

**CARACTERISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES DE LA
PLUVIOMETRIE ET DE L'ÉCOULEMENT EXTREME DANS UN
CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN AFRIQUE DE
L'OUEST : L'EXEMPLE DU SENEGAL**

**SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE RAINFALL
AND FLOW EXTREME IN A CLIMATE CHANGE CONTEXT IN
WEST AFRICA : THE EXAMPLE OF SENEGAL**

FAYE Cheikh : *D^{épt} de Géographie / U.F.R. Sciences et Technologies / Univ. Assane Seck de Ziguinchor / Laboratoire de Géomatique et d'Environnement. (Sénégal). cheikh.faye@univ-zig.sn*

RESUME: Dans un contexte climatique de plus en plus perturbé par les activités anthropiques, la caractérisation des variations spatio-temporelles de la pluviométrie et de l'écoulement est indispensable pour la recherche de mesures d'adaptation des populations face aux changements climatiques. Les caractéristiques spatio-temporelles des précipitations extrêmes au Sénégal ont été analysées en utilisant les données journalières de 1950 à 2012 provenant de six stations météorologiques localisées dans trois domaines climatiques. Pour les caractéristiques spatio-temporelles de l'écoulement extrême, l'analyse est basée sur des données quotidiennes de débit de six stations d'observation dans le bassin du fleuve Sénégal pour la période d'étude de 1950/51 à 2012/13. Dix-huit indices (neuf pour les précipitations extrêmes et neuf pour l'écoulement extrême) ont été utilisés. La tendance de ces indices est étudiée avec le test de Mann-Kendal. Les résultats indiquent que les changements de l'écoulement extrême sont plus sensibles et significatifs que ceux des précipitations. La contribution des précipitations et de l'écoulement extrême respectivement sur les cumuls pluviométriques et l'écoulement a présenté une forte tendance à la baisse. En plus, la pluviométrie annuelle, l'écoulement annuel, le nombre annuel de jours de pluies et d'écoulement montrent aussi des changements significatifs à la baisse. Les caractéristiques spatiales des précipitations et de l'écoulement extrêmes sont similaires. Il est noté que les événements extrêmes des précipitations et de l'écoulement, bien que connaissant une baisse, sont survenus plus fréquemment au Sud du pays (dans le domaine Sud soudanien et dans le régime fluvial de transition) où le risque d'événements extrêmes est supérieur aux autres domaines ou régimes.

Mots clefs : changements climatiques, pluviométrie extrême, écoulement extrême, variabilité, Sénégal

ABSTRACT: In a climatic context more and more disrupted by the anthropological activities, the characterization of the spatiotemporal variations of the pluviometry and the flow is essential for the search for measures of adaptation of the populations in front of climate change. The spatiotemporal characteristics of the extreme precipitation in Senegal were analyzed by using the daily data from 1950 till 2012 resulting from six meteorological stations located in three climatic domains. For the spatiotemporal characteristics of the extreme flow, the analysis is based on daily data of flows of six survey stations in the pond of the Senegal River for the period of study from 1950-51 to 2012-13. Eighteen indices (nine for the extreme precipitation and nine for the extreme flow) were used. The trend of these indices is studied by using the test of Mann-Kendal. The results indicate that the changes of the extreme flow are more sensitive and more significant than those of the precipitation. The contribution of the extreme precipitation and the flow respectively on the pluviometric accumulations and the flow presented a strong downward trend. Besides, the annual pluviometry, the annual flow, the annual number of rainy days and flow also show significant changes in the reduction. The spatial extreme characteristics of the precipitation and the flow are similar. It is noted that the extreme events of the precipitation and the flow, although knowing a reduction, arose more frequently in the South of the country (in the domain the Sudanese South and in the river regime of transition where the risk of extreme events is upper to the other domains or the regimes).

Keywords: climate change, extreme pluviometry, extreme flow, variability, Senegal

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, le changement climatique a été l'un des sujets les plus chauds de la climatologie et de l'hydrologie. Au-delà des températures, les précipitations et l'écoulement sont considérés comme des éléments les plus importants qui peuvent directement refléter le changement climatique. Le dernier indique la tendance à une augmentation, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années, de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, de la diminution dans certaines régions de la pluviométrie en quantité et en durée, de l'accentuation des catastrophes naturelles et des phénomènes extrêmes (sécheresse, inondations, etc... (GIEC, 2014). La fréquence des événements extrêmes de précipitations et de températures a connu une hausse sous la condition du réchauffement de la planète (Croitoru *et al*, 2013). Celui-ci constitue une importante question environnementale,

sociale et économique qui menace la réalisation des objectifs du développement durable (UNEP, 2013).

Les événements extrêmes de précipitations provoquent souvent une série d'événements hydrologiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations (Xu *et al.*, 2015). Dans cette situation, les zones où la principale source de revenus économiques dépend de l'agriculture peuvent être influencées de toute évidence par les changements des précipitations et de la température (Dos Santos *et al.*, 2011 ; Radinovi'c et C'uric', 2012) et leur impact sur les ressources en eau. Depuis le début du 21^e siècle, de nombreuses études sur les précipitations extrêmes (Ford, 2014 ; Madsen *et al.*, 2014 ; Mondal et Mujumdar, 2015 ; Panthou *et al.*, 2014 ; Xu *et al.*, 2015) et sur l'écoulement (Sighomnou, 2004 ; Milly *et al.*, 2005 ; Sharma *et al.*, 2010) à l'échelle mondiale, régionale et nationale ont été faites. Ces études ont indiqué le bouleversement climatique depuis les années 1970 qui s'est traduit par une tendance générale à la baisse des débits du fleuve dans certaines régions, l'Afrique de l'Ouest notamment.

Devant la succession d'épisodes climatologiques (sécheresses et inondations) et hydrologiques (crues et étiages) extrêmes, il est fréquent d'invoquer, sous la base d'analyse des données, le changement climatique pour expliquer leur augmentation. C'est sous ce même sillage que de nombreuses études ont été faites sur divers régions et bassins versants du Sénégal (Sow, 2007 ; Bodian, 2011 ; Faye, 2013 ; Faye *et al.*, 2015 ; Faye, 2017). Les résultats de ces études ont montré la sensibilité et la vulnérabilité de ces différentes zones. Par conséquent, de nouvelles études sur les précipitations et l'écoulement extrêmes sont considérablement une nécessité dans ces régions.

L'objectif de cette étude est d'analyser les caractéristiques spatio-temporelles de la pluie et de l'écoulement extrêmes dans trois domaines climatiques du Sénégal (pour la pluviométrie) et dans le bassin versant du fleuve Sénégal (pour l'écoulement), dans un contexte de changement climatique. Les variables extrêmes sont analysées. Il y a eu peu d'études sur les caractéristiques spatio-temporelles des précipitations et de l'écoulement extrême. Il est à noter que la plupart des études climatologiques comme hydrologiques se sont concentrées sur la moyenne des précipitations et de l'écoulement.

MATERIELS ET METHODES

Description de la zone d'étude

Cette étude porte sur les caractéristiques climatiques du Sénégal et hydrologiques du bassin du fleuve Sénégal.

Le Sénégal, pays bordier de l'Atlantique nord, est situé dans l'extrême ouest du continent africain entre les longitudes 11°21 et 17°32 Ouest et les latitudes 12°8 et 16°41 Nord (Fig.1).

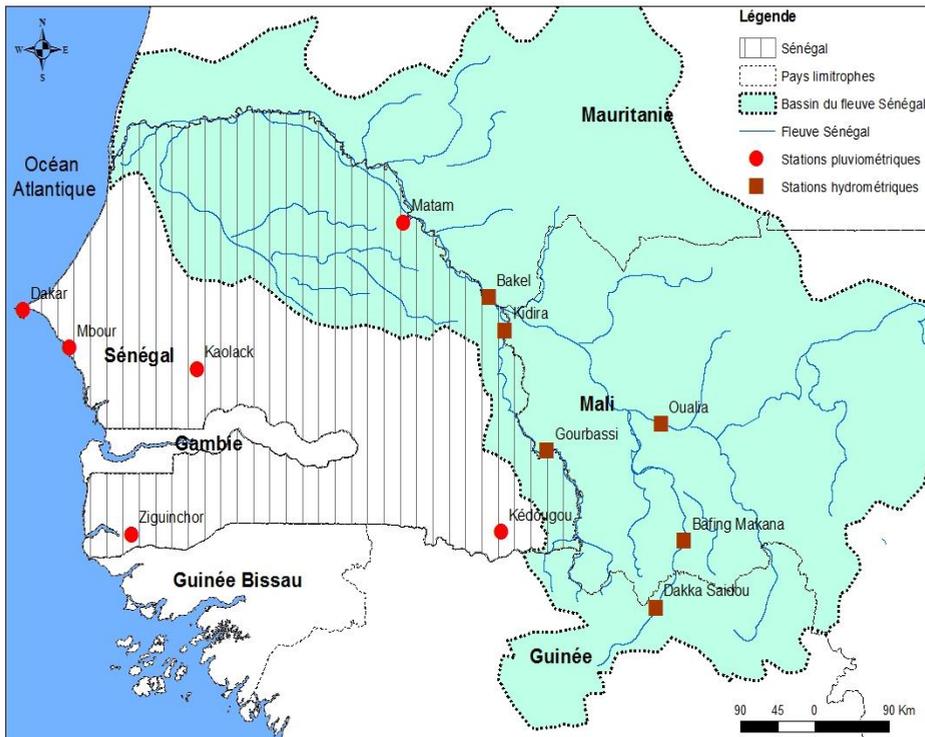


Fig.1. Distribution spatiale des stations pluviométriques et hydrométriques sur le territoire du Sénégal et dans le bassin du fleuve Sénégal

Il s'étend sur une superficie de 196 722 km². Situé dans la zone tropicale, le Sénégal a un climat soudano-sahélien avec une pluviométrie annuelle variant en moyenne entre environ 1250 mm au Sud à un peu plus de 200 mm au Nord. Ce climat est marqué par une alternance entre une saison des pluies et une saison sèche. Les grands traits climatiques du Sénégal sont le résultat conjoint de facteurs géographiques et aérologiques (Leroux, 1983 ; Sagna, 2005). Les premiers s'expriment par la latitude qui confère au territoire des caractères tropicaux, et par la position de « Finistère ouest-africain » qui détermine des conditions climatiques différentes sur le littoral et

à l'intérieur. Les seconds s'expriment par l'alternance sur le pays de trois flux dont les déplacements sont facilités par la platitude du relief. Compte tenu des variations de la pluviométrie dans l'espace et dans le temps, on distingue au Sénégal, du Sud au Nord, trois domaines climatiques que sont les domaines sud soudanien, nord soudanien et sahélien, chaque domaine connaissant deux variantes (une côtière et une continentale) (Fig.1).

Le fleuve Sénégal, long de quelques 1700 km, draine un bassin de 300 000 km², à cheval sur quatre pays que sont, d'amont en aval, la Guinée, le Mali, le Sénégal et la Mauritanie (Fig. 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. Ces trois affluents prennent leurs sources en Guinée et forment le haut bassin qui produit plus de 80% des apports du fleuve à Bakel (OMVS/Projet FEM/ BFS, 2008). Le bassin est généralement découpé en trois entités : le haut bassin, la vallée et le delta. Il est doté de deux barrages Diama et Manantali.

Le Sénégal et le bassin du fleuve Sénégal ont connu un bouleversement climatique depuis les années 1970 et sont particulièrement sensibles et vulnérables aux changements climatiques. Les caractéristiques régionales des indices climatiques et hydrologiques extrêmes des domaines climatiques du Sénégal et des sous-bassins du fleuve Sénégal sont analysées.

DESCRIPTION DES DONNEES DE LA METHODOLOGIE

Description des données

Les données de l'étude sont constituées de relevés pluviométriques et hydrologiques journalières sur 63 années (1950-2012). Les données pluviométriques proviennent de six stations (Tableau 1) localisées dans les trois domaines climatiques (Sud et Nord soudanien et sahélien) selon une répartition de deux stations par domaine (une sur la variante continentale et une autre sur celle côtière). Ce choix a été effectué de manière à permettre une couverture la plus homogène possible de la zone d'étude. Les données ont été mises à notre disposition par l'Agence Nationale de la Climatologie et de l'Aviation Civile (ANACIM) du Sénégal. Les six stations obéissent à des critères de continuité, de durée de l'information disponible et de qualité des données.

Pour les caractéristiques hydrologiques, les données des six stations hydrométriques localisées dans le haut bassin du fleuve Sénégal utilisées (Tableau 1) devaient 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 possible). Ces données concernent les débits journaliers (de 1950 à 2012) et ont été

prises à notre disposition par l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS).

Tableau 1. Postes pluviométriques et hydrométriques au Sénégal retenus pour l'étude et de leurs caractéristiques

Caractéristiques climatiques			Latitudes (° décimaux)	Longitudes (° décimaux)	Altitudes (m)	Périodes
Domaines	Variantes	Stations				
Sud soudanien	côtière	Ziguinchor	12,55	-16,27	26	1950-2012
	continentale	Kédougou	12,57	-12,22	178	1950-2012
Nord soudanien	côtière	Mbour	14,42	-16,97	10	1950-2012
	continentale	Kaolack	13,77	-13,68	49	1950-2012
Sahélien	côtière	Dakar	14,73	-17,50	27	1950-2012
	continentale	Matam	15,65	-13,25	15	1950-2012
Caractéristiques hydrologiques			Latitudes (° décimaux)	Longitudes (° décimaux)	Altitudes (m)	Périodes
Sous-bassins		Stations				
Sous-bassin de la Falémé		Gourbassi	13,4	-11,63		1954-2012
		Kidira	14,45	-12,20		1954-2012
Sous-bassin du Bafing en amont de Manantali		Dakka-Saidou	11,95	-10,62	307	1961-2012
		Bafing-Makana	12,55	-10,27		1954-2012
Sous-bassin du Bakoye		Oualia	13,6	-10,38	108	1954-2012
Bassin du Sénégal		Bakel	14,9	-12,45		1950-2012

Indices climatiques et hydrologiques extrêmes

Il existe de nombreux indices de précipitations et d'écoulement extrêmes qui sont utilisés dans de nombreuses études (Dos Santos *et al.*, 2011 ; Bodian, 2014 ; Xu *et al.*, 2015 ; Faye, 2017).

Afin de comparer les valeurs extrêmes des précipitations et de l'écoulement respectivement dans le territoire du Sénégal et le bassin versant du fleuve Sénégal, neuf indices de précipitations extrêmes et neuf indices d'écoulement extrêmes sont adoptés dans cette étude. Une bonne partie de ces indices utilisés, ceux pluviométriques notamment, ont été sélectionnés parmi les principaux indices climatiques extrêmes qui ont été développés par la

communauté du climat ETCCDMI (coordonnée par l'équipe d'experts de détection des changements climatiques, de suivi et d'indices (Xu *et al.*, 2015).

Les caractéristiques de ces indices sont données dans le Tableau 2 (les indices de précipitations extrêmes vont du n° 1 au n° 9 et les indices hydrologiques extrêmes du n° 10 au n° 18). Ces 18 indices climatiques et hydrologiques extrêmes peuvent être divisés en indices de durée, en indices de centile, en indices de seuil ou en indices d'intensité.

Tableau 2. Liste des indices de précipitations et d'écoulement extrêmes

N°	Indices	Appellation des indices	Définitions	Unités
1	ISIP	Indice d'intensité quotidienne de pluies	Précipitations totales annuelles divisée par le nombre de jours pluvieux ($P_{mm} > 0$) sur une année	mm/jour
2	P10	Nombre de jours de fortes pluies	Nombre annuel de jours où $P_{mm} \geq 10$ mm	jours
3	P20	Nombre de jours de très fortes pluies	Nombre annuel de jours où $P_{mm} \geq 20$ mm	jours
4	P25	Nombre de jours de pluies extrêmes	Nombre annuel de jours où $P_{mm} \geq 25$ mm	jours
5	NJP	Nombre de jours pluvieux	Nombre annuel de jours où $P_{mm} > 0$ mm	jours
6	NJS	Nombre de jours secs	Nombre annuel de jours où $P_{mm} = 0$ mm	jours
7	P95p	Jours très humides	Précipitations totales annuelles quand $P_{mm} >$ au 95 ^e percentile	mm
8	P99p	Jours extrêmement humides	Précipitations totales annuelles quand $P_{mm} >$ au 99 ^e percentile	mm
9	PTA	Précipitations totales annuelles	Total annuel des précipitations en jours pluvieux ($P_{mm} \geq 1$ mm)	mm
10	ISID	Indice d'intensité quotidienne de débits	Écoulement total annuel divisé par le nombre de jours où débit ≥ 1 l/s/km ²) sur une année	l/s/km ² /jour
11	DS	Débit spécifique	Nombre annuel de jours où le débit ≥ 1 l/s/km ²	l/s/km ² /jour
12	DMAX	Débit maximum annuel	Valeur de l'écoulement la plus élevée sur une année	m ³ /s
13	DMIN	Débit minimum annuel	Valeur de l'écoulement la plus faible sur une année	m ³ /s
14	NJE	Nombre de jours d'écoulement	Nombre annuel de jours où le débit > 0 m ³ /s	jours
15	Q=0	Nombre de jours sans écoulement	Nombre annuel de jours où le débit = 0 m ³ /s	jours
16	D95p	Jours très humides	Écoulement total annuel quand le débit $>$ au 95 ^e percentile	m ³ /s
17	D99p	Jours extrêmement humides	Écoulement total annuel quand le débit $>$ au 99 ^e percentile	m ³ /s
18	DMOY	Module	Valeur moyenne annuelle des débits sur une année	m ³ /s

Méthodes de détection de tendance et de rupture

Le test de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) a été utilisé pour analyser les tendances de la tendance de chaque indice. En outre, les estimations de la pente de Sen (Sen, 1968) ont été appliquées pour déterminer l'ampleur du changement et le test de Pettitt (1979) pour examiner l'existence d'une rupture sur les séries des variables. Pour identifier l'existence de tendances et explorer les caractéristiques temporelles de ces indices climatiques et hydrologiques extrêmes, le seuil de signification est fixé à 0,01. Pour l'analyse des caractéristiques spatiales de chaque indice extrême, qui donnera un aperçu sur la région de risque élevé pour les événements climatiques extrêmes, la méthode inverse de la distance de pondération est adoptée pour interpoler la valeur de l'indice de la moyenne décennale des stations météorologiques et hydrologiques.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Caractéristiques temporelles des précipitations et de l'écoulement extrêmes

Analyse des précipitations extrêmes

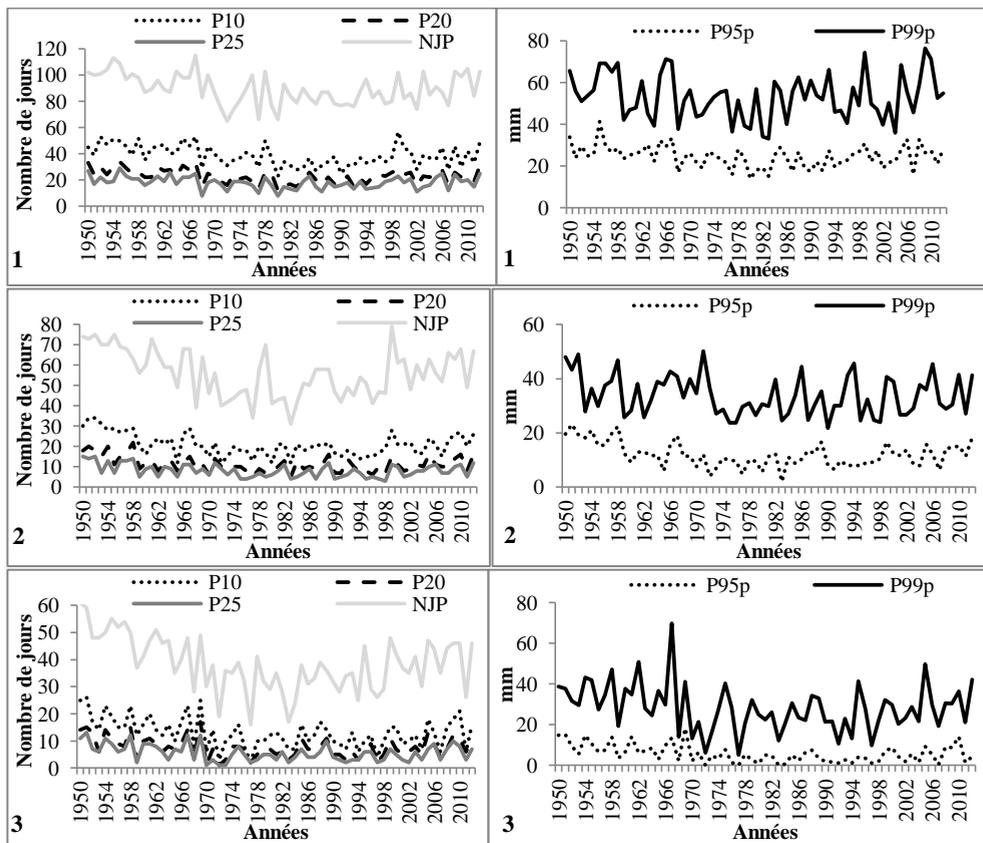
Les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt sur les indices de précipitations extrêmes dans les trois domaines climatiques du Sénégal sont donnés dans le Tableau 3 et illustrés en figure 2. Les indices sont dans l'ensemble marqués par une tendance générale à la baisse, traduisant la baisse des caractéristiques des précipitations extrêmes, en phase avec le déficit pluviométrique. Cette baisse se traduit par une tendance à la hausse du nombre de jours secs (NJS).

Dans la zone d'étude, 83% des stations ont connu une tendance à la hausse sur un seul indice (le nombre de jours secs) et à la baisse sur les huit autres indices extrêmes. En revanche, la station de Kédougou, dans le domaine climatique sud-soudanien continental, reste la seule de la série qui enregistre un nombre de jours secs en baisse et un nombre de jours pluvieux en hausse. Ces tendances des indices extrêmes, généralement à la baisse, sont mises en évidence par des ruptures (sur 80% des séries) intervenues généralement entre 1967 (avec 24%) et 1969 (avec 31,5%). Cette période coïncide avec l'installation de sécheresse au niveau du Sénégal. Seule la station de Matam, dans le domaine climatique sahélien continental, a enregistré des dates de rupture antérieures (en 1966) sur ses indices. Il faut également noté que cette même station n'a enregistré aucun changement de tendance significative sur les neuf indices.

Tableau 3. Tests de Mann-Kendall et de Pettitt sur les indices de précipitations extrêmes dans les domaines climatiques du Sénégal (1950-2012)

	Ziguinchor				Mbour				Dakar			
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.
ISIP	-0,07	-0,01	-	-	-0,17	-0,05	1969	-18,4	-0,02	-0,01	-	-
P10	-0,25*	-0,17	1967	-21,6	-0,25*	-0,14	1969	-29,2	-0,24*	-0,11	1969	37,3
P20	-0,19	-0,09	1967	-24,2	-0,24*	-0,08	1969	-34,8	-0,16	-0,04	1969	36,0
P25	-0,13	-0,05	1967	-21,6	-0,21	-0,06	1969	-40,7	-0,17	-0,04	1969	42,4
NJP	-0,18	-0,20	1969	-13,4	-0,04	-0,03	-	-	-0,26*	-0,21	1967	28,4
NJSP	+0,18	+0,2	1969	+4,9	+0,02	0	-	-	+0,23*	+0,21	1967	+4,2
P95p	-0,13	-0,06	1967	-19,5	-0,25*	-0,11	1969	-42,8	-0,26*	-0,09	1969	58,8
P99p	-0,04	-0,04	-	-	-0,16	-0,16	1969	-31,4	-0,14*	-0,13	1967	30,9
PTA	-0,17	-4,40	1967	-22,2	-0,24*	-4,78	1969	-38,1	-0,20	-3,48	1969	39,3
	Kédougou				Kaolack				Matam			
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.
ISIP	-0,13	-0,03	-	-	-0,09	-0,02	-	-	+0,01	+0,01	-	-
P10	-0,16	-0,08	-	-	-0,20	-0,1	1967	-26,6	-0,21	-0,08	1966	33,0
P20	-0,13	-0,05	-	-	-0,18	-0,06	1967	-29,8	-0,06	0	1966	34,4
P25	-0,11	-0,03	-	-	-0,19	-0,05	1969	-28,6	-0,10	-0,02	1966	42,3
NJP	+0,27*	+0,19	-	-	-0,17	-0,17	1967	-21,8	-0,17	-0,12	1966	19,6
NJSP	-0,26*	-0,20	-	-	+0,15	+0,17	1967	+4,7	+0,15	+0,10	1966	+2,4
P95p	-0,09	-0,03	-	-	-0,19	-0,08	1967	-34,7	-0,22	-0,06	1966	51,0
P99p	-0,06	-0,05	-	-	-0,18	-0,12	1972	-17,8	-0,09	-0,07	1966	26,8
PTA	-0,16	-2,85	-	-	-0,23*	-3,58	1969	-28,8	-0,16	-2,14	1966	34,3

τ = Tau de Kendall ; (-) : tendance négative ; (+) : tendance positive ;(*) : tendance significative ; (Non) : absence d'une rupture ; (Exc.) : Excédent ; (Défi.) : Déficit



(P10, P20 et P25= Nombre annuel de jours où Pmm est respectivement ≥ 10 mm, à 20 mm et à 25mm ; NJP= Nombre annuel de jours où Pmm > 0 mm ; P95p et P99p = Précipitations totales annuelles quand Pmm est respectivement > au 95^e et 99^e percentile)

Fig. 2. Evolution de quelques indices de précipitations extrêmes : 1 Ziguinchor ; 2 Kaolack ; 3 Dakar

Il ressort du tableau 3 et de la figure 2, que bien que des changements soient notés, la plupart des stations n'ont pas montré une tendance significative sur leurs indices extrêmes. Toutefois, 22% des indices de précipitations extrêmes indiquent une tendance significative généralement décroissante. Il s'agit du nombre de jours de fortes pluies (P10) à Ziguinchor (-0,25 mm/an), Mbour (0,25) et Dakar (0,24), du nombre de jours de très fortes pluies (P20) à Mbour (-0,24), des jours très humides (P95p) à Mbour (-0,25) et Dakar (0,26), du nombre de jours pluvieux (NJP) à Kédougou (0,27) et Dakar (-0,26), du nombre de jours secs (NJSP) à Kédougou (-0,26) et

Dakar (+0,23), des jours extrêmement humides à Dakar (0,14), des précipitations totales annuelles (PTA) à Mbour (-0,24) et Kaolack (-0,23).

Partant des résultats des indices de la durée des précipitations, le nombre de jours de fortes, de très fortes de pluies extrêmes, et le nombre de jours pluvieux ont montré, de façon évidente, une tendance à la baisse, alors que pour le nombre de jours secs (NJSP), la tendance est à la hausse. De plus, le nombre de jours secs (NJSP) est supérieur à celui pluvieux (NJP), ce qui indique une durée de la sécheresse relativement plus longue dans les trois domaines climatiques du Sénégal. De part et d'autres des dates de rupture, le nombre de jours pluvieux (NJP) est passé de 98 à 85 jours à Ziguinchor, de 66 à 52 jours à Kaolack, de 48 à 34 jours à Dakar, de 42 à 34 jours à Matam. Dans le même temps, le nombre de jours de fortes pluies (P10) est passé de 46 à 40 jours à Ziguinchor, de 23 à 16 jours à Mbour, de 26 à 19 jours à Kaolack, de 18 à 11 jours à Dakar, de 17 à 12 jours à Matam. Ce constat reste le même pour le P20 et la P25.

Les indices de percentile de précipitations dans cette étude (P95p et P99p) peuvent indiquer le caractère extrême des précipitations, en illustre la fréquence des inondations sur la période actuelle. La valeur moyenne annuelle du P95p est de 24,4 mm à Ziguinchor, à 30 mm à Kédougou, 9,7 mm à Mbour, 11,8 mm à Kaolack, 5,6 mm à Dakar et 5,3 mm à Matam. Les tendances du P95p et du P99p sont significativement à la baisse. Pendant la période de 1950-2012, la valeur annuelle moyenne de l'indice d'intensité quotidienne de pluies a connu des changements de part et d'autres des dates de rupture. Toutefois, cette tendance n'a été statistiquement significative dans aucune station. La valeur moyenne annuelle des précipitations (PTA) a également connu une tendance à la baisse sur toutes les stations, une tendance statistiquement significative à Mbour et Kaolack.

Les indices (P10, P20 et PTA) qui peuvent refléter un changement de la quantité et la durée des précipitations, ont montré une tendance à la baisse, en particulier. En comparant les changements de tendance de tous les indices de précipitations extrêmes au Sénégal, il est digne de noter que la plupart des indices ont montré de manière significative une tendance décroissante. Dans le même temps, seul l'indice de NJSP a indiqué une tendance positive. Des différentes stations, Dakar (avec 5 sur 9 des indices) et Mbour (avec 4 sur 9 des indices) ont enregistré les tendances statistiquement significatives les plus importantes. Des différents indices, le nombre de jours pluvieux (NJP) a enregistré la tendance significative décroissante la plus importante. De plus, la baisse notée sur les valeurs des indices est plus apparent sur les stations du Nord du pays, dans le domaine sahélien.

De ces résultats, il est possible de montrer que le risque de sécheresse au Sénégal est très grand dans le domaine sahélien. Toutefois, les précipitations extrêmes ont montré une tendance croissante sur la période la plus récente.

Analyse de l'écoulement extrême

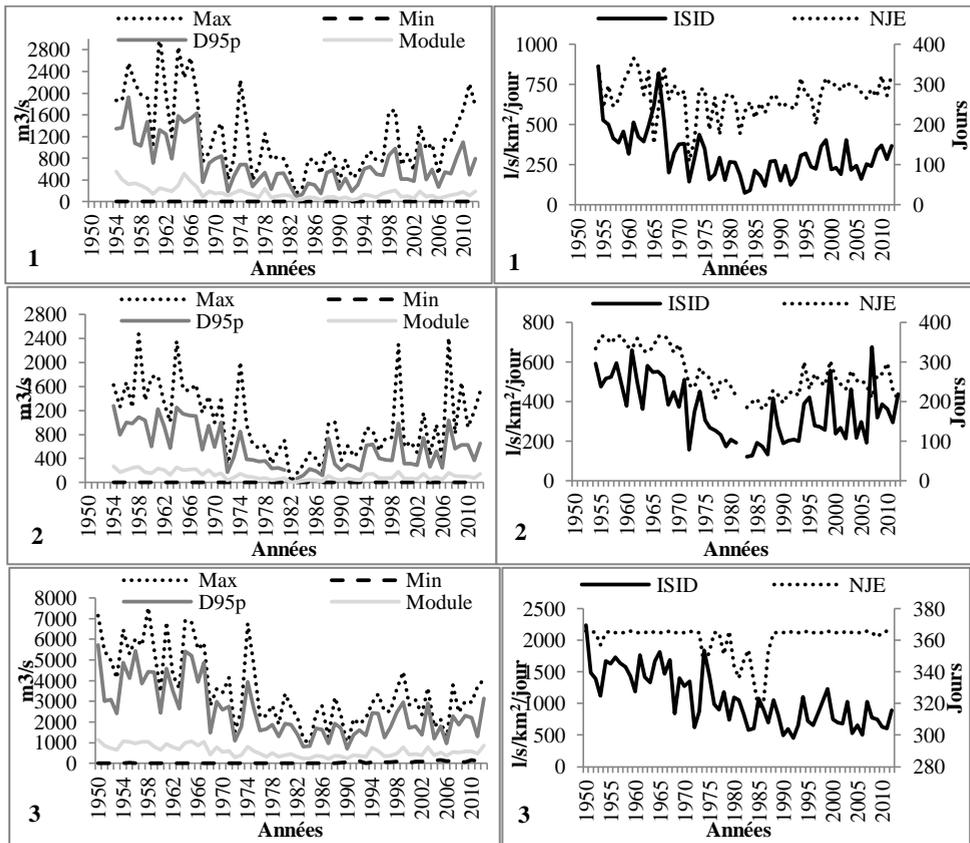
Afin d'étudier les changements temporels des 9 indices, toutes les valeurs moyennes de chaque indice ont été estimées sur la base des valeurs de six stations hydrométriques. Les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt de l'écoulement extrême du bassin du fleuve Sénégal sont donnés dans le tableau 4 et présentés en figure 3. Les stations des sous-bassins du Sénégal, dans la partie en amont de Bakel, ont toutes indiqué une baisse de l'écoulement, en témoignent des indices dont les tendances sont à la baisse, une baisse très souvent statistiquement significative (avec 48% des séries). La baisse de l'écoulement s'explique aussi par une hausse du nombre de jours sans écoulement notée sur toutes les stations de l'étude. Les stations de Gourbassi et Oualia ont enregistré le nombre de tendances statistiquement significatives le plus important (7 sur 9 indices pour chacune). A la station de Bafin-Makana, bien qu'une baisse des indices soit notée, aucune tendance n'est significative, c'est ainsi qu'elle enregistre le nombre de rupture le plus faible. Ces tendances statistiquement significatives sont mises en évidence par l'importance des ruptures (avec 87% des séries). Ces ruptures sont plus dispersées sur les indices de l'écoulement extrême, comparées à celles des précipitations extrêmes, mais interviennent généralement entre 1969 et 1971.

Le déficit pluviométrique a comme corolaire la baisse des ressources en eau du bassin. Cette baisse de l'écoulement s'est traduite par une diminution de l'indice d'intensité quotidienne de débits (même si celle-ci n'est significative qu'à la station de Bakel) et du débit spécifique (DS), du débit maximum annuel (DMAX) et celui minimum annuel (DMIN). La baisse de l'écoulement dans le bassin est plus significative sur le débit minimum annuel (-0,47 m³/s par an à Kidira, -0,49 à Gourbassi, -0,38 à Oualia. -0,38 à Dakka Saidou et à Bakel) que sur le débit maximum annuel dont la baisse n'est significative qu'à Bakel (avec -0,34 m³/s par an). Pour le nombre de jours d'écoulement, la baisse est généralisée, mais il n'est significative qu'à Gourbassi (-0,40 m³/s par an) et Oualia (-0,38 m³/s par an). Les indices de modules annuels ont montré des caractéristiques spatiales similaires sur la tendance à la baisse.

Tableau 4. Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt sur les indices de l'écoulement extrême des sous bassins du fleuve Sénégal (1950-2012)

	Kidira				Gourbassi				Oualia			
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.
ISID	-0,27	-3,30	1975-76	-45,4	-0,21	-1,61	1975-76	-31,8	-0,23	-3,60	1971-72	-42,2
DS	-0,04	-0,14	1969-70	-22,1	-0,32*	-1,19	1971-72	-31,2	-0,34*	-0,9	1971-72	-39,1
Max	-0,19	-11,7	1967-68	-89,0	-0,17	-7,57	1975-76	-39,9	-0,21	-12,1	1971-72	-47,2
Min	-0,47*	0	1984-85	-100	-0,49*	0	1967-68	-100	-0,38*	0	1967-68	-100
NJE	0,07	+0,28	-	-	-0,40*	-1,48	1970-71	-21,7	-0,38*	-2,02	1971-72	-32,3
Q=0	+0,47*	+1,36	1984-85	+1125	+0,38*	+1,37	1970-71	+915,4	0,41*	2,13	1971-72	+572
D95p	-0,25*	-10,6	1971-72	-58,8	-0,26*	-6,96	1971-72	-49,2	-0,25*	-8,43	1971-72	-57,6
D99p	-0,19	-11,3	1967-68	-58,0	-0,18*	-6,83	1975-76	-42,4	-0,23*	-9,89	1975-76	-48,3
Module	-0,33*	-2,78	1978-79	-56,5	-0,27*	-1,50	1971-72	-52,7	-0,30*	-2,15	1971-72	-60,4
	Bafing-Makana				Dakka-Saidou				Bakel			
	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.	τ de Kendall	Pente	Année de rupture	Exc. ou Défi.
ISID	-0,01	-0,06	-	-	-0,09	-0,51	1969-70	-22,3	-0,52*	-16,59	1978-79	-44,1
DS	-0,10	-0,32	1976-77	-7,4	-0,44*	-1,32	1976-77	-16,3	+0,04	+0,25	1990-91	32,5
Max	+0,06	3,03	-	-	-0,17	-5,74	1970-71	-31,3	-0,34*	-48,6	1975-76	-48,5
Min	+0,02	0	1971-72	-16,6	-0,38*	-0,15	1977-78	-54,3	+0,38*	+1,64	1988-89	+1923
NJE	+0,20	0	-	-	+0,02	0	-	-	-0,04	0	1971-72	-1,7
Q=0	-0,22	0	1985-86	+4,7	+0,01	0	-	-	-0,03	0	1987-88	-100
D95p	-0,03	-0,68	1975-76	-68,4	-0,17	-3,57	1971-72	-28,5	-0,34*	-34,5	1971-72	-52,0
D99p	-0,02	-1,01	-	-	-0,16	-4,69	1971-72	-29,4	-0,34*	-45,8	1975-76	-49,9
Module	-0,01	-0,12	1976-77	-28,0	-0,20	-1,37	1970-71	-35,0	-0,30*	-7,07	1971-72	-46,3

τ = Taux de Kendall ; (-) : tendance négative ; (+) : tendance positive ;(*) : tendance significative ; (Non) : absence d'une rupture ; (Exc.) : Excédent ; (Défi.) : Déficit



(DMAX et DMIN = Valeur de l'écoulement respectivement la plus élevée et la plus faible sur une année ; D95p = Ecoulement total annuel quand le débit > au 95^e percentile ; Module = Valeur moyenne annuelle des débits sur une année ; ISID = Ecoulement total annuel divisé par le nombre de jours où débit ≥ 1 l/s/km² sur une année ; NJE = Nombre annuel de jours où le débit > 0 m³/s)

Fig.3. Evolution de quelques indices d'écoulement extrême : 1 Kidira ; 2 Oualia ; 3 Bakel

Des différentes stations, seule Bakel a enregistré une hausse des DMIN. Cette hausse significative, dans un contexte de baisse généralisée des ressources en eau dans le bassin, s'explique par la mise en place du barrage de Manantali qui a entraîné, à travers la politique de soutien des étiage, le maintien d'un volume important dans le fleuve pour l'irrigation (Sambou *et al.*, 2009). En période d'étiage, le fleuve, en régime naturel, pouvait tarir complètement sur certaines années, alors que le soutien d'étiage du barrage permet d'y relever le niveau de d'eau. C'est également les opérations de gestion du barrage avec un laminage des crues (par le stockage dans le

réservoir de Manantali) qui sont à l'origine de la baisse significative du débit maximum annuel à Bakel.

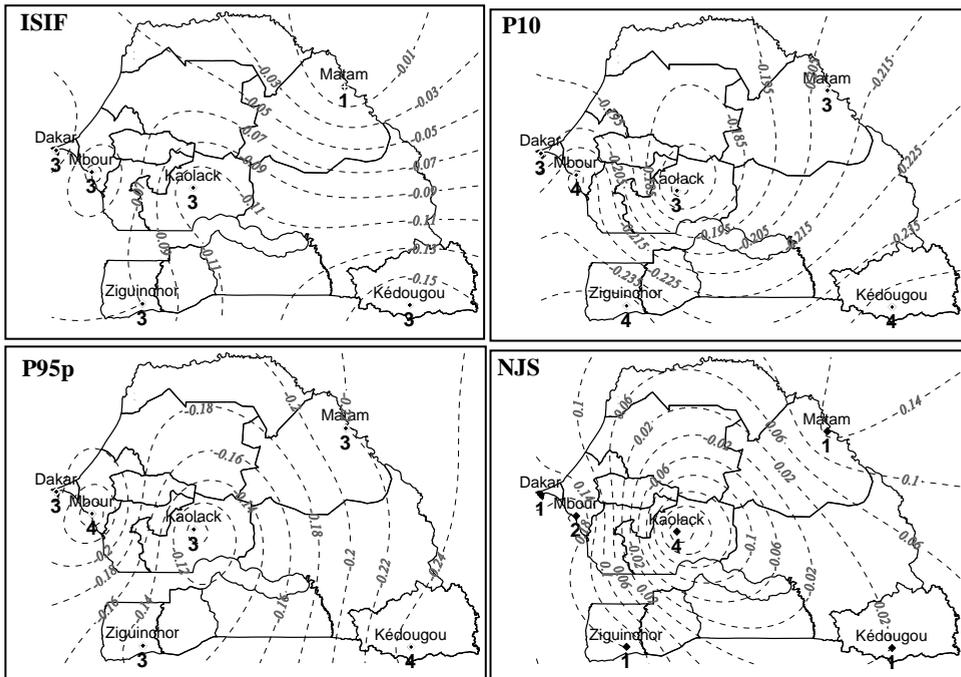
Le nombre de tendances significatives relativement important aux stations des bassins naturels comme Goubassi et Oualia est dû aux changements climatiques et à la sécheresse qui s'est installée dans le bassin depuis les décennies 1970, celui à la station de Bakel est plutôt lié à l'action anthropique avec la mise en place du barrage de Manantali.

Selon les résultats statistiques à partir de 9 indices d'écoulement extrême dans 4 sous-bassins du haut fleuve du fleuve Sénégal, les caractéristiques de l'écoulement montre d'importante tendance à la baisse. Il est donc intéressant de noter cette baisse des ressources en eau du bassin impacte sur les activités liées à l'eau.

3

Caractéristiques spatiales des précipitations et de l'écoulement extrêmes

Les caractéristiques spatiales des précipitations extrêmes au Sénégal et de l'écoulement extrême dans le bassin versant du fleuve Sénégal, à travers quelques indices, sont illustrées respectivement en figures 4 et 5.



(1) tendance positive non significative ; (2) tendance positive significative ; (3) tendance négative non significative ; (4) tendance négative significative ; (traits discontinus et valeurs en couleur grise) valeur du taux de Kendall

Fig.4. Distribution spatiale des tendances des précipitations extrêmes

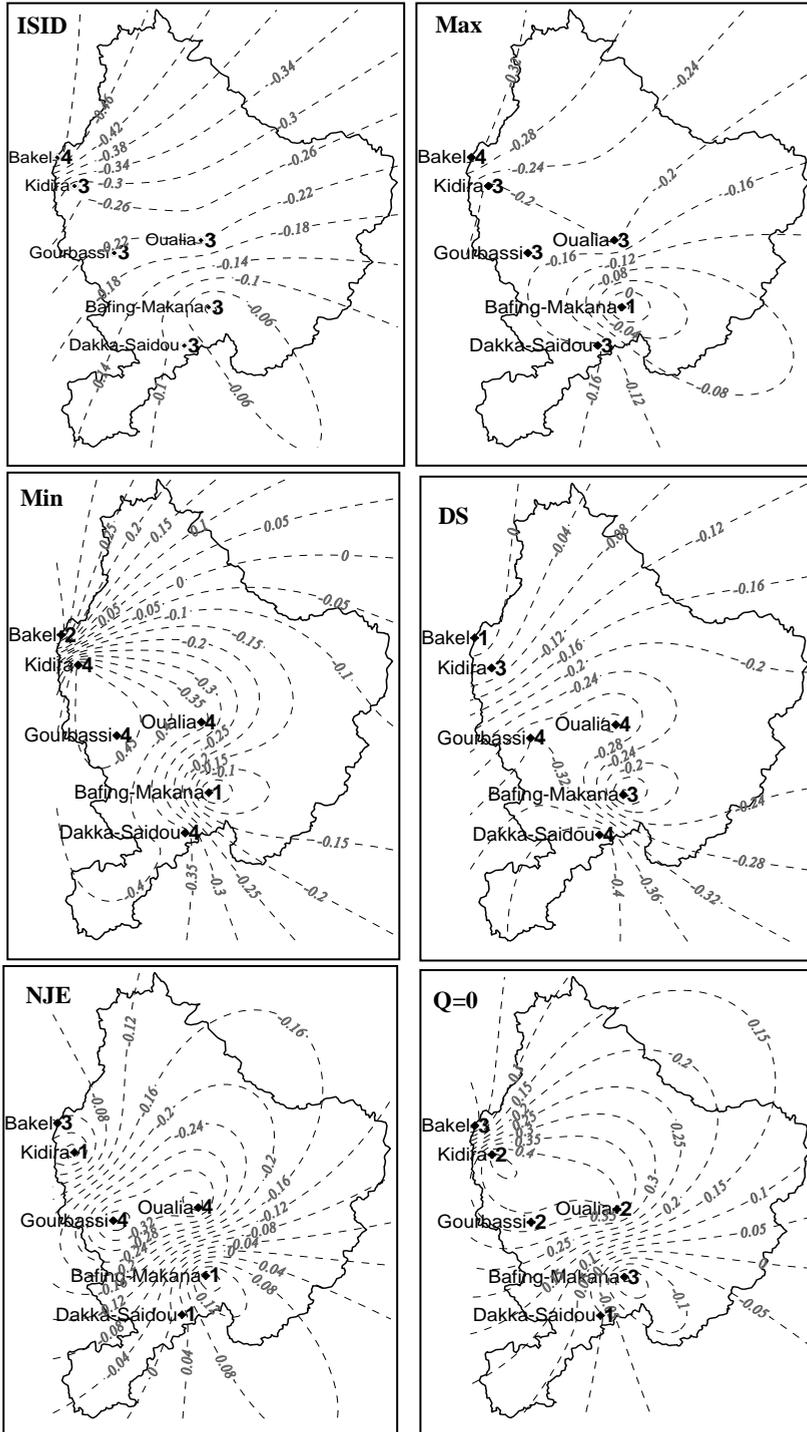


Fig. 5. Distribution spatiale des tendances de l'écoulement extrême

Analyse des précipitations extrêmes

On peut voir que les indices de précipitations extrêmes utilisés dans la spatialisatation (ISIP, P10, P95p et NJS) ont montré des changements significatifs de tendance de façon différente. Pour l'indice d'intensité quotidienne de pluies (ISIP), la figure 4 indique des tendances négatives sur cinq des 6 stations mais elles sont non significatives. En revanche, la station de Matam, dans le domaine sahélien continental, enregistre une tendance positive non significative. Dans la partie continentale du pays, les valeurs du τ de Kendall indiquent un gradient latitudinal relatif à une diminution de l'intensité des pluies du Nord au Sud, du domaine sahélien au domaine Sud-soudanien. Cette diminution de l'intensité de la pluie du Sud au Nord du pays s'explique par une pluviométrie largement plus abondance dans le domaine sud-soudanien comparé à celui sahélien. Il peut être déduit que les régions du Sud dans le domaine sud-soudanien peuvent avoir plus de risques de précipitations extrêmes que les autres régions.

Pour le nombre annuel de jours où la pluie est ≥ 10 mm (P10), toutes les tendances sont à la baisse et même 50 % des stations ont enregistré des tendances négatives significatives. Ces dernières sont beaucoup plus apparentes dans le domaine sud-soudanien où elles sont notées dans les deux variantes (côtière et continentale) que dans celui sahélien. Ainsi les valeurs du τ de Kendall y sont plus importantes et peuvent atteindre $-0,235$ à Ziguinchor et Kédougou, alors qu'au Nord, à Matam, elles tournent autour de $0,195$, soit un écart de $0,04$.

Les jours très humides où les précipitations totales annuelles sont $>$ au 95^e percentile (P95p) indiquent les mêmes tendances de la baisse tantôt significatives (à Kédougou et Mbour), tantôt non significatives (à Ziguinchor, Kaolack, Dakar et Matam). Cette baisse noté sur l'indice P95p se fait de façon anarchique et ne répond à aucune logique latitudinale, en témoignent les valeurs du τ de Kendall qui peuvent être égales au Sud comme au Nord du pays. Toutefois, un gradient longitudinale relatif à une diminution du τ de Kendall de la frontière Est vers le centre mais aussi de la côte ouest vers le centre est noté. C'est pourquoi, la zone de Kaolack enregistre les valeurs les plus faibles.

La baisse de la pluviométrie dans le pays donnée par les différents indices, est due en partie par la hausse du nombre de jours secs (NJS), en témoigne un τ de Kendall qui est généralement positif, à l'exception de la station de Kaolack.

Néanmoins, sur les stations où le τ de Kendall est en hausse, le changement est non significatif. Contrairement à l'indice P95p, l'indice NJS enregistre un gradient longitudinale relatif à une augmentation du τ de Kendall de la frontière Est vers le centre mais aussi de la côte ouest vers le centre, avec toujours, la zone centre du pays qui enregistre les valeurs les plus élevées.

Analyse de l'écoulement extrême

La répartition spatiale des différents indices d'écoulement extrême dans le haut bassin du fleuve Sénégal est présentée en figure 5. L'indice d'intensité quotidienne de débits, tout comme la pluie, a connu une baisse au niveau des différentes stations. Cette baisse est toutefois seulement significative au niveau de la station de Bakel. De plus, les valeurs du τ de Kendall enregistrent une baisse de plus en plus importante du Sud au Nord du bassin, passant de -0,06 à -0,46. Cette baisse est confirmée par l'indice DMAX dont les tendances sont à la baisse, à l'exception de la station de Bafing Makana qui enregistre une tendance à la hausse. En plus, de la station d'Oualia au centre, la station de Bakel au Nord ont un τ de Kendall en baisse. Contrairement à l'indice DMAX, l'indice DMIN connaît des changements très significatifs à la baisse (aux stations de Dakka Saidou, Gourbassi, Oualia et Kidira) et à la hausse (à la station de Bakel). Cette tendance significative à la hausse des DMIN au Nord du bassin s'explique par la mise en eau du barrage de Manantali, notamment à travers sa politique de soutien des étiages. De ce fait, la station de Bafing Makana et surtout celle de Bakel sont les seules qui ont enregistré des valeurs du τ de Kendall positives. Compte tenu de la baisse de l'écoulement qui a été noté dans le bassin depuis l'installation de la sécheresse aux années 1970, le débit spécifique (DS) connaît une baisse significative surtout au centre du bassin (stations de Gourbassi et Oualia). Du Nord au centre du bassin, le τ de Kendall enregistre des valeurs de plus en plus faibles. Cependant, du centre au Sud, la diminution se fait toujours mais n'est plus régulière. Parallèlement à la baisse de l'écoulement, le nombre de jours d'écoulement est significativement en baisse au centre (Gourbassi et Oualia) et au Nord (Bakel) du bassin. En revanche le nombre de jours sans écoulement est en hausse au centre (Gourbassi et Oualia) du bassin. Ces valeurs en baisse au Nord du bassin, à la station de Bakel, sont liées au soutien des étiages et son corolaire la disponibilité de l'eau sur toute l'année.

CONCLUSION

L'objectif de cet article était de mieux caractériser les variations spatio-temporelles de la pluviométrie et de l'écoulement extrême au Sénégal, ce qui est indispensable pour la recherche de mesures d'adaptation des populations face aux changements climatiques qui risquent de perturber l'approvisionnement en eau de bonne qualité. Cette analyse réalisée à partir de données journalières de 1950 à 2012 provenant de six stations météorologiques localisées dans les trois domaines climatiques du Sénégal et de six stations hydrométriques dans le bassin du fleuve Sénégal a révélé plusieurs aspects susceptibles d'intervenir dans la gestion de l'eau et des cours d'eau.

Dix-huit indices (neuf pour les précipitations extrêmes et neuf pour l'écoulement extrême) ont permis de caractériser les variations spatio-temporelles des précipitations et de l'écoulement extrêmes. Les résultats ont indiqué des changements de l'écoulement extrême plus sensibles et significatifs que ceux des précipitations. La contribution des précipitations et de l'écoulement extrêmes respectivement sur les cumuls pluviométriques et l'écoulement a présenté une forte tendance à la baisse relative aux changements climatiques. En plus, la pluviométrie annuelle, l'écoulement annuel, le nombre annuel de jours de pluies et d'écoulement montrent aussi des changements significatifs à la baisse. Les caractéristiques spatiales des précipitations et de l'écoulement extrêmes sont similaires. Il est noté que les événements extrêmes des précipitations et de l'écoulement, bien que connaissant une baisse, sont survenus plus fréquemment au Sud du pays (dans le domaine Sud soudanien et dans le régime fluvial de transition) où le risque d'événements extrêmes est supérieur aux autres domaines ou régimes fluviaux du pays.

Le travail présenté est essentiellement d'ordre sémiologique. Il s'attache à décrire certaines caractéristiques de la variabilité spatio-temporelle des pluies et de l'écoulement extrême au Sénégal en faisant ressortir des disparités spatiales. Il reste à approfondir par une analyse plus théorique qui permettrait de modéliser les propriétés d'échelles des champs de pluie et de débits extrêmes. Il est toutefois à noter que les données disponibles dans le pays ne permettent pas toujours facilement de mettre en œuvre les approches sophistiquées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bodian A. (2014). *Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest)* », *Physio-Géo* [En ligne], Vol 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.
- 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, Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 288 p.
- Croitoru A. E., Chiotoroiu B. C., Todorova V. I. & Torica V. (2013). *Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast, Global Planet. Change*, 102, 10–19, doi:10.1016/j.gloplacha.2013.01.004.
- Dos Santos C. A. C., Neale C. M. U., Rao T. V. R. & Da Silva B. B. (2011). *Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation over Utah, USA*, *Int. J. Climatol.*, 31, 1813–1822, doi:10.1002/joc.2205.
- Faye C. (2017). *Variabilité et tendances observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé (Sénégal)*. *HSJournal/Journal des sciences hydrologiques*, 62 (2), 259-269.
- 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, 17-35.
- Faye C. (2013). *Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé*. Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 p.
- Ford T. W. (2014). *Precipitation anomalies in Eastern-Central Iowa from 1640–Present*, *J. Hydrol.*, 519, 918–924.
doi:10.1016/j.jhydrol.2014.08.021.
- 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.
- Kendall M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin, London, 202 p.

- Leroux M. (1983). *Le climat de l'Afrique tropicale*, Thèse de doctorat d'Etat, Univ.Dijon, texte : 3 tomes, 1427 p, 1 atlas météorologique et climatologique, 250 cartes.
- Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M. & Kjeldsen T. R. (2014). *Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe*, J. Hydrol., 519, 3634–3650, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.003.
- Mann H. B. (1945). *Non parametric tests against trend*. *Econometrica*, 13, 245 - 259.
- Milly P. C. D., Dunne K.A. And Vecchia A.V., 2005. *Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate*. *Nature*, 438, 347-350.
- Mondal A. & Mujumdar P. P. (2015). *Modeling non-stationarity in intensity, duration and frequency of extreme rainfall over India*, J. Hydrol., 521, 217–231, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.071.
- OMVS, Projet Fem/Bassin Du Fleuve Sénégal. (2008). *Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problèmes Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal*, Version finale, 133 p.
- Panthou G., Vischel T. Et 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> .
- Pettitt A. N. (1979). *A non-parametric approach to the change-point problem*. *Appl. Statist.*, 28 (2), 126-135.
- Radinovic´ D. & C´ Uric´ M., 2012. *Some evidence on European monsoon existence*, *Theor. Appl. Climatol.*, 110, 11–15, doi:10.1007/s00704-012-0609-y.
- Sagna P., 2005. *Dynamique du climat et de son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique occidentale*. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 786 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), 104-111.

- Sen P.K. (1968). *Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau*. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379-1389.
- Sharma T.C. & Panu U.S. (2010). *Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a case of Canadian rivers*. HSJ, 55 (1), 79-92.
- Sighomnou D. (2004). *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et Hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau*. Thèse Doctorat d'Etat, Univ.Yaoundé 1, D^épt 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 Es lettres et sciences humaines, UCAD, FLSH, Dép^t de Géographie, 1232 p.
- UNEP,(2013). *Embedding the Environment in Sustainable Development Goals*. Published by the United Nations Environment Programme (UNEP), Version 2, July 2013, UNEP Post-2015 Discussion Paper 1, Vers 2, 38 p.
- Xu Z. X., Yang X. J., Zuo D. P. Chu Q., & Liu W. F. (2015). *Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation and temperature: a case study in Yunnan Province, China*. Proc. IAHS, 369, 121–127. [doi:10.5194/piahs-369-121-2015](http://proc-iahs.net/369/121/2015/).

&&&&&