

Application de scénarii climatiques en modélisation hydrologique: utilisation des sorties GCM

SANDRA ARDOIN-BARDIN, ALAIN DEZETTER, ERIC SERVAT, CLAUDINE DIEULIN, LAURENCE CASENAVE, HÉLÈNE NIEL, JEAN-EMMANUEL PATUREL & GIL MAHÉ

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

Résumé Cette étude aborde le problème de l'utilisation des données issues des GCM pour évaluer l'impact du changement climatique sur les écoulements, en particulier, pour l'Afrique de l'Ouest. Il s'agit, d'une part, d'évaluer la fiabilité de quatre GCM (HadCM3, ECHAM4, NCAR-PCM, CSIRO-MK2) au regard des précipitations et, d'autre part, d'évaluer les impacts du changement climatique sur les écoulements de quatre grands fleuves (Sénégal, Gambie, Sassandra, Chari). Pour ce faire, les précipitations simulées par les GCM sont comparées à celles observées. Ces données simulées, peu réalistes, ne peuvent être utilisées directement dans les modèles hydrologiques pour les études d'impacts. C'est pourquoi deux scénarii climatiques basés sur les variations prévues par le modèle HadCM3-A2 ont été élaborés et introduits dans le modèle hydrologique GR2M. Les résultats montrent que les variations envisageables des écoulements dans le futur sont très dépendantes des précipitations et donc de la qualité des sorties du GCM utilisé.

Mots clefs impacts; GCM; scénarii climatiques; modélisation hydrologique; ressources en eau; Afrique de l'Ouest et Centrale

Application of climatic scenarios in hydrological modelling: using GCMs outputs

Abstract This study deals with the issue of using GCMs data to assess the impact of climate change on runoff in western Africa. It requires evaluation of the reliability of four GCMs (HadCM3, ECHAM4, NCAR-PCM, CSIRO-MK2) regarding the rainfall they provide, and then assessment of the impacts of climate change on the discharge of four main rivers (Senegal, Gambia, Sassandra, Chari). First, GCM rainfalls were compared to observed ones. It appears that the data generated by the GCMs cannot be used as direct input to hydrological models to evaluate the impacts as they are not realistic enough. For this reason, two climatic scenarios were developed from the results provided by HadCM3-A2. These two scenarios were used as input to the hydrological model GR2M. The results demonstrate that expected runoff variations remain strongly linked to rainfall and so to the quality of the GCMs outputs used.

Key words impacts; GCM; climatic scenarios; hydrological modelling; water resources; West and Central Africa

INTRODUCTION

Le changement climatique annoncé pour le 21^{ème} siècle par les Modèles de Circulation Générale (ou GCM) ne peut être sans conséquence sur les ressources en eau. L'estimation des impacts sur les systèmes hydrologiques est essentielle pour comprendre et prévenir les problèmes potentiels sur les ressources en eau et leur gestion future. Cependant la modélisation du système climatique est complexe et trois problèmes majeurs relatifs à l'utilisation des GCM peuvent être soulevés (IPCC, 2001): leur résolution n'est pas adaptée à celle de la modélisation hydrologique; les différences entre les projections climatiques produites par les GCM sont très marquées; les précipitations sont généralement peu réalistes. Cependant, ces GCM, même imparfaits, sont les seuls outils à notre disposition pour simuler les conditions climatiques futures. Il s'agit ici d'évaluer la fiabilité des données climatiques fournies par divers GCM, et donc, de vérifier que ces modèles climatiques sont suffisamment performants pour reproduire correctement les précipitations en termes de dynamique saisonnière et de variabilité interannuelle. Pour cela, quatre modèles climatiques ont été choisis parmi ceux mentionnés par l'IPCC. Les précipitations simulées par ces GCM sont comparées à celles observées sur la période 1950–1998, lorsque la disponibilité des données le permet. Ensuite, cette étude propose d'évaluer les impacts du changement climatique sur les écoulements de grands fleuves en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Gambie, Sassandra et Chari). La méthodologie présentée repose sur l'utilisation de la modélisation pluie-débit comme outil de simulation des écoulements, et les sorties du modèle climatique HadCM3-A2 comme source de prévisions climatiques pour le futur.

DESCRIPTION DES DONNÉES

Grilles de données climatiques

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont spatialisées sous forme de grilles à la résolution du demi-degré carré. Les données observées couvrent la période 1950–1995 et ont été obtenues auprès du Climatic Research Unit (CRU) de l'Université d'East Anglia. Il s'agit de grilles mensuelles, construites par interpolation de séries pluviométriques sélectionnées pour la qualité et la longueur de leurs observations (New *et al.*, 2000), et de données d'évapotranspiration potentielle (ou ETP), calculées à partir de la formule de Penman (1956). Les autres données climatiques utilisées dans cette étude proviennent des simulations produites par les GCM et sont extraites des archives du Data Distribution Centre de l'IPCC (<http://ipcc-ddc.uea.ac.uk>). Ces archives contiennent les simulations de changement climatique obtenues avec sept modèles climatiques couplés océan-atmosphère et conduites en utilisant divers scénarii d'émissions de gaz à effet de serre. Seuls quatre d'entre eux avec le scénario d'émission A2 ont été retenus pour cette étude (Tableau 1): CSIRO-Mk2, ECHAM4, HadCM3 et NCAR-PCM.

Tableau 1 Caractéristiques principales des quatre GCM retenus.

| GCM | Résolution spatiale | Scénario d'émission | Données disponibles |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| CSIRO-Mk2 | 3.2°× 5.6° | A1,A2,B1,B2 | 1961–2100 |
| ECHAM4 | 2.8°× 2.8° | A2,B2 | 1990–2100 |
| HadCM3 | 2.5°× 3.75° | A2,B2 | 1950–2099 |
| NCAR-PCM | 2.8°× 2.8° | A1b,A2 | 1981–2099 |

Bassins versants et modèle hydrologique

Cette étude concerne quatre unités hydrographiques situées en Afrique de l'Ouest et Centrale: Sénégal, Gambie, Sassandra et Chari (Tableau 2). Les données hydrologiques mensuelles correspondantes proviennent des données collectées par l'IRD, complétées auprès des Services Hydrologiques Nationaux et rassemblées au sein du système d'informations environnementales SIEREM développé par HydroSciences Montpellier.

Tableau 2 Caractéristiques des unités hydrographiques étudiées.

| Rivière | Station | Données disponibles | Surface (km ²) |
|-----------|-----------|---------------------|----------------------------|
| Sénégal | Bakel | 1908–1998 | 220 818 |
| Gambie | Gouloumbo | 1971–1996 | 42 642 |
| Sassandra | Soubre | 1956–1998 | 62 173 |
| Chari | Ndjamena | 1933–1999 | 601 984 |

Les écoulements mensuels ont été simulés avec le modèle conceptuel GR2M en utilisant une distribution du bassin versant en un maillage régulier au demi-degré carré. Sur chaque cellule du réseau et à chaque pas de temps, le niveau d'un réservoir sol évolue en fonction de la pluie 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). Avec la perspective d'utiliser ce modèle hydrologique dans la continuité chronologique des observations pour simuler les écoulements dans le futur, les paramètres du modèle sont calés pour les conditions déficitaires, installées depuis la fin des années 60 et qui perdurent aujourd'hui (L'Hôte *et al.*, 2002). Ainsi pour chaque bassin versant, les deux paramètres du modèle sont estimés à partir d'un calage sur la période 1971–1987 et validés sur la période 1988–1995.

COMPARAISON DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES (1990–1998)

Méthodes

Un des problèmes majeurs de l'utilisation des simulations produites par les GCM dans les études d'impacts est leur résolution spatiale "grossière" par rapport aux entités étudiées. Plusieurs méthodes, connues sous le nom de *downscaling*, ont donc été développées pour obtenir des projections climatiques à une échelle spatio-temporelle plus fine. Une méthode plus simple consiste à superposer le réseau du GCM à celui du CRU et d'appliquer la valeur d'une cellule de GCM à l'ensemble des cellules observées concernées (désagrégation) et inversement (agrégation). Les formules d'agrégation et de désagrégation utilisées ici peuvent être consultées dans Casenave (2004). Afin de juger de la fiabilité des modèles climatiques à simuler le climat, les précipitations observées sont agrégées à la résolution des GCM puis comparées aux précipitations simulées par les GCM. Les résultats sont donnés soit pour l'ensemble de la zone d'étude, soit pour des cellules représentatives des bassins versants.

Précipitations annuelles

Les quatre GCM retenus pour cette étude reproduisent bien la répartition latitudinale des précipitations moyennes annuelles en Afrique de l'Ouest (Fig. 1). Les trois unités climatiques sahélienne, soudanienne et guinéenne sont bien identifiées sur la fenêtre d'étude, mais leurs limites ne correspondent pas à celles réellement observées et varient selon le modèle climatique étudié. À l'exception du modèle climatique CSIRO-Mk2, les modèles climatiques ECHAM4, HadCM3 et NCAR-PCM surestiment généralement les précipitations moyennes annuelles sur l'Afrique de l'Ouest. Avec ces trois GCM, la limite entre les domaines climatiques sahélien et soudanien, correspondant à l'isohyète 700 mm, se situe au nord de celle observée sur la période 1969-1998. Avec les modèles ECHAM4 et HadCM3, les précipitations sur la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo et le Bénin sont supérieures à 1400 mm, ce qui ne correspond pas aux observations. Les modèles CSIRO-Mk2 et NCAR-PCM ne restituent pas bien les précipitations annuelles sur les pays de la façade atlantique de l'Afrique de l'Ouest, normalement situés en domaine guinéen, ni d'ailleurs sur la partie septentrionale du Congo.

Concernant la variabilité interannuelle, la Fig. 2 compare les chroniques d'indices pluviométriques annuels observés et simulés par les différents GCM, entre 1950 et 1998. Cet indice traduit un excédent ou un déficit pluviométrique. Durant le 20^{ème} siècle, des périodes sèches et humides ont alterné en Afrique de l'Ouest avec une nette et brutale diminution des précipitations

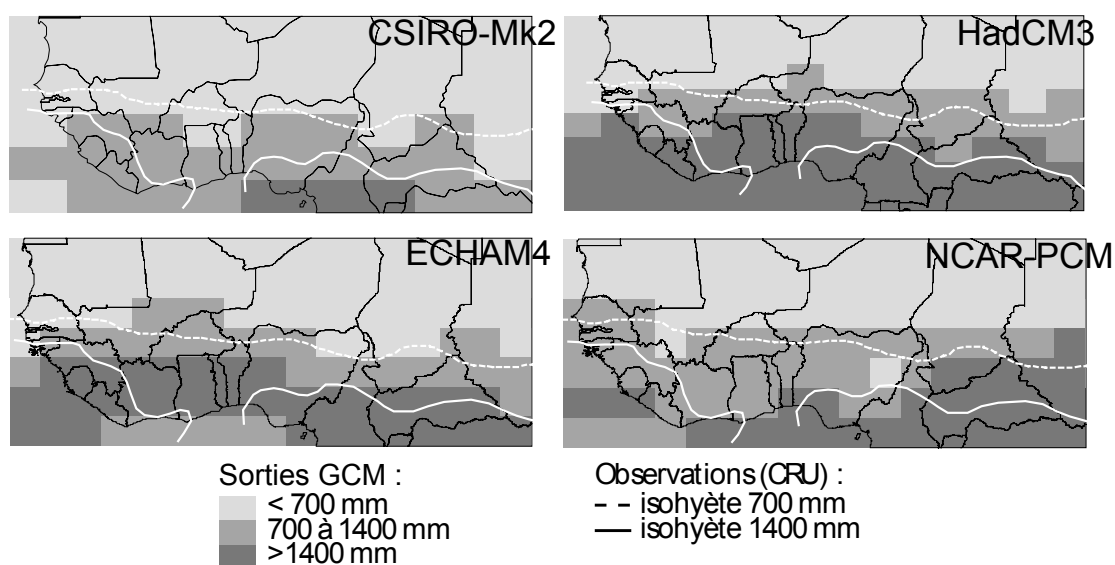


Fig. 1 Position des isohyètes 700 mm et 1400 mm (d'après les données du CRU sur 1969–1998) et précipitations moyennes annuelles simulées par: CSIRO-Mk2 (1961–1998), ECHAM4 (1990–1998), HadCM3 (1950–1998) et NCAR-PCM (1981–1998).

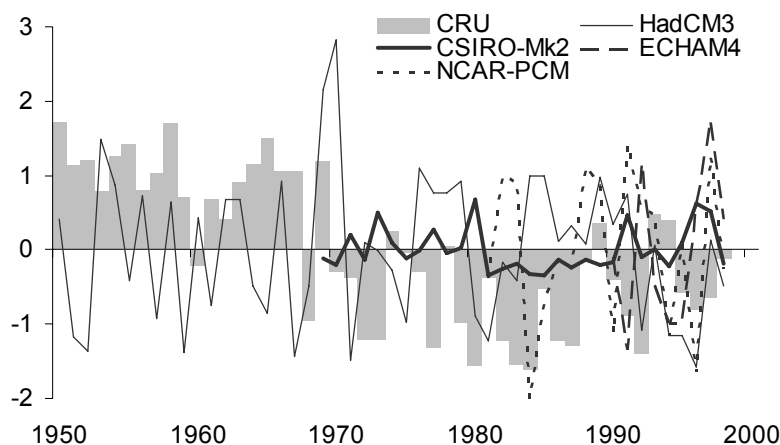


Fig. 2 Anomalies de précipitations observées (CRU, 1950–1998) et simulées par modèles climatiques pour les cellules représentatives des bassins Sénégal et Gambie.

aux alentours de 1969–1970. Cependant, aucun des modèles climatiques étudiés ne reproduit correctement cette alternance. Ainsi le modèle HadCM3 simule une année sur deux comme étant sèche entre 1950 et 1970, période pourtant caractérisée par des précipitations excédentaires (période humide). Sur la période commune aux observations et aux simulations (1990–1998), les quatre modèles climatiques s'accordent en simulant l'année 1994 comme sèche et l'année 1997 comme humide, alors que le contraire a été observé.

Précipitations moyennes mensuelles

Leur aptitude à simuler la saison des pluies a également été étudiée par l'intermédiaire des précipitations moyennes mensuelles calculées sur la période 1990–1998 et comparées aux observations (Fig. 3). Pour le Sénégal et la Gambie, les GCM sous-estiment largement les précipitations mais respectent bien la dynamique saisonnière du domaine soudano-sahélien: la saison des pluies se déroule de mai à octobre avec un maximum centré sur août, à l'exception du modèle NCAR-PCM qui présente un maximum en juillet. Pour le Chari, situé également en domaine soudano-sahélien, seules les précipitations produites par les modèles CSIRO-Mk2, NCAR-PCM et HadCM3 sont corrélées avec les précipitations observées. Le modèle ECHAM4 bien que reproduisant la dynamique saisonnière, surestime largement les précipitations mensuelles, quel que soit le mois de l'année considéré. Le Sassandra est situé en Côte d'Ivoire, en domaine tropical humide où se produisent deux saisons des pluies (avril–juin et août–octobre). Or les modèles climatiques, s'ils sont capables de reproduire cette saisonnalité (excepté HadCM3), montrent de réelles difficultés à simuler correctement les volumes précipités. Aucun des quatre modèles climatiques ne semble vraiment approprié sur cette cellule, et, par extension, probablement sur la zone guinéenne à deux saisons des pluies.

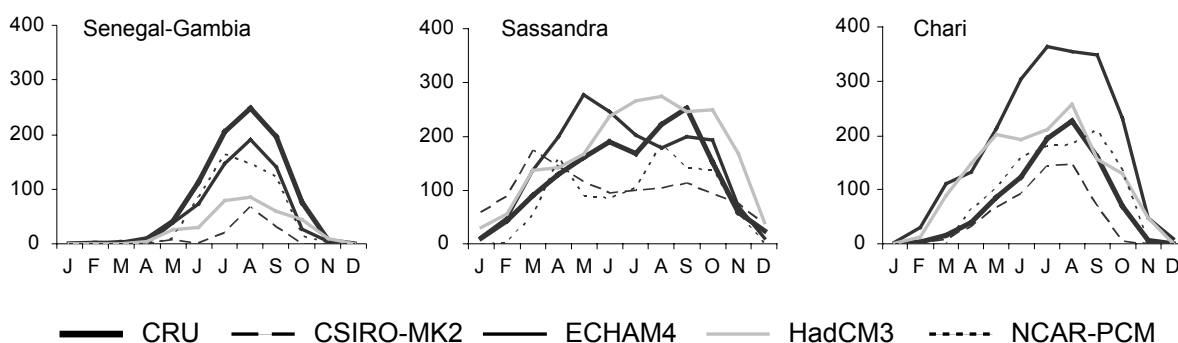


Fig. 3 Précipitations moyennes mensuelles sur la période 1990–1998 observées (CRU) et simulées par les modèles climatiques pour les bassins versants étudiés.

APPLICATION EN MODÉLISATION HYDROLOGIQUE (2006–2095)

Méthodologie

Les précipitations simulées par les GCM ne sont donc pas suffisamment fiables pour être utilisées directement et telles quelles dans les études d'impacts et, *a fortiori*, dans les modèles hydrologiques. L'IPCC recommande, de ce fait, d'établir des scénarii climatiques en utilisant les champs de variations entre le climat futur et une période de référence. Le modèle climatique retenu pour le développement et l'application de ces scénarii climatiques est HadCM3-A2. Les différences entre le climat (précipitations et ETP) de la période de référence et le climat futur sont calculées pour chaque cellule du GCM et à chaque pas de temps. 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 GCM sur la même période de référence (Ardoïn-Bardin et al., 2005). La méthode employée pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau consiste alors à utiliser les séries mensuelles de précipitations et d'ETP, élaborées à partir des deux scénarii climatiques *Anomalies* et *Horizons*, en entrée du modèle hydrologique GR2M, préalablement calé pour chaque bassin versant, pour simuler les écoulements futurs.

Conséquences hydrologiques du changement climatique

Dans l'ensemble, l'impact du changement climatique sur les écoulements varie en fonction de l'évolution des précipitations projetées par le modèle HadCM3-A2: un excès (déficit) des précipitations selon les scénarii *Anomalies* ou *Horizons* se traduit par une augmentation (diminution) des écoulements. Il semble par contre que l'augmentation continue de l'ETP, liée à celle de la température, affecte peu le bilan hydrologique annuel. Le Tableau 3 illustre l'évolution des écoulements au cours du 21^{ème} siècle selon des taux de variations calculés par rapport à la période 1971–1995. Les variations des écoulements entre le scénario *Anomalies* et le scénario *Horizons* sont de même signe, même si les écarts entre les taux peuvent être importants à l'horizon 2080. Pour les bassins versants du Sénégal et de la Gambie, la tendance est à la diminution des écoulements. Pourtant aux horizons 2020 et 2050, le Sénégal présente des taux de variations positifs alors qu'ils sont négatifs pour la Gambie. Ces différences s'expliquent par la répartition des cellules du modèle HadCM3-A2 au-dessus des bassins versants. 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 les bassins du Chari et du Sassandra. Pour le Chari, les débits moyens annuels augmenteraient progressivement tout au long du 21^{ème} siècle. Pour le Sassandra, les taux de variations à l'horizon 2080 sont plus faibles qu'à l'horizon 2050. Malgré cette tendance à l'augmentation, les écoulements ne retrouveraient pas les niveaux observés avant la mise en place de la sécheresse sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale.

Tableau 3 Évolution des taux de variations des débits moyens annuels (en %) calculés aux horizons 2020, 2050 et 2080 pour chaque scénario climatique utilisé.

| Rivière/Bassin | 2020 | | 2050 | | 2080 | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Ano | Horiz | Ano | Horiz | Ano | Horiz |
| Sénégal | +13.9 | +1.9 | +12.7 | +10.4 | -13.9 | -44.8 |
| Gambie | -3.6 | -17.5 | -5.5 | -11.6 | -29.6 | -65.6 |
| Sassandra | +20.3 | +17.7 | +36.8 | +38.3 | +5.9 | +9.9 |
| Chari | +13.7 | +12.3 | +20.4 | +25.9 | +46.7 | +53.5 |

CONCLUSION

Cette étude décrit une approche pour utiliser les sorties des GCM pour évaluer les changements possibles du climat et ses impacts potentiels sur les ressources en eau. Un des objectifs était d'évaluer les limites des modèles climatiques à reproduire le climat observé, du point de vue des

précipitations, dans le but de mieux appréhender les simulations futures. Les comparaisons établies au niveau des précipitations mensuelles (et même annuelles) soulignent bien les différences qui existent: (i) entre les modèles climatiques entre eux et (ii) entre données simulées et observées. Les modèles climatiques semblent atteindre les limites de leurs performances là où les précipitations sont faibles (zone sahélienne) et là où se produisent deux saisons des pluies (zone guinéenne). Par ailleurs, s'ils s'avèrent relativement performants dans la zone soudano-sahélienne en termes de dynamique saisonnière, ils sont en revanche incapables de reproduire les cumuls pluviométriques ainsi que la variabilité interannuelle des précipitations. A l'heure actuelle, ces GCM ne sont pas vraiment en mesure de reproduire les précipitations observées avec un niveau de fiabilité suffisant. Ces résultats ne permettent pas d'utiliser directement les sorties des modèles climatiques mais plutôt de prendre en compte les tendances qu'ils expriment par l'intermédiaire des scénarii climatiques.

REFERENCES

- Ardoin-Bardin, S., Servat, E., Dezetter, A., Mahé, G., Paturel, J. E., Dieulin, C. & Casenave L. (2005) Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. In: *Regional Hydrological Impacts of Climate Change – Hydroclimatological Variability* (ed by S. Franks, T. Wagener, E. Bøgh, H. V. Gupta, L. Bastidas, C. Nobre & C. De Oliveira Galvão), 194–202. IAHS Publ. 296. IAHS Press, Wallingford, UK.
- 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: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC (ed. by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken & K. S. White) Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. & Triboulet, J. P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* **47**(4), 563–572.
- 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. Clim.* **13**(13), 2217–2238.
- Penman, H. L. (1956) Evaporation: an introduction survey. *J. Agric. Sci.* **1**, 9–29.