

PREVISION DES RESSOURCES EN EAU EN AFRIQUE AU 21^{EME} SIECLE.

Sandra ARDOIN-BARDIN, Jean-François BOYER, Alain DEZETTER, Claudine DIEULIN, Gil MAHÉ, Jean-Emmanuel PATUREL, Eric SERVAT
UMR HydroSciences Montpellier, IRD, BP 64501, F-34394 Montpellier cedex 5, France
ardoin@msem.univ-montp2.fr

ABSTRACT

We evaluate the impact of climate change on the runoff of great rivers of West and Central Africa. We develop climatic scenarios for rainfall and PE from HadCM3-A2 projection data for the XXIst century, and we simulate the runoff with two hydrological conceptual models: GR2M and WBM. Results show that future runoff depends mainly on precipitation. Locally the prediction is an increase for the Chari and the Sassandra rivers, and a decrease for the Senegal and the Gambia rivers. It seems that the continuous increase of PE have little effect on runoff in West and Central Africa. These results also demonstrate the differences in the results according to the use of one or another of the hydrological models: with the GR2M model, simulated runoff variations are amplified in regard to those simulated by WBM.

Keywords: Climatic scenarios, water resources, General Climate Models, hydrological modelling, west and central Africa

INTRODUCTION

Le changement climatique annoncé pour le XXI^{ème} siècle par les Modèles de Circulation Générale (ou GCM) ne peut être sans conséquence sur les ressources en eau. L'estimation quantitative des impacts sur les systèmes hydrologiques est essentielle pour comprendre et prévenir les problèmes potentiels sur les ressources en eau et leur gestion future. 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.

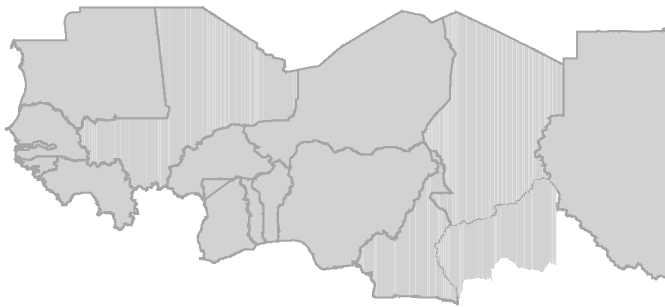
Cette étude propose une méthodologie pour évaluer les impacts du changement climatique sur les écoulements de grands fleuves en Afrique de l'Ouest. Les séries chronologiques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle représentant les conditions climatiques futures sont construites à partir de deux scénarii climatiques, en utilisant les prévisions du modèle HadCM3-A2. Les débits mensuels sont simulés à l'aide de deux modèles hydrologiques conceptuels, préalablement calés et validés, puis comparés aux observations. Il convient donc d'être extrêmement prudent quant à l'interprétation des résultats obtenus. En particulier parce que nous sommes amenés à utiliser des modèles conceptuels avec des séries chronologiques issues d'un travail de prospective, censées refléter ce qui devrait se produire au cours du siècle à venir. Nous devons donc faire l'hypothèse que la relation pluie-débit ne sera pas modifiée par rapport à celle établie à partir des chroniques d'observations. Cette hypothèse est probablement très simplificatrice. Néanmoins, elle nous permet de proposer des ordres de grandeur et de faire correspondre évolution climatique et évolution hydrologique.

DESCRIPTION DES DONNÉES

Données climatiques spatialisées

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont spatialisées sous forme de grilles à la résolution du demi-degré carré. Nous utilisons deux types de données : celles observées et celles simulées par les

modèles de climat, communément appelés GCM. Les données climatiques 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 grille de données pluviométriques mensuelles, construites par interpolation (fonction Saline) de séries pluviométriques sélectionnées pour la qualité et la longueur de leurs observations (New *et al.* 1999 et 2000), et de données d'évapotranspiration potentielle (ou ETP), calculées à partir de la formule de Penman (1956). Les données climatiques simulées proviennent des GCM et sont extraites des archives du Data Distribution Centre de l'IPCC. Il existe de nombreux GCM mais on recommande entre eux son recommandé par l'IPCC (2001). Notre choix s'est porté sur les simulations du HadCM3 conduites avec le scénario d'émission de gaz à effets de serre A2. Ce choix est d'abord motivé par le fait que les données de précipitation et des variables nécessaires au calcul de l'ETP sont disponibles sur la période 1950-2099 qui couvre bien la période d'observations. Cette disponibilité des données a permis de comparer les résultats des simulations du modèle HadCM3-A2 au regard des précipitations simulées avec des modèles conceptuels en utilisant un pas de temps régulier au demi-degré carré. Seule une brève description du fonctionnement pouvant être consultés dans Paturet *et al.* (2004) et à chaque pas de temps, une fraction de l'eau du réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la vidange progressive de ce réservoir produit l'écoulement versant est obtenu par la sommation des contributions



Modèles hydrologiques

Le modèle hydrologique utilisé dans cette étude est de type « réservoir ». Les données d'entrée (précipitation et température) sont traitées par un modèle conceptuel en utilisant un pas de temps régulier au demi-degré carré. Seule une brève description du fonctionnement pouvant être consultés dans Paturet *et al.* (2004) et à chaque pas de temps, une fraction de l'eau du réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la vidange progressive de ce réservoir produit l'écoulement versant est obtenu par la sommation des contributions

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 ; Ardoin *et al.*, 2003). 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 (Ardoin-Bardin, 2004).

MÉTHODE D'ÉVALUATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Principe

La méthode employée pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau se divise en trois étapes : (a) les modèles conceptuels GR2M et WBM sont calés pour chaque bassin versant en utilisant les séries hydrologiques et climatiques observées (période 1971-1995) ; (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) les modèles conceptuels GR2M et WBM avec les paramètres calés à l'étape (a) simulent les écoulements avec les séries chronologiques construites à l'étape (b).

Génération de scénarii climatique

D'après l'étude comparative de Casenave (2004) sur l'Afrique de l'Ouest, les GCM s'avèrent relativement performants dans la zone soudano-sahélienne en termes de dynamique saisonnière mais ils sont en revanche incapables de reproduire les cumuls pluviométriques ainsi que la variabilité interannuelle des précipitations. Les précipitations simulées par les GCM ne sont donc pas suffisamment fiables à l'échelle régionale pour être utilisées directement dans les études d'impact, il est recommandé d'établir les champs de variations entre le climat futur et une période de référence (IPCC, 2001). Les scénarii climatiques sont établis pour les précipitations mais également pour les ETP, car les températures extrêmes simulées par le modèle HadCM3-A2 ne sont pas géostatistiquement réalistes (Lucio, 2004). Les différences entre le climat (précipitations et ETP) représentatif de la période de référence et du climat futur sont calculées pour chaque cellule du GCM 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–suffixe Ano*) ou en taux de variations (scénario *Horizons–suffixe Horiz*) en fonction d'une climatologie moyenne tirée des simulations du HadCM3-A2 sur la période de référence 1969–1998:

Scénario *Anomalies* :

$$Ano_{GCM,i,k} = (X_{GCM,i,k} - \overline{X}_{GCM,i}) / \sigma_{GCM,i} \quad (1)$$

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

Scénario *Horizons* :

$$\Delta_{horiz,i} = 100 \times (\overline{X}_{horiz,i} - \overline{X}_{ref,i}) / \overline{X}_{ref,i} \quad (2)$$

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

Les séries chronologiques 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:

avec le scénario *Anomalies* :

$$X_{SCEN,i,k} = \overline{X}_{CRU,i} + (Ano_{GCM,i,k} \times \sigma_{CRU,i}) \quad (3)$$

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.

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.

Application des scénarii climatiques à la modélisation hydrologique

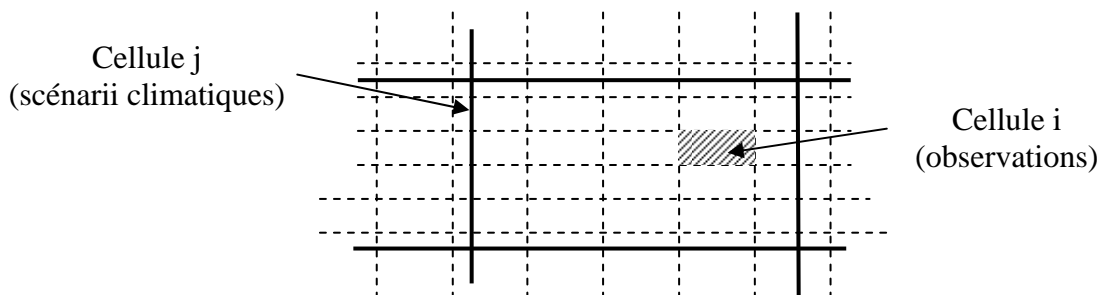


Fig. 2 : Superposition schématique des grilles scénarii climatiques avec les grilles de données observées (grilles CRU à 0,5°x0,5°).

Les données simulées par les GCM fournissent donc une base pour développer les scénarii climatiques. Cependant l'information issue du modèle HadCM3-A2 est à la résolution 2.5°x3.75°. Cette résolution spatiale est donc à première vue une limitation principale de l'application des scénarii climatiques dans les modèles hydrologiques. Une méthode simple est la désagrégation des scénarii climatiques à la résolution du fonctionnement des modèles hydrologiques, c'est-à-dire 0.5°x0.5°. La technique 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 (Fig. 2). L'indice i correspond au réseau de référence et l'indice j au réseau à désagréger. En utilisant un Système d'Information Géographique, on calcule la proportion de chaque cellule i incluse dans une cellule j . Cette proportion est notée $coeff(i)$. On utilise la formule suivante pour désagréger les données de précipitations et d'ETP des scénarii climatiques à l'échelle du demi-degré carré :

$$\text{Désagrégation :} \quad X(i) = X(j) \times coeff(i) \quad (5)$$

où $X(i)$ est la variable désagrégée sur la cellule i , $X(j)$ est la variable du scénario climatique sur la cellule j et $coeff(i)$ est le coefficient d'intersection d'une cellule i dans une cellule j .

Cette approche est suffisante pour permettre l'évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau. Facile à appliquer, elle permet aux modèles hydrologiques d'utiliser des scénarii climatiques à une résolution qu'il serait autrement difficile à obtenir. Ainsi, les séries désagrégées de précipitations et d'ETP mensuelles issues des scénarii climatiques *Ano* et *Horiz* sont utilisées en entrées des deux modèles hydrologiques, GR2M et WBM, pour simuler les écoulements de chaque bassin versant. On suppose donc que la relation pluie-débit reste identique à celle formulée dans les modèles hydrologiques calés. Les paramètres ont donc été maintenus constants, depuis le calage initial avec les données climatiques observées, pour tout le XXI^{ème} siècle.

PRÉVISIONS DES RESSOURCES EN EAU POUR LE 21^{ÈME} SIÈCLE

Évolution climatique : précipitations et ETP

L'évaluation des précipitations pour les décennies à venir est très importante du fait de la sensibilité des modèles hydrologiques à cette variable. La Fig. 3 montre les taux de variations moyennes des précipitations *Ano* annuelles aux horizons 2020, 2050 et 2080, exprimés en un pourcentage par rapport à la moyenne observée 1969-1998.

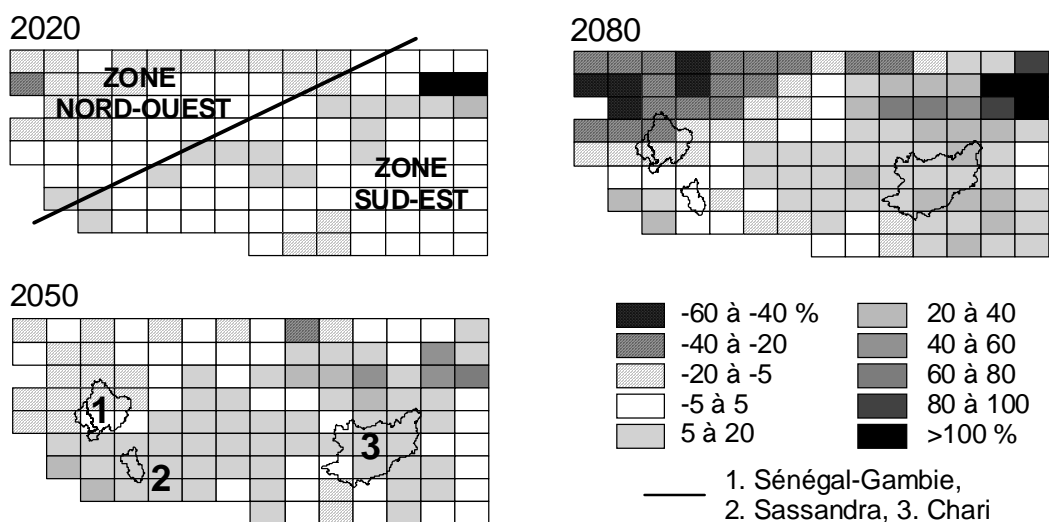


Fig. 3 : Variations des précipitations moyennes (scénario Anomalies) aux trois horizons par rapport aux précipitations moyennes observées sur la période 1969–1998 (en %). Les taux de variations entre les deux scénarii sont du même ordre de grandeur.

Les résultats sont similaires avec les précipitations *Horiz* et donc non présentés sur cette figure. Les variations aux trois horizons ne sont pas uniformes sur l'ensemble de la fenêtre étudiée. Deux zones se distinguent de part et d'autre d'un axe orienté sud-ouest / nord-est. On identifie également un petit groupe de cellules au nord-est de la fenêtre d'étude dont les variations sont supérieures à 100 % quelle que soit la série de précipitations étudiées (*Ano* ou *Horiz*) et quel que soit l'horizon considéré. Ces cellules sont toutes situées au Tchad ou au Soudan au-delà de 15° N, là où les précipitations annuelles sont très faibles et où le modèle HadCM3-A2 atteint ses limites. Au nord-ouest de cet axe, les précipitations moyennes annuelles diminuent, tandis qu'elles augmentent au sud-est de l'axe (Tab. 1). 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. Au contraire, les bassins versants du Sassandra et du Chari sont situés dans la zone où les conditions pluviométriques s'améliorent. On note que pour le bassin du Sassandra les taux de variations sont maximums à l'horizon 2050.

Tab. 1 : 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	
	<i>Ano</i>	<i>Horiz</i>	<i>Ano</i>	<i>Horiz</i>
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

Tab. 2 : Taux de variations (en %) aux horizons 2020, 2050 et 2080 calculés pour les ETP_ *Ano* et ETP_ *Horiz* sur chaque unité hydrographique ; l'ETP moyenne observées est exprimée en 1/10e de millimètres.

Unités hydro.	ETP moy observée	Taux variation ETP_ <i>Ano</i>			Taux variation ETP_ <i>Horiz</i>		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080
Sénégal -Gambie	19055	0.8	1.8	4.9	3.9	8.0	22.9
Sassandra	14147	1.5	4.5	10.6	2.4	6.2	15.7
Chari	17870	2.1	6.0	11.6	3.3	10.8	23.1
moyenne	17024	1.5	4.1	9	3.2	8.3	20.6

Comme tous les GCM prévoient un accroissement de la température pour les décennies à venir (jusqu'à 4°C avec le modèle HadCM3-A2), on constate une augmentation de l'ETP sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Cette augmentation, relativement faible à l'horizon 2020, atteint plus de 30 % à l'horizon 2080 (Tab. 2). L'Afrique Centrale et les pays en bordure du Golfe de Guinée sont touchés dès

l'horizon 2020 par cette hausse et montre les plus fort taux d'accroissement. Entre les deux séries élaborées, l'ETP_Horiz montrent des taux de variations plus élevés par rapport à l'ETP_Ano et ce, dès l'horizon 2020. Les taux de variations aux trois horizons pour chacun des quatre unités hydrographiques sont donnés dans le tableau 2. Les ETP moyennes observées sont exprimées en 1/10^e de millimètres et constituent la valeur de référence. En moyenne sur ces quatre cellules, l'ETP augmente de 1.5 % à 3.2 % à l'horizon 2020, de 4.1 % à 8.3 % à l'horizon 2050 et de 9 % à 20.6 % à l'horizon 2080. Pour l'ETP_Ano, les taux de variation les plus faibles sont observés pour la cellule 32LAT94LON, et les plus forts pour la cellule 34LAT05LON. Pour l'ETP_Horiz, la cellule 34LAT95LON présente les taux de variation les plus faibles et la cellule 34LAT06LON les plus forts.

Associées à une ETP croissante, des précipitations réduites (accrues) laissent présager une réduction (augmentation) des écoulements. L'introduction des séries de précipitations et d'ETP issues des scénarii climatiques au sein des modèles hydrologiques retenus constitue l'étape ultime pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau.

Évolution des écoulements

Pour chaque bassin versant, les séries de précipitations et d'ETP mensuelles issues des scénarii climatiques *Ano* et *Horizons* sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques, GR2M et WBM, pour simuler les écoulements. Les valeurs de débits mensuels ainsi simulés peuvent être considérées comme des valeurs "réalistes" permettant d'aboutir à des ordres de grandeur et traitées en terme de séries chronologiques, ou peuvent être comparées aux observations pour évaluer les changements en terme de taux de variation, exprimés en pourcentage. L'ensemble des tracés de débits moyens annuels entre 2006 et 2095 n'est pas représenté ici. En effet, nous disposons de quatre séries de débits simulés pour chaque bassin versant (2 modèles x 2 scénarii climatiques), correspondant à 168 graphiques au total.

Outre le volume que cela représente, certains de ces graphiques n'apporteraient aucune information supplémentaire. Toutefois, l'examen visuel de l'ensemble des tracés montre que les évolutions des débits moyens annuels simulés sous les conditions climatiques des scénarii "*Anomalies*" et "*Horizons*" sont semblables. Les différences majeures résident dans l'utilisation des modèles hydrologiques. On distingue trois situations d'évolution du débit moyen annuel sur la période 2006-2095 : (i) diminution plus ou moins importante des écoulements : bassins du Sénégal et de la Gambie ; (ii) augmentation, puis diminution des écoulements : bassins du Sassandra ; (iii) augmentation des écoulements : bassins du Chari.

Cette répartition découle directement de celle observée pour les précipitations issues des scénarii climatiques. Les écoulements sont plus sensibles aux variations sur les précipitations qu'aux variations sur les températures via celles de l'ETP. À vrai dire, les études menées par l'IPCC (2001) ont établi le même constat : les variations des débits simulés suivent largement les variations des précipitations pour le futur. Dans l'ensemble, un excès (un déficit) de précipitations selon les scénarii climatiques "*Anomalies*" ou "*Horizons*" se traduit par une augmentation (une diminution) des débits pour la majorité des bassins versants, quelle que soit l'évolution de l'ETP et donc des températures.

Du fait des jeux de paramètres retenus pour simuler les écoulements futurs, la période de référence retenue ici, pour évaluer les variations des écoulements aux horizons 2020, 2050 et 2080, est 1971-1995. Certes, elle ne comprend que 25 années mais elle est jugée significative des conditions observées ces trente dernières années. La Fig. 4 montre les taux de variation des débits moyens annuels *Ano* et *Horiz* simulés par les modèles WBM et GR2M pour quatre bassins versants jugés représentatifs des unités hydrographiques étudiées. 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, en particulier aux horizons 2050 et 2080.

Pour les bassins versants du Sénégal et de la Gambie, la tendance est à la diminution des écoulements. 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 HadCM3-A2 au-dessus des bassins versants. En 2020, la Gambie est alimentée en précipitations par une cellule déficitaire (-1.7 %) et le Sénégal par une cellule excédentaire (+4.6 %). Mais à l'horizon 2080, selon le scénario climatique choisi, les déficits moyens annuels varient entre -3.6 % et -38.1 % pour les bassins du Sénégal et entre -19.4 % et -62.2 % pour les bassins de la Gambie (Tab. 3). Cette diminution est plus conséquente pour les séries simulées par le modèle GR2M_Horiz.

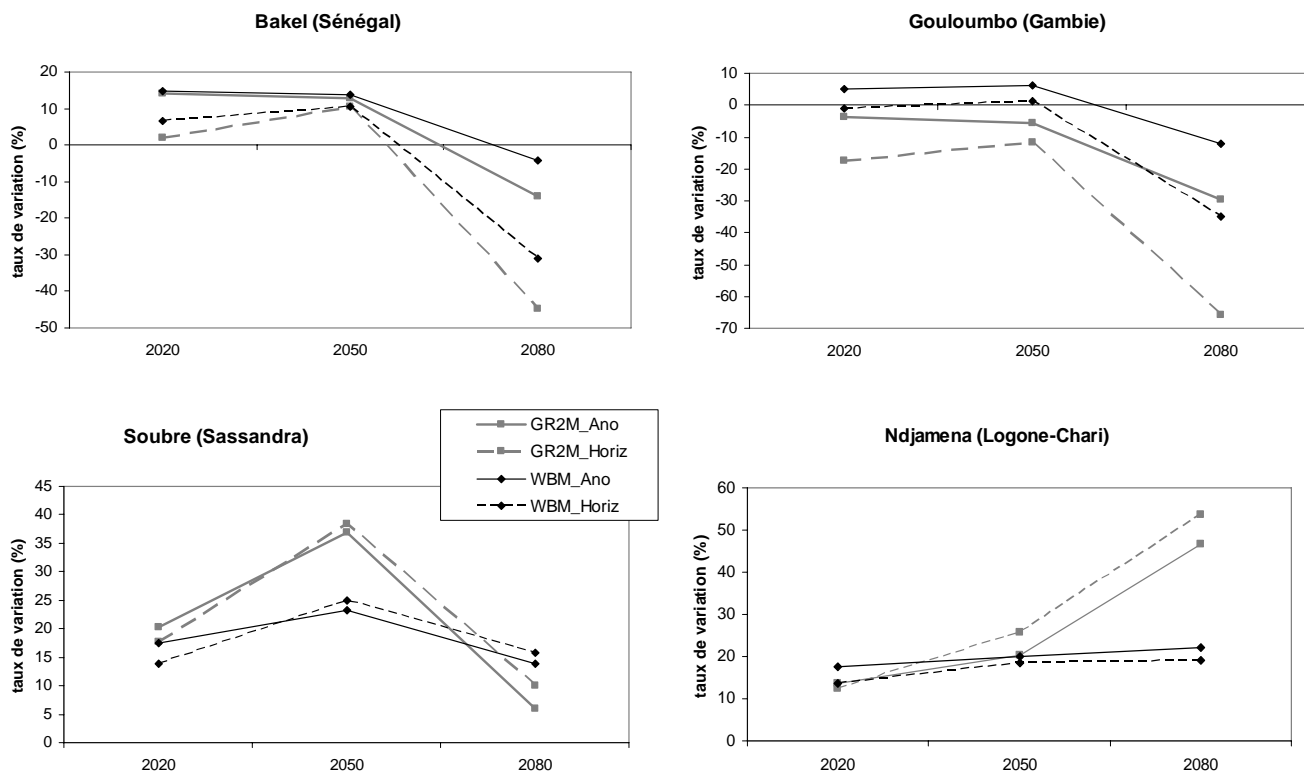


Fig. 4: Évolution des taux de variations des débits moyens annuels calculés aux trois horizons 2020, 2050 et 2080, pour quatre bassins versants représentatifs de chaque unité hydrographique.

Les débits moyens annuels simulés sur les dernières décennies du XXI^{ème} siècle seraient donc 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 XXI^{ème} siècle : +10 % à +19.6% à l'horizon 2020 et de +22.3 % à +48.9 % à l'horizon 2080 (Tab. 3). Pour le Sassandra, les taux de variations à l'horizon 2080 (-14.2% à +13%) sont plus faibles qu'à l'horizon 2050 (+10.6 % à +22.7%) (Tab. 3). Malgré cette tendance à l'augmentation, 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.

Tab. 3 : Taux de variation moyen par unité hydrographique des débits moyens annuels simulés aux horizons 2020-2050-2080 et exprimés en pourcentage par rapport à la période 1971-1995.

Unités hydro.	Horizon	GR2M_Ano	GR2M_Horiz	WBM_Ano	WBM_Horiz
Sénégal	2020	16,2	6,0	13,9	8,7
	2050	15,6	15,9	13,9	14,1
	2080	-10,4	-38,1	-3,6	-24,2
Gambie	2020	-6,6	-18,6	-1,7	-6,4
	2050	-8,0	-12,0	-0,7	-3,5
	2080	-29,6	-62,2	-19,4	-41,6
Sassandra	2020	-1,8	-4,5	15,5	12,3
	2050	10,6	13,2	20,7	22,7
	2080	-14,2	-13,5	11,8	13,0
Chari	2020	12,2	10,0	19,6	16,3
	2050	18,6	22,8	21,1	20,9
	2080	46,5	48,9	23,2	22,3

CONCLUSION

Cette étude décrit une approche pour évaluer les changements possibles du climat et ses impacts potentiels sur les ressources en eau. La méthodologie mise en œuvre utilise des scénarii climatiques basés sur les projections du modèle HadCM3-A2 avec les modèles hydrologiques conceptuels GR2M et WBM pour simuler les écoulements futurs de quatre unités hydrographiques en Afrique de l'Ouest. Dans l'ensemble, les variations vont toutes dans le même sens, quels que soient le modèle et le scénario climatique utilisé. L'évolution de ces taux est à rapprocher de celle des précipitations *Ano* et *Horiz*. L'augmentation des précipitations sur la zone sud-est conduit à l'augmentation des débits sur les bassins versants du Logone et du Chari. Au contraire, la diminution des précipitations sur la zone nord-ouest entraîne une réduction de l'écoulement sur les bassins versants du Sénégal et de la Gambie. Il semble que l'augmentation continue de l'ETP affecte peu la production des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale.

Cependant, deux remarques principales se dégagent de cette étude :

- les écarts entre les taux de variation sont importants, alors qu'on utilise au départ les mêmes données de précipitations et de température issues du modèle HadCM3-A2. Les séries de débit moyen annuel *Horiz* simulées par le modèle GR2M sont celles qui présentent les plus forts taux de variations aux trois horizons. À l'opposé, les séries *WBM_Ano* sont celles qui présentent les taux de variations les plus faibles ;

- à l'horizon 2080 pour les bassins du Sénégal, de la Gambie et du Logone-Chari et à l'horizon 2050 pour le bassin du Sassandra, il y a eu une très grande différence d'amplitude entre les modèles pour un même scénario climatique *Ano* ou *Horiz*.

L'examen des séries de débits moyens annuels souligne les différences dérivant de l'utilisation de l'un ou l'autre des deux modèles hydrologiques retenus. Les débits moyens annuels simulés avec le modèle GR2M présentent des valeurs extrêmes et des dispersions supérieures à celles simulés par le modèle WBM et permet donc de classer les bassins versants en deux catégories :

- les bassins versants pour lesquels les débits moyens annuels simulés sont identiques quelle que soit la série *Ano* ou *Horiz* considérée, mais ils diffèrent selon les modèles hydrologiques utilisés. Ce sont des sous-bassins versants du Sénégal et de la Gambie ;

- les bassins versants pour lesquels les débits moyens annuels sont identiques quel que soit le modèle hydrologique considéré mais diffèrent selon la série *Ano* ou *Horiz*. Ce sont des sous-bassins versants du Chari et du Sassandra.

Ces résultats sont spécifiques au secteur étudié avec les projections du modèle HadCM3-A2 et ne peuvent être transposés ailleurs. Ils constituent un exemple d'utilisation des sorties des modèles climatiques pour évaluer les impacts sur les ressources en eau et doivent être utilisés avec précaution. Les simulations des écoulements au cours du XXIème siècle dépendent essentiellement du modèle hydrologique utilisé mais également des projections climatiques, et donc du choix du GCM. Si les prévisions des GCM 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 GCM pour évaluer la gamme des impacts potentiels.

RÉFÉRENCES

- Ardoin, S., Lubes-Niel, H., Servat, E., Dezette, A., Boyer, J.F., Mahé, G. and Paturel, J.E. (2003) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. *IAHS Pub.* 278, 223-228.
- 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.
- Conway, D. (1997) A water balance model of the Upper Blue Nile in Ethiopia. *Hydrol. Sci. J.* 42, 2, 265-286.

- Dieulin, C. (2005) Calcul des capacités en eau des sols (WHC) à partir de la carte des sols de la FAO. *Note technique*, UMR HydroSciences Montpellier.
- IPCC (2001) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. (Ed. by McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J., White K.S.) Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. and 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.
- Lucio, P.S. (2004) Geostatistical assessment of HadCM3 simulations via NCEP reanalyses over Europe. *Atmos. Sci. Let.* 5, 118-133.
- New, M., Hulme, M. and Jones, P. (1999) Representing twentieth century space-time climate variability. Part I: development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *J. Climate*, 12, 3, 829-856.
- New, M., Hulme, M. and 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. and Vassiliadis, A. (1995) Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data. Case of the GR2M model. *J. Hydrol.* 168, 111-125.
- Penman, H.L. (1956) Evaporation: an introduction survey. *J. Agric. Sci.* 1, 9-29.
- Salathé, E. (2005) Downscaling simulations of future global climate with application to hydrologic modelling. *Int. J. Climatol.* 25, 419-436.

Climatic and anthropogenic impacts on the variability of water resources

Impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau

22-24 November / novembre 2005
Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier
Montpellier, France

Programme / Programme
Papers / Communications
List of Participants / Liste des participants



International Hydrological Programme

IHP

IHP-VI | Technical Documents in Hydrology | No. 80
IHP-VI | Documents Techniques en hydrologie | No. 80





United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization

Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture



International Hydrological
Programme (IHP)

*Programme hydrologique
international (PHI)*

Climatic and anthropogenic impacts on the variability of water resources

Impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau

International seminar / *Séminaire international*

22-24 November / *novembre* 2005
Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier
Montpellier, France

Programme / *Programme*
Papers / *Communications*
List of Participants / *Liste des participants*

IHP-VI / *PHI-VI*
Technical Document in Hydrology No. 80 / *Document technique en hydrologie No. 80*
UNESCO, Paris / UMR 5569, HydroSciences Montpellier, 2007

Published in 2007 by the International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)
1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France

Publié en 2007 par le Programme hydrologique international (PHI) de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)
1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France

IHP-VI Technical Document in Hydrology N°80
IHP-VI Document technique en hydrologie N°80

UNESCO Working Series SC-2007/WS/8

© UNESCO/IHP 2007

The authors are responsible for the choice and presentation of the viewpoints and information contained in their articles, which in no way commit UNESCO. The designations employed and the presentation of data throughout this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des points de vue et informations figurant dans leurs articles, lesquels n'engagent en aucune façon l'UNESCO. Les désignations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant à leurs frontières ou limites.

**Edition prepared by the group of authors and finalized by
Gil Mahé, Scientific Editor**
***Edition préparée par l'ensemble des auteurs et finalisée par
Gil Mahé, Editeur scientifique***

Publications in the series 'IHP Technical Documents in Hydrology' are available from /
Les publications dans la série 'Documents techniques en hydrologie du PHI' sont disponibles auprès de:

IHP Secretariat | UNESCO | Division of Water Sciences
1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France
Tel: +33 (0)1 45 68 40 01 | Fax: +33 (0)1 45 68 58 11
E-mail: ihp@unesco.org
<http://www.unesco.org/water/ihp>