

Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc

STEPHANIE SINGLA¹, GIL MAHÉ², CLAUDINE DIEULIN²,
FATIMA DRIOUECH³, MARIANNE MILANO^{2,4}, FATIMA ZOHRA EL GUELAI³
& SANDRA ARDOIN-BARDIN²

¹ Météo-France, 42 Avenue G. Coriolis 31057, Toulouse Cedex, France
stephanie.singla@meteo.fr

² Laboratoire HydroSciences Montpellier, 300 Avenue du Professeur Emile Jeanbrau 34000 Montpellier, France

³ Direction Nationale de la Météorologie Marocaine, BP 8106 Casablanca, Maroc

⁴ Plan Bleu, 15 rue Beethoven – Sophia Antipolis 06560 Valbonne, France

Résumé L'objectif de cette étude est l'analyse des régimes hydroclimatiques sur 27 bassins marocains pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau. Grâce à la méthode du vecteur régional, on constitue 23 unités climatiques homogènes, sur plusieurs échelles spatiales emboîtées (micro, méso et macro), afin d'évaluer la représentativité et la persistance régionale des signaux climatiques. Dans les régions à l'ouest de l'Atlas les pluies sont corrélées avec l'Oscillation Nord Atlantique, notamment pour le cœur de la saison pluvieuse. La baisse des pluies est généralisée et soulignée par une rupture dans les séries chronologiques entre 1976 et 1980, excepté dans la région entre Rif et Méditerranée, où les pluies montrent une tendance à une hausse relative depuis les minimums des années 1980. Mais aucune tendance n'est détectée dans une majorité d'unités sahariennes. Les débits de la majorité des fleuves marocains diminuent à partir du début des années 1980: les dates de rupture pour les débits et les coefficients d'écoulements mensuels sont homogènes à celles des pluies, sur la période allant jusqu'en 1990. Ces dates de rupture ont été comparées aux dates de construction de grands barrages sans qu'un lien puisse être établi. Les stations choisies sont situées en général dans la moitié amont des bassins, et peu influencées par la construction de barrages. Elles constituent un jeu de données intéressant pour tester l'impact du changement climatique sur des régimes hydrologiques et donc pour connaître la variabilité de la ressource en eau qui serait disponible pour les aménagements en aval de ces stations.

Mots clefs climat; hydrologie; vecteur régional; ruptures; pluies; débits; Maroc

Evolution of rainfall-runoff relationships in 27 watersheds in Morocco

Abstract The objective of this study is the analysis of the hydrological regimes of 27 river basins in Morocco in order to assess the impact of climate change on water resources. We outline 23 units of homogeneous rainfall variability with the method of the regional vector over several nested spatial scales (micro, meso and macro), to assess the representativeness and persistence of regional signals. We observe that precipitations are correlated with the North Atlantic Oscillation West of the Atlas, especially for the heart of the rainy season. We provide evidence of a generalized rainfall reduction by an abrupt change in the time series between 1976 and 1980, except in the region between the Rif and the Mediterranean Sea, where rainfall shows a trend towards a relative increase since 1980. No trend was detected in many of the Saharan units. The discharges of most of the Moroccan rivers decrease from the early 1980s: the rupture years for discharges and monthly runoff coefficients are consistent with those of rain up to 1990. We found no relation between the dates of the construction of large dams and the rupture dates in time series of river discharges on the basins concerned. The selected stations are usually located in the upstream parts of the basins, and are not much influenced by the construction of dams. These data sets are interesting to test the impact of climate change on hydrological regimes of basins not influenced by dams, allowing study of the variability of water resources that would be available for development downstream of these stations in a context of climate change.

Key words climate; hydrology; regional vector; ruptures; rainfall; discharges; Morocco

INTRODUCTION

Le Maroc possède un climat essentiellement semi-aride à forte influence méditerranéenne. Or, les régions semi-arides et méditerranéennes devraient être particulièrement vulnérables aux changements climatiques (Huebener & Kerschgens, 2007). Une modification des pluies devrait entraîner une modification de la disponibilité en eau. D'autre part, la population au Maroc est passée de 12 à 28 millions d'habitants entre 1960 et 1999 (Ministère de l'environnement du Maroc, 2001). Une telle croissance démographique augmente la pression sur les ressources en eau: changement d'occupation des sols, construction de barrages, prélèvements d'eau souterraine, etc.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'analyser les régimes hydroclimatiques d'un grand nombre de bassins versants marocains et la description des effets du changement climatique sur les régimes hydrologiques de surface. Tout d'abord, on applique la méthode du vecteur régional à plusieurs échelles spatiales emboîtées puis on analyse les débits de 27 bassins marocains à l'aide de tests statistiques de détection de ruptures dans les séries chronologiques. Les résultats sont enfin comparés à ceux des précipitations mais aussi aux dates de construction de grands barrages.

DONNEES ET METHODE

Origine des données

La banque de données pluviométriques provient en grande partie du Système d'Information Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM, 2005; Dieulin *et al*, 2006) de l'UMR HydroSciences Montpellier. Cette banque est composée de stations pluviométriques du GHCN (Global Historical Climate Network) et du CRU (Climatic Research Unit). Quelques stations du GHCN possèdent des séries de données s'arrêtant dans les années 1980 et ont été complétées par des données de la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc, sur la période 1970–2008. La répartition des postes pluviométriques est hétérogène: le nombre de stations est très réduit dans la partie sud de l'Atlas mais aussi dans le Sahara Occidental et dans le Maroc oriental. Cependant le jeu de données utilisé est assez dense dans une grande partie du pays (Fig. 1(a),(b)).

La banque de données concernant les débits mensuels provient en majorité du GRDC (Global Runoff Data Center). Les séries chronologiques concernent généralement la période 1960 à 1990, mais sont de durées variables. D'autres données provenant de l'agence hydraulique du Souss-Massa ont été utilisées. Nous disposons d'un total de 26 séries hydrologiques sur le Maroc, possédant peu ou aucune lacune et concernant 8 des 9 grands bassins hydrologiques du Maroc: Loukkos, Sebou, Moulouya, Oum Er Rbiâ, Bouregreg, Tensift, Souss-Massa, Ziz-Guir-Rhériss-Draa. Cependant, les bassins versants sont répartis de façon hétérogène dans l'espace, le plus grand nombre de bassins se trouve dans la partie Nord, sur les reliefs de l'Atlas et du Rif (Fig. 2). De plus, en vue d'une éventuelle spatialisation des données, nous avons travaillé sur les bassins d'une superficie minimum de 1500 km² et dont la série durait plus de 10 ans (Tableau 1).

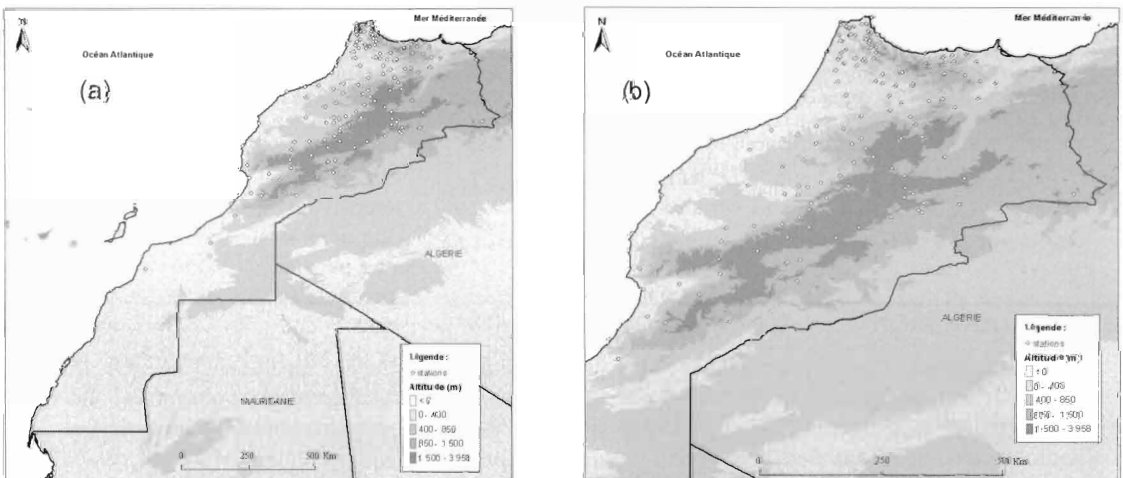


Fig. 1 (a) Relief et répartition géographique des stations pluviométriques utilisées, (b) relief et stations pluviométriques sur le nord du Maroc.

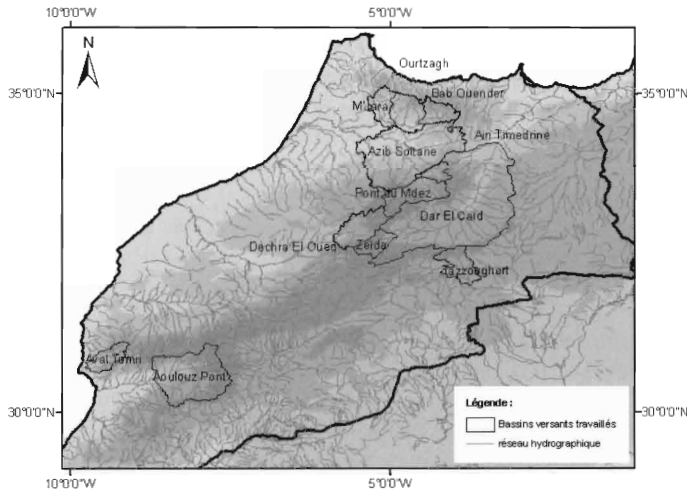


Fig. 2 Carte des bassins versants étudiés.

Tableau 1 Inventaire des bassins versants étudiés.

Bassin	Station hydrol.	Rivière	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Date de début	Date de fin	Superficie (km ²)	Altitude (m)	Lacunes (mois)
Moulouya	Dar El Caïd	Moulouya	34.24	-3.32	01/02/1957	01/12/1988	24422	325	5
	Zeïda	Moulouya	32.97	-4.9	01/09/1976	01/04/1988	1673	1450	aucune
Oum Er Rbiâ	Dechra El Oued	Oum Er Rbiâ	32.68	-5.9	01/09/1953	01/02/1989	3330	591	4
Sebou	Ain Tamedrine	Sebou	33.75	-4.53	01/01/1965	01/07/1984	4392	645	aucune
	Azib Soltane	Sebou	34.28	-5.43	01/09/1959	01/01/1989	17250	70	aucune
	Bab Ouender	Ouergha	34.6	-4.55	01/01/1952	01/01/1990	1758	540	4
	M'Jara	Ouergha	34.59	-5.25	01/09/1951	01/01/1990	6190	85	5
	Ourtzagh	Ouergha	34.62	-5.01	01/09/1951	01/01/1989	4404	140	1
	Pont du Mdez	Mdez	33.67	-4.5	01/09/1956	01/02/1990	3435	725	2
Souss–Massa	Aoulouz pont	Souss	30.53	-8.7	01/01/1955	01/08/1991	4450	706	aucune
Sud Atlas	Aval Tamri	Ait Amer	30.72	-9.76	01/03/1980	01/08/1995	1741	93	aucune
	Tazzoughert	Guir	32	-3.75	01/09/1976	01/08/1989	2370	1052	2

Vecteur régional

Une unité climatique ou région climatique est définie comme une zone à pluviométrie homogène contenant des stations dont les variations interannuelles sont cohérentes les unes par rapport aux autres (Wotling *et al.*, 1995). Le vecteur régional est une méthode automatique de critique des pluies, élaborée à l'ORSTOM-IRD par Hiez (1977). Il est constitué par une suite chronologique d'indices annuels ou mensuels, représentative de l'évolution des précipitations à l'intérieur d'une région climatiquement homogène et dont les stations présentent une variabilité pseudo-proportionnelle entre elles. Il faut au préalable effectuer un premier découpage en régions *a priori* homogènes, puis modifier la répartition des stations entre régions pour réduire au minimum leur écart par rapport à l'indice moyen appelé vecteur.

A partir des données pluviométriques mensuelles nous définissons des régions climatiques du Maroc plus précises que celles proposées par Ward *et al.* (1999). El Guelai (com. pers.) a déjà défini pour la Direction Nationale de la Météorologie du Maroc 19 unités climatiques homogènes, par la méthode des nuées dynamiques.

A partir de cette répartition, la méthode du vecteur régional a été appliquée au pas de temps annuel, puis mensuel, grâce au logiciel Hydraccess de l'IRD (Vauchel, 2005). Ainsi nous avons pu élargir le nombre de régions climatiques à 23 grâce aux nombreuses stations disponibles dans certaines unités climatiques. Or, nous avons constaté que: (a) la taille des séries chronologiques est différente selon les régions; (b) certaines régions connaissent des périodes de lacunes très importantes sur certaines stations, ce qui implique alors une perte de données considérable. Nous avons donc reconstitué certaines données pluviométriques.

En effet, une reconstitution permet d'obtenir des séries plus longues et les plus homogènes possibles. Il est alors possible d'effectuer des tests statistiques de détection des ruptures sur les indices pluviométriques annuels, puis de comparer les séries de données reconstituées et observées.

Cette reconstitution a été effectuée à plusieurs échelles. Un premier essai a été réalisé à l'échelle des 23 unités climatiques, que nous appellerons par la suite "micros" régions (Fig. 3(a)). Ensuite, une reconstitution d'ordre "mésos" et "macro" régionale ont été effectuées pour pouvoir analyser les fluctuations climatiques à plus grande échelle (Fig. 3(b) et (c)). Les "macros" régions peuvent être assimilées aux unités climatiques constituées par Ward *et al.* (1999).

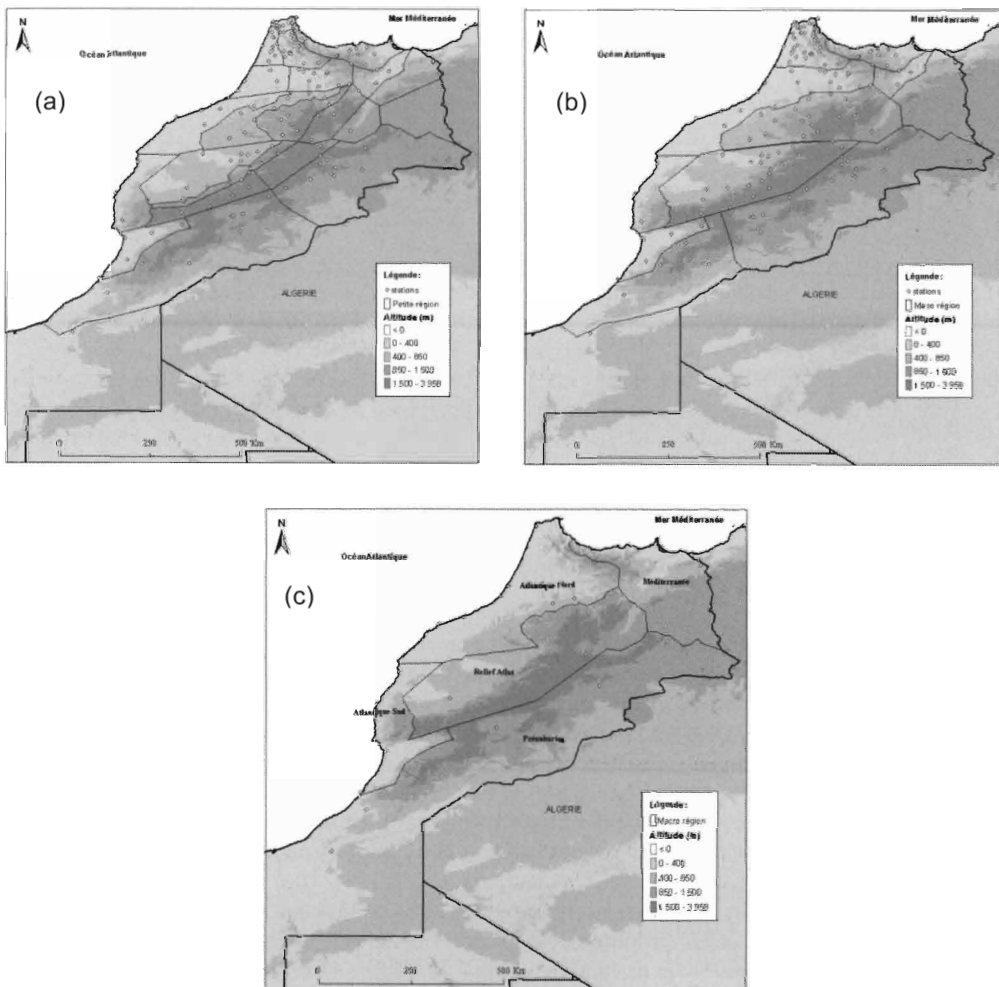


Fig. 3 (a) "Micros" régions (b) "Mésos" régions (c) "Macros" régions.

Tests statistiques de détection de ruptures sur les séries chronologiques

L'approche statistique par l'application de tests de détection de rupture a été utilisée pour analyser les séries chronologiques des précipitations et écoulements. Une rupture dans une série chronologique peut être assimilée à un changement dans la loi de probabilité de la série à un instant donné, le plus souvent inconnu. Khronostat (1998) est un logiciel d'analyses statistiques de séries chronologiques développé par l'IRD (Lubes-Niel *et al.*, 1998) disponible gratuitement. Il propose plusieurs tests statistiques de détection de ruptures. Nous avons choisi ceux nous permettant de déterminer des dates de ruptures: méthode non paramétrique de Pettit, méthode Bayésienne de Lee et Heghinian, et la segmentation de Hubert (Lubès *et al.*, 1994). Ces tests ont été appliqués sur les séries observées et reconstituées des précipitations et écoulements.

Pour la suite de l'étude, nous qualifions une rupture de faible lorsque la date de rupture est indiquée au moins une fois par deux tests statistiques différents sur trois. Une rupture dite probable est définie par une date de rupture signalée au moins deux fois par deux tests statistiques sur trois.

RESULTATS

Analyse de précipitations

Les indices annuels pluviométriques tracés nous ont permis de constater que les régions atlantiques et de l'Atlas montrent un pic important en 1996 à toutes les échelles spatiales. Ce pic peut être mis en relation avec un très fort indice de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) négatif en hiver 1995/1996 (Ward *et al.*, 1999). L'ONA était alors dans une phase positive depuis 1980. De plus, ce pic n'est pas observé dans les "macros" région "Méditerranée" et "Présaharien". Cela met en évidence, encore une fois, l'importance de l'influence de l'ONA sur les précipitations des régions atlantiques qui reçoivent le maximum de leur pluviométrie en saison d'hiver mais aussi sur la chaîne de l'Atlas. Cette même hypothèse est aussi émise dans Ward *et al.* (1999).

Ensuite, nous avons pu distinguer une faible tendance à l'augmentation des indices annuels du début des années 1980 à la fin des années 1990 de 2.4% sur les régions dans la "macro" "Méditerranée" au nord du Rif. Ces résultats obtenus sont différents de ceux des travaux précédents (Born *et al.*, 2008) qui montraient plutôt une diminution des indices standardisés de précipitations saisonnières (SPI). En effet, nous ne disposons pas des mêmes stations d'observations pluviométriques: dans notre étude, une seule station est située en Algérie; tandis que dans les travaux précédents trois stations sont marocaines et trois autres algériennes. Nous pouvons donc nous questionner sur la représentativité des résultats obtenus par Born *et al.* (2008), où le poids des stations algériennes semble être suffisant pour masquer la variabilité des stations marocaines. De plus, des tests de significativité auraient probablement montré la confiance à attribuer à ces tendances.

Par ailleurs, les tests statistiques de rupture dans les indices des régions climatiques ont permis de mettre en évidence plusieurs résultats (Tableau 2). Tout d'abord, la constitution des régions est limitée par le nombre de stations utilisées, mais aussi par leur répartition spatiale et la durée des séries. La reconstitution de données a donc un impact sur les valeurs des indices des séries chronologiques moyennes. En effet, les dates de rupture des données reconstituées sont différentes de celles des données observées (Tableau 2). De nombreuses ruptures correspondant à des diminutions de précipitations ont lieu à la fin des années 1970/début des années 1980 au Maroc (Tableau 2). Même s'il s'agit le plus souvent de ruptures que nous qualifions de faibles, elles concernent un grand nombre de séries, et signalent un changement climatique important spatialement au Maroc à cette période: relief de l'Atlas, sud du Rif et le nord est du bassin de la Moulouya. Ce signal est visible depuis des séries stationnelles jusqu'à des séries de "macros" régions, ce qui confirme les études démontrant une diminution des précipitations au Maroc, depuis les années 1960 (Driouech, 2006; DMN, 2007) et plus significativement depuis la fin des années 1970/début des années 1980 (Agoumi & Debarh, 2006; Knippertz *et al.*, 2003).

Tableau 2 Dates de ruptures des indices pluviométriques annuels pour les régions “macro”, “més”, “micro” et stations de références. (Ref.) pour les données observées (gauche) et reconstituées (droite) (blanc: aucune rupture; gris clair: une rupture faible pour au moins deux régions ou stations; gris foncé: deux ruptures pour au moins deux régions ou stations; noir: trois ruptures pour au moins deux régions ou stations).

Année	Macro	Més	Micro	Stat.	Année	Macro	Més	Micro	Ref.	Stat.
25				14	25					14
26				15	26					15
...
47				25	47					28
48				28	48					28
49				28	49					25
50				23	50					30
51				28	51					35
52				35	52					35
53				35	53					35
54				38	54					38
55				36	55					36
56				35	56					35
57				34	57					34
58				34	58					33
59				40	59					39
60				39	60					39
61				36	61					36
62				38	62					38
63				43	63					43
64				50	64					51
65				50	65					50
66				48	66					48
67				53	67					53
68				54	68					54
69				61	69					61
70				58	70					62
71				71	71					75
72				79	72					83
73				88	73					92
74				86	74					90
75				92	75					96
76				100	76					104
77				105	77					109
78				111	78					115
79				108	79					112
80				117	80					121
81				121	81					125
82				118	82					123
83				110	83					114
84				113	84					117
85				119	85					123
86				120	86					125
87				118	87					122
88				120	88					124
89				120	89					124
90				120	90					125
91				118	91					122
92				118	92					123
93				120	93					126

Tableau 2 (cont.)

Année	Macro	Méso	Micro	Stat.	Année	Macro	Méso	Micro	Ref.	Stat.
94				122	94					128
95				122	95					128
96				121	96					126
97				121	97					126
98				112	98					116
99				116	99					120
00				105	00					109
01				56	01					59
02				56	02					58
03				53	03					55
04				52	04					55
05				22	05					24
06				22	06					24

Tableau 3 Dates de ruptures détectées par au moins deux tests statistiques (ruptures probables) sur les bassins versants (en gras; les dates de ruptures détectées par plus d'un bassin versant la même année ou le même mois) (case vide = aucune rupture probable détectée).

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Débit annuel	Coeff. écoulement annuel
Aoulouz pont	79		74		56							73	72	80
Amsoul		79												
Ourtzagh								80				79		65
Azib Soltane	73				78	78		78	68		79			80
Bab Ouender			79										79	
M'Jara										69				
Foum Tillich				76	76	76							76	
Aït Moutade				80	76	82							80	
Dar El Caïd							77	80		69	77	79		
N'Kouris	79													
Ain Timedrine						76	79							
Pont du Mdez	73			77		76							79	
Tarhat				82	80	80	80	81	81	81	80	79	80	
Dechra El Oued				79	80	79	79	80	80	79				81
Zeïda		79											79	80
Ansegmir	73		86	76	76	76							76	

Analyse des données hydrologiques

Les débits et les coefficients d'écoulements annuels connaissent une diminution globale depuis les années 1970 (Tableau 3). Pour les débits, des ruptures probables sont observées aussi bien en saison de pluie qu'en saison sèche (Tableau 3). Au pas de temps annuel, les dates de ruptures probables sont 1976, 1979 et 1980 et correspondent généralement aux ruptures détectées au pas de temps mensuel.

D'après ces résultats obtenus, nous constatons donc une concordance satisfaisante avec les dates détectées sur les indices annuels pluviométriques de la fin des années 1970 / début des années 1980. Nous supposons donc que la diminution des écoulements serait due à une diminution globale des précipitations sur les bassins versants étudiés au Maroc.

Or, en ce qui concerne les coefficients d'écoulement, l'année de rupture probable est 1980 (Tableau 3). Beaucoup de ruptures faibles sont détectées et indiquent une tendance à une diminution depuis la fin des années 1970 au milieu des années 1980 (non montré) et sont donc plus tardives par rapports à celles détectées sur les débits et précipitations. De plus, nous rappelons que depuis 1967, de nombreux barrages ont été construits au Maroc. En effet, leur nombre croît de 1929 à 1985, puis plus rapidement jusqu'en 2000 (Singla, 2009). En 1953, 1973,

1979 et 1997, de grands barrages ont été construits dans les bassins de l'Oum Er Rbiâ et du Sebou. Mais il n'y a aucune concordance entre les dates de ruptures identifiées dans les séries d'écoulement avec les dates de construction de barrages. Les barrages construits sont soit trop récents, soit situés trop en aval des bassins versants étudiés sur la période donnée.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'analyser les régimes hydroclimatiques sur 27 bassins marocains pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau. Tout d'abord, l'étude des indices pluviométriques annuels, couvrant plusieurs échelles spatiales emboîtées (station, micro, méso et macro-région) et plusieurs profondeurs temporelles, nous a permis de mieux prendre en compte la persistance spatio-temporelle des signaux climatiques mis en évidence: (a) relations de certaines régions avec l'Oscillation Nord Atlantique en 1996; (b) légère augmentation des pluies en région méditerranéenne au Nord du Rif; et (c) une diminution significative et globale des pluies sur les autres régions depuis la fin des années 70. Cependant, il reste difficile de répondre à la question de savoir quel type de données représente le mieux la variabilité climatique des régions: observées ou reconstituées, micro, méso ou macro.

L'analyse des écoulements (débits mensuels et annuels) montrent aussi une diminution depuis fin des années 1970/début des années 1980. Nous avons donc supposé que la diminution des débits est due à la diminution des précipitations sur les bassins versants étudiés. Seules les ruptures détectées sur les coefficients d'écoulements s'étendent jusqu'au milieu des années 80, marquant alors une période de sécheresse généralisée au Maroc. Une comparaison des dates de ruptures détectées sur les séries hydrologiques à celles de construction des grands barrages nous a permis de constater aucune correspondance. L'origine de la diminution des écoulements (débits et coefficients d'écoulement) jusqu'en 1990 est donc très certainement reliée à une diminution des précipitations.

Pour poursuivre ces travaux, une base de données plus complète sur tout le Maroc serait nécessaire. La plupart des bassins étudiés ne comportait pas d'aménagements hydrauliques importants, nous permettant d'observer surtout l'influence climatique. Cependant, pour mener une étude globale sur les écoulements d'autres bassins versants seraient nécessaires. Enfin, lors de la recherche de correspondance entre dates de ruptures des écoulements et date de création d'aménagements hydrauliques, seuls les barrages ont été pris en compte. Une étude plus approfondie devrait aussi tenir compte les prélèvements diffus pour l'irrigation, les transferts d'eau inter-bassins, etc.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement la Direction Nationale de la Météorologie et la Direction Générale de l'Hydraulique du Maroc (Secrétariat d'Etat à l'Eau et l'Environnement), pour la mise à disposition des données pour cette étude, inscrite dans le cadre du Programme MED FRIEND de l'UNESCO (PHI).

REFERENCES

- Agoumi, A. & Debarbar, A. (2006) Ressource en eau et bassins versants du Maroc: 50 ans de développement (1955-2000). 62 pp. <http://www.rdh50.ma/fr/pdf/contributions/GT8-1.pdf>.
- Born, K., Fink, A. H. & Paeth, H. (2008) Dry and wet periods in the northwestern Maghreb for present and futures climate conditions. *Meteorologische Zeitschrift* 17(5), 533–551.
- 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. FRIEND 2006* (ed. by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena & E. Servat), 68–74 (Vth Int. Conf., La Havane (CUB)). IAHS Publ. 308. IAHS Press, Wallingford, UK.
- DMN (Direction de la Météorologie Nationale) (2007) Les changements climatiques au Maroc: Observations et projections. DMN, Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Royaume du Maroc, Casablanca.

- Driouech, F. (2006) Etude des indices de changements climatiques sur le Maroc: températures et précipitations. DMN "INFOMET", Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Royaume du Maroc, Casablanca, Novembre 2006.
- El Guelai (com. pers.) Carte des régions climatiques au Maroc. Direction Nationale de la Météorologie du Maroc. Casablanca.
- Hiez, G. (1977) L'homogénéité des données pluviométriques. Cahiers ORSTOM. *Série Hydrologie* **14**(2), 129–172.
- Huebener, H. & Kerschgens, M. (2007) Downscaling of current and future rainfall climatologies for southern Morocco. Part I: Downscaling method and current climatology. *Int. J. Climatol.* **27**, 1763–1774.
- Khronostat (1998) Logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques. ORSTOM Ed. Paris. <http://www.hydrosociences.org/spip.php?article239>.
- 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. *Met. Atmos. Phys.* **83**, 67–88.
- Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturol, J.-E., Kouamé, B. & Boyer, J.-F. (1994). ICCARE: rapport no. 3: caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques: étude bibliographique. Montpellier: ORSTOM.
- Lubès-Niel, H., Masson, J. M., Paturol, J. E. & Servat, E. (1998) Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau* **11**(3), 383–408.
- Ministère de l'environnement du Maroc (2001) Rapport de l'Etat de l'environnement du Maroc.
- SIEREM (2005) Système d'Information Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation <http://www.hydrosociences.fr/sierem>
- 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.
- Vauchel, P. (2005) HYDRACCESS, Logiciel de gestion et de traitement de données hydrométéorologiques, version 2.1.4. Téléchargeable sur <http://www.mpl.ird.fr/hybam/>.
- Ward, M. N., Lamb, P. J., Portis, D. H., El Hamly, M. & Sebbari, R. (1999) Climate variability in northern Africa: understanding droughts in the Sahel and the Maghreb – Chapter 6. In: *Beyond el Niño – Decadal and Interdecadal Climate Variability* (ed. by A. Navarra), 119–140. Springer Verlag.
- Wotling, G., Mahé, G., L'Hôte, Y. & Lebarbe, L. (1995) Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la Mousson africaine. *Veille climatique satellitaire, ORSTOM/Météo-France* **52**, 58–73.

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