

Etude des pluies et des débits sur le bassin versant de la Medjerda, Tunisie

Study of rainfall and discharges in the Medjerda watershed, Tunisia

Fatma Chahnez KOTTI^{1*}, Gil MAHE², Hamadi HABAIEB³, Claudine DIEULIN⁴, Roger CALVEZ⁵
& Hassan BEN ALI⁶

1. Institut National Agronomique de Tunis, 43, Avenue Charles Nicolle 1082 -Tunis-Mahrajène, Tunisie. *(f.kotti@yahoo.fr).

2. UMR HydroSciences Montpellier / IRD, France.

3. Directeur Général de l'Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts. BP N°10, 2080 Ariana, Tunisie.

4. UMR HydroSciences Montpellier / IRD, France.

5. UMR G-Eau / IRD, INAT, Tunis, Tunisie.

6. DBGTH, Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques, Tunis, Tunisie.

Résumé. En Tunisie, les pluies présentent une grande variabilité spatiale et temporelle, caractéristique du domaine semi aride et méditerranéen, qui entraîne une forte variabilité des écoulements. Cette étude s'intéresse au bassin versant de la Medjerda, le plus grand de la Tunisie (23600 km²). Pour décrire les séries pluviométriques annuelles, nous avons utilisé la méthode du vecteur régional, développée par l'ORSTOM/IRD, dans le but de critiquer et d'homogénéiser des séries de données pluviométriques. Cette méthode permet également de subdiviser la zone d'étude en sous-régions climatiquement homogènes, qui aident à identifier des composantes régionales de la variabilité des écoulements. Les résultats permettent d'identifier six régions à différentes échelles spatiales sur le bassin versant à la station de Jdaïda : Mellegue aval, Mellegue amont, Ghardimaou, Bousalem, Bouhertma et Siliana. On expose ensuite le développement de formules régionalisées pour la détermination du coefficient de ruissellement en fonction de la pluie et du débit maximum enregistrés au niveau des stations de mesure de Jendouba et Bousalem, et des corrélations inter-stations, pour combler des séries de données de débits lacunaires. L'étude a montré qu'il est possible d'estimer la lame ruisselée en fonction du débit maximum. Pour les deux stations étudiées, Jendouba et Bousalem, la meilleure reconstitution est obtenue par le modèle utilisant la pluie et le débit maximum. Cette étude a montré aussi la possibilité d'évaluer le ruissellement d'une station à partir des données hydrologiques d'une autre station. La confrontation des modèles de régression appliqués avec les formulations utilisées dans la littérature a révélé une nette amélioration des valeurs des lames ruisselées en utilisant d'une part le débit maximum et la pluie de la même station, et d'autre part les paramètres hydrologiques d'une station hydrométrique voisine. L'étude de l'évolution des coefficients d'écoulement aux stations hydrologiques majeures permet de constater l'impact de la construction des grands aménagements sur les régimes hydrologiques et une diminution globale des modules à la station de Jdaïda avant l'estuaire.

Mots clés : Changement climatique, pluies, vecteur régional, débit maximum, bassin versant de Medjerda, Tunisie.

Abstract. In Tunisia, the rains exhibit high spatial and temporal variability, characteristic of semi-arid and Mediterranean area, which lead to a high variability of the river flows. This study is focused on the Medjerda watershed, the largest river basin of Tunisia, considered at the Jdaïda gauging station. In order to describe the annual rainfall series, we used the regional vector method, developed by ORSTOM/IRD, in order to criticize and homogenize rainfall data series. This method also allows dividing the study area into climatically homogeneous sub-regions that help to identify the regional components of the variability of the river flows. The results of this study section allow identifying 6 regions in the Jdaïda watershed: downstream Mellegue, upstream Mellegue, Ghardimaou, Bousalem, Bouhertma and Siliana. Then we explain the development of regionalized formulas to determine the runoff coefficient depending on the rain and the maximum flow rate registered at two gauging station: Jendouba and Bousalem, and we also present the inter-correlations between stations to fill in a series of flow data. The study showed that it is possible to estimate the depth of runoff based on the maximum flow. For both stations studied, Jendouba and Bousalem, the best reconstruction is obtained by the model using rain and maximum flow. This study also demonstrated the possibility of evaluating runoff from a station on the basis of hydrological data of another station. The confrontation of applied regression models with the formulations in the literature revealed a marked improvement in values of the depth of runoff using on the one hand, the maximum rate and the rain from the same station, and on the other hand hydrologic parameters from a neighboring gauging station. This study of the evolution of flow coefficients at the major hydrological stations allows to observe the impact of the construction of large dams on hydrological regimes and an overall decrease in modules.

Keywords: Climate change, rainfall, regional vector, maximum flow, watershed Medjerda, Tunisia.

Abridged English Version

In Tunisia, rainfall exhibit high spatial and temporal variability, characteristic of the semi-arid and Mediterranean areas, which lead to a high variability of the river discharges. This study is focused on the Medjerda watershed, the largest river basin of Tunisia (23 600 km²), considered at Jdaïda bridge, the last gauging station before the sea. The Jdaïda station is located in the middle of the coastal flood plain, sufficiently far from the estuary and the sea not to be influenced by tidal effect nor submersion during seasonal

storms. The Medjerda basin is a very fragile environment. Due to its location in the humid part of the country the basin is occupied by an intense agricultural activity, and its water resources are highly exploited. There are thus many dams that modify the natural hydrological regime of the river. The study of the rainfall variability over the basin thus allow to describe the natural variability of the water inputs, before this variability to be modified during the transfer processes along the river stream. In order to describe the annual rainfall series, we used the regional vector method (MVR), developed by ORSTOM/IRD, to criticize and homogenize

rainfall data series. MVR is used to optimize the annual rainfall data of the 40 observed stations within or near the Jdaïda watershed. These stations are an interesting data set to test the impact of climate change on hydrological regimes. This method allows dividing the study area into climatically homogeneous sub-regions that help identify the regional components of the variability of the river flows. The results of this study section allow identifying 6 regions on the Jdaïda watershed: downstream Mellegue, upstream Mellegue, Ghardimaou, Bousalem, Bouhertma and Siliana. These regions can be grouped into two large areas North (more humid) and South (more arid) of the basin. In the South it is also possible to identify a region of substantially different rainfall variability (upstream Mellegue) compared to the Mellegue downstream and Siliana areas. Then we explain the development of regionalized formulas to determine the runoff coefficient depending on the rainfall and the maximum flow rate registered at two gauging stations on the main stream of the Medjerda river: Jendouba (2414 km²) and Bousalem (16483 km²), and we also present the inter-correlations between stations to fill in a time series of runoff data. The study showed that it is possible to estimate the depth of runoff of the Medjerda river based on the maximum flow. For both stations studied, Jendouba and Bousalem, the best reconstruction is obtained by the model using rainfall and maximum discharge. This study also demonstrated the possibility of evaluating runoff from a gauging station on the basis of the hydrological data of another gauging station. The confrontation of applied regression models with the formulations in the literature revealed a marked improvement in estimating the values of the depth of runoff using on the one hand, the maximum discharge and the rainfall from the same station, and on the other hand hydrologic parameters from a neighboring gauging station. This study of the evolution of runoff coefficients at the major hydrological stations allows assessing the impact of the construction of large dams on the modification of the hydrological regime of the Medjerda river, a decrease of the maximum discharges and an overall decrease in modules.

The water managements experienced a major development in the late 1980 in Tunisia. Now, it is possible to assess their actual performances and their socio-environmental impacts. The very developed human activities on the basin probably induce significant impacts in the hydrological cycle. The standardized index of the annual runoff coefficient for Medjerda sub-catchments reflects the

variation of flows in these basins. There is a change in the hydrological regime due to the construction of dams. The first built dam is on the Mellegue river in 1954, which controls more than 40% of the whole Medjerda watershed, it induces a decrease in the flow coefficient (Ben Mammou 1992). The sections of the river have also changed since the construction of the dam. Indeed, the water reservoir of the Mellegue dam traps sediments at a rate of 61% between 1954 and 1991 (Ben Mammou 1998). Faced with this problem and in order to bring security to the dam during floods, water volumes released are becoming increasingly important. This explains the annual variation of the flow, the erosive effect of flows and thus the morphological changes of the bed of the river and meanders downstream the dams. A similar analysis was conducted to assess human impacts on several catchments. The decrease in the flow coefficient on the sub-catchments of Bousalem and Jdaïda is explained by the construction of dams: Beni Mtir in 1954, Bouhertma in 1976, Kassab in 1968, Sidi Salem in 1982, and Siliana in 1987. However, there is an increase in the index of annual runoff on two sub-catchments: Ghardimaou and Jendouba, witnessing a lower impact of the hydraulic structures on these rivers, most likely because there is only one large dam, Ain Dalia in Algeria (1988), upstream, and a few smaller dams (with unknown volume), which total storage is only 76 millions m³.

These large watersheds integrate the hydrological response to climate and environmental change over large spatial and temporal scales, but also changes in the physical environment due to anthropogenic causes, making it very difficult to identify the source of the impact of these changes on the variability of the hydrological regime. It is important to assess the actual socio-environmental impacts of many dams which were built in the Medjerda basin decades ago, in regard of the actual environmental situation upstream and downstream, including potential negative effects of the change of the flow regime that previous managers were not aware of.

These results are part of a larger study of the impact of the reduction of high flows and sediment transports of the Medjerda basin to the gulf of Tunis, as dams trap much of the sediment transport, which now do not reach the sea. These results will help assess how the hydrological changes have impacted the coastal vulnerability, and risk for coastal infrastructures. This will be much developed in an upcoming program funded by the PHC-CMCU/UTIQUE 2016-2018 RYSCMED program.

INTRODUCTION

La Tunisie possède un climat essentiellement semi-aride à forte influence méditerranéenne. Or, les régions semi-arides et méditerranéennes sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques (Huebener & Kerschgens 2007).

Le bassin versant de la Medjerda a fait l'objet d'une étude monographique par l'ORSTOM (Claude *et al.* 1976), qui est maintenant très ancienne. Plusieurs ouvrages de mobilisation des eaux de surface (grands barrages, barrages collinaires et lacs collinaires) ont été construits depuis sur

les cours d'eau des bassins situés au nord du pays. Du fait des nombreux aménagements qui ont été construits sur le bassin et du changement climatique bien visible et déjà décrit en Tunisie (Ben Mamou & Louati 2007), il apparaît important de caractériser la variabilité climatique à différentes échelles de temps, afin de pouvoir comparer sa structuration et son évolution.

Un premier objectif de ce travail est de subdiviser la zone d'étude en sous-régions climatiquement homogènes afin d'identifier des éléments de compréhension de l'évolution climatique dans la zone d'étude et de considérer la contribution de la région au changement climatique (Mahé

& L'Hôte 1992), à l'aide de la méthode du vecteur régional à différentes échelles

spatiales. Les résultats peuvent servir d'éléments explicatifs dans la recherche de l'origine de certains aspects de la variabilité des écoulements. La variabilité des écoulements sera ensuite étudiée à travers les séries de débits annuels, comparées aux pluies sur les bassins considérés, ce qui permettra de suivre l'évolution des coefficients d'écoulement, qui témoignent bien des changements de relations pluies/débits, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. D'autre part, cette étude propose également le développement de formules régionalisées pour la détermination du ruissellement en fonction des données hydrologiques facilement mesurables.

MATERIEL ET METHODE

Origine des données

Les données pluviométriques proviennent de la base SIEREM (Rouché *et al.* 2010) et des données récentes issues

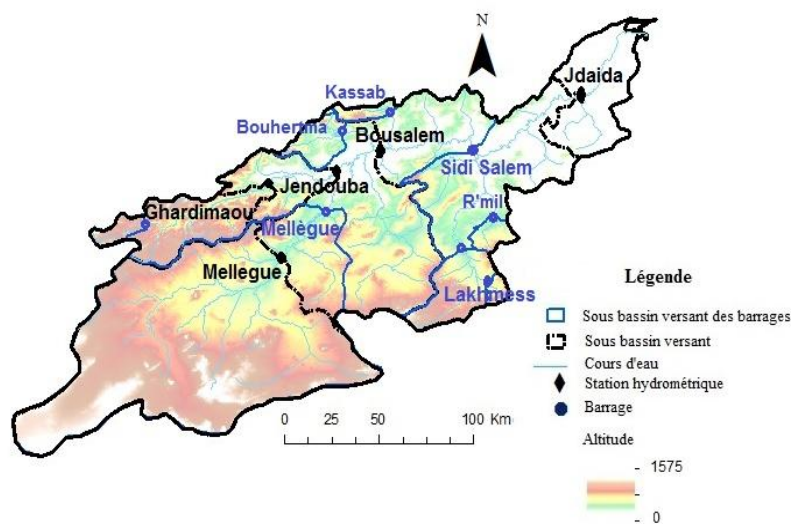


Figure 1. Localisation du Bassin versant de la Medjerda (Google Earth) (Jaune : frontière Algérie-Tunisie).

Figure 1. Watershed of the Medjerda (Google Earth) (Yellow: Algeria-Tunisia border).

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). Ce vecteur 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.

de la météorologie nationale. La base de données hydrométriques provient de la Direction Générale des Ressources en Eau aux 3 stations principales : Ghardimaou, Jendouba, Bousalem et couvre une période allant de 1966 à 1999.

Zone d'étude

La Medjerda est l'un des principaux oueds du Maghreb, tant par la longueur de son cours, la superficie de son bassin versant, que par le volume d'eau qu'elle draine. Elle prend sa source près de Souk-Ahras, dans le Constantinois algérien, puis coule vers l'est avant de se jeter dans la mer Méditerranée (golfe de Tunis). La Medjerda s'étend sur 23 600 km² dont 7500 km² en Algérie et s'écoule sur 482 kilomètres dont 350 en Tunisie (Rodier *et al.* 1981). Le bassin versant à Jdaïda s'étend sur une superficie de 22 100 km² (Fig. 1). En allant vers la mer les reliefs s'adoucissent, les plaines deviennent de plus en plus fréquentes et avec elles les zones favorables pour le débordement des eaux et leur stagnation.

RESULTATS

Utilisation de la méthode du vecteur régional pour la description des variations pluviométriques dans le bassin versant de la Medjerda

Relations entre pluie et altitude

L'altitude est considérée comme le facteur prépondérant des variations climatiques (Le Goulven *et al.* 1987). Lorsque la densité des stations n'est pas suffisante ou que leur répartition spatiale est inadéquate, nous tenons compte des caractéristiques géographiques et de la répartition de la végétation naturelle. Nous avons identifié six régions à différentes échelles spatiales sur le bassin versant à la station de Jdaïda : Mellegue aval, Mellegue amont, Ghardimaou, Bousalem, Bouhertma et Siliana (Fig. 2). Cette analyse s'accompagne d'une bonne connaissance du climat local.

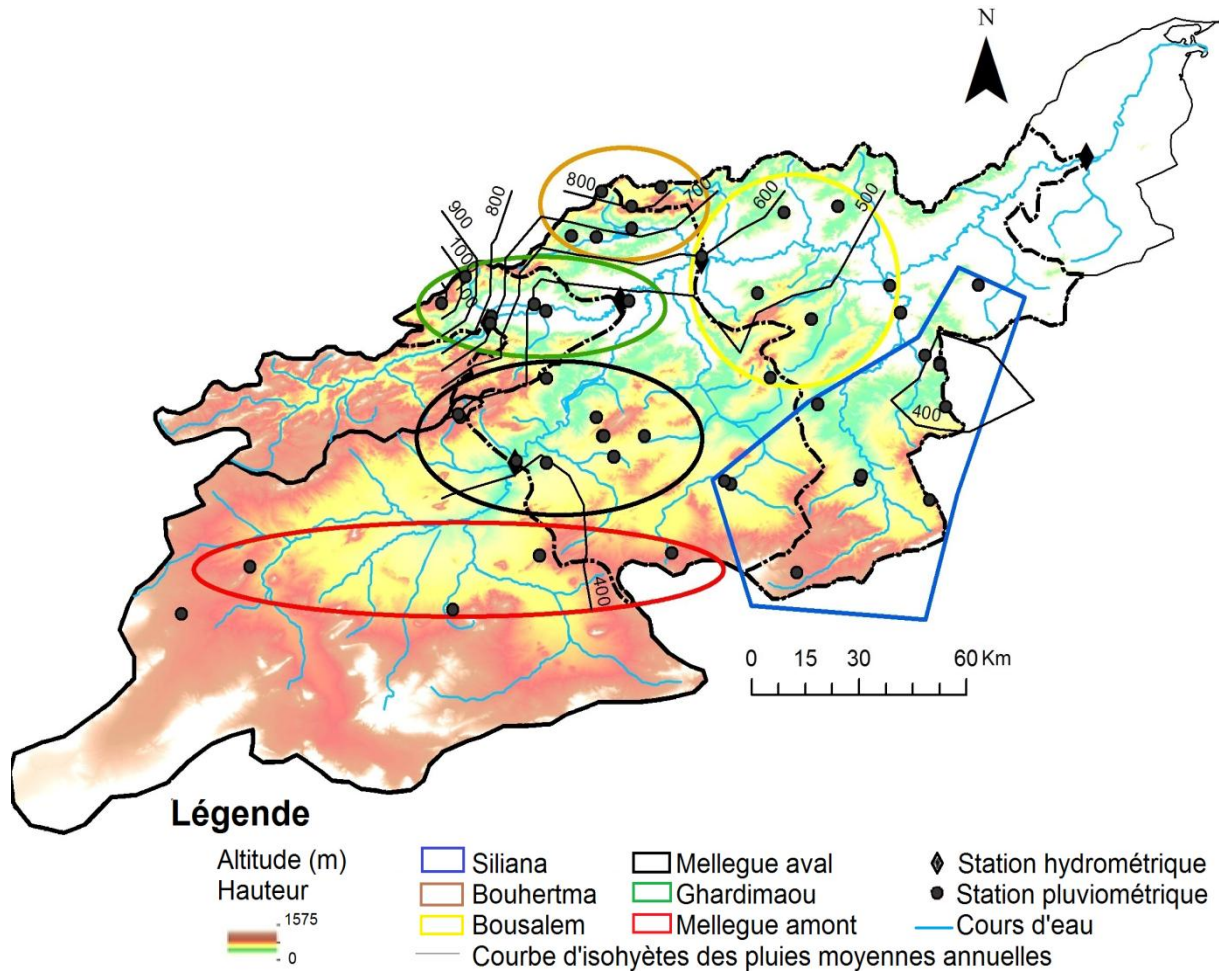


Figure 2. Les régions homogènes du bassin versant de la Medjerda à la station de Jdaïda (cercles), sous-bassins versants principaux, reliefs et isohyètes (1900/2008).

Figure 2. The homogeneous regions of the Watershed of the Medjerda to Jdaïda station (circles), major sub-basins, reliefs and isohyets (1900/2008).

La pluviométrie moyenne annuelle dépasse 1000 mm au nord du bassin versant de la Medjerda et diminue progressivement vers le sud, d'après la carte des isohyètes des pluies moyennes annuelles de 1900 à 2008 dans le bassin versant de la Medjerda (Fig. 2). Les isohyètes s'arrêtent à la frontière algérienne, car il n'y a pas assez de données algériennes pour les poursuivre sur la même période. Les régions Bouhertma et Ghardimaou sont les régions les plus pluvieuses du bassin de la Medjerda, elles sont caractérisées par un fort coefficient du ruissellement. Une étude sur la relation pluie-altitude pour chaque station dans chaque région homogène montre que la variabilité de la pluie n'est pas directement influencée par l'altitude de la station. En effet, pour l'exemple d'une région au sud du bassin versant de la Medjerda, l'altitude des stations pluviométriques de la région Mellegue amont est supérieure à 600 m alors que les pluies moyennes annuelles ne dépassent pas 400 mm. L'altitude joue cependant un rôle, puisque les régions les plus arrosées sont situées sur la dorsale atlasique qui traverse le nord du pays et qui concentre les précipitations les plus importantes du pays. Les régions d'altitude importante situées dans le sud du pays

ne reçoivent pas autant d'eau car elles sont trop éloignées de la source d'humidité qui vient essentiellement du nord-ouest et qui s'assèche au contact des premiers hauts reliefs du nord du pays et du nord-est algérien.

Zones pseudo-proportionnelles et vecteurs

La méthodologie utilisée est basée sur la délimitation de zones homogènes à l'intérieur desquelles les valeurs des paramètres climatiques sont pseudo-proportionnelles pour un intervalle de temps donné. A l'intérieur d'une zone pseudo-proportionnelle, chaque paramètre peut être caractérisé par une série unique représentative de son organisation chronologique interne. L'espace délimité se restreint si l'on diminue le pas de temps (de l'année au mois par exemple), ou si l'on exige une liaison pseudo-proportionnelle plus forte à l'intérieur de la zone. Les définitions précédentes constituent la base théorique des "vecteurs régionaux" qui sont des séries chronologiques homogènes générées à partir des mesures observées aux stations appartenant à la zone climatique considérée, mesures qui peuvent être incomplètes ou erronées sans que cela influe beaucoup sur l'élaboration du vecteur (Fig. 3).

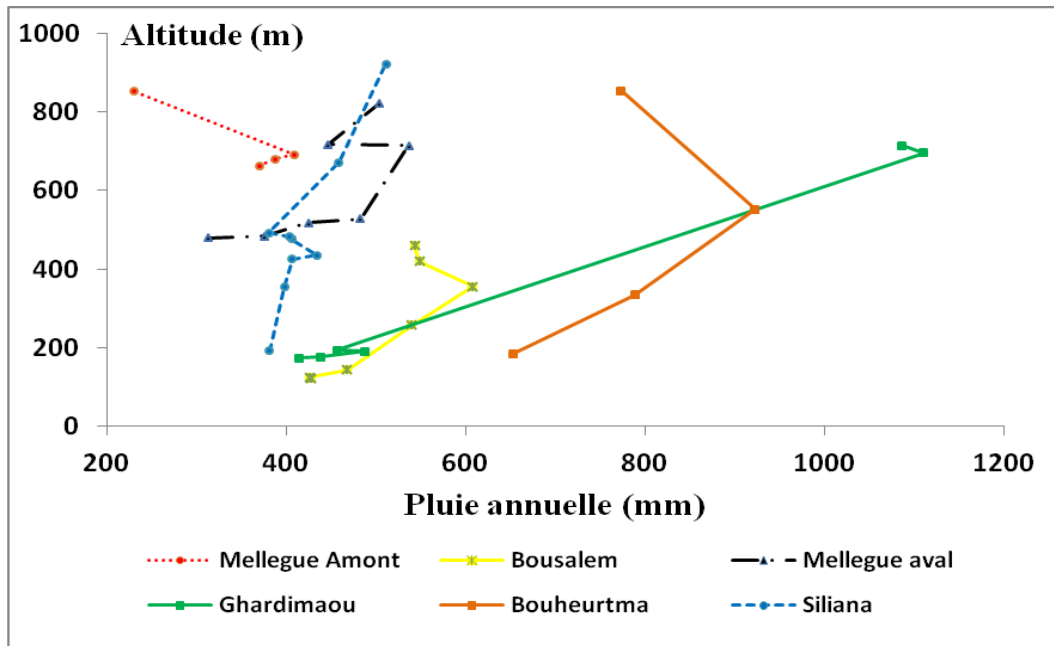


Figure 3. Relation pluie annuelle et altitude de chaque station pour les six régions.

Figure 3. Relationship of the annual rainfall and the altitude of each station for the six regions.

Les tests de pseudo-proportionnalité mettent en évidence la cohérence des variations interannuelles entre les stations des unités. Ce test est limité par définition initiale à 0,20 au maximum pour une station proportionnelle au vecteur régional. Cette valeur est modulable, mais d'expérience elle correspond à un bon compromis entre distance et perte d'information (Wotling *et al.* 1995).

Afin de comprendre les évolutions climatiques dans la zone d'étude et de considérer la contribution de la région au changement climatique, la figure 4 montre que les six régions présentent la même variation de distribution des pluies à l'exception de la région Mellegue amont. Cette région est montagneuse, ce qui induit sans doute une variabilité spécifique de la pluie dans cette région.

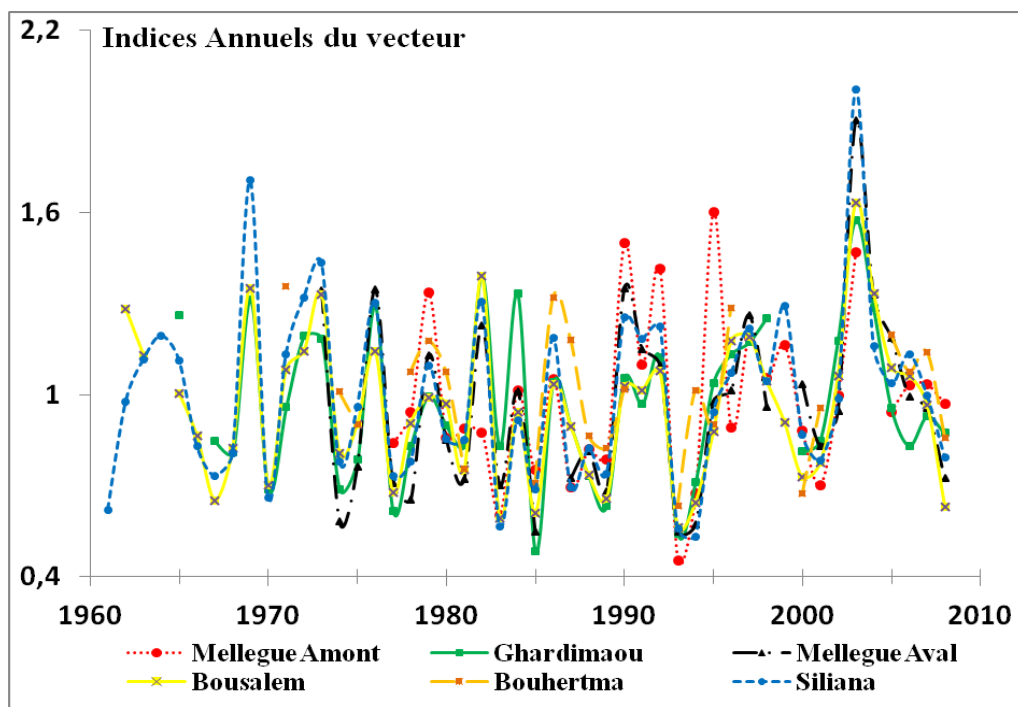


Figure 4. Evolution des vecteurs des six régions.

Figure 4. Evolution of the vectors of the six regions.

Régionalisation

La phase d'homogénéisation consiste à regrouper les stations pluviométriques en fonction du résultat d'un test de proportionnalité proposé par le logiciel MVR (Mahé & L'Hôte 1992), selon une méthodologie décrite dans Kotti *et al.* (2014). Pour que la variabilité pluviométrique de séries de pluie de stations testées soit considérée comme homogène entre les stations, il faut que la valeur du coefficient de proportionnalité soit inférieure ou égale à 0,20 pour chaque poste. Au-delà de 0,20 le risque que la variabilité de la station s'écarte de celle des autres stations du groupe augmente. On cherchera alors à transférer cette station dans une autre région. Ainsi MVR aide à constituer des régions climatiques dans lesquelles les stations ont des variabilités proches, de telle sorte que le coefficient de corrélation moyen entre stations et vecteurs soit proche ou supérieur à 0,9. Les courbes pluie-altitude sont utilisées comme premier filtre.

Le traitement des stations restantes aboutit à la constitution de six groupes homogènes et donc de six vecteurs. Nous constatons d'abord que l'objectif proposé est atteint, puisque les coefficients de corrélation sont autour de 0,90 sauf celui de la région Mellegue amont (Tab. 1). Pour cette région nous ne disposons que de quatre stations seulement. Ces quatre stations sont dispersées et insuffisantes pour définir un vecteur plus représentatif. Cette région appartient au bassin versant de l'oued Mellegue, affluent majeur de l'oued Medjerda, dont une partie importante du bassin se trouve en Algérie, pour laquelle nous n'avons pu obtenir des données que pour quelques stations synoptiques. Ceci explique pourquoi le vecteur pour cette région est le moins performant.

L'oued Mellegue possède un bassin versant très vaste dont les 2/3 se situent en Algérie. La limite sud du bassin suit la longue chaîne montagneuse de l'Atlas Tunisien qui sépare le nord et le centre de la Tunisie, qui constitue le prolongement de la chaîne Atlasique d'Algérie par les Monts de Tebessa jusqu'au massif des Aurès. Malgré le manque de renseignements sur le milieu naturel de la partie algérienne, nous avons pu identifier une région de quatre stations représentatives de l'évolution des précipitations à l'intérieur d'une région climatiquement homogène.

Région	Corrélation / vecteur	Test de proportionnalité
Mellegue Amont	0.76	0.1 à 0.25
Ghardimaou	0.91	0.04 à 0.09
Mellegue Aval	0.94	0.03 à 0.07
Bousalem	0.90	0.05 à 0.08
Bouhertma	0.89	0.04 à 0.08
Siliana	0.91	0.06 à 0.14

Tableau 1. Statistique d'identification des régions homogènes.

Table 1. Statistics for identifying homogeneous regions.

Pour la région Ghardimaou et la région Mellegue aval, nous avons constaté une très bonne homogénéité. L'objectif proposé est atteint avec un coefficient de corrélation moyen

supérieur à 0.9. Ces deux groupes appartiennent au bassin versant de Bousalem, plus précisément à l'amont du barrage Sidi Salem. Ces régions représentent des zones faiblement montagneuses qui entourent le site.

Ainsi, l'étude de la région Bousalem nous paraît intéressante parce que cette région est située dans l'environnement immédiat du barrage de Sidi Salem, à l'aval du barrage. En allant vers la mer les reliefs de ce bassin s'adouissent, les plaines deviennent de plus en plus fréquentes. Ainsi, on est amené à créer une unité assez grande, surtout dans la zone de faible couverture.

La région Bouhertma montre des résultats moyens, mais le vecteur a été calculé seulement à partir de quatre stations assez éloignées. Nous avons discriminé cette région très proche de la zone côtière de la Tunisie. La variabilité interannuelle particulière est due à la proximité de la mer Méditerranée. Enfin la région Siliana est située au niveau du bassin versant de Siliana, affluent en rive droite de l'oued Medjerda, à l'aval du barrage de Sidi Salem et limitée au sud par la dorsale tunisienne. L'étude du relief des bassins versants dans ces régions devrait nous permettre de mieux expliquer la répartition des pluies sur ces bassins, leur aptitude au ruissellement et l'érosion.

Etude analytique des lames ruisselées établies dans les sous-bassins versants de la Medjerda

Détermination de la lame ruisselée à partir des paramètres hydrologiques

La détermination du ruissellement sera fonction des paramètres hydrologiques au sein de la même station ou à partir des valeurs observées du même paramètre à une station voisine. Pour déterminer la lame ruisselée annuelle, nous appliquerons la régression linéaire. Ce modèle a été appliqué aux deux stations de jaugeage se trouvant sur le cours principal de la Medjerda, Jendouba et Bousalem, en utilisant comme paramètres hydrologiques, la pluie moyenne annuelle, le débit maximum annuel et la lame ruisselée à l'amont de la station étudiée. Le calcul de la pluie moyenne annuelle sur chaque bassin est réalisé à partir des fichiers de pluie SIEMEM, au format grille de 0,5 degré carré, de 1966 à 1999. Il suffit de superposer la limite de chaque sous bassin avec la grille pour trouver la pluie moyenne annuelle.

Dans le tableau 2, nous présentons, pour chaque station, les valeurs des coefficients de corrélation entre les valeurs observées et calculées, de la lame ruisselée, par les modèles de régression. Il apparaît que les modèles linéaires à deux variables, tenant compte à la fois de la pluie moyenne annuelle et du débit maximum, donnent les meilleurs résultats pour les deux stations.

	Jendouba	Bousalem
Pluie	0.31	0.56
Débit maximum	0.54	0.86
Pluie + Débit max	0.61	0.89

Tableau 2. Valeurs du coefficient de corrélation pour chaque modèle de régression appliqué pour chaque station (période 1966 à 1999).

Table 2. Values of the correlation coefficient for each regression model applied to each station (period 1966-1999).

Afin d'améliorer les résultats de cette application, nous avons découpé la période d'observations en plusieurs sous périodes sur la base d'éviter la période des données manquantes. Sur le tableau 3, nous présentons pour chaque station et pour chaque période, les valeurs des coefficients de corrélation par les modèles de régression. Ces modèles

ont été appliqués aux mêmes stations afin de développer des relations simples pour l'estimation du ruissellement. La meilleure formule qui estime le ruissellement annuel, dans une station, a été donnée par une régression linéaire qui tient compte de la pluie moyenne annuelle et du débit maximum (Tab. 3)

Période d'observation	Jendouba			Bousalem		
	1969_1976	1977_1987	1988_1999	1966_1976	1977_1987	1977_1999
Pluie	0.37	Données manquantes	0.62	0.56	0.50	0.56
Débit maximum	0.82		0.45	0.94	0.79	0.64
Pluie + Débit max	0.86		0.80	0.96	0.81	0.72

Tableau 3. Valeurs du coefficient de corrélation pour chaque modèle de régression appliqué pour chaque station et pour chaque période.

Table 3. Values of the correlation coefficient for each regression model applied to each station and for each period.

Détermination de la lame ruisselée d'une station à partir des données hydrologiques d'une station voisine

Le ruissellement d'une station a été déterminé à partir des données hydrologiques d'une station se trouvant à

l'amont. Les valeurs des coefficients de corrélation entre les valeurs observées et calculées et de la lame ruisselée, par les modèles de régression linéaires figurent au tableau 4. L'utilisation des pluies et de la lame ruisselée donne les meilleurs résultats (Tab. 4).

	Jendouba	Bousalem
Pluie	0.3	0.74
Lame ruisselée d'une station se trouvant à l'amont	0.92	0.85
Pluie + Lame ruisselée d'une station se trouvant à l'amont	0.93	0.90

Tableau 4. Valeurs des coefficients de corrélation entre valeurs observées et calculées, de la lame ruisselée, par les modèles de régression linéaires aux stations étudiées.

Table 4. Values of correlation coefficients between observed and calculated values of the run-off blade, by a linear regression model to the study sites.

Résultats récapitulatifs

Pour conclure, le tableau 5 montre que le meilleur modèle est celui qui détermine le ruissellement d'une station à partir des données hydrologiques d'une station se trouvant

à l'amont, ce qui est cohérent avec les résultats de Habaieb *et al.* (1994), bien que pour Bousalem les résultats soient pareils.

	Jendouba	Bousalem
Pluie + Débit max	0.61	0.89
Pluie + Lame ruisselée d'une station se trouvant à l'amont	0.93	0.90

Tableau 5. Valeurs des coefficients de corrélation entre les valeurs observées et calculées, de la lame ruisselée, par les modèles de régression linéaires pour les deux stations étudiées.

Table 5. Values of correlation coefficients between observed and calculated values of the run-off blade, by linear regression models for both stations studied.

Sur la figure 5, nous présentons, pour chaque station, les valeurs des lames ruisselées observées et reconstituées données par le meilleur modèle. Les résultats sont relativement bons, meilleurs pour la station de Jendouba que pour la station de Bousalem, surtout pour des lames ruisselées supérieures à 60 Mm

Etude de l'écoulement dans les sous-bassins versants de la Medjerda

Les bassins-versants très anthropisés comme celui de la Medjerda induisent très probablement des impacts importants dans le cycle hydrologique. L'indice standardisé du coefficient d'écoulement annuel pour les sous bassins versants de la Medjerda (Fig. 6), traduit la variation des écoulements dans ces bassins.

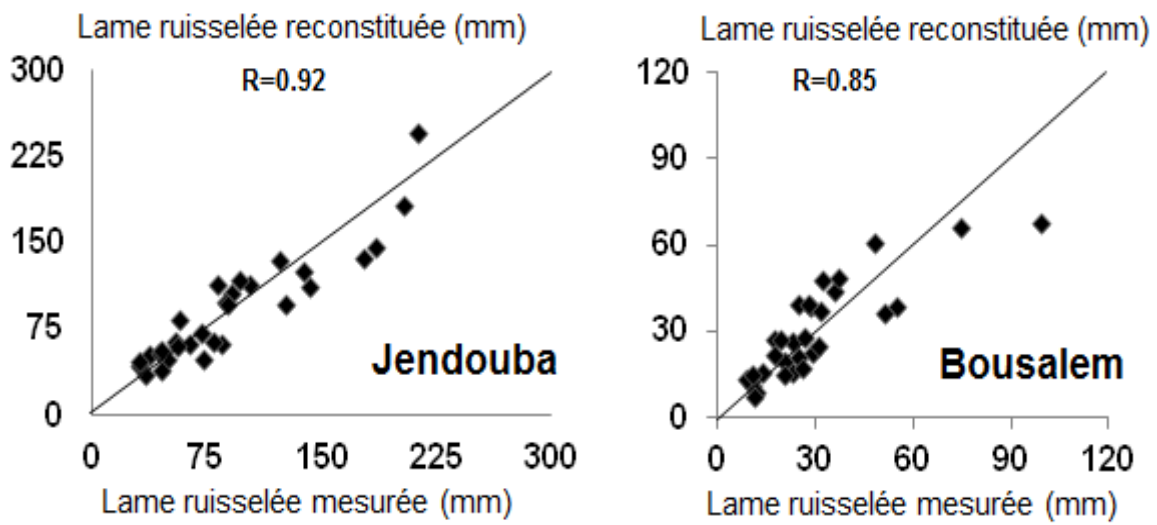


Figure 5. Comparaison entre les valeurs des lames ruisselée (L_r) reconstituées et mesurées à la station de Jendouba et Bousalem sur la Medjerda.

Figure 5. Comparison between the values of run-off blades (L_r) reconstructed and measured in Jendouba and Bousalem Station on Medjerda.

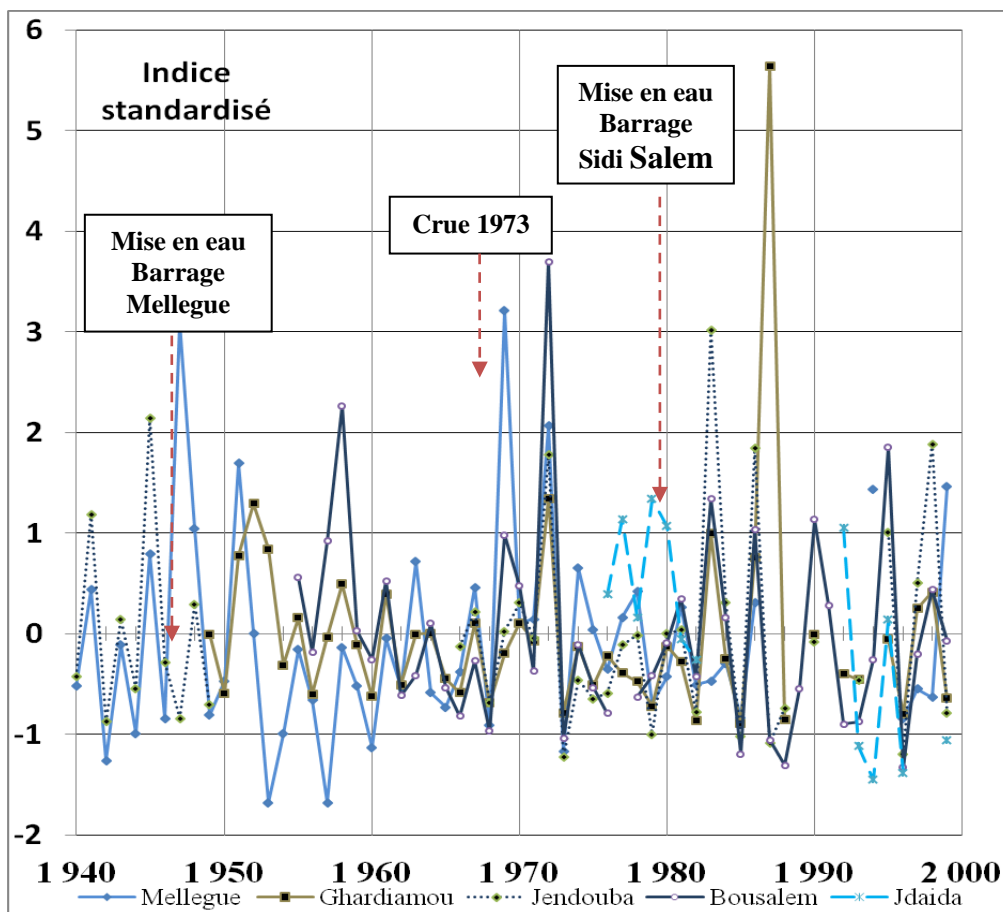


Figure 6. Indice standardisé de l'écoulement des sous-bassins versant de la Medjerda.

Figure 6. Standardized Index of the flow of sub- basins Medjerda.

On assiste à une modification du régime hydrologique suite à la construction des barrages. Il apparaît en premier lieu, à partir de 1954, la construction du barrage Mellegue qui contrôle à lui seul plus de 40% du bassin versant total de la Medjerda, qui entraîne une diminution du coefficient d'écoulement (Ben Mammou 1992). Il y a eu également des changements sur les sections des oueds depuis la construction de ce barrage. En effet, la retenue de Mellegue ne cesse de s'alluvionner avec un taux de 61% entre 1954 et 1991 (Ben Mammou 1998). Face à ce problème et dans le but d'apporter une sécurité à ce barrage lors des crues, les volumes d'eau lâchés sont de plus en plus importants. Ceci explique la variation annuelle de l'écoulement, l'effet érosif des écoulements et donc les modifications morphologiques du lit de l'oued et des méandres en aval de ce barrage.

La ville de Bou Salem constitue le site de convergence des écoulements provenant des oueds Medjerda, Bouherthma, Tessa et Mellegue. Une analyse similaire a été conduite pour évaluer les impacts anthropiques sur ces oueds. La diminution du coefficient d'écoulement relative aux sous bassins-versants de Bousalem et Jdaïda s'explique par la construction des barrages : Beni Mtir (1954), Bouherthma (1976), Kassab (1968), Sidi Salem (1982) et Siliana (1987), (Fig. 1 pour la localisation et Tab. 6).

Depuis la mise en eau du barrage Sidi Salem, un rehaussement rapide du lit de l'oued Medjerda a été constaté en aval du barrage. Le lit de la Medjerda connaît de ce fait un engraissement continu, ce qui provoque des débordements pour des débits de plus en plus faibles et un détariage permanent des stations hydrologiques.

Barrages	Année	Cours d'eau	La superficie du bassin versant (Km ²)	Capacité de la retenue (Mm ³)
Sidi Salem	1981	Medjerda	17885	762
Mellègue	1954	Mellègue	10300	182
Bouherthma	1976	Bouherthma	457	117
Siliana	1987	Siliana	972	70
Kassab	1968	Kassab	170	82
Lakhmess	1966	Lakhmess	127	
Beni Mtir	1954	Ellil	103	38
Ain Dalia	1988	Medjerda	206	86
R'mil	2002	R'mil	232	4

Tableau 6. Les plus grands barrages de stockage édifiés sur le cours d'eau de la Medjerda et sur ses principaux affluents (Rejeb 2006 et Nippon & Ltd Co. 2009).

Table 6. The larger dams built on the river Medjerda and its main tributaries (Rejeb 2006 and Nippon 2009).

Cependant, on assiste à une augmentation de l'indice d'écoulement annuel sur les deux sous bassins-versants de Ghardimaou et Jendouba, témoignant d'un moindre impact probable des aménagements hydrauliques sur ces oueds, puisque il n'existe en amont des stations qu'un seul grand barrage, Ain Dalia, en Algérie (1988), d'une capacité modeste par rapport aux écoulements de la Medjerda dans la partie tunisienne.

De façon générale, les aménagements hydrauliques ont connu un essor très important vers la fin des années 1980, mais nous avons maintenant un recul suffisant pour évaluer leurs performances réelles ainsi que leurs impacts socio-environnementaux (Payan 2007).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Afin de rechercher des éléments explicatifs de l'origine de certains aspects de la variabilité des écoulements et pour bien prendre en compte la variabilité spatiale des pluies dans le bassin versant de la Medjerda, la méthode du vecteur régional a servi à subdiviser la zone d'étude en six sous-régions climatiquement homogènes. Cette méthode permet de mieux décrire les évolutions climatiques dans la zone d'étude et de considérer la contribution de chaque région au changement hydrologique. L'ensemble des résultats permet de dégager deux grands ensembles au nord et au sud du bassin et au sud d'identifier une région à la variabilité

sensiblement différente (Mellegue amont) par rapport aux régions Mellegue aval et Siliana, ce qui est cohérent avec les résultats de Jebari *et al.* (2007). Ainsi il apparaît que les régions les plus contributives aux écoulements de l'oued Medjerda sont le nord et l'ouest, les plus arrosées.

L'objectif de ce travail est également de développer des relations simples pour l'estimation du ruissellement, afin d'une part de combler des lacunes dans les séries de données et également de déterminer une relation simple entre pluies et écoulements à des fins prédictives. Ainsi, pour une station donnée, le ruissellement à l'échelle annuelle a été déterminé à partir des données hydrologiques facilement mesurables à la même station (pluie, débit maximum) ou à partir des données hydrologiques d'une autre station se trouvant à l'amont. La meilleure formule qui estime le ruissellement annuel à une station, a été donnée par une régression linéaire qui tient compte du ruissellement de la station se trouvant à l'amont et de la pluie dans le bassin versant.

Avec la mise en eau des barrages dans le bassin versant de la Medjerda, le régime hydrologique du fleuve Medjerda a été modifié. En effet, depuis l'ouverture du barrage Sidi Salem sur le cours d'eau de la Medjerda, en 1982, une réduction importante du débit écoulé dans la basse vallée a été observée (Zahar *et al.* 2008). Le suivi de l'évolution des indices standardisés des coefficients d'écoulement témoigne bien des changements de relations pluies/débits, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. En effet, les grands

bassins versants comme Medjerda, intègrent la réponse hydrologique aux changements climatiques et environnementaux à de larges échelles spatiales et temporelles, mais également les modifications du milieu physique d'origine anthropique ce qui rend très difficile

l'identification de l'origine de l'impact de la variabilité hydrologique. Ainsi, les écoulements constituent une réponse relative aux différents facteurs (la taille du bassin versant, le relief, la géologie, les sols et le couvert végétal).

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Institut National Agronomique de Tunisie et son Directeur Monsieur Mahmoud Elyes Hamza, pour le soutien logistique et financier, et pour l'octroi d'une bourse de stage à l'Université de Montpellier. Nous remercions vivement Messieurs Taoufik Hermassi (INRGREF) et Lotfi Boughrara (DGRE) pour les informations qu'ils nous ont fait partager. Le programme Campus France est particulièrement remercié pour l'attribution d'une bourse Eiffel de séjour long en France. Les évaluateurs anonymes sont remerciés pour leurs remarques et suggestions.

REFERENCES

- Ben Mammou A. 1992. Alluvionnement de la retenue du barrage Nebeur sur l'Oued Mellegue. *Notes du Service Géologique, Tunisie*, 58, 173-184.
- Ben Mammou A. 1998. *Barrages Nebeur, Sidi Salem, Sidi Saad et Sidi Boubaker. Quantification, étude sédimentologique et géotechniques des sédiments piégés. Apports des images satellitaires.* Thèse de Doctorat ès-Sciences géologique, Université de Tunis II, Faculté des Sciences de Tunis, 345 p.
- Ben Mammou A. & Louati M. H. 2007. Evolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages Tunisie. *Revue des sciences de l'eau/ Journal of water science*, vol. 20, 2, 201-210.
- Claude J., Francillon G. & Loyer J.Y. 1976. *Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors des crues exceptionnelles de Mars 1973.* Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer. Convention DRES-ORSTOM action de type A., 162.
- Hiez G. 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie* 14, 2, 129-172.
- Habaieb H., Ben Mechilia N. & Laroussi C. 1994. Etude analytique des coefficients de ruissellement établis en Tunisie, possibilités d'estimation à partir de la pluie et du débit maximum. *Conférence Internationale: "Water Resources Management"*, 4-8/9/1994, Bari, Italie. Vol. I, 151-165.
- Huebener H. & Kerschgens M. 2007. Downscaling of current and future rainfall climatologies for southern Morocco. Part I: Downscaling method and current climatology. *International Journal of Climatology*, 27, 1763-1774.
- Jebari S., Berndtsson R., Uvo C. & Bahri A. 2007. Regionalizing fine time-scale rainfall affected by topography in semi-arid Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 6, 1199-1215.
- Kotti F., Mahe G., Habaieb H., Dieulin C. & Calvez R. 2014. Description des variations pluviométriques dans le bassin versant de la Medjerda. Poster, *3ème Colloque International Eau-Climat : Regards croisés Nord-Sud*, Hammamet, Tunisie.
- Le Goulven P., Ruf T. & Rivadeneir, H. 1987. *Méthodologie générale et détails des opérations du projet INERHI-Orstom.* Quito, INERHI- Orstom, 06/87, 91.
- Mahé G. & L'Hôte Y. 1992. Utilisation de la Méthode du Vecteur Régional pour la description des variations pluviométriques interannuelles en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. In : LeBarbé, L., Servat, E. (Eds.) : *Régionalisation en hydrologie : application au développement.* Huitièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, ORSTOM Ed., 175-192.
- Nippon K. & Ltd Co. 2009. Etude sur la gestion intégrée du bassin axée sur la régulation des inondations sur le bassin de Medjerda en république Tunisienne. *Rapport final volume III.* Agence Japonaise de Coopération Inter-nationale.
- Payan J.L. 2007. *Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit.* Thèse de Doctorat de l'ENGREF/CEMAGREF, Antony, France
- Rejeb M.M. 2006. *Modélisation du transport solide de la Medjerda sur le tronçon Sidi Salem El Herri.* Thèse, Université catholique de Louvain.
- Rouché N., Mahé G., Ardoin-Bardin S., Brissaud B., Boyer, J.F., Crès A., Dieulin C., Bardin G., Commelard G., Paturel J.E., Dezetter A. & Servat E. 2010. Constitution d'une grille de pluies mensuelles pour l'Afrique, période 1900-2000. *Sécheresse*, 21, 4, 336-338.
- Rodier J.A., Colombani J., Claude J. & Kallael R. 1981. *Monographies hydrologiques du bassin versant de la Medjerda.* ORSTOM/Éditeur, Tunisie, 125 p.
- 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.
- Zahar, Y., Abdelmajid G. & Jean A. 2008. Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: Aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam(Tunisia). *Journal of Hydrology* 351, 318-330.

Manuscrit reçu le 29.12.2015

Version révisée acceptée le 10.03.2017

Version finale reçue le 21.03.2017

Mise en ligne le 24.04.2017