

Prise en compte des variabilités spatio-temporelles de la pluie et de l'occupation du sol dans la modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du haut fleuve Niger

ALAIN DEZETTER¹, JEAN-EMMANUEL PATUREL¹, DENIS RUELLAND²,
SANDRA ARDOIN-BARDIN¹, LUC FERRY³, GIL MAHE¹,
CLAUDINE DIEULIN¹ & ERIC SERVAT¹

¹IRD, UMR HydroSciences Montpellier, Maison des Sciences de l'Eau, Université Montpellier II, Case Courrier MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France
alain.dezetter@ird.fr

²CNRS, UMR HydroSciences Montpellier, Maison des Sciences de l'Eau, Université Montpellier II, Case Courrier MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France

³UMR G-EAU, IRD, BP 2528, BAMAKO, Mali

Résumé Le changement climatique et environnemental est au cœur des préoccupations politiques et scientifiques actuelles. Pour l'Afrique de l'Ouest, déjà fragilisée, la question est vitale. L'objectif de ce travail est de prendre en compte de manière optimale la variabilité spatio-temporelle des états de surface et de la pluie dans la modélisation pluie-débit mensuelle des ressources en eau du haut-fleuve Niger. Une étude de sensibilité détaillée de la version semi-spatialisée du modèle GR2M a tout d'abord été menée. Puis une cartographie de l'occupation du sol à différentes dates a été réalisée à partir d'images Landsat afin d'en déduire des variations spatio-temporelles à appliquer à un des paramètres du modèle. Enfin, des données de pluie issues de Meteosat pour les années 2004 et 2005, ont été utilisées en vue d'une meilleure prise en compte de la variabilité spatiale de la pluie. Cette étude a permis d'identifier les voies d'amélioration de la modélisation à l'aide du modèle GR2M semi-spatialisé.

Mots clefs modélisation pluie débit; pluies METEOSAT; états de surface; ressources en eau; fleuve Niger

Taking into account the spatial and temporal variability of rainfall and land use in semi-lumped modelling of water resources in the upper Niger River

Abstract Climatic and environmental change is a major political and scientific concern, even more for western Africa, already weakened by three decades of drought. This work aims at an optimal consideration of the spatiotemporal variability of land-use changes and rain in the monthly rainfall-runoff modelling of water resources of the upper Niger River. A detailed sensitivity analysis of the semi-lumped version of the GR2M model was first carried out, and then long-term land-use changes were mapped using Landsat images to estimate some spatiotemporal variations of one of the model's parameter. Lastly, rainfall data from Meteosat in 2004 and 2005 were used to get a better estimation of the spatial variability of the rain. This study allowed the identification of the possible ways of improving water resources modelling using the semi-lumped version of the GR2M model.

Key words rainfall-runoff modelling; METEOSAT rainfall; land cover; water resources; Niger River

INTRODUCTION

Le changement climatique et son influence sur l'environnement et la société est au cœur des préoccupations politiques et scientifiques actuelles. Pour des régions déjà fragilisées telles que l'Afrique de l'Ouest, la question est vitale. Ardoïn-Bardin *et al.* (2009) ont montré la possibilité de simuler l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale pour le XXI^{ème} siècle à l'aide de modèles pluie débit simples et robustes et à partir des prévisions faites par des Modèles de Circulation Générale (MCG) de l'atmosphère. Les modèles pluie débit utilisés dans ce cadre ont montré une grande sensibilité à la donnée pluie (Dezetter *et al.*, 2008) et à une donnée caractéristique des états de surface assimilable à une capacité en eau du sol (Mahé *et al.*, 2005).

Les données de pluie utilisées proviennent des réseaux nationaux d'observation et ont été interpolées sous forme de grilles mensuelles au ½ degré carré: les grilles du CRU (*Climatic Research Unit*) ont été principalement utilisées (New *et al.* 1999; Mitchell *et al.* 2005). Les données de sol ont été extraites de la carte FAO des sols et sont fixes dans le temps (FAO, 1981).

La rupture avérée dans les séries pluviométriques d'Afrique de l'Ouest depuis les années 1970, a eu des effets parfois contradictoires. En effet, la baisse pluviométrique a entraîné généralement une baisse des écoulements, mais aussi parfois une augmentation des écoulements

(Mahé *et al.*, 2003). Mahé *et al.* (2005) ont montré que la prise en compte d'une évolution temporelle des états de surface, couplée à la prise en compte de l'évolution démographique (Diello, 2007; Paturol *et al.*, 2009), permettait d'améliorer sensiblement la simulation des écoulements des cours d'eau sahéliens.

L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer la modélisation des ressources en eau du haut-fleuve Niger (Niger à Koulikoro) en intégrant la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface du bassin versant. Dans un premier temps, après une modélisation "classique" du bassin versant, une étude de la sensibilité spatiale du modèle aux différentes entrées a été réalisée. Puis une méthodologie a été mise au point pour générer une cartographie de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol du bassin versant à l'aide d'images Landsat (Ruelland *et al.*, 2008). Enfin, l'aspect de la variabilité spatiale de la pluie a été abordé à l'aide des données Météosat disponibles pour les années 2004 et 2005.

MATERIELS ET METHODES

Le bassin versant du Niger à Koulikoro

Le bassin versant du Niger à Koulikoro correspond à la partie amont du haut fleuve Niger et occupe une superficie de 120 343 km², entre 7°00' et 12°00'W et 8°30' et 13°00'N. Il se situe à cheval sur 3 pays d'Afrique de l'Ouest: le Mali dans sa partie septentrionale (30%), la Côte d'Ivoire dans sa partie orientale (5%) et enfin la Guinée pour le restant du bassin versant (65%). L'altitude varie de 1479 m à 265 m à l'exutoire du bassin.

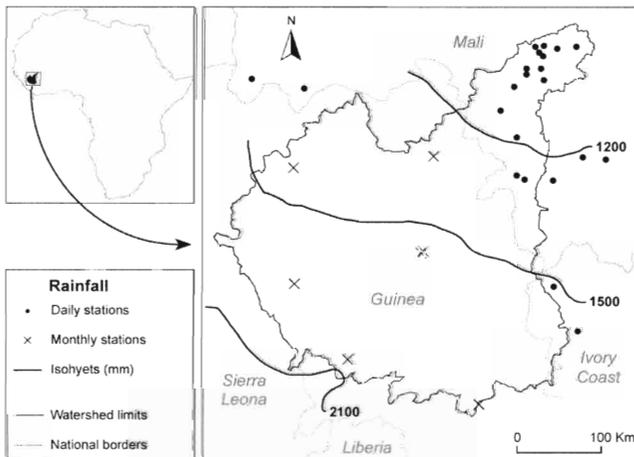


Fig. 1 Le bassin versant du Niger à Koulikoro (Ruelland *et al.*, 2008).

L'analyse hydro-climatique (Ruelland *et al.*, 2008) à partir des données pluviométriques des stations réparties sur la zone d'étude fait apparaître trois zones climatiques distinctes, selon un gradient nord-sud (Fig. 1):

- une zone soudano-sahélienne ($P < 1200$ mm), caractérisée par une seule saison des pluies de juin à septembre et une absence totale de précipitations entre Novembre et Avril;
- une zone soudanienne ($1200 < P < 1500$ mm), caractérisée par une saison des pluies qui s'allonge au fur et à mesure que l'on se rapproche du Tropique (mai à Octobre, avec un maximum centré sur Juillet–Août);
- une zone soudano-guinéenne ($P > 1500$ mm), caractérisée par des précipitations présentes presque toute l'année, mais plus abondantes de mars à octobre, avec un maximum sur Août–Septembre.

L'étude des précipitations interannuelles sur la période 1919–1999 témoigne d'une tendance à un déclin progressif des précipitations sur le bassin. Les 3 zones climatiques présentent des périodes synchrones de diminution (dans les années 40) ou d'augmentation des précipitations et une rupture climatique autour de 1970, qui correspond à l'installation de la sécheresse observée en Afrique de l'Ouest et Centrale (Servat *et al.*, 1998). La période 1970–2000 est donc globalement marquée par une baisse des précipitations, notamment en 1983–1984 où les pluies sont les plus faibles. A partir de 1990, la tendance déficitaire semble s'inverser et des années plus humides sont observées (1994 et 1999) sans toutefois atteindre les valeurs observées avant 1970 (L'Hôte *et al.*, 2003).

On note une forte diminution du module (40%) à Koulikoro entre la période 51–70 et la période 71–90, qui correspond à une baisse importante de la pluviométrie sur la zone. Afin de relativiser ces variations, nous présentons (Tableau 1) les modules par périodes de 10 ans, de l'origine de la station de Koulikoro à nos jours. Même si la période récente semble plus favorable, on note bien 4 décennies consécutives de baisse du module pour un cumul de baisse de 58%.

La Fig. 2 représente le module du Niger à Koulikoro, pour toute la série d'observations (1907 à nos jours). La courbe continue représente la moyenne mobile sur 10 ans et le trait horizontal, la moyenne de toute la série (1355 m³/s). Les quatre dernières décennies sont déficitaires (Fig. 2) et le débit actuel n'est pas encore revenu à la moyenne de toute la série. Même si une certaine reprise de l'hydraulicité est visible, il faut la relativiser et la replacer dans le contexte historique.

Tableau 1 Modules de la station de Koulikoro par périodes de 10 ans, de l'origine de la station à nos jours.

Périodes	1907– 1916	1917– 1926	1927– 1936	1937– 1946	1947– 1956	1957– 1966	1967– 1976	1977– 1986	1987– 1996	1997– 2006
Module (m ³ /s)	1284	1577	1778	1243	1693	1609	1452	973	877	1065
Variation relative / décennie précédente		+23%	+13%	-30%	+36%	-5%	-10%	-33%	-10%	+21%

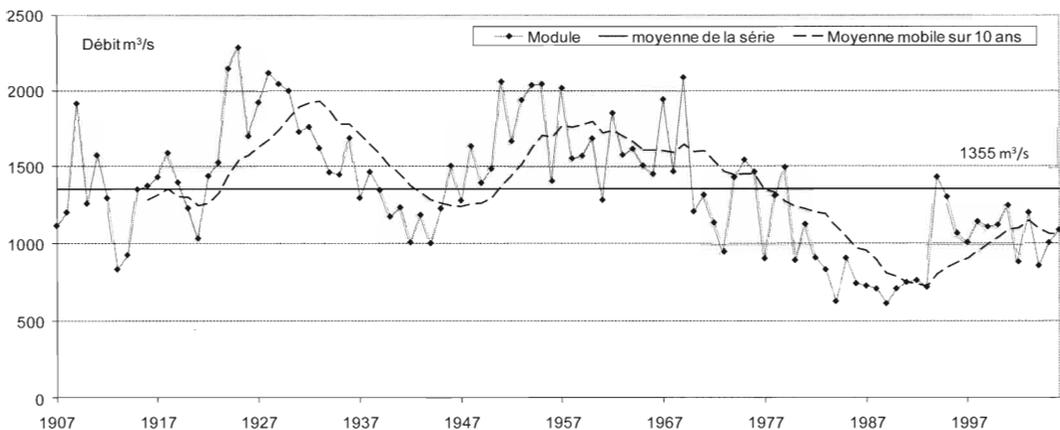


Fig. 2 Module du Niger à Koulikoro et moyenne mobile sur 10 ans – période 1907–2006.

Le modèle GR2M

Une version semi-spatialisée du modèle GR2M du CEMAGREF (Makhlouf, 1994) a été mise au point à HydroSciences Montpellier (Ouedraogo, 2001). Cette version utilise comme unité spatiale une maille régulière d'1/2 degré carré. Les données d'entrée spatialisées sont l'ETP et la pluie

mensuelles ainsi que la capacité de rétention en eau du sol (WHC) issue de la carte FAO des sols (Fig. 3). Les paramètres de calage, X1 et X2, sont déterminés pour l'ensemble du bassin versant.

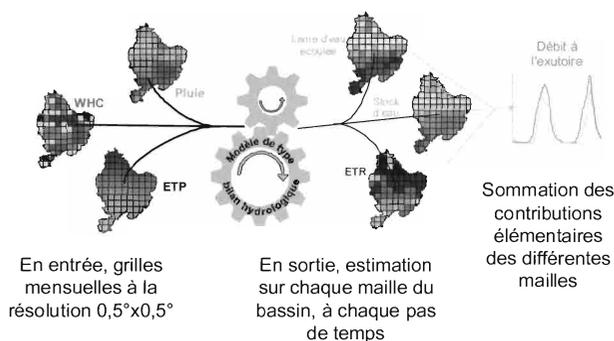


Fig. 3 Fonctionnement de la version semi-spatialisée (Ardoin-Bardin, 2004).

Analyse de la sensibilité du modèle à la répartition spatiale des données d'entrée

Patuere *et al.* (1994) ont étudié la sensibilité de la version globale aux données d'entrées, elle est la suivante: (du plus sensible au moins sensible) Pluie, WHC, puis ETP, l'ETP étant peu, voire pas sensible du tout dans cette zone climatique. C'est la sensibilité à la répartition spatiale des données d'entrée (WHC, pluie, ETP) qui est étudiée ici.

Protocole concernant les pluies et les ETP

Pour chaque sous-bassin, on tire au hasard 1000 grilles de pluie (ou ETP) selon la méthode suivante:

- Pour chaque mois, la pluie moyenne mensuelle sur le bassin est conservée, seule la répartition spatiale change.
- Un tirage aléatoire est réalisé pour chaque demi-degré et pour chaque mois sur la période considérée. On détermine le minimum et le maximum de pluie pour le demi-degré et le mois considérés et une valeur est tirée au hasard entre ce minimum et ce maximum. Les valeurs obtenues sont pondérées pour respecter la pluie moyenne mensuelle sur le bassin.

Protocole concernant la WHC

La WHC ne constitue pas une valeur temporelle, elle est uniquement spatiale, contrairement à la pluie et l'ETP. On utilise la valeur minimale et la valeur maximale de la WHC du bassin concerné, et on réalise un tirage aléatoire de 1000 grilles entre ces valeurs min et max. La WHC moyenne du bassin versant est également respectée en pondérant les valeurs aléatoires obtenues.

Cartographie de l'évolution de l'occupation du sol

Afin d'essayer de relier les changements d'occupation du sol et de rendre évolutive dans le temps la valeur WHC, des classifications multi-temporelles étaient nécessaires. Pour ce faire, une méthode de traitement diachronique de données Landsat couvrant la période 1970–2000 a été mise au point (Ruelland *et al.*, 2008). Le jeu de données multi-temporelles considéré dans cette étude comprend une trentaine d'images Landsat acquises entre 1973 et 2002 à partir des capteurs MSS, TM et ETM+. Ces images couvrent 3 époques centrées autour des années 1975, 1985 et 2000. Elles proviennent de la banque de scènes Landsat mises à disposition gratuitement par la NASA auprès de la communauté scientifique mondiale. L'hétérogénéité des dates et des résolutions spatiales ou spectrales liée aux images ainsi que l'échelle d'analyse ont amené à privilégier une méthode de classification simple. Des prétraitements ont été appliqués de manière à réduire les

variations entre les images. Des indices de végétation (NDVI) ont ensuite été calculés avant d'être seuillés selon une typologie commune de couverts végétaux. Ces seuils ont été optimisés par des calculs récursifs automatisés de matrices de confusion avec des parcelles de contrôle (issues de relevés de terrain). Les résultats montrent certaines limites de précision, mais permettent d'estimer les changements à une échelle d'espace et de temps peu classique. Les évolutions se caractérisent par une tendance modérée à la déforestation et au défrichement au profit des sols nus à peu végétalisés et des savanes arbustives. Les couvertures spatiales produites ont été associées à une carte FAO des sols en vue d'assimiler les changements d'états de surface dans la modélisation hydrologique du fleuve Niger.

Pluies météosat

Dans le cadre du Groupement De Recherche (GDR) "MSG ATR", et en collaboration avec le groupe *Precipamma* (Bergés *et al.*, 2005), une méthodologie de détermination des pluies à l'aide du satellite Météosat seconde génération, combiné aux données TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), est actuellement testée. Les images sont à la résolution spatiale de trois kilomètres et temporelle de 15 minutes. Le GDR fournit des données prétraitées sous la forme d'intensité potentielle de pluie et de probabilité de présence de pluie. Des programmes de traitement ont été élaborés afin d'obtenir des données au pas d'espace du demi-degré carré et au pas de temps mensuel. En fonction des données disponibles, un travail de comparaison a été mené sur l'année 2004: entre juin et septembre inclus et l'année 2005: entre juin et août inclus. Pour cela, nous avons élaboré deux types de grilles au ½ degré carré et au pas de temps mensuel: (i) des grilles de pluie obtenues par la méthode du krigeage simple utilisant les données de pluie au sol rassemblées auprès des services gestionnaires des réseaux pluviométriques et (ii) des grilles de pluie élaborées par agrégation, spatiale et temporelle, des données MSG.

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats de la modélisation

Le Tableau 2 présente les résultats de la modélisation pour la période 1911–1990, par périodes de 10 ans. Les valeurs de critère de Nash de calage sont plutôt bonnes (de 80.8 à 91.3).

Tableau 2 Résultats de calage par périodes de 10 ans pour la station Koulikoro.

Période de calage	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70	71–80	81–90
X1 calé	0.522	0.730	0.620	0.577	0.686	0.669	0.620	0.484
X2 calé	0.446	0.444	0.452	0.465	0.435	0.460	0.463	0.474
Nash Calage	80.8	89.1	89.9	88.0	91.3	89.3	89.9	88.0

Le tableau 3 présente les résultats de la validation croisée. Dans les trois dernières colonnes on trouve la moyenne des critères de Nash de validation pour chaque jeu de paramètres et en tenant compte ou non d'un découpage de la période (toute la période 1911–1990, avant 1950 et après 1950). Les critères de Nash de validation sont également plutôt bons, à quelques exceptions près. Ces exceptions concernent deux périodes bien particulières, la période 1911–1920 et la période 1981–1990. Ces deux périodes ont en commun le fait de contenir des années exceptionnellement sèches (1913, 1983, 1984). Ces années exceptionnelles sont plus difficilement reproductibles par le modèle calé sur des périodes au comportement proche de la moyenne. On remarque par ailleurs que le jeu de paramètres qui valide le mieux sur la période 1911–1920 est celui de 1981–1990 et inversement. Il est probable que des fonctionnements différents du bassin versant ont lieu durant ces périodes et qu'ils n'ont pas cours sur des périodes plus humides. Le modèle ne peut donc pas reproduire des fonctionnements particuliers qui ne se produisent pas dans la période de calage.

Tableau 3 Critères de Nash de validation croisée.

Période de validation	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70	71–80	81–90	Moyenne des Nash de Validation par période		
									11–90	51–90	11–50
p 11–20		71.1	83.5	85.3	77.7	77.6	83.1	86.7	80.7	81.3	80.0
p 21–30	<u>42.8</u>		82.7	<u>73.3</u>	90.0	87.7	83.2	<u>19.8</u>	<u>68.5</u>	<u>70.2</u>	<u>66.3</u>
p 31–40	71.9	84.4		86.9	89.3	87.9	89.9	67.5	82.5	83.7	81.0
p 41–50	77.4	80.1	88.9		85.9	85.1	88.8	78.1	83.5	84.5	82.1
p 51–60	58.3	88.2	87.6	81.2		89.1	87.8	44.3	76.6	73.7	78.8
p 61–70	60.3	87.8	88.2	82.3	91.1		88.5	48.2	78.0	75.9	79.6
p 71–80	71.2	84.6	89.9	86.7	89.4	88.1		66.6	82.3	81.4	83.1
p 81–90	79.9	<u>65.5</u>	<u>79.2</u>	82.4	<u>72.0</u>	<u>72.7</u>	<u>78.9</u>		75.8	74.5	76.7

En **gras** valeur max de la colonne, en *italique souligné* valeur min, p 11–20: paramètres calés sur la période 1911–1920.

Un des objectifs de cette modélisation est de choisir le jeu de paramètres qui représente au mieux le fonctionnement du bassin versant, afin de l'utiliser pour simuler les débits dans le futur à partir de scénarios climatiques. Les trois dernières colonnes du tableau 3 permettent de choisir ce jeu de paramètres et amènent également quelques commentaires. En effet, le fait d'avoir une très longue série d'observations de débits pour cette station, permet de relativiser les calages et d'en tirer également des conséquences pour les sous-bassins versants qui n'ont pas de série aussi longue. Pour toute la période, les paramètres calés sur la période 1941–1950 représentent, en moyenne, le mieux l'ensemble de la série. Pour la période 1951–1990, il s'agit également des mêmes paramètres et pour la période 1911–1950, il s'agit des paramètres calés sur la période 1971–1980. Les valeurs de Nash moyen de validation sont proches (respectivement 83.5, 84.5, 83.1), il n'y a pas de différence notable si on choisit ces jeux de paramètres. Il est par contre singulier d'observer qu'aussi bien pour la période 1911–1950 que pour la période 1951–1990, ce sont des jeux de paramètres calés sur des années extérieures aux périodes considérées qui représentent le mieux l'ensemble de la série (respectivement 1971–1980 et 1941–1950). Cependant, il est intéressant de noter que les périodes de calage dont les paramètres conviennent le mieux, sont des périodes où l'on rencontre à la fois des années déficitaires et des années excédentaires, de manière plus ou moins équilibrée, mais pas d'années exceptionnelles. Les jeux de paramètres retenus afin de simuler les débits pour le futur sont donc les jeux calés sur les périodes 1941–1950 et 1971–1980.

Analyse de la sensibilité spatiale

En appliquant le protocole d'étude décrit précédemment au bassin versant de Koulikoro et à tous ses sous-bassins, nous avons pu étudier la sensibilité à la répartition spatiale des données d'entrée de la version semi-spatialisée du modèle GR2M. Un des premiers résultats est que le modèle n'est pas sensible à la donnée d'entrée ETP, que ce soit à sa répartition spatiale ou à sa valeur relative, confirmant ainsi d'autres travaux sur cette zone climatique (Ardoin *et al.*, 2001). S'agissant des 2 autres données, Pluie et WHC, le tableau 4 donne les variations relatives du critère de Nash et des paramètres X1 et X2 lors de l'application du protocole d'analyse.

La hiérarchie de sensibilité est la suivante: (du plus sensible au moins sensible) Pluie puis WHC. Ces valeurs représentent la valeur moyenne pour l'ensemble des sous-bassins testés (seule

Tableau 4 Variation relative des paramètres calés X1 et X2, et du Nash en fonction de la répartition spatiale.

Variation relative	X1	X2	Nash
WHC	1.89%	1.91%	1.44%
Pluie	18.29%	13.55%	13.32%

la répartition spatiale change). On peut donc en conclure que la version semi-spatialisée du modèle GR2M utilisée est bien sensible à la répartition spatiale des deux données d'entrée sur lesquelles s'est concentré le projet: la pluie et l'occupation du sol.

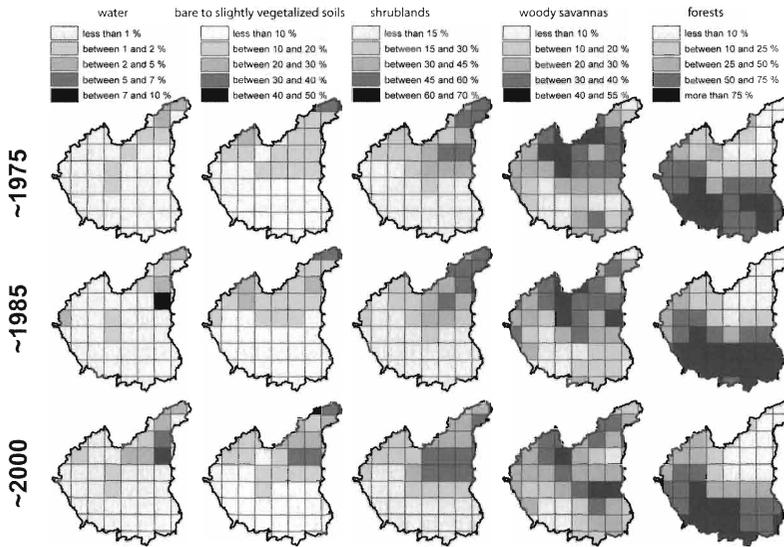


Fig. 4 Cartes au $\frac{1}{2}$ degré carré de l'occupation du sol en% de la superficie de la maille, pour les 3 périodes considérées (Ruelland *et al.*, 2008).

Cartographie de l'évolution de l'occupation du sol

Les matrices de confusion confrontant les 3 classifications finales à l'ensemble des parcelles de contrôle montrent des précisions globales respectives de 75.6%, 72.4% et 78.4% pour les périodes 1975, 1985 et 2000 (Ruelland *et al.*, 2008). Ces résultats indiquent une bonne concordance entre les classifications et les milieux observés sur le terrain. L'analyse de l'évolution des milieux depuis les années 1970 montre des changements modérés (Fig. 4). Au niveau global sur le bassin, les surfaces en eau ont doublé entre 1975 et 1985 du fait notamment de la mise en place du barrage de Sélingué en 1982, à l'est du bassin. Les surfaces de sols nus (y compris urbain) à faiblement végétalisés (y compris cultures) semblent avoir connu une augmentation entre 1985 et 2000 en passant de 8.5% des surfaces à près de 10%, tandis que, dans le même temps, les surfaces en forêts seraient passées de 48.5 à 44% de la zone d'étude. La proportion de savanes arborescentes semble avoir progressé régulièrement entre les trois périodes (de 18.8% à 21.2%). La proportion de savanes arborées a été globalement maintenue. Les taux de changements semblent avoir été plus rapides entre 1985 et 2000, qu'entre 1975 et 1985, même si les confusions plus importantes constatées au niveau de la classification de 1985 ne permettent pas de l'affirmer avec certitude.

Tableau 5 Occupation du sol par année et WHC évolutives déduites de l'occupation du sol à l'aide des coefficients d'écoulement.

Occupation du sol (%)/année	1975	1985	2000
Eau	0.4%	0.8%	0.9%
Sols nus	2.8%	2.8%	3.6%
Surfaces cultivées	21.13%	20.98%	22.88%
Végétation naturelle	75.68%	75.43%	72.63%
WHC évolutive déduite (rappel WHC FAO = 182)	176.5 mm	175.8 mm	174.7 mm

Tableau 6 Paramètres X1, X2 et valeurs de Nash pour le Niger à Koulikoro – WHC fixe et évolutive.

	param. X1	param. X2	Nash Calage (%) 1975–1988	Nash Validation (%) 1989–1995
WHC fixe	0.567	0.461	86.28	78.58
WHC évolutive	0.563	0.459	86.14	78.43

Tableau 7 modélisation intégrant les données MSG.

données/période	SOL 2004–2005	MSG 2004–2005	SOL 1995–2005	MSG 1995–2005
Critère de Nash	87.96	79.37	87.14	84.43
X1	0.4851	0.7468	0.5335	0.5565
X2	0.4509	0.4706	0.4550	0.4544
Pluie totale sur la période (mm)	3002	2274	16262	15534

Intégration de l'occupation du sol dans la modélisation, "WHC évolutive"

En utilisant la procédure appliquée avec succès dans le cas du bassin versant du Nakambé (Mahe *et al.*, 2005; Diello, 2007), nous avons produit des fichiers de WHC "évolutive" (variable dans le temps) à partir des cartographies obtenues précédemment par télédétection (Tableau 5).

Le Tableau 6 regroupe les Nash de calage et de validation pour l'intégration des WHC évolutives dans la modélisation en comparaison des valeurs fixes. On ne note aucune amélioration lors de cette intégration. Ceci peut être expliqué par la faible variation de l'occupation du sol entre les différentes périodes amenant une faible variation dans les valeurs de WHC. De plus, les résultats de modélisation sont déjà très bons sans prendre en compte cette variation temporelle, il est donc plus difficile de l'améliorer contrairement aux expériences précédentes sur le bassin versant du Nakambé (Diello, 2007).

Pluies Météosat et intégration dans le modèle

Concernant la comparaison des grilles de pluie, les données en notre possession sont insuffisantes (quelques mois sur 2 ans) et couvrent un espace bien particulier qui est la zone soudano-guinéenne. Les remarques faites ici sont donc difficilement généralisables. La dynamique spatiale des grilles MSG semble suivre la dynamique spatiale des grilles SOL (grilles construites à partir des stations de mesure au sol) tout en étant moins lissée, mais globalement, les valeurs des grilles MSG sont inférieures à celles des grilles SOL. Cependant l'écart entre les deux se réduit, au fur et à mesure que les totaux respectifs de pluie augmentent (vers le sud du bassin). La dynamique temporelle globale du bassin n'est pas respectée pour les pluies MSG: ce ne sont pas les mois d'août et septembre les plus pluvieux, ce n'est pas le cas non plus de la dynamique temporelle, maille par maille.

Des jeux de données SOL et MSG ont été constitués sur la période 1995–2005. Ces deux jeux sont identiques sauf sur la période 2004–2005 (années disponibles MSG). Les résultats sont reportés dans le Tableau 7. On constate une moins bonne performance en calage avec les pluies MSG. Ceci est probablement dû à la forte différence d'estimation de la pluie (2274 mm pour 2004–2005 avec MSG contre 3002 mm à partir des postes au sol) et aussi à une répartition temporelle différente, décalée par rapport aux débits.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet d'intégration de la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface dans la modélisation a permis d'explorer les limites des différents outils disponibles tant au niveau des modèles eux-mêmes qu'au niveau de l'estimation de l'occupation du sol par télédétection ou de

l'estimation de la pluie par MSG. En effet, dans un contexte africain, où peu de données sont disponibles, ce projet a permis d'utiliser le maximum de l'information disponible et de mettre au point des méthodologies transposables à d'autres bassins africains. L'outil de modélisation utilisé est sensible à la répartition spatiale des entrées pluies et WHC. Une méthodologie originale de traitement des données Landsat pour des grands bassins versants a été mise au point (Ruelland *et al.*, 2008). L'intégration de cette information dans les modèles demande à être encore améliorée. Enfin, même si les valeurs produites par le satellite MSG sont encore éloignées de la réalité, l'utilisation de versions améliorées de ces données sera possible avec les outils mis au point et est prometteuse.

Le modèle est calé et validé pour ce bassin versant et pourra être utilisé pour des simulations pour le futur à l'aide de grilles issues de l'IPCC AR4 2007. Parmi les perspectives ouvertes par ce projet, les méthodologies mises au point ici sont actuellement appliquées et développées dans le cadre d'un projet ANR VMC RESSAC (vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme) sur le bassin versant du Bani, affluent du fleuve Niger, d'une superficie de 102 300 km² essentiellement situé au Mali et en Côte d'Ivoire.

Remerciements Les auteurs souhaitent remercier le Programme National français de Recherche en Hydrologie (ECCO-PNRH) pour son soutien financier ainsi que le GLCF (Global Land Cover Facility <http://www.landcover.org/>) pour la fourniture des images Landsat.

REFERENCES

- Ardoïn-Bardin, S. (2004) Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II.
- Ardoïn-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J-E., Mahé, G., Niel, H. & Dieulin, C. (2009) Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrol. Sci. J.* **54**, 77–89.
- Ardoïn, S., Dezetter, A., Servat, E. & Bocquillon C. (2001) Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain. *CR Acad. Sci. IIA – Earth and Planetary Science* **333**, 611–616.
- Bergés, J-C., Chopin, F. & Bessat, F. (2005) IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas – IV CBCG, Curitiba: Brazil.
- Dezetter, A., Girard, S., Paturel, J-E., Mahé, G., Ardoïn-Bardin, S. & Servat, E. (2008) Simulation of runoff in West Africa: Is there a single data-model combination that produces the best simulation results? *J. Hydrol.* **354**, 203–212.
- Diello P. (2007) Interrelations Climat - Homme - Environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II.
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J-E., Girard, S., Servat, E. & Dezetter, A. (2003) Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. In: *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc & A. Shakeel), 215–222. Proc. Conf., Montpellier, France, 2003. IAHS Publ. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Mahé, G., Paturel, J-E., Servat, E., Conway, D. & Dezetter, A. (2005) The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *J. Hydrol.* **300**, 33–43.
- Makhlouf, Z. & Michel, C. (1994) A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *J. Hydrol.* **162**, 299–318.
- Mitchell, T. D. & Jones, P. D. (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.* **25**, 693–712.
- New, M., Hulme, M. & Jones P. (1999) Representing twentieth century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961–1990 mean monthly terrestrial climatology. *J. Climate* **12**, 829–856.
- Ouédraogo, M. (2001) Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest – Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale, Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier II.
- Paturel, J. E., Servat, E. & Vassiliadis, A. (1994) Sensitivity of conceptual rainfall–runoff algorithms to errors in input data – case of the GR2M model. *J. Hydrol.* **168**, 111–125.
- Paturel, J. E., Diello, P., Mahé, G., Dezetter, A., Yacouba, H., Barbier, B. & Karambiri, H. (2009) Modélisation hydrologique et interrelations homme-climat-environnement dans le Sahel burkinabé. New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions (Proc. of Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009), 128–135. IAHS Publ. 333. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Ruelland, D., Dezetter, A., Puech, C. & Ardoïn-Bardin, S. (2008) Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *Int. J. Remote Sens.* **29**, 3533–3551.

IAHS Publication 340
ISSN 0144-7815

friend 2010



Global Change: *Facing Risks and Threats to Water Resources*

Edited by:

Eric Servat

Siegfried Demuth

Alain Dezetter

Trevor Daniell

Co-editors: *Ennio Ferrari, Mustapha Ijjaali, Raouf Jabrane,
Henny van Lanen & Yan Huang*



Global Change: *Facing Risks and Threats to Water Resources*

Edited by:

ERIC SERVAT

*UMR HydroSciences Montpellier (HSM),
Université Montpellier 2, France*

SIEGFRIED DEMUTH

*Hydrological Processes and Climate Section, Division of Water Sciences,
Natural Sciences Sector, UNESCO, Paris, France*

ALAIN DEZETTER

*UMR HydroSciences Montpellier (HSM),
Université Montpellier 2, France*

TREVOR DANIELL

*School of Civil and Environmental Engineering,
University of Adelaide, Australia*

Co-edited by: ENNIO FERRARI, MUSTAPHA IJJAALI,
RAOUF JABRANE, HENNY VAN LANEN & YAN HUANG

Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco,
25–29 October 2010.

IAHS Publication 340
in the IAHS Series of Proceedings and Reports

Published by the International Association of Hydrological Sciences 2010

IAHS Publication 340

ISBN 978-1-907161-13-1

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

A catalogue record for this book is available from the British Library.

©IAHS Press 2010

This publication may be reproduced as hard copy, in whole or in part, for educational or nonprofit use, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. No part of this publication may be electronically reproduced, transmitted or stored in a retrieval system, and no use of this publication may be made for electronic publishing, resale or other commercial purposes without specific written permission from IAHS Press.

The papers included in this volume have been reviewed and some were extensively revised by the Editors, in collaboration with the authors, prior to publication.

IAHS is indebted to the employers of the Editors for the invaluable support and services provided that enabled them to carry out their task effectively and efficiently.

The information, data and formulae provided in this volume are reproduced by IAHS Press in good faith and as finally checked by the author(s); IAHS Press does not guarantee their accuracy, completeness, or fitness for a given purpose. The reader is responsible for taking appropriate professional advice on any hydrological project and IAHS Press does not accept responsibility for the reader's use of the content of this volume. To the fullest extent permitted by the applicable law, IAHS Press shall not be liable for any damages arising out of the use of, or inability to use, the content.

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

Publications in the series of Proceedings and Reports are available from:
IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK
tel.: +44 1491 692442; fax: +44 1491 692448; e-mail: jilly@iahs.demon.co.uk

Printed by Information Press

Cover picture: Southern Morocco by Eric Servat