibles depuis le début des observations. Le coefficient de tarissement du Niger à Koulikoro, branche principale du Niger venant de Guinée, mitoyen et de taille comparable au

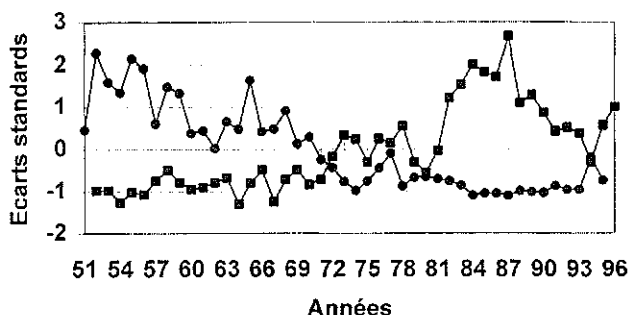


Fig. 4 Coefficients de tarissement du Bani à Douna (carrés)(en jour⁻¹ × 1000), et débits de janvier (ronds)(en écarts centrés réduits).

bassin du Bani, est maximum durant cette période (Fig. 4) par rapport à une série débutée en 1907 (Bricquet *et al.*, 1996).

L'année 1994 est exceptionnelle car on observe un excédent de pluie de 11% par rapport à la normale du siècle, et un total annuel qui n'avait pas été dépassé depuis 1969. L'écoulement est également excédentaire, mais seulement de 6%, valeur qui n'avait plus été observée depuis 1971.

Le suivi du niveau des nappes en 1994 nous renseigne sur la dynamique de la recharge des aquifères fissurés dans le sud Mali, et sur les relations entre eaux de surface et eaux souterraines.

RELATIONS EAUX DE SURFACE/EAUX SOUTERRAINES

Le bilan hydrologique

Les termes du bilan sont $P = E + Q + DS$ (variation de stock). La pluie P et la lame écoulee Q sont connues. En première approche on considère que les variations de stock s'annulent sur un grand bassin au cours d'un cycle hydrologique annuel. En conséquence de quoi E est l'évapotranspiration réelle et correspond à la pluie moins l'écoulement. On observe sur les séries du Bani à Douna que les écoulements diminuent beaucoup plus que les pluies. Sur la base des coefficients de tarissement,

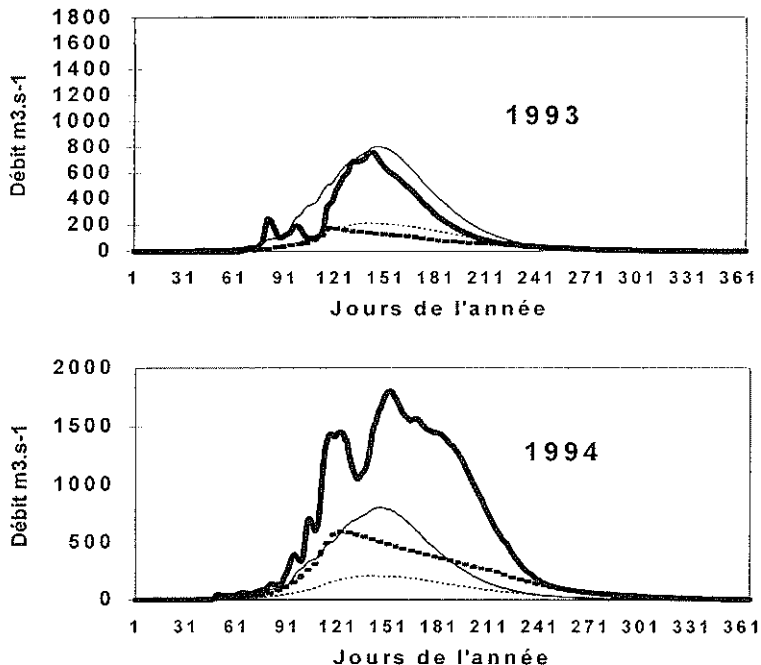


Fig. 5 Hydrogrammes annuels en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ pour l'année humide (1994) et l'année sèche (1993) (traits épais) par rapport à l'hydrogramme moyen (traits fins). Les courbes en trait plein sont relatives aux débits totaux, les courbes en trait tireté représentent les débits de base. Les courbes du débit total moyen (trait plein fin) et du débit de base moyen (trait tireté fin) sont tirées de la Fig. 3.

Olivry *et al.* (1993a) ont posé l'hypothèse d'une diminution des ressources souterraines pour expliquer cette modification apparente des relations pluie/débit, qu'on observe sur beaucoup d'autres rivières de la région (Bamba *et al.*, 1996a, 1996b).

A partir des données piézométriques de plus de 30 puits nous étudions les niveaux minimums et les dates d'occurrence des niveaux maximums. Les premières valeurs sont disponibles dès 1981, mais il faut attendre 1984 pour avoir suffisamment de postes pour établir des moyennes. Les précipitations sont connues jusqu'en 1995. L'intervalle de comparaison est donc 1984-1995, bien que l'on dispose d'informations partielles pour la période 1981-1996.

Méthodologie de détermination de l'écoulement de base

L'hydrogramme annuel du Bani est de type unitaire (Fig. 2). Pour décomposer l'hydrogramme en écoulement de surface et de base nous avons élaboré une méthode qui utilise les courbes de tarissement et les dates d'apparition des niveaux maximum dans les nappes. Le coefficient de tarissement est proportionnel à la vitesse de vidange de la nappe. Il augmente en période de sécheresse. Nous avons utilisé la méthode de détermination des coefficients décrite dans Bamba *et al.* (1996b). On dessine la courbe de tarissement en remontant le temps (Fig. 5, inspirée d'Olivry *et al.* (1993b)) jusqu'à la date du maximum moyen de niveau des nappes. La première partie de la courbe est dessinée en suivant une loi inverse de celle de la décrue (BRGM, comm. pers.) jusqu'aux premiers jours après le début de la montée des eaux. La sous-surface ainsi délimitée de l'hydrogramme annuel représente le débit de base. On obtient deux séries de débits, surface et base, pour chaque année entre 1984 et 1996.

Pour le Bani à Douna sur la période 1984-1996, la date d'apparition moyenne du tarissement est 27 décembre. Le maximum de débit de base correspond au maximum de niveau piézométrique, en moyenne le 15 septembre, soit 10 jours avant le maximum de ruissellement (et d'écoulement total) le 24 septembre. Sur la Fig. 5 sont représentés les écoulements observés du Bani à Douna ainsi que les écoulements de base calculés, pour deux années contrastées 1993 (sèche) et 1994 (humide). En 1994 l'écoulement de base est beaucoup plus important et soutient la crue plus longtemps. Le tarissement apparaît plus tardivement.

VARIATION DU NIVEAU DES NAPPES, RELATION AVEC LES EAUX DE SURFACE

Les variations du niveau de la nappe sont représentées par le cumul interannuel des écarts centrés réduits des amplitudes annuelles de fluctuation du niveau moyen de la nappe (Fig. 6). Sur cette figure sont portés également les écarts centrés réduits des débits de janvier (totalement élaborés par l'écoulement de base et suffisamment différents de zéro) ainsi que les cumuls interannuels des écarts centrés réduits des précipitations annuelles moyennes sur le bassin, de 1981 à 1995. La courbe des débits de janvier est remarquablement corrélée avec celle des pluies.

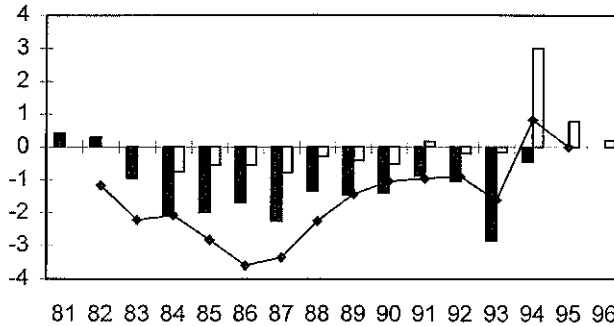


Fig. 6 Ecarts centrés et réduits des débits de janvier du Bani à Douna (barres claires), cumul interannuel des écarts centrés réduits des précipitations annuelles sur le bassin (barres sombres), et cumul interannuel des écarts centrés réduits des amplitudes annuelles de fluctuation de niveau moyen de la nappe (trait fin et losanges), de 1981 à 1996.

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), mais qui se trouve à la fin d'un épisode très sec de plusieurs années. Le coefficient de tarissement maximum a été atteint en 1987 (Fig. 4), puis s'est stabilisé au début de la décennie 1990. En 1994, avec les pluies abondantes 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. Une seule année de pluies excédentaires (+11%) 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 1995 et 1996 le coefficient de tarissement augmente également rapidement.

Le débit du Bani n'a été en 1994/1995 que de 6% supérieur à sa normale 1951-1996. Comparativement pour le Niger à Koulikoro on a observé +15% de pluie et +5% de débit en 1994/1995 (Bricquet *et al.*, 1996). Dans les deux cas l'augmentation d'écoulement est inférieure à celle des pluies. Le niveau de la nappe en 1994/1995 est le plus haut de la série 1981/1995. La recharge des nappes du Bani et la réponse hydrologique se réalisent avec rapidité. Mais le débit de janvier de la crue 1994/1995 reste très inférieur à celui des années précédant 1970 (Fig. 4). En 1995 et 1996, le niveau d'étiage diminue rapidement, à relier sans doute avec une faible capacité de stockage des aquifères du sud Mali. La différence de réponse entre le Niger et le Bani est peut-être à relier à une différence de propriété des aquifères. Les apports souterrains ne semblent pas avoir augmenté autant à partir des aquifères de Guinée, car la différence entre pluie et écoulement est plus élevée pour le Niger à Koulikoro. Ceci pourrait traduire une recharge plus lente des aquifères et pourrait également signifier que cette partie de bassin nécessiterait une période de pluies excédentaires plus longue que le sud Mali pour retrouver un même niveau de nappe.

CONCLUSION

On a mis au point une méthode de séparation d'hydrogrammes à partir des données piézométriques. Cette méthode nécessite d'être affinée, notamment pour mieux

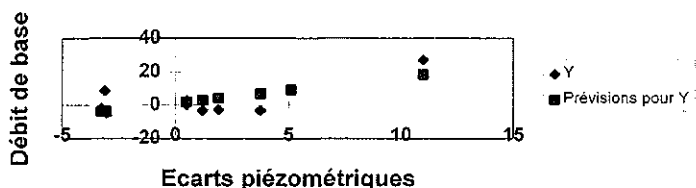


Fig. 7 Corrélation entre valeurs annuelles de débit de base (Y) et d'écart piézométrique (X), $R^2 = 0.5$.

suivre les fluctuations de niveau probables autour du maximum à la période de très hautes eaux. Sur la période 1984–1996 les variations de débit de base et de niveau piézométrique présentent une corrélation de $R^2 = 0.5$ (Fig. 7), de même que celles des coefficients de tarissement et des débits de base ($R^2 = 0.5$). Mais dans le cas du Bani, aquifères fissurés, les échanges plus rapides entre nappe et surface exacerbent les mouvements vers le haut (recharge accélérée) et vers le bas (étiages rapidement faibles). Dans les deux cas, Niger et Bani, une succession de plusieurs années de pluies très supérieures à la normale du siècle serait nécessaire pour retrouver les caractéristiques hydrologiques d'avant 1970. L'évaporation réelle varie peu, et semble bien être prépondérante sur l'infiltration.

REFERENCES

- Bamba, F., Diabate, M., Mahé, G. & Diarra, M. (1996a) Rainfall and runoff decrease of five river basins of the tropical upstream part of the Niger river over the period 1951–1989. In: *Global Hydrological Change* (ed. by L. A. Roald) (EGS XXIth Gen. Ass., La Haye Pays Bas, 6–10 mai 1996).
- Bamba, F., Mahé, G., Bricquet, J. P. & Olivry, J. C. (1996b) Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la Cuvette Lacustre. *XIIèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM: Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques: nouveaux visages de l'Hydrologie Régionale en Afrique* (ORSTOM Montpellier, 10–11 octobre 1996). ORSTOM Montpellier, France.
- Bricquet, J. P., Bamba, F., Mahé, G., Toure, M. & Olivry, J. C. (1997) Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau* 3, 321–337.
- Bricquet, J. P., Mahé, G., Bamba, F. & Olivry, J. C. (1996) Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In: *L'Hydrologie Tropicale. Géoscience et outil pour le développement*. (ed. par P. Chevallier & B. Pouyaud) (Actes de la conférence de Paris, mai 1995, mélanges à la mémoire de Jean Rodier), 157–166. IAHS Publ. no. 238.
- Dessouassi, R. (1997) *Variabilité du niveau et de la qualité chimique des eaux souterraines dans le haut bassin du fleuve Niger au Mali. Comparaison avec la variabilité des écoulements de surface*. Rapport d'activité FRIEND-AOC, ORSTOM Bamako, Mali.
- Diabate, M. (1995) Etude des variations hydroclimatiques sur le bassin versant du Bani de 1950 à 1990. *Mémoire d'Ingénieur, Option Aménagements Hydrauliques, ENI/ORSTOM Bamako, Mali*.
- Laraque, A., Orange, D., Mahé, G., Marieu, B. & Olivry, J. C. (1996) Evolution des écoulements sur le versant droit du bassin zaïrois et répercussion sur le régime hydrologique du fleuve. In: *Journées Bultot, Tropical Climatology Meteorology and Hydrology*, 22–24. Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, Bruxelles.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P. & Mahé, G. (1993a) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? In: *Hydrology of Warm Humid Regions* (ed. by J. S. Gladwell) (Proc. Yokohama Symp., juillet 1993), 67–78. IAHS Publ. no. 216.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P., Bamba, F. & Diarra, M. (1993b) Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In: *Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques : Congo, Niger, Amazone* (ed. par J. C. Olivry & J. Boulegue) (Actes du Colloque PEGI-INSU-CNRS-ORSTOM, 22–24 novembre, Paris), 251–266.
- Orange, D., Wesselink, A., Mahé, G. & Feizoure, C. (1997) The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. In: *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty* (ed. by D. Rosbjerg et al.) (Proc. Rabat Symp. S1, avril–mai 1997), 113–123. IAHS Publ. no. 240.
- Soumaquel, A. (1996) Première exploitation des fichiers opérationnels des pluies sur le bassin versant du Niger: étude témoin. Rapport d'activité, programme FRIEND-AOC, ORSTOM Bamako, Mali.