

Methodologie et application d'une demarche de modelisation hydrologique prenant en compte l'evolution des etats de surface en milieu sahelien d'Afrique de l'ouest

PIERRE DIELO¹, JEAN-EMMANUEL PATUREL¹, GIL MAHE¹,
BRUNO BARBIER², HAROUNA KARAMBIRI³, ERIC SERVAT¹

¹ UMR HydroSciences – MSE, Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier cedex 5, France
eric.servat@msem.univ-montp2.fr

² CIRAD, Avenue du Président Kennedy, 01 BP 596 Ouagadougou 01 Burkina Faso

³ EIER-ETSHER, 03 BP 7023, Ouagadougou 03, Burkina Faso

Resume Les études menées depuis une vingtaine d'années montrent que l'effet conjoint du changement climatique et des activités humaines sur les états de surface est à l'origine d'une variabilité hydrologique paradoxale observée depuis les années 1970 sur les bassins versants sahéliens. En effet, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie de cette région, les coefficients d'écoulement ont très fortement augmenté, entraînant des écoulements plus importants qu'auparavant. Ces modifications de la relation Pluie–Débit nécessitent de nouvelles approches permettant de prendre en compte conjointement la variabilité climatique et la dimension anthropique dans la modélisation hydrologique de ces bassins. Une méthodologie est présentée et des résultats préliminaires sont discutés.

Mots clef activités anthropiques; Burkina Faso; états de surface; fonction logistique; modélisation démographique; modélisation hydrologique; Sahel; variabilité climatique; variabilité hydrologique

A hydrological modelling approach that allows for evolution of the land surface in African Sahel basins

Abstract The hydrological studies undertaken during the last twenty years have shown that the hydrological variability observed since the year 1970 on the Sahelian river basins is due to the combined effect on land-cover of climate changes and human activities. Runoff coefficients have increased, inducing more important flows than in the earlier years despite a reduction in rainfall. These modifications to the rainfall–runoff relationship require new approaches that make it possible to take into account both the climatic variability and the human dimension in hydrological modelling of these basins. A method is presented and preliminary results are analysed and discussed.

Key words human activities; Burkina Faso; Sahel; land cover; logistic function; demographic modelling; hydrological modelling; climatic variability; hydrological variability

INTRODUCTION

Les études hydrologiques menées depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'Ouest ont montré que les coefficients d'écoulement ont fortement augmenté sur certains hydrosystèmes du Sahel, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale. Ces nouvelles conditions de ruissellement apparaissent plus favorables dans les zones caractérisées par une diminution du couvert végétal, une extension des surfaces cultivées et des surfaces dégradées (Pouyaud, 1987; Albergel & Valentin, 1991; Mahe *et al.*, 2003; Seguis *et al.*, 2003). Dans ces régions, les états de surface représentent les facteurs prépondérants des phénomènes d'infiltration et de ruissellement. Une voie vers l'amélioration de notre aptitude à simuler par modèle le fonctionnement hydrologique de ces hydrosystèmes est donc de pouvoir prendre en compte la dynamique du milieu dans les modèles. De nombreux modèles de simulation hydrologique existent, mais peu d'entre elles prennent en compte la dynamique d'évolution du milieu. Les modèles conceptuels à réservoirs tels que GR2M, WBM, et, Yates (Makhlouf, 1994; Yates, 1997; Conway & Jones, 1999), ne font pas exception, même s'ils intègrent comme paramètre ou variable d'entrée une donnée caractérisant la hauteur maximale d'un réservoir "sol". C'est cette dernière donnée qui nous intéresse plus particulièrement car des indicateurs de pression anthropique et/ou climatique peuvent servir de base à la transcription de la dynamique du milieu sur ce paramètre ou cette variable.

MODELES HYDROLOGIQUES ET ETATS DE SURFACE

Le milieu naturel peut être considéré comme une juxtaposition d'états de surface associés ou interdépendants. On entend par état de surface, tout ensemble homogène, constitué du couvert

végétal, du type de sol et de l'organisation pédologique superficielle (croûte). Il est acquis qu'en milieu sahélien, la répartition des pluies entre infiltration et écoulement est sous le contrôle quasi exclusif de cette donnée (Casenave & Valentin, 1992). Le modèle conceptuel GR2M, que nous utiliserons dans le cadre de ce travail, comporte un réservoir "sol" qui se caractérise par une hauteur maximale. Cette hauteur peut être assimilée à la capacité de rétention en eau du sol (WHC: Water Holding Capacity), caractéristique des états de surface. Les données de WHC que nous utilisons sont extraites de la *Digital Soil Map of the World* (FAO-UNESCO, 1974–1981). Des unités de sols sont définies en fonction de la profondeur des horizons et de la texture des constituants, et on y associe des classes de WHC. Les données WHC sont fixées pour chaque unité de terrain et pour toute la durée des simulations. Ces valeurs n'intègrent pas la dynamique d'évolution globale du climat et de l'environnement et ne sont pas évolutives dans le temps. Or, une bonne transcription de la dynamique des états de surface, et donc de la WHC, permettrait d'améliorer les résultats de simulation des modèles hydrologiques.

MODES DE TRANSFORMATION DU MILIEU ET INDICATEURS DE PRESSION ANTHROPIQUE ET/OU CLIMATIQUE

Assurer une certaine "sécurité alimentaire" dans un contexte de baisse globale de la pluviométrie, de manque de terres arables, et de pauvreté sévère, est une question de survie pour les populations sahéliennes d'Afrique de l'Ouest. Ce contexte, que l'on pourrait qualifier de "climato-socio-économique", a engendré de profondes mutations dans les pratiques culturelles et agropastorales des populations concernées. De nos jours, les terres encore arables sont, pour la plupart, exploitées sans interruption (pas de jachère). Les terres, qui, jadis, étaient considérées comme marginales, sont colonisées en faisant appel à de nouvelles pratiques de conservation et de restauration des sols (zaï, demi-lune, cordons pierreux, ...). Les derniers espaces encore en végétation sont défrichés et transformés en champs. Les politiques gouvernementales ont également favorisé la construction de nombreuses retenues d'eau à caractère agro-pastoral dans le but de mobiliser et rendre disponible un maximum d'eau pour les populations et le bétail (le cas du Burkina Faso est très révélateur de cette politique).

L'analyse de ces pratiques dans le contexte hydroclimatique actuel permet, globalement, de dégager quatre modes de transformation possible du milieu:

- *La dégradation des sols*: dessèchement du couvert végétal avec encroûtement et dénudation des sols sous l'effet conjugué des actions de l'homme et du climat.
- *La mise en culture*: défrichage de la végétation et transformation en champs;
- *La mise en jachère*: ne pas ensemer un champ au cours d'une ou de plusieurs saisons successives afin de permettre au sol de se régénérer.
- *La restauration des sols*: récupération des terres dégradées à l'aide de pratiques telles que le zaï, les demi-lunes ou le reboisement.
- De ces pratiques, nous déduisons trois types d'état de surface: les sols en végétation naturelle (jachères y compris), les sols cultivés, les sols nus (dégradés et encroûtés) auxquels nous ajoutons les plans d'eau (barrages et autres retenues d'eau). Les proportions de ces états de surface pour une unité de surface donnée (par exemple un demi-degré carré, # 2500 km²) et leurs évolutions dans le temps seront prises comme indicateurs de pression anthropique et/ou climatique.

CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES INDICATEURS

Le traitement des images satellites combinées avec les données des statistiques agricoles permet de dresser, à des dates bien précises, des cartes d'occupation du sol. L'intervalle de temps entre deux images satellites successives n'étant pas forcément annuel, il faut pouvoir modéliser l'évolution des indicateurs entre deux dates.

Hypothèse simple d'une évolution linéaire des indicateurs: On considère que les proportions de chaque type d'état de surface évoluent linéairement entre deux périodes. Si $S_{T_{initial}}(ES_i)$ est la

surface occupée par l'état de surface ES_i à la date $T_{initial}$, et $S_{T_{final}}(ES_i)$ la surface occupée par ce même état de surface à la date T_{final} , on peut écrire, si n est le nombre d'années entre $T_{initial}$ et T_{final} , que:

$$\begin{cases} S_{T_{initial}+j}(ES_i) = S_{T_{initial}}(ES_i) + jr \\ r = \frac{S_{T_{final}} - S_{T_{initial}}}{n} \\ j \in [1, n] \end{cases} \quad (1)$$

L'équation 1 permet ainsi de calculer les données annuelles des proportions de chaque type d'état de surface.

Un modèle d'évolution "réaliste": On peut concevoir que pour un bassin versant donné, la surface S_{cult} , occupée par les cultures ne peut dépasser une certaine valeur maximale $S_{max_{cult}}$ (on ne peut mettre en culture plus de terres qu'il n'y en a!). De même, la surface S_{vg} occupée par la végétation naturelle ne descendra pas en dessous d'un certain seuil (on ne va tout de même pas tout défricher! il y a toujours des aires protégées: forêts classées et autres...). Pour ces deux indicateurs, la variation de superficie entre deux dates, peut être considérée comme proportionnelle à la différence $S_{seuil} - S$ où S_{seuil} est un maximum ou un minimum et S la valeur actuelle de l'indicateur. La différence $S_{seuil} - S$ s'interprète comme la "place libre" dans le milieu que chaque type d'état de surface pourrait occuper au cours de son évolution dans le temps. On peut donc écrire que:

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dt} = k(S_{seuil} - S) \quad (1)$$

En normalisant par $x = \frac{S}{S_{seuil}}$ et en posant $r = kS_{seuil}$, on obtient une équation différentielle de la

forme $\frac{dx}{dt} = f(x)$ où $f(x)$ est connu sous le nom de fonction logistique et définie comme suit:

$f : x \mapsto rx(1-x)$. La solution de l'équation différentielle $\frac{dx}{dt} = f(x)$ est de la forme:

$$x(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_0)}} \quad (2)$$

Ce type de fonction que l'on retrouve en dynamique de la population (Delmas, 2004) correspond au mécanisme naturel de croissance ou de décroissance d'une variable, freinée par le niveau de sa valeur (x) et par la résultante d'autres paramètres que l'on considère comme constantes. Dans notre cas, ces paramètres peuvent être déterminés à l'aide de séries annuelles de statistiques agricoles et de données de population. L'utilisation des données de population se justifie par le fait que l'accroissement de la population est un facteur induisant des variations de surface cultivées et de surfaces en végétation naturelle.

La surface totale du bassin étant la somme des superficies des quatre indicateurs, on déduit par différence l'évolution des surfaces nues, connaissant celle des surfaces cultivées, des surfaces en végétation naturelle et des plans d'eau.

MODULATION DE LA WHC EN FONCTION DE L'EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE

On fait l'hypothèse que: toute variation de coefficient de ruissellement dans un sens, due au passage de l'un quelconque des quatre types d'états de surface à un autre, se traduit par une même variation, en sens contraire, de la capacité de rétention en eau. La Fig. 1 montre les différentes façons de moduler la WHC pour le cas d'une modification de la végétation naturelle en sols cultivés, sols nus et plans d'eau.

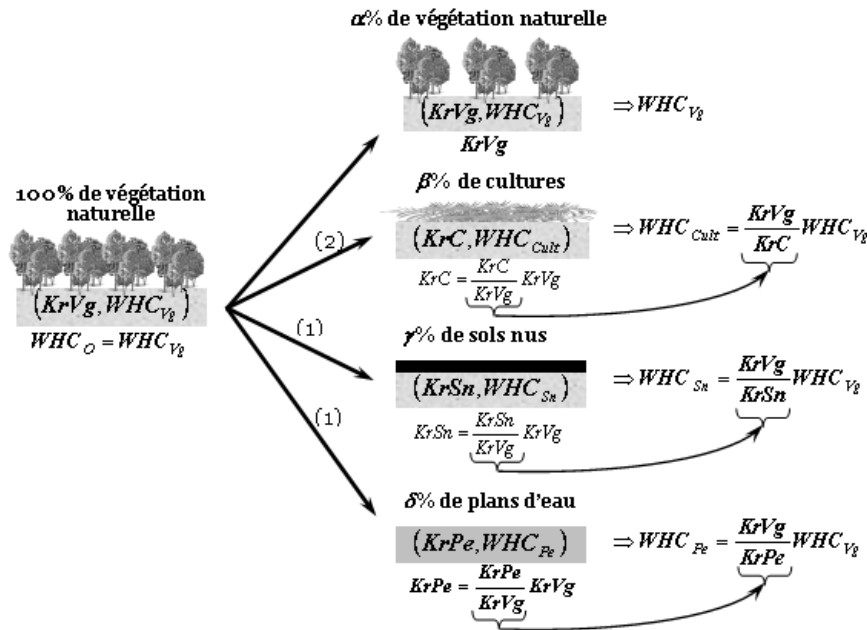


Fig. 1 Modulation de la WHC pour le cas d’une évolution d’un état de végétation naturelle vers un état anthropisé constitué des 4 types d’états de surface. [(1): Mise en culture; (2): Dégradation anthropique et/ou climatique].

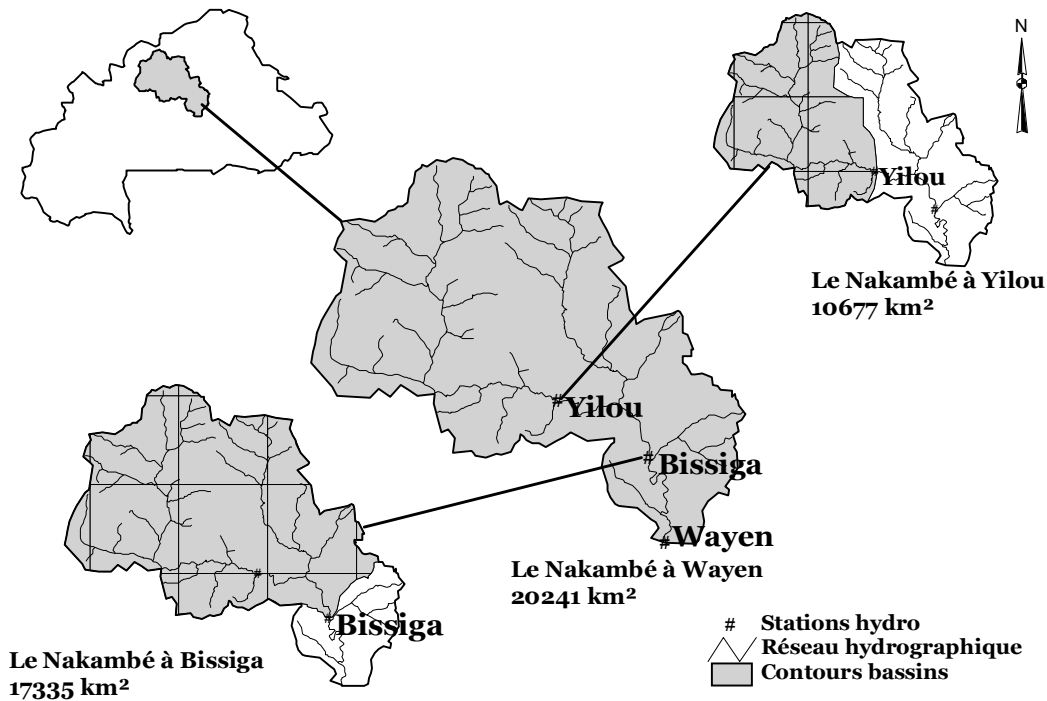


Fig. 2 Bassins tests du fleuve Nakambé au Burkina Faso.

Si la WHC de la surface $S_{Vg}(T_0)$ était WHC_{Vg} à la date T_0 , elle sera, à la date T :

$$WHC = \alpha\%WHC_{Vg} + \beta\%WHC_{Cult} + \gamma\%WHC_{Sn} + \delta\%WHC_{Pe} \tag{3}$$

Où les proportions α , β , γ , et δ sont déterminées dans chaque cas à l’aide des modèles dévolution des états de surface.

Soit, en fonction de WHC_{Vg} :

$$WHC = \left[\alpha\% + \beta\% \frac{KrVg}{KrC} + \gamma\% \frac{KrVg}{KrSn} + \delta\% \frac{KrVg}{KrPe} \right] WHC_{Vg} \quad (4)$$

On peut mener le même raisonnement pour les autres types d'états de surface et aboutir aux mêmes types d'équations.

PREMIERS RESULTATS D'APPLICATION

Les résultats que nous présentons ici concernent trois bassins versants emboîtés du fleuve Nakambé (Volta Blanche) au Burkina Faso (Fig. 2).

Les données de télédétection utilisées pour cette application sont des images LANDSAT acquises en 1975, 1986 et 2002. Les résultats des différents traitements permettent de déduire les proportions de chaque classe d'états de surface en 1975, 1986 et 2002. Un exemple de traitement est présenté à la Fig. 3.

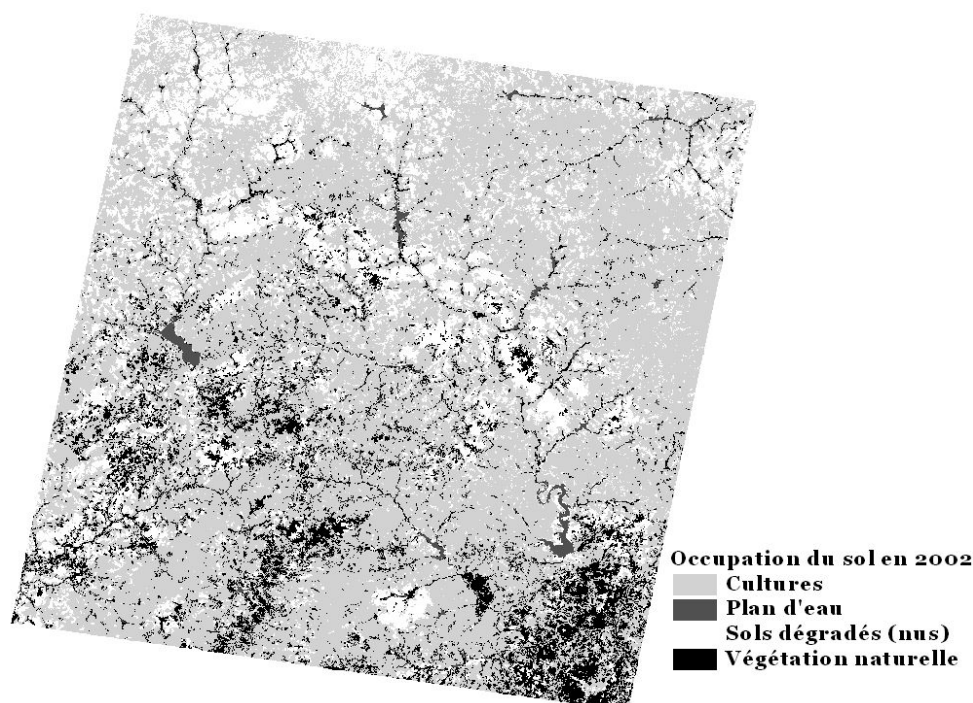


Fig. 3 Résultat de Classification d'image—Occupation du sol en 2002.

Les paramètres de la fonction logistique ont été déterminés à partir des données de recensements généraux de la population (RGP) et des séries de statistiques agricoles au Burkina Faso. La Fig. 4 donne l'allure générale des courbes d'évolution des surfaces cultivées et des surfaces en végétation naturelle.

Les données de pluie et d'ETP Penman utilisées dans ce travail proviennent d'une part de l'Unité de Recherche en Climatologie de l'Université d'East Anglia (CRU), et, d'autre part, de la base de données SIEREM (Système d'Information Environnementale sur les ressources en Eau et leur Modélisation) de l'UMR HydroSciences Montpellier. Ces sont des données mensuelles spatialisées au demi-degré carré.

Les résultats des simulations (Tableau 1) montrent que, comparé au cas où la WHC reste constante dans le temps, les performances du modèle sont quasiment identiques. En effet, sur l'ensemble des trois bassins testés, les gains de performances en calage sont faibles: +3 points pour Bissiga, +0.7 points pour Yilou et +2.2 points pour Wayen. En dehors de la station de Wayen (+ 5.7 et +9.6 points selon la source de données pluie), aucune amélioration en validation n'est observée sur les autres bassins.

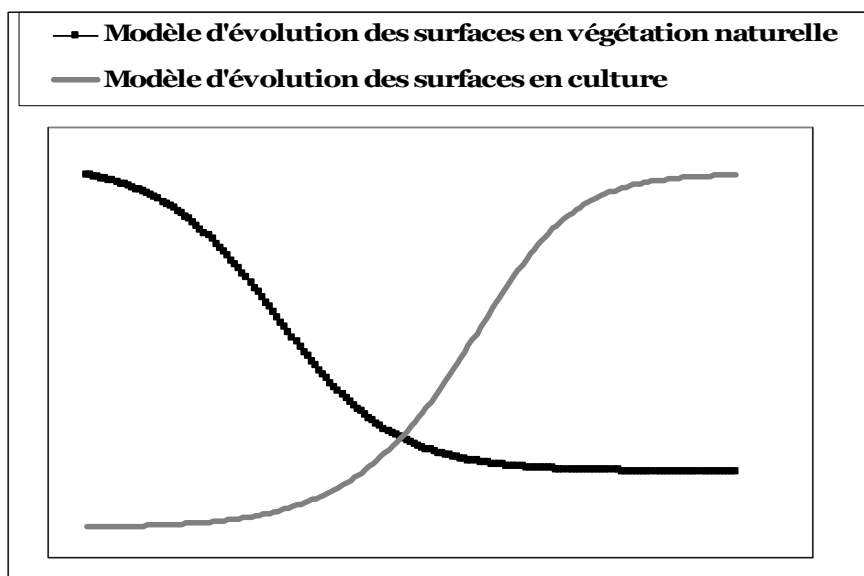


Fig. 4 Modélisation de la dynamique des surfaces cultivées et des surfaces en végétation naturelle à l'aide à partir d'une fonction logistique.

Tableau 1 Résultats préliminaires pour trois bassins versants du Nakambé au Burkina Faso.

Bassins testés		WHC Fixe		WHC évolutif	
		Pluie IRD ETP Penman	Pluie CRU ETP Penman	Pluie IRD ETP Penman	Pluie CRU ETP Penman
Bissiga	Calage 1976–1988	NASH= 54.5	NASH= 48.6	NASH= 57.2	NASH= 51.6
	Validation 1989–1995	NASH= 63.3	NASH= 60.5	NASH= 44.7	NASH= 41
Yilou	Calage 1973–1979	NASH= 75.4	NASH= 75.6	NASH= 76.1	NASH= 75.8
	Validation 1980–1982	NASH= 85.5	NASH= 83.7	NASH= 83.8	NASH= 82.7
Wayen	Calage 1975–1985	NASH=61.1	NASH=57.7	NASH= 63.3	NASH= 59.9
	Validation 1986–1995	NASH= 49.6	NASH= 40	NASH= 55.3	NASH= 49.6

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces résultats ne concernent que trois bassins et ne permettent pas d'évaluer la méthodologie qui a été exposée dans ce travail. En dehors des problèmes sur la fiabilité des données, de la non unicité des solutions liée au processus d'optimisation des paramètres, de l'influence de la longueur des périodes de calage et de validation, on peut se poser la question de la sensibilité des modèles à la variable (ou au paramètre) WHC. Des réflexions sont en cours dans le cadre d'une thèse. Toutefois, il semble nécessaire qu'à l'avenir les modèles puissent prendre en compte dans leur conceptualisation une évolution de l'environnement.

REFERENCES

- Albergel J. & Valentin C. (1991) "Sahélisation" d'un petit bassin versant: Boulsa-Koghner au centre du Burkina Faso. In: Dégénération des Paysages en Afrique de l'Ouest (ed. by J. F. Richard), 119–133. (Dakar, 21–26 novembre 1988). Presse Universitaire de Dakar, Dakar, Senegal.
- Casenave A. & Valentin C. (1992) A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of west Africa. *J. Hydrol.* **130**(1–4), 231–249.
- Conway, D. & Jones P. D. (1999) Assessing the impact of future climatic change on the water resource and the hydrology of the Rio de la Planta basin, Argentina. Climatic Research Unit. University of East Anglia, UK.

- Delmas, B. (2004) Dossier "démographie mathématique": Pierre-François Verhulst et la loi logistique de la population. *Math. Social Sci.* **167**, 51–81.
- Mahe, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J. E., Girard, S., Servat, E. & Dezetter, A. (2003) Augmentation récente du ruissellement de surface en zone soudano-sahélienne et impacts sur les ressources en eau. In: *Hydrology in the Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Jajem, C. Leduc & A. Shakeel), 215–222 (Montpellier, France). IAHS Pub. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Makhlouf, Z. (1994) Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat Thesis, Université Paris-Sud, Paris, France.
- Penman, H. L. (1956) Evaporation: an introduction survey. *J. Agric. Sci.* **1**, 9–29.
- 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, ORSTOM, Montpellier (France).
- Seguis, L., Cappelaere, B., Peugeot, C., Leduc, C. & Milesi, G. (2003) Influence de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin versant sahélien. In: *Hydrology in the Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Jajem, C. Leduc & A. Shakeel), 429–434. IAHS Publ. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Yates, D. N. (1997) Approaches to continental scale runoff for integrated assessments models. *J. Hydrol.* **201**, 289–310.