

Associer données et modèle incertains: une expérience en petit bassin sahélien

B. CAPPELAERE, C. PEUGEOT, L. SEGUIS, A. MAIA

UMR HydroSciences, IRD, BP 64501, F-34394 Montpellier, France

bernard.cappelaere@msem.univ-montp2.fr

B. VIEUX

University of Oklahoma, 202 West Boyd Street - CEC334, Norman, Oklahoma 73019, USA

Résumé Le système endoréique de Wankama, situé à l'est de Niamey et représentatif du paysage hydrologique de cette région du Niger occidental, est constitué d'une mare suivie en continu depuis 1992 et de son bassin-versant. Pour étudier le renouvellement de la ressource, un modèle des écoulements a été établi sur la base des événements observés pendant neuf années, par une représentation distribuée des mécanismes d'infiltration et de ruissellement. Il a été utilisé pour la critique des données et pour en combler les lacunes. Sa calibration, basée sur une fonction de performance du modèle reflétant les caractéristiques particulières du problème, vise en particulier à restituer l'incertitude de modélisation. L'exploitation présentée consiste à établir le bilan des écoulements saisonniers sur la période. Elle montre notamment que la modélisation événementielle est indispensable, et qu'une calibration purement déterministe induirait un certain biais.

Mots-clés analyse de données; bassin endoréique; calage; incertitude; modélisation hydrologique distribuée; Sahel; validation

Key words data analysis; endorheic watershed; calibration; uncertainty; distributed hydrologic modelling; Sahel; validation

INTRODUCTION

Une expérience de modélisation est menée sur un petit bassin-versant sahélien caractéristique de la région à l'est de Niamey (Niger, Fig. 1) et suivi en continu depuis 1992, initialement dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel. Elle s'inscrit dans une étude de l'évolution de la ressource en eau à l'échelle régionale dans ce paysage caractérisé par une juxtaposition de bassins-versants endoréiques alimentant des mares temporaires. On en présente certains aspects méthodologiques particuliers et les résultats principaux, ainsi qu'une première application du modèle à l'estimation des bilans saisonniers du bassin sur neuf années. La description détaillée du bassin, des données, de leur analyse, du modèle et de sa calibration est présentée dans Cappelaere *et al.* (2003) et Peugeot *et al.* (2003).

Le bassin-versant de la mare de Wankama (1.9 km², Fig. 2), à 70 km de Niamey, est équipé depuis 1992 de deux pluviographes à augets et d'un limnigraphe mesurant en continu le niveau de la mare. Les hydrogrammes sont obtenus par différenciation du limnigramme, compte-tenu de la relation niveau-surface de la mare. La modélisation s'appuie sur le modèle hydrologique distribué à bases physiques r.water.fea (Vieux &

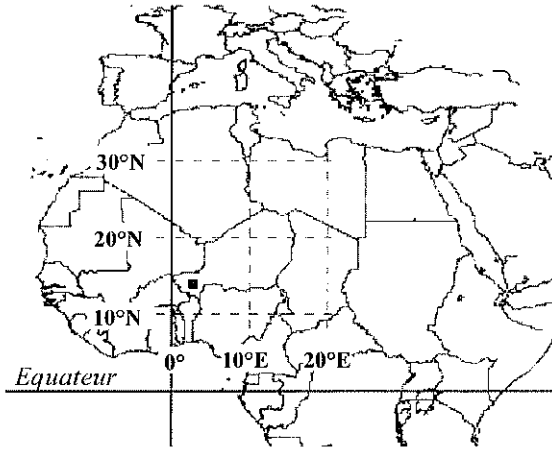


Fig. 1 Carte de situation de la zone d'étude (■) au Niger (grisé).

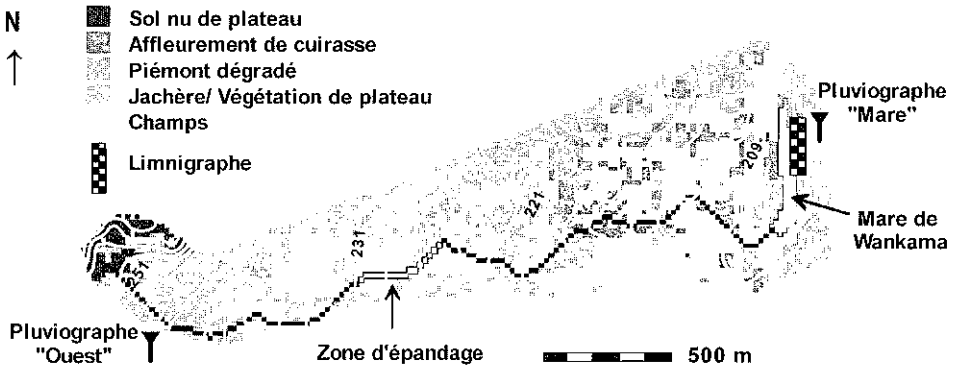


Fig. 2 Bassin-versant de Wankama: états de surface, réseau hydrographique, courbes de niveau (tous les 2 m), et dispositif expérimental.

Gaur, 1994), fondé sur la résolution couplée des équations de Green-Ampt et de l'onde cinématique pour une grille régulière bidimensionnelle. Ce modèle a été en partie remanié pour les besoins de l'étude, et a été utilisé avec une résolution spatio-temporelle de $20\text{ m} \times 1\text{ min}$. Les valeurs initiales (avant calage) des paramètres du modèle (conductivités hydrauliques à saturation, rugosités hydrauliques) sont estimées à partir de la cartographie des conditions de surface sur le bassin (D'Herbès & Valentin, 1997). Les difficultés pratiques propres à la réalisation d'un suivi de longue durée d'un bassin-versant en Afrique sahélienne ont des conséquences sur le contenu en information des données acquises et les incertitudes associées à celles-ci.

REGLAGE DU MODELE

Le test du modèle avant calage a montré des résultats encourageants. Il a été calibré sur les saisons 1992 à 1998, avant que les années 1999 et 2000 ne permettent de tester et

valider cette calibration. Une analyse critique approfondie des données pluie–recharge de mare a conduit à restreindre à 73 événements l'échantillon de calage et à 24 celui de test/validation. La mise en communication de mares adjacentes est l'une des circonstances conduisant au rejet de certains événements; celle-ci étant cependant incomplètement observée jusqu'en 1998 inclus, la détection en a été complétée par une étude de classification basée à la fois sur l'analyse statistique des données et l'application du modèle non calé, classification validée a posteriori sur les données 1999–2000 (Peugot *et al.*, 2003). La distorsion qui en résulte dans la représentation de la gamme des événements (ex.: moins de "gros événements") a été en partie compensée par application d'une pondération fonction de la lame précipitée par l'événement. Telle qu'entendue ici, la calibration du modèle ne consiste pas seulement en la recherche d'un jeu "optimal" de paramètres du modèle, mais aussi et surtout en la caractérisation de l'incertitude de modélisation et sa traduction en termes d'incertitude sur les sorties (Cappelaere *et al.*, 2003). Le nombre de degrés de liberté a été délibérément restreint, les paramètres de calage étant limités à trois facteurs multiplicatifs K , C et M appliqués respectivement à l'ensemble des conductivités hydrauliques sur les versants, dans le chenal, et à l'ensemble des rugosités. Le critère utilisé pour mesurer la performance du modèle combine l'adéquation aux données en volume et en débit de pointe de la crue. Pour un échantillon de crues de taille n , sa formulation est la suivante:

$$F = \sqrt{F_v^2 + (aF_Q)^2}, \text{ avec } 0 < a \leq 1 \text{ (ici } a = 0.5) \text{ et:}$$

$$F_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \{\alpha_i [V_{obs}(i) - V_{sim}(i)]^2\} / \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n_o} \{\alpha_i [V_{obs}(i) - \bar{V}_{obs}]^2\} / \sum_{i=1}^{n_o} \alpha_i} \text{ et } F_Q^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \{\alpha_i [Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i)]^2\} / \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n_o} \{\alpha_i [Q_{obs}(i) - \bar{Q}_{obs}]^2\} / \sum_{i=1}^{n_o} \alpha_i}$$

où α_i est la pondération appliquée au i ème événement, et n_o est la taille de l'échantillon de référence ($n_o = 73$). Le coefficient a reflète le poids moindre accordé à la variable débit. Un modèle parfait correspondrait à $F = 0$. Le dénominateur constant permet de rendre le critère adimensionnel.

L'exploration large de l'espace des paramètres (un millier de triplets K - C - M environ, couvrant un ordre de grandeur en K et M et plus de deux en C) a permis de déterminer la forme de la fonction critère $F(K, C, M)$ pour $n = n_o$, caractérisée par un optimum unique ($K = 0.75$, $C = 1$, $M = 1.25$, produisant $F = 0.160$), et par une moindre sensibilité à C qu'à K et M . Une technique de validation croisée par ré-échantillonnage suggère une certaine stabilité de cette surface et en particulier de son optimum vis-à-vis de l'échantillon utilisé, tout en soulignant l'importance du plus gros événement dans cet échantillon. La calibration du modèle est complétée par une procédure spécialement développée à cette occasion pour quantifier l'incertitude de modélisation et traduire celle-ci en prévision probabiliste des volumes écoulés par événement (Cappelaere *et al.*, 2003; la précision des mesures est prise en compte). La Fig. 3 présente respectivement pour trois événements de différente magnitude la fonction de répartition du volume écoulé ainsi obtenue. Elle montre une assez grande incertitude relative en particulier pour les petits événements, marqués également par l'asymétrie de leur distribution. La valeur la plus probable est celle obtenue avec le jeu de

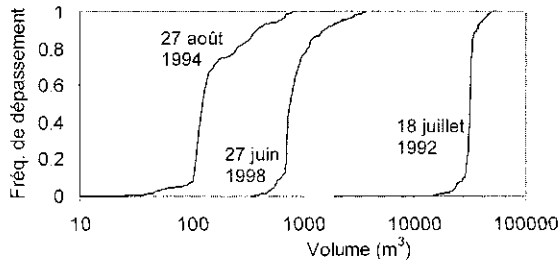


Fig. 3 Exemples de fonctions de répartition du volume écoulé, pour trois événements de l'échantillon de référence (les valeurs observées et simulées avec le jeu optimal de paramètres sont respectivement: 27 août 1994 = 301 et 115 m³, 27 juin 1998 = 614 et 710 m³, 18 juillet 1992 = 31770 et 32172 m³).

paramètres “optimal”, précité. Grâce à la méthode développée, le niveau de risque utilisé pour la production d'intervalles de prévision est bien reproduit expérimentalement sur les événements 1992–1998. La vérification a également été effectuée sur l'échantillon de validation 1999–2000, montrant que le niveau de risque choisi est respecté à quelques pour-cents près. Alors qu'un modèle déterministe basé sur le seul “meilleur” jeu de paramètres ne peut exprimer des données que leur tendance principale, la calibration du modèle étendu constitué de *r.water.fea* et de la procédure de gestion de l'incertitude lui permet d'intégrer beaucoup plus de l'information qu'elles contiennent, à savoir notamment leur dispersion autour de cette tendance principale.

APPLICATION AUX BILANS SAISONNIERS

La variable cible de la modélisation étant la recharge saisonnière de la mare (qui constitue une première approche de la recharge locale de la nappe), une première exploitation du modèle est faite pour les saisons 1992 à 2000. Les 211 événements pluvieux enregistrés pendant cette période au pluviographe de Wankama-Mare ont été simulés, en utilisant le “meilleur” jeu de paramètres mais également la totalité des jeux échantillonnés afin de pouvoir caractériser l'incertitude sur les résultats finaux. Pour chacune des neuf années puis pour la période toute entière, les différentes colonnes du Tableau 1 présentent successivement: le nombre d'événements, les lames précipitées annuelle et moyenne par événement, le coefficient d'écoulement obtenu avec le “meilleur” jeu de paramètres, l'espérance mathématique (avec écart-type) du coefficient d'écoulement quand l'incertitude de modélisation est prise en compte, et enfin le rapport de l'écart entre ces deux estimations du coefficient d'écoulement à l'écart-type. On constate que le “meilleur” jeu de paramètres sous-estime systématiquement les écoulements saisonniers et pluri-saisonnier par rapport à leurs valeurs espérées (jusqu'à près de 10% ou près d'un écart-type) comme par rapport à leurs modes et médianes, tous trois très voisins à l'échelle saisonnière. Contrairement à l'événement, ce jeu de paramètres ne fournit plus le volume écoulé le plus probable lorsqu'on cumule des événements. Sur la base de l'échantillon de référence, Cappelaere *et al.* (2003) ont montré qu'il produisait un biais par rapport au cumul observé, lequel biais disparaît avec les estimateurs stochastiques précités. Ceux-ci avec

Tableau 1 Bilans saisonniers établis par simulation.

Année	Nombre d'événements (an ⁻¹)	Pluie (mm):		Coefficient d'écoulement (%):		Différence: en nombre d'écart-type
		annuelle	moyenne par événement	"meilleur" jeu de paramètres	espérance mathématique (et écart-type)	
1992	21	485	23.1	12.9	13.2 (1.1)	-0.28
1993	22	474	21.6	14.5	14.8 (1.2)	-0.29
1994	32	541	16.9	7.4	8.1 (0.9)	-0.85
1995	24	513	21.4	15.5	15.6 (1.2)	-0.10
1996	26	505	19.4	9.3	9.6 (0.8)	-0.45
1997	16	353	22.1	12.7	12.8 (1.8)	-0.04
1998	21	510	24.3	13.3	13.5 (1.2)	-0.15
1999	27	489	18.1	9.1	9.5 (0.9)	-0.37
2000	22	433	19.7	13.1	13.8 (1.4)	-0.51
1992-2000	23.4	478	20.4	11.9	12.2 (0.4)	-0.94

les écarts-types d'estimation (ou les intervalles de prévision) représentent donc la recharge de la mare de manière plus fiable et plus complète qu'une modélisation déterministe classique, biaisée et sans indication d'incertitude. A noter cependant que cette dernière diminue sensiblement quand on passe à l'échelle pluri-saisonnière, le coefficient de variation tombant de la gamme 8–14% pour les différentes années à 3% pour l'écoulement moyen sur la période.

Alors que l'écoulement saisonnier (exprimé en volume aussi bien qu'en coefficient de ruissellement) apparaît sans corrélation avec la pluie annuelle (coefficient de détermination $R^2 < 10\%$), il est positivement corrélé avec la lame moyenne annuelle par événement, R^2 dépassant 50% pour le coefficient d'écoulement (Fig. 4). Par exemple, l'année 1994 est la plus humide mais avec des événements plutôt faibles, produisant au total le plus petit écoulement. Ceci souligne la nécessité de l'analyse par événement effectuée dans cette étude. Le coefficient d'écoulement moyen sur la période (intervalle de prévision à 95%: 11.5–13%) est cohérent avec les estimations proposées par Desconnets *et al.* (1997) pour la recharge de différentes mares dans la région, ainsi qu'avec celles de la recharge régionale de la nappe produites par Favreau *et al.* (2002) ou Leduc *et al.* (2001).

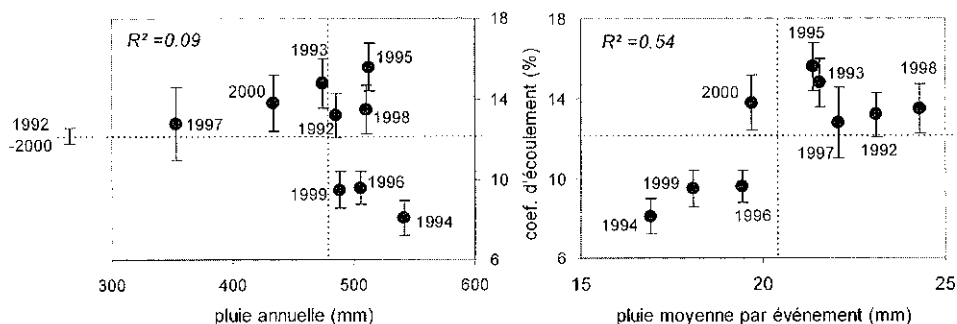


Fig. 4 Relations saisonnières pluie – écoulement estimé (+/- écart-type) et moyennes interannuelles (pointillés).

CONCLUSION

Compte-tenu des incertitudes portant sur données et modèle, il est nécessaire de tirer le parti le meilleur et le plus complet, en les combinant, de ces deux sources d'information quant au comportement du système. La critique des données aidée par le modèle et la restitution des incertitudes dans les résultats de simulation relèvent de cette logique. La précision obtenue sur l'estimation de la ressource locale en eau de surface, qui est ici en lien direct avec la recharge des ressources souterraines, se révèle satisfaisante. La nécessité de l'approche événementielle est confirmée. La démarche est actuellement poursuivie pour étudier le renouvellement à long terme de la ressource régionale.

Remerciements Ce projet a été financé par l'IRD, ainsi que par le Programme National de Recherche en Hydrologie (France). Les auteurs remercient vivement les différentes personnes, françaises et nigériennes, qui ont participé aux travaux de terrain au fil de ces années.

BIBLIOGRAPHIE

- Cappelaere, B., Vieux, B., Peugeot, C., Maia, A. & Séguis, L. (2003) Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: 2. Model calibration and uncertainty characterization. Soumis à *J. Hydrol.*
- Descornets, J.-C., Taupin, J.-D., Lebel, T. & Leduc, C. (1997) Hydrology of Hapex-Sahel central super site: surface drainage and aquifer recharge through the pool systems. *J. Hydrol.* **188-189**, 155-178.
- D'Herbès, J. M. & Valentin, C. (1997) Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications. *J. Hydrol.* **188-189**, 18-42.
- Favreau, G., Leduc, C., Marlin, C., Dray, M., Taupin, J. D., Massault, M., Le Gal J.a Salle, C. & Babic, M. (2002) Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from ^3H and ^{14}C modeling. *Ground Water* **40**(2), 144-151.
- 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.
- Peugeot, C., Cappelaere, B., Vieux, B. E., Séguis, L. & Maia, A. (2003) Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: 1. Model-aided data analysis and screening. Soumis à *J. Hydrol.*
- Vieux, B. E. & Gaur, N. (1994) Finite-element modeling of storm water runoff using GRASS GIS. *Microcomputers in Civil Engineering* **9**, 263-270.