

CARACTÉRISATION DE LA SÉCHERESSE PAR LES INDICES SPI ET SSFI (NORD-OUEST DE L'ALGÉRIE) DROUGHT CHARACTERIZATION BY SPI AND SSFI INDEX (NORTH-WEST OF ALGERIA)

Abderahmane Nekkache GHENIM & Abdessalem MEGNOUNIF

*Equipe "Mobilisation Ressources en Eau" ; Laboratoire "Eaux et Ouvrages dans Leur Environnement". Université de Tlemcen, Faculté de Technologie, BP 230 Tlemcen, 13000 Algérie. anghenim@yahoo.fr
Megnounif_aslam@yahoo.fr*

RÉSUMÉ : La sécheresse pluviométrique induit forcément un déficit dans les apports en eau aux barrages. Dans ce travail, l'utilisation du SPI (Standardized Precipitation Index) pour une période de 63 ans, permet d'identifier les fréquences d'humidité et de sécheresse pour les bassins versants abritant les barrages Meffrouche et Béni Bahdel. A l'aide du SSFI (Standardized Stream Flow Index), on identifie également les fréquences d'écoulement déficitaires et excédentaires. Les résultats obtenus montrent que ces bassins ont connu globalement des périodes d'humidité et de sécheresse légères avec une tendance à la sécheresse. Quoique des années particulières ont été très humides ou extrêmement sèches. Malgré l'absence de simultanéité entre les valeurs du SPI et du SSFI, on note que l'apparition d'une ou deux années déficitaires en pluviométrie au milieu d'années excédentaires, n'a pas d'effet direct sur les apports en eau aux barrages. Par contre, la succession de plusieurs années à pluviométrie modérée peut générer une année à écoulement abondant. D'autre part, l'utilisation de la méthode double masse entre les précipitations et les apports en eau montre l'existence d'une cassure d'homogénéité située vers les années 1980.

Mots clés Précipitation; apport au barrage; Standard Précipitation Index; Standard Stream Flow Index; double-mass curve ; N-O Algérie

ABSTRACT : Drought induced necessarily a deficit in water supplies with dams. In this work, the SPI (Standardized Precipitation Index) is used for a period of 63 years. This index allows the identification of wet and dry frequencies for rainfall. Similarly, the SSFI (Standardized Stream Flow Index) is used for water supply in stream flow. The SSFI is used of

detecting emerging drought for watersheds draining Meffrouche and Beni Bahdel dams. The area is experienced of moderate drought and humidity sequences but with a slight tendency to drought. Though, some years have been very wet or extremely dry. Despite the lack of simultaneity between the SPI and SSFI values, we note that the occurrence of one or two years experiencing drought in the mid of surplus-years has no direct effect on water supply to dams. Contrary to watch, succession of several years with moderate rainfall can generate an abundant water flow with considerable annual supply. In the other hand, the use of double-mass curve method between rainfall and water supply shows the existence of a break in homogeneity located approximately in 1980 years.

Key words Rainfall; water contribution to dam; Standard Precipitation Index; Standard Stream Flow Index; double-mass curve; N-W Algeria.

INTRODUCTION

Dans les régions arides et semi-arides méditerranéennes, la mobilisation des ressources en eau se fait pour une grande part grâce à la construction de barrages (Boudjadja et al., 2003). Or, les apports en eau emmagasinés par ces derniers sont dépendants de la pluviométrie. Lorsque celle-ci est excédentaire, on assiste à un accroissement du taux de remplissage des ouvrages et un développement des les activités liées à l'approvisionnement en eau, notamment l'agriculture et diverses industries. Par contre, lorsque la pluviométrie est déficitaire, on parle de sécheresse. Avec le prolongement de celle-ci, les ouvrages se vident et l'on assiste aux pénuries d'eau, au déclin de l'agriculture, à l'arrêt de certaines usines consommables d'eau en plus des dommages environnementaux et la baisse de la qualité de la vie (Hisdal et Tallaksen 2003).

L'Algérie, à l'instar de l'ensemble de la région Nord Africaine subit depuis plus de trois décennies une sécheresse météorologique persistante (Meddi et Meddi, 2009 ; Ghenim et al., 2010). Ce manque de pluviosité a engendré des déficits d'écoulement allant de 37 à plus de 70% de l'est vers l'ouest du pays (Meddi et Hubert, 2003) entravant ainsi l'effort considérable consenti pour la multiplication des ouvrages de stockage.

Dans ce contexte, le bassin versant de la Tafna (7245 km²), surnommé jadis "le château d'eau de l'Ouest Algérien" subvenait aux besoins en eau pour diverses utilisations de plus de 2 millions de personnes (Yebdri et al., 2007). Ce bassin, doté de 5 barrages d'une capacité globale

de 380.10^6 m^3 est sujet à une longue sécheresse météorologique. Le déficit en apport pluviométrique cumulé depuis le milieu des années soixante-dix est estimé à 25% (Ghenim et al., 2010). Le manque en pluviométrie a engendré une baisse sans cesse croissante des ressources en eau superficielles et souterraines (Khaldi, 2005). Le niveau de stockage des barrages a atteint des niveaux alarmants au point où la cuvette du barrage Meffrouche s'est complètement asséchée en octobre 2006.

Afin de mettre en relief les séquences pluviométriques sèches et d'apprécier leurs conséquences sur la réponse fluviale des cours d'eau dans cette région, on s'est intéressé à l'étude de ces phénomènes dans deux sous bassins : le Meffrouche et la Tafna à Béni Bahdel. Le choix de ces deux sous-bassins est relatif à la disponibilité de séries de mesure assez étalées dans le temps des précipitations et des apports aux barrages. De plus ce sont les bassins qui sont régularisés par les barrages les plus anciens et les plus importants de la région.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Appartenant au bassin versant de la Tafna, les parties régularisées par les barrages Meffrouche et Béni Bahdel dont les caractéristiques physiques sont reportées dans le tableau 1, s'étalent sur des étendues respectives de 86 et 1 016 km^2 . Ces sous-bassins à caractère montagneux sont limités par un ensemble de forêts (Zarifet et Béni Moudjer) et de Djebels (Nador, Benyakoub, Tichiouinen, Guendouza, Belkoudia et les monts de Tlemcen). Ils se caractérisent par des reliefs abrupts. A Meffrouche, les pentes sont assez fortes en amont dépassant les 25%. Elles ont tendance à s'adoucir entre les altitudes 1110 et 1170 m. Elles sont supérieures à 25% sur 49% de l'aire drainée par le barrage Béni Bahdel. Les 2 sous bassins reçoivent l'essentiel des précipitations durant les saisons d'hiver et de printemps (plus de 75% de la pluviométrie annuelle). Sensiblement étirés latéralement, les 2 sous bassins génèrent des crues très brusques avec un temps de montée très court (Collignon, 1986 ; Benfares et Mokrane, 1993). La lithologie du sous-bassin de Béni Bahdel est dominée par les terrains calcaires essentiellement karstiques. Elle comporte aussi des sols alluvionnaires au niveau de la cuvette de Sebdo d'où émergent de nombreuses sources, et des croûtes marno-gréseuses et calcaire-gréseuses sur les hauteurs des monts de Tlemcen (Benest et Elmi, 1978). Les sols du sous-bassin du Meffrouche sont constitués principalement de grès et de calcaires du secondaire. Ils se présentent en bancs assez durs, dont les épaisseurs sont variables pouvant atteindre 500 m.

L'Oued En-Nachef qui draine le sous-bassin du Meffrouche comporte un réseau hydrographique bien organisé. Sa densité de drainage est de 2,51. Il coule sur une longueur de 14,25 km (figure 1). Il prend naissance dans les monts de Tlemcen et parcourt un plateau rocheux se trouvant au sud de cette ville. Il arpente la falaise en formant de grandes cascades et prend l'appellation de Oued Saf-Saf puis Oued Sikkak. Surplombant la ville de Tlemcen, à l'amont des cascades, le barrage Meffrouche est à une altitude de 1100 m. Le barrage Béni Bahdel quant à lui, est situé au confluent des Oueds Sebdou et Khemis (qui forment l'Oued Tafna). L'entaille du cours d'eau est creusée dans des formations essentiellement gréseuses sur lesquelles reposent des formations carbonatées bien karstifiées.

A leurs mises en service, le barrage du Meffrouche (mis en eau en 1963 avec une capacité initiale de 15.10^6 m^3) était destiné à l'alimentation en eau potable de la ville de Tlemcen alors que le barrage Béni Bahdel (mis en eau en 1952 avec une capacité initiale de 63.10^6 m^3) contribuait à l'alimentation en eau de la ville d'Oran à raison de $70\ 000 \text{ m}^3/\text{Jour}$. Il permettait aussi l'irrigation de la plaine d'Hennaya et même la production d'électricité.

Tableau 1. Principaux paramètres physiques des sous-bassins d'étude

Paramètres	Unité	Symbole	Valeurs	
			Mef	B.Bah
Superficie	km ²	A	86	1016
Périmètre	km	P	46,70	165
Indice de compacité	-	Kc	1,41	1,45
Longueur du rectangle équivalent	km	L _{RE}	18,77	67,47
Longueur du thalweg principal	km	L _P	14,25	15,06
Densité de drainage	km/km ²	D _d	2,51	2,40
Coefficient de torrentialité	-	C _t	7,80	12,80
Temps de concentration	Heure	T _c	3,20	9,50
Indice de pente de Roche	-	I _p	0,44	0,90
Indice de pente global	m/km	I _g	16,94	15,40
Altitude minimale	m	H _{min}	1100	650
Altitude maximale	m	H _{max}	1500	1824
Altitude moyenne	m	H _{moy}	1190	1147

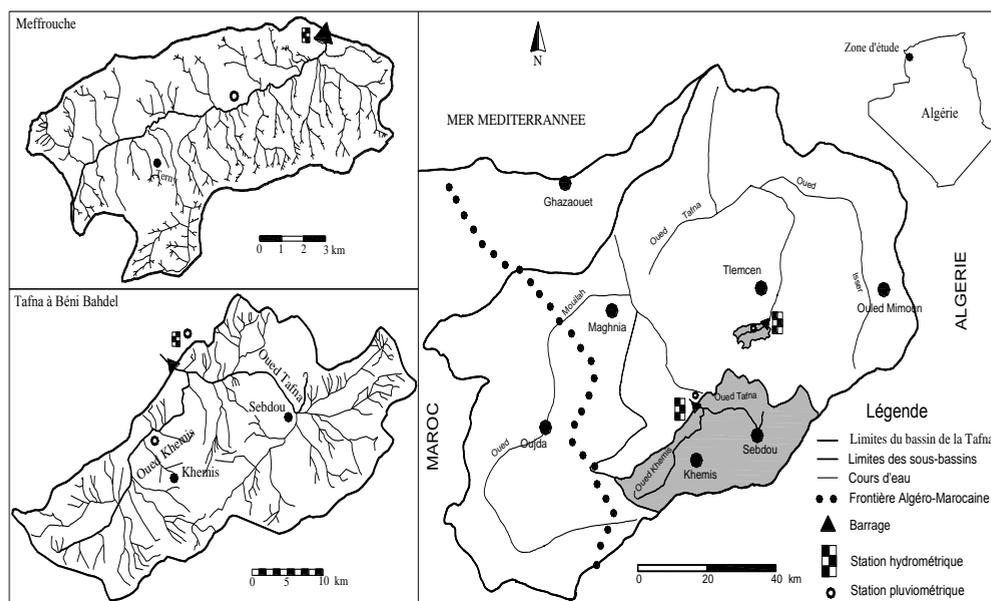


Figure 1. Situation des sous-bassins du Meffrouche et Béni Bahdel

DONNEES ET METHODE D'ETUDE

Collecte des données

Le bassin versant de la Tafna compte 29 stations pluviométriques. Les plus anciennes sont lacunaires, surtout entre 1955 et 1962. Les plus récentes n'ont commencé à fonctionner qu'après 1970. Elles n'offrent que de séries de données courtes. Dans les sous bassins étudiés, les seules stations pluviométriques qui disposent de séries complètes et étalées sont celles situées au niveau des barrages Meffrouche et Béni Bahdel de coordonnées respectives ($X = 01^{\circ}17'31''$; $Y = 34^{\circ}51'19''$; $Z = 1110$ m) et ($X = 01^{\circ}29'48''$; $Y = 34^{\circ}42'33''$; $Z = 660$ m). Les données pluviométriques ainsi que les apports en eau aux barrages sont mesurés et fournis par les services de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). L'étude se base sur les séries mensuelles des précipitations et des apports en eau relatifs aux 2 sous bassins versants durant la période allant de septembre 1946 à août 2009.

Méthode d'étude

La sécheresse est une notion relative (Bergaoui et Alouini, 2001 ; Reyes-Gómez et al., 2006 ; Xingcai et al., 2009). Elle se distingue par sa définition variant selon son impact et ses approches d'estimation mais aussi par ses manifestations diverses. Parmi les nombreux indices d'appréciation

de la sécheresse pluviométrique, l'Indice Standardisé des Précipitations SPI (Standardized Precipitation Index) (McKee et al. 1993) est le plus utilisé (Wu et al., 2006 ; Khan et al., 2008 ; Naresh Kumar et al., 2009).

Le SPI prend en compte la variabilité de la pluie pour des périodes définies, de préférence les plus longues possibles. Il est calculé grâce à l'ajustement des séries pluviométriques recueillies à une courbe de probabilité (McKee et al. 1993). Pour une série distribuée suivant une loi normale, le SPI est équivalent à l'Indice Centré Réduit (ICR). Celui-ci est défini comme le rapport de l'écart à la moyenne interannuelle sur l'écart type de la série considérée. Comme la répartition des précipitations est généralement positivement asymétrique, on applique une transformation aux données afin de rendre leur distribution normale ou Gaussienne (Sharma, 1997). Le plus souvent, le choix de la transformation porte sur la loi de probabilité Gamma. Bien que l'ajustement à cette loi puisse être réalisé par des méthodes analytiques, une méthode statistique selon Edwards et McKee (1997) est utilisée. La modélisation est basée sur les paramètres de forme et d'échelle. Aux données de précipitation transformées en distribution normalisée, on applique les techniques de transformation d'équiprobabilité proposées par Abramowitz et Stegun (1965). Généralement, 9 classes équiprobables sont introduites pour délimiter différents seuils de sécheresse et d'humidité (tableau 2).

Tableau 2. Catégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs du SPI et du SSFI

Valeurs du SPI/SSFI	Degré d'humidité ou de sécheresse
$\geq 2,0$	Humidité extrême
1,5 – 2,0	Humidité forte
1,0 – 1,5	Humidité modérée
0 – 1,0	Humidité légère
0	Normal
-1,0 – 0	Sécheresse légère
-1,5 – -1,0	Sécheresse modérée
-2,0 – -1,5	Sécheresse forte
$\leq -2,0$	Sécheresse extrême

L'indice SPI est utilisé pour le suivi de la sécheresse météorologique à différentes échelles de temps. Il peut être évalué pour des durées de 1, 3, 6, 12, 24, 36, 48 mois et même plus (Hayes et al., 1999). Selon l'échelle de temps choisie, le SPI permet différentes interprétations. Le SPI de 1 mois

reflète le court terme et les conditions de son application peuvent être liées étroitement à l'humidité du sol ; le SPI de 3 mois fournit une évaluation saisonnière des précipitations ; les SPI de 6 et 9 mois indiquent la tendance à moyen terme des précipitations. Quant aux SPI de 12 mois et plus, ils reflètent la tendance à long terme. Ils sont généralement liés aux écoulements dans les cours d'eau, aux taux de remplissage des réservoirs et même aux niveaux statiques des nappes souterraines (Khan et al., 2008).

Pour apprécier la sécheresse hydrologique, une approche similaire à celle du SPI est utilisée. Elle se base sur l'indice standardisé des écoulements SSFI (Standardized Stream Flow Index), introduit par Modarres (2007). Le SSFI offre l'avantage de contrôler la sécheresse hydrologique et/ou l'approvisionnement en eau à court, moyen, et long terme.

Dans cet article, le comportement fluvial quant aux fluctuations pluviométriques qui intéressent la région du Maghreb est étudié. Pour cela, les indices SPI et SSFI appliquées aux sites sont analysées... Deux échelles de temps de 6 et 12 mois sont appliquées pour une appréciation de la sécheresse à moyen et long terme. Le choix du pas de temps de 6 mois est du au fait que dans cette région, l'année hydrologique se décompose en 2 périodes. L'une humide formée des saisons d'hiver et de printemps et l'autre sèche comprenant les saisons d'automne et d'été (Filali, 2004). Dans le bassin versant de la Tafna, du mois de décembre à juin, l'apport pluviométrique et l'apport en eau fluviale cumulent respectivement en moyenne 75% et 65% de l'apport annuel (Bouanani, 2004 ; Ghenim et al., 2008). Selon Yevjevich (1967), la sécheresse pluviométrique ou hydrologique est définie comme une interruption des apports en dessous d'un niveau arbitraire. Dans cette étude, ce niveau est pris égal à la moyenne historique. Les valeurs négatives du SPI et/ou du SSFI correspondent alors à des déficits. Les valeurs positives par contre, témoignent d'années bénéficiant de précipitations et/ou d'écoulements excédentaires (tableau 3). La méthode double-masse traduction de l'anglais "double-mass curve" est introduite dans cette étude afin de vérifier l'homogénéité des données et déceler les changements dans le comportement des cours d'eau quant aux fluctuations pluviométriques. Cette approche est utilisée aux trois pas de temps choisis précédemment : 12 mois (année hydrologique), 6 mois humides (de décembre à juin) et 6 mois secs (de juillet à novembre). La "double-mass curve" a été initiée en 1937 par Merriam (1937). C'est une courbe de valeurs cumulées d'une variable en fonction du cumul de valeurs d'une autre variable pour une même période (Searcy and Hardison, 1960). La courbe obtenue est une ligne droite dont la pente représente la constante

de proportionnalité entre les deux séries de cumules. Une rupture de pente indique un changement de la constante de proportionnalité (Searcy and Hardison 1960, Wigbout, 1973; Kalra and Kumar, 1989, Zaho et al., 2004). Le but de ces courbes est de vérifier la cohérence des données au fil du temps et d'identifier les changements dans les tendances. La cassure de pente ainsi que l'angle formé par les 2 droites indiquent la date et le degré du changement de relation entre les 2 variables. Cette méthode, bien que très répandue dans l'analyse des séries pluviométriques s'est vue généraliser à d'autres phénomènes hydro-climatiques. Ainsi, Hindall (1991) ; Walling et al., (2003) ; Walling (2006) et Iadanza et Napolitano (2006) se sont basés sur cette méthode pour analyser à long terme l'influence de l'action entropique sur le transport fluviaux des sédiments. Par cette approche, des auteurs comme Ruteledge (1985) ont analysé le comportement du ruissellement et d'autres les prélèvements d'aquifère (Alansi et al., 2009).

RESULTATS

Pour les stations pluviométriques (Meffrouche et Beni Bahdel), le coefficient de variation ainsi que le coefficient d'immodération (rapport entre les hauteurs maximale et minimale) des pluies annuelles révèlent une variabilité assez importante des pluies. Cependant, ces coefficients sont quasiment identiques et avoisinent respectivement 30% et 3,7. De même, les coefficients de variation appliqués aux apports annuels alimentant les barrages Meffrouche et Beni Bahdel sont sensiblement voisins mais, sont plus de deux fois plus importants que ceux des précipitations justifiant ainsi une variabilité plus accentuée (tableau 3). Par contre, le coefficient d'immodération diffère considérablement entre les deux sites. Il est de l'ordre de 42,4 à Meffrouche et 29,2 à Béni Bahdel. Les valeurs fortement positives du coefficient d'asymétrie montrent que les apports annuels aussi bien pour les précipitations que pour les apports en eau, sont en majorité inférieurs aux moyennes annuelles et confirment aussi l'existence, bien qu'en nombre minime, de valeurs très excédentaires (tableau 3).

L'examen des variations chronologiques des indices SPI et SSFI (figure 2) dont les principales statistiques sont résumées dans le tableau 4, permet de constater que les valeurs extrêmes ne sont pas nombreuses. Les pluies n'ont pas atteint des seuils d'humidité excessive. Par contre, une diminution considérable des pluies a été observée durant les années 1965-66 et 2007-08 à Meffrouche et 1965-66, 1981-82, 1982-83 et 2007-08 à Béni Bahdel. Cependant, la succession d'années à humidité ou à sécheresse légères a conduit soit à une accumulation considérable d'apports en eau soit

à une sécheresse latente. A Béni Bahdel, une seule année à écoulement abondant a été enregistrée (1973-74) au cours de laquelle le cours d'eau a véhiculé 3 fois la capacité du barrage. Cette année où la pluviométrie n'est pas la plus importante de la période d'étude succède à 6 autres années humides en pluviométrie. Les années les plus sèches en apports en eau, ont été observées en 1983-84 et 2007-08 à Meffrouche. L'année 1983-84 succède à huit années en majorité déficitaires quant à l'année 2007-08, elle est la conséquence d'une sécheresse qui a sévi dans la région depuis le début des années quatre-vingt. Pendant cette dernière année, la réserve du barrage a atteint un niveau alarmant (4000 m³ atteinte le 07/08/2008).

Tableau 3. Principaux paramètres statistiques caractérisant les distributions des précipitations (mm) et des apports en eau aux barrages (Hm³) aux échelles annuelles et saisonnières

		1	2	3	4	5	6
Pluie Annuelle	Mef.	659,4	1062,4	281,0	196,2	29,8	5,6
	B.Bah	468,7	756,1	202,2	142,1	30,3	10,1
Apport Annuel	Mef.	12,6	33,9	0,8	8,6	68,6	68,3
	B.Bah	50,7	172,7	5,9	35,7	70,5	109,7
Pluie saison humide	Mef.	10,4	29,1	0,5	7,7	74,1	82,5
	B.Bah	354,6	670,7	78,2	137,9	38,9	21,9
Apport saison humide	Mef.	496,8	947,1	100,9	180,6	36,3	30,7
	B.Bah	39,3	145,8	4,1	31,2	79,2	121,9
Pluie saison sèche	Mef.	162,6	452,3	26,0	81,6	50,2	83,6
	B.Bah	114,1	272,0	17,3	58,1	50,9	84,3
Apport saison sèche	Mef.	2,1	9,3	0,06	1,8	81,8	205,0
	B.Bah	11,3	30,3	0,4	7,3	66,4	76,0

1 : Moyenne (mm/Hm³) ; 2 : Maximum (mm/Hm³) ; 3 : Minimum (mm/Hm³) ; 4 : Ecart type (mm/Hm³) ; 5 : Coef. Variation (%) ; 6 : Coef. Asymétrie (%).

Pour les 2 sous bassins, les valeurs du SPI-12 varient dans un même intervalle [-2,24 ; +1,79]. Les valeurs négatives et positives ont des moyennes similaires. Elles avoisinent respectivement -0,90 et +0,75. Quant à l'indice SSFI-12, il présente des caractéristiques différentes entre les 2 sous bassins. Il oscille entre -2,30 et +1,80 à Meffrouche et entre -1,99 et +2,39 à Béni Bahdel. Les moyennes des valeurs positives et négatives montrent que l'amplitude de variation des apports en eau est plus importante que celle des précipitations (tableau 4).

L'évolution chronologique du SPI-12 et SSFI-12 montre une tendance globale à la baisse et donc à la sécheresse (figure2). A partir de la pente des droites de régression, la baisse moyenne annuelle du SPI-12 est de

l'ordre de 2,8% à Meffrouche et 2,4% à Béni Bahdel. Pour le SSFI-12, la baisse moyenne est plus prononcée. Elle est de 3,6% pour le bassin versant de Meffrouche et 3,2% pour Béni Bahdel. Malgré cette tendance à la sécheresse, la période d'étude a été majoritairement occupée par des séquences d'humidité et de sécheresse légères. L'intervalle $[-0,99 ; +0,99]$ correspond à la classe modale et occupe plus de 60% des valeurs des indices SPI-12 et du SSFI-12 (tableaux 5 et 6).

Il n'empêche que des années particulières ont été très humides ou extrêmement sèches exprimées par une valeur absolue du SPI-12 et du SSFI-12 supérieure à 2. Selon Edwards et McKee (1997), des valeurs du SPI inférieures à - 2.0 (sécheresse extrême) sont susceptibles d'apparaître 2 à 3 fois en 100 ans (Livada et Assimakopoulos, 2007). Ce résultat est observé pour la station de Meffrouche avec une fréquence d'apparition de 3 fois en 100 ans. Par contre, pour la station de Béni Bahdel, la fréquence des sécheresses extrêmes est plus importante avec une probabilité de 6,3 fois en 100 ans (tableau 5).

La variabilité des pluies à l'échelle saisonnière est encore plus accentuée ($38,9 < C_v < 74,1\%$) que celle observée au pas annuel. Les pluies, quoique concentrées principalement durant les saisons d'hiver et de printemps, accusent des fluctuations importantes au cours d'un même mois d'une année à une autre. De plus le contraste entre les saisons est important. En général, 3 à 4 mois de l'année sont sans pluies alors que le maximum mensuel et parfois important et atteint jusqu'à 7 fois la pluie moyenne mensuelle (tableau 3).

Etroitement liés à la pluviométrie, les apports en eau subissent la variabilité intra-annuelle des précipitations (Bergaoui et Alouini, 2001). Cependant, à l'échelle saisonnière, les seuils de sécheresse et d'humidité sont plus prononcés que ceux enregistrés pour l'année hydrologique complète. Les valeurs du SPI oscillent entre -3,17 et +2,55 alors que celles du SSFI varient de -2,84 et +2,68. Ces valeurs ne traduisent pas l'état de sécheresse ou d'humidité qu'ont connu les bassins tout au long de la période d'étude car ces valeurs extrêmes n'ont été que ponctuelles. Les années à humidité et à sécheresse légères occupent de 60 à 74% de la période étudiée (tableaux 5 et 6). Pendant la saison humide où l'on note une certaine proportionnalité entre les 2 indices, la tendance est décroissante avec une légère prononciation de celle du SSFI. Au cours de la saison sèche, la tendance des précipitations n'est pas claire. La succession des années humides et sèches est désordonnée. Les écoulements ont une allure décroissante. Leurs indices sont parfois très différents de ceux des

précipitations. Pendant l'année 1968-69, pour des SPI-6S proches de zéro on a enregistré des SSFI-6S inférieurs à -2,6. Quoique l'étendue de variation des indices SPI et SSFI soit plus large pendant les saisons par rapport à l'année hydrologique complète (tableau 6), les moyennes de ces indices montrent plus d'humidité et moins de sécheresse.

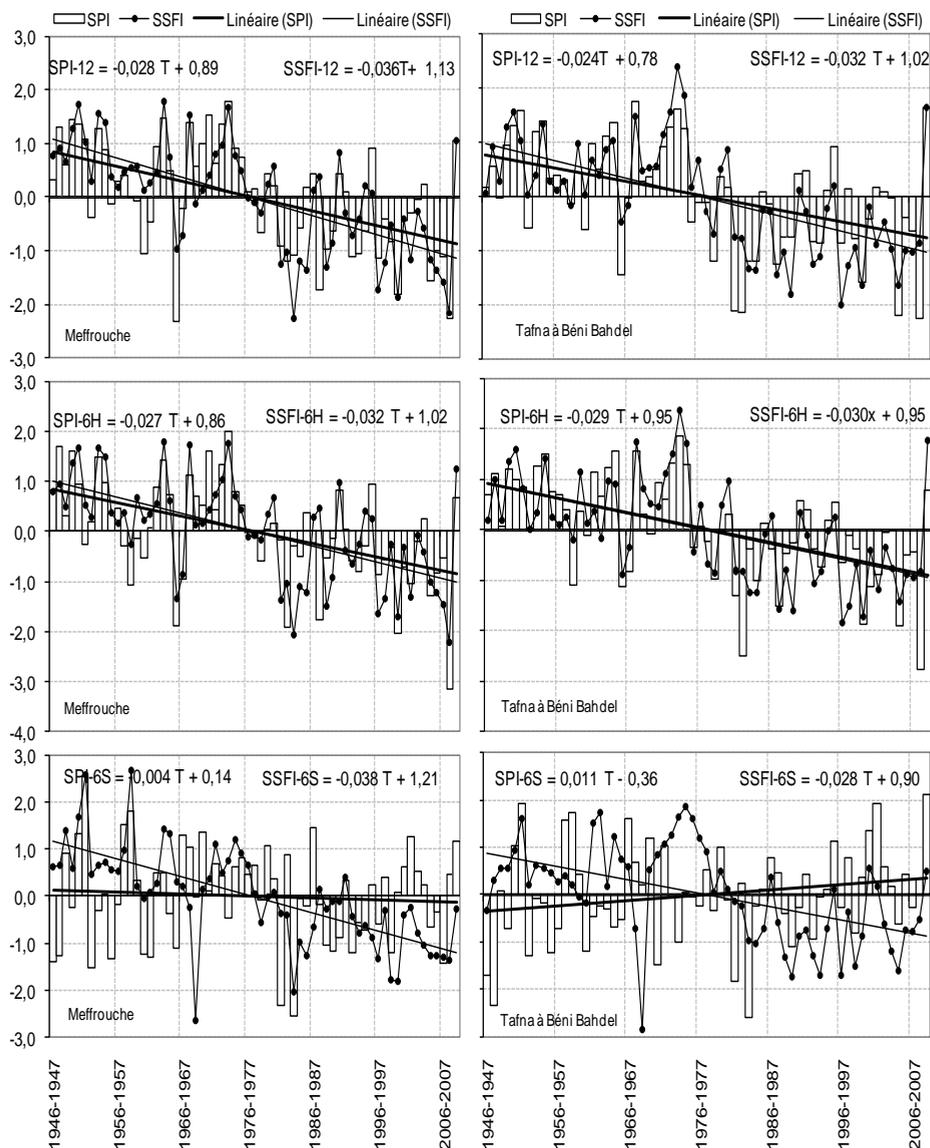


Fig. 2. Evolution des indices SPI et SSFI aux échelles annuelle et saisonnières à Meffrouche et la Tafna à Béni Bahdel

Tableau 4. Principaux paramètres statistiques des indices SPI et SSFI

		1	2	3	4	5
Meffrouche	SPI-12	+0,77	-0,92	+1,79	-2,33	-0,29
	SPI-6-H	+0,76	-0,81	+2,01	-3,17	-0,49
	SPI-6-S	+0,78	-0,83	+2,55	-2,56	-0,17
	SSFI-12	+0,75	-0,95	+1,80	-2,26	-0,28
	SSFI-6-H	+0,74	-0,94	+1,77	-2,22	-0,23
	SSFI-6-S	+0,75	-0,80	+2,68	-2,64	+0,06
B.Bahdel	SPI-12	+0,72	-0,89	+1,76	-2,24	-0,36
	SPI-6-H	+0,75	-0,84	+1,85	-2,78	-0,53
	SPI-6-S	+0,81	-0,73	+2,12	-2,60	-0,14
	SSFI-12	+0,78	-0,88	+2,39	-1,99	+0,11
	SSFI-6-H	+0,76	-0,92	+2,37	-1,84	+0,20
	SSFI-6-S	+0,81	-0,85	+1,86	-2,84	+0,30

1 : moyenne positive ; 2 : moyenne négative ; 3 : maximum positif ; 4 : maximum négatif ; 5 : coefficient d'asymétrie.

Tableau 5. Classes du SPI et fréquences d'occurrence

Degré	Fréquence Théorique (%)	Fréquence (%)					
		B.Bahdel			Meffrouche		
		SPI-12	SPI-6-H	SPI-6-S	SPI-12	SPI-6-H	SPI-6-S
Humidité extrême	2,3	0	0	1,59	0	1,59	1,59
Humidité forte	4,4	6,35	6,35	7,94	3,17	4,76	3,17
Humidité modérée	9,1	11,11	11,11	9,52	15,87	6,35	12,70
Humidité légère	33,9	38,10	34,92	28,57	34,92	38,10	34,92
Sécheresse légère	33,9	28,57	31,75	38,10	25,39	36,51	25,40
Sécheresse modérée	9,1	7,94	7,94	7,94	12,70	4,76	17,46
Sécheresse forte	4,4	1,59	4,76	3,17	4,76	4,76	1,59
Sécheresse extrême	2,3	6,35	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17

Pour analyser l'homogénéité ainsi que le comportement fluvial à long terme (63 ans) en réponse aux apports pluviométriques, nous avons introduit la méthode "double masse". La mise en relation des valeurs cumulées en pourcentage des apports en eau et des précipitations aux échelles annuelle et saisonnières (humide et sèche) permet d'obtenir une ou des droites de régression reliant sur une échelle arithmétique un ensemble de points représentant les couples de valeurs des 2 paramètres (Fig. 3).

Tableau 6. Classes du SSFI et fréquences d'occurrence

Degré	Fréquence Théorique (%)	Fréquence (%)					
		B.Bahdel			Meffrouche		
		SSFI 12	SSFI 6-H	SSFI 6-S	SSFI 12	SSFI 6-H	SSFI 6-S
Humidité extrême	2,3	1,59	1,59	0	0	0	3,17
Humidité forte	4,4	6,35	7,94	9,52	7,94	7,94	1,59
Humidité modérée	9,1	9,52	6,35	6,35	6,35	6,35	7,94
Humidité légère	33,9	34,92	34,92	39,68	41,27	41,27	38,10
Sécheresse légère	33,9	28,57	33,33	28,57	22,22	19,05	31,75
Sécheresse modérée	9,1	12,70	7,94	6,35	14,29	17,46	11,11
Sécheresse forte	4,4	6,35	7,94	7,94	4,76	4,76	3,17
Sécheresse extrême	2,3	0	0	1,59	3,17	3,17	3,17

Une cassure d'homogénéité plausible a marqué le milieu des années soixante-dix. L'alignement des points le long d'une droite et ce jusqu'à la date de rupture 1977-78 à Meffrouche et 1984-85 à Béni Bahdel confirme la relation étroite et l'influence du paramètre précipitation sur les écoulements. Avant et après la date de rupture les points s'alignent le long de deux droites différentes ayant des coefficients angulaires différents. La pente de la droite exprime le taux d'accroissement des apports en eau en fonction des apports pluviométriques. Ainsi, on remarque que le taux d'accroissement est nettement plus faible durant la seconde phase. Pour le pas annuel et 6 mois humides, la pente après la cassure a chuté de moitié. Pour les 6 mois secs la diminution est encore plus importante (tableau 7).

Tableau 7. Déficit en apport en eau après la date de changement d'homogénéité

Bassin versant	Période	Déficit (%)	Déficit moyen annuel (10^6 m^3)
Meffrouche	Année complète	26,7	6,1
	Saison humide	23,3	4,4
	Saison sèche	40,7	1,6
Tafna à Béni Bahdel	Année complète	20,1	26,8
	Saison humide	14,9	15,4
	Saison sèche	39,4	11,6

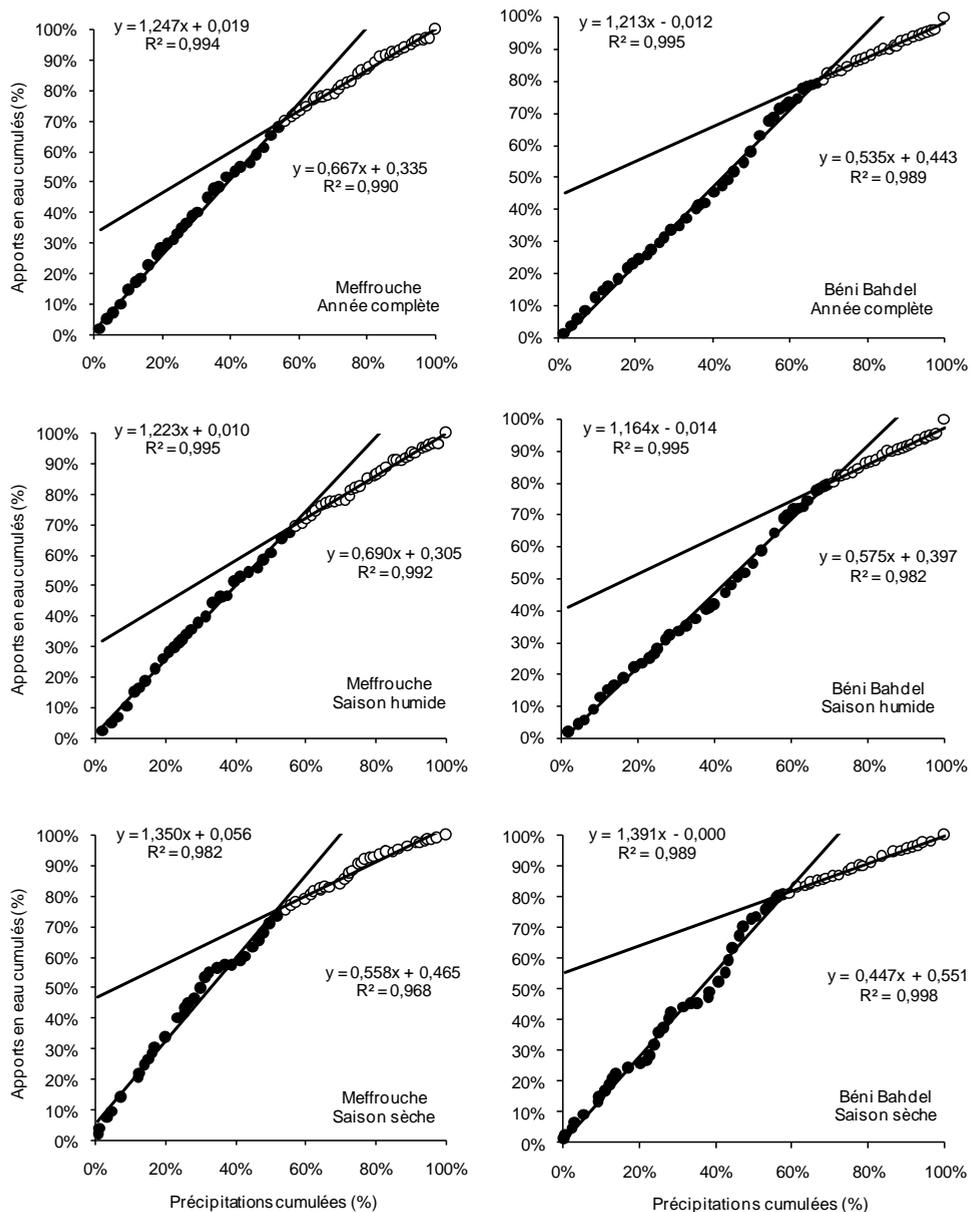


Fig. 3. "Double-mass curves" des apports en eau en fonction des précipitations aux échelles annuelle et saisonnières à Meffrouche et la Tafna à Béni Bahdel

DISCUSSIONS ET CONCLUSION

La tendance chronologique de la pluviométrie est la même pour les deux sites et aux différentes échelles temporelles : annuelle, 6 mois humides et 6 mois secs. Il en est de même pour les apports fluviaux avec une accentuation à la sécheresse sauf pour la saison sèche ou la tendance n'est pas claire pour les apports en eau. Ceci est probablement dû aux averses locales et intenses qui caractérisent la région. De plus, en cette période de l'année l'appauvrissement du couvert végétal et la dessiccation du sol accélèrent le ruissellement superficiel au détriment de l'infiltration. Ainsi le coefficient d'écoulement en période sèche semble plus important qu'en période humide. Ce résultat est en parfaite concordance avec les travaux de recherches sur la susceptibilité des sols à l'écoulement dans les régions arides et semi-arides aux Etats Unis (Thornes 1994 ; Scott 2006).

A l'échelle annuelle, la réponse hydrologique quant aux fluctuations climatiques est quasiment identique pour les deux sites. Cependant, un écart important existe entre les coefficients d'immodération. La configuration des deux bassins versants, notamment la morphométrie et la présence de karst et d'importantes failles géologiques à Meffrouche font que les échanges entre les écoulements superficiels et les nappes phréatiques soient plus importants à Meffrouche qu'à Beni-Bahdel. De cette façon, quand les années sèches se succèdent, la rétention de l'eau par le sous-sol accroît le déficit d'écoulement. L'inverse se produit lors d'une succession d'années humides.

Concernant les 63 années d'étude, et de façon globale, le nombre d'années humides est plus important que le nombre d'années sèches pour les 3 types de SPI et SSFI. Malgré cela, les pics les plus importants sont négatifs. Le résultat saillant est que les valeurs pics sont générées par une succession de déficits ou d'excédents légers.

Les 6 mois humides cumulent en moyenne les trois quarts de l'apport pluviométrique annuel. De plus, ils montrent une forte similitude avec le pas de temps annuel. Contrairement à cela, la saison sèche évolue différemment. Des indices positifs pendant la saison humide correspondent à des indices négatifs pendant la saison sèche et vice versa. Ce comportement est en partie expliqué par la présence d'orages violents qui affectent une partie du bassin versant sans pour autant être enregistré par la seule station pluviométrique dont la position à l'exutoire semble affecter la représentativité du bassin versant.

L'introduction de la méthode " double masse " confirme un changement dans la réponse hydrologique en rapport avec les apports des précipitations. La cassure de l'homogénéité est observée vers les années quatre vingt. Cette date est confirmée par différentes approches abordées dans de nombreuses études menées sur différents bassins versants

méditerranéens. Pour les précipitations, cette rupture concerne l'ensemble des postes pluviométriques de l'Algérie du nord (Laborde, 1993 ; Meddi et Meddi, 2009; Ghenim et al., 2010).

La période avant la date de rupture d'homogénéité est considérée séquence humide. Durant cette dernière, le nombre d'années successives à écoulement excédentaire est plus important que celui à pluviométrie excédentaire car l'apport des nappes phréatiques compense le déficit pluviométrique d'une année ou deux. Au cours de la séquence sèche, l'avènement d'une année à pluviométrie excédentaire au sein d'une période sèche, se traduit par une remontée des apports car la sécheresse favorise l'écoulement par rapport à l'infiltration (Jansson, 1982).

La méthode double masse appliquée au pas de temps 6 mois secs montre une certaine fluctuation des points autour des droites d'ajustement. Une comparaison entre la dispersion des points autour des droites d'ajustement au pas de temps 6 mois secs (figure 3) et les fluctuations du SSFI-12 (figure 3), laisse apparaître une certaine similitude. On remarque que les phases où le taux d'accroissement est accéléré correspondent à des années où le SPI est positif en majorité alors que les phases où le taux d'accroissement est faible correspondent à des années de SSFI-12 négatifs. De là, on estime que les averses, surtout automnales, bien que faibles ont une contribution considérable dans les apports en eau annuels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abramowitz, M. & Stegun, I.A. (1965) Handbook of Mathematical Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications(eds) : New York.
- Alansi, A. W., Amin, M. S. M., Abdul Halim, G., Shafri, H. Z. M., Thamer, A. M., Waleed, A. R. M., Aimrun, W.& Ezrin, M. H. (2009) The Effect of Development and Land Use Change on Rainfall-Runoff and Runoff-Sediment Relationships Under Humid Tropical Condition: Case Study of Bernam Watershed Malaysia, European Journal of Scientific Research, **31**(1), 88-105.
- Benest, M. & Elmi, S. (1978) Précisions stratigraphiques sur le Jurassique inférieur et moyen de la partie méridionale des monts de Tlemcen (Algérie). CR Som Soc Géol France **8**, 295 –96.
- Benfares, A. & Mokrane, N. (1993) Rapport sur la réactualisation de la régularisation du barrage Béni Bahdel (W.Tlemcen). 1er congrès national des grands barrages, Alger, 24-25 mai.

- Bergaoui, M. & Alouini, A. (2001) Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse* **12** (4), 205-213.
- Bouanani, A. (2004) *Hydrologie, Transport solide et Modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie)*. Thèse de doctorat d'état en géologie appliquée, Université de Tlemcen, Algérie.
- Boudjadja, A., Messahel, M. & Pauc, H. (2003) Ressources hydriques en Algérie du Nord, *Rev.Sci.Eau* **16**(3), 285-304.
- Collignon, B. (1986) Hydrogéologies appliquées des aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Thèse de doctorat, Université d'Avignon.
- Edwards, D.C. & McKee, T.B. (1997) Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales. *Climatology Report 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado state University, Fort Collins.
- Filali, B.A. (2004) l'irrigation dans les pays du Maghreb, enjeux stratégiques et défis majeurs, *Revue H.T.E*, 129, 2-7.
- Ghenim, A. (2008) Etude des écoulements et des transports solides dans les régions semi arides méditerranéennes. Thèse de Doctorat en Hydraulique, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie.
- Ghenim, A., Seddini, A. & Terfous, A. (2008) Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien), *Journal des Sciences Hydrologiques* **53** (2), 448-456.
- Ghenim, A., Seddini, A. & Megnounif, A. (2009) Evolution de la pluviométrie et son impact sur les apports en eau superficielle : Cas du bassin versant du Meffrouche - Algérie, XXVII^e rencontres universitaires de Génie civil – Génie civil et développement durable, St Malo du 3- 5 juin.
- Ghenim, A., Megnounif, A., Seddini, A. & Terfous, A. (2010) Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'Oued Tafna à Béni Bahdel (Nord Ouest Algérien), *Sécheresse* **21**(2), 115-120.
- Hindall, S. M. (1991) Temporal Trends in Fluvial-Sediment in Ohio, 1950-1987. *Journal of soil and Water Conservation*. **46**(4), 311-313.
- Hisdal, H. & Tallaksen, L.M. (2003) Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark. *J Hydrol* **281**, 230–247.
- Jansson, M.B. (1982) Land erosion by water in different climates. UNGI Rapp 57,Uppsala University, Sweden.
- Kalra, A. M & Kumar, S. (1989) Changes in water yield and soil loss from a Himalayan catchment following afforestation. *Journal of Modell Simul Controc* **18**(2), 21-29.

- Khaldi, A. (2005) Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida", Thèse de Doctorat d'état en Hydrogéologie, Université d'Oran, Algérie.
- Khan, S., Gabriel, H. F. & Rana, T. (2008) Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrig Drainage Syst* **22**,159–177
- Laborde, J.P. (1993) Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500 000, notice explicative. Projet PNUD/ALG/88/021. Alger : Agence nationale des ressources hydrauliques.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration at time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan 17-23, Anaheim CA, 179-186.
- Meddi, M. & Hubert, P. (2003) Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions*. IAHS publication **278**, 1-7.
- Meddi, H. & Meddi, M. (2009) Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie, *Sécheresse* **20**(1) : 57-65.
- Megnounif, A., Bouanani, A., Terfous, A. & Baba Hamed K. (1999) Distribution statistique de la pluviométrie et mise en évidence de l'influence du relief. (Cas des monts de Tlemcen, Nord Ouest Algérien). *Revue Sciences & Technologie* **12**, 77-80.
- Merriam, C. F. (1937) A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna Valley: *Am. Geophys. Union Trans.*, pt 2: 471-476.
- Modarres, R. (2007) Streamflow drought time series forecasting, *Stoch Environ Res Risk Assess* **21**, 223–233.
- Naresh Kumar, M., Murthy, C. S., Sessa Saib M.V.R. & Royb, P.S. (2009) On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorol. Appl* **16**, 381–389.
- Reyes-Gómez, V.M., Nuñez López, D., Muñoz Robles, C.A., Rodríguez Pineda, J.A., Gadsden, H., López Ortíz, M. & Hinojosa de la Garza, O.R. (2006) Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans le bassin-versant du Río Conchos (État de Chihuahua, Mexique), *Sécheresse* **17** (4), 475-484.

- Ruteledge, A.T. (1985) Use of Double Mass Curves to Determine Drawdown in a long term Aquifer Test in North Central Volusia County. Florida HSSS, Water Resources Investigations Report 84-4309, 29 pages.
- Scott, S.H. (2006) Predicting Sediment Transport Dynamics in Ephemeral Channels: A Review of Literature. US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CHETN-VII-6.
- Searcy, J. K and Hardison C. H, 1960. Double Mass Curves. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1541-B. pp. 66.
- Sharma, T.C. (1997) Estimation of drought severity on independent and dependant hydrologic series. *Water Resources Management* **11**, 35-49.
- Thornes, J. B. (1994) Catchment and channel hydrology. *Geomorphology of Desert Environments*. A. D. Abrams and A. J. Parsons, eds., London: 257-287. Chapman and Hall.
- Walling, D.E.& fang, D. (2003) Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* **39**, 111-126.
- Walling, D.E. (2006) Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers, *Geomorphology* **79**, 192–216
- Wigbout, M. (1973) Limitations in the use of double2mass curves. *Journal of Hydrology* **12** (2), 132-138.
- Wu, H., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., Wilhite, D.A. & Fujiang, W. (2006) Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology* **27**, 65–79.
- Xingcai, L., Zongxue, X. & Bo, L. (2009) Spatio-Temporal Characteristics of Standardized Precipitation Index in the Taihu Basin during 1951-2000, *Wuham University Journal of Natural Sciences*, **14** (6), 518-524.
- Yebdri, D., Errih, M., Hamlet, A. & Tidjani, A.B. (2007) The Water Resources Management Study of the Wadi Tafna Basin (Algeria) Using the Swat Model, *African Water Journal*, **1**(1), 33-47.
- Yevjevich, V. (1967) An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Colorado State University, Hydrology Paper n° 23.
- Zaho, W. W., Fu, B. J., Meng, Q. H., Zhang, Q. J . & Zhang, Y. H.(2004) Effects of land-use pattern change on rainfall-runoff and runoff-sediment relations: a case study in Zichang watershed of the loess plateau of china. *Journal of Environmental science* **16**(3), 436-442.