

Ressources en eau et changement climatique: évolution comparée de bassins versants en Méditerranée et Afrique de l'Ouest

S. ARDOIN-BARDIN¹, M. MILANO^{2,3}, G. THIVET³ & E. SERVAT¹

¹IRD, HydroSciences Montpellier, Place E. Bataillon, F-34395 Montpellier Cedex 5, France
ardoin@msem.univ-montp2.fr

²UM2, HydroSciences Montpellier, Place E. Bataillon, F-34395 Montpellier Cedex 5, France
³Plan Bleu, 15 rue Beethoven, Sophia-Antipolis, F-06560 Valbonne, France

Résumé Cette étude a pour objectif d'évaluer la variabilité des ressources en eau de surface d'ici l'horizon 2080 sur deux grands bassins représentatifs des régions étudiées: la Moulouya au Maroc et le Bani au Mali. Les simulations des écoulements sont réalisées à l'aide du modèle hydrologique semi-spatialisé GR2M et des scénarios climatiques établis suivant les projections des modèles NCPCM et HadCM3 (SRES A2). Les résultats montrent une nette tendance à la diminution des précipitations sur la rive sud de la Méditerranée tandis que les conditions pluviométriques déjà déficitaires en Afrique de l'Ouest semblent se maintenir. En lien avec une hausse continue de l'évapotranspiration potentielle et une pression démographique toujours croissante, les écoulements de surface de ces deux bassins pourraient être fortement réduits, en particulier en période de crue.

Mots clefs changement climatique; modélisation hydrologique; rivière Bani; rivière Moulouya; Méditerranée; Afrique de l'Ouest

Water resources and climate change: evolution compared for basins in Mediterranean and West African regions

Abstract This study aims to assess the variability of surface water resources by 2080 over two main basins: Moulouya in Morocco and Bani in Mali. Simulations of flows are performed using the semi-lumped hydrological model GR2M and climate scenarios established from climatic models NCPCM and HadCM3 (SRES A2). The results show a clear trend of reduced rainfall over the Moulouya watershed, while the already-deficient rainfall conditions over the Bani catchment appear to be maintained. These conditions, together with a continuing increase in potential evapotranspiration and growing population pressure in both areas, suggest that surface runoff from these basins could be substantially reduced, especially during floods.

Key words climate change; hydrological modelling; Bani River; Moulouya River; Mediterranean; West Africa

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, un intérêt soutenu se manifeste pour l'étude du climat et de sa variabilité compte tenu des conséquences parfois dramatiques que celle-ci peut entraîner. Dans le dernier rapport de l'IPCC (2007), malgré des variations interrégionales et saisonnières, il est mis en évidence un réchauffement annuel de 1.5° à 5°C d'ici 2100. Or, une hausse des températures pourrait modifier la répartition spatiale et temporelle des précipitations et risquerait, alors, dans les régions tropicales sèches de moyennes latitudes, d'appauvrir les ressources en eau, d'amplifier leur variabilité et d'affaiblir leur exploitabilité. Par exemple, en région méditerranéenne, avec une diminution des précipitations de 20 à 30% prévue d'ici 2080 (Giorgi & Lionello, 2008), les ressources en eau seront de moins en moins importantes et disponibles et les situations de pénurie déjà présentes dans une partie de la région méditerranéenne risqueront de s'aggraver, comme le montre l'exemple du Maroc. De plus, en Afrique de l'Ouest, la modification de l'occupation du sol et de ses usages témoigne d'une pression démographique croissante qui entraîne inexorablement une dégradation des sols, et donc des conditions de ruissellement (Ruelland *et al.*, 2008). Dans ce contexte, l'évolution future des ressources en eau est un sujet préoccupant pour les populations de ces zones et appelle au développement de stratégies d'adaptation. Ainsi, à l'aide des sorties de Modèles de Circulation Générale (ou GCM), cette étude tente d'évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau de deux grands bassins versants situés en région méditerranéenne et en Afrique de l'Ouest.

ZONES D'ETUDE

Les bassins versants pour cette étude ont été sélectionnés suivant un transect nord-sud sur le continent africain, entre 0° et 10°W (Fig. 1). Ils peuvent alors être utilisés comme témoins d'évolution des ressources en eau de surface dans les zones semi-arides du bassin méditerranéen et d'Afrique de l'Ouest sous l'influence des conditions climatiques prédites par les modèles à la fin du 21ème siècle.

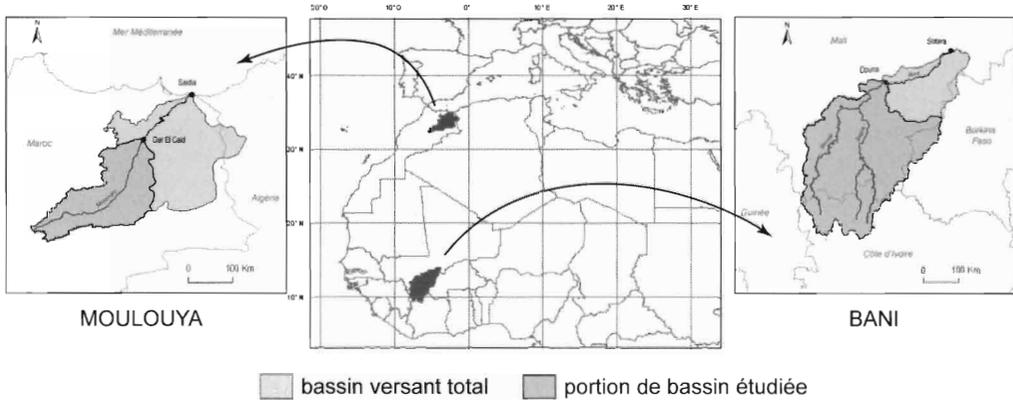


Fig. 1 Localisation des bassins versants de la Moulouya (Maroc) et du Bani (Mali).

Le bassin méditerranéen est divisé entre 22 pays et territoires répartis sur trois zones géographiques: l'Europe du Sud, l'Afrique du Nord et le Proche Orient. Il est délimité par la mer Méditerranée et par de nombreuses unités orographiques (Pyrénées, Alpes, Alpes Dinariques, Balkan, Rhodope, Atlas). Ces dernières, par leur influence sur les circulations atmosphériques, sont les principales sources d'eau des bassins versants côtiers méditerranéens où les précipitations sont rares, l'évapotranspiration élevée et les périodes d'étiage longues et sévères. Le bassin versant de la Moulouya est le cinquième plus grand bassin méditerranéen (55 500 km²). Il prend sa source au Maroc à Alesid à la jonction des chaînes du Haut et du Moyen Atlas et se jette 600 km plus loin dans la mer Méditerranée près de Saïdia, à 16 km de la frontière algérienne. Son climat est aride à semi-aride avec en moyenne 100 à 400 mm de pluie par an (<http://www.caumoulouya.ma>). Toutefois, il est marqué par un important contraste saisonnier, avec des étés longs, chauds et secs et des printemps doux et humides au cours desquels des excès pluviométriques aux conséquences parfois dévastatrices peuvent se produire. En raison de ces faibles précipitations moyennes et des sols peu profonds, la plus grande partie du bassin est employée comme pâturage et aménagée pour l'agriculture. L'Afrique de l'Ouest occupe une surface d'environ 6 140 000 km² et regroupe 16 pays. Elle s'étend entre l'océan Atlantique à l'ouest et au sud, le Sahara au nord, et approximativement le 10° méridien à l'est. Le climat de l'Afrique de l'Ouest est régi par un système de circulation atmosphérique de mousson, piloté par l'oscillation saisonnière de la Zone de Convergence InterTropicale. D'effet relativement limité sur les températures, cette structure engendre pour les précipitations un cycle saisonnier particulièrement stable et marqué. Saisons sèches et humides alternent une ou deux fois par an suivant que l'on se rapproche du tropique (zone sahélienne, semi-aride) ou de l'équateur (zone guinéenne, humide). La rivière Bani est l'un des principaux affluents du fleuve Niger et son bassin draine une superficie d'environ 130 000 km². Il est constitué du Banifing, du Baoulé et de la Bagoé, qui prennent leur source en Côte d'Ivoire, et parcourt une longueur d'environ 775 km avant de confluer avec le Niger à hauteur de Mopti. Le bassin est situé en zone climatique soudano-sahélienne et les précipitations moyennes annuelles vont de 500 à 1 600 mm/an du nord au sud. L'évapotranspiration moyenne

sur le bassin est de 1850 mm/an et montre peu de variations durant l'année. Le bassin versant est caractérisé par une forte pression humaine locale couplée à un flux migratoire de populations sédentaires en provenance du nord suite à l'aridification des milieux. Il sert également de zone de forte transhumance du cheptel. Il s'en est suivi l'extension des superficies cultivées (coton et céréales) et une dégradation des sites sylvo-pastoraux (Ruelland *et al.*, 2008).

MATERIELS ET METHODES

Origine des données

Les données utilisées pour cette étude proviennent de plusieurs banques de données, majoritairement accessibles en ligne. En ce qui concerne les données climatiques (précipitation et température), il s'agit essentiellement de données spatialisées, au pas de temps mensuel et disponibles sur la période d'observations (dite de référence) 1961–1990 et sur la période 2070–2099 (dite horizon 2080). Les données observées proviennent du Climatic Research Unit (<http://www.cru.uae.ac.uk>) à partir de la grille CRU TS 2.1 (Mitchell & Jones, 2005). Dans l'optique de générer des scénarios pour l'horizon 2080, les simulations produites par l'IPCC (2007) sont extraites des archives du Data Distribution Centre (<http://ipcc-ddc.uea.ac.uk>). Les données produites par les modèles HadCM3 et NCPCM ont été sélectionnées avec le scénario d'émission de gaz à effet de serre 20C3M (climat du 20ème siècle – 350 ppm de CO₂, période de référence) et le SRES-A2 (stabilisation du CO₂ à 850 ppm, horizon 2080). Enfin, pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), plusieurs formules ont du être utilisées notamment du fait du manque de données en Méditerranée ou en Afrique de l'Ouest, mais ceci affecte peu la sensibilité du modèle hydrologique utilisé (Oudin *et al.*, 2005). Ainsi sur le Bani, la formule de Penman-Monteith (Monteith, 1965) a été appliquée pour la période de référence. Puis, la formule de Thornthwaite (1948) a été utilisée pour calculer les ETP à l'horizon 2080 et pour la période de référence sur le bassin de la Moulouya. Les données hydrologiques mensuelles proviennent du système d'information environnementale SIEREM (<http://www.hydrosociences.org/sierem>), qui rassemble les données collectées par l'IRD et complétées régulièrement auprès des directions des services hydrologiques nationaux. La série de débits mensuels à la station de Dar El Caid (24 430 km²), exutoire du bassin versant de la Moulouya (Maroc), s'étend de 1961 à 1988, avec seulement 1.6% de lacune. Cette station a été choisie du fait de sa position en amont du barrage hydraulique Mohammed V (mis en service en 1967), susceptible d'influencer les écoulements de la Moulouya. La série de débits à la station de Douna (101 233 km²), exutoire du bassin versant du Bani (Mali), couvre la période 1950-1995 avec un taux de lacune d'environ 8.9%. Le Tableau 1 donne les caractéristiques hydroclimatiques principales sur chacun des deux bassins versants.

Tableau 1 Caractéristiques hydroclimatiques des bassins sélectionnés en Méditerranée et en Afrique de l'Ouest (moyennées sur la période d'étude).

Bassin	Station	Surf. (km ²)	Période	Débit (m ³ /s)	Précip. (mm)	ETP (mm)
Bani	Douna	101 233	1950-1995	433.3	1137	183
Moulouya	Dar El Caid	24 430	1961-1988	20.4	433	52

Modélisation hydrologique des bassins versants

Les écoulements mensuels ont été simulés avec le modèle conceptuel GR2M du CEMAGREF (Niel *et al.*, 2003) 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 du réservoir "sol" évolue en fonction de la pluie et de l'ETP. La vidange progressive de ce réservoir produit un 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 pour simuler les écoulements dans le futur, les valeurs des deux paramètres X_1 et X_2 du modèle sont estimées pour chaque bassin versant, par l'enchaînement des procédures d'optimisation de Rosenbrock et du Simplex (décrits par Servat et Dezetter, 1988). Le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) permet d'apprécier la qualité d'ajustement du modèle GR2M aux observations.

Constitution des scénarios climatiques

Les précipitations simulées par les modèles climatiques ne sont pas suffisamment fiables pour être utilisées directement dans les études d'impacts et, *a fortiori*, dans les modèles hydrologiques (IPCC, 2007). En particulier sur l'Afrique de l'Ouest, Ardoïn-Bardin *et al.* (2009) ont montré que ces modèles climatiques semblent atteindre leurs limites 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 en termes de dynamique saisonnière, ils sont en revanche incapables de reproduire les cumuls pluviométriques au pas de temps annuel ainsi que la variabilité interannuelle des précipitations. L'IPCC recommande, de ce fait, d'établir des scénarios climatiques en utilisant les champs de variations entre le climat futur (précipitations et température) et une période de référence. Ces scénarios représentent les variations prévues par les modèles climatiques et sont donc le résultat de l'application d'hypothèses d'utilisation des séries chronologiques de variables produites par les modèles climatiques. Ainsi, les différences entre les précipitations et les températures représentatives de la période de référence (1961–1990 – scénario 20C3M) et du climat futur (horizon 2080 – scénario SRES-A2) sont calculées et exprimées en taux de variation en fonction d'une climatologie moyenne tirée des simulations du modèle climatique considéré sur la même période de référence. Ces taux de variation sont ensuite appliqués à une série chronologique fictive, obtenue par simple tirage aléatoire dans la période de référence (Ardoïn-Bardin *et al.*, 2009). La méthode employée pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau consiste alors à : (i) caler le modèle hydrologique GR2M pour chaque bassin versant à partir des séries hydroclimatiques observées; (ii) construire les scénarios climatiques (horizon 2080) à partir des simulations des modèles HadCM3 et NCPCM et (iii) simuler les écoulements futurs à l'aide du modèle GR2M calé en utilisant les scénarios climatiques construits précédemment. Le succès de cette démarche repose sur l'hypothèse que la relation pluie-débit ne serait pas modifiée par rapport à celle établie à partir des chroniques d'observations. Cette hypothèse, dont on mesure l'importance, permet de proposer des tendances d'évolution et de faire correspondre variation climatique et variation hydrologique.

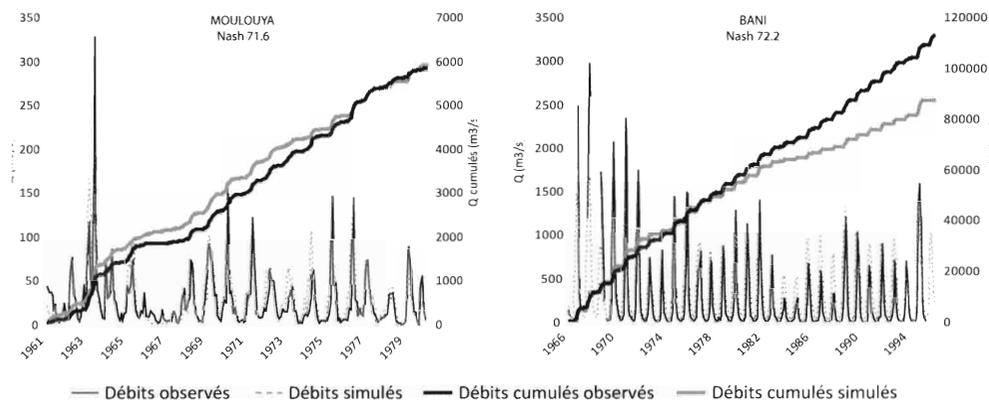
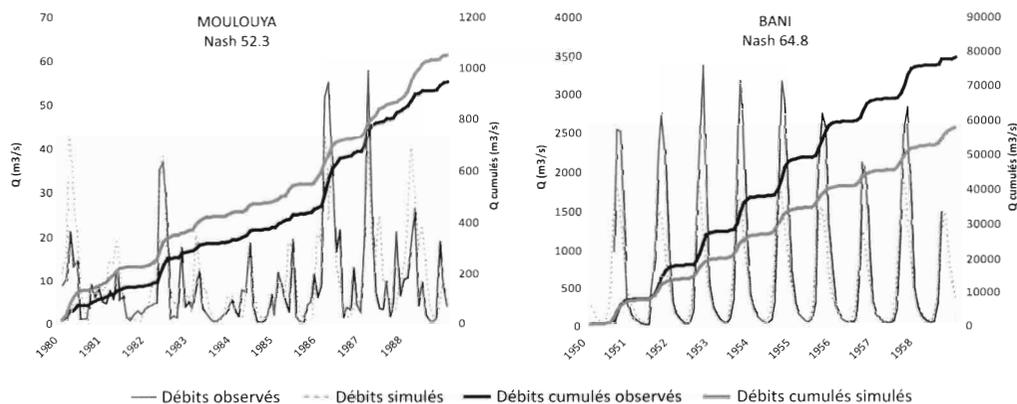
RESULTATS

Efficiences du modèle GR2M

Les valeurs des deux paramètres du modèle GR2M ont été estimées pour chaque bassin versant à partir d'un calage sur une partie des données observées disponibles et validées sur les données restantes. Plusieurs tests ont été réalisés afin d'identifier le meilleur jeu de paramètres. En phase de calage, le comportement du modèle GR2M est satisfaisant au regard des valeurs du critère de Nash (Tableau 2). Néanmoins, l'examen des hydrogrammes calculés par le modèle souligne la difficulté de ce dernier à reproduire les volumes écoulés pendant les pointes de crues. Par ailleurs, si la dynamique saisonnière est respectée, on note également des problèmes dans les périodes d'étiages en particulier pour le bassin du Bani (Fig. 2). De plus, la comparaison des courbes de débits cumulés calculés et observés montre que le modèle GR2M surestime les écoulements de la Moulouya et les sous-estime pour le bassin du Bani. En phase de validation, les critères de Nash se dégradent de 19 points et d'un peu plus de 7 points pour la Moulouya et le Bani respectivement. Les hydrogrammes et les courbes de débits cumulés témoignent d'une qualité moyenne du modèle à représenter les débits observés (Fig. 3).

Tableau 2 Résultats de modélisation: valeurs des paramètres et critères de Nash pour chaque bassin.

Bassin	Période calage	Période validation	X1	X2	Nash Calage	Nash Validation
Moulouya	1961–1979	1980–1988	0.314	0.658	71.6	52.3
Bani	1966–1995	1950–1965	0.398	0.428	72.2	64.8

**Fig. 2** Hydrogrammes calculés et observés sur la période de calage.**Fig. 3** Hydrogrammes calculés et observés sur la période de validation.

Evolution des conditions pluviométriques à l'Horizon 2080

L'utilisation des scénarios climatiques permet d'apprécier les conditions pluviométriques pour la fin du 21^{ème} siècle. Celles-ci sont différentes selon que l'on considère le sud du bassin Méditerranéen ou l'Afrique de l'Ouest. En effet, à l'Horizon 2080, les précipitations devraient diminuer sur l'ensemble du bassin versant de la Moulouya. Par rapport à la période 1961–1990, selon le modèle climatique considéré, les déficits moyens annuels varient entre –22 (NCPCM) et –31% (HadCM3). Les précipitations auraient surtout tendance à diminuer au cours de la période hivernale, d'environ –30% pour NCPCM et entre –30 et –45% pour HadCM3, alors qu'au printemps et en été les précipitations actuelles resteraient inchangées (Fig. 4). En ce qui concerne le Bani, les précipitations prévues par le modèle NCPCM sont identiques à celles observées sur 1961–1990, excepté au mois de novembre où elles enregistrent une légère augmentation (+30 mm/mois). Au contraire, le modèle HadCM3 prévoit une diminution des précipitations de l'ordre

de -10% sur l'ensemble du bassin versant, en particulier entre les mois de mai et septembre (Fig. 4). Associées à une température croissante (et donc une ETP croissante), des précipitations réduites (maintenues) laissent présager une modification des écoulements de surface pour les décennies à venir.

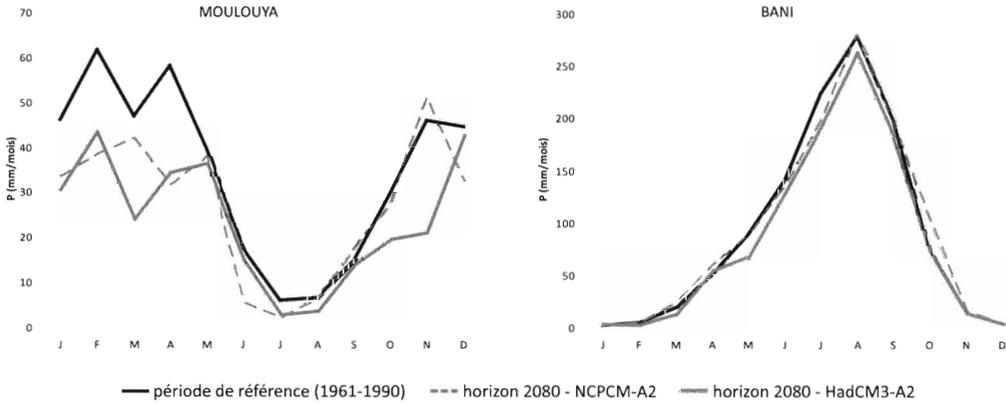


Fig. 4 Variation des précipitations mensuelles à l'horizon 2080 comparées aux observations sur la période 1961–1990, simulations effectuées selon les projections NCPCM et HadCM3 (SRES A2).

Ressources en eau de surface à l'Horizon 2080

Pour le bassin versant de la Moulouya, il peut être constaté, comme pour les précipitations, une diminution importante des écoulements de surface (i.e. débits moyens annuels) par rapport aux années de référence 1961–1990 : -66% à -82% selon le modèle climatique (Fig. 5). Les conditions hydrométriques enregistrées sur la période 1981–1985 semblent se maintenir (de l'ordre de $6 \text{ m}^3/\text{s}$) avec le modèle NCPCM et légèrement se dégrader avec le modèle HadCM3 ($3.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Pour le bassin versant du Bani, les écoulements de surface enregistrent des diminutions de l'ordre de -20% avec le modèle NCPCM et de l'ordre de -38% avec le modèle HadCM3 par rapport à la période 1961–1990 (Fig. 5). Cependant, les débits moyens du Bani à l'Horizon 2080 seront légèrement supérieurs à ceux observés sur la période dite "sèche", post-1970 (250 à $320 \text{ m}^3/\text{s}$ au lieu de $190 \text{ m}^3/\text{s}$). Pour ces deux bassins versants, les niveaux observés dans les phases dites "humides" ne seront vraisemblablement jamais atteints à la fin du 21^{ème} siècle.

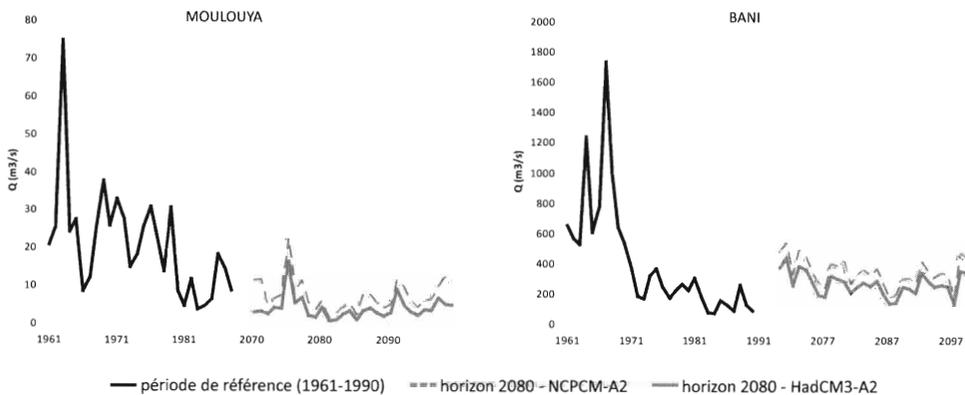


Fig. 5 Evolution interannuelle comparée des écoulements à l'horizon 2080 par rapport à ceux observés sur la période de référence 1961–1990.

La comparaison des hydrogrammes moyens mensuels permet de voir si ces variations interannuelles sont accompagnées d'une modification des régimes hydrologiques. Pour le bassin de la Moulouya, la diminution importante des précipitations a pour conséquence une modification du régime hydrologique (Fig. 6): la crue est peu marquée et les débits sont faibles et quasi constants sur l'ensemble de l'année ($1 \text{ m}^3/\text{s}$ à $13 \text{ m}^3/\text{s}$). En revanche pour le Bani, quel que soit le modèle climatique considéré, le régime hydrologique reste inchangé en termes de dynamique: les périodes de crue et de basses eaux restent identiques à celles observées. Les modifications portent essentiellement sur les volumes écoulés en période de crue, avec une diminution de -31% (NCPCM) à -47% (HadCM3) en septembre–octobre.

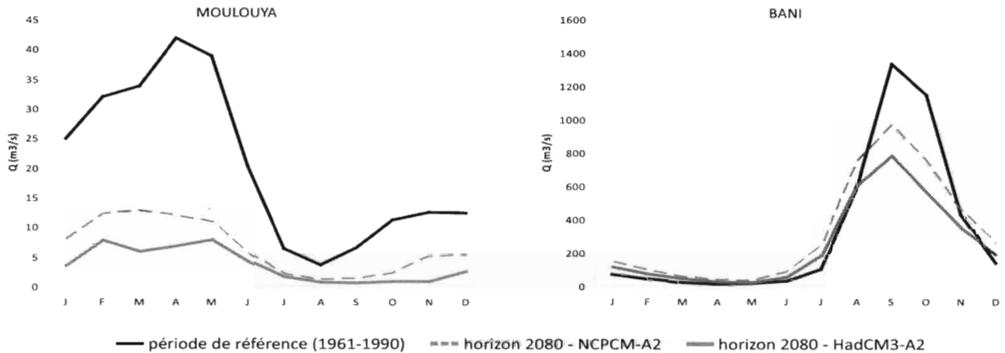


Fig. 6 Evolution mensuelle comparée des écoulements à l'horizon 2080 par rapport à ceux observés sur la période de référence 1961–1990.

CONCLUSION

L'IPCC (2007) place le bassin méditerranéen et l'Afrique de l'Ouest comme les régions les plus sensibles et vulnérables au changement climatique. Dans cette étude, des scénarios climatiques ont été générés à partir des projections des modèles NCPCM et HadCM3 (SRES A2) et ont ensuite été utilisés en entrée du modèle hydrologique GR2M afin de simuler les écoulements futurs des bassins de la Moulouya (Maroc, $\sim 24\,000 \text{ km}^2$) et du Bani (Mali, $\sim 100\,000 \text{ km}^2$). Un premier état des variations hydrologiques à l'horizon 2080 a ainsi pu être établi. Malgré une hypothèse forte sur la stabilité de la relation pluie-débit et une difficulté du modèle à représenter les pointes de crues, certaines tendances ont tout de même pu être mises en évidence. De part et d'autre du Sahara, les changements projetés sont importants et cohérents. Sur la rive sud du bassin méditerranéen, la diminution des précipitations serait importante à l'horizon 2080 (de l'ordre de -20 à -30%) et particulièrement marquée au cours de la période hivernale (d'environ -30%). Ceci entraînerait une diminution des écoulements de la Moulouya telle que les niveaux observés au cours de la période de référence ne seraient plus jamais atteints. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par ailleurs (e.g. Giorgi & Lonello, 2008; Driouech *et al.*, 2010). Pour l'Afrique de l'Ouest, les projections des modèles climatiques tendent à un maintien, voire une faible réduction, des précipitations. Cependant, la simulation des écoulements futurs du Bani indique une réduction des débits en période de crue, impliquant une diminution des écoulements à l'horizon 2080 comprise entre -20 et -40% selon le modèle climatique. Ainsi, ce travail de modélisation a permis d'évaluer les répercussions qu'une modification du climat pourrait avoir sur les écoulements de grands bassins versants, c'est-à-dire le maintien de conditions déficitaires en région marocaine et soudano-sahélienne. L'amélioration de la connaissance des impacts prévisibles du changement climatique sur les ressources en eau devrait favoriser la définition et la mise en œuvre de stratégies et mesures d'adaptation appropriées à la situation des pays méditerranéens et d'Afrique de l'Ouest. Elle devrait par ailleurs nourrir la réflexion sur les coopérations possibles entre pays pour faire face aux fluctuations climatiques.

Remerciements Ce travail a bénéficié du soutien du Plan Bleu, Centre d'Activités Régionales du Plan d'Action pour la Méditerranée (PNUE) et du projet RESSAC financé par l'Agence Nationale de la Recherche programme Vulnérabilité, Milieu et Climat (décision ANR-06-VULN-17).

REFERENCES

- Ardoïn-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J. E., Mahé, G., Niel, H. & Dieulin, C. (2009) Using GCM outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrol. Sci. J.* **54**(1), 77–89.
- Dieulin, C. (2005) *Calcul des capacités en eau des sols (Water Holding Capacity – WHC) à partir de la carte des sols de la FAO*. Note Interne, UMR HydroSciences Montpellier, France.
- Driouech, F., Mahé, G., Déqué, M., Dieulin, C., El Heirech, T., Milano, M., Benabdelfadel, A. & Rouche, N. (2010) Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. VIth FRIEND World Conf., Fes, Morocco, October 2010), 561–567. IAHS Publ. 340. IAHS Press, Wallingford, UK. (this volume)
- Giorgi, F. & Lionello, P. (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global Planet. Change* **63**, 90–104.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 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.
- Monteith, J. L. (1965) *Evaporation and the environment, the state and movement of water living organisms*. XIXth symposium. Cambridge University Press, Swansea, UK.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I: A discussion of principle. *J. Hydrol.* **10**, 282–290.
- Niel, H., Paturel, J. E. & Servat, E. (2003) Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *J. Hydrol.* **278**(1–4), 213–230.
- Oudin, L., Hervieu F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005) Which potential evapotranspiration for a lumped rainfall-runoff model? *J. Hydrol.* **303**, 290–306.
- 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. Rem. Sens.* **29**(12), 3533–3551.
- Servat, E. & Dezetter, A. (1988) *Simple et Rosen: deux méthodes d'optimisations non linéaires. Théorie et Pratique*. ORSTOM Montpellier, notice OVNIh1.
- Thornthwaite, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* **38**(1), 55–94.

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