

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DE LA CASAMANCE

BODIAN A.¹, BACCI M.², DIOP M.³

¹Laboratoire Leïdi « Dynamique des milieux et développement » Université Gaston Berger (UGB), BP 234, Saint Louis, Sénégal, ansoumana.bodian@ugb.edu.sn, bodianansoumana@gmail.com

²IBIMET-CRN, Italie, m.bacci@ibimet.cnr.it

³Centre National de Recherche Agronomique (ISRA), Sénégal, mbaye.diop@isra.sn/mbdiop@gmail.com

Résumé – La présente étude propose une évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur les écoulements du bassin versant de la Casamance. Pour ce faire, les sorties de cinq modèles climatiques du dernier exercice CMIP5 du GIEC (CCSM4, CNRM, HADGEM2-ES, ICHEC et MIROC5), avec deux scénarios d'évolution de gaz à effet de serre (RCP 4.5 et RCP 8.5), sont utilisés en entrée du modèle hydrologique GR2M afin de simuler les écoulements à l'échelle des bassins versants à l'horizon 2028. Une analyse des résultats obtenus permet de constater que pour le scénario RCP 4.5, deux modèles climatiques prévoient une baisse des écoulements entre -3,27 % et -32 % et trois modèles climatiques prévoient une augmentation des écoulements de 10 % à 138 %. Pour le scénario RCP 8.5, par contre, trois modèles climatiques prévoient une baisse des écoulements entre -7,8 % et -42,5 % et deux modèles climatiques prévoient une augmentation des écoulements entre 7,5 % et 115,7 %.

Mots-clés : Bassin de la Casamance, modélisation pluie-débit, scénarios climatiques, GR2M.

Abstract – **Impact of Climate Change on Water Resources in the Casamance River Basin.** This study provides an assessment of the potential impact of climate change on water resources in the Casamance river basin. For that purpose, the outputs of five CMIP5 climate models with two Representative Concentration Pathways (RCPs) of greenhouse gases concentration trajectories (RCPs 4.5 and 8.5) are used as input to the GR2M hydrological model to simulate flows at the scale of the watershed by 2028. An analysis of the results shows that for the RCP 4.5 scenario, two climate models predict a decrease in flows between -3.27% and 32% and three climate models predict a 10% to 138% increase in flow. For the RCP 8.5 scenario, on the contrary, three climate models predict a decrease in flows between -7.8% and -42.5%, and two climate models predict an increase of flows between 7.5% and 115.7%.

Keywords: Casamance river basin, rainfall-runoff modeling, climate scenarios, GR2M.

Introduction

L'étude des impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau est un enjeu important. En effet, la gestion optimale de la ressource en eau, en quantité comme en qualité, est une condition essentielle du développement durable de nos pays. Ce développement s'accompagne inéluctablement d'une croissance des besoins, dans un contexte de croissance démographique, notamment au Sénégal. Ainsi, dans cette étude, les sorties de cinq modèles climatiques sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M, dont la robustesse à simuler les écoulements en contexte africain a été démontrée par plusieurs auteurs (Ouédraogo *et al.*, 1998 ; Ardoin-Bardin *et al.*, 2009 ; Mahé *et al.*, 2005 ; Bodian, 2011 ; Bodian *et al.* 2012 et 2015a) afin de simuler les écoulements à l'échelle des bassins versants de la Casamance à Kolda à l'horizon 2028 (période 2016-2040). L'exploitation des résultats de ces simulations permet de déterminer dans quelles mesures les écoulements de la Casamance seront affectés par des modifications du climat à moyen terme.

La Casamance est un petit fleuve côtier qui se caractérise par la faiblesse des pentes et une invasion profonde de la mer à l'intérieur du bassin. Cela occasionne la salinisation des terres agricoles. En effet, la mer remonte le cours principal de la Casamance jusqu'à Dianamalari à 152 km de l'embouchure (Dacosta, 1989). La station hydrologique de Kolda contrôle l'écoulement du bassin supérieur.

1. Données, outil et méthodes

1.1 Données

1.1.1 Données observées

Les données mensuelles observées de précipitation et des autres paramètres climatiques, proviennent des Directions de la Météorologie Nationale (DMN) de la Gambie, de la Guinée Bissau et du Sénégal. Elles concernent dix sept postes pluviométriques et une station synoptique où sont mesurés les paramètres climatiques. Les données hydrologiques de la station de Kolda proviennent de la base de données de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRES). Elles s'étendent sur la période 1964-2007. Cette période (1964-2007) a été choisie comme référence pour cette étude. Elle a la particularité de présenter des données communes (pluie, ETP et débit) qui comportent peu de lacunes. La répartition spatiale des stations climatiques et hydrométriques est présentée sur la Fig. 1.

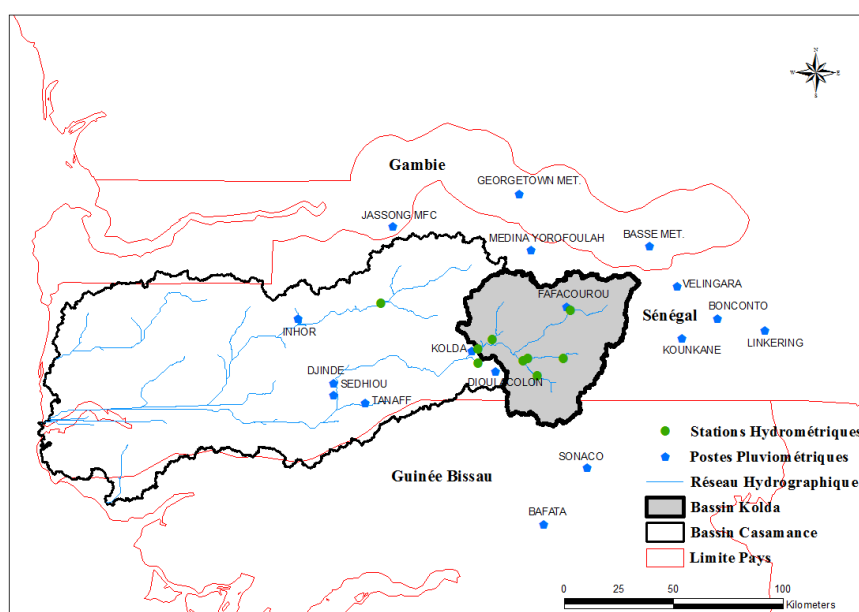


Figure 1. Situation de la Casamance à Kolda et des stations climatiques et hydrométriques

1.1.2 Modèles climatiques

Cinq modèles climatiques globaux (Tableau 1) ont été choisis parmi les Representative Concentration Pathways (RCP, Taylor *et al.* 2012) disponibles en choisissant le scénario moyen (RCP 4.5) et pessimiste (RCP 8.5). Ce choix a été motivé par la disponibilité des données et l'utilisation fréquente de ces modèles dans les études d'impacts (Amadou *et al.* 2014, Bop *et al.* 2014). La concordance des modèles est plus grande dans le cas des températures et ils prévoient toujours une augmentation des températures (Paturel 2014, Amadou *et al.* 2014, Bop *et al.* 2014, Bodian *et al.* 2015b). Ceci a justifié le choix d'un seul modèle (MIROC5) pour les scénarios de température. La résolution spatiale de ces MCG est présentée dans le tableau 1.

Tableau 1. Résolutions et abréviations des modèles utilisés

Centre de modélisation	Nom abrégé du modèle	Résolution (lat x long)
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis CCCMA	CanESM2	0.25°× 0.25°
Irish Centre for High-End Computing	ICHEC	0.5°× 0.5°
Met Office Hadley Centre – MOHC	HadGEM2-ES	0°25'× 0°25'
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC5	0°25'× 0°25'
CNRM-CM5 ESM developed at Météo-France and CERFACS http://www.cnrm.meteo.fr/cmip5/IMG/pdf/Voldoire_et_al_CD_online.pdf	CNRM CERFACS	0°25'× 0°25'

1.2 Méthodes

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya et Michel (1991), Makhlouf et Michel (1994) et Mouelhi *et al.*, (2006), qui ont permis d'améliorer progressivement ses performances. La structure du modèle GR2M, bien qu'empirique, l'apparente à un modèle conceptuel à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Ainsi, sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin. Une description détaillée du modèle et son schéma conceptuel peuvent être trouvés dans Makhlouf et Michel (1994) et Mouelhi *et al.*, (2006). Le modèle GR2M nécessite des données de pluie et d'ETP à l'échelle mensuelle. Les pluies moyennes ont été calculées à partir des données des stations présentées à la Fig. 2, selon la méthode du Krigeage (Baillargeon, 2005) et les données d'évapotranspiration (ETP) selon la formule de Penman (1948) à partir des données climatiques de la station synoptique de Kolda. En effet, la variabilité spatiale de l'ETP mensuelle est faible dans cette région et le modèle GR2M utilisé est peu sensible à cette variable (Paturel *et al.*, 1995 ; Ardoin-Bardin *et al.*, 2001).

La méthode adoptée dans ce travail comporte les étapes suivantes : (i) calage-validation du modèle GR2M sur la période de référence 1964-2007 avec les données observées puis simulation des écoulements observés pour évaluer la performance du modèle à simuler les débits observés ; (ii) élaboration des scénarii climatiques ; (iii) simulation des débits futurs à l'horizon 2028 en utilisant les jeux de paramètres validés à l'étape (i). Deux critères quantitatifs ont été utilisés pour évaluer la performance du modèle GR2M en calage et en validation : (i) le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) calculé sur les débits qui est d'usage courant en hydrologie et basé sur la somme des erreurs quadratiques ; et (ii) le coefficient d'appréciation du bilan volumique, qui est un élément essentiel lorsqu'on s'intéresse à la ressource en eau (Ardoin, 2004).

2. Résultats

2.1. Performance du modèle en calage et en validation

Le tableau 2 donne une synthèse des résultats obtenus en calage et en validation. Les valeurs du critère de Nash et du bilan volumique en calage et en validation sont, de façon

générale, bonne car supérieure à 0,60. Les valeurs des paramètres (X1 et X2) ainsi obtenus sont utilisées pour la simulation des écoulements futurs.

Tableau 2. Performance du modèle GR2M en calage-validation

	Critères d'efficacité (%)		Paramètres	
	<i>Nash(Q)</i>	Bilan	X1	X2
Calage (1974-1985)	89.6	113.3	8.01	0.43
Validation (1968-1973)	67.3	67.8		

2.2. Evolution des forçages climatiques à l'horizon 2028

L'évolution des forçages climatiques à l'horizon 2028 par rapport à la période de référence 1983-2007 est présentée à la figure 2. Elle varie en fonction des modèles climatiques et des différents scénarios. Ainsi, pour le scénario RCP 4.5 trois modèles climatiques (CCSM4, CNRM et MIROC5) prévoient une baisse des pluies comprise entre -4,61 et -7 %. Seuls deux modèles climatiques (HADGEM2_ES et ICHEC) prévoient une augmentation des précipitations de l'ordre de 1,13 à 13,70 %. La baisse des précipitations s'intensifie avec le scénario RCP 8.5, avec des taux de variation des moyennes compris entre -3,53 (HADGEM2_ES) et -14,45 % (CNRM). Globalement, même s'il n'y a pas de consensus entre les modèles climatiques, la moyenne de ces modèles annonce un changement de précipitation à l'horizon 2028 à peine perceptible.

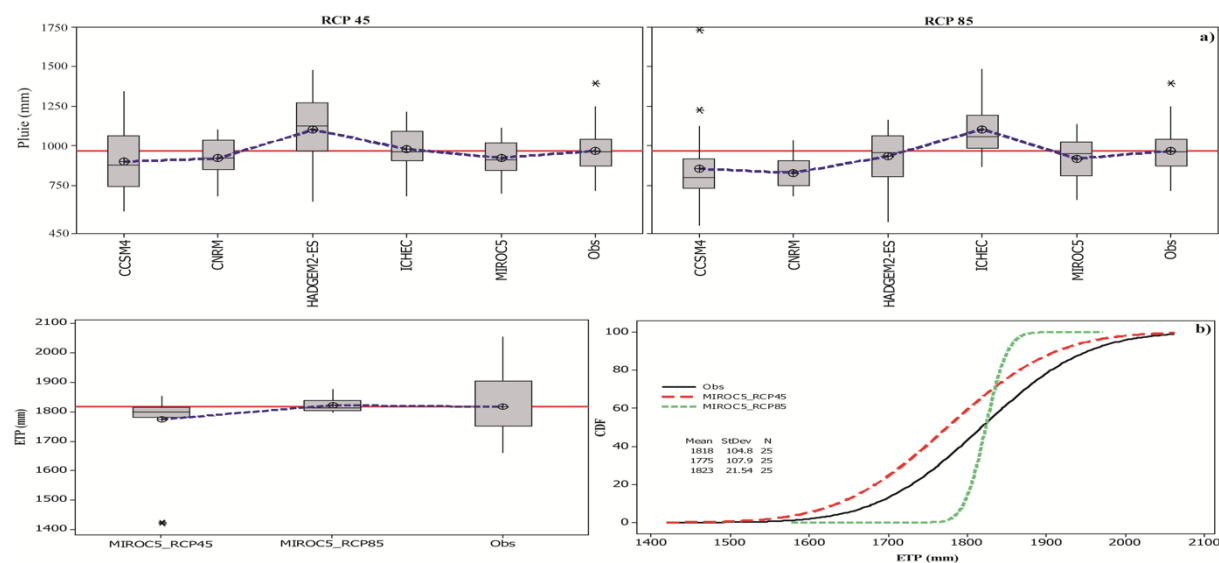


Figure 2. Evolution des forçages climatiques à l'horizon 2028 (2016-2040) par rapport à la période de référence 1983-2007 : (a) représente les pluies (b) l'évapotranspiration. La ligne rouge représente la moyenne des valeurs observées sur la période de référence 1983-2007.

2.3. Evolution des écoulements à l'horizon 2028

La figure 3 présente une série de boîtes à moustaches montrant les statistiques des débits annuels projetés à l'horizon 2028 par rapport à ceux de la période de référence 1983-2007. En hypothèse moyenne (scénario RCP 4.5) deux modèles climatiques (CCSM4 et MIROC5) sur cinq prévoient une baisse des écoulements moyens annuels variant entre -3,3 % et -32 %. Les modèles climatiques CNRM, ICHEC et HADGEM2_ES prévoient une augmentation des écoulements de 10 %, 41,76 % et 138,4 % respectivement. La moyenne calculée à partir des simulations des cinq modèles climatiques donne une augmentation des écoulements de 31 %. En hypothèse pessimiste (scénario RCP 8.5), trois des cinq modèles climatiques prévoient une baisse des écoulements comprise entre -7,8 % et -42,5 %. Seuls deux modèles climatiques

prévoient une augmentation de 7,5 % à 115,7 % des écoulements. Pour le scénario RCP 8.5, la moyenne de l'ensemble des simulations produit une augmentation de 12,5 % des écoulements moyens annuels.

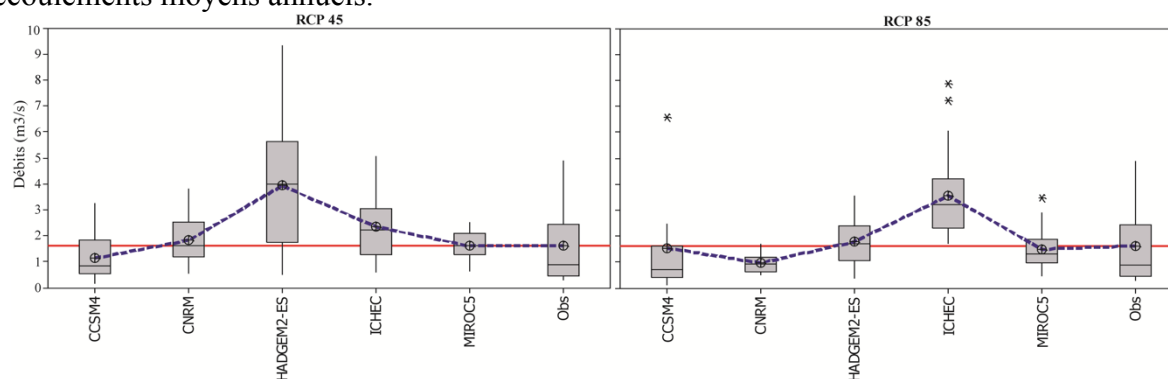


Figure 3. Evolution des écoulements de la Casamance à l'horizon 2028 (2016-2040) par rapport à la période de référence 1983-2007 : la ligne rouge représente la moyenne des valeurs observées sur la période de référence 1983-2007.

Conclusion

Cette étude vise essentiellement à donner une idée sur les impacts potentiels d'un changement climatique sur les apports en eau de la Casamance à Kolda. Ainsi, en hypothèse moyenne (scénario RCP 4.5), la moyenne des cinq modèles climatiques donne une augmentation des écoulements de 31 %. Pour le scénario RCP 8.5, la moyenne de l'ensemble des simulations produit une augmentation de 12,5 % des écoulements moyens annuels. Cette augmentation des écoulements (par conséquent des disponibilités en eau) dans le bassin de la Casamance est en accord avec la tendance actuelle des pluies à l'échelle du Sénégal qui se caractérise par un retour à des conditions humides même si les volumes précipités sont encore inférieures aux quantités d'avant la grande sécheresse des années 1970 (Bodian, 2014).

Cependant, ces résultats obtenus doivent être maniés avec beaucoup de précaution en raison de quelques difficultés inhérentes aussi bien à la modélisation hydrologique qu'aux incertitudes issues des modèles climatiques.

Remerciement :

Nous remercions la République d'Italie à travers la Direction de la Coopération et le Gouvernement du Sénégal qui ont financé ce présent travail dans le cadre du Programme d'Appui au Programme National d'Investissement en Agriculture du Sénégal (PAPSEN).

Bibliographie

Amadou A., Gado D. A., Seidou O., Seidou S. I., Ketvara S., 2014. Changes to flow regime on the Niger River at Koulikoro under a changing climate. *Hydrological Sciences Journal*, **60**, 1709-1723. DOI:10.1080/02626667.2014.916407.

Ardoin 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. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **333**, 611-616.

Ardoin-Bardin S., 2004. *Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélien* (Thèse de doctorat). Université de Montpellier II, France.

Ardoin-Bardin S., 2009. Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, **54**, 77-89.

Baillargeon S., 2005. *Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations* (Mémoire M. Sc). Faculté de Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Canada.

- Bodian A., 2014. Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'ouest). *Revue Physio-Géo-Géographie Physique et Environnement*, **VIII**, 297-312.
- Bodian A., 2011. *Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal* (Thèse de doctorat). Université Cheikh AntaDiop de Dakar, Sénégal.
- Bodian A., Dezetter, Dacosta H., 2012. Apport de la modélisation hydrologique pour la connaissance de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Revue de Climatologie*, **9**, 109-125.
- Bodian A., Dezetter A., Dacosta H., 2015a. Rainfall-Runoff Modelling of Water Resources in the Upper Senegal River Basin. *International Journal of Water Resources Development*. <http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2015.1026435>
- Bodian A., Dezetter A., Diop L., 26-30 oct. 2015b. Evolution des apports en eau au barrage de Manantali à l'horizon 2050. Dans *Conférence Internationale FRIEND/UNESCO sur l'hydrologie des grands bassins africains*, Hammamet, Tunisie.
- Bop M., Amadou A., Seidou O., Kébé C. M. F., Ndione J. A., Sambou S. and Sanda I. S., 2014. Modeling the Hydrological Dynamic of the Breeding Water Bodies in Barkedji's Zone. *Journal of Water Resource and Protection*, **6**, 741-755. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.68071>
- Dacosta H., 1989. *Précipitation et écoulement dans le Bassin de la Casamance* (Thèse 3ème cycle). Département géographie, FLSH, Université Cheikh AntaDiop de Dakar, Sénégal.
- Kabouya M., Michel C., 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau*, **4**, 569-587.
- Mahé G., Paturel J. E., Servat E., Conway D., Dezetter A., 2005. Impact of land use change on soil water holding capacity and river modeling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, **300**, 33-43.
- Makhlouf Z., Michel C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* **162**, 299-318.
- Mouelhi S., Michel C., Perrin C., Andréassian V., 2006. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* **318**, 200-214.
- Nash J. E. et Sutcliffe J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, 282-290.
- Ouédraogo M., Servat E., Paturel J.-E., Lubès-Niel H., Masson J.-M., 1998. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'ouest et centrale non-sahélienne. Proc. of the Abidjan Conf., Ivory Coast, *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, 315-321.
- Paturel J.-E., 2014. Exercice de scénarisation hydrologique en Afrique de l'Ouest - Bassin du Bani, *Hydrological Sciences Journal*, **59**, 1135-1153, DOI: 10.1080/02626667.2013.834340
- Paturel J.-E., Servat E., Vassiliadis A., 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, **168**, 11-125.
- Penman, H. L., 1948. Natural Evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings Royal Society London*, 120-145.
- Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>