

CARACTÉRISATION DES EFFETS DU BARRAGE DE MANANTALI SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE DU FLEUVE SÉNÉGAL

CHEIKH FAYE*, AMADOU ABDOUL SOW**, EL HADJI SALIF DIOP**

Key-words: water regime, indicators of hydrologic change, range of variability approach, Manantali dam, Senegal River basin.

The effects of the Manantali Dam on the water regime of the Senegal River. Characteristic features. The hydrological regime of a river is a driving force of its ecosystem. The operation of dams and locks has significant impacts on the hydrological situation of rivers. Taking the example of the Senegal River, the hydrological section of upper basin was chosen to study the influence of the Manantali dam built on Bafing on hydrological regime. To do this, the daily flows measured at the Bakel hydrological station for the period 1951–2014 were used and divided into three series: a series of humid period (1961–1970); a series of dry period (1970–1988) before the impact of dam; a series on post-impact period (1988–2014). Based on the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA), a range of variability of thirty-three hydrological parameters was calculated and the hydrological alteration associated with dam operation was quantified. Using the Range of Variability Approach (RVA), hydrological alteration at Bakel site was evaluated and showed the dam influence on hydrological state. The results showed a strong dam influence on hydrological regime; the eco-hydrological fluvial objectives calculated in the present study can constitute a certain support for water resources and ecosystems management of the Senegal River.

1. INTRODUCTION

Les régimes d'écoulement des cours d'eau sont considérés comme la principale force motrice de leur écosystème (Poff *et al.*, 1997; Yang *et al.*, 2012). L'intégrité et la stabilité des écosystèmes fluviaux sont largement tributaires des caractéristiques de changements dynamiques naturels de l'écoulement fluvial (Poff *et al.*, 1997; Zuo et Liang, 2014). Le développement et la gestion des ressources en eau ont entraîné une modification du débit naturel des fleuves dans le monde entier (Richter, 1997). Les régimes d'écoulement altérés dans le système fluvial affectent la qualité de l'eau, les sources d'énergie, les conditions physiques de l'habitat, et les interactions biotiques, entraînant des dommages à l'intégrité écologique des cours d'eau (Suen, 2011).

Pour conserver les réserves d'eau, de nombreux barrages ont été construits le long des cours d'eau et permettent de réguler le débit d'un fleuve, diminuant ainsi les écarts de flux et donc l'intensité des crues et des sécheresses. Cette régulation par les barrages modifie le mode d'écoulement naturel des rivières. L'augmentation probable du flux moyen aval en saison sèche peut inonder de manière permanente des écosystèmes importants, tandis qu'une diminution des flux pendant la saison humide peut nuire à la productivité biologique de petites plaines inondables (Kummu et Varis, 2007). En outre, selon les études sur l'Amazonie menées par Junk *et al.* (1997), un changement du régime du fleuve peut entraîner des retards dans l'arrivée et la durée plus courte des crues, ce qui aurait un effet négatif sur la productivité des écosystèmes.

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

** Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, UCAD, BP 5005 Dakar (Sénégal), amsow310@hotmail.com, salif.diop@ucad.edu.sn.

Le débit naturel d'un fleuve connaît une grande variabilité spatio-temporelle et exerce des influences importantes sur des caractéristiques écologiques. Pour caractériser cette variabilité naturelle de l'écoulement d'un cours d'eau, plusieurs années d'observation d'une station hydrologique sont généralement nécessaires. Cette caractérisation du régime naturel peut être faite par différentes approches et son évaluation est essentielle pour comprendre et prévoir, à la suite des aménagements, l'impact biologique des deux régimes d'écoulement naturels et modifiés sur le milieu (Zuo et Liang, 2014). Pour se faire, un certain nombre d'indices hydrologiques et de méthodes prenant en compte non seulement des paramètres hydrologiques mais également des paramètres écologiques, sont mis au point et appliqués pour caractériser différentes composantes du régime hydrologique.

De nombreuses études sur les relations entre les variables hydrologiques et l'intégrité des écosystèmes des rivières mènent à un paradigme sur le débit naturel qui stipule que la totalité de la plage des variations intra- et interannuelles des régimes hydrologiques, et les caractéristiques associées tels la magnitude, la saisonnalité, la durée, la fréquence, et le taux de variation, sont critiques pour maintenir la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes aquatiques (Hirtt, 2009). Il en découle que gérer un écosystème avec toutes ses plages de variations naturelles est un moyen approprié pour maintenir un système diversifié, productif, souple et sain. Donc, si la conservation de la biodiversité autochtone et l'intégrité de l'écosystème sont les objectifs de gestion de la rivière, alors le gestionnaire doit prendre en compte le paradigme sur le débit naturel, comme proposé par la méthode des indicateurs de l'altération hydrologique (Indicators of Hydrologic Alteration, IHA).

Comme l'ensemble des indices hydrologiques proposés, la méthode IHA, avec sa gamme d'approches de variabilité (Range of Variability Approach, RVA), est largement utilisée pour caractériser la variabilité du débit naturel d'un cours d'eau (Richter *et al.*, 1996, 1997, 1998). Elle identifie les objectifs annuels de gestion en se basant sur une étude statistique complète des caractéristiques du débit qui sont pertinentes d'un point de vue écologique. A cette fin, elle détermine d'abord un ensemble de 33 paramètres hydrologiques de statistique descriptive et élabore ensuite une méthode de gestion. La méthode IHA/RVA fournit une manière plus quantitative pour évaluer le degré d'altération et permet d'enregistrer les effets de la gestion du cours d'eau sur son écologie, des informations servant à redéfinir de nouveaux objectifs et règles de gestion. Les applications actuelles de la méthode IHA/RVA dans le monde montrent des degrés élevés de modification à des endroits en aval des structures de contrôle hydrauliques (Yang *et al.*, 2008).

L'analyse du régime hydrologique et de la détermination du débit écologique raisonnable sont des éléments clés en matière de gestion des ressources en eau. Pour étudier l'influence du barrage de Manantali sur l'altération hydrologique du régime du fleuve Sénégal, cet article s'est fixé comme objectif d'analyser la variabilité temporelle du régime hydrologique à travers les paramètres hydrologiques du fleuve, et de quantifier l'altération hydrologique associée à l'exploitation du barrage à travers une comparaison des régimes hydrologiques de périodes de part et d'autre de la mise en eau du barrage.

2. LA ZONE D'ÉTUDE

Le fleuve Sénégal, long de quelques 1700 km, draine un bassin de 300 000 km², répandu sur quatre pays que sont, d'amont en aval, la Guinée, le Mali, le Sénégal et la Mauritanie. 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 la Bafing, la Bakoye et la Falémé. Ces trois affluents prennent leurs sources en Guinée et forment le haut bassin (Michel, 1973) qui produit plus de 80% des apports du fleuve à Bakel. Le fleuve Sénégal ainsi formé par la jonction entre le Bafing et le Bakoye, reçoit la Kolimbiné puis le Karokoro sur la droite et la Falémé sur la gauche, à 50 km en amont de Bakel (Rochette, 1974). Le bassin est généralement découpé en trois entités: le haut bassin, la vallée et le delta.

Le bassin versant du fleuve Sénégal est un hydrosystème du domaine tropical humide dans sa partie sud et sec dans sa partie nord dont les altitudes varient de 15 m (Bakel: cours médian) à 1330 m (Fouta Djallon) pour une altitude moyenne environ 672 m. Dans le bassin en amont du Sénégal et du Mali, les hauteurs de précipitations sont élevées (> 1800 mm / an à Mamou), les pentes fortes et les roches dans l'ensemble peu perméables. La partie aval et septentrionale (zone de Bakel), est orientée vers le nord, puis l'ouest. Elle présente des pentes (indice de pente = 0,022%) et des altitudes (altitude maximale = 15 m environ) peu importantes. Les précipitations y sont faibles (≈ 500 mm à Bakel) (Michel, 1973; Rochette, 1974; Faye, 2014).

Le barrage de Manantali est situé sur la rivière Bafing, principal affluent du fleuve Sénégal, à 90 km en amont de Bafoulabé (Fig. 1). Construit entre 1982 et 1988, le barrage de Manantali est constitué d'une digue de 1 460 m de long et a une hauteur de 66 m à la fondation. A la cote de remplissage 208 mètres IGN, sa retenue a une capacité de 11,3 milliards de m^3 et couvre une superficie de 477 km^2 (Office International de l'Eau, 2009). A son niveau minimum d'exploitation (187 m IGN), la retenue a un volume de 3,4 milliards de m^3 et couvre une superficie de 275 km^2 . Le barrage de Manantali régularise le débit du fleuve Sénégal et permet d'irriguer un potentiel de 255 000 ha de terres et à terme, devra permettre la navigabilité du fleuve sur environ 800 km à partir de l'embouchure. La gestion du barrage entre les Etats riverains du fleuve Sénégal s'effectue de façon concertée dans un cadre régional de coopération sous la tutelle de l'Organisation pour la Mise en valeur du Fleuve Sénégal (OMVS) dont la construction de ce barrage de Manantali est sans doute l'une de ses plus grandes réalisations.

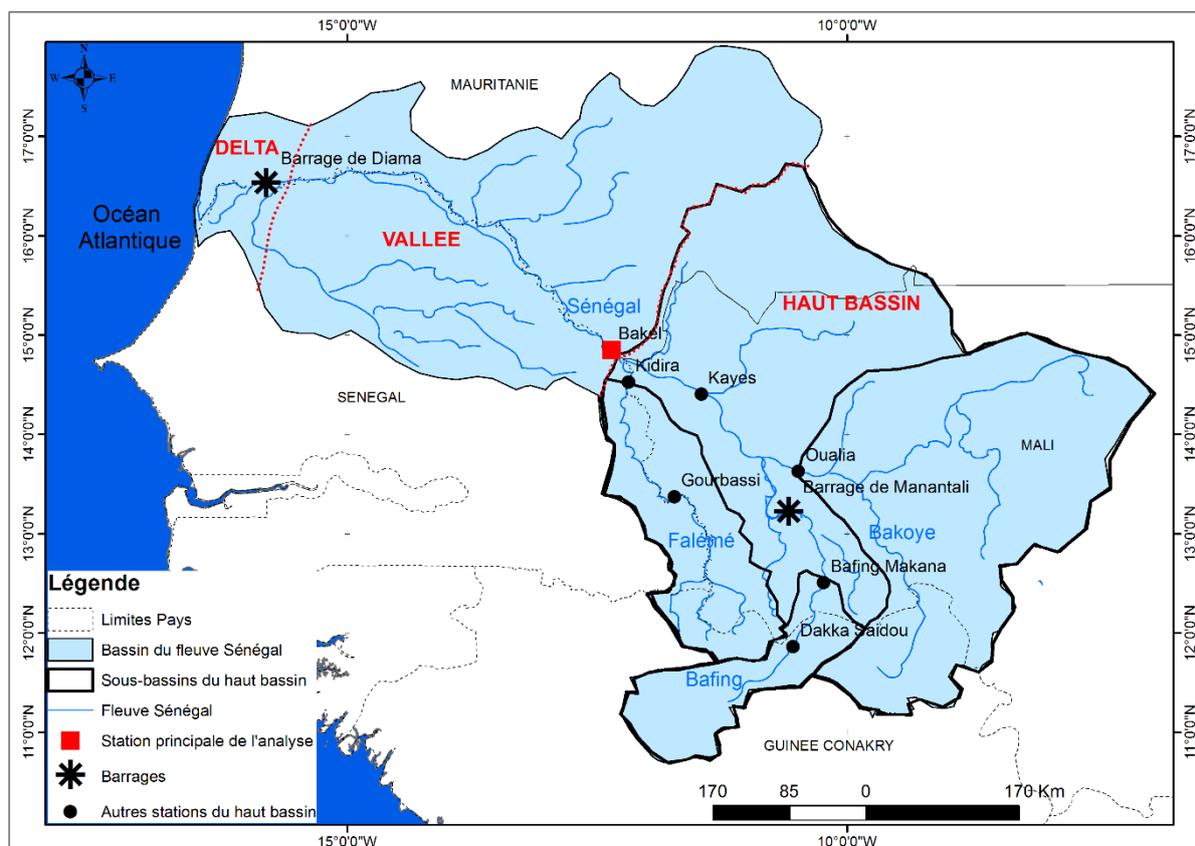


Fig. 1 – Localisation du bassin versant du Sénégal, du barrage de Manantali et de la station hydrométrique de Bakel

Durant les années '70-'80, les effets des changements climatiques et de la sécheresse ont entraîné une modification du régime hydrologique du bassin (Sow, 2007; Faye, 2017; Faye *et al.*, 2015). Pour y remédier, un ensemble d'aménagements, les deux barrages de Diama et de Manantali notamment, sont mis en place et ont transformé totalement la dynamique hydrologique du bassin du fleuve Sénégal (Faye, 2018; 2019). La station hydrologique de Bakel qui contrôle le haut bassin et dont les débits sont influencés par l'exploitation du barrage de Manantali, est utilisée, compte tenu de la disponibilité des données hydrologiques, pour étudier l'influence du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du fleuve Sénégal. La localisation de la zone d'étude, du barrage de Manantali et de la station hydrologique de Bakel est faite sur la Figure 1.

3. DONNÉES ET MÉTHODES

3.1. Données

Les données de débits journaliers ont été utilisées pour analyser la variation du régime hydrologique du haut bassin du fleuve Sénégal avec la méthode IHA / RVA. Ces données journalières observées ont été mises à notre disposition par l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS). Ces données couvrent la période 1951–2014.

3.2. La méthode de subdivision de la série en sous-périodes

Dans cet article, l'écoulement fluvial de la période 1951–2014 a été divisé en séries. Pour cette division, on a procédé à priori par recenser la date de mise en eau du barrage, qui est de 1988, ce qui nous a permis de subdiviser dans un premier temps la série en deux parties ou sous-périodes:

- La première sous-période va de 1951 (début de la série) à la date de la mise en eau du barrage en 1988 (1951–1988). Cette période d'avant barrage est dite la période pré-impact du barrage;
- La deuxième sous-période va de 1988 (date de mise en eau du barrage) à la fin de la série en 2014 (1988–2014). Cette période d'après barrage est dite la période post-impact du barrage.

Après, on a procédé à une visualisation graphique et sur la série de la première sous-période ou période pré-impact du barrage (1951–1988), la représentation graphique des débits ~~écoulés~~ et de leurs indices standardisés ~~des débits~~ (Fig. 2) a permis de constater encore deux phases plus ou moins opposées:

- La première phase est caractérisée par un excédent hydrologique (les indices étant généralement positifs) et va de 1951 (début de la série) au début des années 1970 (1951–1970). Il s'agit d'une phase où l'écoulement est dans des conditions naturelles humides;
- Une deuxième phase caractérisée par un déficit hydrologique (les indices étant tous négatifs) et qui va du début des années 1970 à la date de la mise en eau du barrage en 1988 (1970–1988). Il s'agit d'une phase où l'écoulement est dans des conditions naturelles sèches.

Partant de ces différentes divisions, le débit liquide de la période 1951–2014 a été divisé en trois séries dont deux sur la période pré-impact du barrage (1951–1970 et 1970–1988 représentant respectivement l'écoulement dans des conditions naturelles humides et sèches) et une sur la période post-impact du barrage (1988–2014) dans des conditions contrôlées. Sur ces deux périodes pré-impact et post-impact, les caractéristiques du régime hydrologique ont été examinées à l'aide de la méthode IHA / RVA.

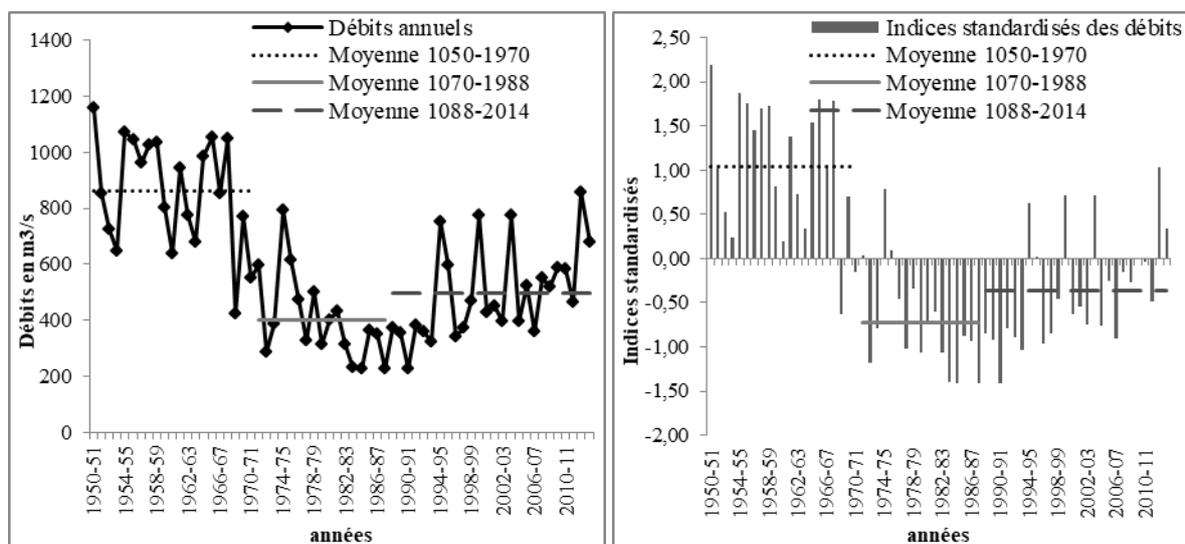


Fig. 2 – Variation des débits écoulés et des indices standardisés des débits à Bakel de 1951 à 2014.

3.3. La méthode IHA / RVA

La méthode IHA (Indicators of hydrologic alteration) établi par The « *Nature Conservancy* » (Richter *et al.*, 1996) a été utilisée pour évaluer les caractéristiques hydrologiques principales affectées à l'aval des barrages (Magilligan et Nislow, 2005) et l'altération de régime hydrologique des cours d'eau. Ce modèle utilise des débits moyens journaliers et calcule 33 paramètres hydrologiques écologiquement pertinentes qui décrivent le régime hydrologique et qui sont groupés en 5 catégories (Richter *et al.*, 1998): (i) amplitude, (ii) amplitude et durée des conditions extrêmes annuelles, (iii) périodicité (Timing) de ces conditions extrêmes annuelles, (iv) fréquence et durée des pulsations fortes et faibles, (v) taux et fréquences des variations de débits (Tableau 1). Tous ces indices mesurés par l'IHA ont été définis pour prendre en compte la plupart des perturbations hydrologiques correspondant à des impacts écologiques potentiels relevant des barrages (Erskine *et al.*, 1999).

Tableau 1

Résumé des 33 paramètres de l'IHA et de leurs significativité hydrologique (Richter *et al.*, 1998)

Catégories	Groupes de paramètres IHA	Paramètres hydrologiques
(i) Amplitude	1. Ampleur des conditions d'eau mensuelles (1 paramètre)	Valeur moyenne ou médiane pour chaque mois
(ii) Amplitude et durée des conditions extrêmes annuelles	2. Ampleur et durée des conditions d'eau extrêmes annuelles (12 paramètres au total)	Minimums annuels, moyenne sur 1 jour
		Minimums annuels, moyenne sur 3 jours
		Minimums annuels, moyenne de 7 jours
		Minimums annuels, moyenne de 30 jours
		Minimums annuels, moyenne de 90 jours
		Maxima annuel, moyenne sur 1 jour
		Maxima annuel, moyenne de 3 jours
		Maxima annuel, moyenne de 7 jours
		Maxima annuel, moyenne de 30 jours
		Maxima annuel, moyenne de 90 jours
		Nombre de jours à débit nul
		Indice de débit de base: débit minimum sur 7 jours / débit moyen pour l'année

Tableau 1 (continue)

(iii) Périodicité de ces conditions extrêmes annuelles	3. Timing des conditions d'eau extrêmes annuelles (2 paramètres au total)	Date julienne de chaque année 1 jour maximum
		Date julienne de chaque année 1 jour minimum
(iv) Fréquence et durée des pulsations fortes et faibles	4. Fréquence et durée des impulsions haute et basse (4 paramètres au total)	Nombre d'impulsions faibles dans chaque année hydrologique
		Durée moyenne ou médiane des impulsions faibles (jours)
		Nombre d'impulsions élevées dans chaque année hydrologique
		Durée moyenne ou médiane des impulsions élevées (jours)
(v) Taux et fréquences des variations de débits	5. Taux et fréquence des changements d'état de l'eau (2 paramètres au total)	Hausse des taux: Moyenne ou médiane de toutes les différences positives entre les valeurs quotidiennes consécutives
		Taux de chute: Moyenne ou médiane de toutes les différences négatives entre les valeurs quotidiennes consécutives
		Nombre d'inversions hydrologiques

La méthode IHA comporte quatre étapes: (1) définir la série de données pour des périodes pré- et post-impact; (2) calculer les valeurs des attributs hydrologiques; (3) calculer les statistiques interannuelles; (4) calculer les valeurs de l'IHA. Sur la base de l'IHA, la méthode RVA (Range of Variability Approach) peut être utilisée pour évaluer les effets de l'exploitation des barrages sur le régime hydrologique d'un cours d'eau. La méthode nécessite d'avoir des données de débits sur environ vingt ans, avant et après modification du régime hydrologique du cours d'eau.

Les mesures des tendances générales et de la dispersion des débits sont tirées des séries annuelles pour chacun des paramètres étudiés et sont utilisées pour caractériser les variations interannuelles. Un objectif est choisi pour chacun des paramètres. Le principe demande que la rivière soit gérée de telle sorte que les valeurs annuelles de chaque paramètre IHA soient incluses dans la gamme des variations naturelles de ce paramètre. Donc, les objectifs de gestion pour chacun des paramètres sont donnés dans une gamme de valeurs RVA acceptables (Richter *et al.*, 1997), des objectifs de gestion définie par les 25^e et 75^e percentile du paramètre à seulement 50% d'années (Richter *et al.*, 1997). Le degré de l'altération hydrologique, exprimée en pourcentage, peut être calculé comme suit:

$$\frac{\text{Fréquence observée} - \text{Fréquence attendue}}{\text{fréquence attendue}} \times 100$$

L'altération hydrologique est égale à zéro lorsque la fréquence observée des valeurs annuelles post-barrage comprises dans la gamme RVA est égale à la fréquence attendue. Un écart positif indique que les valeurs des paramètres annuels sont tombées plus souvent que prévu dans la gamme de la RVA; les valeurs négatives indiquent que les valeurs annuelles sont tombées moins souvent que prévu dans la gamme de la RVA (Yang *et al.*, 2008). Pour quantifier cette altération hydrologique, Richter *et al.* (1998) ont divisé les gammes d'altération en trois classes de gamme égale: (i) 0%–33% (L) représente peu ou pas d'altération; (ii) 34%–67% (M) représente une altération modérée; (iii) 68%–100% (H) représente un haut degré d'altération.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Premièrement, la valeur moyenne des 33 paramètres hydrologiques dans les séries de données de débits pré-impact du barrage de Manantali sur la période humide (1951–1970) et sur la période sèche (1970–1988) a été calculée, de même que la gamme d'approche de la variabilité de ces paramètres. Ensuite, la valeur moyenne des mêmes paramètres hydrologiques dans la série de débits après l'impact du barrage a été calculée. Dans le but de comparer chacune des deux séries (humide et sèche) de la période pré-impact du barrage de Manantali avec celle de la période post-impact, les différences entre les deux périodes ont été aussi calculées. Enfin, en utilisant les valeurs du 25^e et 75^e percentile des paramètres pré-impact, comme cibles éco-hydrologiques, le degré de déviation des paramètres post-impact par rapport aux paramètres avant l'impact (ou degré d'altération hydrologique) a été calculé (Tableau 2).

Tableau 2

Niveau d'altération des 33 paramètres hydrologiques entre les périodes humide (1951–1970) et sèche (1970–1988) par rapport à la période après impact du barrage (1988–2014)

Paramètres hydrologiques	Situation 1 (entre 1951–1970 et 1988–2014)					Situation 2 (entre 1970–1988 et 1988–2014)				
	Valeurs moyennes				Degré d'altération (%)	Valeurs moyennes				Degré d'altération (%)
	1951–1970	1988–2014	Ecart moyen	Ecart en %		1970–1988	1988–2014	Ecart moyen	Ecart en %	
Groupe 1 IHA										
Mai	134,8	161,7	26,9	17	34,6 (M)	8,434	161,7	153,3	95	4,4 (L)
Juin	223,8	224	0,2	0,08	-51,9 (M)	123,1	224	100,9	45	14,8 (L)
Juillet	614,9	419,3	-195,6	-47	-51,9 (M)	378,3	419,3	41	10	25,3 (L)
Août	2083	1031	-1052	-102	-71,2 (H)	1455	1031	-424,0	-41	14,8 (L)
Septembre	3385	1828	-1557	-85	-80,8 (H)	1649	1828	179,0	10	-26,9 (L)
Octobre	1714	683,9	-1030	-151	-90,4 (H)	673,3	683,9	10,6	2	-16,5 (L)
Novembre	620	307,8	-312	-101	-90,4 (H)	284,9	307,8	22,9	7	-79,1 (H)
Décembre	325,2	182,6	-142	-78	-80,8 (H)	128,9	182,6	53,7	29	-68,7 (H)
Janvier	205,9	149,1	-56,8	-38	-51,9 (M)	95,78	149,1	53,3	36	-47,8 (M)
Février	133,2	159,2	26,0	16	-23,1 (H)	72,75	159,2	86,5	54	-58,2 (M)
Mars	95,22	176,6	81,4	46	-100 (H)	47,65	176,6	129	73	-79,1 (H)
Avril	83,23	173,5	90,3	52	-13,5 (L)	29,87	173,5	143,6	83	-68,7 (H)
Groupe 2 IHA										
Minimum 1 jour	31,45	116,5	85,1	73	-100 (H)	0	116,5	116,5	100	-100 (H)
Maximum 1 jour	5474	2887	-2587	-90	-90,4 (H)	2578	2887	309	11	-6,0 (L)
Minimum 3 jour	32,17	117,9	85,7	73	-100 (H)	0	117,9	117,9	100	-100 (H)
Maximum 3 jour	5427	2858	-2569	-90	-90,4 (H)	2515	2858	343	12	-26,9 (L)
Minimum 7 jour	33,6	120	86,4	72	-100 (H)	0	120	120	100	-100 (H)
Maximum 7 jour	5208	2729	-2479	-91	-90,4 (H)	2279	2729	450	16	-37,4 (M)
Minimum 30 jour	52,82	123,8	71,0	57	-90,4 (H)	1,827	123,8	122	99	-100 (L)
Maximum 30 jour	4160	2020	-2140	-106	-100 (H)	1839	2020	181	9	-37,4 (M)
Minimum 90 jour	106,2	143,4	37,2	26	-51,9 (M)	46,6	143,4	96,8	68	-89,6 (H)
Maximum 90 jour	2668	1232	-1436	-117	-90,4 (H)	1304	1232	-72,0	-6	-6,0 (L)
Indice de débit de base	0,04	0,24	0,2	534	-100 (H)	0	0,24	0,24	100	-100 (H)
Jours à Zéro-débit	0	0	0,0		5,26 (L)	13	0	-13,0		46,2 (M)
Groupe 3 IHA										
Date julienne du maximum annuel	257 ^{er}	248 ^{er}	-9	-3,31	-32,7 (L)	250 ^{er}	248 ^{er}	-5	-1	67 (M)
Date julienne minimum annuel	121 ^{er}	117 ^{er}	-4	-2,89	-65,8 (M)	131 ^{er}	117 ^{er}	-14	-11	-78,1 (H)
Groupe 4 IHA										
Nombre de fortes impulsions	1	1,5	0,5	50	-47,4 (M)	1	1,5	0,50	33	-31,0 (L)
Nombre de faibles impulsions	1	1	0	0	-15,0 (L)	1	1	0	0	-88,8 (H)
Durée de fortes impulsions	86	28	-58	-67,1	-51,9 (M)	81	28	-53	-184	-26,9 (L)
Durée de faibles impulsions	101	55	-46,0	-45,5	-80,8 (H)	126	55	-71	-129	-85,4 (H)
Groupe 5 IHA										
Taux de montée	5,43	2,82	-2,6	-48,0	-42,3 (M)	6,11	2,82	-3,29	-116	100 (H)
Taux de descente	-4,06	-4,12	-0,1	1,6	-32,7 (L)	-1,78	-4,12	-2,34	57	-47,8 (M)
Nombre de reprises	18	21,5	3,5	19,4	-35,9 (M)	15	21,5	6,50	30	-16,5 (L)

4.1. Influence sur le régime hydrologique

Pour les paramètres des différents groupes, la situation 1 (rapport entre période post-impact: 1988–2014 et période humide pré-impact: 1951–1970) est plus ou moins opposée à la situation 2 (rapport entre période post-impact: 1988–2014 et période sèche pré-impact: 1970–1988).

4.1.1. Paramètres du groupe 1

Les paramètres du groupe 1 décrivent l'ampleur des changements du débit mensuel dans les situations 1 et 2.

Dans la situation 1 (rapport entre période post-impact et période humide pré-impact), l'altération hydrologique est en faveur d'une baisse des débits sur tous les mois, à l'exception du mois de mai. En effet, 50% des mois (août à décembre, mars) ont enregistré un haut degré d'altération hydrologique. Le mois de mars enregistre le degré d'altération maximal avec 100% et le mois de septembre, le mois du débit maximum sur la série, a une altération de 80,8% (Fig. 3). L'altération hydrologique positive pour le mois de mai et négative pour les mois de juin, juillet et janvier est modérée. Seule les mois de février et d'avril ont connu une altération faible à nulle. Les débits moyens mensuels pendant la période post-impact indiquent une tendance à la baisse du mois de juillet au mois de janvier. Le taux de diminution pendant la période post-impact s'étend de 38% à 151%. En revanche, du mois de février au mois de juin, les écarts sont positifs. Les écarts positifs sur les mois de basses eaux et négatifs sur les mois de hautes eaux résultent de la gestion du barrage de Manantali, notamment avec l'action de laminage des crues et de soutien des débits faibles (Sambou *et al.*, 2009). Néanmoins, des écarts positifs notés sur des mois de hautes eaux résulteraient du changement climatique et son corollaire le déficit hydrologique (Faye *et al.*, 2015).

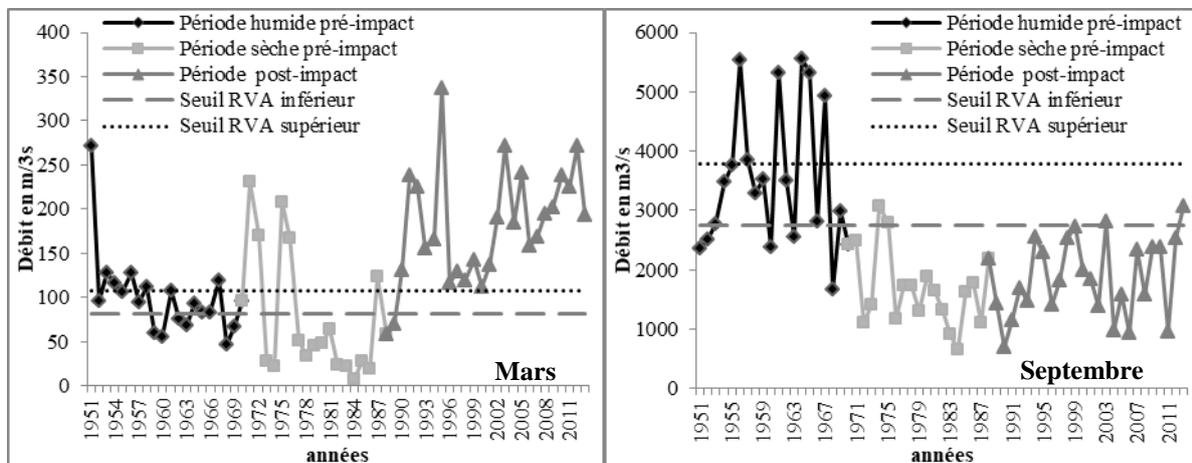


Fig. 3 – Variation des débits du mois de mars et de septembre sur les périodes pré-impact et post-impact.

Dans la situation 2 (rapport entre période post-impact et période sèche pré-impact), le degré d'altération hydrologique est plus variable comparée à la situation 1. En effet, l'altération est positive de mai à août et négative de septembre à avril. En plus, elle est généralement faible à nulle (de mai à octobre), modérée en janvier et février, et élevée sur le reste de l'année. L'altération maximale est notée aux mois de novembre et de mars avec 79,1%. Au-delà du mois d'août, les écarts sont positifs sur les 11 mois et indiquent une tendance à la hausse de l'écoulement dans le bassin comparé avec celle de la période pré-impact. Cela s'explique par les lâchers du barrage qui viennent soutenir, dans un contexte de sécheresse et de déficit hydrologique, les faibles débits du fleuve. De façon générale,

les fluctuations de débits mensuels sur les deux situations sont moins importantes dans la période post-impact en raison du laminage des crues et du soutien des étiages.

4.1.2. Paramètres des groupes 2, 3 et 4

Des événements extrêmes ont été caractérisés par des minima et les maxima de débits, des jours de zéro-débit, de l'indice de débit de base, de la date julienne du maximum et du minimum annuel, du nombre et de la durée des impulsions fortes et faibles, du taux de montée et de descente. Ces paramètres sont donnés dans les groupes 2, 3 et 4 du Tableau 2 et indiquent un caractère plus ou moins homogène entre les 2 situations, contrairement au groupe 1.

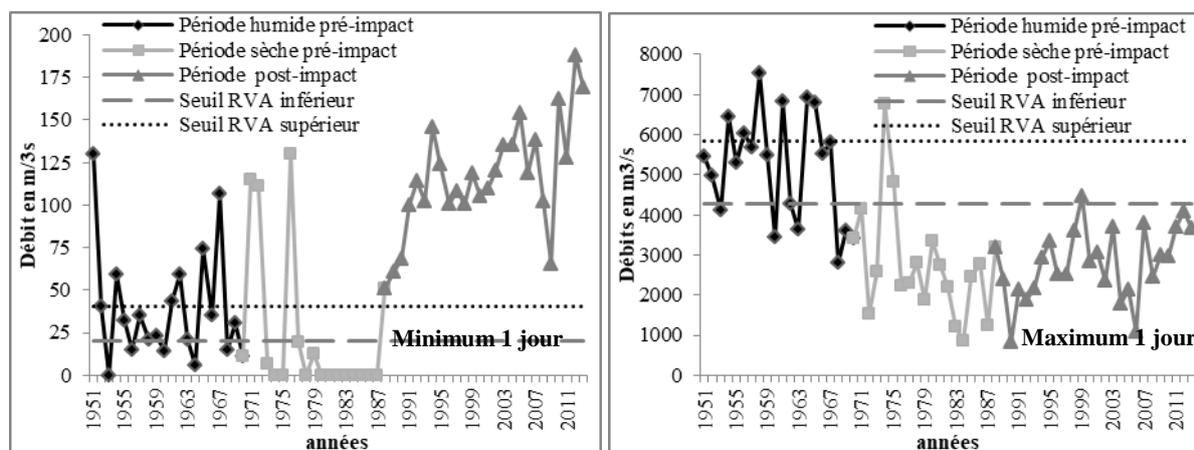


Fig. 4 – Variation des débits maximaux et minimaux de 1 jour sur les périodes pré-impact et post-impact.

Les débits moyens minimaux annuels de 1, 3, 7, 30 et 90 jours connaissent une diminution maximale de manière significative entre les deux périodes sur la situation 1 et une augmentation sur la période 2. Sur la situation 1, les valeurs de débits maximaux de la période post-impact (1988–2014) étaient plus petites que celle de la période pré-impact (1951–1970), contrairement aux valeurs de débits minimaux (Fig. 4). Sur la situation 2, seul le débit maximum 90 jours a une valeur pré-impact supérieure à celle post-impact. Par rapport à l'altération hydrologique sur la situation 1, les débits annuels minimaux comme maximaux ont des catégories IHA élevées (entre 99,4% et 100%). Seul le débit annuel maximum de 90 jours a un degré moyen (-51,9%). En revanche sur la situation 2, seules les débits minimaux enregistrent des degrés élevés, alors que sur les débits maximaux, les altérations peuvent être faibles à nulles.

Quant aux jours zéro-débit (susceptible d'entraîner une mortalité importante des organismes aquatiques, de menacer, d'altérer la qualité écologique et la continuité sur le long terme), ils sont nuls sur la situation 1. Cela est tout à fait logique car la période pré-impact (1951–1970) était bien humide avec un écoulement permanent et la période post-impact, avec le barrage, a connu un soutien des débits faibles. Pour la situation 2, les jours zéro-débit ont considérablement diminué entre les périodes pré-impact (13 cas) et post-impact (0 cas). Cette disparition des jours zéro-débit est très bénéfique pour les écosystèmes aquatiques et s'explique par le soutien des débits faibles par le barrage. Les résultats des deux situations indiquent que les débits maximaux et minimaux quotidiens, hebdomadaires, mensuels et trimestriels sont influencés tantôt négativement, tantôt positivement par le barrage et sa gestion.

Généralement, la date julienne moyenne de chaque maximum annuel de 1 jour et de chaque minimum annuel de 1 jour sur la période post-impact était arrivée plus tôt que celle avant l'impact du

barrage. La date julienne moyenne du maximum annuel de 1 jour passe du 257^e jour sur la période pré-impact au 248^e jour sur la période post-impact sur la situation 1 (soit une baisse de 9 jours), et du 250^e jour sur la période pré-impact au 248^e jour sur la période post-impact sur la situation 2 (soit une baisse de 5 jours). De même, pour la date julienne moyenne du minimum annuel de 1 jour (Fig. 5), la date se déplace toujours dans le même sens, du 121^e jour (pré-impact) au 117^e jour (post-impact) sur la situation 1 (soit une baisse de 4 jours), et du 131^e jour (pré-impact) au 117^e jour (post-impact) sur la situation 2 (soit une baisse de 11 jours).

Le nombre moyen de fortes et de faibles impulsions sur la période pré-impact est le même sur la période humide (1951–1970) et la période sèche (1970–1988). Il en est de même pour le nombre moyen de faibles impulsions sur la période post-impact (1988–2014), la valeur étant égale à 1. En revanche, le nombre moyen de fortes impulsions sur la période post-impact (avec une valeur de 1,5) a été supérieur à celui de la période antérieure à l'impact. Pour les fortes et faibles impulsions, une forte baisse de la durée est notée entre la période post-impact et celle pré-impact humide ou sèche (Fig. 5). Sur la situation 1 par exemple, la durée de fortes impulsions est de 86 jours sur la période antérieure à l'impact et de 28 jours sur la période post-impact. Sur la situation 2, la durée de faibles impulsions est de 126 jours sur la période antérieure à l'impact et de 55 jours sur la période post-impact.

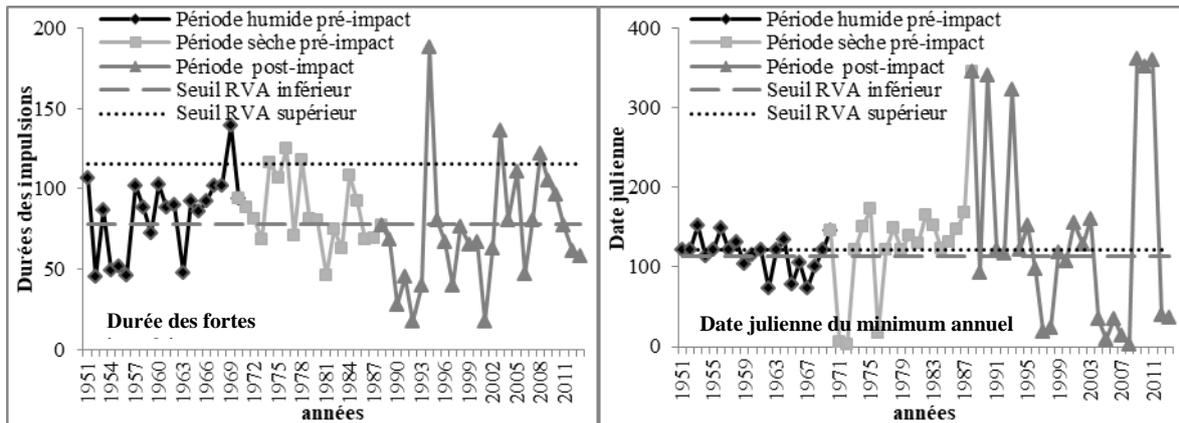


Fig. 5 – Variation de la durée des fortes impulsions et de la date julienne du minimum annuel sur les périodes pré-impact et post-impact.

Enfin, les taux moyens de montée et de descente sont généralement plus faibles sur la période post-impact (1988–2014) que sur la période pré-impact humide (1951–1970) comme sèche (1970–1988), contrairement au nombre de reprises dont la valeur augmente. Le taux de diminution des taux moyens de montée et de descente est respectivement de 48% et 1,6% entre les périodes pré-impact humide et post-impact. En revanche, entre les périodes pré-impact sèche et post-impact, le taux moyen de descente connaît une augmentation de 57%. Cette même augmentation est notée sur le nombre de reprises quelle que soit la situation considérée, le taux d'augmentation étant de 19,4% et de 30% respectivement sur la situation 1 et sur la situation 2.

4.2. Degré d'altération hydrologique

Comme le montre le Tableau 2, les 33^e et 67^e percentiles ont été calculés pour les 33 indicateurs d'altération hydrologique et considérés comme les limites inférieure et supérieure de la gamme de variabilité cible de la RVA pour la station de Bakel. Les seuils de la gamme RVA des situations 1 (entre 1951–1970 et 1988–2014) et 2 (entre 1970–1988 et 1988–2014) sont donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3

Seuils de la gamme RVA entre 1951–1970 et 1988–2014 et entre 1970–1988 et 1988–2014

Entre 1951–1970 et 1988–2014	Seuil	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A
	Inférieur	95	194	514	1660	2750	1342	530	271	178	113	82	53
	Supérieur	191	260	751	2472	3777	2077	716	355	223	144	108	137
Entre 1970–1988 et 1988–2014	Seuil	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A
	Inférieur	4	8	291	1006	1307	605	245	123	92	47	28	16
	Supérieur	149	202	429	1582	1813	788	304	177	109	117	90	101

Entre la période post-impact (1988–2014) et celle pré-impact humide (1951–1970), les résultats montrent que le taux de chute au premier rang de toutes les valeurs d'altérations hydrologiques est maximal (100%) au mois de novembre, au minimum de 1, 3 et 7 jours, au maximum de 30 jours et au débit de base. Ils sont suivis de très près par les mois de juin et juillet, le maximum de 1, 3, 7 et 90 jours et le minimum de 30 jours dont les degrés d'altérations sont supérieurs à 90%. D'autres paramètres tels que les mois de septembre et de décembre, et la durée de faibles impulsions enregistrent des degrés d'écart dépassant 67 %, donc élevés. Les paramètres restants, bien que censés être fortement affectés par la construction et l'exploitation du barrage en amont, sont moins altérés, les valeurs étant soit modérées (comme pour les mois de mai, juin, juillet et janvier, la date julienne du minimum annuel, le nombre et la durée de fortes impulsions, le minimum 90 jours, le taux de montée et le nombre de reprises), soit faibles à nulles (pour les paramètres restants comme le taux de descente, la date julienne du maximum annuel, les mois de février et d'avril). Dans la réglementation pratique (Tableau 3), les objectifs doivent être gardés de 514 à 3777 m³/s pour l'ampleur du débit mensuel de la période de hautes eaux (juillet à novembre) et avec des gammes de cibles semblables de 53 à 355 m³/s pour les sept mois restants (décembre à juin).

Entre la période post-impact (1988–2014) et celle pré-impact sèche (1970–1988), les résultats montrent que seuls les débits moyens minimaux annuels de 1, 3, 7 et 30 jours, le débit de base et le taux de montée connaissent des degrés d'altération maximale de 100%, suivis des débits minimaux de 90 jours, du nombre et de la durée de faibles impulsions, des mois de novembre, décembre et avril dont l'altération est toujours élevée. La classe modérée de l'altération est notée sur des mois comme janvier et février, des débits moyens maximaux annuels de 7 et 30 jours, la date julienne du maximum annuel, le taux de descente. Quant aux valeurs les plus faibles, elles sont notables aux mois de mai à octobre, aux débits moyens maximaux annuels de 1, 3, 30 et 90 jours, au nombre et à la durée de fortes impulsions, au nombre de reprises. Dans la réglementation pratique (Tableau 3), les objectifs doivent être gardées de 245 à 1813 m³/s pour la période de hautes eaux (juillet à novembre) et de 4 à 202 m³/s pour la période de basses eaux (décembre à juin).

5. CONCLUSIONS

Dans cet article, les valeurs de débits quotidiens de la station hydrologique de Bakel de 1951 à 2014 ont été choisies pour étudier l'influence du barrage de Manantali sur l'altération du régime hydrologique du bassin du fleuve Sénégal. Trois séries chronologiques (deux sur la période avant l'impact et une sur la période après l'impact) ont été considérées. Les principales conclusions peuvent être données comme suit:

- Le modèle de distribution annuelle des débits écoulés était en train de changer au cours de la période allant de 1951 à 2014. Le barrage affecte profondément les conditions hydrologiques du fleuve Sénégal. Sa gestion a entraîné une réduction des débits de pointe annuels, la diminution de la gamme de débits maximaux journaliers, l'augmentation de la gamme de débits minimaux journaliers et du nombre de reprises, la modification du calendrier des

périodes de hautes et de basses eaux, le changement du calendrier des débits minimaux et maximaux annuels.

- En comparant la période post-impact avec celle de la période antérieure à l'impact (humide comme sèche), les caractéristiques hydrologiques ont indiqué des changements évidents. L'ampleur de l'écoulement était plus faible en période de crue (avec l'écêtement des crues du barrage) et plus élevée en période d'étiage (soutien des débits faibles). La fréquence des événements de faibles débits a diminué sur tous les mois de basses eaux. Tous les débits maximaux et les débits minimums pour 1 jour, 3 jours, 7 jours, 30 jours et 90 jours ont présenté une tendance à la hausse par rapport à la période sèche pré-impact, alors que rapport à la période humide pré-impact, seuls les débits minimums de la période post-impact ont connu cette tendance à la hausse. La durée des fortes et des faibles impulsions ont une tendance à la baisse entre la période pré-impact (sèche ou humide) et celle post-impact.
- L'altération du régime hydrologique est particulièrement importante pour les débits mensuels ainsi que pour les débits minimaux. Ces débits mensuels sont beaucoup plus faibles, en saison pluvieuse, et beaucoup plus élevées, en saison sèche, que les débits qu'on devrait normalement observer sans altération. En effet, la présence d'un barrage en amont du cours d'eau entraîne une diminution généralisée des débits en période de crue (écêtement des crues) et une augmentation des débits en période d'étiage (soutien des faibles débits).

La modification du régime d'écoulement peut apporter des menaces sérieuses pesant sur les espèces sauvages et par conséquent entraîner des effets écologiques indésirables. Par conséquent, il est nécessaire d'approfondir les réponses de l'étude de l'altération hydrologique du régime résultant du barrage de Manantali.

RÉFÉRENCES

- Erskine, W., Terrazzolo, N., Warner, R.F. (1999), *River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of a large hydro-electric power project: Snowy River*, Australia. Regulated Rivers, Research and Management, **15**, pp. 3–24.
- Faye, C. (2018), *Weight of transformations and major drifts related to major river water projects in Africa: case of the Manantali dam on the Senegal river basin*. Journal of Research in Forestry, Wildlife & Environment, **10**(3), pp. 13–24.
- Faye, C. (2019), *Changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal: caractères et impacts, parties prenantes et acteurs, valorisation de l'eau et gestion*. Edilivre, 172 p.
- Faye, C. (2017), *Variabilité et tendances observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé (Sénégal)*, Hydrological Sciences Journal – Journal des sciences hydrologiques, **62**(2), pp. 259–269.
- Faye, C. (2014), *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., 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.
- Hirtt, L. (2009.), *Méthodologie intégrée de détermination du débit réservé: application au cas du Crupet*, Mémoire, 103 p.
- Junk, W.J. (1997), *The central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system*, Springer, Berlin, New York, Ecological Studies, **126**, 525 p.
- Kummu, M., Varis, O. (2007), *Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River*, Geomorphology, **85**, pp. 275–293.
- Magalligan, F.J., Nislow, K.H. (2005), *Changes in hydrologic regime by dams*. Geomorphology, **71**, pp. 61–78.
- Michel, P. (197), *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Etude géomorphologique*. Mémoires ORSTOM n° **63**–3 tomes, 752 p.
- Office International de l'Eau (OIEau) (2009), *Développer les compétences pour mieux gérer l'eau*, Dialogue autour des grandes infrastructures – Rapport de synthèse – Etape 2. Analyse des processus de décision sur les barrages de Bui (Ghana), Manantali (Sénégal, OMVS) et Kandadji (Niger), 86 p.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C. (1997), *The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration*, Bioscienc, **47**, pp. 769–784.

- Richter, B.D. (1997), *How much water does a river need?*, *Freshwater Biology*, **37**, pp. 231–249.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., Braun, D.P. (1996), *A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems*, *Conservation Biology*, **10**, pp. 1163–1174.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. (1998), *A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network*. *Regulated Rivers: Research & Management*, **14**, pp. 329–340.
- 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.
- 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 Es lettres et sciences humaines, UCAD, FLSH, Département de Géographie, 1232 p.
- Suen, J.P. (2011), *Determining the ecological flow regime for existing reservoir operation*, *Water Resour Manage.* **25**, pp. 817–835.
- Yang, T., Zhang, Q., Chen, Y.D., Tao, X., Xu, C-y, Chen, X. (2008), *A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China*. *Hydrol. Process.*, **22**, pp. 3829–3843.
- Yan, Y., Yang, Z., Liu, Q., Sun, T. (2010), *Assessing effects of dam operation on flow regimes in the lower Yellow River*, *Procedia Environmental Sciences*, **2**, pp. 507–516.
- Yang, Z.F., Yan, Y., Liu, Q. (2012), *Assessment of the flow regime alterations in the Lower Yellow River, China*, *Ecological Informatics*, **10**, pp. 56–64.
- Zuo, Q., Liang, S. (2014), *Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA*, *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources (IAHS Publ. 368, 2015) (Proceedings RSHS14 and ICGRHWE14, Guangzhou, China, August 2014)*, pp. 275–280.

Reçu le 2 février 2018

