

Modélisation hydrologique et interrelations Climat–Homme–Environnement dans le Sahel Burkinabè

JEAN-EMMANUEL PATUREL¹, PIERRE DIEELLO², GIL MAHE³, ALAIN DEZETTER¹, HAMMA YACOUBA², BRUNO BARBIER⁴ & HAROUNA KARAMBIRI²

1 HSM/IRD, BP 2528, Bamako, Mali
paturel@ird.fr

2 2iE -UTER-GVEA, 01 BP 594, Ouagadougou 01, Burkina Faso

3 HSM/IRD, USTL, Case MSE, Pl. E. Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 5, France

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

Résumé Dans le contexte sahélien, les études menées depuis une vingtaine d'années montrent que les effets conjoints du changement climatique et des activités humaines sur les états de surface sont à l'origine d'un "paradoxe hydrologique". On observe, en effet, depuis les années 1970 que sur certains bassins versants de cette région les coefficients d'écoulement ont très fortement augmenté, entraînant parfois des écoulements plus importants qu'auparavant, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale. 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. Le travail mené a eu pour objectif d'intégrer dans un modèle hydrologique une composante environnementale et humaine. Cette donnée est reliée à des indicateurs de pression anthropique et climatique que sont les états de surface. Ces états conditionnent la répartition de la pluie en infiltration, évapotranspiration et écoulement. Ces indicateurs sont déterminés à partir d'images satellites LANDSAT. Pour calculer l'évolution annuelle des états de surface et des coefficients d'écoulement associés, on propose une méthodologie qui relie les différentes classes d'états de surface à l'évolution de la population. Les résultats des simulations sur un bassin de plus de 20 000 km² au Burkina Faso montrent des améliorations très significatives dans les performances du modèle quand on utilise cette composante environnementale et humaine.

Mots-clés changement climatique; impact anthropique; modélisation hydrologique; Sahel; changements d'occupation du sol

Hydrological modelling and climate–man–environment interrelationships in the Burkinabe Sahel

Abstract In the Sahel, the studies conducted over the past two decades show that the combined effect of climate change and human activities on the surface conditions is the cause of a "hydrological paradox" seen since the 1970s on some watersheds in this region: the runoff coefficients have risen significantly, sometimes flows are higher than before, despite a decline in regional rainfall. These changes in rainfall–runoff relationships require new approaches to jointly take into account climate variability and the human dimension in the hydrological modelling of these basins. The study aims to integrate environmental and human elements in a hydrological model. These data are linked to indicators of human and climatic pressure: the land use in the Sahel which determines the distribution of rain between infiltration, evaporation and runoff. These indicators are characterized from Landsat satellite images at different times. To calculate the annual changes of land use and associated runoff coefficients, we propose a methodology that connects the various classes of land use and the evolution of the population, determined annually through a demographic model. The results of the simulations on a watershed of more than 20 000 km² in Burkina Faso show very significant improvements in performance of a hydrological model when taking into account environmental and human changes.

Key words anthropogenic impact; climate change; hydrological modelling; land-use/cover change; Sahel

CONTEXTE

Dans les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, les sols pauvres en matières organiques et mal protégés par une végétation clairsemée ont tendance à subir, sous l'effet des fortes intensités de pluie, des réorganisations superficielles importantes qui conditionnent la répartition de la pluie en infiltration, évapotranspiration et écoulement. Des études récentes ont mis en évidence le caractère prédominant de ces états de surface dans la modification de l'écoulement en milieu sahélien de ces dernières décennies (Dolman *et al.*, 1997; Nicholson, 2000; Legesse *et al.*, 2003; Mahé *et al.*, 2003; Séguis *et al.*, 2003; Mahé *et al.*, 2005). Ainsi, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale (20%) depuis 1970, les coefficients d'écoulement ont très fortement

augmenté (jusqu'à +100%). On observe alors des écoulements parfois plus importants que dans le passé. C'est le "paradoxe hydrologique".

Les images satellites et les visites de terrain montrent que ces états de surface ont de tout temps évolué. Mais cette évolution est plus marquée depuis 1970, en réponse au changement climatique observé dans la région.

Dans les régions où la question de l'eau est une véritable contrainte pour le développement, il apparaît important de mettre au point des outils de prévision et de gestion. Cela nécessite des modèles hydrologiques capables de reproduire, à des échelles d'espace et de temps données, des résultats de simulations satisfaisants. Mais afin d'y parvenir en prenant en compte les changements environnementaux et climatiques des régions sahéliennes, il faut intégrer dans un modèle hydrologique une dynamique environnementale et une dynamique humaine (Diello, 2007).

SITE D'ETUDE

La zone d'étude sélectionnée est représentative des conditions d'écoulement au Sahel: le bassin versant du Nakambé (Volta Blanche) à Wayen au Burkina Faso (Fig. 1).

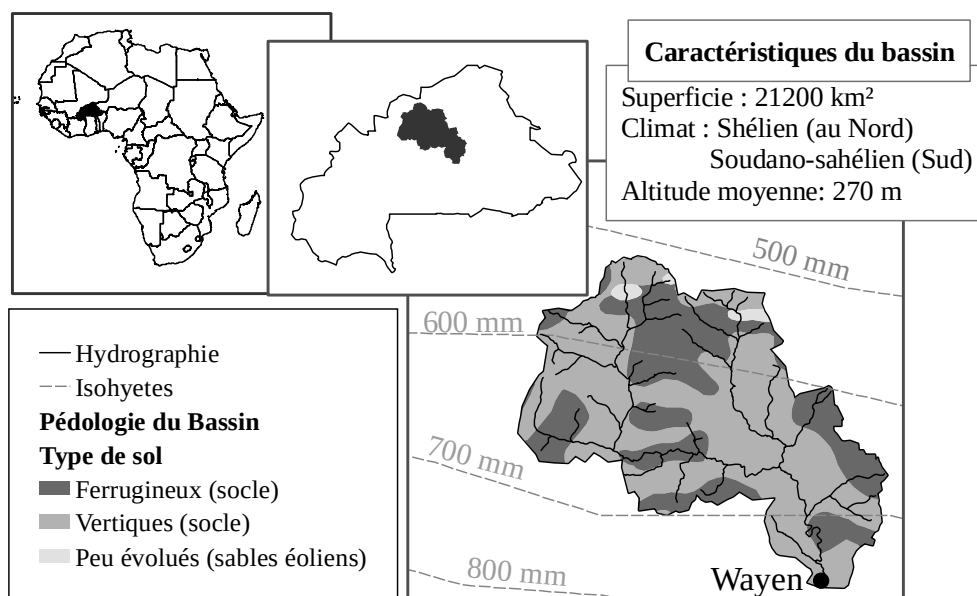


Fig. 1 Situation de la zone d'étude.

INDICATEURS DE LA DYNAMIQUE ENVIRONNEMENTALE

La dynamique d'évolution des états de surface est le résultat de l'interaction d'un ensemble de facteurs:

$$\text{Transformation nette} = \frac{[\sum(\text{processus naturels de dégradation}) - \sum(\text{régénérations naturelles})]}{+} + \frac{[\sum(\text{interférences négatives de l'homme}) - \sum(\text{aménagements et restaurations})]}{+}$$

De cette équation se dégagent deux groupes de facteurs qui conditionnent l'évolution du milieu:

- Les processus naturels de dégradation et de régénérescence du milieu. Ceux-ci sont régis par des facteurs climatiques, physiques et pédologiques.
- Le facteur anthropique à travers l'occupation des sols qui, dans ces régions, est la conséquence des besoins accrus d'une population en croissance rapide induisant un déséquilibre entre ressources naturelles et capacité de production. Ce déséquilibre est accru par la diminution persistante des pluies depuis 1970. De plus, les pratiques agro-pastorales traditionnelles ne

sont plus tout à fait adaptées aux conditions pédoclimatiques locales, ce qui « perpétue » la situation de pauvreté des populations concernées. Aujourd'hui se développent des nouvelles pratiques agropastorales tendant à favoriser une certaine régénérescence du milieu. Celles-ci sont appelées communément les techniques de Conservation des Eaux et des Sols (CES).

L'analyse de ces pratiques au Sahel permet, de dégager quatre modes de transformation possible du milieu:

- (a) 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;
- (b) la mise en culture: défrichage de la végétation et transformation en champs;
- (c) 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 – technique qui disparaît peu à peu;
- (d) la restauration des sols: récupération des terres dégradées à l'aide de pratiques telles que les demi-lunes, le reboisement ou le zaï, pratique agricole de plus en plus utilisée dans les zones plus sèches.

De ces pratiques, nous pouvons déduire quatre 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).

Ces clés de caractérisation de la dynamique du milieu seront prises comme indicateurs de la dynamique des états de surface et nous renseigneront sur l'importance de la pression anthropique et/ou climatique sur le milieu d'étude.

Ces indicateurs satisfont aux conditions nécessaires à l'intégration dans un modèle hydrologique. C'est-à-dire qu'ils sont:

- (a) disponibles et mesurables à grande échelle;
- (b) évaluables sur des chroniques relativement longues;

L'évolution de ces indicateurs est mesurable après traitement d'images satellites ou de photographies aériennes que l'on peut se procurer relativement facilement sur des périodes données.

EVOLUTION TEMPORELLE DES INDICATEURS

Après traitement d'images de type Landsat (Diello *et al.*, 2006) et validation de ces résultats par comparaison avec des statistiques agricoles du Burkina Faso disponibles sur le bassin (Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, 2007), on a pu recréer des cartes des indicateurs d'occupation du sol sur le bassin du Nakambé pour quatre années données (Fig. 2). Mais comment interpoler les situations annuelles entre ces quatre années? La méthodologie retenue est décrite dans le paragraphe suivant.

DYNAMIQUE ENVIRONNEMENTALE ET DYNAMIQUE DÉMOGRAPHIQUE

L'analyse des annales de statistiques agricoles du Burkina Faso des superficies cultivées sur le Nakambé montre dans un premier temps une forte augmentation de celles-ci puis, dans un second temps, un ralentissement voire une stagnation. Cette forme d'évolution s'ajuste bien à un modèle dit logistique (ou courbe en "S") qui décrit bien le phénomène de croissance puis de saturation, sachant qu'un territoire donné est rarement entièrement cultivable.

Ce type de modèle est également utilisé en dynamique des populations. Ajusté aux données démographiques du Nakambé, le modèle montre un ralentissement de l'accroissement de la population à partir de 2010.

On pose alors l'hypothèse suivante qui a été vérifiée: il y a un lien entre l'accroissement de la population et les variations de surfaces cultivées et de surfaces en végétation naturelle. On peut alors en déduire les caractéristiques du modèle logistique d'évolution des superficies cultivées.

A partir de ces éléments, du recensement de l'ensemble des retenues et barrages construits sur le bassin, et en posant l'hypothèse vérifiée que l'évolution des superficies en végétation naturelle

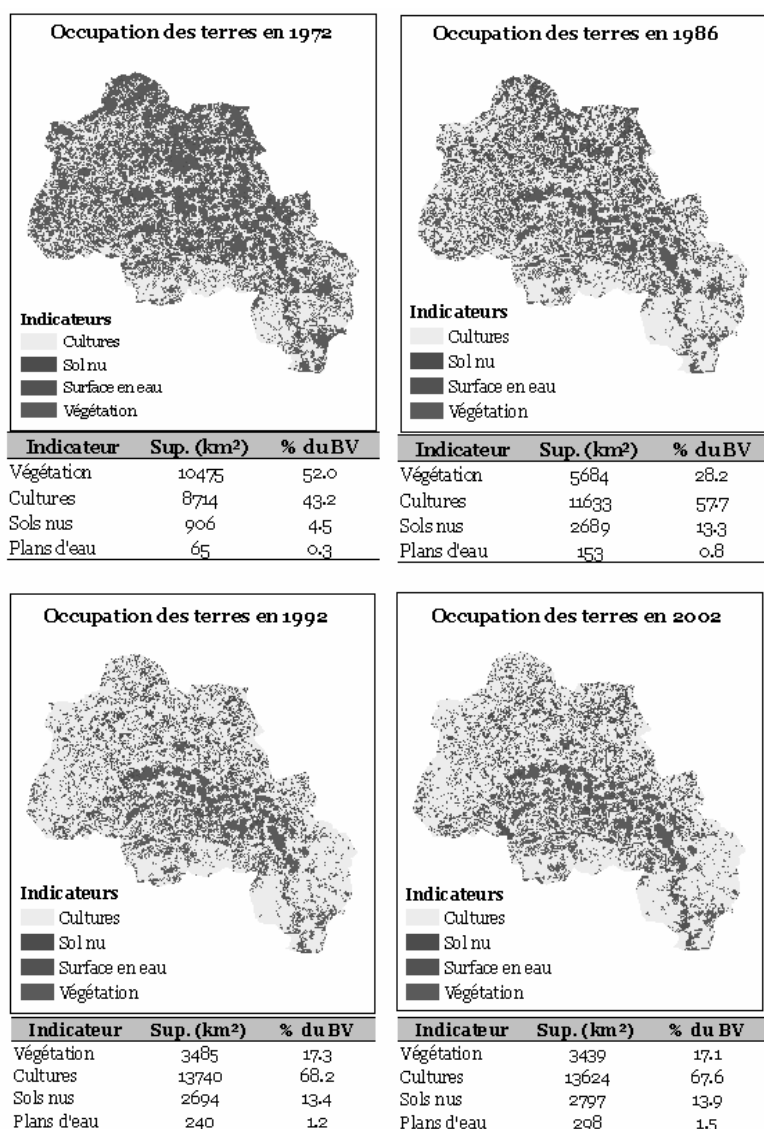


Fig. 2 Bassin du Nakambé à Wayen – indicateurs d’occupation à quatre dates (1972, 1986, 1992 et 2002).

peut être aussi ajustée par une courbe “antilogistique” (symétrique d’une courbe logistique), on obtient (figure 3) l’évolution annuelle des 4 indicateurs de la dynamique du milieu par rapport à l’évolution annuelle de la population de 1944 à 2002 sur le bassin du Nakambé à Wayen.

MODELE HYDROLOGIQUE ET DYNAMIQUE ENVIRONNEMENTALE

Les données disponibles ont guidé notre choix de modèle. Nous avons donc opté pour un modèle conceptuel global, simple et robuste, à réservoirs et à pas de temps mensuel, GR2M (<http://www.cemagref.fr/webgr/index.htm>). Le modèle est constitué:

- (a) d’un réservoir sol qui régit la fonction de production;
- (b) d’un réservoir eau gravitaire qui régit la fonction de transfert.

Rappelons que dans les régions sahéliennes, la variabilité des écoulements des bassins versants est directement liée à la dynamique de ses états de surface. Un des compartiments du modèle GR2M est le réservoir sol, caractérisé par sa capacité maximale, voisine de la capacité de rétention en eau du sol (en anglais: water holding capacity, WHC).

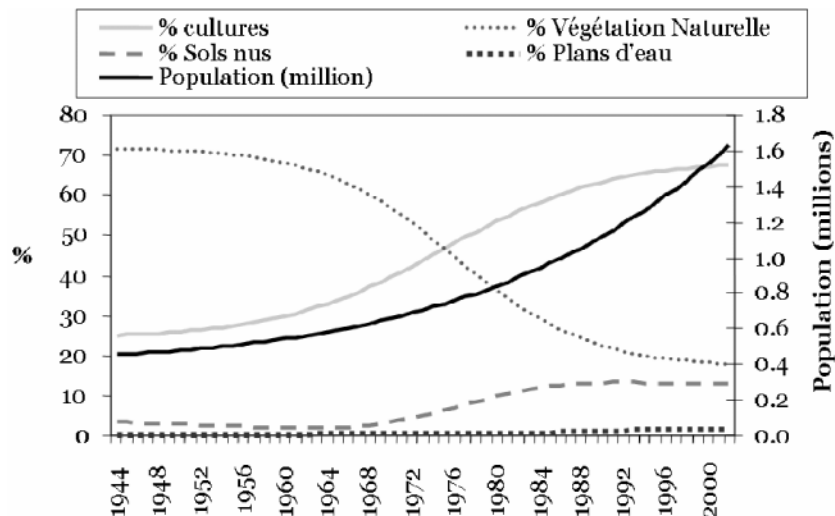


Fig. 3 Bassin du Nakambé à Wayen – évolution temporelle des indicateurs d'occupation du sol et de la population.

La WHC est fonction de plusieurs paramètres pédologiques comme la texture du sol, sa porosité et sa granulométrie. La profondeur racinaire et le type de couverture végétale jouent également un rôle dans la détermination de cette variable. Ces différents paramètres peuvent varier énormément selon les conditions climatiques (pluviosité, ETP, etc.) et aussi en fonction des activités anthropiques (travail du sol, défrichage de la végétation, etc.).

Ce lien entre les paramètres descriptifs des états de surface et la WHC est particulièrement intéressant car des coefficients de ruissellement ont été mesurés pour chaque type d'état de surface (Tableau 1).

Tableau 1 Bassin du Nakambé à Wayen – mesures des coefficients de ruissellement pour différentes occupations du sol en deux lieux représentatifs du nord (Yacouba *et al.*, 2002) et du sud (Fournier *et al.*, 2000) du bassin.

Indicateur d'état de surface	Coefficient de ruissellement (%):	
	Nord	Sud
Végétation naturelle	17	13
Culture	24	20
Sols nus	54	50

DYNAMIQUE ENVIRONNEMENTALE ET MODULATION DE LA CAPACITÉ DE RÉTENTION EN EAU DU SOL

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.

Dans le cas d'une modification de la végétation naturelle en sols cultivés, sols nus et plans d'eau. Si la WHC de la surface $S_{Vg}(T_0)$ était WHC_{Vg} à la date T_0 , elle sera, à la date T :

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

où les proportions α , β , γ et δ sont déterminées dans chaque cas à l'aide des modèles d'évolution des états de surface.

Soit, en fonction de WHC_{Vg} :

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

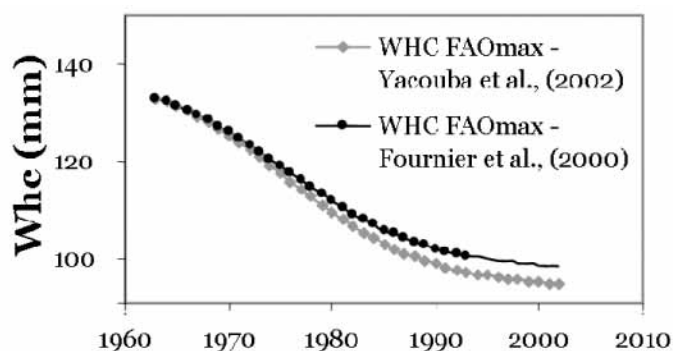


Fig. 4 Bassin du Nakambé à Wayen – exemple d'évolution de la WHC du bassin.

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

A partir des données disponibles et de la carte des sols de la FAO (1981), on peut déterminer la WHC globale du bassin (Fig. 4).

Pour la suite de l'étude, on comparera les résultats du modèle GR2M selon le critère de Nash, avec deux entrées possibles pour les WHC:

- des WHC "fixes" dans le temps, c'est-à-dire n'intégrant pas de changements dans les états de surface et les coefficients d'écoulement associés,
- des WHC évolutives intégrant ces changements et calculées pour chaque maille du modèle à partir des informations obtenues grâce à la combinaison des divers éléments mis en place dans cette étude: étude des états de surface à partir des images Landsat (Fig. 2), relation entre modèle de population et coefficients d'écoulements caractéristiques par type de surface (Fig. 3).

APPLICATION AU BASSIN DU NAKAMBÉ À WAYEN

En fonction des données disponibles sur la station de Wayen, nous avons opéré plusieurs calages/validations. Les résultats sont repris dans le Tableau 2 et la Fig. 5, et montrent que:

Tableau 2 Bassin du Nakambé à Wayen – résultats de tests de calage/validation pour des WHC fixe et évolutives (d'après les valeurs de coefficients de ruissellement données par Fournier *et al.* (2000) et Yacouba *et al.* (2002)).

WHC	Calage: Période	Nash	Validation: Période	Nash	Période	Nash	Période	Nash
Fixe		73		26.2		33.8		31.1
évolutive (Yacouba)	65–72	72	73–86	37.1	87–95	56	73–95	49
évolutive (Fournier)		71.5		41.7		64.3		55.9
Fixe		63.7		–231.1		74.2		
évolutive (Yacouba)	73–86	67.6	65–72	–106.9	87–95	67.9		
évolutive (Fournier)		68.9		–68.6		58.2		
Fixe		75.3		–291.5		62.8		27.7
évolutive (Yacouba)	87–95	74.2	65–72	–8.7	73–86	63.5	65–86	57
évolutive (Fournier)		73.4		41.2		60.2		59.1
Fixe		61.6		47.6				
évolutive (Yacouba)	65–75	54.7	76–95	63.2				
évolutive (Fournier)		67.5		64.7				
Fixe		48.9		61.8				
évolutive (Yacouba)	65–85	57.1	86–95	72.6				
évolutive (Fournier)		60		70.7				

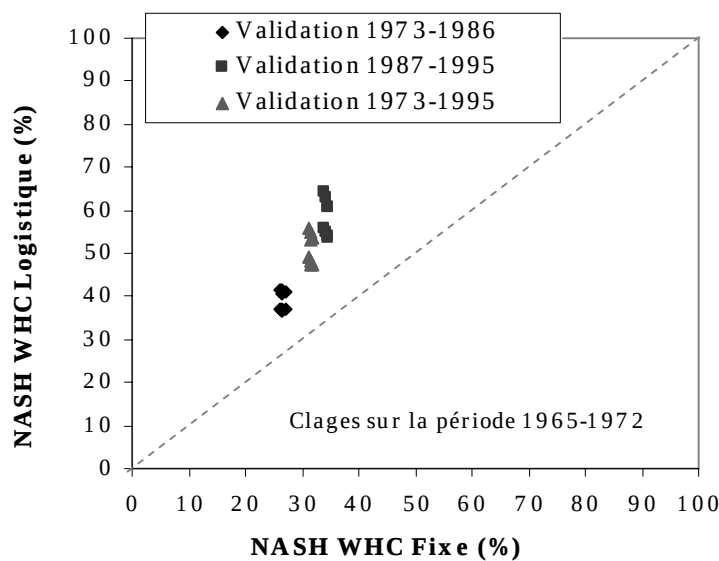


Fig. 5 Bassin du Nakambé à Wayen – valeurs du Nash WHC “logistique” en fonction du Nash WHC “fixe” pour les trois périodes de validation associées à la période de calage 1965–1972.

- (a) en calage, le fait de considérer des WHC évolutives améliore le critère de Nash pour des valeurs faibles de celui-ci ; sinon, il y a peu de changements. Le modèle GR2M est connu pour sa robustesse et le démontre ici une nouvelle fois;
- (b) en validation, l'utilisation de WHC évolutives améliore très nettement le critère de Nash.

CONCLUSIONS

Nous avons cherché à répondre à la question de la prise en compte de la dynamique du milieu sahélien dans un modèle hydrologique global tel que GR2M. Nous avons donc pour objectif d'améliorer notre aptitude à simuler le fonctionnement des bassins versants au Sahel pour une meilleure évaluation, prédiction et gestion des ressources en eau de cette région au cours du 21ème siècle.

Les résultats obtenus représentent des améliorations très significatives au regard de ceux classiquement obtenus avec la WHC fixe. En effet, l'analyse comparative des performances a montré que l'utilisation dans GR2M de données WHC évoluant suivant les changements des états de surface, corrélée à un modèle logistique de population, conduit à des gains de performances très nets.

Il est important de préciser que ce travail revêt un caractère exploratoire. De ce fait, plusieurs points devraient être approfondis afin de permettre une meilleure prise en compte de la dynamique du milieu dans le modèle hydrologique choisi, GR2M.

Une des originalités de ce travail réside dans l'utilisation de données démographiques en hydrologie. Le modèle démographique que nous avons utilisé donne des tendances à plus ou moins long terme mais il est difficile, dans la zone d'étude, de prendre en compte des déterminants de la dynamique démographique tels que les phénomènes migratoires dus:

- (a) aux conflits que l'on ne peut pas anticiper et qui peuvent profondément modifier les sociétés et leur environnement,
- (b) aux déplacements de population dus au manque de terre, à une sécheresse ponctuelle, à l'attraction de villes et/ou à une demande en main d'œuvre dans des zones plus développées.

La difficulté est essentiellement liée au manque de données. Les résultats obtenus dans ce travail doivent donc être approfondis pour une meilleure prise en compte des questions démographiques en hydrologie.

REFERENCES

- Diello, P., Paturel, J. E., Mahé, G., Karambiri, H. & Servat, E. (2006) Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'Ouest. In: *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts* (ed. by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena & E. Servat) (Proc. 5th FRIEND World Conference, La Havana, Cuba), 691–697. IAHS Publ. 308. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Diello, P. (2007) Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabè: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse, Université de Montpellier II, France.
- Dolman, A. J., Gash, J. H. C., Goutorbe, J.-P., Kerr, Y. H., Lebel, T., Prince, S. D. & Stricker, J. N. M. (1997). The role of the land surface in Sahelian climate: HAPEX-Sahel results and future research needs. *J. Hydrol.* **188–189**, 1067–1079.
- FAO-Unesco (1981) CD-ROM: *Soil Map of The World*. UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Fournier, J., Serpantié, G., Delhoume, J.-P. & Gathelier, R. (2000) Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina: Application à l'aménagement des versants. In: *La jachère en Afrique tropicale: Rôle, Aménagements, Alternatives: 1. Actes du séminaire international, Dakar, 13–16 avril 1999* (ed. by J. Libbey), 179–188. Paris (FRA); Montrouge: IRD.
- Legesse, D., Vallet, C. C. & Gasse, F. (2003) Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical Africa; case study south central Ethiopia. *J. Hydrol.* **275**(1-2), 67–85.
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J. E., Girard, S., Servat, É. & Dezetter, A. (2003). Augmentation récente du ruissellement de surface en zone soudano-sahélienne et impacts sur les ressources en eau. In: *Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides* (ed. by E. Servat et al.), 215–222. IAHS Publ. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Mahé, G., Paturel, J. E., Servat, É., Conway, D. & Dezetter, A. (2005) The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambé river, Burkina Faso. *J. Hydrol.* **300**, 33–43.
- Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques (2007) *Statistiques agricoles du Burkina Faso*. Direction Générale de la Prévision et de la Statistique Agricole. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Nicholson, S. E. (2000) Land surface processes and Sahel climate. *Rev. Geophysics* **38**(1), 117–139.
- Séguis, 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: *Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides* (ed. by E. Servat et al.), 429–434. IAHS Publ. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Yacouba, H., Da, D. E. C., Yonkeu, S., Zombre, P. & Soule, M. (2002) Caractérisation du ruissellement et de l'érosion hydrique dans le bassin supérieur du Nakambé (Burkina Faso). In: *5ème Conférence Inter-Régionale sur l'environnement et l'Eau - Envirowater 2002*, 318–325. Ouagadougou, Burkina Faso.