

Influences de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin sahélien

**LUC SEGUIS, BERNARD CAPPELAERE,
CHRISTOPHE PEUGEOT, CHRISTIAN LEDUC &
GÉRALDINE MILESI**

*UMR, HydroSciences, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), France
seguis@mpl.ird.fr*

Résumé Le Sahel par son aridité est particulièrement sensible à toute modification climatique ou environnementale. Pour les petits bassins sahéliens, il existe très peu de séries hydrologiques continues sur le dernier demi-siècle pour évaluer les impacts climatique et anthropique sur l'écoulement. Sur un petit bassin du sud-ouest nigérien, à l'aide d'un modèle hydrologique distribué à base physique, nous analysons la sensibilité des écoulements aux modifications climatiques (diminution de la précipitation moyenne annuelle de 24% après 1970) et environnementales (cultures passant de 6% du bassin en 1950 à 57% en 1992). L'analyse montre une plus grande sensibilité de l'écoulement aux changements anthropiques que climatiques. Globalement, malgré la sécheresse depuis 1970, les écoulements moyens annuels auraient augmenté de 30% sous l'action du défrichement. Ces résultats confirment la hausse paradoxale de la nappe sous-jacente observée depuis 50 ans.

Mots clefs défrichement; modélisation pluie-débit; nappe; ruissellement; Sahel; sécheresse

Key words land-clearing; rainfall-runoff modelling; runoff; groundwater; Sahel; drought

INTRODUCTION

Le Sahel par son aridité est particulièrement sensible à toute modification climatique ou environnementale sous l'action de l'homme. Pour les petits bassins sahéliens, il existe très peu de séries hydrologiques continues sur le dernier demi-siècle permettant d'évaluer les impacts climatique et anthropique sur l'écoulement. Sur deux bassins du Burkina Faso (700–950 mm de pluie), Albergel (1987) montre au moyen d'un modèle hydrologique que la diminution actuelle du total pluviométrique semble être compensée par les modifications du milieu (mise en culture) dans le fonctionnement hydrologique de ces petits bassins.

Au Niger occidental, Leduc *et al.* (2001) mettent en évidence la remontée de la nappe du Continental Terminal depuis 40 ans et l'attribuent à une mise en culture qui aurait entraîné une augmentation du ruissellement vers des mares, sites privilégiés d'infiltration vers la nappe. Dans cet article, pour conforter l'hypothèse émise par Leduc *et al.* (2001), nous proposons d'évaluer au moyen d'un modèle hydrologique l'évolution des écoulements d'un petit bassin versant de la région sur le demi-siècle passé, en relation avec les modifications de la pluviométrie et du couvert végétal. Dans la première partie, nous présenterons successivement le bassin versant puis la méthodologie de modélisation en fonction des données disponibles. Ensuite, les résultats des simulations nous permettront de dégager les influences respectives du

climat et des modifications anthropiques sur la ressource en eau de surface. Enfin, nous évaluerons les conséquences sur la nappe de l'évolution de l'écoulement de surface.

LE BASSIN VERSANT DE WANKAMA ET SON ÉVOLUTION DEPUIS 1950

Le paysage de la région à l'est de Niamey se présente sous la forme de plateaux cuirassés entaillés par de larges vallées fossiles appelées localement *koris*. Ce réseau hydrographique n'est plus fonctionnel. Durant la saison des pluies (juin-septembre), les fonds de vallées sont occupés par un chapelet de mares collectant le ruissellement des versants. La dégradation hydrographique caractérisé par des interruptions des écoulements concentrés est le trait majeur du fonctionnement hydrologique. Le bassin test de Wankama (1.9 km², pente moyenne de 2%) s'étage entre le plateau et la vallée d'un *kori*. A mi-pente, le drain principal se scinde en de multiples défluent formant une zone d'épandage. Le reliquat des écoulements ayant franchi la zone d'épandage se reconcentre à la faveur d'apports ruisselés sur les parties aval du bassin pour aboutir à une mare. La nappe du Continental Terminal est à environ 15 m sous le fond de la mare.

Nous disposons de photographies aériennes en 1950 et 1975 ainsi que d'images SPOT en 1992. Sur les photographies de 1950 et 1975, il est difficile de quantifier l'extension de la zone d'épandage.

La caractérisation des états de surface est dérivée d'une classification SPOT en 1992 (d'Herbès & Valentin, 1997) et de la photo-interprétation des photographies aériennes en 1950 et 1975. En 1950, le bassin versant présente une végétation naturelle de savane arbustive, les cultures n'occupent que 6% du bassin (Tableau 1 et Fig. 1). En 1975, le système jachère-culture représente 17% de la superficie du bassin, les champs se situent dans la partie aval du bassin. La mise en culture s'accompagne d'une croissance des surfaces dégradées, zones de fort encroûtement à végétation faible à nulle. En 1992, le système jachère-culture est majoritaire sur le bassin (56%). Ce changement majeur du paysage est à mettre en parallèle avec l'explosion démographique de la zone (Loireau, 1998).

À partir des cartes de couvert végétal et des classifications des états de surface (Casenave & Valentin, 1992; Desconnets *et al.*, 1996), nous avons construit des cartes de conductivité hydraulique à saturation (K_s) et de coefficient de rugosité de Manning (n) à chacune des dates. Les K_s moyens sur le bassin sont respectivement de 57, 45 et

Tableau 1 Surface et caractéristiques hydrauliques des états de surface sur le bassin de Wankama.

Classe	Superficie (%):			K_s ($\times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$)	n ($\times 10^{-3} \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$)
	1950	1975	1992		
Culture	6.0	13.4	53.9	36	130
Jachère	0.0	3.2	1.9	56	149
Savane claire	57.4	55.9	23.9	56	174
Savane dense	19.1	0.0	0.0	56	200
Fourré	8.6	4.3	0.2	111	277
Sol dégradé	3.1	9.4	6.4	8	46
Sol très dégradé	3.6	11.9	10.5	11	15
Végétation claire de plateau	1.4	0.0	0.5	111	277
Sol nu de plateau	0.8	1.9	2.6	6	20

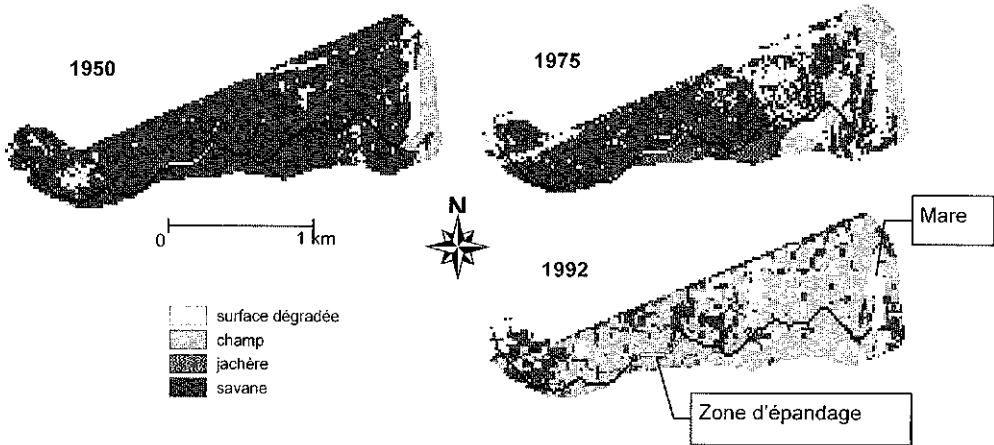


Fig. 1 États de surface du bassin de Wankama en 1950, 1975 et 1992 (résolution 20 m).

$37 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ en 1950, 1975 et 1992. Aux mêmes dates, n est égal à 176, 138 et $122 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$. À l'échelle globale du bassin versant, le ruissellement devrait augmenter de l'état de surface 1950 à celui de 1992 car l'infiltration (K_s) diminue et le temps de transfert proportionnel à n diminue.

Pour le bief, K_s est fixé à $1250 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ (450 mm h^{-1}) et n à $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$, valeur représentative d'un lit sableux propre.

LE MODELE HYDROLOGIQUE ET LES SIMULATIONS

Les simulations sont entreprises avec le modèle distribué événementiel à base physique r.water.fea (Vieux & Gaur, 1994) sous le SIG GRASS. Les fonctions de production (équation de Green et Ampt) et de transfert (onde cinématique et relation de Manning) sont couplées, ce qui laisse la possibilité à l'écoulement produit en un point de s'infiltrer plus en aval (run-on process) (Séguis *et al.*, 2002).

Le modèle a été calé et validé sur un échantillon de crues de la période 1992–1998 (Peugeot *et al.*, 2003). Les paramètres de calage sont des coefficients multiplicateurs des cartes de K_s et de n . Pour tenir compte des incertitudes sur les simulations (Cappelaere *et al.*, 2003), le modèle est utilisé ici avec une gamme de paramètres permettant de reproduire correctement 75% des événements, les 25% restant étant majoritairement des petits événements.

Pour chacun des trois états du bassin, nous calculons les écoulements de 1950 à 1998. La chronique de pluie de longue durée la plus proche du bassin est celle de Niamey Aéroport (60 km), supposée représentative à long terme des pluies à Wankama (Lebel *et al.*, 1997). La précipitation annuelle passe de 646 mm avant 1969 à 493 mm après (–24%). La baisse et la date de la rupture sont comparables à celles déterminées en d'autres sites sahéliens. Nous distinguons une période humide (1950–1969) et une période sèche (1970–1998).

La pluie journalière est connue sur toute la période mais des lacunes existent dans les hyétogrammes au pas de 5 min. Pour combler les lacunes et disposer d'une série

complète, les hyétoigrammes absents (38%) sont tirés aléatoirement parmi les hyétoigrammes de cumul correspondant. Sur un jeu de cinq chroniques générés, nous avons vérifié que l'incidence du tirage est mineure que ce soit sur la précipitation annuelle ou via le modèle sur la lame écoulée reconstituée. L'ensemble du travail est donc réalisée avec une série parmi les cinq.

La taille de la zone d'épandage étant peu discernable sur les photographies de 1950 et 1975, nous avons effectué les simulations en considérant la zone d'épandage à sa taille actuelle (225 m de large sur 400 m de long) ou en la négligeant (largeur égale à 2 m soit équivalente à celle des autres tronçons de la ravine). L'ensemble des simulations réalisées s'élève à 144 (24 jeux de paramètres, trois cartes d'états de surface, deux largeurs de zone d'épandage).

RESULTATS

Modifications environnementales

La Fig. 2 présente pour une zone d'épandage de 2 m de large les lames écoulées annuelles simulées pour chaque état du bassin, avec l'intervalle d'incertitude sur les valeurs simulées. Quelle que soit l'année, le ruissellement calculé avec le jeu de paramètres optimal augmente de l'état 1950 à l'état 1992. Il n'y a superposition des lames écoulées qu'entre l'état intermédiaire (1975) et les deux extrêmes (1950 ou 1992). Calculé sur la période 1950–1998, l'écoulement moyen annuel triple en passant du bassin dans l'état 1950 "naturel" au bassin dans l'état 1992 "cultivé".

En augmentant la largeur de la zone d'épandage fortement filtrante, l'écoulement moyen annuel pour chaque état du bassin diminue de 20% environ. Les variations de l'écoulement liées à une modification de la zone d'épandage apparaissent du second ordre en comparaison de celles liées à la modification du couvert végétal.

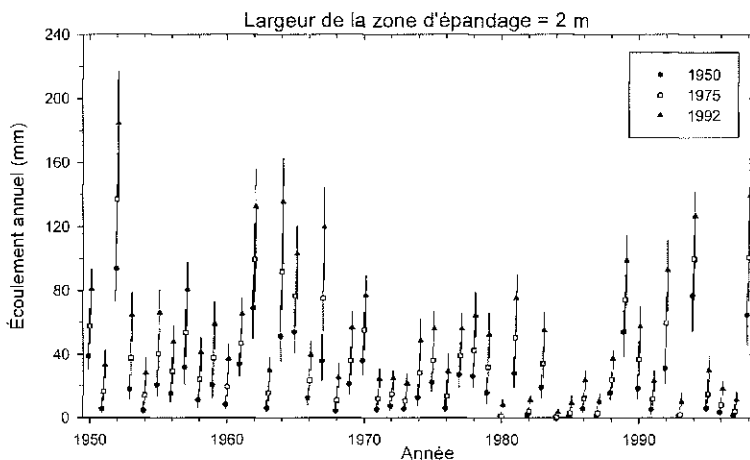


Fig. 2 Lame écoulée annuelle pour les trois cartes d'état de surface (1950, 1975 et 1992). Pour chaque année, les trois valeurs d'écoulement correspondent au jeu optimal et aux deux jeux de paramètres donnant les lames écoulées minimale et maximale.

Modification climatique

Pour chaque état du bassin, nous comparons les lames écoulées moyennes simulées sur la période humide (1950–1969) et sèche (1970–1998). La diminution des précipitations (–23%) entre les deux périodes est amplifiée pour les écoulements (–38 à 40%) (Tableau 2). Cette amplification est la même quels que soient l'état du bassin et la largeur de la zone d'épandage.

Tableau 2 Ruissellement annuel moyen (V) et rapport pour les deux périodes climatiques (1950–1969 et 1970–1998).

	Pluie (mm)	Zone d'épandage 2 m:			Zone d'épandage 225 m:		
		V_{1950} (mm)	V_{1975} (mm)	V_{1992} (mm)	V_{1950} (mm)	V_{1975} (mm)	V_{1992} (mm)
Période 1950–1969	645.8	27.7	47.2	71.6	21.1	38.8	58.1
Période 1970–1998	497.7	17.2	28.6	44.7	13.0	23.3	36.3
Déficit relatif sec sur humide	0.23	0.38	0.40	0.37	0.38	0.39	0.38

Modification conjointe du climat et de l'environnement

En fonction de la taille retenue de la zone d'épandage en 1950, l'écoulement moyen annuel simulé augmente de 31 ou 72% pour le scénario le plus probable d'évolution du bassin durant les 50 dernières années (passage du couvert 1950, associée à une période humide, au couvert 1992 avec une zone d'épandage de 225 m et une période sèche).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les simulations hydrologiques mettent en évidence la plus grande sensibilité des écoulements au changement environnemental qu'au changement climatique. En effet, en considérant uniquement le changement environnemental, les écoulements sont multipliés par trois alors que la péjoration climatique des 50 dernières années n'engendre une diminution des écoulements que d'un rapport 0.6 seulement (Tableau 2).

L'hypothèse avancée par les hydrogéologues du rôle des modifications environnementales dans la hausse de la nappe est confirmée par nos simulations. La mise en culture compense, en terme d'écoulement, la sécheresse survenue depuis 1970 (multiplication des écoulements par 1.3 à 1.7).

Cette amplification des écoulements est à mettre en parallèle avec l'évolution de la nappe. Par des analyses radio-isotopiques sur une zone de 4000 km² englobant le bassin de Wankama, Favreau *et al.* (2002) ont estimé le taux de renouvellement de la nappe en 1960 entre 0.6 et 5 mm an⁻¹. Un suivi du niveau piézométrique de 1960 à 1998 a permis de déterminer un taux de renouvellement de 10 à 30 mm an⁻¹ soit 6 à 17 fois plus qu'en 1960.

La première explication pour justifier la différence entre l'analyse hydrogéologique et nos simulations hydrologiques serait que le bassin versant de Wankama n'est pas caractéristique des modifications environnementales de l'ensemble

de la zone sur laquelle est fondée l'interprétation hydrogéologique. Pourtant, ce bassin versant présente un des plus forts taux de mise en culture de la région. L'augmentation du ruissellement sur ce bassin est donc au moins, si ce n'est plus, importante que celle retrouvée sur l'ensemble de la zone.

Une autre hypothèse plus plausible est la suivante : du fait de la mise en culture de 1950 à nos jours, de nouvelles mares sont apparues dans le paysage impliquant une multiplication des sites d'infiltration préférentielle vers la nappe ces 50 dernières années.

REFERENCES

- Albergel, J. (1987) Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface: application aux petits bassins du Burkina Faso. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*. (Proc. Vancouver Symp.). 355-365. IAHS Publ. no.168.
- Casnavé, A. & Valentin, C. (1992) A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrol.* **130**, 231-249.
- Cappelaere, B., Vieux, B. E., Peugeot, C., Maia, A. & Séguis L. (2003) Hydrologic process simulation of a semi-arid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: II. Model calibration and uncertainty characterization. *J. Hydrol.* (submitted).
- Descornets, J. C., Vieux, B. E., Cappelaere, B. & Delclaux, F. (1996) A GIS for hydrological modelling in the semi-arid, HAPEX-Sahel experiment of Niger, Africa. *Trans. in GIS I*, 82-94.
- Favreau, G., Leduc C., Marlin, C., Dray, M., Taupin, J. D., Massault, M., Le Gal La Salle, C. & Babic M. (2002) Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from ^3H and ^{14}C modeling. *Groundwater* **40**, 144-151.
- d'Herbes, J. M. & Valentin, C. (1997) Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications. *J. Hydrol.* **188-189**, 18-42.
- Lebel, T., Taupin, D. & D'Amato, N. (1997) Rainfall monitoring during Hapex-Sahel. I. General rainfall conditions and climatology. *J. Hydrol.* **188-189**, 74-96.
- Leduc, C., Favreau, G. & Schroeter, P. (2001) Long-term rise in a Sahelian water-table: the continental terminal in south-west Niger. *J. Hydrol.* **243**, 43- 54.
- Loireau, M. (1998) Espaces, ressources, usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. Thèse. Montpellier III, France.
- Peugeot, C., Cappelaere, B., Vieux, B.E., Séguis, I. & Maia, A. (2003). Hydrologic process simulation of a semi-arid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: I. Model-aided data analysis and screening. *J. Hydrol.* (submitted).
- Vieux, B. E. & Gaur, N. (1994) Finite-element modeling of storm water runoff using GRASS GIS. *Microcomputers in Civil Engineering* **9**, 263-270.