



Belgeo

Revue belge de géographie

4 | 2015

Miscellaneous

Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés

Impacts of the changes in climatic conditions and the management of water resources of the Senegal River: characterization and evolution of the hydrological regimes in natural and managed watersheds

Cheikh Faye, El Hadji Salif Diop et Ibrahima Mbaye



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/17626>

DOI : [10.4000/belgeo.17626](https://doi.org/10.4000/belgeo.17626)

ISSN : 2294-9135

Éditeur :

National Committee of Geography of Belgium, Société Royale Belge de Géographie

Référence électronique

Cheikh Faye, El Hadji Salif Diop et Ibrahima Mbaye, « Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés », *Belgeo* [En ligne], 4 | 2015, mis en ligne le 30 décembre 2015, consulté le 10 décembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/17626> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/belgeo.17626>

Ce document a été généré automatiquement le 10 décembre 2020.



Belgeo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International.

Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés

Impacts of the changes in climatic conditions and the management of water resources of the Senegal River: characterization and evolution of the hydrological regimes in natural and managed watersheds

Cheikh Faye, El Hadji Salif Diop et Ibrahima Mbaye

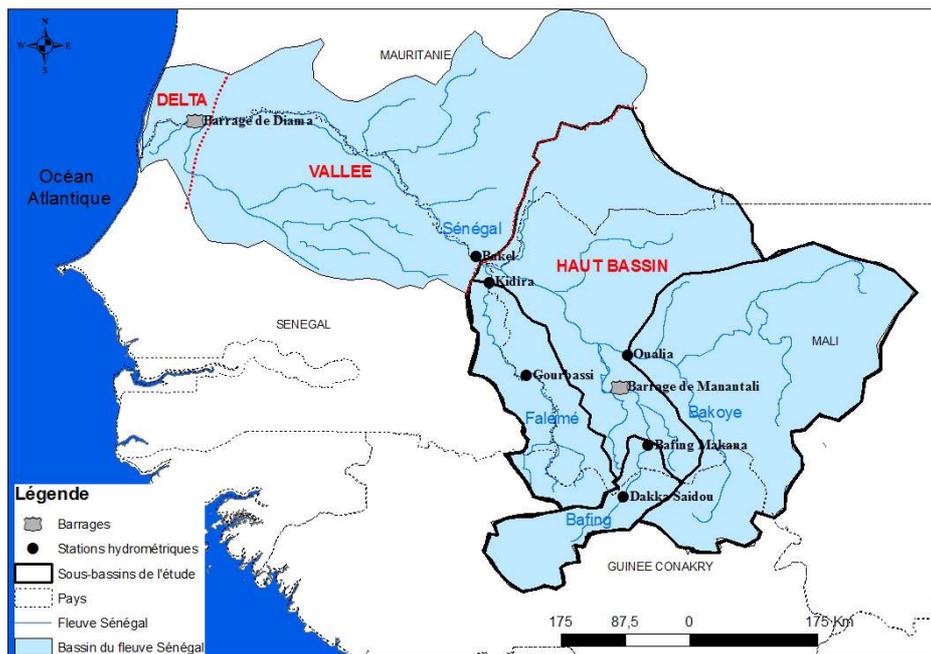
Introduction

- 1 Les changements de conditions climatiques observés dans la zone tropicale depuis la fin des années 1960 et le début des années 1970 indiquent une tendance à la diminution de la pluviométrie en quantité et en durée dans de nombreux bassins versants. Ces changements sont à l'origine de la grande sécheresse des années 1970 et 80 avec son lot d'impacts d'ordre environnemental, social et économique. Au déficit pluviométrique et à la sécheresse des années 1970 et 80, s'est ajouté le changement climatique global qui est une tendance au réchauffement du climat (relevée dans plus de 89 % de 29 000 séries de températures) et à l'accentuation des catastrophes naturelles et des phénomènes extrêmes (sécheresses, inondations, etc.) (GIEC, 2007, 2008, 2014 ; Yanda, 2010). Ces différents changements menacent la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le

Développement (UNDP, 1998) qui depuis 2012 ont été transformés en Objectifs du Développement Durable (UNEP, 2013).

- 2 L'étude de l'évolution du climat à l'échelle d'un territoire est une préoccupation croissante tant pour la communauté scientifique que pour les acteurs territoriaux. Elle vise à caractériser les variations climatiques récentes et à imaginer les futures évolutions afin de mettre en place des stratégies d'adaptation sur des échelles spatiales opérationnelles comme la région (Leroy *et al.*, 2012). Le réchauffement global conjugué à la variabilité accrue des précipitations entraîne la recrudescence de phénomènes extrêmes, notamment les crues et les étiages qui vont augmenter en fréquence et en intensité à travers le continent africain. Diverses études (Hubert Nicholson *et al.*, 2000 ; Paturol *et al.*, 2003 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Sow, 2007 ; Faye *et al.*, 2015) mettent en évidence l'évolution des débits dans les cours d'eau et les impacts sur les systèmes naturels et humains des territoires, pendant la période récente, dont l'ampleur varie selon les régions et les conditions hydro-climatiques.
- 3 Le fleuve Sénégal, long de quelques 1700 km, draine un bassin de 300 000 km², à cheval sur quatre pays qui sont, d'amont en aval, la Guinée, le Mali, le Sénégal et la Mauritanie (figure 1). Il va de 10°20' à 17° N et de 7° à 12°20' W et est formé de plusieurs affluents, dont les principaux sont le Bafing, le Bakoye et la Falémé. Dans la partie Sud du bassin, la densité du réseau hydrographique de surface témoigne de la nature imperméable des terrains (Michel, 1973 ; Rochette, 1974). Du point de vue topographie, le bassin est allongé, du Sud vers le Nord, des massifs du Fouta Djallon (1445 m) aux étendues dunaires et sableuses du Nord, en Mauritanie et au Sénégal. Le bassin est généralement découpé en trois entités : le haut bassin, la vallée et le delta.

Figure 1. Localisation du bassin versant du fleuve Sénégal et des stations hydrométriques de l'étude.



- 4 Le bassin du fleuve Sénégal à l'instar de toute la bande intertropicale a connu un bouleversement climatique depuis les années 1970 (Bodian, 2011). Les différentes études

sur ce bassin ont déjà montré les effets de la sécheresse avec les modifications de son régime hydrologique à partir de 1970. Parmi ces travaux on peut citer Hubert *et al.* (1989), Dione (1996), Nicholson *et al.* (2000), Paturol *et al.* (2003), Ardoin-Bardin (2004), Sow (1984, 2007), Bader (2013), Faye (2013, 2014a, 2014b), Faye et Sow (2013), Faye *et al.* (2015). Pour remédier aux effets de la sécheresse et faire face aux modifications du régime hydrologique, les aménagements mis en place ont transformé totalement la dynamique hydrologique du bassin du fleuve Sénégal. Il en a résulté trois secteurs ou bassins aux régimes d'écoulement différents (tableau 1) :

- Des tronçons ou bassins à écoulement naturel ou régime simple qui n'ont pas subi d'aménagement : ils sont analysés dans cette étude comme des bassins non aménagés (sous-bassins du Bafing en amont de Manantali aux stations de Dakka Saidou et Bafing Makana ; sous-bassin du Bakoye à la station d'Oualia ; sous-bassin de la Falémé aux stations de Gourbassi et de Kidira) ;
- Un tronçon à écoulement totalement contrôlé (avec les lâchers du barrage de Manantali) allant du barrage à sa confluence avec le Bakoye : il est juste utilisé en guise d'illustration dans l'analyse de l'écoulement du bassin aménagé ;
- Un bassin à écoulement ou régime complexe (à l'aval de Bakel) qui est la synthèse des deux types d'écoulement (naturel et contrôlé) : il est analysé dans cette étude comme un bassin aménagé (il s'agit du bassin du Sénégal à la station de Bakel). L'écoulement du fleuve Sénégal à la station de Bakel est pour une part artificialisé puisque, depuis 1988, il est influencé par l'exploitation du barrage de Manantali.

Tableau 1. Stations hydrométriques du bassin du fleuve Sénégal retenues pour l'étude et leurs caractéristiques.

Bassins		Bassins non aménagés (à écoulement naturel)			Bassins non aménagés (en amont du Barrage)		Lâchers du barrage	Bassin influencé par le barrage	Moy
		Kidira	Gourbassi	Oualia	Bafing Makana	Dakka Saidou	Manantali aval	Bakel	
Période 1960-2014	Tendance négative	75	100	100	83,3	81,8	16,7	50	72,4
	Tendance significative	16,7	16,7	33,3	8,3	27,3	66,7	50	31,3
Période 1970-2014	Tendance positive	91,7	83,3	66,7	91,7	83,3	83,3	91,7	84,5
	Tendance significative	25,0	0,0	0,0	41,7	16,7	66,7	58,3	29,8

case blanche : bassins non aménagés ; case grise : bassin aménagé.

- 5 Les trois affluents (Bafing, Bakoye et Falémé) qui forment le fleuve Sénégal prennent leurs sources en Guinée. En effet, le fleuve Sénégal est formé par la jonction entre le Bafing et le Bakoye, avant de recevoir le Kolimbiné suivi du Karokoro sur la droite et la Falémé sur la gauche, à 50 km en amont de Bakel. Ainsi se forme le haut bassin qui produit plus de 80% des apports du fleuve à Bakel (OMVS/Projet FEM/ BFS, 2008). Ce haut bassin est contrôlé par la station de Bakel. Le fleuve Sénégal est doté de deux barrages, Diama et Manantali. Le barrage de Diama mis en service en 1986 dans le bas delta du

le fleuve Sénégal est essentiellement un barrage anti-sel, ayant pour objectif de stopper la remontée de la langue salée, en période d'étiage, sur le lit du fleuve Sénégal. Le barrage de Manantali mis en eau en 1988 et situé sur le Bafing à 90 km au Sud-est de Bafoulabé en République du Mali, permet de réguler le débit du fleuve et d'assurer une bonne disponibilité en eau sur l'année pour satisfaire certains besoins (production hydroélectrique, navigation, irrigation...).

- 6 Devant la succession et l'accentuation d'épisodes extrêmes (crues et étiages), il est fréquent d'invoquer, sans toujours se baser suffisamment sur l'analyse des données, l'un ou les deux facteurs responsables de ces modifications, à savoir, les changements climatiques ou les aménagements des bassins versants. Afin de déterminer les facteurs responsables, il convient d'aborder les trois questions préalables suivantes :
 1. Les tendances constatées sur les débits sont-elles statistiquement significatives ?
 2. Les évolutions des débits sur la période récente dans le bassin découlent-elles des changements climatiques ou des aménagements?
 3. Quels points convergents ou divergents peut-on noter dans les écoulements des sous-bassins versants et dans les différents régimes fluviaux?
- 7 Pour obtenir des éléments de réponse à ces questions, les coefficients d'écoulement mensuels (CMD), saisonniers et annuels de 6 stations (tableau 1) dans le bassin du fleuve Sénégal ont donc été analysés. A la lumière de ces considérations, cet article poursuit les deux objectifs suivants :
 - Caractériser les variations de l'écoulement de sous-bassins versants du fleuve Sénégal et comparer les régimes hydrologiques naturels et artificialisés au moyen de variables hydrologiques fondées exclusivement sur les débits annuels, saisonniers et mensuels. Ces variables sont soumises à deux tests (tests de Mann-Kendall et de Pettitt) qui permettent de caractériser la variabilité et la détection de tendance et de rupture.
 - Déterminer la responsabilité des facteurs naturels ou environnementaux (changements climatiques) et anthropiques (aménagements) sur la variabilité spatiale des débits relatifs aux régimes hydrologiques des sous-bassins versants du fleuve Sénégal.
- 8 L'approche que nous proposons présente un certain nombre d'intérêts majeurs : elle permet de regrouper les rivières du bassin du fleuve Sénégal en tenant compte des caractéristiques des débits qui définissent les régimes hydrologiques. Au plan hydrologique, elle procède à la classification des régimes hydrologiques fondée sur un choix rigoureux des variables qui caractérisent la variabilité spatiale de l'écoulement dans le bassin du fleuve Sénégal. Au plan de la gestion et de l'aménagement des bassins versants, elle permet de déterminer la responsabilité de chaque facteur sur la variabilité spatiale de l'écoulement. Cette approche n'est donc pas négligeable dans le contexte actuel des changements climatiques, des modifications dues à des pressions anthropiques accrues et à des aménagements constants sur les ressources en eau.

Données et méthodes

Données

- 9 Du fait que la robustesse des tests à appliquer dépend de la longueur des séries (au moins 30 ans) et de la faiblesse des lacunes, les données hydrométriques utilisées dans cette étude doivent respecter deux critères importants : la longueur des chroniques d'une part

(couvrir la plus grande période de temps possible), la qualité des données d'autre part (le moins de données manquantes possibles). Ce qui a été le cas des stations retenues pour l'étude (tableau 1) et les lacunes notées ont été comblées par la méthode des doubles cumuls. Ces données ont été mises à notre disposition par l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS). L'analyse est faite sur la période allant de 1960 à 2014. Le choix de cette échelle temporelle s'explique par le fait que généralement les données journalières ne sont disponibles à la fois sur les 6 stations retenues qu'à partir des années 1960 (si les données sont disponibles depuis 1904 à Bakel, elles ne le sont qu'en 1954 à Oualia, Gourbassi, Kidira et Dakka Saidou, et en 1961 à Bafing Makana). Cette période est subdivisée en deux séries : 1960-2014 et 1970-2014. Ce choix s'explique par le besoin de détecter les différentes ruptures (deux au total : une aux environs des années 1970 et une autre aux environs de 1990) tout en appliquant le test de Pettitt (ce test, contrairement à d'autres méthodes, en particulier la méthode de segmentation, ne détecte qu'une rupture unique par série). Le raccourcissement de la série (1970-2014) permet donc avec le test de Pettitt appliqué dans cette étude, au-delà de la rupture des années 1970, de détecter celle des années 1990.

Méthodes : tests statistiques

- 10 Les méthodes employées sont basées d'abord sur le calcul des coefficients d'écoulement et les séries obtenues soumises ensuite à deux tests statistiques.

Calcul des coefficients d'écoulement mensuels, saisonniers et annuels

- 11 Le régime hydrologique est la réponse d'un bassin-versant aux facteurs physiques stables et aux aléas climatiques et aux facteurs anthropiques (Sow, 2007 ; Faye, 2013). L'année hydrologique, en raison du mode d'alimentation exclusivement pluvial des cours d'eau tropicaux, débute en mai et se termine en avril. L'étude du régime hydrologique est faite à partir du coefficient mensuel de débit (CMD) qui est le rapport entre le débit d'un mois considéré et le douzième du débit annuel moyen. Il est calculé comme suit (équation 1) :

$$CMD = \frac{\text{débit d'un mois}}{\text{douzième du débit annuel moyen}}$$

- 12 Le CMD permet de définir les périodes de hautes eaux et les périodes de basses eaux. Selon la classification de Pardé (1968), un CMD supérieur ou égal 1 correspond à une période de hautes eaux et un CMD inférieur à 1 est assimilé à une période de basses eaux. Deux régimes fluviaux sont distingués au niveau des stations de l'étude : le régime fluvial tropical de transition (4 mois de hautes eaux) et le régime fluvial tropical pur (3 mois de hautes eaux).
- 13 A l'échelle pluriannuelle, les coefficients d'écoulement (ou indices d'écoulement interannuel, IEI), donnés par le rapport entre le débit moyen de l'année (ou de la saison) et le débit moyen interannuel de la série, sont calculés comme suit (équation 2) :

$$IEI = \frac{\text{débit moyen de l'année}}{\text{débit moyen interannuel de la série}}$$

- 14 A l'échelle saisonnière, les coefficients d'écoulement (ou indices d'écoulement saisonniers, IES) sont calculés avec la formule suivante (équation 3) :

$$IES = \frac{\text{débit moyen de la période de hautes eaux}}{\text{débit moyen annuel}}$$

- 15 Avec les séries de coefficients ou des indices d'écoulement mensuels (CMD), saisonniers (IES) et interannuels (IEI), une batterie de tests est utilisée dans ce travail pour détecter d'éventuels changements au seuil de signification 0,01.

Test de Mann-Kendall

- 16 Le test de Mann-Kendall a permis de détecter d'éventuels changements graduels dans les séries de variables extrêmes. Selon Mann (1945) et Kendall (1975), ce test non paramétrique, basé sur le rang, permet de déterminer si la corrélation entre le temps et la variable d'étude est significative ou pas. Soit (x_1, \dots, x_n) un échantillon de valeurs indépendantes relative à une variable aléatoire X dont on cherche à évaluer la stationnarité. La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit (équation 4) :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(x_i - x_j)$$

- 17 où n est la longueur de la série, x_i et x_j deux valeurs génériques de données séquentielles et la fonction

$$\text{sign}(x_i - x_j)$$

- 18 est définie par l'équation suivante (5) :

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & \text{si } (x_i - x_j) > 0, \\ 0, & \text{si } (x_i - x_j) = 0, \\ -1, & \text{si } (x_i - x_j) < 0. \end{cases}$$

- 19 La statistique S représente donc le nombre de différences positives moins le nombre de différences négatives trouvées dans les séries chronologiques analysées. Si l'hypothèse est nulle, il n'y a pas de tendance dans les données de corrélation entre les variables considérées et le temps, chaque ordre de l'ensemble des données étant également probable. Dans cette hypothèse, la statistique S est environ une distribution normale avec la moyenne $E(S)$ et la variance $\text{Var}(S)$ définies respectivement sur les équations (6) et (7) suivantes :

$$E(S) = 0$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)]$$

- 20 où n est le nombre de données non manquantes, t_p le nombre de valeurs dans le $p^{\text{ième}}$ groupe et q le nombre de rang ex aequo. Le second terme représente un ajustement de données liées ou censurées. La valeur de S et de $\text{Var}(S)$ servent au calcul du test statistique standardisé Z qui s'écrit sous la formule de l'équation (8) suivante:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0, \\ 0 & \text{si } S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0. \end{cases}$$

- 21 La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en étudiant la valeur de Z . L'hypothèse nulle (H_0) indique l'absence d'une tendance et l'hypothèse alternative (H_a) la présence d'une tendance dans la série. Une valeur de Z positive indique une tendance à la hausse dans le temps, tandis qu'une valeur de Z négative une tendance à la

baisse. En cas de hausse ou de baisse de la tendance monotone par rapport à un seuil de signification p , l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée. Dans ce travail, le seuil de signification 0,01, le plus élevé pour ce test a été appliqué et une p -value a été obtenue pour chaque série analysée.

- 22 Il est également possible d'obtenir une estimation non paramétrique pour la magnitude de la pente de la tendance (Hirsch *et* Slack, 1984). Ainsi, la méthode de la pente de Sen (Sen, 1968) qui a été appliquée pour déterminer l'ampleur du changement, s'obtient par la formule suivante (équation 9) :

$$b = \text{Mediane} \left[\frac{(X_j - X_i)}{(j-i)}, \text{pour } i < j \right]$$

- 23 où b est la pente entre les points de données X_j et X_i mesuré au temps j et i respectivement.

Test de Pettitt

- 24 Le test de Pettitt (1979) est un test non paramétrique de détection d'une rupture unique à date inconnue. L'existence de modifications brutales de certains paramètres statistiques des séries hydroclimatiques, en particulier de leur moyenne, est une cause possible de la rupture de l'homogénéité de ces séries. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable de Pettitt (U_t, N). La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k définie permet d'apprécier l'importance de la rupture. La statistique de test Z est calculée de la façon suivante (équations 10 et 11) :

$$Z = \max |U(k)|, K = 1, \dots, n - 1$$

- 25 avec :

$$U(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{signe}(x_j - x_i)$$

- 26 On peut noter que le test fournit également une estimation de la position de la rupture en utilisant l'indice k correspondant au maximum $|U(k)|$. L'absence de rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de l'année de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable U_t, N .
- 27 La méthode de variations hydrométriques permet de déterminer le pourcentage de variations de la moyenne de la série après la rupture par rapport à la moyenne avant la rupture (Mahé *et* Olivry, 1995). Pour toute variable dont la série chronologique présente une rupture, cette méthode qui précise le pourcentage de variation autour de la date de rupture, s'obtient par la formule suivante (équation 12) :

$$D = \left(\frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_i} - 1 \right) \times 100$$

- 28 où \bar{X}_j est la moyenne de la série après la rupture et \bar{X}_i celle avant la rupture.

Résultats

Variabilité et tendances des régimes du bassin

- 29 Les variations annuelles, saisonnières et mensuelles ont été analysées par l'utilisation des coefficients d'écoulement. L'application de la méthode des coefficients d'écoulement aux

bassins versants permet une meilleure comparaison des données de bassins de différentes tailles d'une part, et d'éliminer l'influence de la taille des bassins versants sur l'écoulement. Ces coefficients mensuels (CMD), saisonniers et annuels soumis aux tests de Mann-Kendall et de Pettitt (tableaux 2 et 3) ont révélé d'importantes fluctuations dont les conséquences sur l'environnement sont multiples, d'où l'intérêt de les étudier.

- 30 L'analyse des tests montre la présence sur les deux séries de CMD d'une double rupture (souvent significatives au seuil de 1%). La première (tableau 2) est comprise généralement entre 1967 et 1976, et connaît son paroxysme en 1971 (plus de 19%). La seconde (tableau 3) apparaît entre 1990 et 1994 avec une occurrence de plus de 35 % en 1993. Ces deux dates de rupture (1971 dans le sens négatif et 1993 dans le sens positif) sont donc choisies du fait qu'elles apparaissent beaucoup plus. Ainsi, de part et d'autre d'elles, trois périodes sont établies. La première va de 1960 à 1971 et enregistre une tendance des coefficients d'écoulement significativement positive relative aux conditions humides (Dacosta *et al.*, 2002) contrairement à la deuxième (de 1972 à 1993) durant laquelle cette tendance est significativement négative et correspond à une grande sécheresse (Ozer *et al.*, 2009). La dernière période, qui va de 1994 à 2014, quoique non significative (alors ce n'est pas une tendance pertinente), enregistre une tendance positive. Cette nouvelle tendance à la hausse de l'écoulement, perçue au niveau des coefficients d'écoulement annuels, est corrélée au retour à des conditions plus humides (sans pour autant revenir aux conditions très humides des années 1960-1970), en accord avec les travaux de Ali *et al.* (2008) et de Ali et Lebel (2009) sur la zone sahélienne, de Ouoba (2013) sur le Burkina Faso, de Ozer *et al.* (2009) sur le Niger, de Niang (2008) sur la Mauritanie et de Hubert *et al.* (2007) et de Bodian (2014) sur le Sénégal. Selon l'analyse de Hubert *et al.* (2007) basée sur la série naturalisée de Bakel (1904-2003), plusieurs ruptures déjà bien documentées (1920 positive, 1940 négative, 1950 positive, 1970 négative, positive vers 1993-1994) sont mises en évidence. Ce qui amène à s'interroger sur la possibilité d'un changement du régime hydrologique.

Tableaux 2a-2b. Résultats comparatifs des tests de Mann-Kendall et de Pettitt sur les coefficients mensuels (CMD), saisonniers et annuels d'écoulement des sous bassins du fleuve Sénégal (1960-2014).

	Bassin de Falémé à Kidira				Bassin de Falémé à Gourbari				Bassin du Bakoye à Oualla					
	Bassin non aménagé				Bassin non aménagé				Bassin non aménagé					
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation		
Mai	-0,37 *	0	1970	-99,9	-0,45 *	0	1995	-99,0	-0,36 *	0	1970	-72,8		
Juin	-0,28 *	-0,001	1984	-70,3	-0,37 *	-	0,001	1984	84,4	-0,23	-	0,002	1985	-54,9
Juillet	-0,15	-0,006	N	-	-0,18	-	0,009	1976	-49,8	-0,24	-	0,014	1976	-38,4
Août	0,11	-0,02	1974	45,8	-0,13	-	0,027	1974	43,3	-0,08	-	0,015	1974	-40,8
Septembre	-0,07	-0,02	1971	-31,9	-0,13	-	0,036	1970	-47,7	-0,15	-	0,046	1971	-60,5
Octobre	0,01	0,003	N	-	-0,06	-	0,007	1969	62,1	-0,16	-	0,018	1971	-72,0
Novembre	+0,02	0,001	N	-	-0,07	-	0,002	1970	-56,3	-0,19	-	0,008	1976	-76,8
Décembre	+0,05	0,0003	N	-	-0,13	-	0,002	1971	-63,6	-0,22	-	0,003	1976	-85,3
Janvier	-0,06	0	1971	60,3	-0,14	0	1972	-74,7	-0,25 *	-	0,003	1977	-82,2	
Février	-0,13	0	1972	-53,8	-0,14	0	1972	-82,6	-0,25	0	1972	-85,7		
Mars	-0,17	0	1979	64,8	-0,12	0	1972	86,4	-0,28 *	0	1972	-97,1		
Avril	-0,22	0	1972	-89,0	-0,25	0	1972	-94,8	-0,49 *	0	1972	-99,2		
Année	-0,06	-0,005	1971	-51,5	-0,12	-	0,009	1971	-48,8	-0,17	-	0,012	1971	-58,1
Maximum	-0,07	-0,024	1971	-53,4	-0,11	-0,05	1975	-44,1	-0,12	-0,04	1971	-55,8		
Minimum	-0,43 *	0	1970	-99,9	-0,52 *	0	1970	-100	-0,48 *	0	1970	-100		
Période de hautes-eaux	0,07	-0,013	1971	51,1	-0,11	-	0,022	1971	48,3	-0,16	-	0,031	1971	-55,9
Période de basses-eaux	-0,05	-0,005	N	-	-0,14	-	0,008	1971	63,5	-0,34 *	-	0,019	1976	-76,5

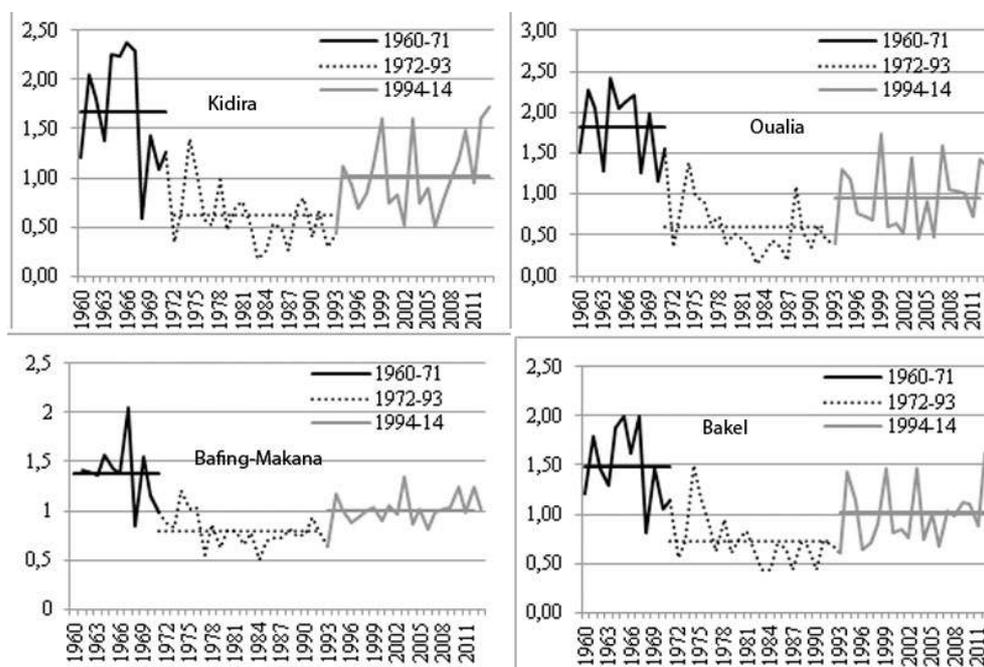
	Bassin du Daling à Daling/Makana				Bassin du Daling à Dakka-Saidou				Bassin du Fleuve Sénégal à Sali					
	Bassin non aménagé				Bassin non aménagé				Bassin aménagé					
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation		
Mai	0,116	0	1975	78,4	-0,26 *	0,001	1981	45,2	0,48 *	0,001	1987	309,7		
Juin	-0,25 *	0,003	1984	41,4	-0,28 *	0,003	1984	38,9	+0,45 *	0,01	1991	388		
Juillet	0,13	0,005	N	-	0,19	-	0,027	N	0,08	-	0,001	N		
Août	0,00	0	N	-	+0,02	0,021	N	-	-0,23	-	0,031	1981	-45,2	
Septembre	-0,05	-0,006	1975	-82,0	-0,03	-	0,004	1975	-24,1	-0,38	-	0,001	1975	-45,4
Octobre	0,04	0,005	N	-	0,08	-	0,006	N	-0,26 *	-	0,007	1978	-50,4	
Novembre	-0,02	-0,005	N	-	0,03	0,001	N	-	-0,18	0,001	1978	-45,0		
Décembre	0,08	0,001	1976	34,0	0,12	-	0,001	1976	39,0	0,15	-	0,003	1979	39,7
Janvier	-0,07	-0,001	1977	-33,1	-0,12	-	0,001	1977	-36,7	0,06	-	0,001	1994	70,8
Février	0,01	0	1977	86,5	0,14	-	0,001	1977	81,7	0,32 *	-	0,001	1991	139
Mars	0,03	0	1971	43,5	0,17	0	1977	28,9	0,42 *	-	0,001	1988	45,2	
Avril	0,09	0	1972	54,0	-0,26 *	0	1977	35,1	+0,45 *	0,001	1988	139		
Mars-avril	0,05	0,001	1976	28,4	0,04	-	0,001	1976	24,5	0,11	-	0,004	1975	37,8
Maximum	-0,05	-0,005	1975	-31,4	-0,02	-	0,003	1971	-26,5	-0,20	-	0,001	1973	-45,0
Minimum	0,111	0	1971	28,7	-0,25 *	0,001	1976	45,2	0,48 *	0,001	1987	314		
Période de hautes-eaux	0,04	0,004	1975	29,5	0,04	-	0,001	1976	22,4	0,22	-	0,024	1976	44,4
Période de basses-eaux	-0,10	-0,007	1976	-33,4	-0,12	-	0,004	1976	-35,4	+0,28 *	0,005	1990	50,3	

τ = Tau de Kendall ; (-) : tendance négative ; (+) : tendance positive ; (*) : tendance significative ; (Non) : absence d'une rupture ; Variation : indice de variation de la moyenne de part et d'autre de la rupture ; case blanche : bassin non aménagé ; case grise : bassin aménagé

Variabilité et tendances pluriannuelles de l'écoulement

- 31 La figure 2 présente la variabilité pluriannuelle des coefficients annuels d'écoulement ou indices d'écoulement mensuels, saisonniers et annuels de stations à écoulement naturel et artificialisé mais aussi de stations en amont du barrage (Bafing Makana) dont le lac du barrage formé peut modifier le profil d'équilibre et en aval (Bakel) du barrage. Il ressort de cette figure 2 que cette variabilité est quasi synchrone à la fois sur les stations à écoulement naturel en amont, et sur celles en aval du barrage. Elle se caractérise par trois périodes hydroclimatiques : une période très humide entre 1960 et 1971, une période sèche entre 1972-1993, et enfin un nouvel épisode humide durant la période 1994-2014.

Figure 2. Evolution des coefficients d'écoulement annuels de part et d'autre des deux périodes de rupture.



- 32 La figure 2 met en évidence une différence nette dans l'évolution multi-décennale des CMD moyens annuels sur le bassin depuis 1960. Alors que les CMD moyens annuels de 1972 à 1993 restent largement déficitaires par rapport à la moyenne de la période humide 1960-1971, les CMD annuels sur la période 1994-2014 affichent des valeurs supérieures. Sur chaque station, les trois courbes se différencient nettement à partir du début des années 1970 et 1990. Cela laisse à penser qu'au-delà de la sécheresse des années 1970, un nouveau changement important du régime hydrologique s'est encore produit au tournant du siècle (années 1990), les débits des cours d'eau connaissant une hausse.
- 33 A l'échelle pluriannuelle, l'évolution des sous-bassins est assez semblable et ne permet pas de déterminer la différence nette entre les régimes hydrologiques naturels et artificialisés. Toutefois, on constate que la date de rupture (tableau 2) arrive plus tardivement (1976) et les déficits sont moins importants (moins de 30 %) sur les stations en amont du barrage (Bafing Makana et Dakka Saidou) que sur les stations des bassins non aménagés (Gourbassi, Kidira et Oualia) où elle est notée en 1971 avec des déficits dépassant 50 %. D'ailleurs sur la station de Bakel qui subit en partie l'influence du

barrage, aucune rupture n'est notée sur la série des coefficients d'écoulement annuels de 1960-2014. Pour la série 1970-2014 où la rupture est notée en 1993, la station de Gourbassi (tableau 3) est la seule à ne pas connaître de rupture. Quant aux lâchers du barrage, la rupture est notée au début des années 2000, en faveur d'une hausse des valeurs de l'indice d'écoulement (ou coefficients annuels).

Tableaux 3a-3b. Résultats comparatifs des tests de Mann-Kendall et de Pettitt sur les coefficients mensuels (CMD), saisonniers et annuels d'écoulement des sous bassins du fleuve Sénégal (1970-2014).

Kidira	Bassin de Falémé à Kidira				Bassin de Falémé à Gourbassi				Bassin du Bakoye à Oualla			
	Bassin non aménagé				Bassin non aménagé				Bassin non aménagé			
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation
Mai	-0,09	0	N		-0,15	0	N		-0,04	0	N	
Juin	0,11	0	N		0,21	0	N		0,16	0,002	N	
Juillet	0,13	0,003	N		0,07	0,003	N		-0,06	0,004	N	
Août	-0,12	0,028	N		-0,08	0,016	N		-0,18	0,034	N	
Septembre	-0,24	0,063	1993	72,8	-0,17	0,041	N		-0,19	0,052	N	
Octobre	+0,35 *	0,03	1993	110,2	-0,27	0,022	1993	72,8	-0,18	0,012	N	
Novembre	+0,36 *	0,009	1993	124,1	0,26	0,006	1993	71,4	-0,14	0,002	N	
Décembre	+0,38 *	0,004	1993	153,9	-0,23	0,002	1993	99,6	-0,12	0,001	N	
Janvier	-0,26	0,001	1994	124,5	0,22	0,001	1994	128,4	-0,08	0	N	
Février	-0,18	0,001	1998	224,3	-0,22	0	1994	93,7	-0,10	0	N	
Mars	-0,13	0	N		-0,23	0	1994	141,4	-0,09	0	N	
Avril	-0,19	0	N		-0,12	0	N		-0,18	0	N	
Année	0,26	0,012	1993	63,0	0,20	0,008	N		-0,18	0,008	1993	57,0
Maximum	-0,23	0,057	1993	57,9	0,17	0,043	N		-0,22	0,056	1993	67,2
Minimum	-0,03	0	N		0,21	0	N		0,21	0		
Période de hautes eaux	-0,25	0,033	1993	59,7	0,20	0,023	N		-0,18	0,026	1993	58,7
Période de basses eaux	0,27	0,012	1993	110,3	0,20	0,008	1993	72,5	-0,07	0,002	N	

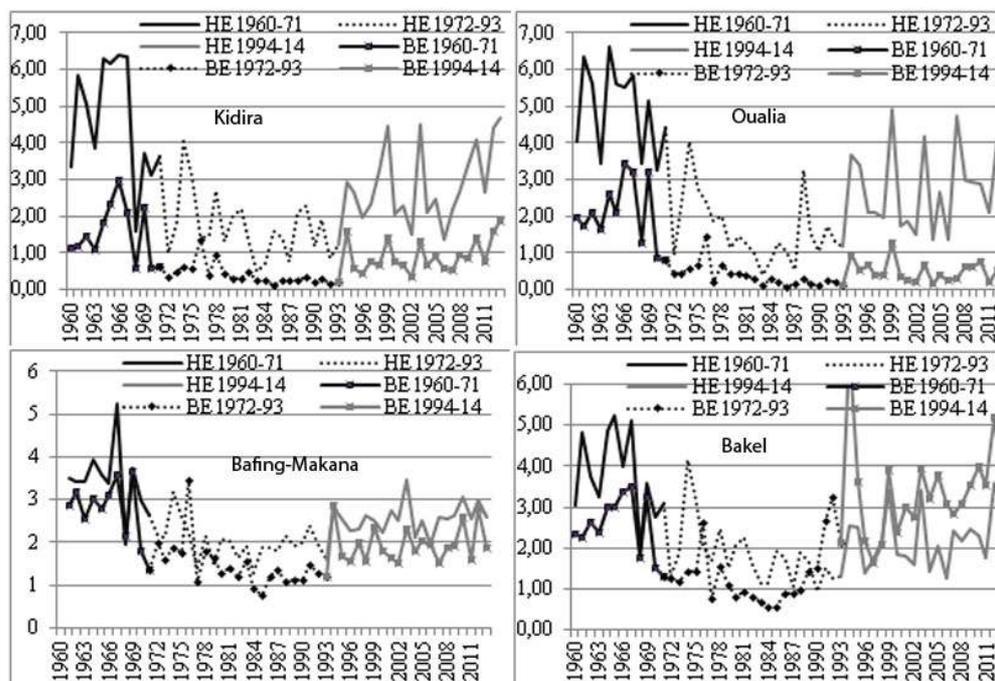
Gourbassi	Bassin du Baïfing à Baïfing-Makana				Bassin du Baïfing à Dakka-Saldou				Bassin du fleuve Sénégal à Bakel			
	Bassin non aménagé				Bassin non aménagé				Bassin aménagé			
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Variation
Mai	0,20	0	N		-0,03	0	N		+0,51*	0,013	1990	1383
Juin	0,12	-	N		0,17	-	1984	9,5	+0,53*	0,016	1991	468
Juillet	+0,04	0,001	N		+0,04	0,003	N		+0,31*	0,003	N	
Août	+0,20	0,02	N		+0,23	0,018	N		0,03	0,004	N	
Septembre	+0,26	0,026	1993	27,8	+0,30*	0,022	1993	23,1	-0,12	0,021	N	
Octobre	+0,25	0,014	1993	34,7	+0,26	0,017	1993	32,3	-0,09	0,001	N	
Novembre	+0,34*	0,007	1993	33,3	+0,38*	0,008	1993	39,9	-0,07	0,002	N	
Décembre	+0,26	0,003	1993	33,3	+0,23	0,002	1993	23,8	-0,13	0,002	2003	37,2
Janvier	+0,28*	0,002	1994	38,0	+0,22	0,001	1994	17,4	+0,37*	0,005	1991	154
Février	+0,33*	0,002	1994	51,8	+0,22	0,001	1994	13,0	+0,54*	0,000	1991	330
Mars	+0,33*	0,001	1994	73,3	+0,17	0	N		+0,55*	0,011	1991	677
Avril	+0,28*	0,001	1994	103,3	+0,05	0	N		+0,59*	0,013	1990	1673
Année	+0,29	0,007	1993	26,7	+0,32*	0,006	1993	23,7	-0,11	0,008	1993	38,5
Maximum	+0,26	0,027	1993	26,3	+0,32*	0,021	1993	22,7	-0,08	0,014	N	
Minimum	+0,27	0	1994	187,9	+0,09	0	1996	33,6	+0,51*	0,008	1989	2164
Période de hautes eaux	+0,28*	0,016	1993	25,5	+0,32*	0,014	1993	23,3	-0,05	0,006	N	
Période de basses eaux	+0,23	0,013	1993	33,1	+0,21	0,011	1993	26,2	+0,53*	0,076	1990	189

τ = Tau de Kendall ; (-) : tendance négative ; (+) : tendance positive ; (*) : tendance significative ; (Non) : absence d'une rupture ; Variation : indice de variation de la moyenne de part et d'autre de la rupture ; case blanche : bassin non aménagé ; case grise : bassin aménagé

Variabilité et tendances saisonnières de l'écoulement

- 34 La figure 3 présente la variabilité saisonnière des indices d'écoulement sur des stations à écoulement naturel et artificialisé, sur des stations en amont et en aval du barrage, dans le bassin du fleuve Sénégal. Tout comme à l'échelle pluriannuelle, deux tendances successivement opposées ont été observées aux périodes de hautes eaux (correspondant à la saison de la crue annuelle) et de basses eaux (saison de l'étiage). Les coefficients d'écoulement analysés sur les deux saisons (périodes de hautes et de basses eaux) montrent des tendances tantôt négatives (sur la période 1960-2014 avec une rupture aux environs de 1971, tableau 2), tantôt positives (sur la période 1970-2014 avec une rupture aux environs de 1993, tableau 3), les valeurs de p-value étant pour la plupart des cas inférieures au seuil de signification qui est de 0,01. Ces tendances sont cependant beaucoup plus importantes pour la période de hautes eaux.

Figure 3. Evolution des coefficients d'écoulement saisonniers de part et d'autre des deux périodes de rupture.



HE : saison de hautes eaux ; BE saison de basses eaux.

- 35 La période de hautes eaux et celle de basses eaux enregistrent des tendances à la baisse statistiquement très significatives. Les coefficients d'écoulement saisonniers de la période de hautes eaux indiquent d'abord une tendance à la baisse, sur la période 1960-2014, de $-0,16/\text{an}$ à Oualia à $-0,03/\text{an}$ à Dakka Saidou, et ensuite une tendance à la hausse, sur la période 1970-2014, de $+0,32/\text{an}$ à Dakka Saidou à $+0,05/\text{an}$ à Bakel. Pour la période de basses eaux, le constat est le même avec toutefois des tendances pour les coefficients d'écoulement moins significatives comparées à la période de hautes eaux : baisse sur la période 1960-2014 (de $-0,34/\text{an}$ à Oualia à $-0,05/\text{an}$ à Kidira) et hausse sur la période 1970-2014 (de $+0,64/\text{an}$ pour les lâchers d'eau du barrage à $+0,20/\text{an}$ à Gourbassi). Sur cette deuxième période (1970-2014), seules les stations qui subissent les lâchers du barrage ont enregistré une tendance à la baisse sur la période de hautes eaux ($-0,15/\text{an}$ pour les lâchers d'eau du barrage) et significativement à la hausse sur la période de basses eaux ($+0,64/\text{an}$ pour les lâchers d'eau du barrage et $+0,53/\text{an}$ à Bakel), ce qui laisse apparaître une différence entre les bassins à écoulement naturel et ceux à écoulement artificialisé.
- 36 De façon générale, à l'échelle saisonnière, les tendances positives sont plus significatives sur la période de hautes eaux et les négatives plus significatives sur la période de basses eaux. L'analyse des variations saisonnières des coefficients d'écoulement a permis de dégager les nuances entre régimes hydrologiques à alimentation essentiellement pluviale et régimes hydrologiques à alimentation contrôlée. Ces nuances ont fait apparaître la forte opposition entre l'abondance estivale et l'indigence hivernale des cours d'eau. Ainsi, le régime hydrologique des bassins de la Falémé (à Gourbassi et Kidira), du Bakoye (à Oualia) et du Bafing en amont de Manantali (à Dakka Saidou et à Bafing Makana), qui se caractérise par des coefficients d'écoulement élevés pendant la période pluviale, peut être

classé parmi les fleuves à régime pluvial, contrairement à la station de Bakel sur le Sénégal qui enregistre une alimentation contrôlée en partie par le barrage de Manantali car recevant les lâchers d'eau du barrage, son régime étant dès lors plus complexe.

Variabilité et tendances interannuelles de l'écoulement mensuel

- 37 La figure 4 et le tableau 4 présentent la variabilité mensuelle des CMD sur des stations à écoulement naturel et artificialisé, des stations en amont et en aval du barrage dans le bassin du Sénégal. Comme aux échelles pluriannuelle et saisonnière, les résultats du test de Mann-Kendall sur les CMD, à l'échelle mensuelle, montrent des tendances négatives (72,4 %) sur la période 1960-2014 (tableaux 2 et 4) et positives (84,5 %) sur la période 1970-2014 (tableaux 3 et 4). Ces tendances négatives comme positives sont significatives (respectivement de 31,3 % et 29,8 %) pour certains mois de la série analysée. Des mois aux tendances non significatives (car ayant des p-value calculées supérieures au seuil de signification qui est de 0,01) sont notés aux six stations quel que soit le type de régime (pluvial ou complexe).

Figure 4. Evolution mensuelle des CMD de part et d'autre des deux période de rupture.

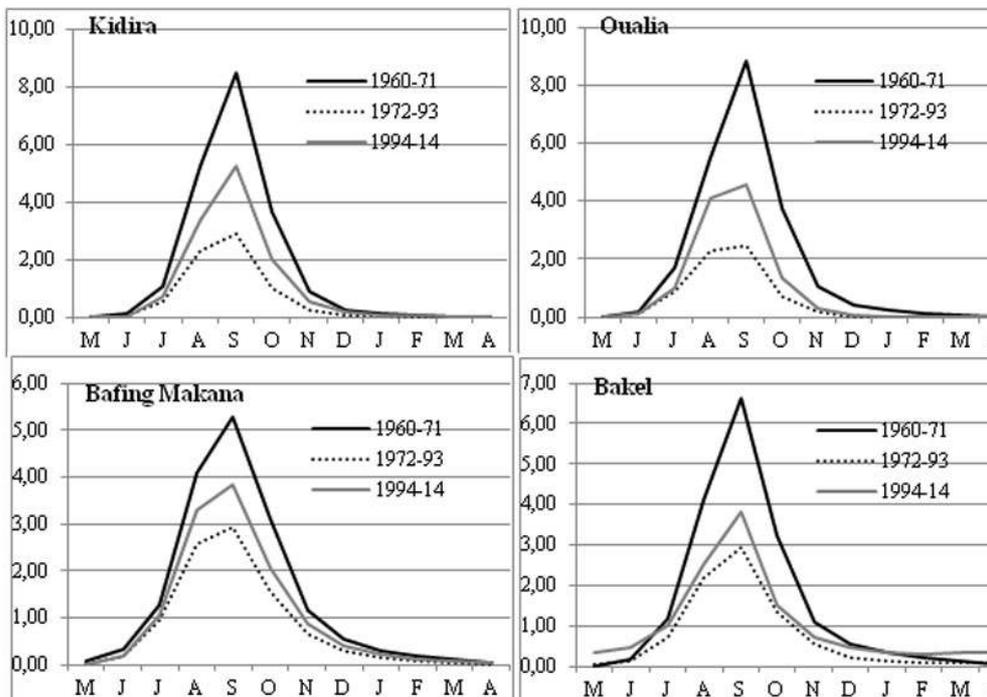


Tableau 4. Statistiques mensuelles (en pourcentage) des tendances des CMD sur les deux périodes aux différentes stations.

Bassins		Bassins non aménagés (à écoulement naturel)			Bassins non aménagés (en amont du Barrage)		Lâchers du barrage	Bassin influencé par le barrage	Moy
Stations		Kidira	Gourbassi	Oualia	Bafing Makana	Dakka Saidou	Manantali aval	Bakel	
Période 1960-2014	Tendance négative	75	100	100	83,3	81,8	16,7	50	72,4
	Tendance significative	16,7	16,7	33,3	8,3	27,3	66,7	50	31,3
Période 1970-2014	Tendance positive	91,7	83,3	66,7	91,7	83,3	83,3	91,7	84,5
	Tendance significative	25,0	0,0	0,0	41,7	16,7	66,7	58,3	29,8

case blanche : bassin non aménagé ; case grise : bassin aménagé

- 38 Dans les bassins à écoulement naturel (comme la Falémé à Gourbassi, le Bakoye à Oualia), tous les mois enregistrent une tendance négative sur la période 1960-2014 ; celle-ci est plus significative à Oualia (33,3 %). Les CMD montrent des tendances à la hausse sur la période 1970-2014 (91,7 à Kidira) statistiquement significatives (25 %). Les stations de Gourbassi et d'Oualia y enregistrent des tendances à la hausse non significatives.
- 39 Sur les tronçons à écoulement naturel en amont du barrage de Manantali, les tendances à la baisse sur la période 1960-2014 ont des fréquences moins importantes (81,8% à Dakka Saidou et 83,3% à Bafing Makana), de même que leur significativité (27,3% à Dakka Saidou). Sur la période 1970-2014, les tendances positives sont assez semblables aux stations de Kidira et de Gourbassi, mais leur significativité est plus importante.
- 40 Le bassin qui subit l'influence du barrage de Manantali connaît une nette différence par rapport aux bassins à écoulement naturel, notamment pour les tendances négatives de la période 1960-2014. En effet, la station de Bakel sur le Sénégal enregistre une fréquence de 50% sur les tendances négatives et 50% sur leur significativité. Quant aux lâchers d'eau du barrage, les fréquences sont faibles sur les tendances négatives (16,7%) et très fortes sur leur significativité (66,7%). En revanche, pour les tendances de la période 1970-2014, seule la significativité différencie la station contrôlée de Bakel (58,3%) et les lâchers d'eau du barrage (66,7%) des autres stations à écoulement naturel, les tendances positives étant semblables (valeurs supérieures à 80%).
- 41 Sur les stations en amont du barrage et sur les stations à écoulement naturel, la deuxième rupture intervient en 1993-94, alors que dans la partie aval du barrage, elle intervient en 1990-91 à Bakel (sur 5 mois) et en 2000-04 pour les lâchers d'eau du barrage (pour un total de 11 mois). D'autre part, les excédents sont plus élevés aux stations des sous bassins non aménagés (224 % en février à Kidira) qu'aux stations des sous-bassins aménagés mais qui sont en amont du barrage. Par ailleurs, la station de Bakel sous influence du barrage enregistre des excédents qui peuvent être énormes du fait du soutien en période de basses eaux (1583 % pour le mois de mai). La figure 4 révèle aussi que les valeurs des CMD

sont quasi systématiquement plus élevées (en valeurs absolues) en aval (Bakel) qu'en amont du barrage (Bafing Makana). Ce qui signifie qu'en aval du barrage, on lâche beaucoup d'eau pendant les années humides et moins d'eau pendant les années sèches. Ainsi le coefficient de variation est plus élevé en aval (0,62 à Bakel) qu'en amont du barrage (0,51 à Bafing Makana).

Facteurs responsables de cette variabilité des régimes

- 42 Pour caractériser la variabilité, les tendances et les ruptures notées dans les régimes hydrologiques du bassin du fleuve Sénégal, les causes sont recherchées sur les différents bouleversements naturels et anthropiques que ce bassin a connus. En réalité, la rupture dans la série peut avoir deux origines : changements de conditions climatiques (sécheresse ou changement climatique) ou influence des aménagements majeurs (Sambou *et al.*, 2009). Quelle est la part de chacun dans les modifications du régime ?

Rôle des changements des conditions climatiques

- 43 Les changements climatiques indiquent la tendance à une augmentation à l'échelle mondiale et sur plusieurs années, de la température, mais aussi à une variabilité et une diminution de la pluviométrie en quantité et en durée (GIEC, 2007, 2014). L'un des impacts de ces grandes variabilités climatiques s'est traduit notamment par la grande sécheresse des années 1970 (Goula *et al.*, 2005 ; Sow, 2007 ; Ozer *et al.*, 2009). Il a été interprété comme étant le seul facteur responsable de la première rupture sur toutes les stations de l'étude, car celle-ci est antérieure à la mise en eau du barrage de Manantali. Aux différentes échelles (pluriannuelle, saisonnière et mensuelle), les évolutions significatives détectées sont des tendances à la baisse avec une rupture aux environs de 1971-72 avec des déficits pouvant atteindre 99 %, ce qui est très élevé.
- 44 Par contre, pour la deuxième rupture notée aux environs de 1993-94 (donc postérieure au barrage), les changements de climat, en faveur souvent d'une pluviométrie excédentaire (Ali *et al.*, 2008 ; Hountondji *et al.*, 2009 ; Panthou *et al.*, 2014 ; Bodian, 2014) ont été à l'origine d'une tendance des CMD à la hausse. Par rapport à cette rupture et à la hausse de l'écoulement dans les bassins amont et aval du barrage, aménagés et non aménagés, l'origine n'est pas strictement les changements de climat. Néanmoins, les conditions pluviométriques plus ou moins favorables sont à l'origine de cette hausse de l'écoulement dans les affluents du fleuve Sénégal (le Bafing en amont de Manantali, le Bakoye, la Falémé) qui ne sont pas sous influence du barrage. En revanche, la station de Bakel, qui est sous contrôle du barrage, est en partie influencée par les changements des conditions climatiques car le débit passant par Bakel provient du Bafing, mais également des affluents non contrôlés que sont le Bakoye et la Falémé. Cette différence en faveur de Bakel est-elle liée à l'action du barrage de Manantali ?

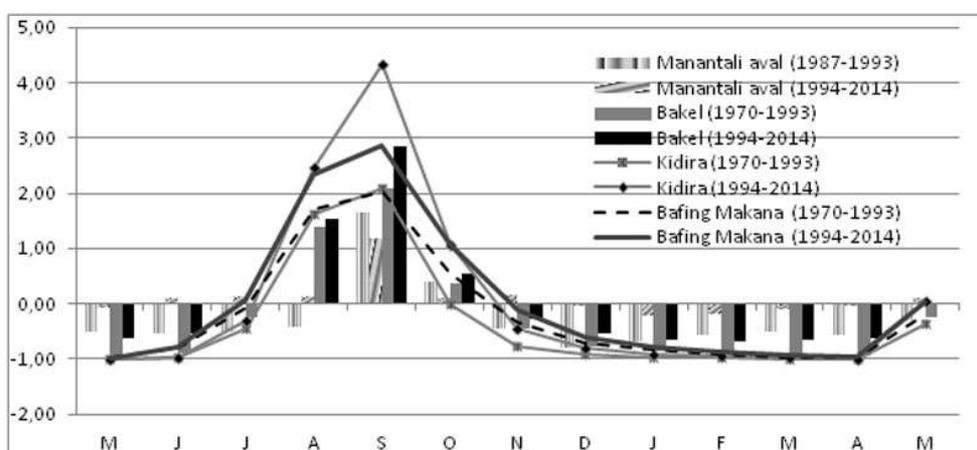
Rôle des aménagements

- 45 Le barrage de Manantali, construit sur le Bafing, contrôle la majeure partie des écoulements du fleuve Sénégal passant par Bakel. Il permet de régulariser le cours d'eau en vue de remplir différents objectifs : irrigation, navigation, production d'électricité... (OMVS/FEM, 2008). Pour déterminer le rôle du barrage, les CMD sur la deuxième période (1970-2014) sont analysés pour la station de Bakel aux échelles mensuelle et saisonnière

sur lesquelles l'impact du barrage est plus apparent (les débits lâchers par le barrage sont utilisés pour illustrer l'analyse). A la station de Bakel, les ruptures sont arrivées plus tôt, à partir de 1989 (une année après la mise en eau du barrage) avec des excédents très importants. Cependant, les stations de Kidira et d'Oualia ont, quant à elles, enregistré un excédent important, alors qu'elles ne subissent l'influence d'aucun barrage, mais celle d'une pluviométrie plus ou moins excédentaire. Ce qui restreint, en partie, l'action du barrage de Manantali comme le principal responsable de la hausse des débits à la station de Bakel.

- 46 À l'échelle mensuelle (tableau 3), les ruptures se produisent après la mise en eau du barrage pour 8 mois dans le sens d'une augmentation des CMD. Seul le mois d'août enregistre une tendance légèrement négative. Les tendances ne sont significatives que pour les mois de basses eaux. L'analyse du tableau 3 met en évidence l'action de laminage des crues et du soutien des débits faibles du barrage, en attestent les valeurs d'anomalies des CMD de Bakel comparées à celles de Kidira et Bafing Makana (figure 5).

Figure 5. Evolution comparée des anomalies de coefficients d'écoulement mensuels de débits entre 1970-1993 et 1994-2014 aux stations de Bakel, Manantali aval, Kidira, et Bafing-Makana.



- 47 La comparaison des CMD entre la période 1970-1993 et la période 1994-2014 indique une différence du nombre de mois de hautes eaux (c'est-à-dire mois à $CMD > 1$). Sur la période 1970-1993, le nombre de mois de hautes eaux est de 3 (août à octobre), alors que sur la période 1994-2014, il est de 4 mois (juillet à octobre). Cette différence s'explique par les effets du barrage (notamment avec la mise en eau en 1988 et surtout la production hydroélectrique à partir de 2003), contrairement à la période 1970-1993. Quant aux stations dont l'écoulement reste toujours naturel, le nombre de mois de hautes eaux est toujours égal entre les deux périodes : 3 mois aux stations de Kidira et Oualia (il s'agit du régime fluvial tropical pur) ; 4 mois à la station de Bafing-Makana (c'est le régime fluvial tropical de transition). Ainsi, la mise en eau du barrage de Manantali change le régime du bassin à la station de Bakel en le faisant passer d'un régime fluvial tropical pur (avec 3 mois de hautes eaux) avant la construction du barrage à un régime fluvial tropical de transition (avec 4 mois de hautes eaux) après la construction du barrage (figure 5).
- 48 Contrairement à Kidira et Bafing-Makana où toutes les ruptures détectées sont strictement imputables aux changements des conditions climatiques), à Bakel, la rupture des CMD pour la période de hautes eaux, dont l'ampleur est très importante, peut être imputable à la fois aux changements de climat et au laminage des crues du barrage. Pour

la période des basses eaux, cette rupture provient du soutien des étiages du barrage (Sambou *et al.*, 2009). Le barrage entraîne donc une augmentation des CMD sur la période de basses eaux et leur diminution sur la période de hautes eaux (tableau 3). En période d'étiage, le fleuve, en régime naturel, pouvait tarir complètement certaines années (surtout durant les décennies 1970 et 80), alors que le soutien d'étiage du barrage permet d'y maintenir un volume important. L'écart appréciable pendant la période d'étiage fait que la rupture détectée ne relève plus des changements des conditions climatiques mais probablement du soutien d'étiage. C'est pourquoi, les opérations de gestion en période de crue (stockage dans le réservoir de Manantali) provoquent bien une diminution des CMD sur la période de hautes eaux.

Discussion

- 49 L'évolution des coefficients d'écoulement mensuels, saisonniers et annuels sur deux périodes (1960-2014 et 1970-2014) montre une tendance générale d'abord à la diminution de l'écoulement (depuis 1971) et ensuite à l'augmentation de l'écoulement (depuis 1993) relative à la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest en général et dans le bassin versant du fleuve Sénégal en particulier. Au-delà des changements du climat, les coefficients d'écoulement en période de basses eaux à Bakel enregistrent une augmentation considérable à partir de la mise en eau du barrage de Manantali.
- 50 La première cassure notée en 1971 au niveau des coefficients d'écoulement, relative à une baisse de l'écoulement, vient confirmer les résultats de nombreux travaux sur différents fleuves en Afrique de l'Ouest (Dione, 1996 ; Servat *et al.*, 1999 ; Sighomnou, 2004 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; L'Hôte *et al.*, 2002 ; Goula *et al.*, 2005 ; Sow, 2007 ; Bodian, 2011 ; Faye, 2013 ; Faye *et al.*, 2015), en Europe de l'Est et en Amérique latine (Milly *et al.*, 2005) dans lesquels les ruptures sont notées au début des années 1970. Par contre, ces tendances à la baisse sont opposées à celles notées sur des fleuves d'Amérique du Sud (Genta *et al.*, 1998 ; Callède *et al.*, 2004), de la Chine (Tao *et al.*, 2003), de la Finlande (Hyvärinen, 1998), des 48 États contigus des États-Unis (Walter *et al.*, 2004), sur lesquels l'écoulement a connu une hausse.
- 51 La deuxième cassure, notée en 1993 au niveau des coefficients d'écoulement, relative à une hausse de l'écoulement, présage d'une amélioration du régime hydrologique dans cet espace, par comparaison à la période de sécheresse, bien que la persistance et la durée de la hausse restent encore à prouver (car après 1993, les volumes d'eau écoulés à l'échelle d'une année restent néanmoins bien inférieurs à ceux observés avant les années 60). Une telle hausse est aussi signalée dans les travaux de certains auteurs (Ali *et al.*, 2008 ; Niang, 2008 ; Ali et Lebel, 2009 ; Ozer *et al.*, 2009 ; Hountondji *et al.*, 2009 ; Ouoba, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014 ; Bodian, 2014), qui suggèrent la fin de la sécheresse sahélienne durant les années 1990. Néanmoins, elle est en contradiction avec d'autres travaux qui estiment que la pluviométrie évolue peu depuis la fin des années 1960 et reste déficitaire (L'Hôte *et al.*, 2002 ; Frappart *et al.*, 2009 ; Lebel et Ali, 2009).
- 52 Pour la première cassure, bien que la mise en eau du barrage ait entraîné des variations des coefficients d'écoulement par rapport au régime naturel, les tests appliqués ne les ont pas détectées. Le signal de la sécheresse a été si fort qu'il a masqué l'effet du barrage sur le régime hydrologique (Sambou *et al.*, 2009). Cette cassure traduit donc les changements des conditions climatiques observés en Afrique occidentale (Faye, 2013 ; Faye *et al.*, 2015).

53 La deuxième cassure mise en évidence après un raccourcissement de la série des CMD de 1970 à 2014, a été notée à la fois sur les bassins aménagés et non aménagés. Pour noter la différence et montrer le rôle véritable du barrage, l'échelle mensuelle a été utilisée et indique l'effet réel du barrage sur le régime hydrologique à la station de Bakel (Sambou S. *et al.*, 2009). Par comparaison aux stations de Kidira, d'Oualia et de Bafing-Makana, la nouvelle rupture détectée (1993), à la station de Bakel, ne correspond plus du tout à celle des changements du climat, quelle que soit sa force de signal, mais probablement au soutien des étiages du barrage qui permet de maintenir dans le fleuve un débit suffisamment important pour éviter son éventuel tarissement (mais, comme la rupture de 1993 est observée dans 5 des 6 stations étudiées, même celles non influencées par le barrage de Manantali, le climat peut toutefois influencer partiellement l'écoulement à Bakel). Les opérations de gestion du barrage ont donc entraîné un laminage des crues (stockage dans le réservoir de Manantali). La modification du régime hydrologique qui en résulte et qui traduit l'effet du barrage, vient confirmer les travaux de divers auteurs (Amoussou *et al.*, 2012), qui ont indiqué l'impact de la construction des grands aménagements sur les régimes hydrologiques et la diminution des extrêmes hydrologiques.

Conclusion

54 Après que de nombreux aménagements ont été construits sur le bassin du fleuve Sénégal (celui de Manantali notamment) et au-delà de la grande sécheresse des années 1970, il est apparu important d'évaluer les performances réelles de chacun des éléments ainsi que leurs impacts sur la dynamique hydrologique du bassin du fleuve Sénégal. Ainsi, le principal objectif de ce travail est de déterminer la variabilité hydrologique (à l'échelle mensuelle ou interannuelle) et de mettre en évidence l'action naturelle (effet des changements du climat) et celle anthropique (influence du barrage de Manantali) sur les importantes modifications du régime d'écoulement des eaux dans le bassin du fleuve Sénégal. L'article met en évidence l'existence de deux ruptures, en sens inverse, illustrant la non-linéarité de certains effets des changements du climat. Le suivi de l'évolution des coefficients d'écoulement aux échelles pluriannuelle, saisonnière et mensuelle sur la période 1960-2014, témoigne bien des changements de la dynamique de l'écoulement et des modifications des régimes hydrologiques. L'analyse des coefficients d'écoulement, variant de pourcentages élevés, a mis en évidence l'influence des changements des conditions climatiques et de la gestion du barrage de Manantali sur l'écoulement du bassin.

55 L'intérêt de l'article est aussi dans la mise en évidence de l'impact comparé des changements du climat et des barrages. La première rupture notée en 1971 (la période 1960-2014) sur les coefficients d'écoulement et relative à une baisse de l'écoulement dans tout le bassin, est strictement liée à la sécheresse et au fort signal du changement climatique, le barrage n'étant pas encore mis en service (tous les bassins sont alors non aménagés). La deuxième rupture notée en 1993 (sur la période 1970-2014) après la mise en eau du barrage en 1988, au niveau des coefficients d'écoulement, est relative à une hausse de l'écoulement et a été notée à la fois sur les bassins aménagés et non aménagés. Sur les bassins aménagés (station de Bakel), à l'échelle mensuelle, la rupture de 1993 est plus liée à l'effet réel du barrage qu'à celui des changements des conditions climatiques, quel que soit sa force de signal. En attestent les opérations de gestion du barrage à travers le

soutien des étiages et la lutte contre le tarissement. Par contre, sur les bassins non aménagés (stations de Kidira, d'Oualia et de Bafing-Makana), c'est toujours la sécheresse qui explique les modifications du régime hydrologique. Même sur les bassins aménagés (station de Bakel), en période de hautes eaux, l'effet de la gestion du barrage n'est pas significatif car masqué par le fort signal des changements du climat.

- 56 L'étude de la variabilité hydrologique du bassin du fleuve Sénégal est donc perçue comme un élément majeur à prendre en compte pour une meilleure compréhension des grands bassins versants qui intègrent la réponse hydrologique aux changements des conditions climatiques à de larges échelles spatiales et temporelles, mais également les modifications du milieu physique d'origine anthropique aux impacts positifs (niveau de satisfaction en eau des usages écologiques, domestiques, productifs et in situ) et négatifs (prolifération des plantes aquatiques nuisibles ; pollution biologique et chimique ; altération de la qualité de l'eau et salinisation...) considérables. Ce qui rend très difficile l'identification de l'origine de l'impact de la variabilité hydrologique.
- 57 Face au double rôle des changements des conditions climatiques et de la gestion du barrage sur les CMD, cette étude montre les difficultés des tests statistiques d'homogénéité, incapables à eux seuls de déceler les effets de chacun des facteurs (changements du climat et barrage) sur le régime hydrologique à Bakel. Il faut alors les combiner à d'autres approches, par exemple reprendre les analyses de tendance en y incluant les données de précipitations des années récentes et des états de surfaces. Il serait donc important de connaître la dynamique de l'occupation du sol, dans un contexte de changement climatique, et son impact sur l'écoulement dans le bassin, ce qui est aujourd'hui possible avec les techniques de télédétection à partir des données d'imageries satellitaires.

BIBLIOGRAPHIE

- ALI A. & LEBEL T. (2009), "The Sahelian standardized rainfall index revisited", *International Journal of Climatology*, 29, 12, pp. 1705-1714.
- ALI A., LEBEL T. & AMAMI A. (2008), « Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel », *Sécheresse*, 19, 4, pp. 227-235.
- AMOUSSOU E., CAMBERLIN P. & MAHE G. (2012), « Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest) », *Hydrological Sciences Journal*, 57, 4, pp. 805-817.
- ARDOIN-BARDIN, S. (2004), *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*, Thèse de doct. Univ. Montpellier II, 440 p.
- BADER J.-C. (2013), *Actualisation de la monographie du fleuve Sénégal (rapport final)*, OMVS-IRD, 789 p., http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-08/010059331.pdf.
- BODIAN A. (2011), *Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau. Application au haut bassin du fleuve Sénégal*, Thèse de doctorat, UCAD, 288 p.

- BODIAN A. (2014), « Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest) », *Physio-Géo* [En ligne], 8, mis en ligne le 12 janvier 2014, Consulté le 17 février 2015. URL : <http://physio-geo.revues.org/4243> ; DOI : 10.4000/physio-geo.4243.
- CALLEDE J., GUYOT J. L., RONCHAIL J., L'HOTE Y, NIEL H. & DE OLIVEIRA E. (2004), « Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999, Evolution of the River Amazon's discharge at Óbidos from 1903 to 1999 », *Hydrological Sciences Journal*, 49, 1, pp. 85-97.
- DACOSTA H., KONATÉ Y.K. & MALOU R. (2002), « La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle », in *Regional hydrology: bringing the gap between research and practice* (FRIEND conference, Le Cap, Afrique du Sud), IAHS Publication, 274, pp. 499-506.
- DIONE O. (1996), *Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie*, Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin, 477 p.
- FAYE C. (2013), *Évaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé*, Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 p.
- FAYE C. (2014a), « Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal », *Cinq Continents*, 4, 10, pp. 80-108.
- FAYE C. (2014b), « Variabilité et tendances observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé (Sénégal) », *Hydrological Sciences Journal*, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.990967>.
- FAYE C. & SOW A.A. (2013), « Analyse de la variabilité des ressources en eau dans le bassin de la Falémé par modélisation hydrologique », *Annales de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines*, 43(B), pp. 119-139.
- FAYE C., SOW A. A. & NDONG J.B. (2015), « Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal », *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 9, pp. 17-35.
- FRAPPART F., HIERNAX P., GUICHARD F., MOUGIN E., KERGOAT L., ARJOUNIN M., LAVENU F., KOITE M., PATUREL J.E. & LEBEL T. (2009), " Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali ", *Journal of Hydrology*, 375, pp. 128-142.
- GENTA J., PEREZ-IRIBARREN G. & MECHOSOS C. (1998), "A recent increasing trend in streamflow of rivers in southeastern South America", *J. Climate*, 11, pp. 2858-2862.
- GIEC (2008), *Changements Climatiques 2008. Rapport de synthèse*, IPCC, OMM, PNUE. ISBN 92-9169-222-0, 114 p.
- GIEC (2014), *Changements climatiques 2014 : Impacts, vulnérabilité et adaptation. Résumé à l'intention des décideurs*, Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 40 p.
- GIEC (2007) [SOLOMON S., QUIN A., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M. & MILLER H.L. (éds.)], « Résumé à l'intention des décideurs », in *Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA, 18 p.

- GOULA B. T. A., SAVANE I., KONAN B., FADIKA V. & KOUADIO G.B. (2005), "Comparative study of climatic variability impact on water resources of N'zo and N'zi watersheds in Côte d'Ivoire", *Sciences & Nature*, 2, 1, pp. 10-19.
- HIRSCH R.M. & SLACK J.R. (1984), "A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence", *Water Resources Research*, 20, pp. 727-732.
- HOUNTONDI Y.C., SOKPON N., NICOLAS J. & OZER P. (2009), "Ongoing desertification processes in the sahelian belt of West Africa: an evidence from the rain-use efficiency", in RÖDER A. & HILL J. (eds.), *Recent advances in remote sensing and geoinformation processing for land degradation assessment*, CRC Press, série ISPRS, 8, pp. 173-186.
- HUBERT P., BADER J.C. & BENDJOURI H. (2007), « Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal », *Hydrol. Sc. Journal*, 52, 1, pp. 68-73.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P. & 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*, 110, pp. 349-367.
- HYVÄRINEN V. (1998), "Observed trends and fluctuations in hydrological time series in Finland - a review", *Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water*, Espoo, Finland, pp. 1064-1070.
- KENDALL M. G. (1975), *Rank correlation methods*, Griffin, London, 202 p.
- LEBEL T. & ALI A. (2009), "Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007)", *Journal of Hydrology*, 375, 1-2, pp. 52-64.
- LEROY E., ROME S. & BIGOT S. (2012), « Variabilité spatio-temporelle de la température de l'air (1950-2009) dans le département de la Drôme (région Rhône-Alpes, France) », *Association Internationale de Climatologie*, 25, pp. 469-474.
- MAHE G. & OLIVRY J.C. (1995), « Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989 », *Sécheresse*, 6, 1, pp. 109-117.
- MANN H. B. (1945), "Non parametric tests against trend", *Econometrica*, 13, pp. 245 - 259.
- MICHEL P. (1973), *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Etude géomorphologique*, Mémoires ORSTOM 63, 3 tomes, 752 p.
- MILLY P. C. D., DUNNE K.A. & VECCHIA A.V. (2005), "Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate", *Nature*, 438, pp. 347-350.
- NIANG A.J. (2008), *Les processus morphodynamiques, indicateurs de l'état de la désertification dans le Sud-Ouest de la Mauritanie. Approche par analyse multisource*, Thèse de Doctorat, Université de Liège (Belgique), 286 p.
- NICHOLSON S.E., SOME B. & KONE B. (2000), "An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years", *Journal of Climate*, 13, pp. 2628-2640.
- OMVS, PROJET FEM/BASSIN DU FLEUVE SENEGAL (2008), *Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problèmes Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal, Version finale*, 133 p.
- OUBA A.P. (2013), *Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè*, Thèse de Doctorat Unique, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 305 p.
- OZER P., HOUNTONDI Y.C. & LAMINO MANZO O. (2009), « Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'Est du Niger de 1940 à 2007 », *Geo-Eco-Trop, Revue de Géographie et d'Écologie Tropicale*, 33, pp. 11 - 30.

- PANTHOU G., VISCHEL T. & LEBEL T. (2014), "Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel", *International Journal of Climatology*, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3984/abstract>.
- PARDE M. (1968), *Fleuves et rivières*, Paris, A. Colin, 245 p.
- PATUREL J.E., OUÉDRAOGO M., SERVAT E., MAHÉ G., DEZETTER A. & BOYER J.F. (2003), "The concept of hydropluviometric normal in West and central Africa in a context of climatic variability", *Hydrological Sciences Journal*, 48, 1, pp. 125-137.
- PETTITT A. N. (1979), "A non-parametric approach to the change-point problem", *Appl. Statist.*, 28, 2, pp. 126-135.
- ROCHETTE C. (1974), *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal*, Coll. Mém. ORSTOM, 1442 p.
- SAMBOU S., DIÉMÉ Y., TOURÉ A.K., BADJI A.M. & MALANDA-NIMY E.N. (2009), « Effet du barrage de Manantali sur les modifications du régime hydrologique du fleuve Sénégal dans le bassin amont : une approche statistique », *Science et changements planétaires, Sécheresse*, 20, 1, pp. 104-111.
- SEN P.K. (1968), "Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau", *Journal of the American Statistical Association*, 63, pp. 1379-1389.
- SIGHOMNOU D. (2004), *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau*, Thèse Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé 1, Département des Sciences de la Terre, 291 p.
- SOW A. A. (2007), *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé*, Thèse doctorat d'Etat ès lettres et sciences humaines, UCAD, FLSH, Département de Géographie, 1232 p.
- SOW A.A. (1984), *Pluie et écoulement fluvial dans le Bassin du Fleuve Sénégal*, Thèse de 3^{ème} cycle de Géographie Physique, Université de Nancy II, 442 p.
- TAO W. K. & SIMPSON J. (1993), "The Goddard Cumulus Ensemble Model. Part I: Model description", *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 4, pp. 35-72.
- UNDP (1998), *Climate Change and the Millennium Development Goals*, http://www.undp.org/climatechange/cc_mdgs.shtml.
- UNEP (2013), *Embedding the Environment in Sustainable Development Goals*, Version 2, July, UNEP Post-2015 Discussion Paper 1, 38 p.
- WALTER M.T., WILKS D.S., PARLANGE J.Y. et al. (2004), "Increasing evapotranspiration from the conterminous", *United States. J. Hydrometeorol.*, 5, pp. 405-408.
- YANDA P. Z. (2010), "Climate change impacts, vulnerability and adaptation in Southern Africa", *Sarua Leadership Dialogue Series*, 2, 4, pp. 11-30.

RÉSUMÉS

Depuis plusieurs décennies, de nombreux pays accordent une haute priorité à la conservation, à l'utilisation et à l'aménagement durable des ressources des bassins versants pour répondre aux déficits hydrologiques et aux demandes en eau d'une population croissante. Face à ces différentes évolutions, le bassin du fleuve Sénégal a connu un ensemble d'aménagements majeurs sur plusieurs tronçons fluviaux (Manantali sur le Bafing, Diama dans la vallée). Le présent travail s'inscrit dans cette perspective. Il a pour objectif d'évaluer le potentiel hydrologique du fleuve Sénégal dans un contexte de changements des conditions climatiques et d'aménagements des

bassins versants. Cette étude est basée sur une analyse de la variation spatio-temporelle des écoulements fluviaux tout en procédant à une comparaison des sous-bassins versants du fleuve Sénégal qui tient compte des différents régimes d'écoulement. Afin de juger l'impact de la persistance ou non de la sécheresse et des aménagements majeurs sur l'écoulement du bassin, les séries hydrométriques mensuelles et annuelles utilisées couvrent la période 1960-2014 et l'approche adoptée comporte : (1) la mise à jour des données lacunaires; (2) le calcul des coefficients d'écoulement mensuels (CMD), saisonniers et annuels et leur subdivision en deux séries avec des pas de temps différents (1960-2014 et 1970-2014); (3) la détection de ruptures et/ou tendances au sein des deux séries avec l'application de deux tests (Pettitt et Mann-Kendall). Cette application sur les deux séries montre une double rupture (souvent significative au seuil de 1 %). La première, comprise entre 1967 et 1976, est notée sur la série 1960-2014 et la seconde, entre 1990 et 1994, notée sur la série 1970-2014. En comparant un certain nombre de stations, on constate que les tendances ou ruptures dans les bassins à écoulement naturel (Falémé, Bakoye, Bafing en amont de Manantali) sont dues aux changements des conditions climatiques, alors que celles dans les bassins à écoulement artificialisé (Bakel et les lâchers d'eau du barrage), peuvent vraisemblablement être entraînées par les aménagements qui y ont été réalisés.

For several decades, numerous countries have given high priority to the preservation, the use and the sustainable development of water resources in order to provide responses to the deficit of hydrological flow and in response to increasing population demands. Facing these various evolutions, Senegal River basin is going to experience a set of major arrangements on some of its sections (Manantali on Bafing river, Diama in the valley). The present work has to be analyzed through this perspective. Its main objective is the evaluation of the water resources of the Senegal River in a context of changes in climatic conditions and basins managements. This work is based on an analysis of the spatio-temporal variations of the flow while proceeding to a comparison of Senegal River basin, through its various regimes. To evaluate the impact of the drought and its effects on the flow of the river within various sub-basins, monthly and annual hydrometric series covering the period 1960-2014 have been used. This approach includes: (1) updating of incomplete data, (2) calculation of monthly (CMD), seasonal and annual coefficients of flows and their subdivision into two series with different period (1960 to 2014 and 1970 to 2014), (3) trends detection within both series by the application of two tests (Pettitt and Mann-Kendall). This application on both series indicates a double "breakdown" (often significant with a threshold of 1 %). The first one, between 1967 and 1976, is noted in the series 1960-2014 and the second, between 1990 and 1994, in the series 1970-2014. By comparison between stations, we have noticed that the trends or the breakdown in river basins with natural flow (Falémé, Bakoye) are due to climate change, while those in basins with man-made flow (Bakel and water releases from the dam), to be entrained by the subsequent managements within the basins.

INDEX

Mots-clés : ressources en eau, changements des conditions climatiques, aménagements des bassins versants, régime hydrologique, bassin du fleuve Sénégal

Keywords : flow regime evaluation, water resources, changes in climatic conditions, water regimes, Senegal River Basin

AUTEURS

CHEIKH FAYE

Département de Géographie, U.F.R. des Sciences et Technologies, UASZ, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor (Sénégal), 221775071519, cheikh.faye@univ-zig.sn

EL HADJI SALIF DIOP

Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, UCAD, BP 5005 Dakar (Sénégal)

IBRAHIMA MBAYE

Département de Géographie, U.F.R. des Sciences et Technologies, UASZ, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor (Sénégal)