

Physio-Géo

Géographie physique et environnement

Volume 7 | 2013

Varia 2013

Articles

Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie)

ABDERRAHMANE NEKKACHE GHENIM AND ABDESSELAM MEGNOUNIF

p. 35-49

<https://doi.org/10.4000/physio-geo.3173>

Abstracts

Français English

Situé au Nord Ouest de l'Algérie, le bassin versant en amont du barrage Meffrouche, d'une superficie de 89 km², a reçu des précipitations annuelles moyennes de 659 mm (à Meffrouche) sur une période de 68 années (1943-44 à 2010-11). Ce bassin, à l'instar de l'ensemble du Maghreb, subit depuis quelques décennies une sécheresse persistante. Différentes approches utilisant les données pluviométriques et hydrologiques sont utilisées dans cette étude afin de préciser le degré de sévérité de cette sécheresse. Les résultats obtenus montrent l'existence d'une cassure d'homogénéité vers le milieu des années 1970. La période avant cette date est qualifiée d'humide, celle qui suit de sèche. Le déficit de la seconde période par rapport à la première, est évalué à près de 30 % pour les précipitations et à plus de 60 % pour les écoulements. Si les années très humides ou extrêmement sèches ont été observées, les deux périodes mises en évidence montrent une humidité, pour l'une, et une sécheresse, pour l'autre, d'intensité légère. Une ou deux années déficitaires en pluviométrie au milieu d'années excédentaires, n'a pas d'effet direct sur l'alimentation en eau des barrages. Par contre, la succession de plusieurs années à pluviométrie moyenne peut générer une année aux écoulements abondants.

Meffrouche watershed, located in North-West Algeria with a land area of 89 km², collects a mean annual rainfall of 659 mm (Meffrouche), computed over a period of 68 years (1943-1944 to 2010-2011). This basin, like most of the Maghreb, has been undergoing a persistent drought for a few decades. Different approaches, using a dataset of precipitation and depth of runoff, are addressed in this study to highlight the severity of this drought. The results obtained show the existence of a break of homogeneity located in the mid-1970s. The previous period is classified as wet, the one after is dry. The deficit between the two periods, valued at nearly 30 % for precipitation caused a drop in flow of more than 60 %. Periods of wetness and dryness are highlighted with a mild tendency to drought. Although some years have been very wet or extremely dry, the appearance



of one or two years deficient rainfall in the mid-year surplus has no direct effect on water supplies in dam. For cons, the succession of several years with medium rainfall can generate a strong flow of water year.

Index terms

Index de mots-clés : Algérie, lame d'eau écoulée, Meffrouche, précipitations, rupture, sécheresse, SPI

Index by keywords: Algeria, break, drought, Meffrouche, rainfall, runoff, SPI

Full text

I - Introduction

- 1 Au Maghreb, les ressources hydriques sont vulnérables aux variations d'un climat aux caractères semi arides ou arides. C'est un climat relativement doux, avec deux saisons distinctes : une saison fraîche où se concentre l'essentiel des pluies de l'année et une saison chaude et sèche caractérisée par l'occurrence de canicules et l'absence presque totale de pluies (N. ROUSSET et R. ARRUS, 2006). Dans cette région, lamobilisation des ressources en eau se fait pour une grande part grâce à la construction de barrages (A. BOUDJADJA *et al.*, 2003). Or, depuis quelques décennies, on assiste à une augmentation des températures, de l'évaporation et une baisse significative des précipitations et des écoulements (A. AGOUMI *et al.*, 1999 ; M. TOUAZI *et al.*, 2004 ; M. MEDDI *et al.*, 2009 ; J.M. GARCIA-RUIZ *et al.*, 2011 ; J. SCHILLING *et al.*, 2012). En Algérie, la diminution de la pluviosité a engendré des déficits d'écoulement allant de 37 à plus de 70% de l'est vers l'ouest du pays (M. MEDDI et P. HUBERT, 2003), contrecarrant ainsi l'effort considérableconsenti pour la multiplication des ouvrages de stockage. Cette sécheresse s'est traduite par des pénuries d'eau, le déclin de l'agriculture et l'arrêt de certaines usines consommatrices d'eau. Cela a donc entraîné, non seulement des dommages environnementaux, mais aussi la baisse de la qualité de la vie (H. HISDAL et L.M. TALLASKEN, 2003 ; J.M. GARCIA-RUIZ *et al.*, 2011).
- 2 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 les diverses utilisations de plus de 2 millions de personnes (D. YEBDRI *et al.*, 2007). Ce bassin, doté de 5 barrages d'une capacité globale de 380.106 m³, cumule depuis le milieu des années soixante-dix un déficit pluviométrique estimé à 25 % (A.N. GHENIM *et al.*, 2010). Cette diminution de la pluviosité a engendré une baisse sans cesse croissante des ressources en eau superficielles et souterraines (A. KHALDI, 2005). Le niveau de stockage des barrages a atteint des niveaux alarmants, au point que la cuvette du barrage Meffrouche (Photo 1) s'est complètement asséchée en octobre 2006.

Photo 1 - Barrage Meffrouche et lac de retenue vus de la rive gauche. [cliché : A.N. GHENIM et A. MEGNOUNIF, février 2013]



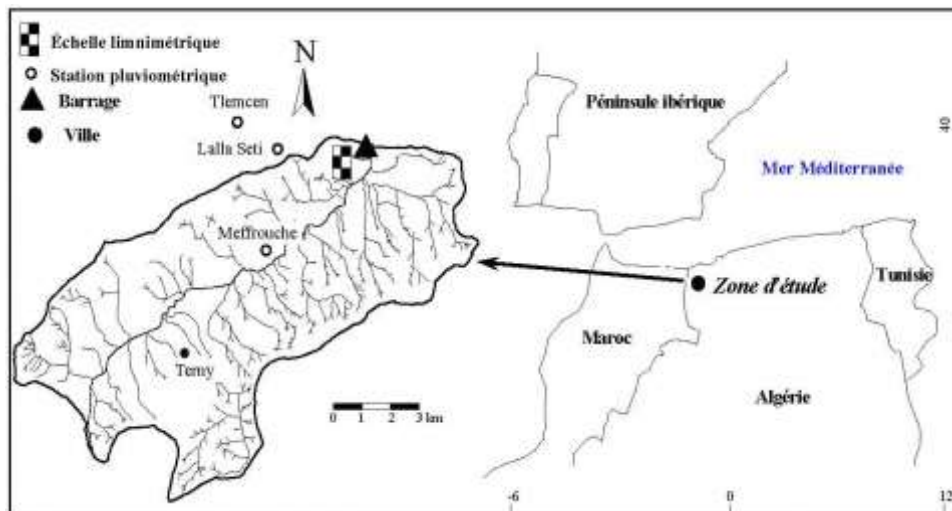


- 3 Afin de mettre en évidence les séquences pluviométriques sèches et d'apprécier leurs conséquences sur la réponse des cours d'eau dans cette région, nous nous sommes intéressés au bassin d'alimentation du barrage Meffrouche. Ce choix est lié à la disponibilité de séries de mesure assez longues pour les précipitations comme pour les écoulements. De plus, le barrage Meffrouche revêt une grande importance pour la ville de Tlemcen, car il était prévu pour contribuer à son alimentation en eau potable.

II - Le terrain d'étude

- 4 Le barrage Meffrouche, d'une contenance de 15.106 m³, a été mis en eau en 1963. Son bassin d'alimentation est situé entre 34°45' et 34°52' de latitude Nord et entre 1°15' et 1°25' de longitude Ouest. Relativement compact (coefficient de compacité de GRAVELIUS : 1,37), il occupe une superficie de 86 km², pour un périmètre de 46,3 km. Ce bassin est drainé par l'oued En-Nachef (Fig. 1), long de 14,25 km, au réseau bien hiérarchisé.

Figure 1 - Situation du bassin d'alimentation du barrage Meffrouche et dispositif de mesure disponible.



- 5 Le bassin versant, à caractère montagneux (indice de pente global : 0,016), est limité par un ensemble de djebels couverts de forêts, dont le point culminant est à 1579 m d'altitude (djebel Nador). La pente des versants dépasse 25 % dans la partie amont du bassin, mais les valeurs s'adoucissent à l'approche de l'exutoire.



- 6 Le substrat est constitué principalement de grès et de calcaires du Secondaire. Le substrat est constitué, au nord, de marnes miocènes, dans lesquelles sont intercalés des bancs de grès jaunâtres très durs, et, au sud, de grès et de calcaires du Jurassique.
- 7 Cistes (*Cistus daniferus*) et chênes lièges (*Quercus suber*) sont abondants en terrains gréseux, où ils constituent les forêts de Hafir et Zarifet. Les principales activités agricoles (cultures céréalières et prairies naturelles) sont concentrées sur les marnes.
- 8 Les données sur les écoulements nous ont été communiquées par les services de l'ANBT (Agence Nationale des Barrages et des Transferts). Elles intègrent les mesures d'une station hydrométrique gérée sur l'oued En-Nachef, pour la période allant de 1943 jusqu'à la mise en eau du barrage, et celles obtenues ensuite à partir du suivi du niveau du lac. En effet, depuis 1963, des lectures systématiques sont effectués à une échelle limnimétrique placée à proximité de la digue, chaque jour à 8h00 du matin en période d'écoulement normal ou en étiage et toutes les 30 minutes pendant les crues. Les apports en eau au barrage sont déduits des variations du volume stocké, déterminé à partir des hauteurs d'eau mesurées. Les calculs intègrent, outre les lâchers effectués en période de crue, les prélèvements pour l'irrigation et l'alimentation de la ville de Tlemcen, l'évaporation directe du plan d'eau, évaluée à partir de mesures en bac Colorado, ainsi que les fuites sous le barrage, qui sont récupérées dans un souterrain à l'aval de l'ouvrage. Les précipitations tombées directement sur le lac sont comptabilisées avec les écoulements du cours d'eau. L'étude de l'ensemble de la chronique disponible depuis 1943 ne montre pas de rupture liée au changement de mode de mesure (voir *infra*).
- 9 Le dispositif en place sur le terrain d'étude comprend aussi une station pluviométrique implantée à proximité du barrage Meffrouche (voir Fig. 1 et Photo 1) et gérée par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). En complément de celle-ci, nous avons pris en compte deux stations situées à proximité, celles de Tlemcen et de Lalla Setti (Tab. I), également gérées par l'ANRH, qui sont situées respectivement à 3,8 et 4,7 km de celle de Meffrouche. Certes, les valeurs ainsi obtenues ne sont sans doute pas parfaitement représentatives des précipitations effectives sur le bassin versant, mais elles le sont certainement des variations relatives interannuelles de la pluviosité. Les fichiers qui nous ont été communiqués (pour la période de septembre 1943 à août 2011) ne présentent pas de lacunes, mais il nous est impossible d'évaluer la part des reconstitutions.
- 10 En raison de la proximité des stations, et donc faute de pouvoir spatialiser les pluies, les précipitations moyennes sur le bassin sont évaluées en effectuant la moyenne des trois stations.

Tableau I - Précipitations annuelles moyennes (mm) et coefficients de variation aux stations pluviométrique de Meffrouche, Lalla Setti et Tlemcen sur la période septembre 1943 - août 2001.

Station	X	Y	Z (m)	P _{moy} (mm)	CV
Meffrouche	01°17'31"	34°51'19"	1110	659	0,295
Lalla Setti	01°19'17"	34°51'50"	1007	611	0,282
Tlemcen	01°19'30"	34°52'26"	810	586	0,269
Moyenne	-	-	-	618	0,261

CV = coefficient de variation (= écart-type / précipitations annuelles moyennes).

- 11 Comme sur l'ensemble du Maghreb, l'année climatique présente deux saisons bien distinctes : une saison humide et fraîche (hiver et printemps) et une saison sèche et chaude (été et automne). Au cours de la période d'étude (de septembre 1943 à août 2011), la saison humide totalise 75 % des précipitations (pour la moyenne des trois stations) et 83 % des apports en eau au barrage.



III - Les approches mises en œuvre

12 Les fluctuations de la pluviométrie et des écoulements sont analysées au moyen de trois tests statistiques d'homogénéité, appliqués aux séries annuelles et saisonnières (humides et sèches).

13 1/ Le test de A.N. PETTITT, non paramétrique, est utilisé pour détecter le changement de stationnarité (A.N. PETTITT, 1979 ; H. LUBES *et al.*, 1994 ; H. LUBES-NIEL *et al.*, 1998). Ce test, reconnu par sa robustesse, dérive du test de MANN-WHITNEY (P. DAGNÉLIE, 1970). Il est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne. L'absence de rupture dans une série chronologique (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant " t " compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) $i=1$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable U_t, N définie par :

$$U_{tN} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (1)$$

où $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$, avec $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$, 0 si $X = 0$ et -1 si $X < 0$.

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est proposée.

14 2/ La méthode bayésienne de A.F.S LEE et S.M. HEGHINIAN est une approche paramétrique qui requiert une distribution normale des variables étudiées. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. La méthode établit la distribution de probabilité a posteriori de la position dans le temps d'un changement (A.F.S. LEE et S.M. HEGHINIAN, 1977 ; H. LUBES *et al.*, 1994). La procédure repose sur le modèle suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i=1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i=\tau+1, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

15

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 . τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. La procédure bayésienne se fonde sur la distribution marginale a posteriori de τ et δ . Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

16 3/ La procédure de segmentation initiée par P. HUBERT a pour principe de découper la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit nettement différente de la moyenne des segments voisins (P. HUBERT *et al.*, 1989 ; H. LUBES-NIEL *et al.*, 1998 ; P. HUBERT, 2000). Pour un ordre donné, la segmentation retenue est celle qui minimise l'écart quadratique entre la moyenne du segment et celle de la série.

Toute série X_i , $i=i_1, i_2$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq N$ où $i_1 < i_2$, constitue un segment de la série initiale des (X_i). Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m de cette série. À partir d'une segmentation particulière d'ordre m pratiquée sur la série initiale, on définit : I_k , $k = 1$ à m , le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale de k ème segment ; x_k , la moyenne du k ème segment ; D_m , l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée :

$$D_m = \sum_{k=1}^{k=m} d_k \quad \text{avec} \quad d_k = \sum_{i=I_{k-1}+1}^{i=I_k} (X - x_k)^2 \quad (3)$$

17

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum et que les moyennes de deux segments contigus soient significativement différentes.



18 La méthode du simple cumul (C.F. MERRIAM, 1937) est introduite dans cette étude afin de vérifier l'homogénéité des données et de déceler les changements de comportement des cours d'eau. En représentant les valeurs cumulées d'une variable en fonction du temps, on obtient une droite dont toute rupture de pente traduit une modification de la relation, en raison soit d'un problème métrologique, soit d'un changement de tendance.

19 Afin d'apprécier le degré de sécheresse pluviométrique, on utilise l'indice SPI (Standardized Precipitation Index) (T.B. MAC KEE *et al.*, 1993 ; D.C. EDWARDS et T.B. MAC KEE, 1997). Celui-ci prend en compte la variabilité de la pluie pour des périodes définies, de préférence les plus longues possibles. Il est adapté pour surveiller la sécheresse et l'évaluation des scénarios climatiques pour des durées de 1, 3, 6, 12, 24, 36, 48 mois et même plus (M.J. HAYES *et al.*, 1999). Le SPI, dont 9 classes équiprobables délimitent les seuils de sécheresse et d'humidité (Tab. II), peut être formulé comme suit :

$$\text{SPI} = S \frac{1 - (C_2 t + C_1)t + C_0}{((d_3 t + d_2)t + d_1)t + 1} \quad \text{où } t = \sqrt{(\ln 1/H(x))^2} \quad (4)$$

$$G(x) = \frac{\int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad \text{avec } \Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (5)$$

où : x représente les valeurs des précipitations ; β et γ sont les paramètres d'échelle et de forme de la fonction Γ ; C_0 , C_1 , C_2 et d_1 , d_2 , d_3 sont les paramètres de calcul, ayant pour valeurs : $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$; $G(x)$ désigne la probabilité de distribution des précipitations. Lorsque $G(x) > 0,5$, $H(x) = 1 - G(x)$, $S = 1$. Pour $G(x) \leq 0,5$, $H(x) = G(x)$, $S = -1$.

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

Valeurs du SPI ou duSSFI	Degré d'humidité ou de sécheresse
$\geq +2,0$	Humidité extrême
+1,5 à +1,99	Humidité forte
+1,0 à +1,49	Humidité modérée
+0,1 à +0,99	Humidité légère
0	Normalité absolue
-0,1 à -0,99	Sécheresse légère
-1,0 à -1,49	Sécheresse modérée
-1,5 à -1,99	Sécheresse forte
$\leq -2,0$	Sécheresse extrême

20 Pour l'appréciation de 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 R. MODARRES (2007). Le SSFI offre l'avantage de contrôler la sécheresse hydrologique et/ou l'approvisionnement en eau à court, moyen et long terme. Selon V. 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 interannuelle entre 1943 et 2011. Les valeurs négatives du SPI et/ou du SSFI correspondent alors à des déficits. Les valeurs positives, en revanche, témoignent d'années bénéficiant de précipitations et/ou d'écoulements excédentaires.

IV - Résultats

21 Pour les précipitations annuelles, les coefficients de variation, ainsi que les coefficients d'immodération (rapport entre les hauteurs maximale et minimale), révèlent une très forte variabilité d'une année à l'autre. À la station de Meffrouche, sur les 68 années d'observation considérées, les précipitations annuelles ont varié de



281 mm (en 1965-66) à 1062 mm (en 1973-74). Ainsi, pour deux années consécutives récentes, les précipitations sont-elles passées de 289 mm en 2007-08 à 871 mm l'année suivante. En considérant les saisons, la variabilité interannuelle est particulièrement marquée dans le cas de la saison sèche, pour laquelle le coefficient d'immodération correspondant à la pluie moyenne des trois stations atteint 5,37 (Tab. III).

Tableau III - Principaux paramètres statistiques caractérisant les distributions des précipitations (mm) et des lames d'eau écoulées (mm) aux échelles annuelle et saisonnières sur la période de 1943-44 à 2010-11.

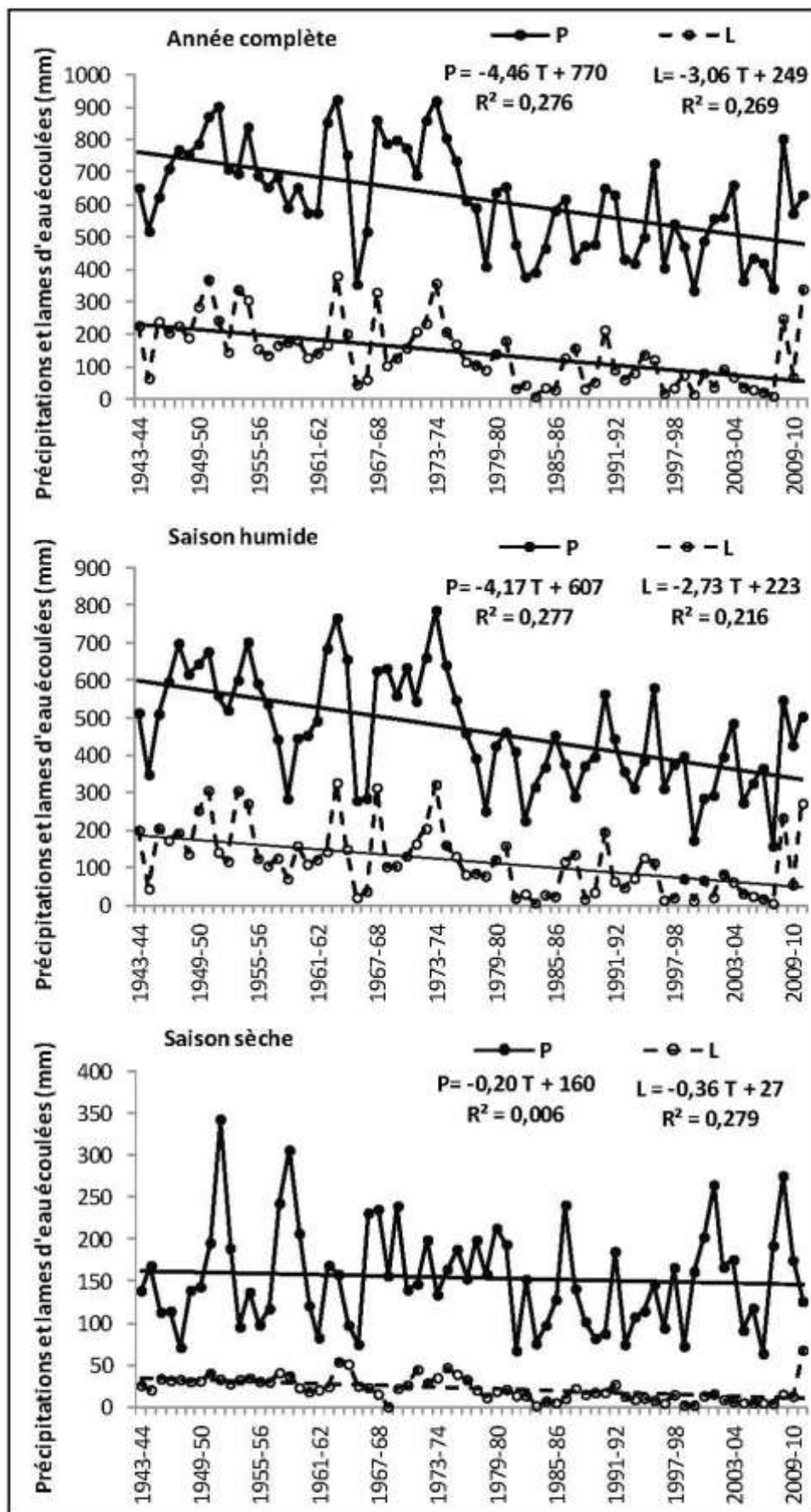
	Précipitations			Lames d'eau écoulées		
	Année	Saison humide	Saison sèche	Année	Saison humide	Saison sèche
Moyenne (mm)	618,5	465,8	152,7	145,0	120,1	24,9
Maximum (mm)	924,5	786,9	343,0	394,4	338,5	108,7
Minimum (mm)	335,6	158,7	63,9	9,0	5,6	0,7
Écart type (mm)	161,3	149,1	60,7	100,0	89,3	20,4
Coef. Variation	0,261	0,320	0,395	0,689	0,744	0,820
Coef. Asymétrie	0,058	0,318	0,846	0,708	0,849	2,073
Coef. Immodération	2,8	5,0	5,4	43,8	60,5	155,3

Coefficient de variation : écart-type / valeur moyenne. Coefficient d'asymétrie (FISHER) : moment centré d'ordre 3 normalisé \times cube de l'écart-type. Coefficient d'immodération : valeur maximale / valeur minimale.

- 22 L'irrégularité interannuelle des précipitations saisonnières et des lames d'eau écoulées, annuelles et saisonnières est indirectement confirmée par les valeurs positives et élevées du coefficient d'asymétrie de FISHER. En effet, il apparaît ainsi que les moyennes dépassent nettement les médianes, ce qui s'accompagne bien sûr de valeurs annuelles parfois très excédentaires. La variabilité est particulièrement forte pour les lames d'eau écoulées, avec des coefficients de variation qui sont plus du double de ceux des précipitations. De même, le coefficient d'immodération des lames d'eau écoulées est très élevé, puisqu'il avoisine 44 pour les valeurs annuelles, 60 pour la saison humide et 155 pour la saison sèche (Tab. III).
- 23 Les courbes de tendance, aussi bien pour les pluies que pour les lames d'eau écoulées traduisent des diminutions en fonction du temps aux trois échelles temporelles (Fig. 2). Les pentes des droites de régression sont plus fortes pour les précipitations que pour les lames d'eau écoulées. La baisse moyenne des précipitations est de 4,46 mm/an, soit 0,7 % par rapport à la moyenne interannuelle. Pour les lames d'eau écoulées, elle est de 3,06 mm/an, soit 2,1 % de la moyenne interannuelle. Les déficits enregistrés portent principalement sur la saison humide, à 94 % pour les pluies et à 89 % pour les lames d'eau écoulées. Pour la saison sèche, la tendance à la baisse est bien sûr nettement plus sensible sur les lames d'eau écoulées que sur les pluies.

Figure 2 - Fluctuations annuelles et saisonnières des précipitations (P, en mm) et des lames d'eau écoulées (L, en mm) de 1943-44 à 2010-11.





T : temps depuis l'origine, représenté par le rang de l'année dans la chronique.

- 24 Les tests statistiques indiquent qu'il y a bien eu rupture d'homogénéité dans les séries pluviométriques et hydrométriques, exception faite pour les précipitations de saison sèche, pour lesquelles les tests donnent des résultats contradictoires (Tab. IV). La date de rupture se situerait entre le milieu des années 1970 et le début des années 1980 (Tab. IV et V). Les déficits enregistrés entre les périodes avant et après la date de



rupture selon la segmentation de P. HUBERT (Tab. IV) sont autour de 30 % pour les précipitations et 60 % pour les lames d'eau écoulées.

Tableau IV - Tests statistiques de rupture des précipitations (P).

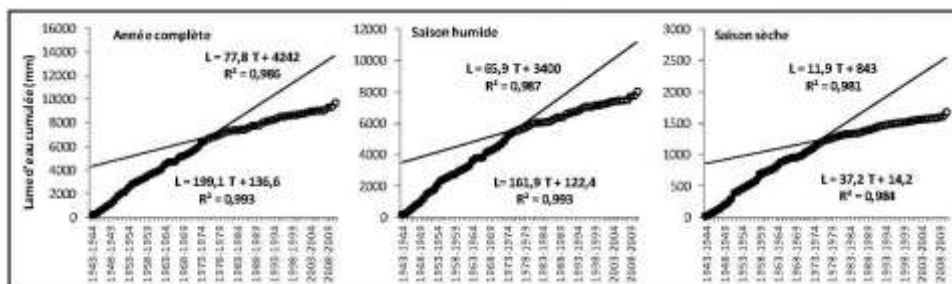
Station	Échelle temporelle	Année de rupture selon les tests de			P avant rupture (mm)	P après rupture (mm)	Diminution (%)
		PETTIT	LEE et HEGHINIAN	HUBERT			
Meffrouche	Annuelle	1977-78	1977-78	1977-78	759,8	548,3	-27,8
	Saison humide	1976-77	1975-76	1975-76	589,5	405,8	-31,2
	Saison sèche	1980-81	1980-81	-	162,6	-	-
Lalla Setti	Annuelle	1975-76	1975-76	1975-76	708,6	494,2	-30,2
	Saison humide	1975-76	1975-76	1975-76	551,7	356,1	-35,4
	Saison sèche	-	-	1958-59	260,4	146,5	-43,7
Tlemcen	Annuelle	1976-77	1976-77	1976-77	674,3	495,0	-26,6
	Saison humide	1976-77	1976-77	1976-77	531,5	351,4	-33,9
	Saison sèche	-	-	-	143,3	143,3	-

Tableau V - Tests statistiques de rupture des lames d'eau écoulées (L).

Station	Échelle temporelle	Année de rupture selon les tests de			Selon le test de HUBERT		
		PETTIT	LEE et HEGHINIAN	HUBERT	L avant rupture (mm)	L après rupture (mm)	Diminution (%)
Meffrouche	Annuelle	1975-76	1975-76	1975-76	209,6	82,3	-60,7
	Saison humide	1980-81	1980-81	1975-76	172,1	69,6	-59,5
	Saison sèche	1976-77	1976-77	1976-77	37,4	12,1	-67,6

- 25 La rupture de l'homogénéité de la série pluviométrique s'est répercutée, en s'accroissant, sur les écoulements. Les cumuls des précipitations et des lames d'eau écoulées en fonction du temps confirment la modification qui s'est produite dans les années 1970. La comparaison des courbes avant et après la date de rupture permet de quantifier le déficit moyen annuel des apports au barrage à 60,9 %. Le déficit est de 59,3 % pour la saison humide et de 68,0 % pour la saison sèche (Fig. 3). Ces valeurs sont proches de celles portées dans le tableau III.

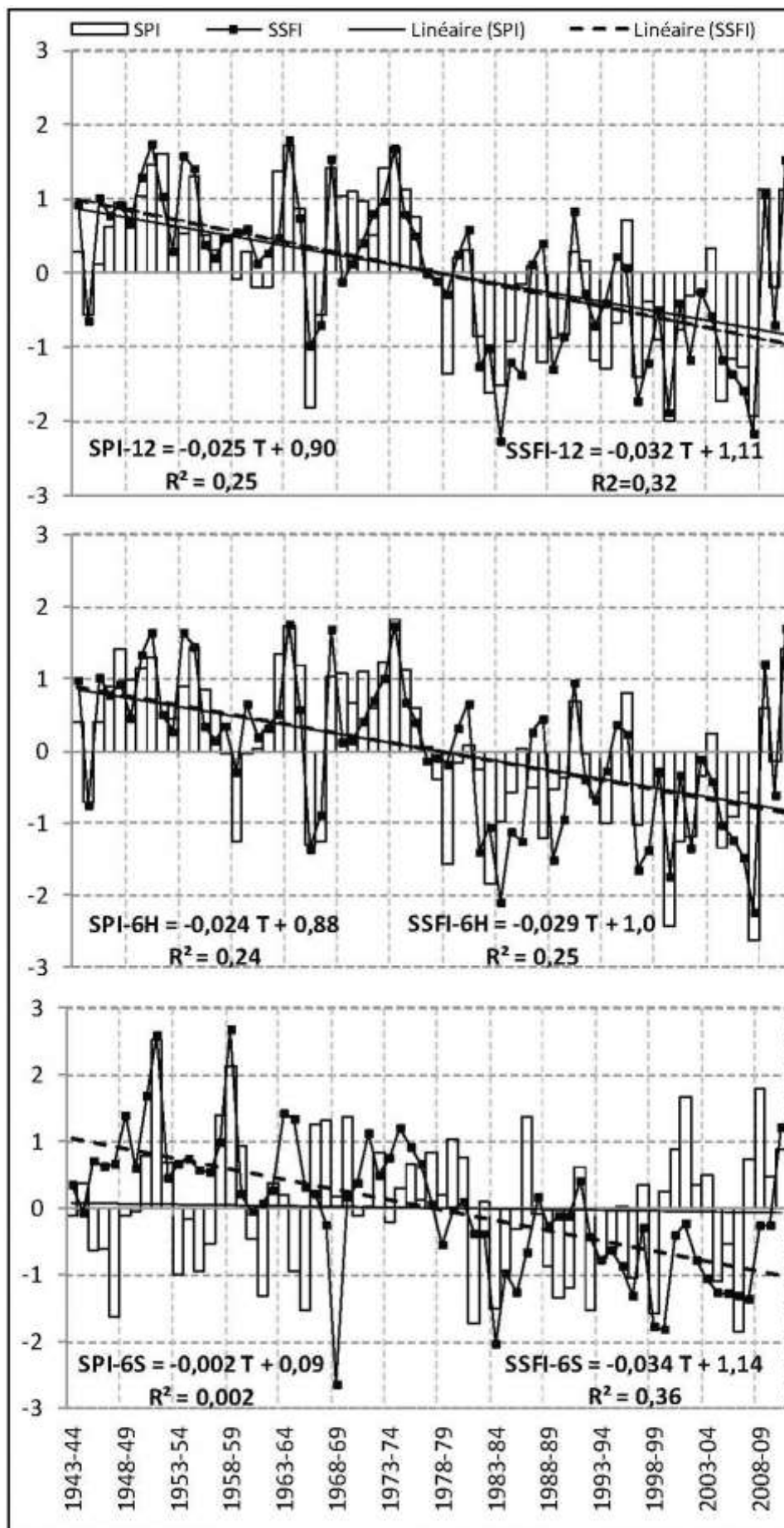
Figure 3 - Cumuls des lames d'eau écoulées (L, en mm) en fonction du temps aux échelles annuelle et saisonnières de 1943-44 à 2010-11.



- 26 En traitant les données annuelles, les valeurs du SPI-12 varient entre -2,00 et +1,71. Pour l'indice SSFI-12, la fourchette des valeurs est encore plus ouverte, de -2,30 à +1,80. Sur la période d'étude, ces deux indices montrent une tendance à la baisse, ce qui dénote une aggravation de la sécheresse (Fig. 4). L'examen des droites de régression fait ressortir une baisse annuelle moyenne de l'ordre de 2,5 % pour le SPI-12. La diminution avoisine 3,2 % par an pour le SSFI-12.

Figure 4 - Évolution des indices SPI et SSFI aux échelles annuelle et saisonnières de 1943-44 à 2010-2011.





27 Toutefois les valeurs très fortes ne sont pas nombreuses. La période d'étude a été essentiellement marquée par des séquences d'humidité et de sécheresse légères. La classe modale $[-0,99$ à $+0,99]$ représente plus de 60 % des valeurs des indices SPI-12 et SSFI-12 (Tab. VI). 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 (Fig. 4). Les années les plus sèches ont été observées en 1999-00 pour les pluies et en

1983-84 et 2007-08 pour les écoulements. L'année 1983-84 vient après trois années sèches sur le plan de la pluviométrie, dont deux fortement. 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 (succession de 11 années sèches). Au cours de l'année 2007-08, la réserve du barrage a atteint un niveau alarmant (4 000 m³ seulement le 07/08/2008).

Tableau VI - Classes des SPI et des SSFI, et fréquences d'occurrence.

Degré	SPI et SSFI	Fréquence (%)			Fréquence (%)		
		SPI 12	SPI 6-H	SPI 6-S	SSFI 12	SSFI 6-H	SSFI 6-S
Humidité extrême	$\geq +2,0$	0	0	2,9	0	0	3,2
Humidité forte	+1,5 à +1,99	4,4	2,9	2,9	7,9	7,9	1,6
Humidité modérée	+1,0 à +0,49	16,2	17,7	8,8	6,4	6,4	7,9
Humidité légère	0 à +0,99	33,8	30,9	38,2	41,3	41,3	38,1
Sécheresse légère	0 à -0,99	26,5	29,4	27,9	22,2	19,1	31,8
Sécheresse modérée	-1,0 à -1,49	10,3	13,2	8,8	14,3	17,5	11,1
Sécheresse forte	-1,5 à -1,99	7,4	2,9	10,3	4,8	4,8	3,2
Sécheresse extrême	$\leq -2,0$	1,5	2,9	0	3,2	3,2	3,2

28 Aux échelles saisonnières (par périodes humides ou sèches de 6 mois), les niveaux de sécheresse et d'humidité sont plus marqués qu'à l'échelle annuelle. Les valeurs du SPI oscillent entre -2,63 et +1,83 pour la saison humide et de -1,84 à +2,51 pour la saison sèche. Pour le SSFI, les fourchettes sont respectivement de -2,22 à +1,77 et de -2,64 à +2,68. Ces valeurs extrêmes ne traduisent pas l'état de sécheresse ou d'humidité qu'a connu le bassin versant tout au long de la période d'étude, car les valeurs au-delà de +2,0 ou de -2,0 ont été extrêmement rares. Les années à humidité et à sécheresse légères occupent de 60 à 70 % de la période étudiée (Tab. VI). Pendant la saison humide où l'on note une certaine proportionnalité entre les deux 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 un SPI-6S égal à +0,17, on a enregistré un SSFI-6S inférieur à -2,64.

V - Discussion et conclusion

29 Au cours de la période d'étude, la tendance chronologique de la pluviométrie et de l'écoulement dans le bassin versant du barrage Meffrouche a été globalement déficitaire aux différentes échelles temporelles. Néanmoins les méthodes statistiques révèlent l'existence de deux périodes distinctes. La première, humide, a duré du milieu des années 1940 jusqu'au milieu des années 1970 ou même jusqu'au début de la décennie 1980. Ensuite, une sécheresse s'est installée dans la région. Pour les précipitations, cette rupture concerne l'ensemble des postes pluviométriques de l'Algérie du Nord (J.P. LABORDE, 1993 ; M. MEDDI et H. MEDDI, 2009 ; A.N. GHENIM *et al.*, 2010). L'ampleur du déficit enregistré après la rupture est la conséquence d'une modification progressive du régime des. Ce genre de cassure peut apparaître plusieurs fois dans une même série, donc sans que cela traduise une rupture définitive (L. PERREAULT *et al.*, 1999 ; P. HUBERT *et al.*, 2007).

30 Le comportement des précipitations et des lames d'eau écoulées est relativement identique avec parfois un décalage d'une année ou deux relatif probablement à la recharge ou à la vidange des nappes. Durant les 68 années d'observation, le nombre d'années humides est plus important que le nombre d'années sèches pour les trois types de SPI et SSFI considérés. Malgré cela, les pics négatifs sont les plus importants. Ces extrêmes, pour l'humidité comme pour la sécheresse, sont parfois générés par une succession d'années marquées par des excédents ou par des déficits légers.



Pour les précipitations comme pour les écoulements, les comportements annuels sont, fort logiquement, très semblables à ceux de la saison humide. Si les précipitations de saison sèche ne montrent aucune tendance, le SSFI présente, en revanche, une forte

baisse, qui tient bien évidemment à la raréfaction des pluies de saison humide. On note en outre que, presque chaque année, les deux saisons manifestent des comportements différents : à des valeurs positives des indices en saison humide correspondent des valeurs négatives en saison sèche et *vice versa*.

32 La courbe des écoulements cumulés en fonction du temps est affectée d'irrégularités, certainement liées à des aléas pluviométriques qu'il est impossible de préciser à travers une approche globale. Mais, surtout, cette courbe confirme la modification du fonctionnement hydrologique de l'oued En-Nachef en rapport avec l'évolution des pluies. La cassure observée au milieu des années soixante dix correspond à l'accentuation de la sécheresse mise en évidence par les autres approches. Avec la diminution des pluies, les écoulements ont très fortement baissé, les coefficients d'écoulement étant bien sûr d'autant plus faibles que les pluies sont moins abondantes.

33 La réponse hydrologique aux événements pluvieux est complexe, de nombreux facteurs pouvant influencer les écoulements, et notamment la réserve des aquifères. Ainsi, après une succession de plusieurs années à écoulement excédentaire, la diminution du SSFI est parfois tardive (cas de l'année 1958-59, où l'on enregistre un SSFI-12 positif correspondant à un SPI12 négatif – voir Fig. 4), les nappes continuant d'assurer pendant quelque temps un écoulement abondant. En revanche, une année à pluviométrie excédentaire venant à la suite d'une séquence sèche (cas des années 1990-91 qui après une période déficitaire en pluviométrie et en écoulement enregistre un SSFI-12 de +0,83 pour un SPI-12 de +0,28 – voir Fig.4) se traduit par une augmentation immédiate des écoulements, même atténuée par la recharge des aquifères, d'autant plus que la dégradation du couvert végétal et la dessiccation du sol consécutifs à la sécheresse favorisent le ruissellement (J.B. THORNES 1994 ; S.H. SCOTT 2006).

Remerciements : Nous sommes reconnaissants aux services de l'ANBT (Agence Nationale des Barrages et des Transferts) et de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) de nous avoir fourni les données nécessaires à cette étude. Nos remerciements s'adressent également à nos trois réviseurs restés anonymes, pour leurs remarques, et surtout à Claude MARTIN, pour son aide lors de la phase finale de préparation de l'article.

Bibliography

AGOUMI A., SENOUSI S., YACOUBI M., FAKHREDINE A., SAYOUTI E.H., MOKSSIT A. et CHIKRI N. (1999) - Changements climatiques et ressources en eau. *Hydrogéologie Appliquée*, vol. 12, n° 11, p. 163-182.

BOUDJADJA A., MESSAHEL M. et PAUC H. (2003) - Ressources hydriques en Algérie du Nord. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 16, n° 3, p. 285-304.

DOI : 10.7202/705508ar

DAGNÉLIE P. (1970) - *Théorie et méthodes statistiques*. Édit. Presses agronomiques de Gembloux, Belgique, vol. 2, 451 p.

EDWARDS D.C. et MAC KEE T.B. (1997) - *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales Climatology*. Climatology report 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, 155 p.

GARCIA-RUIZ J.M., LOPEZ-MORENO J.I., VICENTE-SERRANO S.M. LASANTA-MARTINEZ T. et BEGUERIA S. (2011) - Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science and Reviews*, vol. 105, n° 3-4, p. 121-139.

DOI : 10.1016/j.earscirev.2011.01.006

GHENIM A., MEGNOUNIF A., SEDDINI A. et TERFOUS A. (2010) - Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'oued Tafna à Béni Bahdel (Nord Ouest algérien). *Sécheresse*, vol.2, n° 2, p. 115-120.

HAYES M.J., SVOBODA M.D., WILHITE D.A. et VANYARKHO O.V. (1999) - Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 25, n° 1, p. 3367-3370.

DOI : 10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2



- HISDAL H. et TALLAKSEN L.M. (2003) - Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark. *Journal of Hydrology*, vol. 281, n° 3, p. 230-247.
DOI : 10.1016/S0022-1694(03)00233-6
- HUBERT P. (2000) - The segmentation procedure as a tool for discrete modeling of Hydrometeorological regimes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 14, n° 4, p. 297-304.
DOI : 10.1007/PL00013450
- HUBERT P., CARBONNEL J.P. et CHAUCHE A. (1989) - Segmentation des séries hydrométéorologiques Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, vol. 110, n° 3-4, p. 349-367.
DOI : 10.1016/0022-1694(89)90197-2
- HUBERT P., BADER J.C. et BENDJOUDI H. (2007) - Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. *Hydrological Science Journal*, vol. 52, n° 1, p. 68-73.
DOI : 10.1623/hysj.52.1.68
- KHALDI A. (2005) - *Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien "Monts de Tlemcen - Saïda"*. Thèse de Doctorat d'État, Université d'Oran, Algérie. 229 p.
- LABORDE J.P. (1993) - *Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500 000*. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021, une carte avec notice explicative, 44 p.
- LEE A.F.S. et HEGHINIAN S.M. (1977) - A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables. A Bayesian approach. *Technometrics*, vol. 19, n° 4, p. 503-506.
DOI : 10.1080/00401706.1977.10489592
- LUBES H., MASSON J.M., SERVAT É., PATUREL J.E., KOUAME B. et BOYER J.F. (1994) - *Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Étude bibliographique*. Programme ICCARE, Rapport n° 3, ORSTOM, Montpellier.
- LUBES-NIEL H., MASSON J.M., PATUREL J.E. et SERVAT É. (1998) - Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité des chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 11, n° 3, p. 383-408.
DOI : 10.7202/705313ar
- MAC KEE T.B., DOESKEN N.J. et KLEIST J. (1993) - The relationship of drought frequency and duration at time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Anaheim, Canada), Édité. American Meteorological Society, p. 179-186.
- MEDDI M. et HUBERT P. (2003) - Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In : *Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions*, IAHS Publication, vol. 278, p. 1-7.
- MEDDI H. et MEDDI M. (2009) - Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, vol. 20, n° 1, p. 57-65.
DOI : 10.1684/sec.2009.0169
- MEDDI M., TALIA A. et MARTIN C. (2009) - Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo Géographie Physique et Environnement*, vol. III, p. 61-84.
DOI : 10.4000/physio-geo.686
- MERRIAM C.F. (1937) - A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna Valley. *American Geophysical Union Transactions*, vol.18, n° 2, p. 471- 476.
DOI : 10.1029/TR018i002p00471
- MODARRES R. (2007) - Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol.21, n° 3, p. 223-233.
DOI : 10.1007/s00477-006-0058-1
- PERREAULT L., HACHE M., SLIVITZKY M. et BOBEE B. (1999) - Detection of changes in precipitation and runoff over Eastern Canada and US using a Bayesian approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 13, n° 3, p. 201-216.
- PETTITT A.N. (1979) - A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, vol. 28, n° 2, p. 126-135.
DOI : 10.2307/2346729
- ROUSSET N. et ARRUS R. (2006) - L'agriculture du Maghreb au déficit du changement climatique : quelles stratégies d'adaptation face à la raréfaction des ressources hydriques. *Communication à la Troisième Conférence internationale sur les ressources en eau dans le bassin Méditerranéen – WATMED 3* (Tripoli, Liban), 8 p.
- SCHILLING J., FREIER K.P., HERTIG E. et SCHEFFRAN J. (2012) - Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 156, p. 12-26.
DOI : 10.1016/j.agee.2012.04.021



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*, 8 p.










THORNES J.B. (1994) - Catchment and channel hydrology. In : *Geomorphology of desert environments*, A.D. ABRAMS et A.J. PARSONS édit., Édit. CHAPMAN and HALL, Londres, p. 257-287.

TOUAZI M., LABORDE J.P. et BHIRY N. (2004) -Modelling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in northern Algeria. *Journal of Hydrology*, vol. 296, n° 1-4, p. 179-191.
DOI : 10.1016/j.jhydrol.2004.03.030





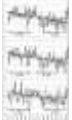

YEBDRI D., ERRIH M., HAMLET A. et TIDJANI A.B. (2007) - The Water Resources Management Study of the Wadi Tafna Basin (Algeria) Using the Swat Model. *African Water Journal*, vol. 1, n° 1, p. 33-47.

YEVJEVICH V. (1967) - *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts*. Édit. Colorado State University, Hydrology Papers, n° 23, Fort Collins, Colorado, 25 p.

List of illustrations

	Title	Photo 1 - Barrage Meffrouche et lac de retenue vus de la rive gauche. [cliché : A.N. GHENIM et A. MEGNOUNIF, février 2013]
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-1.jpg
	File	image/jpeg, 424k
	Title	Figure 1 - Situation du bassin d'alimentation du barrage Meffrouche et dispositif de mesure disponible.
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-2.jpg
	File	image/jpeg, 248k
	Title	Tableau I - Précipitations annuelles moyennes (mm) et coefficients de variation aux stations pluviométrique de Meffrouche, Lalla Seti et Tlemcen sur la période septembre 1943 - août 2001.
	Caption	CV = coefficient de variation (= écart-type / précipitations annuelles moyennes).
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-3.jpg
	File	image/jpeg, 120k
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-4.jpg
	File	image/jpeg, 80k
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-5.jpg
	File	image/jpeg, 24k
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-6.jpg
	File	image/jpeg, 28k
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-7.jpg
	File	image/jpeg, 220k
	Title	Tableau II - Catégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs du SPI et du SSFI.
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-8.jpg
	File	image/jpeg, 156k
	Title	Tableau III - Principaux paramètres statistiques caractérisant les distributions des précipitations (mm) et des lames d'eau écoulées (mm) aux échelles annuelle et saisonnières sur la période de 1943-44 à 2010-11.
	Caption	Coefficient de variation : écart-type / valeur moyenne. Coefficient d'asymétrie (FISHER) : moment centré d'ordre 3 normalisé cube de l'écart-type. Coefficient d'immodération : valeur maximale / valeur minimale.



	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-9.jpg
	File	image/jpeg, 252k
	Title	Figure 2 - Fluctuations annuelles et saisonnières des précipitations (P, en mm) et des lames d'eau écoulées (L, en mm) de 1943-44 à 2010-11.
	Caption	T : temps depuis l'origine, représenté par le rang de l'année dans la chronique.
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-10.jpg
	File	image/jpeg, 680k
	Title	Tableau IV - Tests statistiques de rupture des précipitations (P).
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-11.jpg
	File	image/jpeg, 308k
	Title	Tableau V - Tests statistiques de rupture des lames d'eau écoulées (L).
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-12.jpg
	File	image/jpeg, 184k
	Title	Figure 3 - Cumuls des lames d'eau écoulées (L, en mm) en fonction du temps aux échelles annuelle et saisonnières de 1943-44 à 2010-11.
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-13.jpg
	File	image/jpeg, 228k
	Title	Figure 4 - Évolution des indices SPI et SSFI aux échelles annuelle et saisonnières de 1943-44 à 2010-2011.
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-14.jpg
	File	image/jpeg, 732k
	Title	Tableau VI - Classes des SPI et des SSFI, et fréquences d'occurrence.
	URL	http://journals.openedition.org/physio-geo/docannexe/image/3173/img-15.jpg
	File	image/jpeg, 221k

References

Bibliographical reference

Abderrahmane Nekkache Ghenim and Abdesselam Megnounif, "Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie)", *Physio-Géo*, Volume 7 | -1, 35-49.

Electronic reference

Abderrahmane Nekkache Ghenim and Abdesselam Megnounif, "Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie)", *Physio-Géo* [Online], Volume 7 | 2013, Online since 13 February 2013, connection on 01 November 2022. URL: <http://journals.openedition.org/physio-geo/3173>; DOI: <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3173>

This article is cited by

- Belarbi, Halima. Touaibia, Bénina. Boumechra, Nadir. Abdelbaki, Chérifa. Amiar, Sakina. (2022) *Natural Disaster Science and Mitigation Engineering: DPRI reports Wadi Flash Floods*. DOI: 10.1007/978-981-16-2904-4_5
- Zerouali, Bilel. Chettih, Mohamed. Abda, Zaki. Mesbah, Mohamed. Santos, Celso Augusto Guimarães. Brasil Neto, Reginaldo Moura. da Silva, Richarde Marques. (2021) Spatiotemporal meteorological drought assessment in a humid Mediterranean region: case study of the Oued Sebaou basin (northern central Algeria). *Natural Hazards*, 108. DOI: 10.1007/s11069-021-04701-0



- Ghenim, Abderrahmane Nekkache. Megnounif, Abdesselam. (2016) Variability and Trend of Annual Maximum Daily Rainfall in Northern Algeria. *International Journal of Geophysics*, 2016. DOI: 10.1155/2016/6820397
- Kazi Tani, H.A.. Bouanani, A.. Baba-Hamed, K.. (2017) Estimations et quantifications des apports solide et liquide du bassin versant du Meffrouche (Nord-Ouest algérien). *Techniques Sciences Méthodes*. DOI: 10.1051/tsm/20179035
- Otmane, Abdelkader. Baba-Hamed, Kamila. Bouanani, Abderrazak. Gherissi, Radia. (2021) Impacts of groundwater over exploitation on the renewal and hydrodynamic behavior of the alluvial aquifer of Sidi Bel Abbes (Algerian NW). *Applied Water Science*, 11. DOI: 10.1007/s13201-021-01392-7
- Hallouz, Faiza. Meddi, Mohamed. Mahé, Gil. Toumi, Samir. Rahmani, Salah Eddine Ali. (2018) Erosion, Suspended Sediment Transport and Sedimentation on the Wadi Mina at the Sidi M'Hamed Ben Aouda Dam, Algeria. *Water*, 10. DOI: 10.3390/w10070895
- Appiagyei, Bright Danso. Belhoucine-Guezouguli, Latifa. Bessah, Enoch. Morsli, Boutkhil. Fernandes, Paulo Alexandre Martins. (2022) A Review on Climate Change Impacts on Forest Ecosystem Services in the Mediterranean Basin. *Journal of Landscape Ecology*, 15. DOI: 10.2478/jlecol-2022-0001
- Otmane, A.. Baba-Hamed, K.. Bouanani, A.. Kebir, L.W.. (2018) Mise en évidence de la sécheresse par l'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest algérien). *Techniques Sciences Méthodes*. DOI: 10.1051/tsm/201809023
- Achite, Mohammed. Ouillon, Sylvain. (2016) Recent changes in climate, hydrology and sediment load in the Wadi Abd, Algeria (1970–2010). *Hydrology and Earth System Sciences*, 20. DOI: 10.5194/hess-20-1355-2016

About the authors

Abderrahmane Nekkache Ghenim

Équipe "Mobilisation Ressources en Eau", Laboratoire "Eaux et Ouvrages dans leur Environnement", Université de Tlemcen, BP 230, TLEMEN 13000, ALGÉRIE.
Courriel : anghenim@yahoo.fr

Abdesselam Megnounif

Équipe "Mobilisation Ressources en Eau", Laboratoire "Eaux et Ouvrages dans leur Environnement", Université de Tlemcen, BP 230, TLEMEN 13000, ALGÉRIE.
Courriel : megnounif_aslam@yahoo.fr

Copyright



Creative Commons - Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International - CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

