

Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies

J.-C. OLIVRY, J. P. BRICQUET & G. MAHE

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

e-mail: j-claude.olivry@mpl.orstom.fr

Résumé Le régime des fleuves et rivières d'Afrique intertropicale, affecté par plus de deux décennies de déficit pluviométrique montre des hydrogrammes de crue réduits en volume et en durée et des maximums de crue nettement plus faibles. L'analyse des données conduit à évoquer un effet mémoire et cumulatif de la sécheresse réduisant la contribution de l'écoulement de base dans l'hydrogramme de crue. Ceci est confirmé par l'examen des crues de 1994 et 1995 sur le Niger à Koulikoro qui montre pour des années de bonnes précipitations la durabilité d'écoulements plus faibles que dans la période antérieure à 1970.

INTRODUCTION

Les déficits pluviométriques, observés globalement depuis plus de 25 ans en Afrique sub-saharienne, tant dans les zones soudano-sahéliennes que dans les zones tropicales humides, ont eu d'importantes conséquences sur la ressource en eau de ces régions. De nombreux travaux (Olivry, 1987; Mahé *et al.*, 1991, Olivry *et al.*, 1993; Bricquet *et al.*, 1996, 1997) ont montré qu'au delà d'une réponse annuelle immédiate de l'écoulement des cours d'eau à une saison des pluies déficitaire, une certaine durabilité du déficit hydrologique devait être imputée à l'effet cumulé des longues années de sécheresse. L'analyse du tarissement principal des fleuves et rivières a mis en évidence une augmentation importante du coefficient de tarissement, autrement dit une vidange beaucoup plus rapide des aquifères des bassins alimentant l'écoulement de base (Olivry, 1987; Olivry *et al.*, 1992; Olivry, 1997). L'effet mémoire de l'amenuisement des réserves souterraines explique la persistance des modifications apportées aux variables des régimes hydrologiques. Celles-ci, évidentes et souvent sérieuses en termes de gestion de la ressource pour les basses eaux et les étiages, sont aussi ressenties pour l'écoulement annuel et le régime des crues. Ce sont ces deux derniers aspects qui sont évoqués ici. L'analyse des données a porté sur l'ensemble des grands cours d'eau d'Afrique de l'ouest et du centre, où les mêmes phénomènes sont observés. L'exemple du Niger à Koulikoro (bassin de 120 000 km²) illustre cette variabilité de la puissance des crues et l'interprétation qui en a été faite.

ANALYSE DES DONNEES

Les données hydropluviométriques proviennent des banques de données des services nationaux gérant les réseaux hydrométriques et pluviométriques et ont été utilisées après critique et homogénéisation des chroniques sur la période 1951–1990. L'acquisition de données plus récentes varie suivant les pays. Sans rentrer dans le détail, on rappellera que non seulement les lames écoulées ont considérablement diminué dans les décennies 70 et 80 par rapport aux décennies humides qui ont précédé mais que le déficit hydrologique s'est accentué par rapport au déficit pluviométrique. Ainsi les coefficients d'écoulement de la décennie 80 sont tombés à 6% pour le Sénégal contre 12% en décennie humide, à 16% pour le Niger contre 28% dans les années 50 et 60, 12% sur l'Oubangui contre 20% en décennie humide, 8% pour le Bandama contre 16% dans les années 60. Par rapport à la moyenne 1951–1990, l'appauvrissement de la ressource en eau de la décennie 80 est de $375 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ (soit -16%) pour l'Afrique atlantique humide (y compris bassin du Zaïre), et de $65 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ (soit -27%) pour l'Afrique atlantique sèche. Le phénomène s'est donc accentué dans les années 80 alors que l'ampleur des déficits de précipitations tendait à diminuer et il est encore très significatif dans les années 90 en dépit de quelques années de bonnes précipitations.

L'analyse statistique des données a mis en évidence dans les travaux de Hubert *et al.* (1989) et de Lubès *et al.* (1995) une rupture majeure dans les séries chronologiques autour de l'année 1970 pour l'Afrique de l'ouest. Pour l'écoulement annuel, cela se traduit par l'observation de lames écoulées (Le) plus faibles pour de mêmes hauteurs moyennes de précipitations (P) depuis les années 1970. La Fig. 1 présente les deux relations $Le = f(P)$ obtenues sur le Niger à Koulikoro avant et après 1970. Généralement médiocres, car n'intégrant pas la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans la saison des pluies, entre autres variables

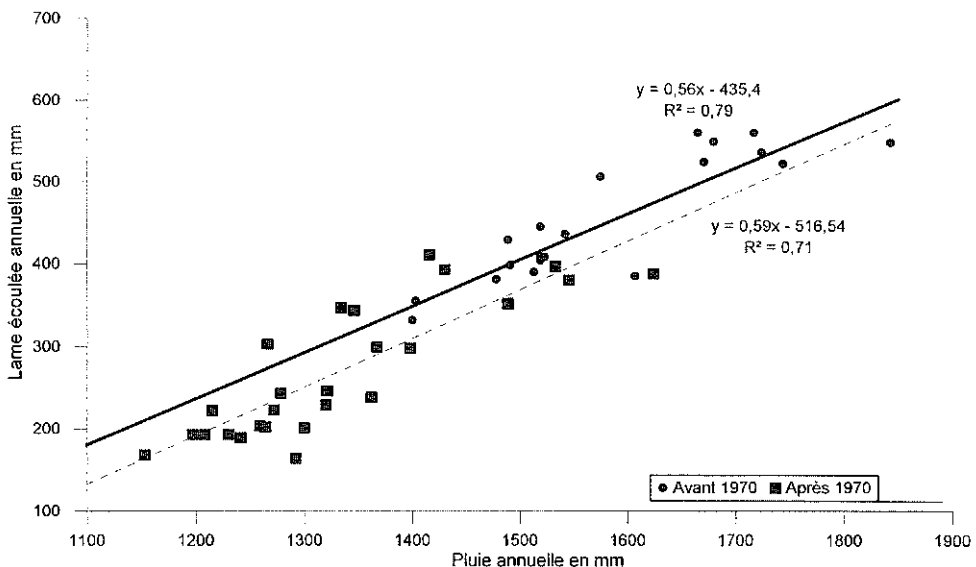


Fig. 1 Relation pluie-lame écoulée du Niger à Koulikoro de 1950 à 1996.

explicatives, ces relations admettent ici des coefficients de corrélation de 0.89 et 0.84. Le décalage entre les deux droites de régression montre un appauvrissement significatif de l'écoulement depuis 1970 de l'ordre de 50 mm, soit près de 20% de la moyenne de la décennie 80 qui ne peut être imputé qu'à une modification des conditions de l'écoulement.

ÉCOULEMENT ANNUEL ET PUISSANCE DES CRUES

L'examen des chroniques de débits maximums annuels montre une évolution historique pratiquement calquée sur celle de l'écoulement annuel; cela n'a rien d'étonnant car il n'est, en effet, pas abusif, pour les grands fleuves, de considérer le maximum annuel atteint comme une variable caractérisant le régime des crues et des hautes eaux, correspondant aux mois d'abondance pluviométrique, qui représentent l'essentiel de l'écoulement annuel.

Dans les études de prédétermination des crues, la non-stationnarité des séries, telle qu'elle a été mise en évidence, pose un réel problème dans l'évaluation des risques. La tentation est forte, en parlant de rupture climatique, de traiter deux populations différentes: avant et depuis la "grande sécheresse". La comparaison des prédéterminations ajustées aux différentes séries de valeurs (série complète, série antérieure à 1970, série de 1971 à 1992) montre le danger, pour un projeteur, de l'estimation des risques sur la seule période actuelle pour les crues exceptionnelles: 35% de sous estimation pour le Sénégal, 24% pour le Niger, 14% pour l'Oubangui, 9% pour le Congo par rapport à la série complète (cf. Tableau 1).

La comparaison des hydrogrammes de crue des différents fleuves étudiés montre dans la période actuelle deux types de situation:

- un hydrogramme tronqué sans maximum nettement affirmé correspondant à une saison des pluies normale en durée mais très déficitaire au coeur de la saison;
- un hydrogramme réduit en durée correspondant à une saison des pluies tardive ou écourtée.

Dans les deux cas, le volume de la crue et le maximum sont faibles. Les coefficients de pointe, évalués ici comme le rapport du débit maximum au module annuel, montrent que la tendance générale de la période actuelle est caractérisée par des hydrogrammes de crue plus étroits.

L'approche graphique qui consiste à mettre en relation le débit maximum de crue avec le module conduit au même type de conclusions. Si on traite séparément les deux échantillons (avant, après 1970), les relations obtenues sont différentes; on observe un décalage vers de plus faibles valeurs des modules pour les droites de

Tableau 1 Exemple de prédétermination des maximums annuels de crue sur le Niger à Koulikoro pour trois séries de valeurs.

| | Fréquence de retour sèche: | | | | Médiane | Fréquence de retour humide: | | | |
|-----------|----------------------------|------|------|------|---------|-----------------------------|------|------|------|
| | 100 | 50 | 20 | 10 | | 2 | 10 | 20 | 50 |
| 1907-1992 | 2260 | 2680 | 3300 | 3800 | 5590 | 7735 | 8290 | 8910 | 9330 |
| 1907-1970 | 3400 | 3730 | 4240 | 4690 | 6290 | 7880 | 8330 | 8840 | 9180 |
| 1971-1992 | 1340 | 1680 | 2200 | 2660 | 4280 | 5900 | 6360 | 6870 | 7220 |

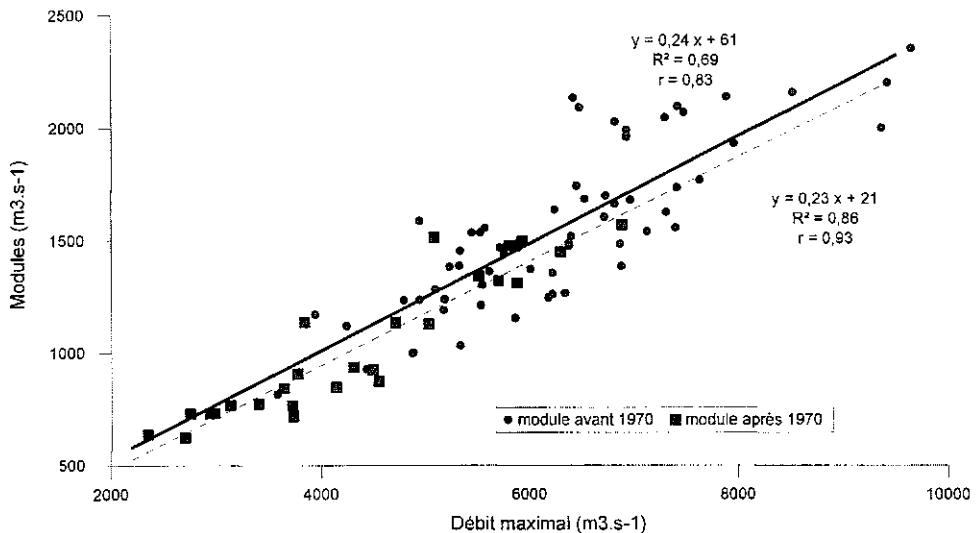


Fig. 2 Relation *Modules*/*Q*_{max} du Niger à Koulikoro avant et après 1970.

régression de la période actuelle. Cela signifie bien des coefficients de pointe de crue supérieurs à ceux de la période antérieure à 1970, et, par suite, que l'écoulement annuel est concentré sur un hydrogramme de crue de plus courte durée. Les coefficients de corrélation de ces relations apportent une information complémentaire. Ils sont plus élevés et montrent pour la plupart des fleuves des relations plus étroites entre les variables de la période actuelle, ce qui traduit encore la concentration de l'écoulement annuel sur l'hydrogramme de crue, sans les apports annexes qui donnaient des hydrogrammes plus irréguliers et étalés dans le temps dans la période antérieure. La Fig. 2 illustre pour le Niger à Koulikoro ce décalage des relations $Module = f(Q_{max})$ pour les deux périodes avec les coefficients de corrélations respectifs de 0.83 et de 0.93. La Fig. 3 donne un autre exemple de l'évolution de ces relations pour l'Oubangui à Bangui (480 000 km²).

Amointrissement de la puissance des crues annuelles, que ce soit en volume, durée ou débit maximum, ruptures dans les chroniques des maximums annuels de crue avec analyses fréquentielles contrastées, relations différentes entre écoulements annuels et maximums de crue pour les périodes humide et sèche, traduisent des changements importants dans les régimes hydrologiques d'Afrique de l'ouest et du centre. Les travaux antérieurs déjà cités en introduction ont montré qu'en plus de l'impact immédiat des variabilités climatiques, il était nécessaire de prendre en compte l'appauvrissement durable des apports de l'écoulement de base lié à une réduction des aquifères. Cette réduction de l'extension des aquifères et de leurs réserves a été mise en évidence dans l'étude du tarissement et des chroniques du coefficient de tarissement α de la loi de Maillet qui s'écrit: $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$ où t est le nombre de jours écoulés depuis l'observation du débit Q_0 . A l'appui de cette hypothèse sur l'incidence de l'écoulement de base dans l'écoulement déficitaire des cours d'eau, on relève une relation significative entre le coefficient d'écoulement

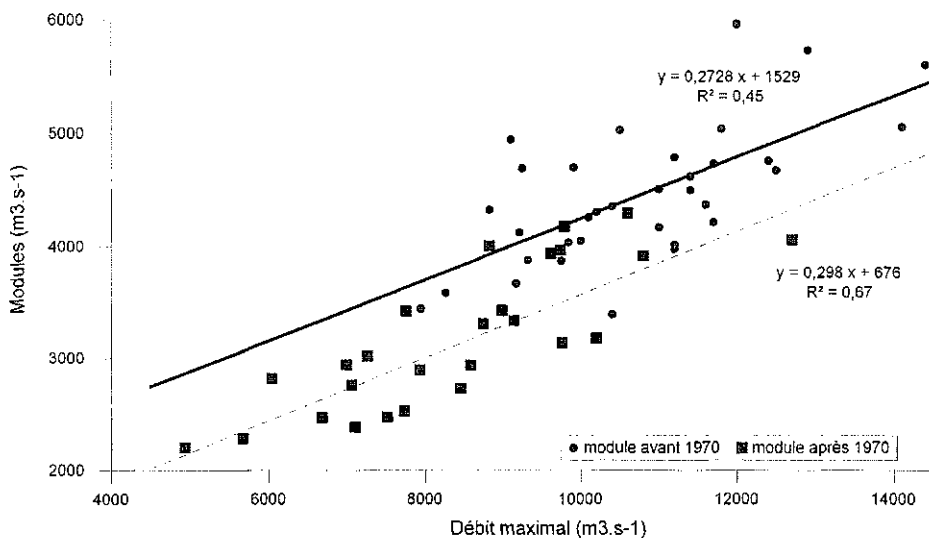


Fig. 3 Relation *Modules/Q_{max}* de l'Oubangui à Bangui avant et après 1970.

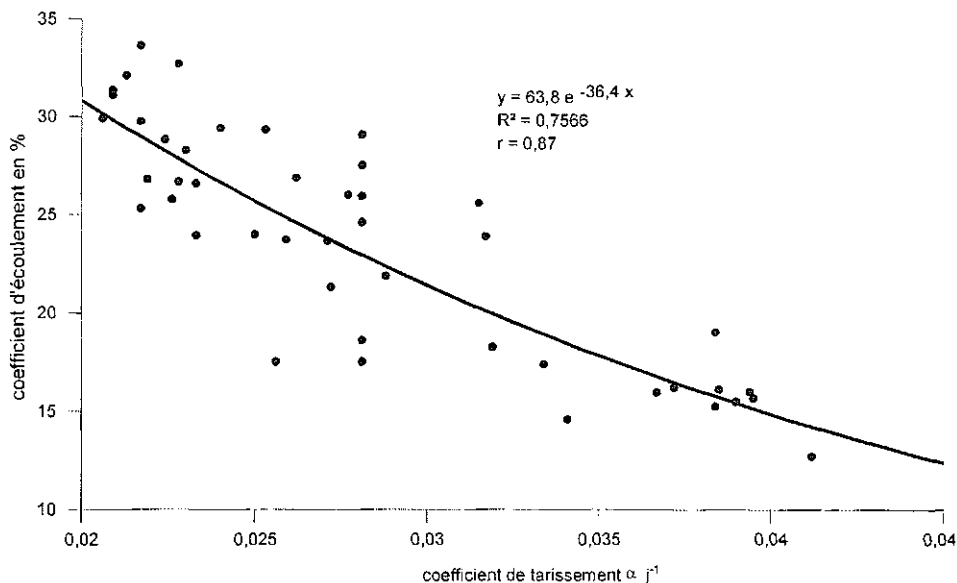


Fig. 4 Relation entre le coefficient de tarissement de l'année $x - 1$ et le coefficient d'écoulement de l'année x montrant l'incidence des réserves souterraines et de l'écoulement de base dans le bilan annuel.

annuel (Ke) et le coefficient de tarissement α . Pour le Niger à Koulikoro, cette relation, donnée dans la Fig. 4, s'écrit: $Ke\% = 63.8e^{-36.4\alpha}$, avec un coefficient de corrélation de 0.87.

INCIDENCE DE LA BAISSÉ DES ECOULEMENTS DE BASE SUR LES HYDROGRAMMES DE CRUE

Que ce soit pour les étiages, l'écoulement annuel ou les maximums de crue, les observations récentes montrent donc une certaine durabilité du déficit hydrologique dans le même temps où les précipitations voient leur déficit diminuer. On constate notamment que pour des saisons des pluies équivalentes le maximum de crue de la période actuelle reste nettement plus faible que dans le passé.

Ainsi, sur le bassin du Niger, les précipitations se sont rapprochées de la normale en 1991 pour la plus grande satisfaction des populations rurales dont les cultures pluviales ont été de bon niveau, mais le fleuve lui-même n'a pas marqué de réaction très sensible. La même année, des études du ruissellement sur petits bassins représentatifs au Mali ont permis d'observer quelques événements pluviométriques journaliers intenses, dont certains de fréquence décennale, et des conditions générales de genèse des crues sans modification significative par rapport aux observations effectuées une trentaine d'années auparavant. Ces observations rejoignent les conclusions de nombreux auteurs (Pouyaud, 1987; Joignerez *et al.*, 1995). A l'échelle de grands bassins, il est donc permis de penser que dans de mêmes

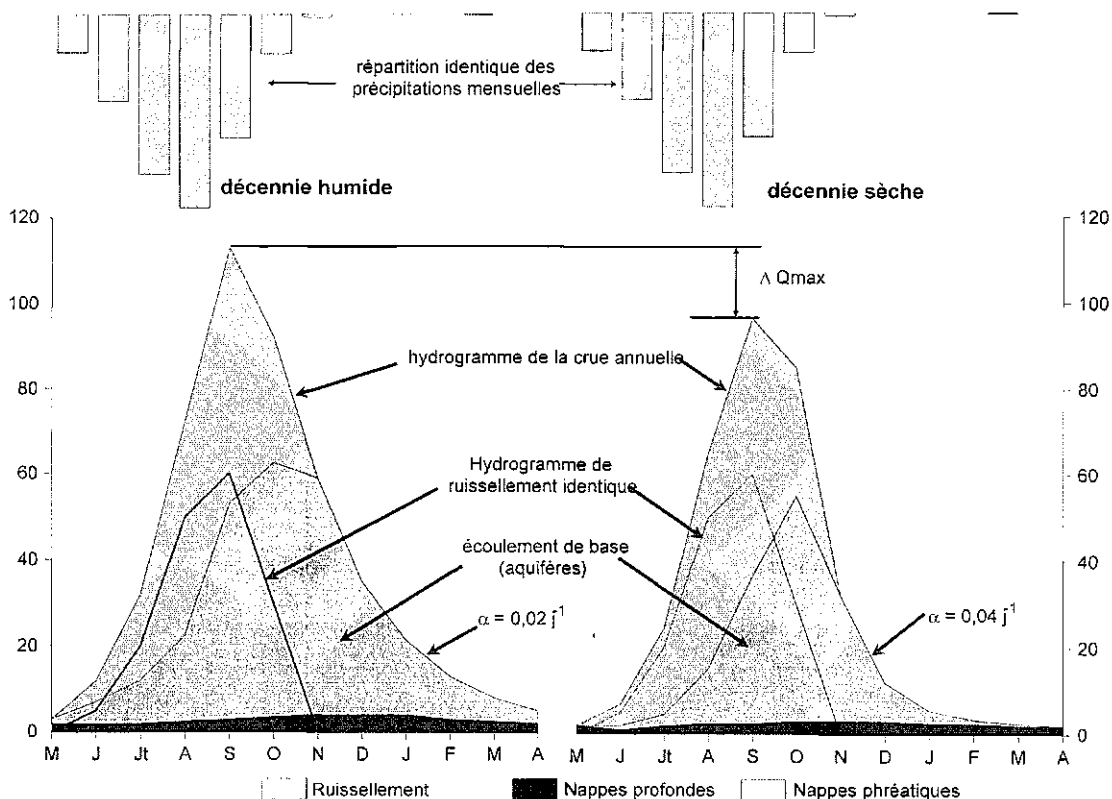


Fig. 5 Schéma explicatif de la variabilité des hydrogrammes de crue pour une même saison des pluies en période humide et en période sèche.

conditions pluviométriques, la contribution à l'hydrogramme de crue des écoulements rapides (ruissellement et écoulement hypodermique) sera identique.

Dans ce qui précède, on a vu qu'il faut rechercher la persistance de l'amoinissement de la puissance des crues dans une contribution réduite des apports d'origine souterraine et en particulier dans une réduction de l'extension des nappes de versant des bassins (nappes phréatiques), leur alimentation n'étant plus assurée dans des conditions aussi favorables par suite d'une baisse importante du niveau piézométrique. La part de cet écoulement de base est difficile à chiffrer sur les grands bassins; elle est probablement plus importante qu'on ne l'imaginait, mais a considérablement diminué dans la période actuelle.

Olivry (1994) a proposé un schéma théorique de composition de ces écoulements pour deux hydrogrammes annuels de crue correspondant aux périodes étudiées (décennie humide et décennie sèche) résultant de conditions pluviométriques identiques en hauteurs de précipitations et en répartition. On pose l'hypothèse que le volume "ruisselé" est le même; le volume d'origine phréatique ("écoulement de base") est déduit de la courbe du tarissement principal, beaucoup plus rapide en décennie sèche. La composition des deux écoulements donnent des hydrogrammes montrant un maximum de crue et un volume nettement plus faibles dans la situation sèche actuelle. Ce schéma a été reproduit dans la Fig. 5.

LES CRUES OBSERVEES SUR LE NIGER EN 1994 ET EN 1995

En 1994, la crue du Niger a atteint à Koulikoro une cote inégalée depuis de nombreuses années, bien qu'à peine supérieure à la valeur médiane calculée sur 86 ans. La hauteur moyenne de précipitations reçues par le bassin est de 1670 mm, ce qui place l'année 1994 au cinquième rang des années fortes de la période 1951-1990 (fréquence vicennale humide). Dans la perspective de comparer l'écoulement de l'année hydrologique 1994-1995 à celui observé en période humide, une année de précipitations "équivalente" a été déterminée à partir des années 1953, 1955, 1957, 1967 et 1969 dont le total annuel est voisin de celui de 1994. La moyenne annuelle de ces années est de 1660 mm.

Le maximum de crue 1994 a été de $5800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, légèrement supérieur à la moyenne; c'est la plus forte crue observée depuis 1979 et la quatrième en importance depuis la sécheresse (1974: $6300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; 1975: $6890 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; 1979: $5930 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Le module est de $1430 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, à peine supérieur à la moyenne de $1360 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. L'hydraulicité est de 1.05 alors que la pluviosité est de 1.15. L'année "équivalente" en période humide a un maximum de crue de $6500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et un module de $2040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, soit des valeurs nettement plus élevées qu'en 1994. La comparaison des valeurs des coefficients de tarissement, respectivement de 0.036 jour^{-1} en 1994 et de 0.022 jour^{-1} en année "équivalente", confirme les hypothèses d'un appauvrissement des écoulements essentiellement dû à celui des aquifères alimentant l'écoulement de base.

Le Tableau 2 résume ces observations sur le bilan hydrologique du bassin pour l'année moyenne, l'année 1994-1995 et l'année équivalente. Le coefficient d'écoulement de la crue de 1994 est inférieur de 9% à l'année moyenne, pour une

Tableau 2 Comparaison de la saison 1994–1995 avec 1951–1990 et la moyenne des années de pluviométrie équivalente.

| | 1951–1990 moyenne | 1994–1995 période sèche | Année équivalente période humide |
|----------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Pluviométrie mm | 1445 | 1670 | 1660 |
| Lame écoulée mm | 357 | 376 | 537 |
| Coef. écoulement % | 24.7 | 22.5 | 32.3 |
| Tarissement α | 28.5 | 36.0 | 22.2 |

pluviométrie excédentaire de 15%. Il est inférieur de 30% à celui de l'année équivalente et le coefficient de tarissement est supérieur de 60%.

L'année 1995 est de pluviométrie moindre mais plus concentrée sur les mois de hautes eaux; la moyenne reçue par le bassin est de 1350 mm. Le maximum de crue est légèrement supérieur à celui de 1994 avec $5880 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mais le module calculé sur l'année 1995–1996 n'est que de $1309 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, soit une lame écoulée de 344 mm et un coefficient d'écoulement de 25.6%. Le coefficient de tarissement a légèrement diminué (0.0315 jour^{-1}) et suggère un début de réalimentation des nappes consécutive à l'abondance de l'année 1994 et une meilleure contribution de l'écoulement de base.

On a comparé dans la Fig. 6 les hydrogrammes de la séquence 1994–1996 à ceux des deux années 1925 et 1926 observées en séquence humide et dont les précipitations, respectivement de 1640 et 1380 mm, sont très voisines des observations récentes. Les coefficients de tarissement, 0.0235 puis 0.022 jour^{-1} , indiquent un bon remplissage des aquifères, qui, dans le cas de l'année 1925, conjugué à une répartition favorable des précipitations, aboutit à la crue exceptionnelle du siècle avec un maximum de $9900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La figure est complétée par l'hydrogramme moyen établi pour l'année "équivalente" en période humide de 1994–1995.

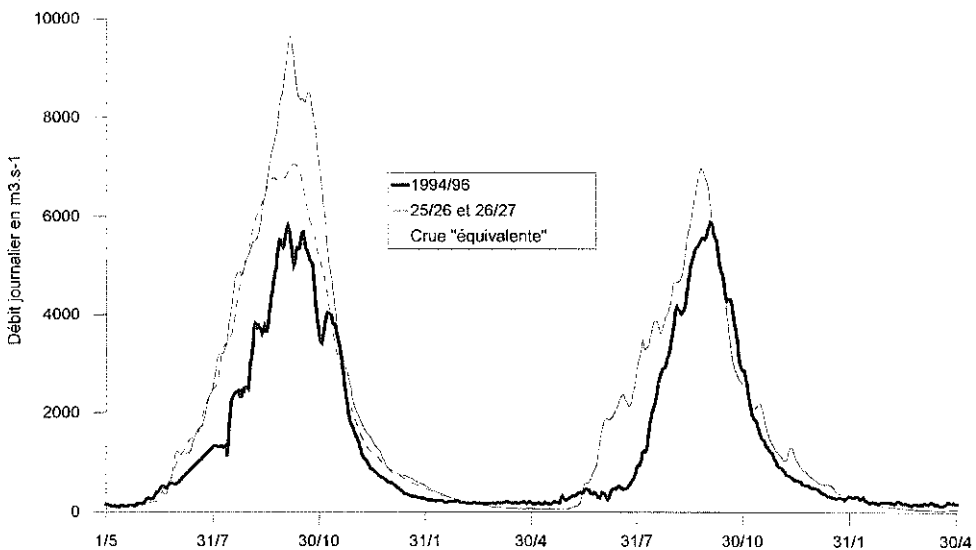


Fig. 6 Hydrogrammes comparés du Niger à Koulikoro des années 1994 et 1995 (période sèche), des années 1925 et 1926 (période humide) et de l'année "équivalente" en période humide à l'année 1994.

CONCLUSIONS

Sans remettre en cause l'importance de la répartition spatio-temporelle des précipitations sur la variabilité des écoulements de crue des grands cours d'eau tropicaux, les observations récentes confirment que la contribution moindre des écoulements de base, du fait d'apports réduits des nappes phréatiques, est un phénomène durable dans le bilan hydrologique. Cette persistance de maximums de crue plus faibles que ceux observés avant 1970 constitue une modification importante des régimes hydrologiques dans une période où les années de fortes précipitations restent un aléa climatique isolé dans la séquence sèche. Un retour à des conditions hydrologiques antérieures nécessitera une reconstitution des aquifères superficiels qui suppose une série assez longue d'années consécutives de bonnes précipitations. Il paraît difficile de ne pas tenir compte de cette composante pluriannuelle dans les projets de modélisation régionale et de gestion de la ressource en eau.

REFERENCES

- 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* (éd. par P. Chevallier & B. Pouyaud) (Actes de la conférence de Paris, mai 1995), 157-166. IAHS Publ. no. 238.
- Bricquet, J. P., Bamba, F., Mahé, G., Touré, M. & Olivry, J. C. (1997) Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *Revue des Sciences de l'Eau* 10(3), 321-337.
- Huhert, P., Carbonnel, J. P. & Chaouch, A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol.* 110, 349-367.
- Joignerez, A., Guiguen, N. & Olivry, J. C. (1995) Evaluation des ressources en eau non pérennes: méthode de régionalisation des résultats observés. In: *Régionalisation en hydrologie* (éd. by Le Barbé & E. Servat) (VIIIèmes Journées Hydrologiques de Montpellier, septembre 1992), 343-361. Coll. et Séminaires ORSTOM, Paris, France.
- Lubés, H., Aka, A., Masson, J. M., Servat, E., Paturel, J. E. & Kouamé, B. (1995) Essai de mise en évidence d'une variation climatique par application de tests statistiques à des séries chronologiques de débit. Application aux grands fleuves de Côte d'Ivoire. In: *Statistical and Bayesian Methods in Hydrological Sciences* (Proc. Int. Conf. in Honour of J. Bernier, September 1995). UNESCO, Paris, France.
- Mahé, G. & Olivry, J. C. (1991) Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuel. In: *Hydrology for the Water Management of Large River Basins* (éd. by F. H. M. Van de Ven, D. Gutnecht, D. P. Loucks & K. A. Salewitz) (Congrès AISH Vienne, Autriche, août 1991), 163-172. IAHS Publ. no. 201.
- Olivry, J. C. (1987) Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (éd. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987), 501-512. IAHS Publ. no. 168.
- Olivry, J. C. (1994) De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. In: *Potamologie d'hier et d'aujourd'hui, aménagements et cours d'eau* (Actes des Journées hydrologiques—Centenaire Maurice Paré, Grenoble, septembre 1993), 101-112. Les dossiers de la revue de Géographie Alpine no. 12.
- Olivry, J. C. (1997) Long term effects of rain shortage: the ill rivers of Western and Central Africa. *FRIEND General Report/UNESCO IHP V. UNESCO*, 158-162. Paris, France.
- Olivry, J. C., Sircoulon, J. & Touré, M. (1992) *The Ill Rivers of Africa*. Colloque ICID Impactos de variacoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regioes semi-aridas, Fortaleza, Brazil, janvier 1992.
- 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* (éd. by J. S. Gladwell) (Proc. Yokohama Symp., July 1993), 67-78. IAHS Publ. no. 216.
- 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 Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (éd. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg) (Proc. Vancouver Symp., August 1987), 447-461. IAHS Publ. no. 168.