

## Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc

FATIMA DRIOUECH<sup>1</sup>, GIL MAHÉ<sup>2</sup>, MICHEL DÉQUÉ<sup>3</sup>, CLAUDINE DIEULIN<sup>2</sup>,  
TARIK EL HEIRECH<sup>1</sup>, MARIANNE MILANO<sup>2</sup>,  
ABDELHAMID BENABDELFADEL<sup>4</sup> & NATHALIE ROUCHE<sup>2</sup>

1 Direction de la Météorologie Nationale, BP 8106 Casa-Oasis, Casablanca, Maroc  
driouechfatima@yahoo.fr

2 HydroSciences Montpellier, France / Plan Bleu, Centre d'activités régionales, France

3 Météo-France/CNRM, CNRS/GAME, Toulouse, France

4 Direction de la recherche et de la planification de l'eau, Rabat, Maroc

**Résumé** A l'aide du modèle hydrologique GR2M et des données de scénarios climatiques à haute résolution sur le Maroc issues du modèle ARPEGE-climat, une évaluation de l'impact éventuel de changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Moulouya est effectuée pour l'horizon 2021–2050. En termes d'évolution observées, les débits mensuels ont accusé une diminution entre 1958 et 2000, principalement attribuée à la diminution des précipitations combinées à l'augmentation de l'ETP. Selon les projections du scénario SRES A1B, cette diminution de débits va se poursuivre dans le futur, notamment en saison hivernale.

**Mots clés** ressources en eau; changement climatique; impacts; débits; Maroc; Moulouya

### Evaluation of potential climate change impacts on water resources of the Moulouya watershed in Morocco

**Abstract** Using the hydrological model GR2M and climate scenarios data at high resolution over Morocco issued from the ARPEGE-Climate model, this study has tried to evaluate climate change impacts on water resources of the Moulouya watershed. The analysis of observed discharge data reveals a negative trend over the period 1958–2000. This decrease is mainly attributed to a decrease in total rainfall amounts and to a positive trend shown by the ETP. After the SRES A1B, the Moulouya winter discharges are projected to also decrease during 2021–2050.

**Key words** water resources; climate change; impacts; discharges; Morocco; Moulouya

## INTRODUCTION

Le réchauffement du système climatique bien réel et sans équivoque est selon le 4<sup>ème</sup> rapport de GIEC (IPCC, 2007) accompagné de plusieurs changements dans les climats régionaux induisant des impacts non négligeables dans différents secteurs socio-économiques. Dans la zone méditerranéenne et en particulier en Afrique du nord, le secteur des ressources en eau est parmi les plus vulnérables à la variabilité du climat ce qui rend l'évolution de la ressource dans le cadre du changement climatique une question préoccupante pour la plupart des pays de la zone. Le Maroc n'est pas exclu de cette préoccupation surtout que la ressource en eau est d'une valeur socio-économique certaine.

L'évaluation des impacts du changement climatique sur la ressource en eau est une étape incontournable dans tout processus de mise en place de stratégies d'adaptations relatives à ce secteur. Cette évaluation nécessite l'utilisation de données de scénarios climatiques à échelles plus fines que ce que permettent les modèles de circulation générale (quelques centaines de km). Les méthodes de réduction d'échelle spatiale (downscaling) statistiques et dynamiques sont utilisées pour accéder à ces échelles.

L'hydrologie du bassin versant de la Moulouya, un des grands bassins du Maroc, a fait l'objet de différentes études (Snoussi *et al.*, 2002; Milano, 2009; Singla, 2009) antérieures, mais, à notre connaissance, les travaux qui ont abordé l'évaluation des impacts futurs en utilisant les scénarios climatiques résultants de méthodes de réduction d'échelle dynamiques sont rares ou inexistantes.

En utilisant les données de réduction d'échelle dynamique issues du modèle ARPEGE-Climat, cette étude vise l'évaluation des impacts potentiels des changements climatiques futurs sur le

bassin versant de la Moulouya à l'horizon 2021–2050. Après une description du bassin, des données et de la méthodologie utilisés, on a procédé à l'évaluation des changements de débits projetés pour le futur.

### **Le bassin versant de la Moulouya**

Le bassin de la Moulouya s'étend sur une superficie de 55 500 km<sup>2</sup> ([www.water.gov.ma](http://www.water.gov.ma)) à l'est du Maroc. La rivière de la Moulouya de longueur d'environ 600 km prend sa source à Alemsid à une altitude de 1170 m à la jonction du massif du moyen Atlas et du haut Atlas et se jette à Saidia (Ras el ma) en Méditerranée. L'apport moyen annuel à l'embouchure de la Moulouya est de l'ordre de 920 millions de m<sup>3</sup>/an (période 1970–1998).

Le climat du bassin est de type méditerranéen avec une pluviométrie annuelle relativement faible et irrégulière (cumuls annuels de 200 à 400 mm). Le cumul annuel de précipitation peut varier de moins de 100 mm à un peu plus de 600 mm. Les températures moyennes varient généralement entre 5°C et 18°C l'hiver et entre 18°C et 31°C l'été. La zone hydrographique de la Moulouya se trouve sous l'influence climatique de l'Atlantique et à la Méditerranée. Les plus fortes pluviométriques sont généralement associées à une circulation cyclonique à l'ouest de la Méditerranée. Une diminution prononcée des précipitations de cette zone est visible depuis 1970 (Knippertz *et al.*, 2003). Ce sens d'évolution est aussi mis en évidence à l'aide de l'indice d'aridité de DeMartonne (Beltrando & Chémery, 1995) qui fait ressortir une aridification de la zone avec le temps (Driouech et Sebbari, com. pers.). En effet, entre 1961–1970 et 1991–2000 les régions semi-arides du bassin sont devenues arides et les quelques régions semi-humides du nord sont devenues semi-arides.

## **DONNEES UTILISEES**

### **Données climatiques et hydrologiques**

Les données de précipitations mensuelles sont issues du Climatic Research Unit – CRU (New *et al.*, 2000) disponibles sur la base de données SIREM de l'UMR HydroSciences Montpellier (Dieulin *et al.*, 2006). Elles sont spatialisées sur une grille de 0.5° de résolution et couvrent la période 1901–2002. Les données de l'ETP sont calculées à l'aide de la formule de Thornthwaite (Réménieras, 1986; Milano, 2009) sur une grille de la même résolution et sur la même période.

Les données de débits mensuelles sont issues de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, elles couvrent la période 1956–2000. On se focalise dans ce qui suit sur les débits à la station hydrologique de Dar ElCaid située à 34.24° nord et 3.32° ouest. Cela revient à étudier une superficie de bassin d'environ 24 430 km<sup>2</sup>. Le choix de cette station est dû, outre la disponibilité des données, à son emplacement à l'amont des barrages hydrauliques susceptibles de biaiser l'estimation de la relation pluie-débit. Afin d'éviter un certain nombre de données manquantes, les deux années 1956 et 1957 sont écartées.

La forte variabilité interannuelle des pluies et débits est illustrée par la Fig. 1 met en relief une relative bonne relation pluies-débits sur pratiquement toute la période (1958–2000). Cette relation se traduit par un coefficient de corrélation entre les pluies et les débits de 0.8. Entre 1958 et 2000 les précipitations et les débits ont connu des tendances à la baisse annuelles respectivement de 2.8 mm et 3.5 m<sup>3</sup>/s. L'évapotranspiration potentielle (ETP) a aussi connu une évolution non négligeable; à savoir une hausse d'environ 0.7 mm/an. Tous ces éléments reflètent l'importance de l'impact du climat et ses évolutions sur les débits du bassin.

### **Données de scénarios climatiques**

Les données de précipitations et températures utilisées pour le calcul de changements climatiques futurs sous le scénario SRES A1B sont issues de la récente version (Version IV) du modèle de circulation générale ARPEGE-Climat (Déqué & Piedelièvre, 1995; Gibelin & Déqué, 2003; Driouech *et al.*, 2008). Il s'agit d'une version à résolution variable avec un pôle d'étiement placé sur le Maroc (à 28°N, 8°W) ce qui donne une résolution de l'ordre du demi degré carré sur tout le

pays (50 à 60 km). La période de base est 1971–2000 et la période future est 2021–2050. L'évaluation des performances de cette version du modèle sur le Maroc a été effectuée par Driouech *et al.* (2008). Malgré la tendance du modèle à sous estimer les précipitations durant certains régimes de temps de l'Atlantique nord (l'anticyclone de Groenland), celui-ci reproduit bien les périodes moyennes de sécheresses et la variabilité interannuelle des précipitations.

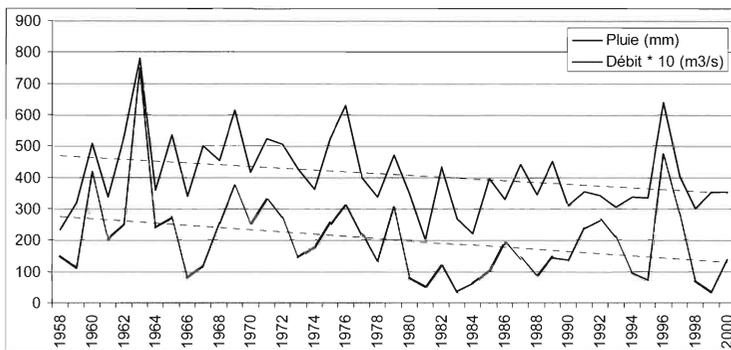


Fig. 1 Evolution des débits observés et des pluies moyennes (issues du CRU) au bassin versant de la Moulouya (Dar ElCaid); les débits sont multipliés par 10.

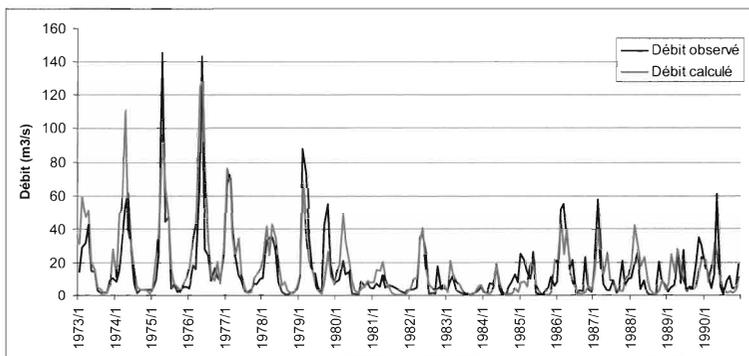


Fig. 2 Débits mensuels observés et simulés en validation sur la période 1973–1990 à Dar ElCaid.

### Calage et validation du modèle hydrologique

La simulation des écoulements est réalisée à l'aide du modèle hydrologique conceptuel GR2M du CEMAGREF (Paturel *et al.* 1995; Ardoin-Bardin *et al.*, 2005). Ce modèle utilise un pas de temps mensuels et une distribution du bassin en un maillage de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Avant de l'utiliser pour le calcul des changements futurs, on a procédé à son calage à l'aide des débits observés et des précipitations du CRU. Le calage et la validation ont été effectués sur différentes périodes afin de trouver la formulation qui reproduit au mieux la relation pluies-débits. La qualité des différents calages et validations est évaluée à l'aide du critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970).

La meilleure période de calage trouvée est 1958–1972 avec un critère de Nash de 71%. La validation faite sur la période 1973–1990 donne un critère de Nash de 60% traduisant une qualité moyenne du modèle à représenter les débits observés. En effet, bien que la dynamique générale des écoulements soit assez bien reproduite, ce qui donne un coefficient de corrélation de 0.8 entre les débits observés et ceux calculés, le modèle montre des difficultés à reproduire les pointes de crue (Fig. 2). Au cours des périodes humides, au sens hydrologique, les volumes écoulés sont

généralement sous-estimés (jusqu'à 50 m<sup>3</sup>/s) tandis qu'au cours des périodes sèches le modèle a tendance à les surestimer. La prolongation de la période de validation jusqu'en 2000 fait baisser le critère de Nash à 45%. Ceci est probablement lié au renforcement des prélèvements à partir des années 1990.

**CHANGEMENTS FUTURS**

**Constitution des séries futures de précipitation et de l'ETP**

Le calcul des changements projetés pour les débits est effectué à l'aide des champs de variation, entre la période future et la période de référence, issus du modèle climatique. Ces champs de variation sont utilisés pour la constitution des séries chronologiques futures de précipitation et de l'ETP. Pour chaque cellule et chaque mois de l'année on calcul le changement des précipitations et de l'ETP à l'aide de l'expression suivante:

$$\Delta_i = 100 * (F_i - R_i) / R_i \tag{1}$$

avec  $\Delta_i$  le changement de précipitation (ou ETP) projeté pour le mois  $i$ ,  $F_i$  la moyenne de la précipitation (ou ETP) mensuelle pour le mois  $i$  calculée sur la période future et  $R_i$  la moyenne calculée sur la période de référence.  $F_i$  et  $R_i$  sont calculés à l'aide des données du modèle climatique. Les séries chronologiques pour le climat futur (période 2021–2050) sont alors construites en combinant celles représentant le climat observés (période 1971–2000) et le terme représentatif du changement ( $\Delta_i$ ). Pour chaque mois  $i$  et chaque année  $j$  de la période future, la précipitation (ou ETP)  $X_{ij}$  est obtenue à l'aide de la formule suivante:

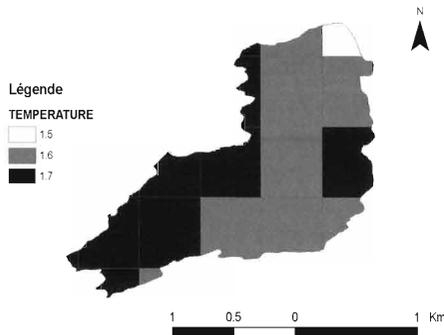
$$X_{ij} = XP_{ik} * (1 + \Delta_i / 100) \tag{2}$$

avec  $XP_{ik}$  la valeur de la précipitation (ou ETP) mensuelle observée au mois  $i$  de l'année  $k$ . L'année  $k$  est tirée au hasard parmi les années de la période de référence.

Les débits futurs sont simulés par le modèle hydrologique conceptuel GR2M préalablement calé et prenant comme entrée les valeurs de  $X_{ij}$  pour les précipitations et l'ETP. Ils sont alors comparés aux débits observés.

**Changements projetés**

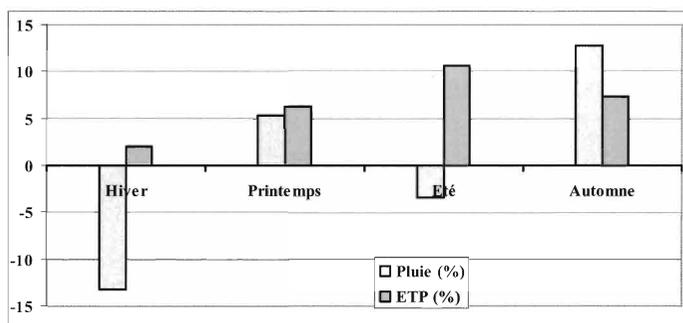
Les projections de l'IPCC pour 2046–2065 comparativement à 1980–1990 donnent pour toute la moitié nord du Maroc une augmentation de la température moyenne de 1.5 à 2°C (IPCC, 2007). Selon le modèle ARPEGE-Climat, les températures mensuelles moyennes du bassin de la Moulouya augmenteraient dans le futur (2121–2050) de 1.5 à 1.7°C par rapport aux moyennes de 1971–2000 (Fig. 3). Le réchauffement concernerait toutes les saisons et attendrait 2°C en été.



**Fig. 3** Evolution future de la température mensuelle moyenne (calculée sur tous les mois de l'année) pour le bassin de la Moulouya (Dar ElCaïd); en °C.

L'ETP, étroitement liée à la température, connaîtrait des augmentations moyennes (Fig. 4) de 2% (hiver) à 11% (été). Les mois de décembre et janvier ne sont pas censé subir d'importants changements selon les projections.

Les changements futurs projetés, pour la pluviométrie au Maroc, par la version du modèle ARPEGE-Climat dont les données sont utilisées pour cette étude, ont été évalués par Driouech *et al.* (2010) sur la saison d'hiver. Le bassin de la Moulouya connaîtrait une diminution des cumuls pluviométriques de 10 à 20% durant cette saison bien importante en termes de précipitations reçues. Cette baisse serait accompagnée d'une diminution du nombre totale de jours pluvieux (-10 à -15%) et d'une augmentation de la persistance temporelle de la sécheresse. Le changement mensuel moyenné sur le bassin pour chacune des quatre saisons de l'année (Fig. 4) montre que la plus forte baisse projetée concerne l'hiver (-13%) et que les saisons d'automne et du printemps connaîtraient en moyenne plutôt des augmentations.



**Fig. 4** Changements futurs des précipitations et ETP mensuelles moyennés sur les différentes saisons (Bassin de la Moulouya, Dar ElCaid).

Le calcul des changements projetés pour les débits mensuels moyens par comparaison des débits futurs et des débits observés comme dans Ardoin-Bardin *et al.* (2005, 2006) donne des évolutions parfois difficiles à analyser tenant compte des changements projetés pour les pluies et ETP (Table 1). En effet, à titre d'exemple, la saison d'automne obtient d'importantes baisses de débits malgré la hausse projetée pour les pluies et des changements peu élevés de l'ETP. Ceci peut être dû au fait qu'en comparant des débits futurs simulés à des débits observés revient à considérer le modèle hydrologique comme étant parfait, ce qui n'est pas le cas en réalité.

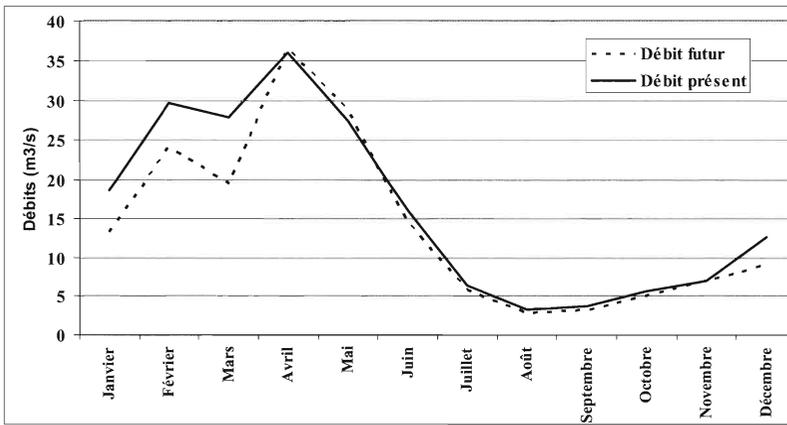
La comparaison des débits futurs et actuels (période de référence) simulés par le modèle hydrologique est plus appropriée pour estimer le changement futur de débits puisqu'elle considère deux quantités issues du même processus. Elle permet en plus de corriger certaines erreurs du modèle comme celle relative au biais moyen. En résultats, le mois de mai est projeté connaître une augmentation de débits mais qui reste relativement faible (5%) (Table 1, colonne 5). Le mois d'avril, correspondant à la période de pointe de crue, et le mois de novembre ne montrent pas d'évolutions notables. Les débits des 9 autres mois sont projetés diminuer de 10 à 30%. À l'échelle saisonnière, les débits mensuels moyens baisseraient de 26% en hiver et de 7%, 8% et 10% respectivement en automne, au printemps et en été. L'analyse des changements projetés pour les pluies et ETP conjointement avec celles projetées pour les débits montre le rôle non négligeable de l'évolution de l'ETP. Les débits des mois d'août à octobre diminueraient, en effet, dans le futur de 11% en dépit des augmentations de 8 à 12% projetées pour les pluies.

En utilisant les données climatiques issues de modèles de circulation générale de faible résolution, Milano (2009) projette une quasi disparition des écoulements au niveau de la Moulouya en 2046–2065 et ce pour toute l'année en dépit de l'augmentation projetée pour les précipitations de l'été. Ceci est probablement dû à la forte augmentation prédite pour l'ETP (jusqu'à 65%) en liaison avec l'augmentation des températures qui dépasse 5°C. Dans notre cas d'étude, les baisses

de 5 à 8 M<sup>3</sup>/s projetées pour 2021–2050 ne feraient pas disparaître complètement les écoulements à cet horizon (Fig. 5). En plus, le format de l'hydrogramme moyen serait conservé; mêmes périodes de hautes eaux et de basses eaux intra-annuelles entre le présent et le futur.

**Table 1** Changements projetés pour les pluies, l'ETP et le débit au bassin de la Moulouya (Dar ElCaid).

Mois	Changement de pluie (%)	Changement de l'ETP (%)	Changement de débit par rapport aux débits observés(%)	Changement de débit par rapport aux débits simulés pour le présent (%)
1	-18	-3	-13	-29
2	-1	7	0	-19
3	-20	7	-32	-30
4	24	4	3	1
5	12	8	4	5
6	-20	11	-18	-9
7	2	11	6	-10
8	8	11	-20	-11
9	12	11	-65	-11
10	8	5	-67	-11
11	18	6	-51	-1
12	-20	1	-10	-29



**Fig. 5** Variation des débits mensuels moyens entre le futur et le présent (Bassin de la Moulouya, Dar ElCaid).

## CONCLUSION

Cette étude consiste en l'évaluation de l'impact de changement climatique sur un des grands bassins du Maroc qui est celui de la Moulouya à l'est du pays. L'évaluation est faite à l'aide du modèle hydrologique GR2M en utilisant les données de scénarios climatiques issues du modèle ARPEGE-Climat tourné à haute résolution sur le Maroc (50 à 60 km).

Entre 1958 et 2000 les débits mensuels ont accusé une nette tendance à la baisse attribuée principalement à la diminution de la pluviométrie et à l'augmentation de l'ETP. A l'horizon 2050, les débits de l'hiver sont projetés connaître une baisse de 20 à 30%, ceux des autres saisons diminueraient de façon plus faible (en moyenne 7 à 10%).

L'analyse des évolutions projetées à la fois pour les débits, les précipitations et les ETP (étroitement liées aux températures) montre l'importance non négligeable de cette dernière. Il

serait donc intéressant d'utiliser d'autres formules de calcul de l'ETP comme celles permettant par exemple la prise en compte de l'évolution de l'amplitude thermique. Les températures maximales et minimales risquent en effet de ne pas évoluer au même rythme.

Enfin, une approche multi-modèle permettrait d'évaluer la robustesse des résultats et de couvrir une part des incertitudes liées à l'évaluation des impacts de changement climatique.

## RÉFÉRENCES

- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Mahé, G., Paturol, 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 Climatic Change—Hydroclimatic Variability* (Proc. Symp. S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 296. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Beltrando, G. & Chémery, L. (1995) Dictionnaire du Climat. Ed. Larousse, Collection Références, ISBN 2-03-720233-4.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Dieulin, C., Casenave, L., Niel, H., Paturol, J. E. & Mahé, G. (2006) Application de scénarii climatiques en modélisation hydrologique: utilisation des sorties GCM. In: *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts* (ed. by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena & E. Servat) (Proc. Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006). IAHS Publ. 308. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Déqué, M. & Piedelievre, J. P. (1995) High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dyn.* **11**, 321–339. doi:10.1007/BF00215735.
- Dieulin, C., Boyer, J. F., Ardoin-Bardin, S. & Dezetter, A. (2006) The contribution of GIS to hydrological modelling. In: *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts* (ed. by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena & E. Servat) (Proc. Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), 68–74. IAHS Publ. 308. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Driouech, F., Déqué, M. & Mokssit, A. (2008) Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. In: *Climate Dyn.* Springer. DOI 10.1007/s00382-008-0430-6.
- Driouech, F., Déqué, M. & Sánchez-Gómez, E. (2010) Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change*. DOI:10.1016/j.gloplacha.2010.03.004.
- Gibelin, A. L. & Déqué, M. (2003) Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dyn.* **20**, 327–339.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The physical Science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment (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.
- Knippertz, P., Christoph, M. & Speth, P. (2003) Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol Atmos Phys.* **83**, 67–88.
- Milano, M. (2009). Les Changements Climatiques en Méditerranée et les Impacts prévisibles sur les Ressources en Eau. Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement. Université de Montpellier 2, juin 2009.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I: A discussion of principle. *J. Hydrol.* **10**, 282–290.
- New, M., Hulme, M. & Jones, P. (1999) Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: development of 1901–1966 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate* **13**(13), 2217–2238.
- Paturol, J. E., Servat, E. & Vassiliadis, A. (1995) Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data. Case of the GR2M model. *J. Hydrol.* **168**, 111–125.
- Réménieras, G. (1986) L'Hydrologie de l'Ingénieur. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Ed. Eyrolles.
- Singla, S. (2009) Impact du changement climatique global sur les régimes hydroclimatiques au Maroc: tendances, ruptures et effets anthropiques sur les écoulements. Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement. Université de Montpellier 2, France.
- Snoussi, M., Haïda, S. & Imassi, S. (2002) Effects of the construction of dams on the water and sediment fluxes of the Moulouya and the Sebou Rivers, Morocco. *Reg Environ Change.* **3**, 5–12.

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](mailto:jilly@iahs.demon.co.uk)

Printed by Information Press

---

Cover picture: Southern Morocco by Eric Servat