

Variabilité des débits d'étiages « VCNd » dans un contexte climatique semi-aride: Cas du bassin versant de l'oued Srou, Haut Oum Er Rbi, Maroc

[Variability of low-flow rates « MAMd » in a semi-arid climatic context: Case of the watershed of the river Srou, Oum Er Rbia upstream, Morocco]

Omar Ghabane, Mohamed Chakir, Hassan Ouakhir, Jawad Elhawari, Aomar Achehboune, Othman Rahimi, Youness Bouhafa, and Mohamed El Ghachi

Laboratoire Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoines, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Morocco

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In a context of climate change with a growing population, the pressure on water resources is increasing. In Morocco, water resources are scarce and poorly distributed in time and space. To face this situation, the state has established strategies and laws since the 1960s, but they have not considered the management of low-flow situations. The management of such situations is a major pillar for an integrated and sustainable management of the water resource. The present article aims at identifying the daily low-flow rates (VCNd) in a semi-arid climatic context, that of the watershed of the river Srou, first tributary of the river Oum Er Rbia in the central Middle Atlas. The data used concern the daily flows of the upstream station of the watershed (downstream Elhri) and the downstream station (Chacha N'mallah) for the 1976-2016 period. The results obtained show that the daily low-flow rates on an annual scale are very stable between the different durations. On the other hand, they show a strong variability on an interannual and spatial scale. Low flows occur throughout the watershed between July and September. Severe low-flow situations occurred in 1995 and 2008.

KEYWORDS: Low-flow, MAMd, Srou watershed, Oum Er Rbia.

RESUME: Dans un contexte de changement climatique avec une augmentation démographique, la pression sur la ressource en eau ne cesse d'augmenter. Au Maroc, les ressources en eau sont rares et mal réparties dans le temps et dans l'espace. Pour faire face à cette situation l'état a instauré des stratégies et des lois depuis les années 60, mais ils n'ont pas tenu en compte la gestion des situations des étiages. Alors que la gestion de telles situations constitue un pilier majeur pour une gestion intégrée et durable de la ressource en eau. Le présent article vise à identifier les débits d'étiages journaliers (VCNd) dans un contexte climatique semi-aride, celui du bassin versant de l'oued Srou, premier affluent de l'oued Oum Er Rbia dans le moyen Atlas central. Les données utilisées concernent les débits journaliers de la station amont du bassin (aval Elhri) et la station de l'aval (Chacha N'mallah) pour la chronique 1976-2016. Les résultats obtenus montrent que les débits d'étiages journaliers à l'échelle annuelle connaissent une stabilité bien marquée entre les différentes durées. En revanche, ils connaissent une forte variabilité à l'échelle interannuelle et spatiale. Les étiages se produisent dans la totalité du bassin entre juillet et septembre. Les années 1995 et 2008 ont connu des situations d'étiages sévères.

MOTS-CLEFS: Etiage, VCNd, bassin versant de l'oued Srou, Oum Er Rbia.

1 INTRODUCTION

Les questions de changement et de variabilité climatique préoccupent depuis quelques temps les scientifiques et les décideurs politiques en raison de leurs conséquences immédiates et durables sur l'environnement [1], [2].

Le changement climatique s'est traduit par la succession des périodes de sécheresse, en Afrique du Nord, l'Afrique occidentale et centrale et dans le pourtour méditerranéen à partir de la fin de la décennie 1960 et le début des années 70 [3]. Le Maroc, pays dont les ressources en eau sont limitées, dispose d'une quantité d'eau de surface estimée à 22,5 milliards de m³, dont seul 16 milliards de m³ sont mobilisables dans les conditions techniques et économiques actuelles [4]. La plupart de ces ressources sont localisées principalement dans les régions du Nord et du Nord-Ouest, ce qui laisse apparaître un grand déficit dans le reste du pays. Avec les périodes de sécheresse qui sont de plus en plus fréquentes ces dernières années, ce déficit devient très grave et touche presque tout le royaume [5]. La contrainte de la sécheresse dans les régions montagneuses est souvent ignorée dans les études hydro-climatiques. Les sécheresses qu'a connues le Maroc depuis 1980, rappellent que ces régions ne sont pas épargnées des déficits en eau importants, surtout pendant la saison estivale, périodes des étiages [6]. Dans un tel cadre, la connaissance des débits d'étiages doit revêtir un caractère vital en raison du contexte climatique et hydrologique sévère et difficile. En effet, Les travaux sur les crues ont été prédominants dans l'analyse des extrêmes hydrologiques, mais les pressions actuelles sur la ressource en eau et les incertitudes liées au changement climatique suscitent depuis quelques années un intérêt croissant pour l'analyse des étiages [6].

L'étiage se définit ainsi comme un phénomène naturel, saisonnier, résultant généralement d'un déficit de pluie plus ou moins long et plus ou moins sévère, susceptible de varier dans le temps et dans l'espace et entraînant une diminution du débit dans les cours d'eau [7].

L'intérêt pour les débits d'étiage ne cesse de croître actuellement au sein de la communauté scientifique [8], [9], [10]. L'étude des étiages aide les décideurs et les gestionnaires dans la planification et la conception de l'approvisionnement en eau, la conception du réservoir de stockage et le maintien de la quantité et de la qualité de l'eau pour l'irrigation, et la conservation de la vie aquatique [11].

Les étiages sont des phénomènes plus complexes à définir et à décrire. Leurs genèses qui sont particulièrement longues les rendent difficiles à identifier. Ils peuvent être définis statistiquement à partir des débits journaliers, des débits mensuels, des moyennes mobiles calculées sur plusieurs jours ou encore à partir d'un débit seuil [12] – [15].

La présente étude vise à identifier et analyser la variabilité des débits d'étiages à partir des débits moyens journaliers sur plusieurs jours consécutifs « VCNd » (Volume Consécutif Minimal pour d jours), dans un contexte climatique semi-aride. Il s'agit du bassin versant de l'oued Srou premier affluent de l'oued Oum Er Rbia dans le moyen Atlas central.

2 SITUATION GÉOGRAPHIQUE, CADRE GÉOLOGIQUE ET CLIMATIQUE

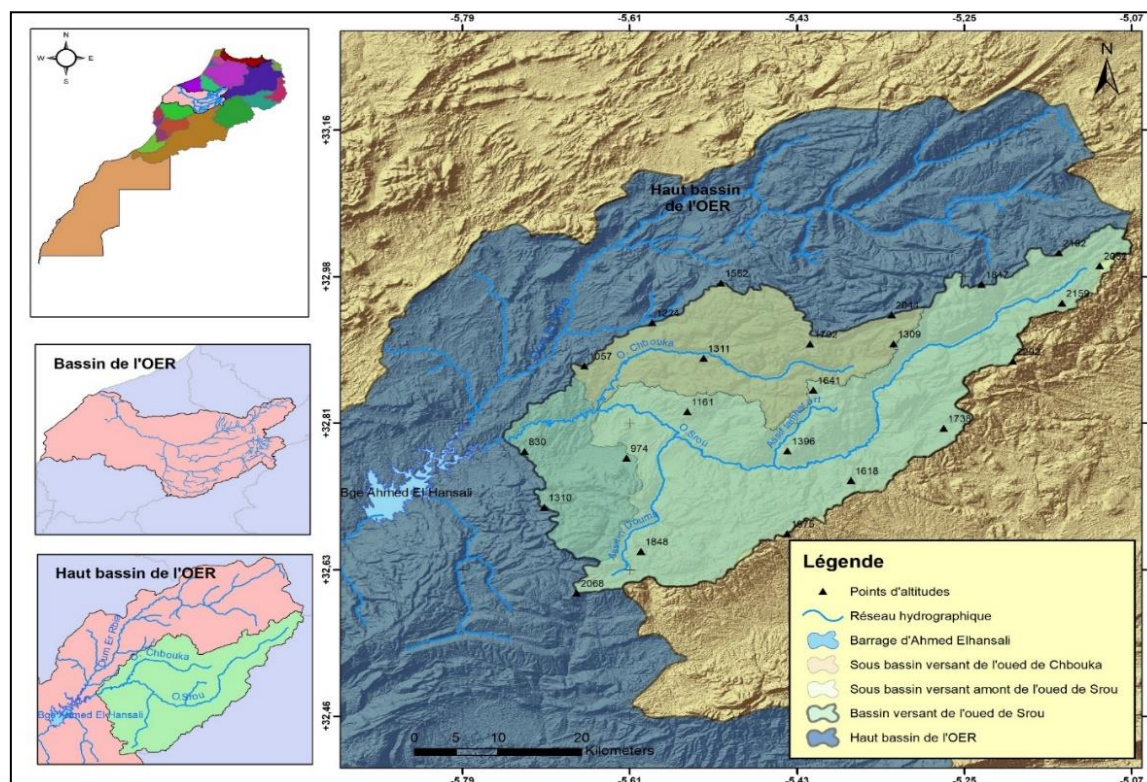


Fig. 1. Situation géographique du bassin versant de l'oued Srou

Le bassin de Srou, objet de ce travail, constitue le premier affluent de l'Oued Oum-Er-Rbia dans le moyen-Atlas central. Il s'étend sur une superficie de 1374 km² à la station hydrométrique de Chacha N'mallah. Il est localisé au nord-ouest du moyen-atlas central. Il se situe entre la longitude 5°6' et 6°50' ouest et la latitude 38° 4' et 39°1' nord (Figure 1). Administrativement, le bassin de l'oued de Srou s'étale sur la province de Khénifra et une petite partie de la province d'Ifrane. Il est limité à l'ouest par le massif hercynien du plateau central, au nord par le causse moyen-atlasique et au sud-est par la meseta Maroc-oranaise. Il présente un caractère montagneux: l'altitude varie entre 700 m et 2400 m. Il montre aussi une diversité sur le plan du relief, avec des formes structurales diversifiées. Le sens d'écoulement du cours d'eau principal est du nord-est vers le sud-ouest.

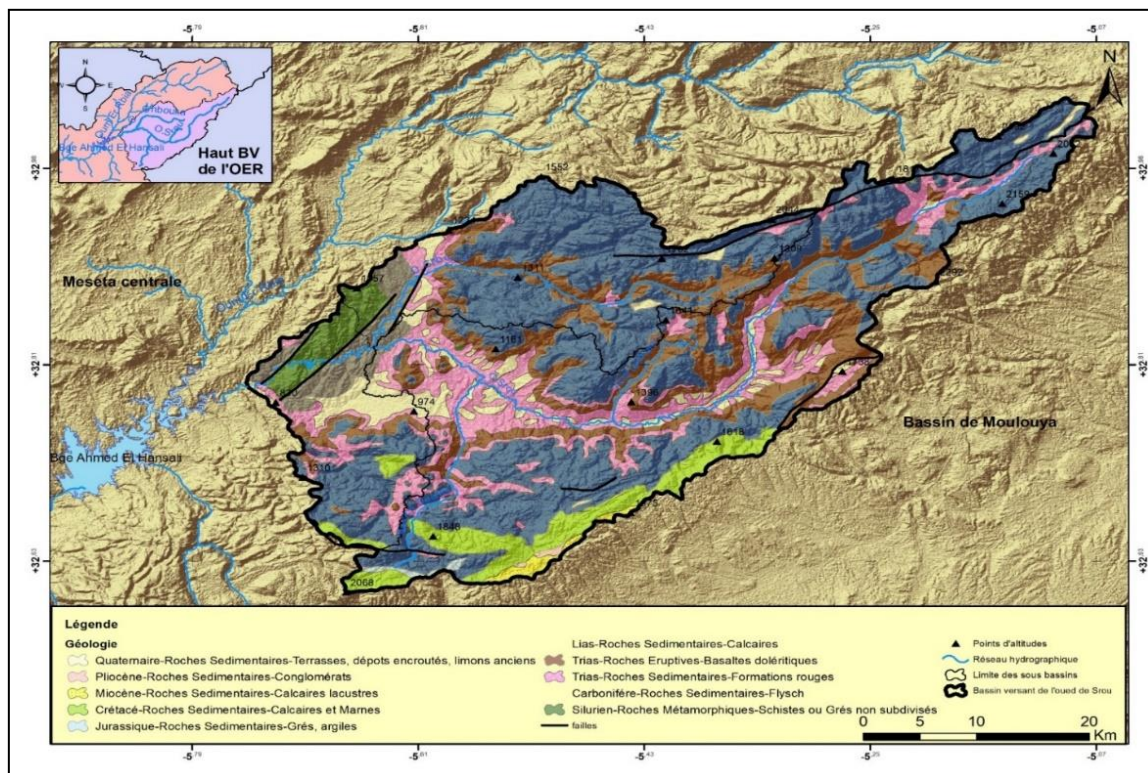


Fig. 2. Géologie du bassin versant de l'oued Srou (Source: Carte géologique du Maroc centrale 1/250000)

Le bassin versant de l'oued Srou est situé à cheval sur deux domaines structuraux du Maroc: à l'est, le domaine Mesetéen et à l'ouest, le domaine atlasique. Il est caractérisé par l'affleurement à l'ouest des terrains paléozoïques qui font partie de la chaîne hercynienne [16]. Ces terrains sont représentés essentiellement par des séries détritiques grésoschisteuses d'âge ordovicien [17]. Les terrains mésozoïques affleurent dans la moyenne partie du bassin. Ils sont représentés par des séries argileuses évaporitiques à intercalation des coulées basaltiques du Trias. Les calcaires et les dolomies de la plateforme carbonatée du Jurassique apparaissent dans le causse du moyen Atlas alors que les formations marno-calcaires du Crétacé sont limités au sud-ouest du secteur. Les terrains quaternaires affleurent dans les parties basses du relief montagneux et sont représentés par des dépôts à croûtes calcaires et des limons (Figure 2). Le bassin versant de l'oued Srou constitue l'une des principales zones du Maroc où les séries rouges triasiques affleurent largement, à côté du bassin versant de l'Ourika situé dans le Haut Atlas [18].

Cette hétérogénéité lithologique se reflète sur la perméabilité du bassin. Une partie importante de sa superficie est imperméable (42 %). Des argiles gypsifères, des marnes et des basaltes dolorétiques du Permo-trias occupent les larges dépressions dans lesquelles l'oued de Srou creuse sa vallée.

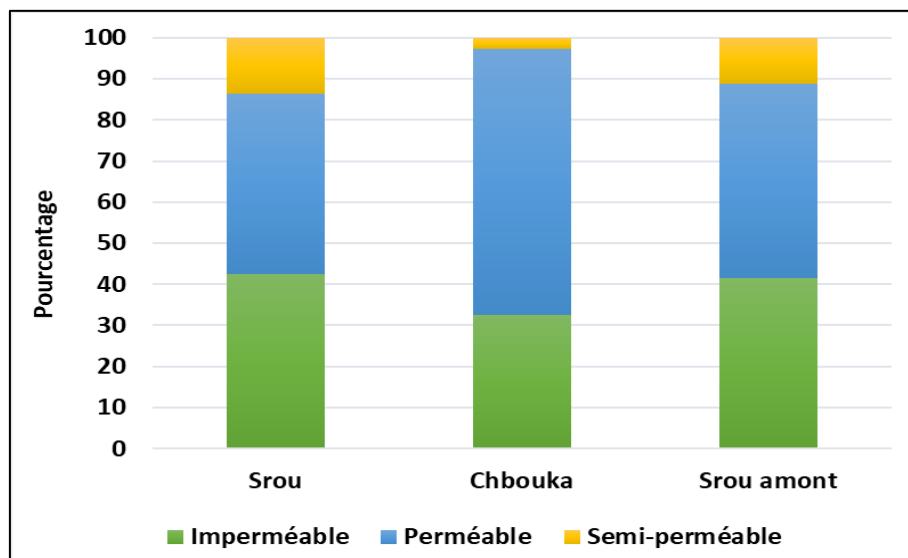


Fig. 3. Perméabilité (en %) des formations lithologiques du bassin versant de l'oued de Srou et de ces principaux sous bassins

Cependant, les formations calcaires et calcaire-dolomitiques du Lias qui constituent les différents fragments du plateau de Srou forment les aquifère du bassin (43 %). Ceci présage un soutien moyen et favorise plus les ruissellements. Cependant, le sous bassin versant de l'oued de Chbouka est dominé par les formations calcaire-dolomitique perméables (65 %) (Figure 3). Cette dominance assure un écoulement important surtout en période d'étiage malgré leur petite superficie par rapport à celui du bassin de Srou.

De nombreuses études réalisées dans la région du moyen-Atlas central [19] – [24] dont le bassin versant de l'oued Srou fait partie, ont montré une importante variabilité pluviométrique, avec une tendance globale vers la diminution des précipitations.

Les variations interannuelles de la pluviométrie aux stations de d'Aval Elhri en amont du bassin versant et de Chacha N'mallah en aval (Figure 4) sont mises en évidence par l'indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2. Méthode déjà utilisée et détaillée par [3], [25] – [31].

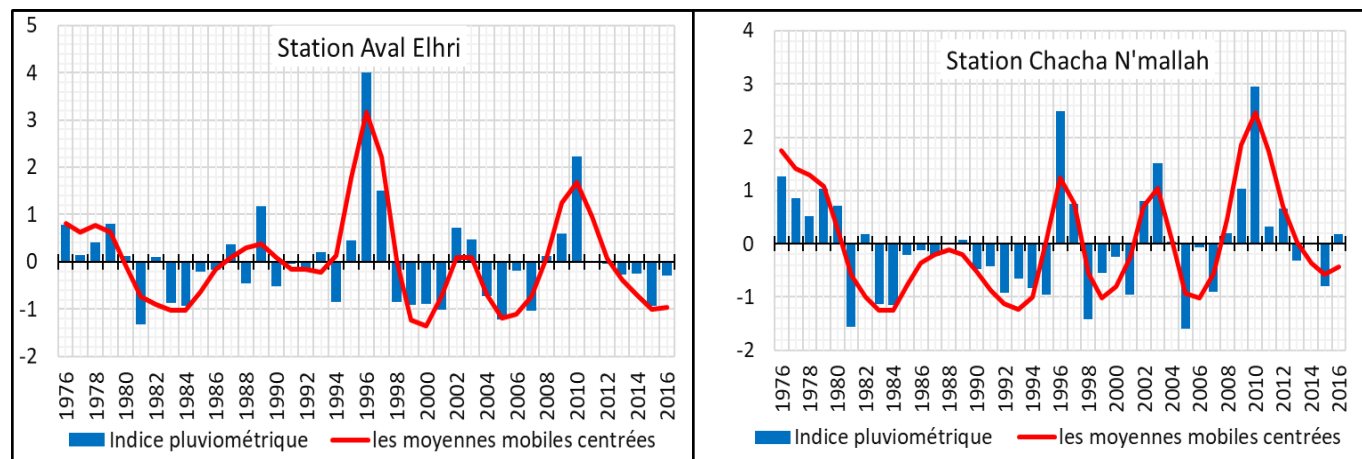


Fig. 4. Variabilité pluviométrique dans les stations du bassin versant de l'oued Srou (1976-2016)

Une forte tendance à la sécheresse est observée dans la région, 60 % des années de la chronique sont déficitaires. La période de sécheresse la plus longue qui affecte la majorité du bassin, s'étale de 1981 à 1994, avec quelques intercalations d'épisodes humides qui ont des durées comprises entre 1 et 4 années selon les stations. Cette même période a été observée dans plusieurs régions du Maroc et de l'Afrique [32] – [35].

3 MÉTHODE ET DONNÉES

3.1 MÉTHODE D'IDENTIFICATION DES VCND

La méthodologie ainsi adoptée dans le cadre de ce travail se base au début sur l'identification des débits d'étiages à l'échelle journalières (VCNd) et l'analyse de leurs variabilités spatio-temporelles via les coefficients de variations, l'écart-types et les tests de corrélations. Une analyse statistique est réalisée dans le but de déterminer les périodes de retours. Mais avant de commencer la présentation des méthodes, on doit d'abord préciser quelques terminologies concernant les étiages.

Les étiages sont définis comme le niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné [36] qu'il ne faut pas les confondre avec les basses eaux ordinaires [37]. Mais pour bien cerner cet événement, les hydrologues proposent de les définir statistiquement par des durées ou des volumes relatifs à un « seuil » qui est susceptible de varier selon le contexte géographique et se réfère avant tout à la disponibilité en eau pour satisfaire les différents usages. En effet, le régime de débit d'étiage d'une rivière peut être analysé par différentes méthodes, selon le type de données disponibles et le type de résultat recherché. Plusieurs indices ont été définis pour identifier l'étiage ainsi que les impacts que celui-ci peut avoir sur la ressource en eau [6], [11], [38] – [40]. On distingue généralement les indices issus de la courbe des débits classés, dites débits caractéristiques des étiages, les débits d'étiage issus de l'échelle mensuelle « QMNA » débit moyen mensuel le plus bas de l'année et les débits d'étiage calculés à partir des moyennes mobiles journalières « VCNd ».

Les VCNd (Volume Consécutif Minimal pour d jours) ou MAMd (en anglais pour Mean Annual d-day Minimum flow) représentent le débit moyen minimal annuel non dépassé pendant d jours consécutifs [7], [11], [12], [40], [41]. L'idée de travailler avec tel indicateur est déjà proposée par [42] dans le but de déterminer avec précision les variations des régimes d'étiages à une échelle très fine.

Les VCNd sont extraits annuellement en fonction d'une durée fixée de d jours. Dans la littérature, la durée d prend usuellement des valeurs égales à 1, 3, 5, 10 ou 30 jours, néanmoins des durées plus longues peuvent être parfois utilisées pour caractériser la sévérité des étiages à long terme (de d = 90 jusqu'à d = 284 jours) ([43], [44]).

La durée optimale pour le calcul des VCNd doit être en relation avec la définition que l'on attribue à l'étiage, mais aussi avec le caractère plus ou moins anthropisé des cours d'eau [11].

Les VCNd sont utilisés dans de nombreux pays comme seuils d'étiages. Par exemple, le VCN7 qui est connu aussi sous le nom de débit par temps sec [45] ou sous le nom de débit minimum annuel moyen sur 7 jours (MAM7) est utilisé au Royaume-Uni par les licences d'abstraction [46], [47].

3.2 ANALYSES STATISTIQUES DES VCND

Les débits minimaux annuels s'avèrent le plus souvent intégrés dans une procédure d'analyse fréquentielle visant à permettre d'estimer un quantile de période de retour donné à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations. Certains de ces quantiles (VCN7 (T=2,10,20), VCN30 (T=2,10), VCN90 (T=10)) ont, par exemple, été particulièrement étudiés aux Etats-Unis [48] – [52].

La détermination d'une loi de distribution théorique appropriée pour la caractérisation fréquentielle des variables d'étiage et le mode d'ajustement de celle-ci ont fait l'objet de très nombreux travaux dont le problème majeur dans l'étude fréquentielle des débits d'étiages réside dans l'identification d'une distribution raisonnable et de quantifier ses paramètres.

De nombreuses études ont examiné quelles distributions de probabilité sont les plus appropriées pour ajuster les séquences de débits minimum annuels dans différentes régions. Parmi les fonctions de distribution les plus fréquemment mentionnées dans la littérature pour les débits d'étiages, cas des VCNd, nous trouvons les lois: Log-normale (LN2), Weibull, Gumbel, et Pearson de type III (LP3). [11] – [15], [38], [41] ont réalisé une synthèse exhaustive des principales lois appliquées aux débits d'étiage.

Dans la présente étude nous nous sommes proposés, en tenant compte des particularités évoquées précédemment, de déterminer le type de loi théorique le plus approprié pour la description des distributions des VCNd. Pour faire, des tests d'ajustement sur les séries de valeurs annuelles extraites de chaque chronique de l'échantillon de référence ont été réalisés.

3.3 DONNÉES UTILISÉES

Les données utilisées pour cette étude concernent les données hydrométriques collectées auprès des services de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia (ABHOER), au pas de temps journaliers. Ces données dans un premier lieu ont été organisées, analysées et corrigées. Des tests de corrélation et d'homogénéisation ont été réalisés. Cet ensemble de données a été exploité sur la période 1976 - 2016 (41 ans) (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des données utilisées

Noms des stations	Coordonnées géographiques (m)		Données utilisées	Chroniques
	X	Y		
Chacha N'mallah	467800	243300	Débits journaliers	1976-2016
Aval Elhri	478500	251200	Débits journaliers	1976-2016

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 VCND REPRÉSENTATIFS DES ÉTIAGES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED SROU

Dans la majorité des cas, il n'y a pas de grande différence entre les faibles débits sur 1 jour et 7 jours [11], mais ceci est observé aussi pour d'autres durées dans le cas du bassin versant de l'oued Srou.

Les différents VCNd de chaque station du bassin versant de l'oued Srou sont bien corrélés entres eux (Tableau 2).

Cependant, on peut remarquer que certains indices présentent des coefficients de corrélation importants, pour certains que d'autres. Ces résultats permettent de regrouper les VCNd qui présentent un coefficient de corrélation qui dépasse les 90 % en trois classes.

Classe des VCNd de courte durée: Dans cette catégorie les VCN1 se corrént bien aux VCN3 et les VCN5. Ces derniers présentent un coefficient de variation très faible, il est de l'ordre de 0,59 % dans la station d'Aval Elhri et de 0,30 % dans la station de Chacha N'mallah. L'écart type entre ces indicateurs ne dépasse pas 0,01 (Tableau 3);

Classe des VCNd de moyenne durée: dans cette classe on trouve les VCN30 qui se corrént bien aux VCN10, VCN15 et VCN20. L'écart type entre ces indicateurs ne dépasse pas 0,01 (Tableau 3). Les VCN10, VCN15 et VCN20 présentent une variation légèrement faible entres eux, elle est de l'ordre de 0,87 % en Aval d'Elhri et de 1,23 % au niveau de Chacha N'mallah (Tableau 3). Classe des grandes durées: elle regroupe les VCN30 qui se corrént bien au VCN60 et VCN90.

Tableau 2. Corrélation entre les VCNd des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)

Station	Indice	VCN 1	VCN 3	VCN 5	VCN 10	VCN 15	VCN 20	VCN 30	VCN 60	VCN 90
Aval Elhri	VCN 1	1								
	VCN 3	0,985	1							
	VCN 5	0,978	0,993	1						
	VCN 10	0,944	0,958	0,966	1					
	VCN 15	0,926	0,941	0,948	0,982	1				
	VCN 20	0,924	0,938	0,946	0,98	0,998	1			
	VCN 30	0,872	0,886	0,894	0,923	0,936	0,938	1		
	VCN 60	0,828	0,842	0,85	0,879	0,885	0,887	0,939	1	
	VCN 90	0,81	0,82	0,83	0,86	0,86	0,87	0,91	0,95	1
Chacha N' mallah	VCN 1	1								
	VCN 3	0,999	1							
	VCN 5	0,994	0,995	1						
	VCN 10	0,987	0,987	0,993	1					
	VCN 15	0,982	0,982	0,988	0,995	1				
	VCN 20	0,972	0,973	0,978	0,985	0,99	1			
	VCN 30	0,947	0,948	0,954	0,961	0,966	0,976	1		
	VCN 60	0,854	0,852	0,851	0,853	0,858	0,868	0,892	1	
	VCN 90	0,817	0,818	0,816	0,814	0,819	0,829	0,853	0,927	1

La faible variation des VCNd de différents pas de temps est due principalement à la grande stabilité des débits pendant la saison des basses eaux (Figure 6) qui caractérisent les cours d'eau du moyen Atlas [53].

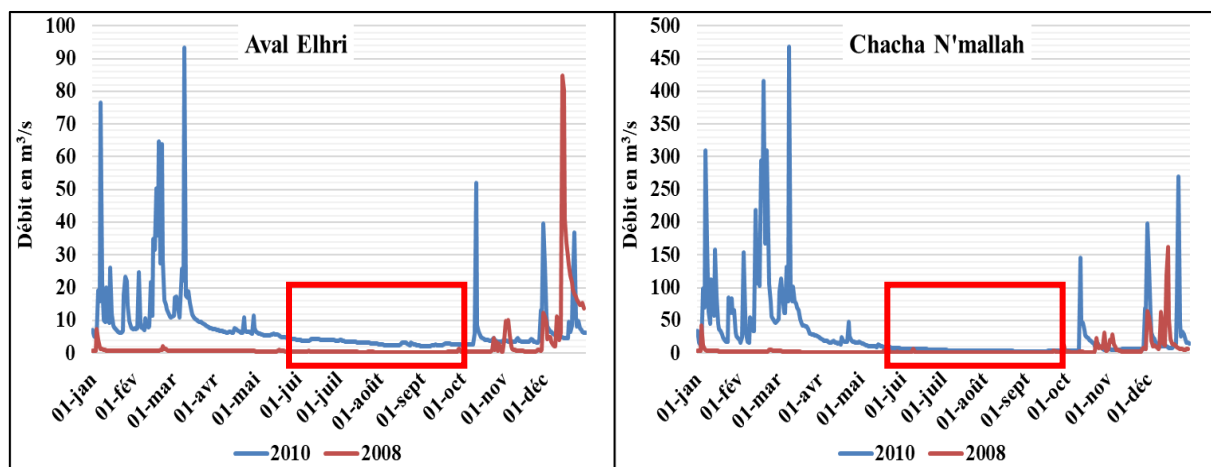


Fig. 5. Stabilité des débits d'étiages dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou, comparaison entre l'année la plus excédentaire (2010) et l'année la plus déficitaire (2008)

Tableau 3. Analyse de variation entre les VCNd des stations du bassin versant de l'oued Srou

Indice	Aval Elhri		Chacha N'mallah	
	σ	Cv	σ	Cv
VCN1, VCN3, VCN5	0,01	0,59 %	0,00 %	0,30 %
VCN10, VCN15, VCN20	0,01	0,87 %	0,02 %	1,23 %
VCN30, VCN60, VCN90	0,04	3,29 %	0,15 %	9,13 %

4.2 OCCURRENCE DES VCNd DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED SROU

Comme la majorité des bassins avec régime pluviale, la grande totalité des VCNd du bassin versant de l'oued Srou se produit pendant la période des basses eaux, entre les mois de mai et de septembre (Figure 7). Au niveau de la station d'Aval Elhri, 56,1% des VCN60 et 46,3% des VCN90 apparaissent en mois de juillet. Alors que 39% des VCN5, VCN10 et des VCN30 se produisent en mois d'août. Dans la station de Chacha N'mallah, la majeure partie des VCN30 (71%), VCN60 (69%) et VCN90 (45%) se produit en mois de juillet. Alors que pour les VCN5 et les VCN10, la majorité (58 et 56%) se produit en mois d'août.

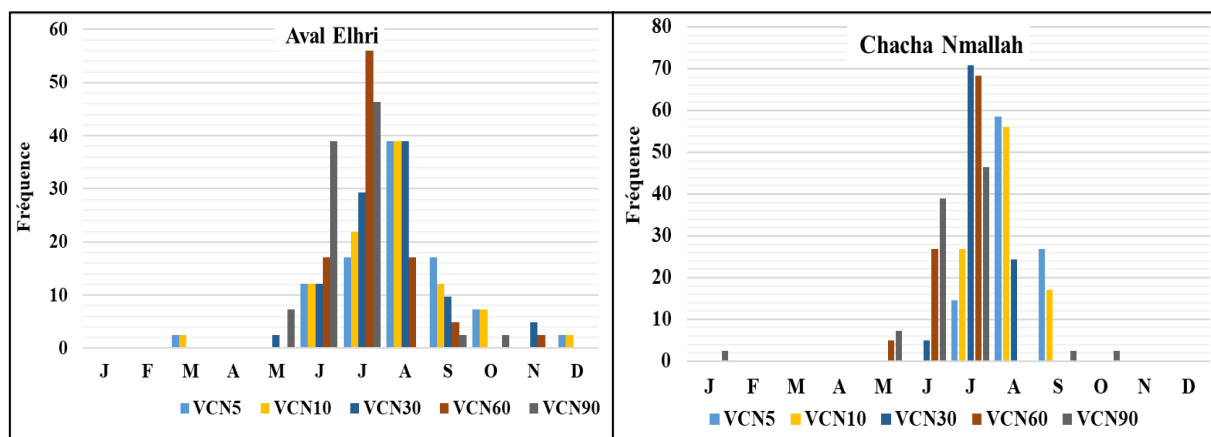


Fig. 6. Occurrence des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Des VCNd ont été apparus pendant la phase des hautes eaux. Cette situation est observée en amont du bassin à la station d'aval Elhri, en mois d'octobre des années 1982 et 1993, mars de l'année 2000 et décembre de 2005. La même situation est enregistrée en aval du bassin à la station de Chacha N'mallah en mois de janvier de 1976 et octobre de 1994. Ces années ont connu des longues périodes déficitaires, ce qui s'est reflété sur leurs régimes d'écoulement.

4.3 VARIABILITÉ SPATIOTEMPORELLE DES VCND

Les séries des VCNd des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah présentent une variabilité importante à l'échelle temporelle et spatiale.

En amont du bassin à la station d'Aval d'Elhri, les Cv des VCNd oscillent entre 48,1% et 50,4%. La variabilité devient plus importante en aval du bassin. A la station de Chacha N'mallah, les Cv dépassent les 54% (Tableau 4).

L'écart entre les valeurs des VCNd de la station de Chacha N'mallah est important et devient plus important durant les années excédentaires de la chronique (1976, 1979, 1996, 2010 et 2013). Les valeurs des VCNd du bassin versant de l'oued de Srou sont observées en 1976, 1978, 2010 et 2013, alors que les plus faibles sont observées en 2008, 2007 et 2016. Pour approfondir cette analyse visuelle nous allons procéder à une analyse des rangs des différentes valeurs des VCNd dans le but de classer les années avec étiage sévère.

Tableau 4. Analyse de la variation des VCNd dans les stations du bassin versant de l'oued Srou (1976-2016)

	Aval Elhri					Chacha N'mallah				
	VCN 5	VCN 10	VCN 30	VCN 60	VCN 90	VCN 5	VCN 10	VCN 30	VCN 60	VCN 90
μ (m3/s)	1,0	0,99	1,03	1,07	1,10	1,58	1,59	1,66	1,79	1,96
σ	0,5	0,48	0,5	0,52	0,55	0,86	0,87	0,9	0,94	1,07
Cv	47,1	48,1	48,5	49,1	50,4	54,9	54,9	54,4	52,5	54,6

L'analyse des rangs des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou permet d'identifier les étiages les plus sévères. Cette méthode est déjà appliquée par [12] dans l'analyse des VCNd et des QCNs de la station Gerbéviller en France. Le principe consiste à donner pour chaque valeur son rang dans la série, la plus faible valeur prend le premier rang alors que la plus forte prend le dernier rang. Or, lorsque l'on classe les VCNd, on constate que le rang d'une même année peut varier en fonction de la variable retenue. Cela signifie donc qu'en fonction des VCNd considérés, la fréquence expérimentale d'apparition d'un étiage peut changer (Tableau 5).

Les étiages les plus sévères de la chronique d'étude ont été apparus dans le bassin versant de l'oued Srou en 2008. Toutes les faibles valeurs des différents VCNd ont été enregistrées durant cette année.

Les années 2007 et 2016 viennent respectivement en deuxième et troisième position en amont du bassin à la station d'aval Elhri. Dans la station de Chacha N'mallah en aval du bassin la situation est différente, le classement n'est pas le même pour tous les VCNd. Selon les VCN5, VCN10, VCN30 et VCN60, la deuxième année sévère de la chronique est l'année 1995.

La variation dans les rangs des VCNd peut, en partie, être liée au problème de la durée de l'étiage. Un événement peut en effet être sévère, mais sur une courte durée et donc être peu représentatif d'une situation d'étiage. Au contraire, les débits d'étiage peuvent être moins bas mais sur une durée plus longue et finalement plus pénalisante [12].

Les plus fortes valeurs des VCNd ont été enregistrées en 1976 en aval du bassin alors qu'en amont elles sont observées en 2010. Les grandes baisses des écoulements observées durant ces années sont liées à la longue durée du déficit pluviométrique enregistrée dans le bassin versant de l'oued Srou et le moyen Atlas en général dans les années 80 et 90. Pour certains auteurs [35], [54], [55], [55], l'explication de cet écart entre déficit pluviométrique et hydrologique viendrait d'une contribution réduite des apports d'origine souterraine à l'écoulement de surface depuis les années 1970. En effet, les réserves d'eau souterraine diminuaient au fur et à mesure que le déficit pluviométrique se prolongeait.

Les périodes humides ont favorisé la reconstitution rapide des réserves hydriques et la recharge de la nappe aquifère. Tandis que la période sèche ou la sécheresse récente a été persistante et très sévère surtout pour les années 1981, 1995 et 2007.

Ces résultats sont aussi comparés à ceux d'autre bassin versant nord-africains, de l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique centrale [30], [34], [56] – [58] et ils montrent une concordance presque totale.

Tableau 5. Rangs des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Année	Aval Elhri					Chacha N'mallah				
	VCN 5	VCN 10	VCN 30	VCN 60	VCN 90	VCN 5	VCN 10	VCN 30	VCN 60	VCN 90
1976	41	41	40	39	39	37	37	38	38	37
1977	38	38	38	38	38	40	40	40	40	40
1978	37	37	37	37	36	39	39	39	39	39
1979	39	39	39	40	40	41	41	41	41	41
1980	35	35	35	34	34	38	38	37	36	35
1981	26	26	24	23	25	26	28	27	21	19
1982	19	18	27	26	24	25	25	24	22	23
1983	10	9	9	9	8	14	14	13	10	8
1984	11	10	11	10	12	12	11	11	8	7
1985	12	11	10	11	11	13	13	12	11	9
1986	25	25	25	22	22	19	19	19	19	18
1987	9	8	7	8	13	21	21	21	18	20
1988	6	6	5	5	5	18	18	17	17	16
1989	18	17	17	17	18	32	32	31	29	28
1990	24	24	23	25	26	33	33	33	32	32
1991	27	27	28	28	28	24	24	25	24	24
1992	27	27	29	27	27	22	22	28	27	27
1993	7	21	21	21	21	11	12	14	15	15
1994	17	16	15	18	15	23	23	22	25	21
1995	8	7	6	6	6	2	2	2	2	3
1996	31	31	31	31	31	29	29	29	28	29
1997	33	33	34	35	35	35	35	35	37	36
1998	16	15	14	14	14	30	30	30	31	31
1999	13	12	8	7	7	28	27	26	26	25
2000	14	13	12	12	9	16	16	15	12	11
2001	15	14	12	12	10	3	3	3	3	2
2002	20	19	18	15	17	6	6	6	5	6
2003	20	19	18	15	16	10	10	9	9	10
2004	22	22	20	19	19	27	26	23	20	22
2005	4	4	16	20	20	7	7	7	14	12
2006	5	5	4	4	4	8	8	8	7	17
2007	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
2008	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2009	30	30	30	30	30	31	31	32	34	38
2010	40	40	41	41	41	36	36	36	35	34
2011	32	32	32	32	32	20	20	20	23	26
2012	29	29	26	24	23	9	9	10	13	13
2013	36	36	36	36	37	34	34	34	33	33
2014	34	34	33	33	33	15	15	16	16	14
2015	23	23	22	29	29	17	17	18	30	30
2016	3	3	3	3	3	5	5	5	6	5

4.4 ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES VCND

L'analyse fréquentielle des VCNd montre la proportion de temps pendant laquelle un débit est dépassé (ou de manière équivalente l'intervalle moyen en années (« période de retour » ou « intervalle de récurrence ») que la rivière tombe en dessous d'un débit donné).

De nombreuses études ont examiné quelles distributions de probabilité sont les plus appropriées pour ajuster les VCNd dans différentes régions [12], [13], [53], [59] – [62].

Les VCNd des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah ont été ajustés aux différentes lois de probabilités déjà mentionnées. Ces débits s'ajustent bien à la loi Log-Normal (Figure 8).

Les faibles valeurs de VCNd de la chronique d'étude (1976-2016) ont été enregistrées dans la station d'Aval Elhri en 2008 durant les années 2008, 2007, 2016. Les fortes valeurs des VCN5 et VCN10 ont été observées en 1976, alors que les fortes valeurs des VCN30, VCN60 et VCN90 sont produites en 2010. Dans la station de Chacha N'mallah les faibles valeurs de VCN5, VCN10, VCN30 et VCN60 apparaissent respectivement en 2007, 1995 et 2001. Mais pour le VCN90, sa deuxième faible valeur est observée en 2001 alors que la troisième est enregistrée en 1995. Les fortes valeurs des VCNd de cette station sont apparues en 1976.

Les débits fréquents d'étiage sont ainsi identifiés (Tableau 6). Les débits fréquents de la station d'Aval Elhri sont marqués par une faible variabilité entre les différentes périodes de retours. Cette variabilité est plus importante dans la station de Chacha N'mallah.

Tableau 6. Fréquences d'apparition des VCNd du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Station	Fréquence	Période de retour	VCN5 (m ³ /s)	VCN10 (m ³ /s)	VCN30 (m ³ /s)	VCN60 (m ³ /s)	VCN90 (m ³ /s)
Aval Elhri	1/2	2 ans	0,979	0,991	1,032	1,065	1,100
	1/5	5 ans	0,583	0,590	0,610	0,625	0,634
	1/10	10 ans	0,376	0,381	0,390	0,395	0,390
	Q médian/ Q décennal		2,61	2,61	2,60	2,64	2,69
Chacha N'mallah	1/2	2 ans	1,575	1,591	1,658	1,794	1,958
	1/5	5 ans	0,846	0,856	0,899	1,001	1,059
	1/10	10 ans	0,465	0,472	0,502	0,586	0,589
	Q médian/ Q décennal		3,39	3,39	3,37	3,30	3,06

Les rapports entre le débit médian et le débit décennal sont importants dans le bassin versant de l'oued Srou (varient entre 2,82 et 3,33). Ces rapports montrent l'importance du soutien de la nappe karstique au niveau du sous bassin de l'oued de Chbouka. Les étiages les plus extrêmes de la chronique d'étude de 2008 se produisent au moins une fois tous les 108 ans.

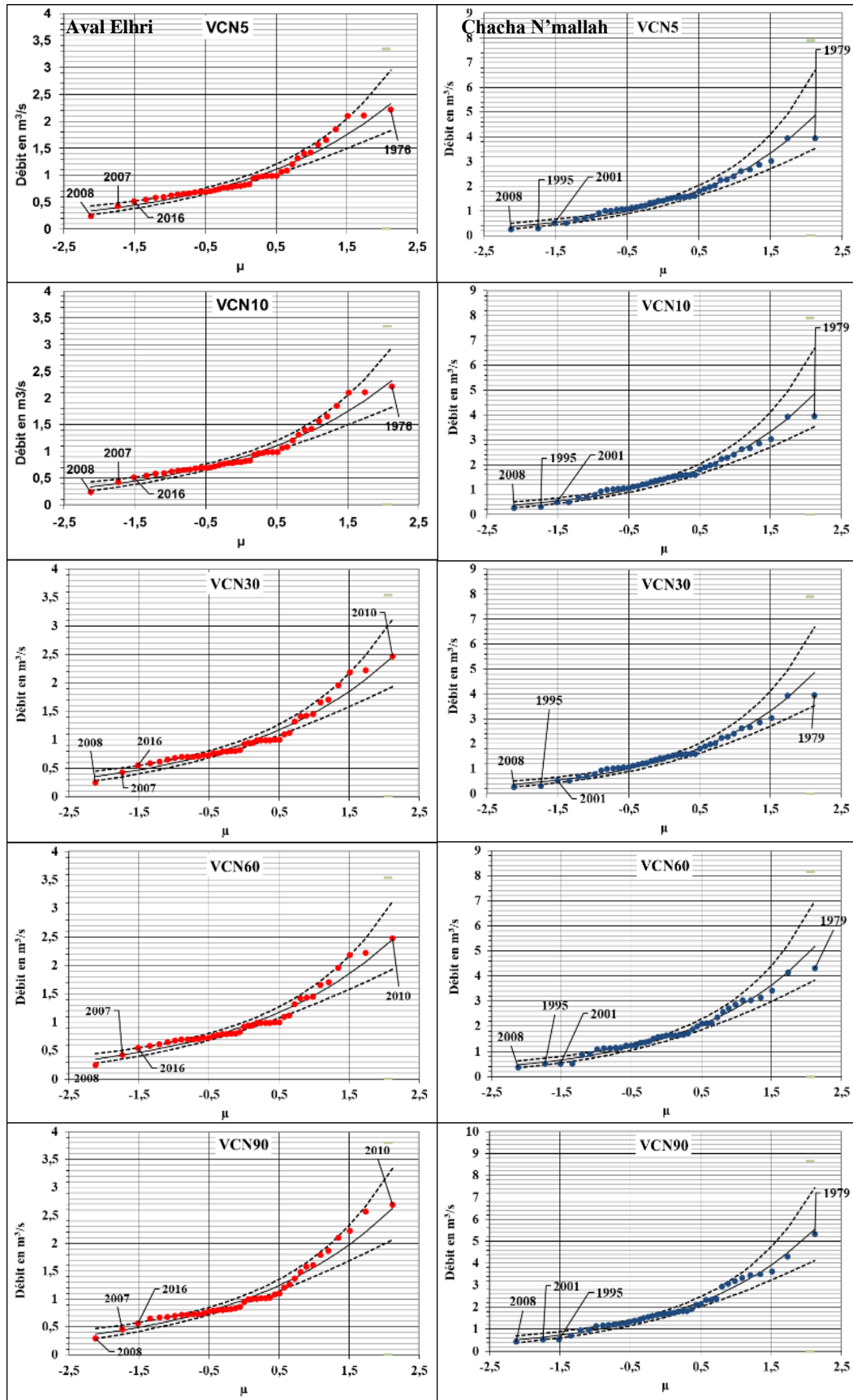


Fig. 7. Ajustement des VCNd des stations du bassin versant de l’oued de Srou à la loi Log-normal (1976-2016)

5 CONCLUSION

Au terme de la présente étude, qui avait pour but l'identification et l'analyse de la variabilité des débits d'étiages à l'échelle journalier « VCNd » dans un contexte climatique semi-aride. Les résultats obtenus montrent une grande stabilité de ces débits quelques soit la valeur de d jours choisi. Cette stabilité est due à la régularité des débits qui caractérise les cours d'eau marocains qui prennent naissance de la bordure Karstique du moyen Atlas pendant la saison des basses eaux. Les faibles débits apparaissent dans la totalité entre les mois de juillet et septembre. Les débits d'étiages dans le bassin sont variables d'une année à l'autre, ceci met en exergue notamment la succession des périodes humides et sèches avec une nette dominance de cette dernière. Cette fluctuation conduit à l'apparition des situations d'étiages sévères, comme le cas pour les années 1995 et 2008. Bref, cette contribution ne constitue qu'une introduction pour les études des étiages au Maroc et sa serait très important d'élargir ce type d'étude dans d'autre bassin dans le but de construire une banque des débits d'étiages pour améliorer la gestion de la ressource en eau.

REFERENCES

- [1] I. Jouilil, K. Bitar, H. Salama, A. Amraoui, A. Mokssit, et M. Tahiri, « SECHERESSE METEOROLOGIQUE AU BASSIN HYDRAULIQUE OUM ER RIBIA DURANT LES DERNIERES DECENNIES », *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782*, n° 12, Art. n° 12, janv. 2013, Consulté le: 5 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/151>.
- [2] E. Assemian *et al.*, « Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide : cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire) », *rseau*, vol. 26, n° 3, p. 247-261, 2013, doi: 10.7202/1018789ar.
- [3] O. Ghabbane, M. EL GHACHI, et M. CHAKIR, « Étude de la variabilité climatique et de ses impacts sur le régime hydrologique de l'Oued Srou, affluent de rive gauche de l'Oued Oum Er Rbia », *Afrique SCIENCE*, vol. 18, n° 2, p. 69-80, 2021.
- [4] N. Boutayeb, M. Bzioui, et J. Tammar, « [Water supply and demand: present planning balance-sheet and prospects]. [French] », in *Colloque International sur le Theme: Eau: Gestion de la Rarete. Rabat (Maroc). 19-20 Oct 1995.*, 1995.
- [5] B. Abdellaoui, A. Merzouk, M. Aberkan, et J. Albergel, « Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc) », *rseau*, vol. 15, n° 4, p. 737-748, 2002, doi: 10.7202/705478ar.
- [6] C. Lang Delus, « Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires », *cybergeo*, nov. 2011, doi: 10.4000/cybergeo.24827.
- [7] F. Garcia, « Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage », PhD Thesis, Paris 6, 2016.
- [8] A. DEVOS, A. NEJJARI, E. GILLE, B. AKDIM, et M. BENJELLOUL, « Ressources et usages de l'eau dans le bassin supérieur de l'oued Guigou (Moyen-Atlas-Maroc) », *Etudes de géographie physique*, n° 28, p. 191-195, 1999.
- [9] B. Hingray, C. Picouet, et A. Musy, *Hydrologie: Une science pour l'ingénieur*, vol. 21. PPUR presses polytechniques, 2009.
- [10] S. Lebaut, « L'apport de l'analyse et de la modélisation hydrologiques de bassins versants dans la connaissance du fonctionnement d'un aquifère : les grès d'Ardenne-Luxembourg », phdthesis, Université Paul Verlaine - Metz, 2000. Consulté le: 14 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748991>.
- [11] V. U. Smakhtin, « Low flow hydrology: a review », *Journal of Hydrology*, vol. 240, n° 3-4, p. 147-186, janv. 2001, doi: 10.1016/S0022-1694(00)00340-1.
- [12] C. Lang, « Etiages et tarissements : vers quelle modélisations ? : l'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français », These de doctorat, Metz, 2007. Consulté le: 9 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2007METZ016L>.
- [13] M. El Ghachi, « La Seille : un système fluvial anthropisé (Lorraine, France) », These de doctorat, Metz, 2007. Consulté le: 9 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2007METZ015L>.
- [14] C. Catalogne, « Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés », PhD Thesis, Doctorat Ocean Atmosphere Hydrologie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2012.
- [15] A. Qadem, « Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc) », Université Sidi Mohamed Ben Abdelah et l'Université de Lorraine, Fès, 2014. [En ligne]. Disponible sur: http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2015_0263_QADEM.pdf
- [16] M. Bouabdelli, « Tectonique et sédimentation dans un bassin orogénique : le sillon viséen d'azrou-khenifra (est du massif hercynien central du maroc) », These de doctorat, Strasbourg 1, 1989. Consulté le: 11 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/1989STR1A003>.
- [17] M. El. Wartiti, J. Broutin, P. Freytet, M. Larhrib, et N. Toutin-Morin, « Continental deposits in Permian basins of the Mesetian Morocco, geodynamic history », *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, vol. 10, n° 1, p. 361-368, janv. 1990, doi: 10.1016/0899-5362(90)90067-O.

- [18] K. Elbouqdaoui, H. Ezzine, M. Badrahoui, M. Rouchdi, M. Zahraoui, et A. Ozer, « Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc) », *Evaluation by remote sensing and SIG of potential erosion risk in the Oued Srou Basin (Middle Atlas, Morocco)*, vol. 29, n° 1-2, 2005, Consulté le: 28 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/248867>.
- [19] M. Adell, J. A. Domínguez-Gómez, et J. Soria, « Monitoring of Forty Years of Agricultural Expansion in the Oum Er Rbia Valley (Morocco). The Use of Google Earth Engine Compared to Sentinel Application Platform ». Preprints, 1 novembre 2021. doi: 10.20944/preprints202111.0007.v1.
- [20] A. Devos, A. Nejjari, E. Gille, B. Akdim, et M. Benjelloul, « Ressources et usages de l'eau dans le bassin supérieur de l'oued Guigou (Moyen Atlas - Maroc) », in *Etudes de géographie physique*, 1999, n° 28, p. 191-195. Consulté le: 28 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=13641988>.
- [21] T. El Orfi, G. Omar, M. El Ghachi, et S. Lebaut, « Variabilité des précipitations dans le bassin versant de l'oued Oum ErRbia en amont du barrage Ahmed El Hansali », janv. 2020.
- [22] E. Ghachi, F. Morchid, et M. El Ghachi, « Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique (Rainfall trend analysis in Khenifra city in a context of climate variability) », vol. 6, p. 3346-3358, janv. 2015.
- [23] O. Ghabbane, « Étiage et tarissement dans le bassin versant de l'oued Srou (amont Oum Er Rbia-Maroc) (1976-2019) : Détermination, analyse et impact », Sultan Moulay slimane, Béni Mellal, 2021.
- [24] R. Serbout, « Le bassin versant de l'oued Oum er Rébia en amont de Déchra el Oued (moyen-Atlas) : contribution à l'étude des phénomènes hydro-climatiques : thèse... », These de doctorat, Nice, 2001. Consulté le: 28 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2001NICE2043>.
- [25] A. A. Assani, « Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (*El Niño/La Niña*) », *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 10, n° 4, p. 245-252, janv. 2000.
- [26] A. M. Kouassi, K. F. Kouamé, Y. B. Koffi, K. B. Dje, J. E. Paturel, et S. Oulare, « Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire », *Cybergeo: European Journal of Geography*, déc. 2010, doi: 10.4000/cybergeo.23388.
- [27] C.-R. Nguimalet et D. Orange, « Caractérisation de la baisse hydrologique actuelle de la rivière Oubangui à Bangui, République Centrafricaine », *La Houille Blanche*, n° 1, Art. n° 1, févr. 2019, doi: 10.1051/lhb/2019010.
- [28] S. E. Nicholson, « Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent », *The Holocene*, vol. 4, n° 2, p. 121-131, juin 1994, doi: 10.1177/095968369400400202.
- [29] J. Paka *et al.*, « Fluctuations des précipitations et des écoulements dans le bassin versant de l'Alima à Tchikapika au Congo-Brazzaville en Afrique centrale de 1960-1993 », *Rev. Ivoir. Sci. Technol*, vol. 32, p. 85-97, 2018.
- [30] T. D. Soro *et al.*, « La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) », *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, n° Volume 5, Art. n° Volume 5, janv. 2011, doi: 10.4000/physio-geo.1581.
- [31] A. B. Yao, B. T. A. Goula, Z. A. Kouadio, K. E. Kouakou, A. Kane, et S. Sambou, « Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide. Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire », *Rev. Ivoir. Sci. Technol*, vol. 19, p. 136-157, 2012.
- [32] E. Bahin Yoli Baudet, S. Haida, et J.-L. Probst, « Analyse de la variabilité hydroclimatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride : Le Sebou Au Maroc », *European Scientific Journal*, vol. 13, n° 5, p. 509-525, 2017, doi: 10.19044/esj.2017.v13n5p509.
- [33] A. Kingumbi, Z. Bergaoui, J. Bourges, P. Hubert, et R. Kalled, « Etude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale. in, Séminaire International Montpellier 2000; «Hydrologie des Régions Méditerranéennes»; PHI-V/Doc. Tech. en Hydrol. N 51 ». UNESCO, Paris, 2000.
- [34] G. Mahé et J.-C. Olivry, « Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989 », *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 6, n° 1, p. 109-117, 1995.
- [35] A. Sebbar, W. Badri, H. Fougrach, M. Hsaine, et A. Saloui, « Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004) », *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 22, n° 3, p. 139-148, 2011.
- [36] M. Roche, Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand. 1986.
- [37] M. Dacharry, « Dictionnaire français d'hydrologie ». URL: <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/indexdic.htm>, 1996.
- [38] I. Abi-Zeid et B. Bobée, « La modélisation stochastique des étiages: une revue bibliographique », *rseau*, vol. 12, n° 3, p. 459-484, avr. 2005, doi: 10.7202/705360ar.
- [39] F. Garcia, « Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage », These de doctorat, Paris 6, 2016. Consulté le: 6 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2016PA066653>.
- [40] R. Pырce, « Hydrological low flow indices and their uses », 2004.

- [41] M. Chakir et M. El Ghachi, « Low flow water: Hydrological definition, statistical identification and regulatory thresholds for precise management and rationalization of water resources », *International Journal of Environment & Water*, vol. Vol 11, n° 1, p. 1-15, 2022.
- [42] R. Frécaut, « Contribution à l'étude statistique des étiages. Application au domaine tempéré océanique », *rgest*, vol. 15, n° 1, p. 89-99, 1975, doi: 10.3406/rgest.1975.1311.
- [43] T. A. McMahon et R. G. Mein, *River and reservoir yield*, vol. 368. Water resources publications Littleton, CO, 1986.
- [44] D. C. Midgley, W. V. Pitman, et B. J. Middleton, « The Surface Water Resources of South Africa 1990 (Vol 1 to 6). Report Numbers 298/1.1/94 to 298/6.1/94 (text) and 298/1.2/94 to 298/6.2/94 (maps) », *Water Research Commission, Pretoria. Also accompanied by a CD-ROM with selected data sets*, 1994.
- [45] D. R. Hindley, « The definition of Dry Weather Flow in river flow measurement », *J. Inst. Water Engng*, vol. 27, p. 438-440, 1973.
- [46] A. Gustard, A. Bullock, et J. M. Dixon, *Low flow estimation in the United Kingdom*. Wallingford: Institute of Hydrology, 1992.
- [47] J. Pirt et M. Simpson, *The Estimation of river flows*. Severn Trent Water Authority, 1983.
- [48] D. M. Thomas et M. A. Benson, « Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics », US Government Printing Office Washington, DC, 1970.
- [49] D. C. Hayes, *Low-flow characteristics of streams in Virginia*. US Government Printing Office, 1991.
- [50] R. M. Vogel et C. N. Kroll, « Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics », *Water Resources Research*, vol. 28, n° 9, p. 2451-2458, 1992.
- [51] S. L. Dingman et S. C. Lawlor, « ESTIMATING LOW-FLOW QUANTILES FROM DRAINAGE-BASIN CHARACTERISTICS IN NEW HAMPSHIRE AND VERMONT 1 », *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 31, n° 2, p. 243-256, 1995.
- [52] M. H. Stuckey, « Low-flow, base-flow, and mean-flow regression equations for Pennsylvania streams », U. S. Geological Survey, 2006.
- [53] A. Qadem, « QUANTIFICATION, MODELISATION ET GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT SEBOU (MAROC) », p. 360, 2014.
- [54] E. Gille, A. Nejjari, et A. DEVOS, « Le lac Aguelmam Sidi Ali (Moyen Atlas marocain): un évaporomètre naturel? », *Mosella*, vol. 25, n° 3-4, p. 55-69, 2001.
- [55] K. Obda, « Indigences extrêmes des écoulements des oueds méditerranéens: cas des oueds Nekor au Rif et du Haut Sebou au Moyen Atlas », PhD Thesis, Thèse de doctorat d'Etat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Maroc, 422p, 2004.
- [56] J. P. Bricquet, F. Bamba, G. Mahe, M. Toure, et J. C. Olivry, « Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique », *PHI-V*, vol. 6, p. 83-95, 1997.
- [57] F. Nezzal et Z. Iftini-Belaid, « Variabilité climatique et impacts anthropiques sur la nappe alluviale de la Mitidja Orientale (Baie d'Alger) », *Revue scientifique et technique, LJEE*, n° 21, 2013.
- [58] J. E. Paturel, E. Servat, B. Kouamé, H. Lubes, M. Ouedraogo, et J. M. Masson, « Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea Part II: an integrated regional approach », *Journal of hydrology*, vol. 191, n° 1-4, p. 16-36, 1997.
- [59] I. Abi-Zeid, « La modélisation stochastique des étiages et de leurs durées en vue de l'analyse du risque. », phd, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec, 1997. Consulté le: 19 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://espace.inrs.ca/id/eprint/313/>.
- [60] C. Catalogne, « Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés », phdthesis, Doctorat Ocean Atmosphere Hydrologie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2012. Consulté le: 9 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.inrae.fr/tel-02597804>.
- [61] S. Gailliez, « Estimation des débits d'étiage pour des sites non jaugés. Application en Région wallonne. », 2013.
- [62] R. M. Vogel et I. Wilson, « Probability distribution of annual maximum, mean, and minimum streamflows in the United States », *Journal of hydrologic Engineering*, vol. 1, n° 2, p. 69-76, 1996.