

Evaluation des écoulements de base dans le bassin de l'Ouémé (Bénin) par séparation des hydrogrammes

[Evaluation of baseflow in the Ouémé Basin (Benin) through hydrograph separation]

F. Avahounlin Ringo¹⁻², Okoundé Jean-Eudes¹, Koudérin Lucie¹, and Danhossou Gilbert¹

¹Chaire Internationale de Physique Mathématique et Applications (CIPMA CHAIRE-UNESCO, UAC), Benin

²Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM), Benin

³Université d'Abomey-Calavi (UAC), Benin

Copyright © 2025 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: This study aims to apply different methods for oueme-basin base flow assessment. Of the four separation hydrogram approaches of that exist for the assessment of the baseflow, only the approaches by filter proposed by Nathan & McMahon, Chapman and the one this of Furey and Gupta have been tested in view of an identification of the most suitable method for the evaluation of the baseflow. The application of the method «approches by filter», watch that the filter of Nathan & McMahon gives some results very little satisfactory in spite of relatively weak values of mistakes. As for the filters proposed by Furey & Gupta, the gotten results present an overestimate of the baseflow during the period of the low flow. Only the filter proposed by Chapman shows a good evaluation of the baseflow all along the year. The method of Chapman is very comfortable and precise. It is evident from these works that the method of Chapman can be used to value the oueme baseflow. The results descended of its application can be used therefore like.

KEYWORDS: approach by filter, low flow, assessment, oueme-basin, hydrogram separation.

RESUME: La présente étude a pour objectif l'application des méthodes d'évaluation des écoulements de base pour l'estimation des débits de base dans le bassin Ouémé. Des quatre approches de séparation d'hydrogramme existantes pour l'évaluation des écoulements de base, seules les approches par filtre proposée par Nathan & McMahon, Chapman et celle ce de Furey et Gupta ont été testées en vue d'une identification de la méthode la plus appropriée pour l'estimation des débits de base. L'application de la méthode « approche par filtre», montre que le filtre de Nathan & McMahon donnent des résultats très peu satisfaisants malgré des valeurs relativement faibles d'erreurs. Quant aux filtres proposés par Furey & Gupta, les résultats obtenus présentent une surestimation des écoulements de base durant la période des basses eaux. Seul le filtre proposé par Chapman montre une bonne estimation de l'écoulement de base tout au long de l'année. La méthode de Chapman est très aisée et précise. IL ressort de ces travaux que la méthode de Chapman peut être utilisée pour évaluer les débits de base de l'Ouémé. Les résultats issus de son application peuvent donc être utilisés comme variable hydrologique pour des études futures entrant dans le cadre de gestion des ressources en eau durant la période des basses eaux.

MOTS-CLEFS: approche par filtre, débit de base, évaluation, bassin de l'ouémé, séparation d'hydrogramme.

1 INTRODUCTION

L'écoulement de base d'un cours d'eau qui est la composante de l'écoulement total de celui-ci résultant de son alimentation par les seules eaux souterraines, peut être approchée par l'analyse de son hydrogramme. Ils sont considérés comme la contribution des eaux souterraines à l'écoulement du cours d'eau (White & Sloto., 1990; Holtschlag & Nicolas., 1998; Smakhtin., 2001). Son évaluation est indispensable pour les études hydrogéologiques y compris l'approvisionnement en eau, l'irrigation, les pertes d'eau par dilution, la navigation, l'hydrodynamique, l'estimation de la recharge des nappes d'eau souterraines et leur caractérisation (Brutsaert & Nieber., 1977; Troch et al., 1993; Szilagyi., 2004 cités dans M. R. Ghanbarpour et al). L'analyse des hydrogrammes pour l'évaluation des débits de base d'une rivière permet la quantification des débits des écoulements souterrains. Cette quantification est plus précise que celle résultant de la méthode du bilan hydrologique (Olivier Banton et al., 1999). Elle renseigne sur les débits instantanés des écoulements souterrains contrairement à la méthode du bilan hydrologique qui ne permet qu'une évaluation sur une longue période de temps, choisie généralement comme étant le cycle hydrologique annuel. La connaissance des débits instantanés des écoulements souterrains présente un intérêt pour l'étude hydrologique d'un cours d'eau puisqu'ils correspondent aux débits d'étiage de celui-ci. Toutefois elle constitue une information très partielle dans la connaissance générale des eaux souterraines étant donné qu'elle ne renseigne ni sur les volumes réels des eaux souterraines, ni sur leurs vitesses d'écoulement. Dans le cadre de la présente étude, les méthodes d'évaluation des débits de base par séparation des hydrogrammes ont été testées à l'échelle du bassin de l'Ouémé. Celle-ci a pour objectif l'identification de l'une des meilleures méthodes applicables pour l'estimation des écoulements de base dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur en vue d'une bonne connaissance de la contribution des eaux souterraines à l'écoulement du fleuve Ouémé. Cette étude constitue une étape majeure dans la connaissance de la variation temporelle des écoulements de base, information utile à la prévention de la réduction des eaux souterraines et à son adaptation.

2 CADRE D'ÉTUDE

L'Ouémé à Savè couvre une superficie de 23.600 km² pour une longueur de 523 km soit 47,2 % de la superficie couverte (Le Barbé et al, 1993) et s'étend des latitudes 7°58 et 10°12 et des longitudes 1°35 et 3°05 cité par Totin et al, (2007). La portion d'espace faisant objet de cette étude prend en compte le bassin à son exutoire de Savè.

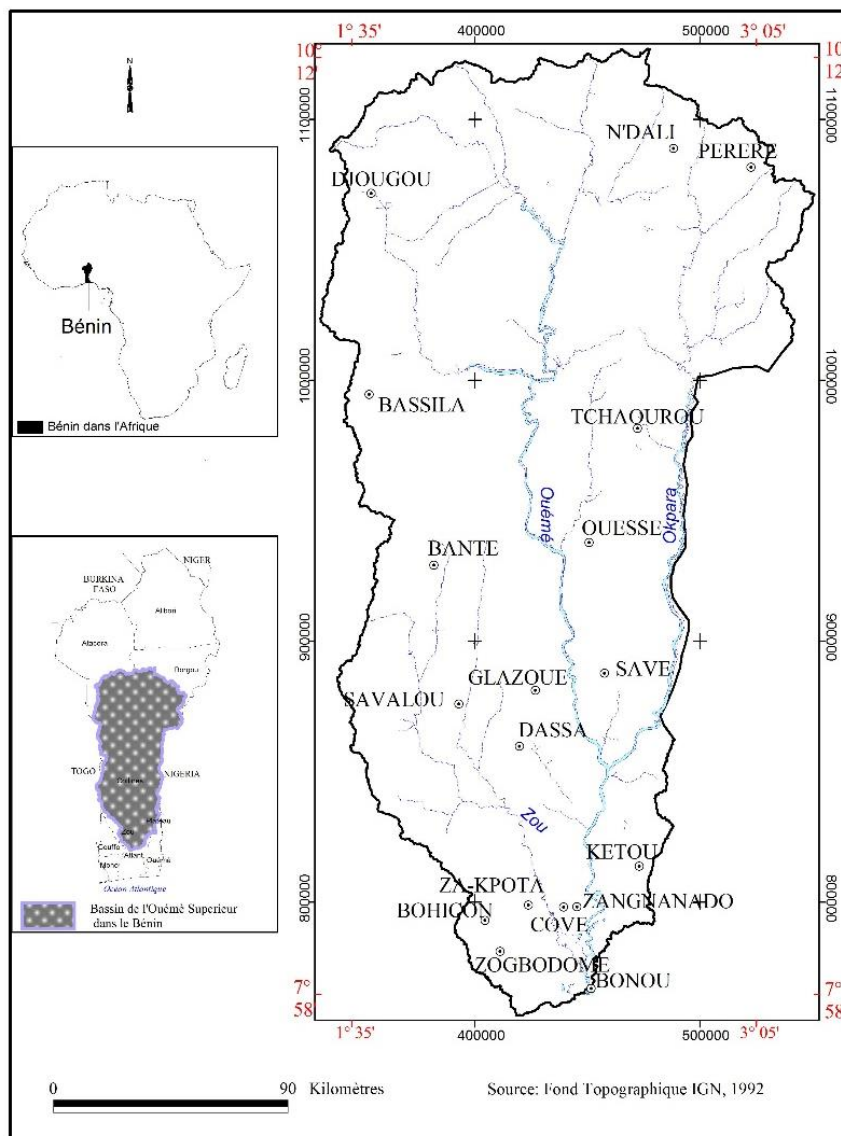


Fig. 1. Situation géographique du bassin de l'Ouémé

Le régime pluviométrique se caractérise par un climat unimodal. Les moyennes annuelles de précipitations (1952 – 2006) sont de 1098,40 mm à Savè. L'hydrologie du bassin est causée par la saison pluvieuse unimodale et la dynamique de l'écoulement est caractérisée par un débit élevé pendant la saison des pluies. Ainsi les débits maxima relevés (1952 – 2006) entre Mai et Septembre sont de l'ordre de 267,88 m³/s à Bétérou et 478,87 m³/s au pont de Savè. De Novembre à Mai presque tous les cours d'eau s'assèchent et les débits moyens d'étiage passent de 49 à 5 m³/s à Savè (Totin et al, 2007). La réponse du bassin à la répartition des pluies s'observe à partir de Mai – Juin. Ainsi après un temps d'inertie hydrologique où les premières pluies ont servi à la recharge des réservoirs d'eau souterraine dans les secteurs arénisés de roches granitiques entre Février et Mai, l'écoulement reprend en Juin. De ce fait les hautes eaux sont enregistrées de Juillet à Octobre et les basses eaux de Novembre à Mai (Totin et al, 2007). La structure verticale des sols est essentiellement constituée d'une zone de sols (1 à 3m d'épaisseur), d'une zone d'altérites formées par les arènes issues de la décomposition des roches (10 à 20m d'épaisseur) (DH/SOGREAH, 1998) et un socle qui reste fracturé ou fissuré dans sa partie supérieure puis non fracturé, non altéré et imperméable plus en profondeur (Varado, 2004). D'un relief peu marqué par des inselbergs isolés, avec des altitudes comprises entre 230 m (Ouémé) et 658 m (Inselberg Mont Sobbaro), il repose sur le socle dahoméyen fracturé, essentiellement constitué de migmatites et de gneiss (Faure et Volkoff, 1998). Ces formations sont caractérisées par une aquifère de fracture rocheuse par le bas et un aquifère régitale par le haut dans sa zone d'altération. L'ensemble des zones fissurées et les arènes granitiques constituent les rares poches d'infiltration et réservoirs d'eau qui alimentent les débits d'étiage du fleuve Ouémé.

3 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

3.1 REVUE DE LITTÉRATURE

Les écoulements de base, qui représentent une estimation de l'apport d'un aquifère à une rivière, sont calculés à partir de la séparation d'hydrogrammes en formulant certaines hypothèses. En effet un hydrogramme de rivière est constitué d'eau ayant emprunté quatre chemins différents: 1) le ruissellement ou écoulement de surface, 2) l'écoulement hypodermique, qui correspond à la partie de l'eau infiltrée qui circule dans les couches supérieures du sol jusqu'à ce qu'elle refasse surface, 3) l'écoulement souterrain et 4) les précipitations tombant directement sur le cours d'eau (C.Rivard et al., 2003). Généralement, la surface d'eau étant très petite comparativement à la superficie du bassin versant, ce dernier apport peut être considéré négligeable. L'hypothèse de base de la séparation de l'hydrogramme est que les écoulements ont des temps de réponse différents. Ainsi, la contribution du ruissellement cesse en premier et l'écoulement souterrain se prolonge après l'arrêt de l'écoulement hypodermique (El-Jabi et Rousselle, 1990). En période d'étiage, le débit de base fournit la grande majorité du débit du cours d'eau. La réponse hydrologique d'un bassin versant dépend fortement de ses caractéristiques physiographiques. Le temps de concentration, qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une précipitation, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques: la taille du bassin (sa superficie), sa forme et sa pente. À ces facteurs s'ajoutent encore l'influence des paramètres hydrométéorologiques qui varient en fonction de l'altitude (précipitations, température, vent, rayonnement solaire), du type de sol (propriétés d'infiltration et de rétention, perméabilité) et de son occupation. Par ailleurs, les facteurs anthropiques tels que les prélèvements en eau, dans la nappe (pompage) ou dans le cours d'eau (irrigation), les ouvrages hydrauliques de régulation de débit (barrage) ou les rejets d'effluents dans les cours d'eau ont également une influence directe sur l'estimation des débits de base. Ces quantités ne peuvent généralement pas être quantifiées lors de l'estimation de la recharge et font donc partie de l'incertitude associée à cette approximation. De plus, toutes les méthodes de séparation d'hydrogrammes souffrent d'un manque de connaissance réelle de l'écoulement à travers le bassin versant sur une période incluant plusieurs événements pluvieux et des conditions d'humidité antécédente (Arnold *et al.*, 1995). Toutefois, la séparation des hydrogrammes est régulièrement utilisée pour estimer la quantité d'eau s'étant infiltrée jusqu'à la nappe puisqu'elle ne nécessite pas de mesures directes dans le sol, souvent incertaines et locales, et intègre une grande quantité d'information à l'échelle régionale sur de nombreuses années. Quatre types d'approches (géochimique, graphique, par filtre et analytique) sont utilisées pour la séparation des débits de base. La séparation est possible en faisant l'hypothèse que les hydrogrammes peuvent se diviser en deux parties distinctes: l'écoulement de surface (le ruissellement) et l'écoulement souterrain (incluant le débit de base et l'écoulement hypodermique). La séparation des hydrogrammes consiste à définir un filtre mathématique de type « passe-bas » dans le domaine du temps et/ou des fréquences, et il est appliqué par la suite aux séries quotidiennes des débits de rivières (Nathan et McMahon, 1990). Différents filtres ont été utilisés en se basant sur celui élaboré par Lyne et Hollick (1979, dans Furey et Gupta, 2001) qui considèrent que le débit est la somme de deux composantes à savoir une composante basse fréquence représentant le débit de base et une composante haute fréquence représentant l'écoulement de surface. Les débits de base sont calculés en additionnant une grande proportion du débit de base du temps précédent à un terme tenant compte du débit des rivières actuel et/ou passé.

Le filtre proposé par Nathan & McMahon (1990) s'écrit comme suit:

$$Q_k = \alpha Q_{k-1} + \frac{(1+\alpha)}{2} (y_k - y_{k-1}) \quad (\text{Eq 1})$$

Où Q_k est le débit de base au jour k , y_k le débit de rivière au jour k , y_{k-1} le débit de rivière au jour précédent le jour k , α est le paramètre fixé du filtre est fonction du débit total et des précipitations. Suivant ces auteurs, le filtre passe trois fois au-dessus de la série des données et le nombre de passage détermine le degré de lissage.

Le filtre de Nathan et McMahon présente l'inconvénient de nécessiter plusieurs passages de façon à ce que le débit de base ne dépasse pas le débit de rivière vers la fin de la courbe de récession (fin du ruissellement). Chapman (1991), propose donc une amélioration du filtre de Nathan et McMahon, un filtre nécessitant un seul passage. Il s'écrit sous la forme:

$$Q_k = \frac{(3\alpha-1)}{(3-\alpha)} Q_{k-1} + \frac{(1-\alpha)}{(3-\alpha)} (y_k + y_{k-1}) \quad (\text{Eq 2})$$

où Q_k est le débit de base au jour k , y_k le débit de rivière au jour k , y_{k-1} le débit de rivière au jour précédent le jour k , α est le paramètre fixé à 0,95.

Furey et Gupta ont quant à eux proposé un filtre basé sur quatre paramètres physiques qui ont été estimés à partir de données de débits de rivières et de précipitations. L'équation proposée par Furey et Gupta (2001) s'écrit:

$$Q_k = (1 - \gamma) Q_{k-1} + \gamma \frac{c_3}{c_1} (y_{k-3} - Q_{k-3}) \quad (\text{Eq 3})$$

Où $(1-\nu) = 0,95$ et $C_3/C_1 = 1,1$

Les deux filtres de Chapman (1991) et Furey et Gupta (2001) utilisent des relations basées sur des caractéristiques physiques pour déterminer les coefficients de proportionnalité. Ces deux méthodes n'utilisent pas de contraintes sur les équations (ex: $0 < Q_{base} < Q_{total}$, etc.).

3.2 DONNÉES ET MÉTHODES

Les données utilisées dans le cadre de la présente étude concernent les données hydrométriques des différentes stations du bassin de l’Ouémé. Sur la période 1953 à 2006, ces données prennent en compte les stations de l’Ouémé à Bétérou, à Atchakpa_Savè, à Bonou, le Zou à Atchérigbé, à Domé. Les trois méthodes (HYSEP, Furey et Gupta, Chapman) ont été intensivement testées (Benhamanne, 2002). Les différentes conclusions stipulent que la méthode du minimum local de HYSEP surestime souvent le débit de base maximal, et même si les deux filtres (Furey et Gupta, Chapman) fournissent généralement des résultats semblables, le débit de base estimé avec le filtre de Furey et Gupta excède souvent le débit de rivière durant la période de récession. De plus la séparation d’hydrogrammes par filtre peut facilement être réalisée à l’intérieur d’un fichier (ex: Excel), alors que l’utilisation d’HYSEP requiert de nombreuses étapes pour traiter les données (dont plusieurs conversions de fichiers). A cet effet, seules les approches par filtre sont testées dans le cadre de la présente étude. Pour cette étude, le but recherché étant de sélectionner la méthode de séparation qui s’appliquerait à l’échelle régionale, ne serait-ce dans le bassin de l’Ouémé supérieur, les différents filtres seront testés puis comparés suivant des critères de performance. Il faut signaler que les techniques de séparation des écoulements de base sont arbitraires et subjectives, toutefois l’analyse de la courbe de récession peut être utilisée comme meilleur critère d’évaluation de la fiabilité de la méthode. Pour ce faire une simple observation graphique et l’analyse des courbes de récession seront utilisées pour comparer les différents résultats obtenus, en vue du choix de la méthode qui évaluerait le plus précisément que possible les débits de base.

Les critères de performance sont l’Erreur entre la Moyenne Arithmétique (EMA) et l’Erreur sur la Racine Carré des débits Moyen (ERCM). L’expression des erreurs s’écrit sous la forme:

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[z(x_i) - z(x_i) \right] \tag{Eq 4}$$

$$ERCM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[z(x_i) - z(x_i) \right]^2} \tag{Eq5}$$

Où $z(x_i)$ est la valeur observée à partir de l’analyse de la courbe de récession, z^{x_i} est la valeur estimée à partir de la méthode testée et n le nombre d’observations.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 TECHNIQUE APPROPRIÉE À L’ESTIMATION DES ÉCOULEMENTS DE BASE DANS LE BASSIN DE L’OUÉMÉ

L’ensemble des techniques de séparation des hydrogrammes basées sur l’approche des filtres est testé avec succès et a permis de retenir une méthode d’évaluation de la recharge annuelle des nappes dans le bassin de l’Ouémé à l’exutoire de Savè. Les figures 2 et 3 présentent respectivement les hydrogrammes de base séparée par les filtres de Furey_Gupta (2001) et de Chapman (1991).

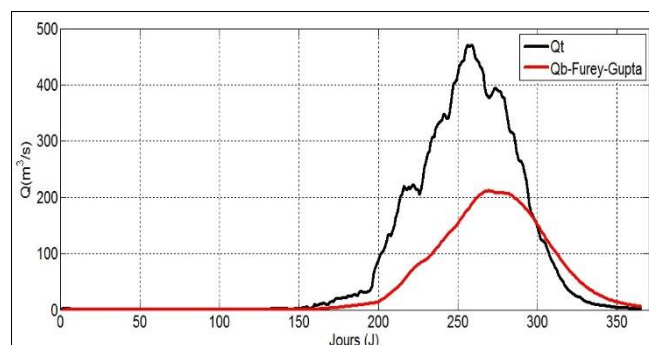


Fig. 2. Comparaison de la méthode de calcul du débit de base par le filtre de Fury & Gupta

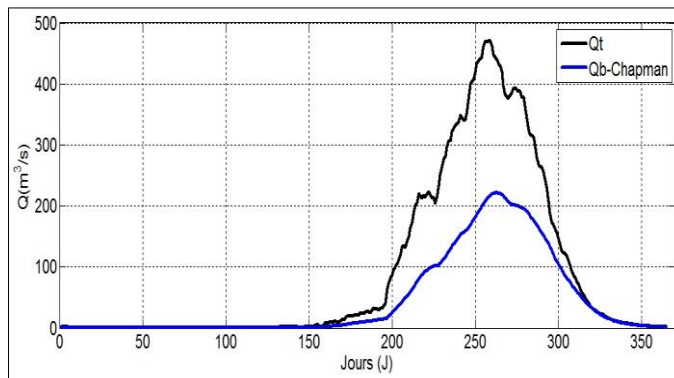


Fig. 3. Comparaison de la méthode de calcul du débit de base par le filtre de Chapman

Les différentes figures sont utilisées pour une comparaison graphique des méthodes tout en associant aux résultats les critères de performance basés sur les Erreurs entre la Moyenne Arithmétique (EMA) et l’Erreur sur la Racine Carré des débits Moyen (ERCM) et les résultats de l’analyse de la courbe de récession. Il ressort de cette comparaison que la méthode de filtre proposée par Furey & Gupta (2001) représente bien les débits mais, elle surestime (décalage entre le débit total et le débit de base) les écoulements de base pendant la période de récession. Ceci confirme les conclusions de Rivard et al (2003). D’après ces auteurs, les décalages obtenus entre le débit total et le débit de base de ce filtre proviennent du fait que cette technique considère que le facteur retard des eaux souterraines par rapport au ruissellement est de 3 jours.

Dans certains bassins versants et dépendant de l’événement pluvieux (intensité, durée), une ou deux journées pourraient suffire pour drainer toute l’eau souterraine vers l’exutoire du bassin, ce qui soulève le problème du dépassement du débit total par le débit de base sur une base quotidienne. De plus, à cause du grand nombre de stations (situées dans des bassins dont les caractéristiques sont très différentes) à traiter et surtout pour avoir un outil facile à appliquer, les paramètres du filtre qui sont fonction du débit total et des précipitations ont été fixés. Les valeurs moyennes attribuées à ces paramètres contribuent probablement au problème de dépassement du débit total par le débit de base dans certains cas. De même la comparaison des résultats obtenus avec le filtre proposé par Chapman (1991) montre une bonne estimation de l’écoulement de base tout au long de l’année. Dans la pratique, le débit de base ne dépasse que très rarement les débits de rivière, ce qui traduit bien le comportement hydrologique du bassin durant la période de récession. En fait, en absence de précipitation, le cours d’eau reste alimenté par les eaux souterraines correspondant aux réserves régulatrices des horizons aquifères de son bassin versant.

Les différentes applications des filtres proposés par Nathan & McMahon (1990) dans la littérature ont montré des résultats très peu satisfaisants. Selon Rivard et al (2003), la valeur du paramètre α permettant la meilleure séparation de l’hydrogramme est comprise entre 0,9 et 0,95. De plus le simple filtre numérique fixé à 0,95 produit un débit exact et les résultats répétés sont comparables au simple lissage ainsi qu’aux règles de séparation. Malgré cette performance annoncée de la méthode, les quatre tests effectués sur les deux sous-bassins donnent une sous-estimation des débits de base, ceci surtout durant la période de récession (figure 4).

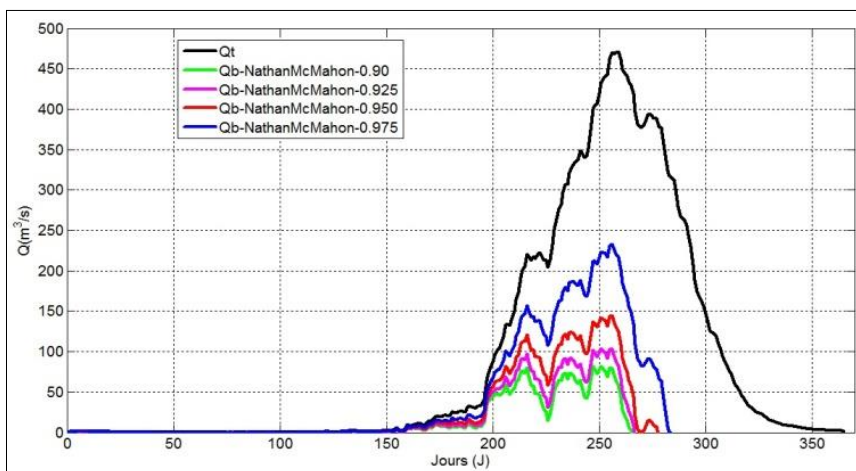


Fig. 4. Comparaison de la méthode de calcul du débit de base par les différents filtres de Nathan & McMahon

Pour comparer les différents résultats obtenus, les courbes de récession ont été analysés afin de confirmer ou non la performance de chaque méthode appliquée. En fait, pendant la récession les débits de base renseignent sur les écoulements des eaux souterraines. Les hydrogrammes des basses eaux sont tracés sur papier semi-logarithmique avec les débits en échelle logarithmique, on identifie donc la période de récession par changement du coefficient de tarissement représenté par la pente du graphique semi-logarithmique. La forme de l'hydrogramme de base est obtenue en traçant le segment de droite délimitant le début et la fin de la récession. Quand bien même fastidieuse, elle est appliquée aux méthodes de séparation des hydrogrammes, ici adoptée afin d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus. Une telle procédure assure une utilisation des débits de base comme variable indépendante pour les travaux futurs sur les ressources en eau. Par ailleurs les critères d'erreur d'estimation ensemble avec les résultats de l'analyse de la courbe de récession sont aussi utilisés pour comparer les résultats des différents filtres. Il ressort du tableau 1 que les filtres de Furey & Gupta d'une part et de Chapman d'autre part présente avec plus de précision, les débits de base comparativement aux autres filtres où on a des erreurs de l'ordre de 100%.

Tableau 1. Valeurs des critères de performance dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè

METHODE DE FILTRE	ERREUR	
	EMA	ERCM
Furey_Gupta	1,61	30,19
Chapman	30,11	25,89
Nathan&McMahon_0.9	136,94	32,12
Nathan&McMahon_0.925	152,37	29,09
Nathan&McMahon_0.95	177,91	21,59
Nathan&McMahon_0.975	210,26	Non définie

Les erreurs obtenues avec le filtre de Furey et Gupta laissent penser à une meilleure estimation des écoulements. De ce fait les points d'inflexion (figure 5) des hydrogrammes tracés à l'échelle logarithmique ont été sélectionnés et comparés afin de retenir avec plus de précision la meilleure méthode. Ces points quand bien même arbitraires marquent le début du tarissement pur (période au cours de laquelle le cours d'eau reste uniquement alimenté par les réservoirs d'eaux souterraines).

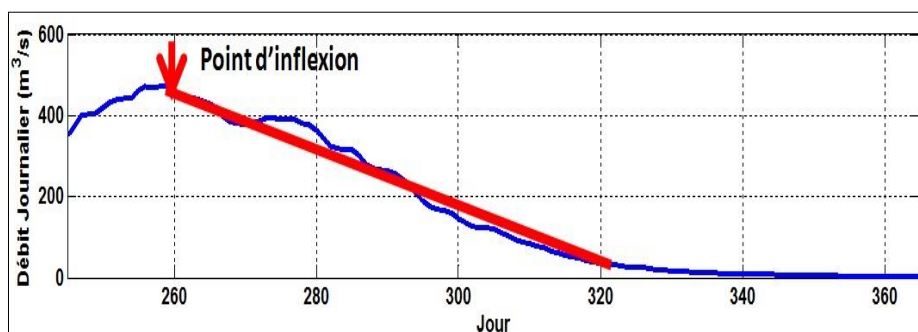


Fig. 5. Analyse de la courbe de tarissement et identification du point d'inflexion de l'hydrogramme moyen

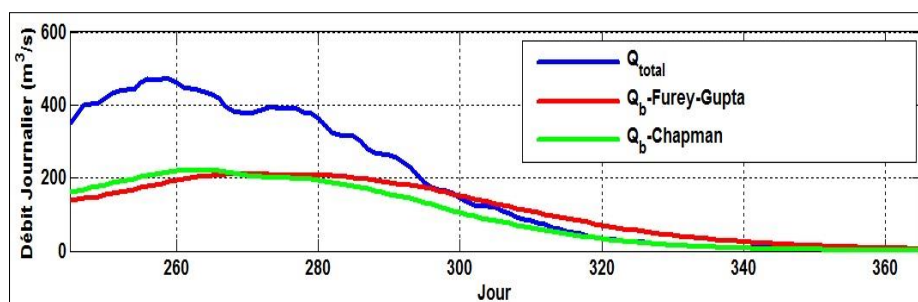


Fig. 6. Comparaison des résultats du filtre de Furey & Gupta et celui de Chapman par observation des points d'inflexion moyen

L'analyse de la figure 6 et l'observation des hydrogrammes de base montre que la méthode de Chapman détermine avec plus de précision le point d'inflexion comparativement à la méthode de Furey & Gupta qui présentent un décalage dans l'apparition des points. De tout ce qui précède, la méthode de Chapman peut être retenue pour évaluer les débits de base à l'échelle du bassin de l'Ouémé.

4.2 UTILISATION DES ÉCOULEMENTS DE BASE POUR L'ANALYSE DE LA VARIABILITÉ DE LA RECHARGE DES NAPPES DANS LE BASSIN DE L'OUÉMÉ

Au Bénin, les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau de la population. Le renouvellement de cette ressource dépend directement de l'infiltration efficace des précipitations, qui elle, résulte évidemment des précipitations totales, mais aussi de leur intensité, de leur durée, de leur répartition dans le temps et de la température qui influe sur les taux d'évapotranspiration. Une diminution de la recharge des aquifères aurait donc des effets directs sur le niveau des nappes, le niveau d'étiage des rivières et possiblement la qualité de l'eau.

La recharge des nappes constitue la quantité d'eau circulant verticalement à travers la zone non-saturée et qui atteint la nappe, représentant ainsi un apport à l'aquifère. Dans les nappes libres elles constituent la réserve régulatrice représentant le volume d'eau gravifique stocké dans l'horizon aquifère et ensuite libérée par vidange. Elle correspond donc à la quantité d'eau libérée par le volume d'horizon aquifère délimitée par les positions maximales et minimales de la surface piézométrique. Dans les nappes captives et semi-captives, elle représente la quantité d'eau qui s'est infiltrée, correspondant à une recharge "potentielle". Plusieurs méthodes permettent le calcul de la recharge des nappes (Scanlon et al, 2002), parmi lesquelles l'approche par fluctuations piézométriques des nappes libres, l'approche par courbe de tarissement, l'évaluation à partir des débits de base, etc. Dans le cadre de la présente étude, la recharge annuelle des nappes est évaluée par l'approche basée sur le calcul des débits de base journalier. Les débits de base qui représentent une estimation de l'apport d'un aquifère à une rivière, sont calculés à partir de la séparation d'hydrogrammes par application du filtre de Chapman (2001). Ainsi à partir des chroniques de données de débits journaliers, les débits de base journaliers sont calculés. Le taux de recharge en m^3 est calculé en multipliant le débit de base par la superficie du bassin (23.600 km^2) pour une période donnée (ici le jour dont la somme donne la valeur annuelle). La figure 7 présente la variabilité interannuelle de la recharge annuelle des nappes dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè. Les indices centrés réduits sur les recharges annuelles signalent une succession d'anomalies positives et négatives entre 1960 et 1974 et des anomalies négatives entre 1975 et 1995. De 1996 à 2012, on note à nouveau la succession d'anomalies positives et négatives. L'évolution de la recharge annuelle des nappes dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè présente deux ruptures dans la série constituée, une première rupture en 1974 et une seconde en 1995. Les fluctuations interannuelles déterminent une alternance de période humide (1960-1974) suivie d'une sous-période déficitaire (1975-1995) et enfin une sous-période normale (1996-2012). Les moyennes annuelles de la recharge des nappes au cours des différentes sous-périodes sont de $2408,41 \text{ m}^3$ (1960-1974); $1078,18 \text{ m}^3$ (1975-1996) et $1859,25 \text{ m}^3$ (1996-2012).

Les recharges annuelles ont connu une baisse de -55,23% dans la deuxième sous-période (baisse par rapport à la première sous-période) et de -22,80% dans la dernière sous-période (baisse par rapport à la première sous-période) qui annonce une reprise. Une comparaison de la moyenne de la dernière sous-période par rapport à celle de la deuxième sous-période montre que la reprise annoncée est de +72,44%. La fluctuation interannuelle de la recharge des nappes dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè est assez importante. Toutefois, c'est la manifestation à l'échelle saisonnière de la variabilité climatique qui en augmente l'effet. Les variations interannuelles du niveau des nappes d'eaux souterraines dans le Bassin s'intègrent à la fluctuation du régime pluviométrique observée à la fin des années 1960 et au début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale sahélienne comme non sahélienne (Hubert et Carbonel, 1987; Hubert et al, 1989; Mahé et Olivry, 1995; Makanga Maloba et Samba, 1997; Paturol et al, 1997; Servat et al, 1999). L'un des facteurs responsables de la baisse considérable des nappes d'eaux souterraines reste les précipitations.

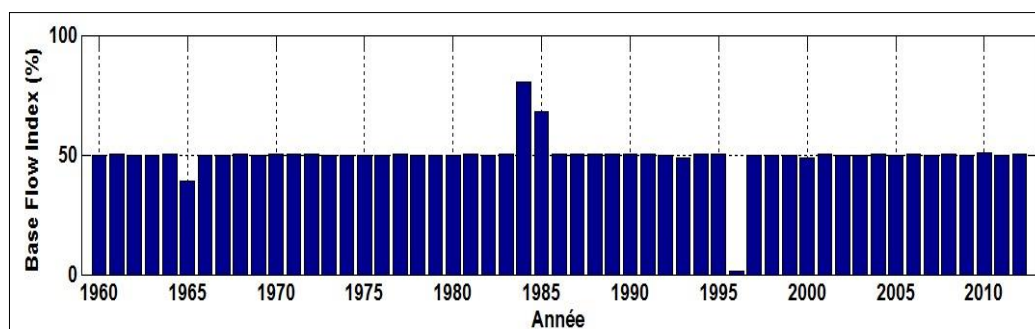


Fig. 7. Variabilité temporelle du BFI dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè

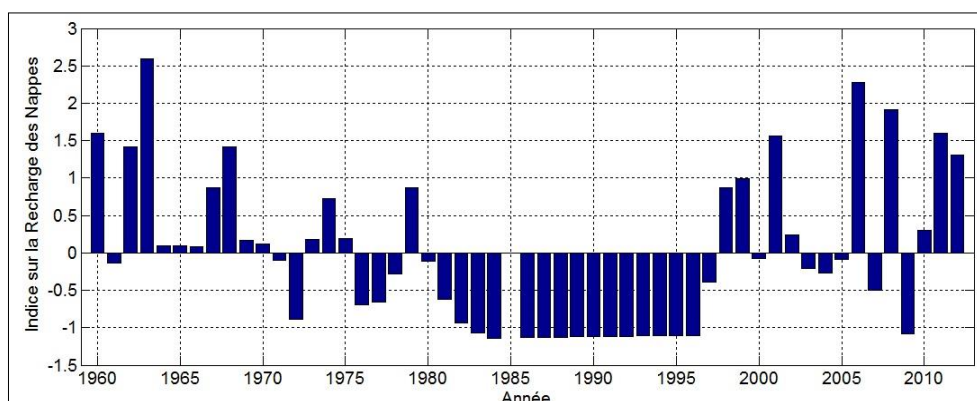


Fig. 8. Variabilité interannuelle de la recharge des nappes dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè

En effet, le déficit pluviométrique signalé a engendré une baisse de -55,23% (soit le triple) de la recharge annuelle avec désormais une augmentation de l'ordre de +72,44% liée à la reprise pluviométrique. Toutefois certains paramètres tels que les caractéristiques géologiques du bassin peuvent aussi être remise en cause compte tenu de leurs capacités à influencer le régime hydrologique des bassins versants. Par ailleurs pour évaluer la proportion d'eau mobilisée par les réservoirs dans le temps et dans l'espace, la variabilité temporelle du " BFI " entendu Base Flow Index, est analysée. Le BFI est révélateur de l'existence de stocks d'eau plus ou moins important. Cet indicateur varie entre 0 et 100%. Plus il est élevé, plus la contribution des stocks d'eau est importante. Sur un bassin pluvial, un BFI proche de 100% est donc révélateur d'une forte composante souterraine sur les débits du cours d'eau. Le BFI est la moyenne des débits de base divisée par la moyenne des débits du cours d'eau. A partir des écoulements de base générés par application de la méthode de Chapman, une série de BFI annuel a été constituée et représentée par la figure 8. Les résultats obtenus par analyse de la variabilité temporelle du BFI confirment l'importance de la contribution des réservoirs d'eau souterraine à l'alimentation en eau de l'Ouémé. Ils montrent que 50% des eaux de l'Ouémé sont stockées dans les réservoirs souterrains.

5 CONCLUSION

La séparation des hydrogrammes permet le calcul des débits de base des cours d'eau. Dans le cadre de la présente étude, les approches par filtre proposées par Nathan & McMahon (1990), Chapman (1991), Furey & Gupta (2001) ont été testées pour l'estimation des débits de base à l'échelle du bassin de l'Ouémé. L'analyse des différents hydrogrammes montrent que le filtre de Nathan & McMahon donnent des résultats très peu satisfaisants malgré des valeurs relativement faibles d'erreurs. Quant aux filtres proposés par Furey & Gupta, les résultats obtenus présentent une surestimation des écoulements de base durant la période des basses eaux. Seul le filtre proposé par Chapman (1991) montre une bonne estimation de l'écoulement de base tout au long de l'année. Durant la période de récession le débit de base résultant ne dépasse que très rarement les débits de rivière. Ces conclusions sont confirmées par les critères de performance et l'analyse comparée des courbes de récession. Il ressort de ces travaux que la méthode de Chapman peut être utilisée pour évaluer les débits de base du fleuve Ouémé. L'application de la méthode d'estimation des écoulements par l'approche du filtre de Chapman est très aisée et précise. Les résultats issus de son application peuvent être utilisés pour l'estimation de la recharge des nappes d'eau souterraine qui constitue une variable hydrologique indispensable à la gestion des ressources en eau des bassins versants. Toutefois il serait intéressant de tester et comparer à l'échelle du bassin de l'Ouémé les autres approches sus-indiquées afin de confirmer la performance de la méthode et la fiabilité des résultats. Par ailleurs, l'analyse de la variabilité interannuelle de la recharge des nappes d'eau souterraine aider les gestionnaires des bassins à disposer d'une meilleure connaissance de la disponibilité dans le temps et dans l'espace de la ressource en eau souterraine. Une bonne connaissance de la fluctuation annuelle de la recharge des nappes permettrait d'identifier les relations existantes entre le climat, les données hydrologiques (hydrogrammes des rivières) afin d'évaluer les tendances de divers paramètres (précipitations, recharge) à moyen et à long terme et de développer des indices climatiques qui permettraient aux gestionnaires de la ressource de s'adapter à court terme pour l'approvisionnement en eau potable.

REFERENCES

- [1] Arnold J. G., P.M Allen, R. Muttiah, G. Bernhardt, (1995): Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground water*, 33 (6): 1010-1018.
- [2] Benhamane S., (2002): Évaluation des différentes méthodes de séparation d'hydrogrammes pour évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada. Rapport de stage INRS- Eau, Terre et Environnement, 39p.
- [3] Brutsaert W., Nieber J. (1977). Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. *Water Resources Research* 13: 637-643.
- [4] Chapman, T. G.; (1991): Comment on «Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis», by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research*, 27 (7): 1783-1784.
- [5] Chapman, R.J. (2001): The Controlling Influences on Effective Risk Identification and Assessment for Construction Design Management. *International Journal of Project Management*, 19, 147-160. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00070-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00070-8).
- [6] El-Jabi N., J. Rousselle (1990): Hydrologie fondamentale. Deuxième Edition, Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal.
- [7] Faure P., B. Volko, (1998): Some factors affecting regional differentiation of the soil in the Republic of Benin (West Africa). *CATENA*, 32 (3-4): 281-306.
- [8] Furey, R. Peter, V.K. Gupta, (2001): A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *Water Resources Research*, 37 (11): 2709-2722.
- [9] Holtschlag, D.J., and Nicholas, J.R., (1998): Indirect ground water discharge to the Great Lakes: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-579, 25 p.
- [10] Hubert, P., & Carbonnel, J. P. (1987): Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal Hydrologie*, 95, 165-183. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90123-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90123-5).
- [11] Hubert P., J.P. Carbonnel, A. Chaouché, (1989): Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 110, pp. 349-367.
- [12] Le Barbé L., G. Alé, B. Millet, H. Texier, Y. Borel, R. Gualdé, (1993): Les ressources en eaux superficielles du Bénin. Editions de l'ORSTOM, Paris, France, 540p.
- [13] Lyne V., M. Hollick (1979): Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. I.E. Aust. Natl. Conf. Publ. 79/10, Inst. Of Eng. Aust., Canberra, pp. 89-93.
- [14] Mahé G., J.C Olivry, (1995): Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6, 1, pp.109-117.
- [15] J. D. MALOBA MAKANGA et G. SAMBA, (1997): Organisation pluviométrique sur l'espace Congo-Gabon (1950-1998). *Sécheresse*, Vol. 8, N°1 (1997) 39 - 45 p.
- [16] Nathan R. J., T. A. McMahon, (1990a): Practical aspects of low flow frequency analysis. *Water Resources Research*, 26 (9), pp.2135-2141.
- [17] Paturel J.E., E. Servat, B. Kouamé, H. Lubes, J.M. Masson, J.F. Boyer, M. Travaglio, M. Marieu, (1997a): Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée. Approche régionale intégrée. *PHI-V*, 16, pp.1-31.
- [18] Rivard C., J. Marion, Y. Michaud, S. Benhamane, A. Morin, R. Lefebvre, A. Rivera (2003): Etude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada. Commission Géologique du Canada, dossier public 1577, 39 pp. et annexes. Scanlon et al, 2002.
- [19] Servat E., E. Paturel, H. Lubes- Niel, B. Kouamé, J. Masson, M. Travaglio, B. Marieu, (1999): Différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, pp. 363-387.
- [20] Smakhtin V.U, (2001): Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.* 240, 147-186.
- [21] Szilagyi, J., 2004. Heuristic continuous baseflow separation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 9 (4): 1-8.
- [22] Totin V.S.H., B. Michel, O. Euloge, (2007): Dynamique de la mousson ouest africaine, régime hydrologique et gestion de l'eau dans le bassin supérieur de l'Ouémé. *Journal Climat et Développement* Vol.2 (12) 2007.
- [23] Troch P., F. De Troch, W. Brutsaert, (1993): Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions. *Water Resources Research*, vol.29,2, pp. 427-434.
- [24] Varado N., (2004): Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée: Application au bassin de la Donga, au Bénin; Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [25] White, K.A. and Sloto, R.A. (1990): Base-flow frequency characteristics of selected Pennsylvania Streams, U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 90-4160, 66p.