

Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale

**S. ARDOIN-BARDIN, A. DEZETTER, E. SERVAT, G. MAHE,
J. E. PATUREL, C. DIEULIN & L. CASENAVE**

UMR HydroSciences Montpellier, IRD, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France
ardoin@msem.univ-montp2.fr

Résumé Cette étude présente une méthodologie pour évaluer l'impact du changement climatique sur les écoulements de quatre bassins versants situés en Afrique de l'Ouest et Centrale. Les séries chronologiques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle représentant les conditions climatiques futures sont construites à partir de deux scénarii climatiques, en utilisant les prévisions du modèle HadCM3-A2. Les débits mensuels sont simulés à l'aide d'un modèle hydrologique conceptuel, puis comparés aux observations. Les résultats montrent que les variations des écoulements dans le futur suivent celles des précipitations: diminution pour les bassins du Sénégal et de la Gambie, augmentation pour les bassins du Sassandra et du Chari.

Mots clefs Afrique de l'Ouest et Centrale; changement climatique; modes de circulation générale (MCG); ressources en eau

Evaluation of the impact of climatic change on the water resources of West and Central Africa

Abstract This study presents a method for evaluating the impact of climatic change on the river flows of four watersheds in West and Central Africa. Time series of rainfall and potential evapotranspiration representing future climatic conditions were constructed for two climate scenarios using predictions from the HadCM3-A2 model. Monthly flows were simulated with the aid of a conceptual hydrological model, and the observations were compared. The results show that the predicted flow variations follow those of the rainfall: reduced flows in the Senegal and Gambia basins, and increased flows in the Sassandra and Chari basins.

Keys words Central Africa; climatic change; general circulation models (GCM); water resources; West Africa

INTRODUCTION

Compte tenu de la variabilité du climat et des conséquences parfois dramatiques que celles-ci peut entraîner, l'évolution des ressources en eau est une question préoccupante pour de nombreuses régions du globe. Ceci est d'autant plus vrai pour les pays africains de la zone soudano-sahélienne soumis depuis une trentaine d'années à une sécheresse persistante (Servat *et al.*, 1998; Ardoin *et al.*, 2003). La question du changement climatique est devenue à la fin du 20ème siècle un enjeu international, comme l'atteste la publication du troisième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (IPCC, 2001). Mais si les connaissances sur

le fonctionnement du climat et le rôle des émissions de gaz à effets de serre ne cessent de s'améliorer, beaucoup de questions persistent quant aux incidences du changement climatique sur les systèmes anthropiques et naturels. Basée sur l'utilisation des variables climatiques produites par les modèles de circulation générale (MCG), cette étude présente l'impact du changement climatique sur les écoulements de grands fleuves africains au 21^{ème} siècle.

DESCRIPTION DES DONNEES

Bassins versants

Cette étude concerne quatre unités hydrographiques situées en Afrique de l'Ouest et Centrale: le Sénégal à Bakel (220 818 km²), la Gambie à Gouloumbo (42 642 km²), le Sassandra à Soubre (62 173 km²) et le Chari à Ndjamenà (601 984 km²). Leur régime hydrologique correspond au régime tropical pur avec une brève période de hautes eaux (juillet–octobre) suivie d'un tarissement rapide puis d'une longue période de basses eaux. Les données hydrologiques mensuelles proviennent du système d'information environnemental SIEREM développé par HydroSciences Montpellier, rassemblant les données collectées par l'IRD et complétées auprès des directions des services hydrologiques nationaux. Les données sont disponibles sur la période 1908–1998 pour le Sénégal, 1953–1998 pour le Sassandra, 1971–1996 pour la Gambie et 1933–1999 pour le Chari.

Données climatiques

Les données pluviométriques mensuelles spatialisées sous forme de grille au demi-degré carré couvrent la période 1950–1998 et sont disponibles auprès du Climatic Research Unit (CRU) de l'Université d'East Anglia (New *et al.*, 2000). Sur notre zone d'étude, la répartition des précipitations mensuelles est unimodale, avec un maximum centré sur août, qui représente 40% à 60% du total annuel. Les précipitations moyennes annuelles diminuent du sud vers le nord et sont comprises entre 250 et 1800 mm. Nous disposons également de grilles mensuelles d'évapotranspiration potentielle (ETP) sur la période 1950–1995 et à la même résolution que celle des précipitations. Les données d'ETP ont été calculées selon la formule de Penman (1956) et obtenues auprès du CRU.

Modélisation hydrologique

Les écoulements mensuels ont été simulés avec le modèle conceptuel GR2M du Cemagref en utilisant une distribution du bassin versant en un maillage régulier (0.5° × 0.5°). Seule une brève description du modèle est donnée ici, les détails de son fonctionnement pouvant être consultés dans Paturol *et al.* (1995). Sur chaque cellule du réseau et à chaque pas de temps, une fraction de la pluie participe à l'écoulement direct. Le niveau d'un réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la

fraction de pluie restante et de l'ETP. La vidange progressive de ce réservoir produit l'écoulement retardé. L'écoulement à l'exutoire du bassin versant est obtenu par la sommation des contributions des différentes cellules du réseau. Le remplissage maximal du réservoir sol correspond à la capacité en eau du sol, dont les données sont estimées à partir de la carte des sols de la FAO (Dieulin, 2005). Les deux paramètres du modèle sont estimés à partir d'un calage sur la période 1971–1987 et validés sur la période 1998–1995 (Ardoïn-Bardin, 2004).

EVALUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Méthodologie

La méthode employée pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau se divise en trois étapes: (a) le modèle conceptuel GR2M est calé pour chaque bassin versant en utilisant les séries hydrologiques et climatiques observées; (b) les séries climatiques futures (période 2006–2095) sont construites à partir des séries observées sur une période de référence et de scénarii climatiques exprimant un changement dans les précipitations et l'ETP; (c) le modèle conceptuel GR2M avec les paramètres calés à l'étape (a) simule les écoulements en utilisant les séries chronologiques construites à l'étape (b).

Construction de scénarii climatiques

Les projections de variables climatiques sont produites par de nombreux MCG. Celles prévues par le modèle HadCM3 avec le scénario d'émission de gaz à effet de serre A2 sont choisies pour cette étude. Comme les précipitations simulées par HadCM3-A2 ne sont pas suffisamment fiables à l'échelle régionale pour être utilisées directement dans les études d'impact (Casenave, 2004), il est recommandé d'établir les champs de variations entre le climat futur et une période de référence. Les différences entre les précipitations représentatives de la période de référence et du climat futur sont calculées pour chaque cellule du MCG et à chaque pas de temps (mois i , année j de la période de référence, année k de la période 2006–2095). Elles sont alors exprimées en anomalies standardisées (scénario *Anomalies*) ou en taux de variations (scénario *Horizons*) en fonction d'une climatologie moyenne tirée des simulations du HadCM3-A2 sur la période de référence 1969–1998:

$$\text{Scénario } Anomalies: An_{MCG,i,k} = (X_{MCG,i,k} - \bar{X}_{MCG,i}) / \sigma_{MCG,i} \quad (1)$$

où X_{MCG} est la valeur mensuelle simulée par le MCG, \bar{X}_{MCG} est la moyenne de la série simulée sur la période de référence, σ_{MCG} est l'écart-type de la série simulée sur la période de référence.

$$\text{Scénario } Horizons: \Delta_{horiz,i} = 100 \times (\bar{X}_{horiz,i} - \bar{X}_{ref,i}) / \bar{X}_{ref,i} \quad (2)$$

où \bar{X}_{horiz} est la valeur moyenne de la série simulée calculée sur un horizon donné (2020, 2050 ou 2080), \bar{X}_{ref} est la valeur moyenne de la série simulée calculée sur la période de référence.

Les variations de l'ETP pour le climat futur sont calculées de la même manière, en utilisant la période de référence 1966–1995. Les séries chronologiques de précipitations et d'ETP représentant le climat futur (période 2006–2095) sont construites en combinant les séries chronologiques observées sur la période de référence et les deux scénarii de changement climatique, selon les formules suivantes:

$$\text{avec le scénario } Anomalies: X_{SCEN,i,k} = \overline{X}_{CRU,i} + (Ano_{MCG,i,k} \times \sigma_{CRU,i}) \quad (3)$$

où \overline{X}_{CRU} est la valeur moyenne de la série observée sur la période de référence, σ_{CRU} est l'écart-type de la série observée sur la période de référence.

$$\text{avec le scénario } Horizons: X_{SCEN,i,k} = X_{CRU,i,j} \times \Delta_{horiz,i} \quad (4)$$

où X_{CRU} est la valeur mensuelle observée d'une année tirée aléatoirement sur la période de référence.

RESULTATS DE L'ETUDE D'IMPACT AUX HORIZONS 2020, 2050 et 2080

Évolution de l'évapotranspiration potentielle

Le modèle HadCM3-A2, comme l'ensemble des MCG, prévoit une augmentation de la température pour les décennies à venir, qui peut atteindre jusqu'à 4°C en moyenne sur l'ensemble de la surface terrestre. Ce réchauffement conduit à une augmentation de l'ETP sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Cette augmentation, relativement faible à l'horizon 2020, atteint localement plus de 30% à l'horizon 2080. L'Afrique Centrale et les pays en bordure du Golfe de Guinée sont les plus touchés par cette hausse et montrent les plus forts taux d'accroissement. Selon le scénario climatique utilisé, l'ETP augmente en moyenne de 2–3% à l'horizon 2020, de 5–8% à l'horizon 2050 et de 11–20% à l'horizon 2080 (Tableau 1). Cet accroissement de l'ETP concerne tous les mois de l'année, mais plus particulièrement ceux de novembre à février, où l'on observe une augmentation de l'ordre de 10–30% selon le scénario climatique utilisé. L'importance de ces variations d'ETP sur les ressources en eau dépend de leur association avec les variations des précipitations, car le modèle hydrologique retenu est plus sensible aux modifications pluviométriques qu'aux variations de l'ETP (Paturel et al., 1995).

Évolution des précipitations

Deux zones d'évolution des précipitations se distinguent de part et d'autre d'un axe orienté sud-ouest/nord-est (Fig. 1). Au nord-ouest de cet axe, les précipitations

Tableau 1 Taux de variations de l'ETP aux trois horizons, calculés par rapport à la période de référence 1966–1995 pour les bassins versants étudiés (exprimés en %).

Bassin versant	2020		2050		2080	
	Ano	Horiz	Ano	Horiz	Ano	Horiz
Sénégal-Gambie	+0.8	+3.9	+1.8	+8	+4.9	+22.9
Sassandra	+1.5	+2.4	+4.5	+6.2	+10.6	+15.7
Chari	+2.1	+3.3	+6	+10.8	+11.6	+23.1

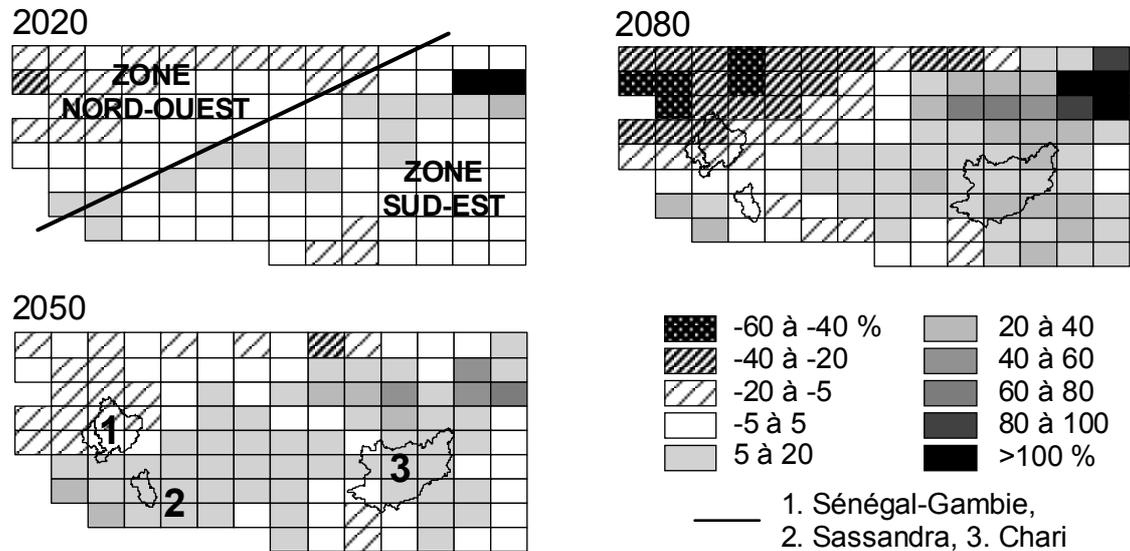


Fig. 1 Variations des précipitations moyennes (scénario *Anomalies*) aux trois horizons par rapport aux précipitations moyennes observées sur la période 1969–1998 (en %). Les taux de variations entre les deux scénarii sont du même ordre de grandeur.

Tableau 2 Taux de variations moyens des précipitations aux trois horizons, calculés par rapport à la période de référence 1969–1998 sur les deux zones identifiées (exprimés en %).

	Zone Nord-Ouest		Zone Sud-Est	
	Ano	Horiz	Ano	Horiz
2020	-5.4	-8.8	+1.6	+0.5
2050	-4.6	-2.1	+6.5	+6.8
2080	-28.9	-41.2	+11.4	+12.7

moyennes annuelles diminuent, tandis qu'elles augmentent au sud-est de l'axe (Tableau 2). Pour les bassins du Sénégal et de la Gambie, les conditions pluviométriques déficitaires observées sur la période 1969–1998 semblent se maintenir, puis se dégrader à l'horizon 2080 (jusqu'à -47 % localement). Au contraire, les bassins versants du Sassandra et du Chari sont situés dans la zone où les conditions pluviométriques s'améliorent (jusqu'à +35 % localement à l'horizon 2080). On note que pour le bassin du Sassandra les taux de variations sont maximums à l'horizon 2050 (jusqu'à +14 % localement).

La Fig. 2 présente les variations des précipitations moyennes mensuelles pour les bassins versants étudiés. La saison des pluies à l'horizon 2020 est proche de celle observée sur la période 1969–1998. Les différences majeures apparaissent à l'horizon 2080, où la baisse (hausse) des précipitations moyennes annuelles s'explique par une diminution (augmentation) des volumes précipités entre juillet et septembre. De manière générale, les variations du climat sous un scénario donné s'amplifient depuis les horizons 2020 et 2050 à l'horizon 2080. Associées à une ETP croissante, des précipitations réduites (accrues) laissent présager une réduction (augmentation) des écoulements pour les décennies à venir.

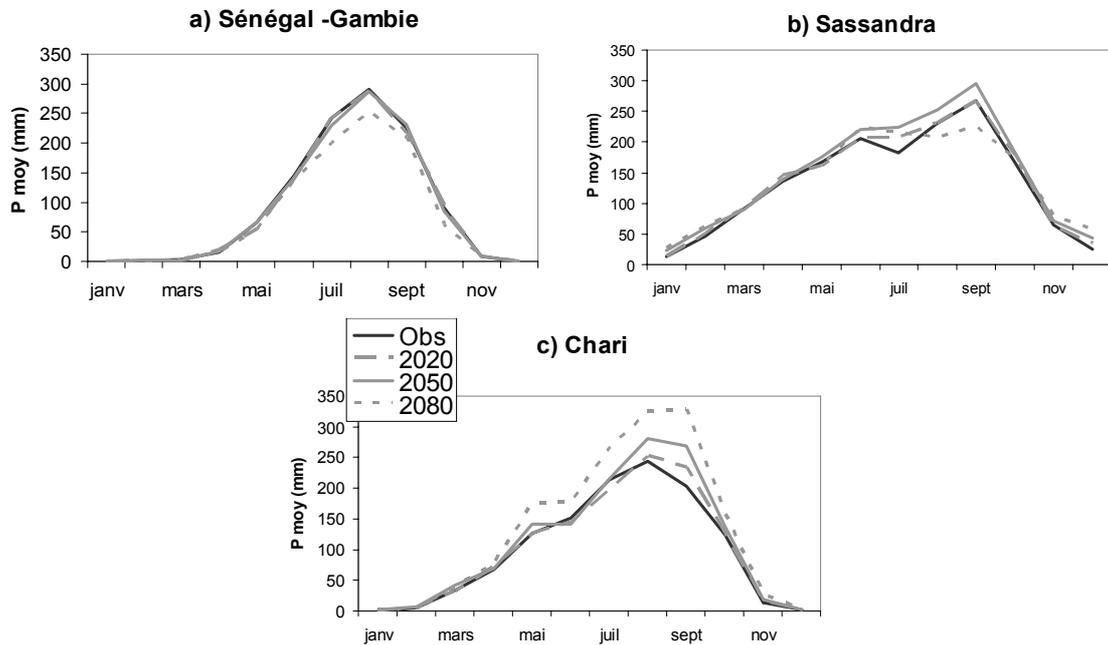


Fig. 2 Précipitations moyennes mensuelles (scénario *Anomalies*) aux trois horizons comparées aux précipitations moyennes mensuelles observées sur 1969–1998 (en mm).

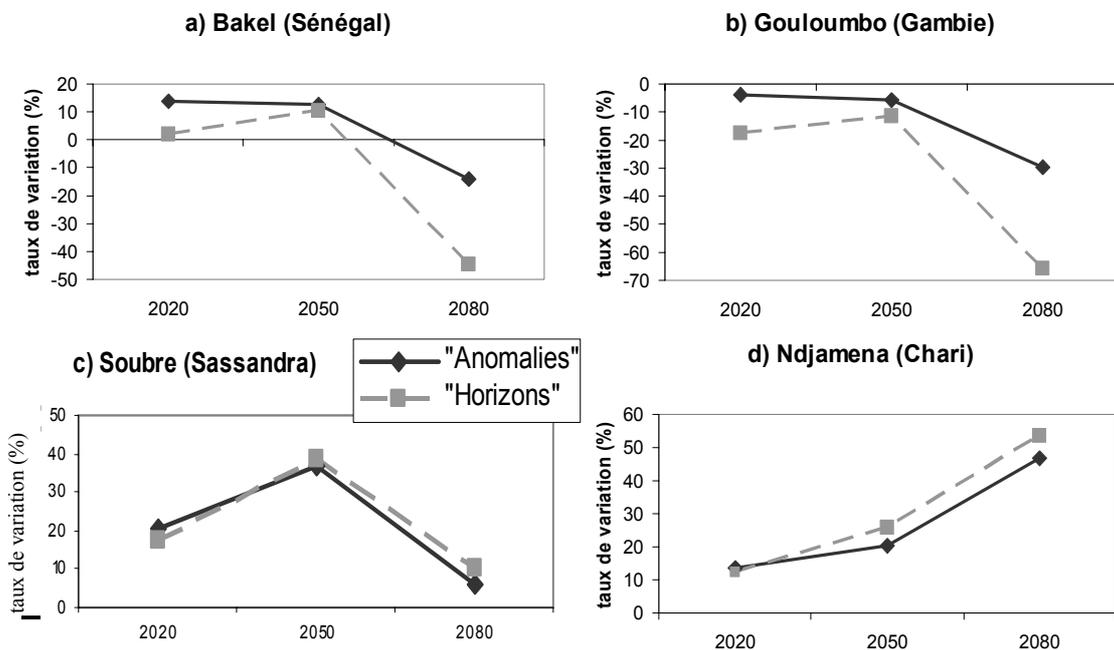


Fig. 3 Évolution des taux de variations des débits moyens annuels (en %) calculés aux horizons 2020, 2050 et 2080 pour les quatre bassins versants étudiés.

Evolution des écoulements

Pour chaque bassin versant, les séries de précipitations et d'ETP mensuelles construites à partir des deux scénarii climatiques sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M. On suppose que la relation pluie-débit reste identique à celle

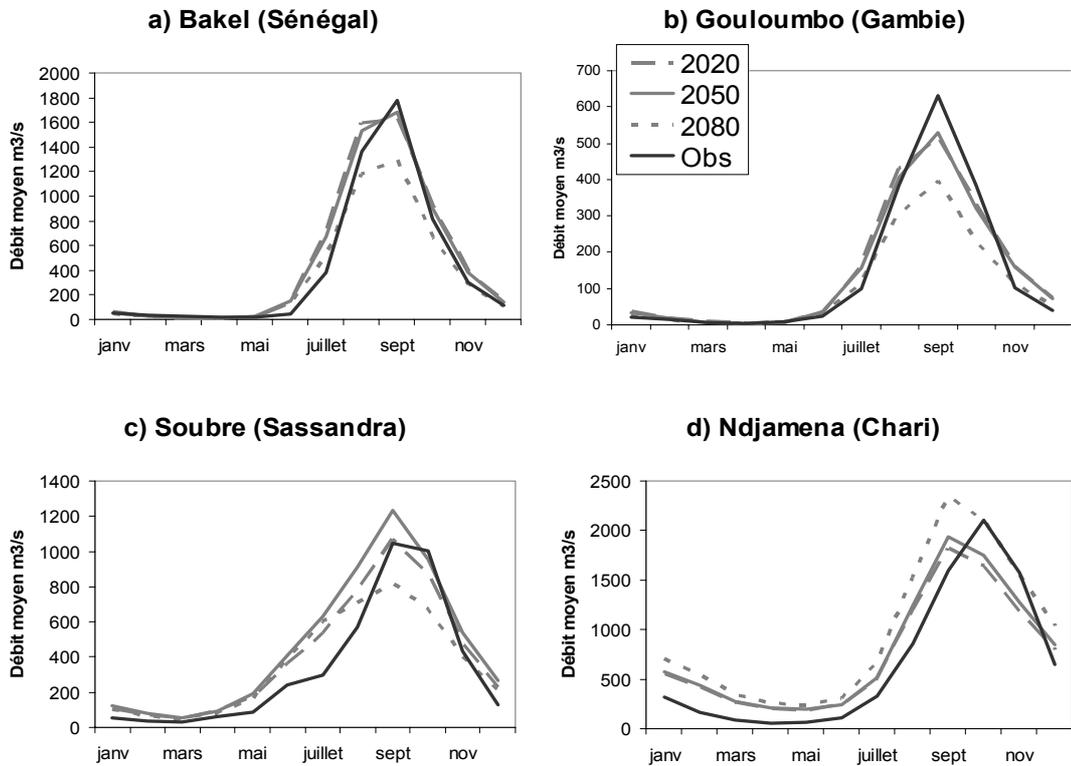


Fig. 4 Hydrogrammes moyens aux trois horizons (scénario *Anomalies*) comparés à celui observé sur la période 1971–1995 (en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

formulée dans le modèle hydrologique, calé avec les séries chronologiques observées. Les valeurs de débits ainsi simulées peuvent être considérées comme des valeurs “réalistes” permettant d’aboutir à des ordres de grandeurs et comparées aux observations pour évaluer les modifications en terme de taux de variations. Dans l’ensemble, l’impact du changement climatique sur les écoulements varie en fonction des précipitations projetées par le modèle HadCM3-A2. Il semble que l’augmentation continue de l’ETP, liée à celle de la température, affecte peu le bilan hydrologique annuel.

Pour les bassins versants du Sénégal et de la Gambie, la tendance est à la diminution des écoulements (Fig. 3(a) et 3(b)). Selon le scénario climatique choisi, les déficits moyens annuels à l’horizon 2080 varient entre -14% et -45% pour le bassin du Sénégal et entre -30% et -66% pour le bassin de la Gambie. Les débits moyens annuels simulés sur les dernières décennies du 21^{ème} siècle seraient alors plus faibles que ceux observés sur la période 1971–1995. Au contraire, les projections climatiques du modèle HadCM3-A2 conduisent à l’augmentation des écoulements pour le bassin du Chari mais également pour celui du Sassandra, même si les taux de variations à l’horizon 2080 sont inférieurs à ceux de l’horizon 2050 (Fig. 3(c) et 3(d)). Les débits moyens annuels augmenteraient de l’ordre de $+38\%$ (horizon 2050) et de $+10\%$ (horizon 2080) pour le bassin du Sassandra et entre $+47\%$ et $+53\%$ à l’horizon 2080 pour le bassin du Chari. Toutefois, les écoulements ne semblent pas retrouver les niveaux observés avant la mise en place de la sécheresse sur l’Afrique de l’Ouest et Centrale.

En règle générale, les variations observées sur les écoulements annuels se traduisent par une variation des volumes écoulés entre juillet et octobre. La

comparaison des hydrogrammes moyens mensuels aux trois horizons avec celui de la période de référence montre qu'il n'y a pas de modification du régime hydrologique pour les bassins versants du Sénégal et de la Gambie (Fig. 4(a) et 4(b)). À l'horizon 2080, les débits de pointe en septembre enregistrent une diminution de -27 % pour le bassin du Sénégal et de -37 % pour le bassin de la Gambie. En revanche pour le bassin du Sassandra (Fig. 4(c)), les débits simulés de juin à août sont supérieurs à ceux observés et compensent en partie la diminution des écoulements en septembre-octobre à l'horizon 2080 (-22 %). Pour le bassin du Chari (Fig. 4(d)), on observe un glissement du pic de crue d'octobre-septembre accompagné d'un accroissement des débits en période de basses eaux. À l'horizon 2080, le débit de pointe en septembre enregistre une augmentation de +12 % par rapport au débit de pointe observé en octobre sur la période 1971-1995.

CONCLUSION

Cette étude propose une méthodologie pour évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur les écoulements. Basée sur les projections climatiques du modèle HadCM3-A2, la situation pour les décennies à venir est évaluée au moyen du modèle hydrologique GR2M. Les variations s'amplifient depuis les horizons 2020 et 2050 vers l'horizon 2080: hausse de température (et donc de l'ETP) associée à une diminution (secteur nord-ouest) ou une augmentation (secteur sud-est) des précipitations et des écoulements (sauf pour le bassin du Sassandra). Toutefois, ces résultats doivent être utilisés avec précaution. Les simulations des écoulements au cours du 21ème siècle dépendent essentiellement du modèle hydrologique utilisé mais également des projections climatiques, et donc du choix du MCG. Si les prévisions des MCG convergent vers une augmentation significative de la température, l'étendue des situations rencontrées pour les précipitations en Afrique de l'Ouest (Casenave, 2004) suggère de prendre en compte les prévisions de plusieurs MCG pour évaluer la gamme des impacts potentiels.

RÉFÉRENCES

- Ardoin, S., Lubes-Niel, H., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, J. F., Mahé, G. & Paturel, J. E. (2003) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990. In: *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc & A. Shakeel) (Proc. Montpellier Conf. April 2003), 223-228. IAHS Publ. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Ardoin-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, France.
- Casenave, L. (2004) Hydro-climatic variability: comparison of different global circulation model in western Africa. Master Thesis, University of Chalmers. Sweden.
- Dieulin, C. (2005) Calcul des capacités en eau des sols à partir de la carte des sols de la FAO. Note interne. UMR HydroSciences Montpellier, France.
- IPCC (2001) *Climate Change 2001: Synthesis Report* (ed. by R. T. Watson and the Core Writing Team). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- New, M., Hulme, M. & Jones, P. (2000) Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: development of a 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate* **13**(13), 2217-2238.
- Paturel, J. E., Servat, E. & Vassiliadis, A. (1995) Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data. Case of the GR2M model. *J. Hydrol.* **168**, 111-125.

- Servat, E., Paturol, J. E., Kouame, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J. F., Lubes-Niel, H., Fritsch, J. M., Masson, J. M. & Mariou, B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J. M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan Conf.), 323–337. IAHS Publ. 252. IAHS Press, Wallingford, UK.