

Variation spatiale et temporelle des précipitations de 1971 à 2010 dans le bassin versant du Sine Saloum (Sénégal)

C.Faye¹, T. Sané*, E.H.B. Diéye

¹Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, UASZ, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor (Sénégal)

*Corresponding author: cheikh.faye@univ-zig.sn; Tel.: +221775071519

ARTICLE INFO

Article History :

Received : 30/06/2018
Accepted : 22/06/2019

Key Words:

Climate change.
Drought.
Standardized precipitation index.
Watershed.
Sine Saloum

Mots-clés:

Changement climatique;
Sécheresse;
Indice standardisé de précipitation;
Bassin versant;
Sine Saloum.

ABSTRACT/RESUME

Abstract: As important variables in the hydrological cycle, rainfall has a strong influence on irrigated and rainfed agricultural crops. A better understanding of their variability in Senegal is important and useful for water users and most agricultural activities. Senegal is among the African countries most affected by the impacts of climate change, particularly the drought of the 1970s and 1980s, which caused considerable economic losses for several decades. The objective of this article is to analyze the spatial and temporal variation of precipitation over the period 1970-2010 in the Sine Saloum watershed. The method used is based on the analysis of the variability and trends of the annual precipitation series through the Mann Kendall and Pettitt tests as well as the calculation of the standardized precipitation index. The results indicate a significant fluctuation of interannual rains and a significant upward trend from 2000 to 2010. The estimated drought indices show that the Sine Saloum watershed has in the past experienced a long drought with moderate severity followed by drought. a relatively wet period in the majority of the study area. The decrease in rainfall during drought years has certainly had significant impacts in this basin, where rainfed agriculture remains the main activity. In addition, the interpolation of standardized rainfall indices over the entire Sine Saloum basin has made it possible to visualize and evaluate the spatio-temporal evolution of rainfall, and should help decision makers in the management of water resources, agricultural and other activities that may be affected.

Résumé: En tant que variable importante du cycle hydrologique, les précipitations ont une forte influence sur les cultures agricoles irriguées et pluviales. Une meilleure compréhension de leur variabilité au Sénégal est importante et utile pour les usagers de l'eau et la plupart des activités agricoles. Le Sénégal est parmi les pays africains les plus touchés par les impacts du changement climatique, en particulier par la sécheresse des années 70 et 80 qui a causé des pertes économiques considérables pendant plusieurs décennies. L'objectif de cet article est d'analyser la variation spatiale et temporelle des précipitations sur la période 1970-2010 dans le bassin versant du Sine Saloum. La méthode utilisée est basée sur l'analyse de la variabilité et des tendances des séries annuelles de précipitations à travers les tests de Mann Kendall et de Pettitt ainsi que le calcul de l'indice standardisé de précipitations. Les résultats indiquent une fluctuation importante des pluies interannuelles et une

tendance à la hausse significative de 2000 à 2010. Les indices de sécheresse estimés montrent que le bassin versant du Sine Saloum a connu dans le passé une longue période de sécheresse avec une sévérité modérée suivie d'une période relativement humide dans la majorité de la zone d'étude. La baisse des précipitations durant les années de sécheresse a certainement eu des impacts significatifs dans ce bassin où l'agriculture pluviale demeure la principale activité. De plus, l'interpolation des indices standardisés de précipitations sur l'ensemble du bassin du Sine Saloum a permis de visualiser et d'évaluer l'évolution spatio-temporelle des précipitations, et devrait aider les décideurs dans la gestion des ressources hydriques, agricoles et d'autres activités susceptibles d'en être affectées.

I. Introduction

La sécheresse est un phénomène naturel qui pose de nombreux problèmes à travers le monde dans la mesure où elle exige des ponctions énormes sur les ressources naturelles et particulièrement sur les ressources en eau [1]. Elle constitue un des risques naturels les plus importants qui ont négativement impacté les sociétés humaines à travers les générations. Selon Wilhite et Glantz [2], la sécheresse est classée en quatre catégories : (i) la sécheresse météorologique défini comme un manque de précipitations pendant une période de temps au-dessus de la zone affectée; (ii) la sécheresse hydrologique définie comme une insuffisance de l'approvisionnement en eau de surface et souterraine; (iii) la sécheresse agricole se référant à une période avec un déficit d'humidité du sol, qui affecte la productivité des cultures; (iiii) la sécheresse socioéconomique associée à l'insuffisance des ressources en eau pour satisfaire les besoins économiques dans la région touchée. Pour faire face à ce risque, les hommes ont essayé d'apprécier le phénomène et de comprendre les cycles climatiques à travers l'étude de la variabilité et les tendances des différentes variables climatiques, en particulier les précipitations et les températures [3-7]. Depuis 1900, plusieurs indices ont été développés pour identifier et évaluer la sévérité de la sécheresse, tels que l'indice d'anomalie de pluie [8], l'indice de sévérité de sécheresse de Palmer [9] et l'indice standardisé de précipitations [10]. Ce dernier est recommandé par de nombreuses organisations telles que l'Organisation météorologique mondiale et l'Administration océanique et atmosphérique (NOAA) pour caractériser les sécheresses météorologiques ainsi que les autres catégories de sécheresse [11] en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de sa flexibilité pour l'analyse de la sécheresse. Hayes *et al.* [12] précisent qu'il peut également être utilisé à différentes échelles de temps (hebdomadairement, mensuellement, annuellement).

Le continent africain a connu durant le 20^e siècle une sécheresse sévère qui a affecté de nombreuses zones et causé une perte économique colossale [13-14]. Plusieurs études réalisées en Afrique de l'Ouest et Centrale ont mis en évidence, à partir des années 1970, une diminution de l'écoulement de surface et souterrain à la suite de la baisse de la pluviométrie [15-18]. Selon plusieurs études [18-21], le Sénégal n'était pas une exception. Il a connu au cours des décennies 1970 et 80 une sécheresse sévère caractérisée par des déficits pluviométriques dépassant parfois 30%.

Sur l'ensemble du bassin versant du Sine Saloum, des conditions prolongées de déficits pluviométriques et hydrométriques depuis les années 1970 ont été mises en évidence [22]. Toutefois, à partir de la fin des années 1990, une hausse des précipitations est notée sur une bonne partie de la zone ouest africaine, présageant d'une amélioration du régime pluviométrique dans cet espace [23-27]. L'objectif de cet article est d'analyser la variabilité climatique dans le bassin versant du Sine Saloum, dans un contexte de hausse des précipitations. Il vise à évaluer l'évolution spatiale et temporelle des précipitations sur le bassin versant du Sine Saloum (centre du Sénégal) pour la période 1970-2010 en analysant les séries de précipitations à l'aide de plusieurs tests (Mann-Kendall, Pettitt), en calculant et en cartographiant l'indice standardisé de précipitation (SPI). Cette étude vise à fournir aux décideurs les éléments nécessaires à la mise en place des politiques de gestion des ressources en eau adaptées au contexte climatique et au développement durable du bassin versant du Sine Saloum.

Cet article étudie la variabilité et des tendances pluviométriques sur la période 1970-2010 dans le bassin versant du Sine Saloum, bassin qui connaît depuis quelques décennies une modification importante de ses conditions bioclimatiques et environnementales. Il s'appuie sur un « substratum scientifique » tout en s'ouvrant sur d'autres aspects novateurs permettant de mettre en exergue les tendances pluviométriques et leurs enjeux pour

l'environnement. C'est ce qui justifie notre motivation à vouloir apporter une contribution sur une étude complémentaire des faciès climatiques, certes explorée, mais encore dénuée d'ouvrages spécifiques. L'analyse de l'évolution des précipitations dans le bassin versant du Sine Saloum et les tendances qu'on peut y détecter vers la fin du XXème siècle, après une longue période de sécheresse (décennies 1970 et 80) sont du plus grand intérêt pour une région où les ressources écologiques et hydriques constituent les enjeux économiques majeurs des populations locales et par voie de conséquences, de la gestion durable de l'environnement [22]. Les indicateurs environnementaux disponibles, avant le retour timide de la pluviométrie sur la période récente [26], faisaient état d'une diminution des précipitations, d'une accentuation de l'irrégularité pluvieuse, d'un raccourcissement de la saison humide et d'un amenuisement du potentiel écologique [18-21]. Cet article constitue donc une contribution de l'étude d'un milieu naturel vulnérable dans un contexte environnemental alliant une hétérogénéité et des fragilités spécifiques [20]. En caractérisant les variations temporelle et spatiale de la pluviométrie, cet article permet donc une connaissance climatique du milieu, un volet incontournable pour la mise en place de stratégies d'adaptation et de nouvelles formes de pratiques et

d'innovations dans le système de production. Les réponses politiques et les pratiques sociales ne peuvent être efficaces que si elles sont étayées par des connaissances précises sur les mécanismes climatiques, environnementaux et sociaux impliqués dans les évolutions à maîtriser, connaissances qui sont en partie produites dans cette étude.

II. Zone d'étude

Situé entre les latitudes 13° 70' et 15° 30' Nord et les longitudes 14° et 17° Ouest, le bassin du Sine Saloum couvre les régions administratives de Thiès (dans sa partie Nord), Diourbel, Louga et Matam (dans sa partie Est), Fatick, Kaolack et le Nord-ouest de Tambacounda. Ses limites naturelles sont la *cuesta* de Thiès (au Nord-ouest), les petits bassins côtiers (à l'Ouest sur la façade maritime), le bassin de la Gambie (au Sud) et le bassin du fleuve Sénégal à l'Est et au Nord-est [22]. Il s'étend entièrement sur le territoire sénégalais dans sa partie centrale. Son bassin est vaste de 31893,5 km² et sa pente est relativement faible (plus de 99% de la surface du bassin ont une altitude inférieure à 75 m). Cette faiblesse des pentes explique la remontée, très prononcée, des eaux de la mer jusqu'au-delà de Kahone, sur le Saloum [28].

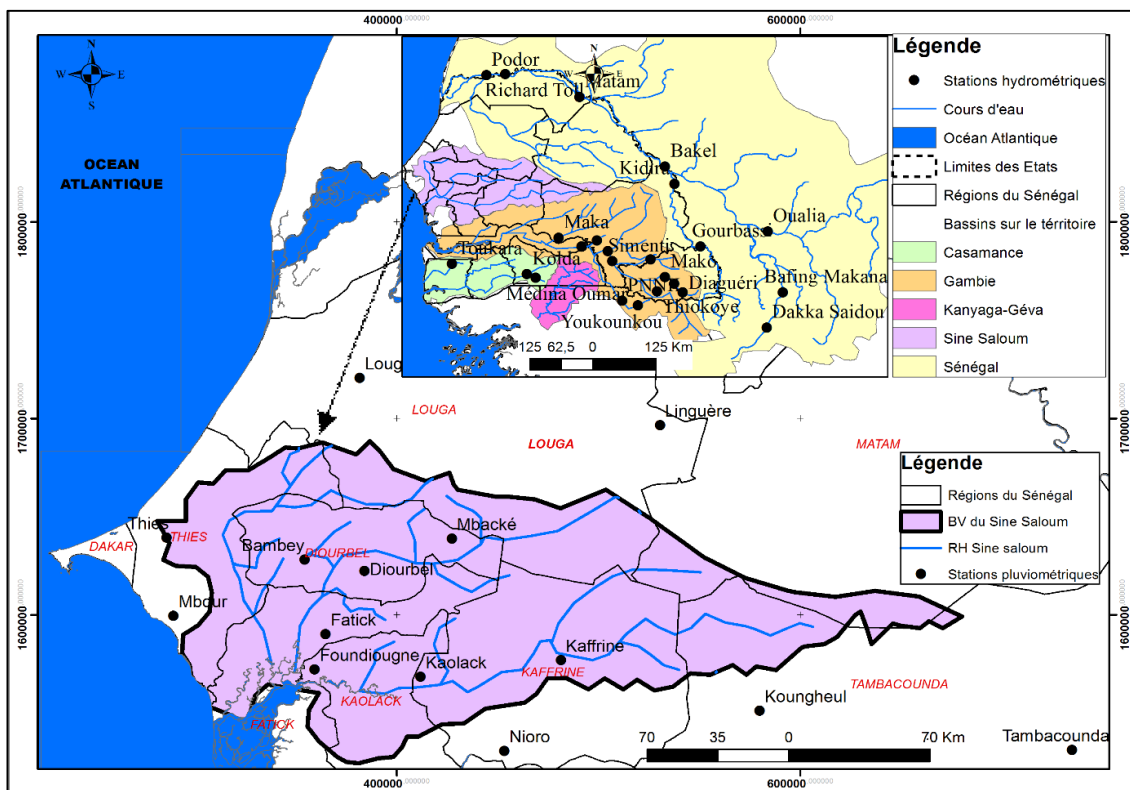


Figure 1. Situation géographique du bassin versant du Sine Saloum et des stations pluviométriques retenues

Le bassin du Sine Saloum est situé dans les domaines climatiques nord-soudanien et sahélien. Son climat est caractérisé par deux saisons contrastées : une longue saison sèche (pas moins de 7 mois) et une courte et irrégulière saison des pluies (5 à 3 mois). Son bilan hydrique est déficitaire du fait d'une forte évapotranspiration et d'une faible pluviométrie, auxquelles s'ajoute la péjoration climatique des années 1970 et 1980. Cela explique en partie le caractère inverse de son estuaire [29-30] avec comme manifestation la pénétration des eaux marines à l'intérieur des terres. Le bassin du Sine Saloum est le seul grand bassin versant non jaugé, drainant le centre du bassin sédimentaire sénégalomauritanien et se jetant dans l'Atlantique par un large delta. Il occupe une place importante dans le pays du fait de sa position géographique, de son poids démographique et de celui des activités (surtout agricoles et halieutiques) qui y sont pratiquées, des écosystèmes particuliers qu'il abrite (mangrove).

II. Données et méthodes

III.1. Données

L'étude du climat nécessite de longues et nombreuses séries d'observations. C'est pour cela que la qualité des données représente un élément majeur [7]. Dans cette étude, 10 stations pluviométriques (Tableau 1) gérées par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) ont été utilisées pour créer la base de données annuelles la plus complète et la plus représentative possible pour notre zone d'étude (Figure 1). Les données recueillies auprès de ces stations répondent aux critères de qualité

mis en avant dans ce travail. La série des observations prises en compte s'étale sur 40 ans, entre 1971 et 2010.

Tableau 1. Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin versant du Sine Saloum

Stations	Latitudes	Longitude	Altitude
Louga	15°37'	16°13'	38
Linguère	15°23'	15°07'	20
Thiès	14°48'	16°57'	71
Bambey	14°42'	16°28'	20
Diourbel	14°39'	16°14'	7
Mbour	14°25'	16°58'	10
Fatick	14°20'	16°24'	6
Kaoloack	14°08'	16°04'	6
Koungheul	13°58'	14°50'	11
Tambacounda	13°46'	13°41'	49
Nioro	13°33'	15°47'	18

Les principales caractéristiques statistiques des séries pluviométriques sont présentées dans le Tableau 2. L'analyse statistique réalisée sur les séries annuelles de précipitations montre que leur distribution est asymétrique. Nous avons également noté une différence significative entre les paramètres de la position (moyenne, médiane). Le coefficient de variation de la pluviométrie annuelle est caractérisé par de fortes fluctuations, notamment aux stations de Louga et de Mbour où le coefficient de variation est de 32%, alors qu'il varie entre 22% (à Kaolack) et 30% (à Linguère) pour les autres stations.

Tableau 2. Caractéristiques statistiques des données pluviométriques du bassin de 1971 à 2010

Stations	Moyenn e	Minimu m	Maximu m	Ecartyp e	CV	Coefficien t de skewness	Taux ? de Kendal l	P- value de MK	Pente de Sen
Louga	294	150	474	92,9	0,32	0,23	0,12	0,27	1,44
Linguère	398	190	788	118	0,30	1,20	0,24	0,03	3,11
Thiès	452	228	664	128	0,28	0,02	0,11	0,31	2,05
Bambey	488	316	805	127	0,26	0,81	0,15	0,17	2,98
Diourbel	483	286	723	119	0,25	0,32	0,17	0,12	2,57
Mbour	500	129	847	162	0,32	0,31	0,17	0,12	4,19
Fatick	547	273	898	155	0,28	0,36	0,24	0,03	5,26
Kaoloack	585	305	878	130	0,22	0,45	0,22	0,05	3,90
Koungheul	697	399	1143	176	0,25	0,57	0,11	0,35	2,98
Tamba	719	434	1067	167	0,23	0,34	0,07	0,55	1,96
Nioro	698	246	1095	179	0,26	0,04	0,12	0,30	2,70

III.2. Méthodes

III.2.1. Analyse de l'homogénéité des données de pluies

L'homogénéité des données pluviométriques a été réalisée pour définir les tendances et les points de changement dans les séries temporelles de précipitations annuelles en utilisant: (i) le test de Mann-Kendal, (ii) la pente de Sen et (iii) le test de Pettitt.

III.2.1.1. Test Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall (MK) non paramétrique proposé par Mann [31] et prolongé par Kendall [32] est utilisé dans cette étude pour détecter les tendances des données sur les précipitations. Cette technique reconnaît toute tendance dans une série temporelle donnée, sans préciser si la tendance est linéaire ou non [33]. Le test MK a été largement utilisé pour tester la tendance des données météorologiques et hydrologiques car il accepte les valeurs manquantes dans la série temporelle [34-36].

La statistique de test S définie par Taxak *et al.* [37] :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

Où: x_j = les valeurs de données séquentielles; n = longueur de l'ensemble de données ;

$$\text{signe}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & \text{si } (x_i - x_j) > 0, \\ 0, & \text{si } (x_i - x_j) = 0, \\ -1, & \text{si } (x_i - x_j) < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Il a été documenté que lorsque $n \geq 8$, la statistique S est approximativement normalement distribuée avec la moyenne $E(S) = 0$ et la variance comme :

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (3)$$

Où: m = le nombre de groupes liés; t_i = la taille du i ème groupe lié.

La simulation de Monte Carlo a été utilisée pour évaluer la signification statistique des tendances à un niveau de signification de 5%. A ce niveau, une tendance positive est significative lorsque la p-value $> 0,05$; et une tendance négative est significative lorsque sa p-value est $< 0,05$ [38]. L'hypothèse nulle H_0 suppose qu'il n'y a pas de tendance dans la série, ce qui signifie que la série des données est homogène [39].

III.2.1.2. Estimateur de pente de Sen

L'amplitude de la tendance est estimée à l'aide d'un estimateur de pente médian non paramétrique proposé par Sen [40] et Hirsch et Slack [41]. La pente de Sen est donnée par l'expression suivante [42]:

$$b = \text{Mediane} \left[\frac{(x_j - x_i)}{(j - i)} \right], \text{ pour } i < j \quad (4)$$

Où: $1 < k < j < n$, et β est considéré comme la médiane de toutes les combinaisons de paires possibles pour l'ensemble de données.

III.2.1.3. Test de changement de point

Le test du point de changement proposé par Pettitt [43] issu du test statistique Mann-Whitney est adopté dans cette étude pour identifier la présence de non-stationnarité sous la forme d'un changement brusque de la série des précipitations annuelles. C'est un test non paramétrique qui ne nécessite aucune hypothèse sur la distribution de données. Ce test a été largement utilisé pour détecter les points de changement dans les séries temporelles météorologiques et hydrologiques observées [37].

Le point de changement t est détecté en déterminant si la série temporelle moyenne peut être divisée en deux séries statistiquement différentes avant et après t . L'hypothèse nulle H_0 indique qu'aucun décalage n'existe dans la série temporelle à l'instant t , ce qui signifie que les deux moyennes de la sous-série sont cohérentes. L'hypothèse alternative H_a est que le point de changement existe à l'instant t , où $t = 1, \dots, n$ car toutes les subdivisions possibles de la série temporelle sont mesurées, puisque t est inconnu ici [44].

Dans la présente étude, la signification du test est évaluée en utilisant la procédure de rééchantillonnage de Monte Carlo qui calcule les p-values correspondantes au niveau de signification de 5%. A ce niveau, un point de changement existe quand la p-value $< 0,05$.

III.2.2. Analyse des données de pluies par des indices pluviométriques

La méthode de l'indice standardisé de précipitations (ISP) proposée par McKee *et al.* [10] a été utilisée dans cette étude pour analyser les données pluviométriques en identifiant les séquences sèches et humides et en évaluant la sévérité de la sécheresse. La méthode des ISP est une technique hautement recommandée et a été employée dans plusieurs recherches partout dans le monde [45-47, 7].

Le calcul des ISP nécessite au moins 30 ans de données pluviométriques permettant d'évaluer la fonction de distribution de probabilité, cette dernière étant normalisée pour avoir la moyenne de zéro. Les valeurs des ISP sont exprimées en écarts-types où l'ISP positif indique une pluviométrie supérieure à la pluviométrie médiane (excédent), tandis que les valeurs négatives indiquant une pluviométrie inférieure à la moyenne (déficit) [48]. Mathématiquement, l'ISP est calculé en utilisant l'expression suivante:

$$ISP = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma} \quad (5)$$

Où: P_i = précipitations réelles (mm), P_m = précipitations moyennes, σ = écart-type.

La sévérité de la sécheresse est identifiée par des valeurs ISP selon le schéma de classification (Tableau 3) proposé par Mckee *et al.* [10] et utilisé dans plusieurs études en Afrique de l'Ouest [23-25, 19-21].

Tableau 3. Classification des séquences de sécheresse selon l'ISP

Valeur de l'ISP	Séquence de sécheresse	Valeur de l'ISP	Séquence humide
0,00 < ISP < -0,99	Légèrement sèche	0,00 < ISP < 0,99	Légèrement humide
-1,00 < ISP < -1,49	Modérément sèche	1,00 < ISP < 1,49	Modérément humide
-1,50 < ISP < -1,99	Sévèrement sèche	1,50 < ISP < 1,99	Sévèrement humide
ISP < -2,00	Extrêmement sèche	2,00 < ISP	Extrêmement humide

IV. Résultats et discussion

IV.1. Analyse de l'homogénéité

Les résultats du test de Mann-Kendall (Tableau 2) indiquent que l'hypothèse nulle H_0 est acceptée pour le plus grand nombre de stations (p -value > 0,05) : Louga (0, 27) ; Thiès (0, 31) ; Bambey (0, 17) ; Diourbel (0, 12) ; Mbour (0, 12) ; Koungheul (0, 35) ; Tambacounda (0, 55) ; Nioro (0, 30). Ces stations présentent une certaine homogénéité des données de précipitations annuelles à un niveau de signification de 5%. En revanche, la probabilité de l'hypothèse nulle est rejetée pour les stations de Linguère, Fatick et Kaolack avec des amplitudes respectives de 0,03, 0,03 et 0,04. En effet, il s'agit des stations sur lesquelles les tendances sont statistiquement significatives.

Selon les estimations de la pente de Sen au niveau de signification de 5% (Tableau 2), toutes les

stations ont montré des tendances positives, parfois significatives, allant de 1,44 (Louga) à 5,26 (Fatick). Si les valeurs du τ de Kendall montrent une augmentation des précipitations sur toutes les stations, celles-ci sont toutefois faibles sur la plupart d'entre elles (0,12 mm/an à Louga, 0,11 mm/an à Thiès, 0,15 mm/an à Bambey, 0,17 mm/an à Diourbel, 0,17 mm/an à Mbour, 0,11 mm/an à Koungheul, 0,07 mm/an à Tambacounda, 0,12 mm/an à Nioro. Par contre, la hausse est plus importante aux stations de Linguère (0,24 mm/an), de Fatick (0,24 mm/an) et de Kaolack (0,22 mm/an). Le Tableau 4 indique les résultats du test de rupture de Pettitt effectué sur la pluviométrie annuelle des 11 stations retenues sur le bassin versant du Sine Saloum.

Tableau 4. Résultats du test de Pettitt sur les données pluviométriques du bassin de 1971 à 2010

Stations	p-value	Années de rupture	Tendance	Excédent en %
Louga	0,13	2007	H0	18,6
Linguère	0,003	2008	Ha	19,0
Thiès	0,11	2006	H0	21,6
Bambey	0,09	2007	H0	23,2
Diourbel	0,10	2004	H0	18,8
Mbour	0,02	2008	Ha	23,3
Fatick	0,002	2007	Ha	27,4
Kaolack	0,02	1998	Ha	25,6
Koungheul	0,13	2008	H0	18,8
Tambacounda	0,27	2007	H0	8,74
Nioro	0,17	2007	H0	9,60

Ha : série hétérogène ; H0 : série homogène ; L'excédent en % est calculé pour la période 1999-2010 par rapport à 1971-1998 (1998 étant la première année de rupture significative)

Avec la hausse notée sur les séries de précipitations annuelles des stations retenues, les résultats montrent que certaines d'entre elles comme Linguère, Mbour, Fatick et Kaolack ont des points de changement significatifs entre 1998 et 2008, l'hypothèse d'homogénéité étant rejetée pour ces stations à un niveau de signification de 5%. Le test a également indiqué que l'hypothèse d'homogénéité est valable dans les autres stations (Louga, Thiès, Bambey, Diourbel, etc.) où des points de

changement non significatifs ont été détectés dans leurs séries de précipitations ($p \geq 0,05$). De part et d'autres de l'année 1998, la première année de rupture significative observée, les excédents pluviométriques de la période 1999-2010 par rapport à la période 1971-1998, sont assez importants au niveau des stations de Fatick (27,4%), de Kaolack (25,6%), de Mbour (23,3%), de Bambey (23,2%), de Thiès (21,6%) et de Linguère (19%). La figure 2 montre l'évolution des

précipitations de part et d'autre de l'année 1998 sur les quatre stations qui ont les excédents les plus significatifs. Par exemple, entre 1999-2010 et 1999-

2010, la moyenne pluviométrique est passée de 505 mm à 644 mm à la station de Fatick et de 543 mm à 683 mm à la station de Kaolack.

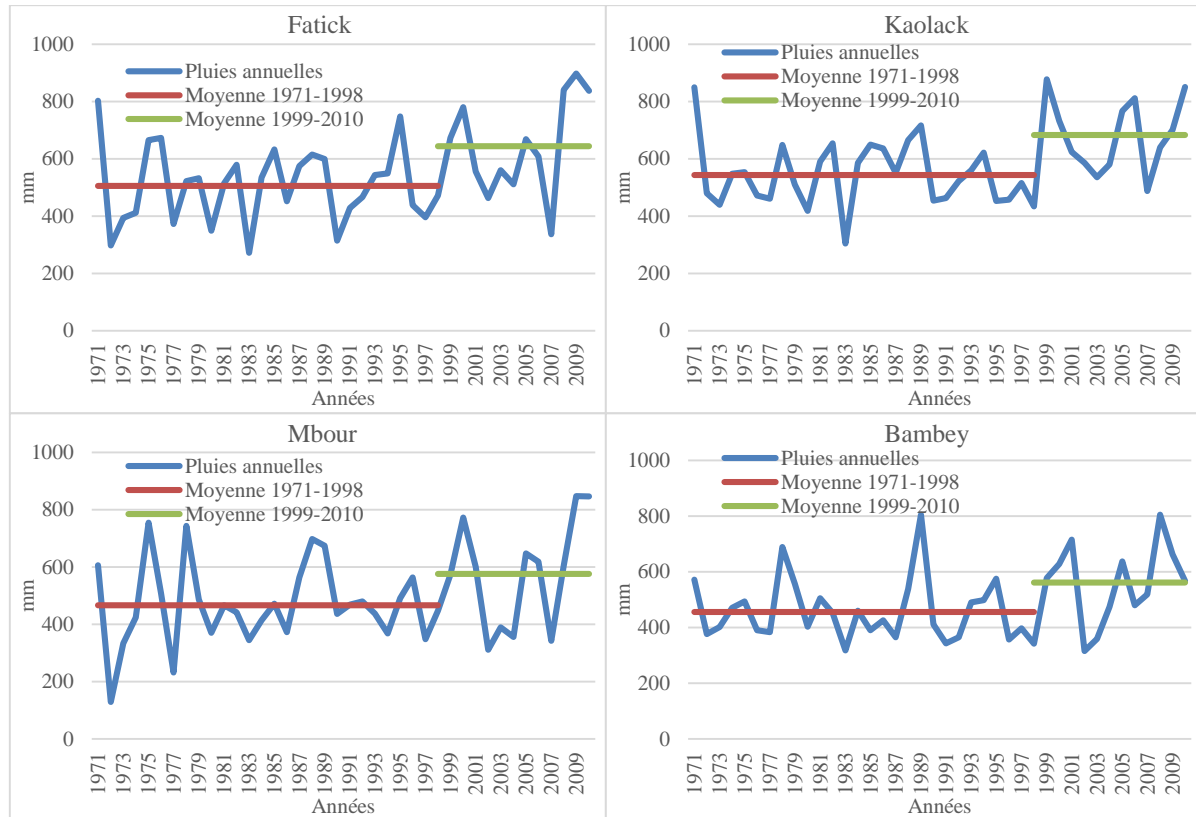


Figure 2. Evolution des précipitations annuelles aux stations de Fatick, Kaolack, Mbour et Bambe

IV.2. Analyse des pluies par l'indice standardisé de précipitation

En plus de l'identification des séquences sèches et humides et de leur caractérisation par des tests, l'ampleur du déficit en termes de sévérité a été déterminée grâce au calcul de l'indice standardisé de précipitation (ISP). L'ISP est établi pour quantifier le déficit des précipitations pour des échelles de temps multiples qui vont refléter l'impact du déficit sur la disponibilité des différents types de ressources en eau. Pour mieux évaluer les variations de la pluviométrie annuelle, les indices ISP calculés sont résumés dans les tableaux 5 et 6. Ces indices ISP ont été calculés pour les 11 stations pluviométriques du bassin du Sine Saloum afin de différencier les périodes sèches, normales et humides et de mieux évaluer les variations des précipitations annuelles sur ce bassin. Durant les années 1970, 80 et le début des années 90, il est observé des valeurs ISP souvent négatives, inférieures à -1 (Figure 3). Du milieu des années 90 jusqu'en 2010, on observe des valeurs ISP

généralement positives, souvent supérieures à 1, les valeurs négatives étant moins fréquentes (Figure 3). Dans le bassin du Sine Saloum, les sécheresses sont généralement légères avec des fréquences d'apparition de 50% à Linguère et à Mbour, 40% à Louga, à Bambe, à Diourbel et à Kaolack. Elles sont suivies des séquences de sécheresses modérées (17% à Thiès, 15% à Bambe et à Diourbel, 10% à Fatick, à Kaolack et à Niore). Par contre, les séquences de sécheresses sévères (3 cas à Tamba et 2 à Thiès, à Bambe et à Fatick) et surtout celles extrêmes (2 cas à Koungheul et un seul à Mbour, à Kaolack et à Niore) ont les fréquences d'apparition les plus faibles dans le bassin. Toutefois, quel que soit son degré de sévérité dans le bassin du Sine Saloum, la sécheresse qui a sévi de façon fréquente dans le passé (décennies 1970 et 80), s'estompe de plus en plus depuis les années 2000, malgré sa persistance sur certaines années comme 2007. Depuis quelques années déjà, des travaux menés au Sénégal par différents chercheurs confirment cette tendance à la hausse la pluviométrie [18, 27, 21, 49].

Tableau 5. Valeurs moyennes quinquennales et fréquences des ISP par station dans le bassin de 1971 à 2010

Caractéristiques	Louga	Linguère	Thiès	Bambey	Diourbel	Mbour	Fatick	Kaoloack	Koungheul	Tamba	Nioro
1971-75	0,18	-0,59	-0,02	-0,19	0,18	-0,31	-0,21	-0,08	-0,01	0,69	0,002
1976-80	-0,23	-0,30	0,22	-0,03	-0,05	-0,19	-0,36	-0,63	0,21	-0,40	-0,12
1981-85	-0,93	-0,30	-0,54	-0,49	-0,91	-0,44	-0,26	-0,21	-0,57	-0,87	-0,69
1986-90	0,71	0,49	0,07	0,16	-0,14	0,30	-0,23	0,15	-0,16	0,33	0,50
1991-95	-0,28	-0,45	-0,58	-0,26	0,09	-0,31	0,00	-0,46	-0,27	-0,30	0,09
1996-00	0,16	0,23	0,16	-0,21	-0,09	0,25	0,03	0,14	0,27	0,08	0,16
2001-05	-0,26	-0,16	-0,07	0,10	0,18	-0,24	0,03	0,25	-0,58	0,02	-0,61
2006-10	0,65	1,08	0,76	0,92	0,76	0,93	1,00	0,86	-0,45	0,45	0,66
Caractéristiques	Louga	Linguère	Thiès	Bambey	Diourbel	Mbour	Fatick	Kaoloack	Koungheul	Tamba	Nioro
Extrêmement humide	0,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	2,50	7,50	5,00	2,50	2,50
Sévèrement humide	10,00	2,50	5,00	5,00	7,50	5,00	7,50	2,50	5,00	7,50	5,00
Modérément humide	7,50	2,50	17,50	7,50	15,00	7,50	5,00	5,00	7,50	7,50	5,00
Légèrement humide	25,0	30,0	25,0	27,5	17,5	22,5	32,5	32,5	25,0	30,0	40,0
Légèrement sèche	40,0	50,0	30,0	40,0	40,0	50,0	37,5	40,0	37,5	37,5	32,5
Modérément sèche	15,00	7,50	17,50	15,00	15,00	5,00	10,00	10,00	12,50	7,50	10,00
Sévèrement sèche	2,50	2,50	5,00	0,00	5,00	2,50	5,00	0,00	2,50	7,50	2,50
Extrêmement sèche	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	2,50	5,00	0,00	2,50
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 6. Statistiques quinquennales moyennes des ISP dans le bassin de 1971 à 2010

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype	CV
1971-75	-0,03	-0,59	0,69	0,32	-10,07
1976-80	-0,17	-0,63	0,22	0,26	-1,49
1981-85	-0,56	-0,93	-0,21	0,26	-0,46
1986-90	0,20	-0,23	0,71	0,30	1,52
1991-95	-0,25	-0,58	0,09	0,22	-0,90
1996-00	0,11	-0,21	0,27	0,15	1,39
2001-05	-0,12	-0,61	0,25	0,28	-2,35
2006-10	0,69	-0,45	1,08	0,42	0,61

Le Tableau 6 présente les caractéristiques statistiques des indices ISP moyens sur 5 ans. La période étudiée peut être divisée en deux séquences : une séquence sèche qui commence en 1971 et se termine généralement en 1995 avec des valeurs ISP moyennes négatives allant de -0,56 (1981-85) à -0,03 (1971-75) ; une séquence humide de 1996 à 2010 avec des valeurs ISP moyennes positives allant de 0,11 (1996-00) à 0,69 (2006-10).

Toutefois, il faudra noter le caractère parfois hétérogène des deux séquences avec la présence d'un quinquennat humide (1986-1990 avec 0,20) sur la séquence dite sèche et d'un quinquennat sec (2001-2005 avec -0,12) sur la séquence dite humide. Cette hétérogénéité spatiale dans le régime des pluies en déclin est cohérente avec les études antérieures en Afrique de l'Ouest [50-51].

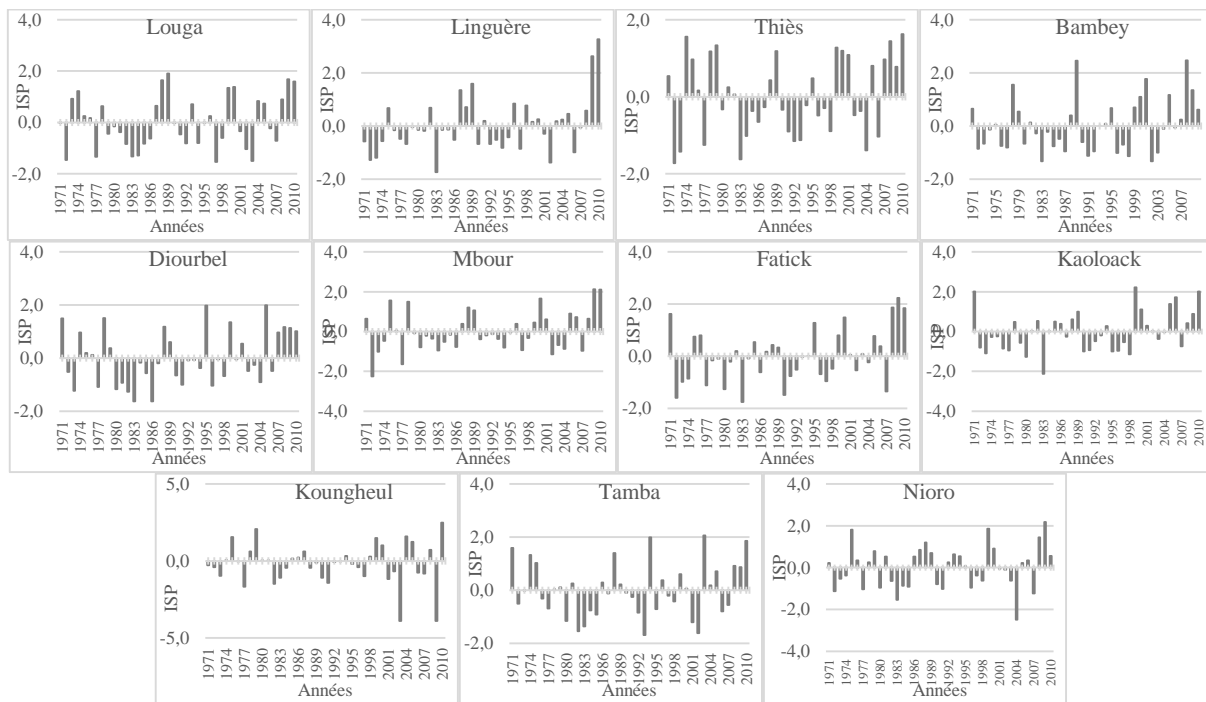


Figure 3. Evolution annuelle des ISP dans le bassin de 1971 à 2010

La figure 4 indique la variabilité spatiale et temporelle des indices pluviométriques dans le bassin du Sine Saloum, les cartes étant créées dans un environnement de système d'information géographique (SIG) à travers une interpolation des valeurs ISP des 11 stations et une utilisation d'un type d'interpolation de Krigage.

Selon les cartes ISP par 5 ans (Figure 4), durant la période 1971-1976, le déficit pluviométrique est associé à des conditions légèrement sèches largement observé dans le bassin versant du Sine Saloum et plus particulièrement au nord du bassin (Linguère). Cette période a également été marquée par un excès de précipitations associé à des conditions légèrement humides persistantes dans la zone centre-ouest (Diourbel) et Sud (Tamba et Nioro). Le constat reste le même durant la période 1976-1980 avec une sécheresse légère sur la plus grande partie du bassin et une humidité légère au Sud (Kougheul) et au Nord-ouest (Thiès). De toute la série, la période 1981-1985 reste la plus déficitaire (aucun excédent n'y est noté) suivie de la période 1991-1995 qui n'a enregistré que quelques rares excédents au centre (Diourbel) et au Sud

(Nioro). Le constat reste également le même sur le quinquennat 2001-05 généralement sec sur la plus grande partie du bassin (le Sud notamment), seul le centre reste excédentaire (Bambey, Diourbel, Fatick et Kaolack).

Au cours de la période 1996-2010, on observe un retour progressif à la normale des précipitations. En effet, des conditions légèrement et modérément humides ont été enregistrées dans la plupart des zones du bassin versant du Sine Saloum. Il s'agit principalement des quinquennats 1996-2000 et 2006-2010, en plus de 1986-90 qui est généralement humide dans le bassin (à l'exception de Diourbel, Fatick et Kougheul). Le quinquennat 2006-2010 reste de loin le plus humide dans le bassin versant du Sine Saloum. Cependant, sur toute la période humide, quelques déficits pluviométriques persistent au centre (Bambey et Diourbel sur la période 1996-2000) et au Sud (Kougheul sur la période 2006-2010) du bassin.

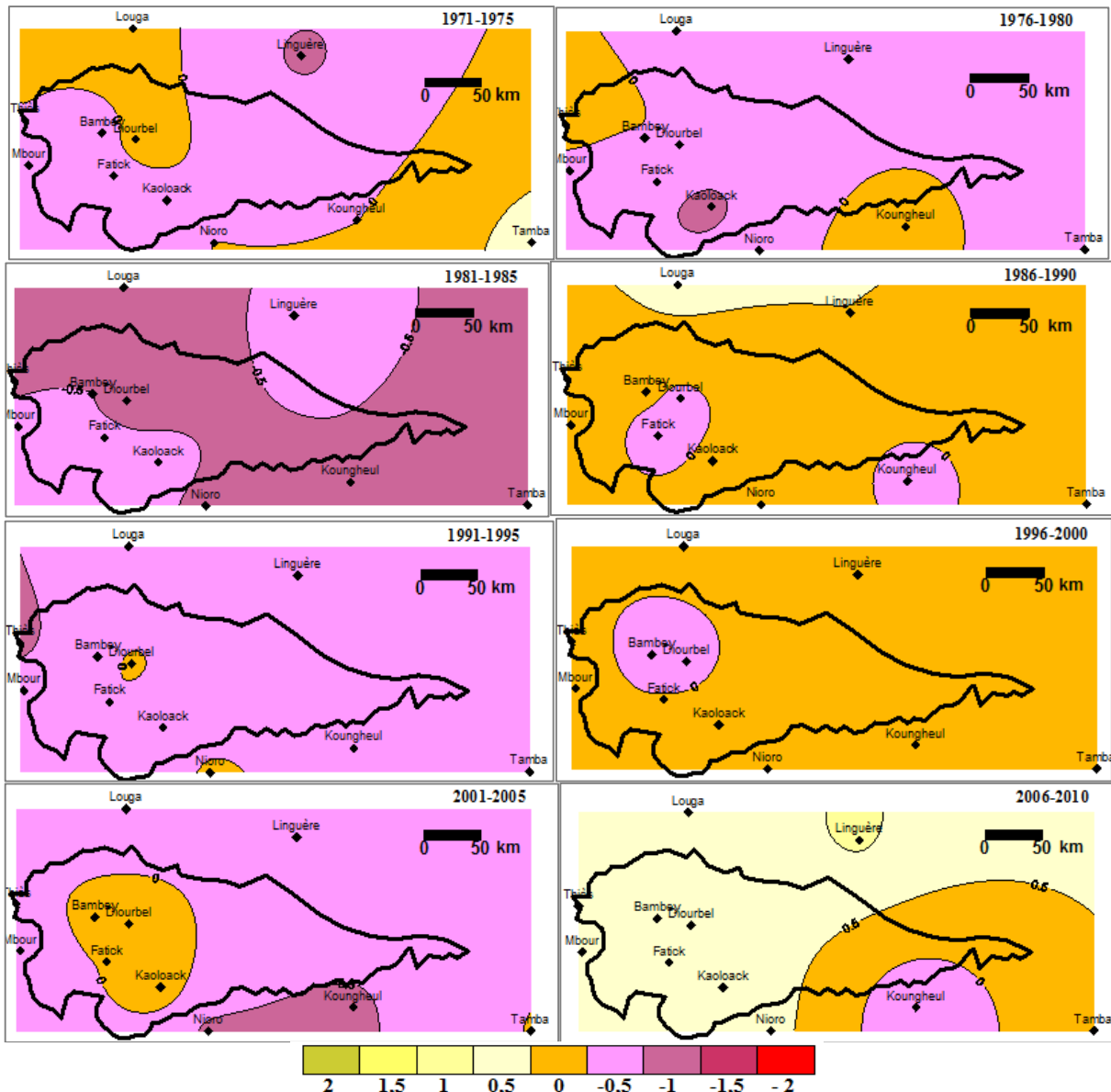


Figure 4. Variation spatiale des ISP dans le bassin de 1971 à 2010

Si la tendance à la baisse des précipitations annuelles a un effet direct sur le débit des cours d'eau, la disponibilité de l'eau pour la production agricole, les ménages et les autres utilisateurs de l'eau, le retour progressif à la normale des précipitations devrait être bénéfique pour la plupart des usagers de l'eau dans le bassin du Sine Saloum. La diminution des précipitations et le changement de l'indice de sécheresse ont des impacts environnementaux dans le bassin tels que la dégradation des sols et la perte de biodiversité, la perte du couvert forestier, la baisse des rendements agricoles [52]. L'agriculture, la principale activité du bassin, est intrinsèquement sensible aux conditions climatiques et fait partie des secteurs les plus vulnérables aux risques et aux impacts du changement climatique [53].

V. Conclusion

Dans cette étude, une analyse de la variabilité pluviométrique a été menée dans le bassin versant du Sine Saloum entre 1971 et 2010, à l'aide de tests non paramétriques et de la méthode ISP. L'analyse statistique des données pluviométriques a montré que l'évolution des précipitations moyennes annuelles est caractérisée par des irrégularités significatives exprimées par des coefficients de variation significatifs et une augmentation statistiquement significative des précipitations moyennes. De plus, la variabilité pluviométrique dans la zone d'étude a été confirmée par le test de Pettitt qui a détecté la présence de changements dans les séries de précipitations annuelles moyennes. Ces changements étaient significatifs sur 4 stations parmi les 11 stations étudiées.

D'après les calculs de l'indice standardisé de précipitation, la période étudiée a été divisée en

deux séquences; une séquence sèche de 1971 à 2000 et une séquence humide de 2000 à 2010, Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par Sighomnou [16] et Goula *et al.* [17] qui ont noté une baisse significative des précipitations en Afrique de l'Ouest après les années 1970. Ils s'accordent également avec les études d'Ouoba [26] et Faye *et al.* [49] qui indiquent le retour des précipitations normales à partir de la deuxième moitié des années 1990. L'interpolation des indices ISP sur l'ensemble du bassin montre une répartition hétérogène des précipitations dans le bassin du Sine Saloum soit au cycle sec, soit au cycle humide et a montré que la grande partie du bassin était affectée par des conditions de sécheresse persistantes.

Une meilleure compréhension de la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans le bassin versant du Sine Saloum est importante et utile pour les utilisateurs d'eau et la plupart des activités agricoles. Les résultats de l'étude constituent donc un matériel précieux qui peut être utilisé pour prévoir les sécheresses dans le bassin versant du Sine Saloum, ce qui permet une planification et une gestion efficaces des ressources en eau et des activités agricoles et élaborer des mesures d'adaptation pour faire face aux périodes de sécheresse. Les résultats de cette étude pourraient ainsi être utilisés par les institutions de gestion de l'eau et les universités pour améliorer la conception et la gestion des systèmes de production, surtout pour les cultures pluviales et irriguées dans le bassin étudié.

La tendance à une évolution progressive de la pluviométrie, amorcée vers la fin des années 1990, présage des lendemains meilleurs en phase avec les solutions aux défis posés par les différents types d'aménagement et le développement durable. **Cette évolution devrait réduire les menaces qui pèsent sur l'agriculture, la disponibilité des ressources en eau, les écosystèmes et les espèces qu'ils abritent, et influencer sur la modification des modes d'utilisation des terres et l'adaptation aux conséquences des changements climatiques.** L'analyse de ces différents éléments devrait constituer la substance d'une étude future qui viendra compléter celle-ci. Il serait intéressant d'analyser, au-delà de l'évolution récente de ces éléments, celle de la longueur de la saison des pluies. Il s'agit en effet de vérifier si la tendance continue à la diminution du nombre de jours de pluie et du nombre de jours avec des précipitations supérieures ou égales à 20 mm se confirme dans notre zone d'étude.

V. References

1. Barua, S.; Ng, A.W.M.; Perera, B.J.C. Comparative evaluation of drought indexes: case study on the Yarra River catchment in Australia. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137 2 (2009), 215-226.
2. Wilhite, D.A.; Glantz, M.H. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10. 3 (1985) 111-120.
3. Faye, M.; Fall, F.; Faye, G; Van Hecke, E. La variabilité pluviométrique et ses incidences sur les rendements agricoles dans la région des Terres Neuves du Sénégal oriental », *Belgeo* [Online], 1 | 2018, Online since 20 June (2018) connection on 17 June 2019. URL : DOI : 10.4000/belgeo.22083
4. Sambou, P.C. Evolution climatique récente et stratégies d'adaptation des populations dans les arrondissements de Sakal et Ndande, dans la région de Louga, thèse de Doctorat unique, FLSH-UCAD, (2015) 456 p.
5. IPCC. Summary for policymakers. In: Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 1-32 (Cambridge, UK and New York (2014).
6. Gautam, HE M. M. Variability and trends in precipitation, temperature and drought indices in the State of California Hydrology. 3 (2), 14 (2016). DOI: 10.3390/hydrology3020014.
7. Khezazna, A.; Amarchi, H.; Derdous, O.; Bousakhria F. Drought monitoring in the Seybouse basin (Algeria) over the last decades. *Journal of water and Land Development*, 33 (IV-VI) (2017) 79-88.
8. Van Rooy, M.P. A rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. *Notos*. 14 (1965), 43-48.
9. Palmer, W.C. Meteorological droughts. U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45 (1965) 58.
10. Mckee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA. AMS (1993) 179-184
11. Moreira, E.E.; Pires, C.L.; Pereira, L.S. SPI drought class predictions driven by the North Atlantic Oscillation Index Using Log-Linear Modeling. *Water*, 8. Iss. 2, 43 (2016). DOI:10.3390/w8020043.
12. Descroix, L.; Diongue Niang, A.; Panthou, G.; Bodian, A; Sane, Y.; Dacosta, H.; Malam Abdou, M.; Vandervaere, J.-P.; Quantin, G. Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions: La sénégalie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie*, 12 (2015) 25-43.
13. Sylla, M. B.; Nikiema, M.; Gibba, P.; Kebe, I.; Klutse, N. A. B. Climate change over West Africa: Recent trends and future projections. In J. A. Yaro, & J. Hesselberg (Eds.), *Adaptation to climate change and variability in rural West Africa* (pp. 25-40). Cham: Springer (2016). https://doi.org/10.1007/978-3-319-31499-0_3
14. Kanohin, F.; Saley, M.B.; Savané, I. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zones tropicale humide: Cas de la région de Daoukro en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 26, 2 (2009) 209-222.
15. Faye, C. Analysis of drought trends in Senegalese coastal zone on different climatic domains (1951-

- 2010). *Anabelle Universităţii diin Oradea., Seria Geografie XXVIII*, no. 2 (2018). 231-244
16. Okonkwo, C.; Demoz, B.; Onyeukwu, K. Characteristics of drought indices and rainfall in Lake Chad Basin. *International Journal of Remote Sensing* 34 (2013) 7945–7961,
 17. Sambou, S.; Dacosta, H; et Paturel, J-E. Variabilité spatio-temporelle des pluies de 1932 à 2014 dans le bassin versant du fleuve Kayanga/Gèba (République de Guinée, Sénégal, Guinée-Bissau)», *Physio-Géo*, 12, 1 (2018) 61-78.
 18. Sow, A. A. L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé. Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, (2007) 1232 p.
 19. Otmane, A.; Baba-Hamed, K., Bouanani, A.; et Kebir, L.W. Mise en évidence de la sécheresse par l'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest algérien), *TSM*, 9 (2018) 23-37.
 20. Faye, C. 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, (2013) 309 p.
 21. Faye, C.; Sow, A.A.; Ndong, J.P. 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*, 9 (2015) 17-35.
 22. Manga, A.V. Variabilité pluviométrique et estimation des écoulements dans le Bassin versant du Sine-Saloum (Sénégal). Mémoire de Master 2, Université Cheikh Anta Diop (UCAD), (2010) 98 p.
 23. James, R.; Washington, R. Changes in African temperature and precipitation associated with degrees of global warming. *Climatic Change*, 117 (2013) 859–872.
 24. Diawara, H. Analyse de l'évolution contemporaine de la température de l'air et des précipitations sur le territoire du Mali. *European Scientific Journal (ESJ)*, 15, 2 (2019) 154-168.
 25. Serdeczny, O.; Adams, S.; Baarsch, F.; Coumou, D.; Robinson, A.; Hare, W.; Schaeffer, M.; Perrette, M.; Reinhardt, J. Climate change impacts in Sub-Saharan Africa: from physical changes to their social repercussions. *Regional Environmental Change*, 17, 6 (2017) 1585–1600.
 26. Ouoba, A.P. Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè. Thèse de Doctorat Unique, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), (2013) 305 p.
 27. Bodian, A. 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. (2014), URL: <http://physio-geo.revues.org/4243>; DOI: 10.4000/physio-geo.4243.
 28. Dacosta, H. Variabilité des précipitations sur le bassin versant du Saloum. In : A.T. Diaw, M.D. Thiam, P. Bouland, L.A. Lake, M.A. Mbow, and P.N. Ndiaye, Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal, UICN, Gland, Suisse (1993) 87-103
 29. Pagès, J., Citeau, J. Rainfall and salinity of a sahelian estuary between 1927 and 1987. *Journal of Hydrology*, 113 (1990) 325-341
 30. Mikhailov, V.N.; Isupova, M.V. Hypersalinization of river estuaries in West Africa. *Water Resources*, 35,4 (2008) 367–385.
 31. Mann, H.B. Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13 (1945) 245–259.
 32. Kendall, M.G. Rank correlation methods. 4th ed. London. Charles Griffin, 202 (1975).
 33. Faye, C. Changement climatiques observés sur le littoral sénégalais (Région de Dakar) depuis 1960 : Étude de la variabilité des tendances sur les températures et la pluviométrie, *Nature & Technology*, C, Environmental Sciences, 20 (2019) 65-78.
 34. Patra, J.P.; Mishra, A.; Singh, R.; Raghuvanshi, N.S. Detecting rainfall trends in twentieth century (1871–2006) over Ormoa State, India. *Climatic Change*, 111, 3–4 (2012) 801–817.
 35. Pingale, S.M.; Khar E. D.; Jat, M.K. Adamowski, J. Trend analysis of climatic variables in an arid and semiarid region of the Ajmer District, Rajasthan, India. *Journal of Water and Land Development*, 28, 1 (2016) 3–18.
 36. Sarailidis, G.; Vasiliades, L.; Loukas, A. Analysis of streamflow droughts using fixed and variable thresholds. *Hydrological Processes*,- Wiley Online Library (2019). Disponible : <https://doi.org/10.1002/hyp.13336>
 37. Taxak, A.K.; Murumkar, A.R.; Arya, D.S. Long term spatial and temporal rainfall trends and homogeneity analysis in Wainganga basin, Central India. *Weather and Climate Extremes*, 4 (2014) 50–61.
 38. Fniguire, F.; Laftouhi, N.E.; Saidi, M.E.; Zamrane, Z.; El Himer, H.; Khalil, N. Spatial and temporal analysis of the drought vulnerability and risks over eight decades in a semi-arid region (Tensift basin: Morocco). *Theoretical and Applied Climatology* (2016) 1-10.
 39. Douglas, E.M; VogeL, R.M.; Kroll, C.N. Trends in floods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 240 (2000) 90-105.
 40. Sen, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 324 (1968) 1379–1389.
 41. Hirsch, R.M.; Slack, J.R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20, 6 (1984) 727–732.
 42. Salarjazi, M.; Akhon, D.; Ali, A.M.; Adib, A.; Daneshkhah, A. Trend and change-point detection for the annual stream-flow series of the Karun River at the Ahvaz hydrometric station. *African Journal of Agricultural Research*, 7, 32 (2012) 4540–4552.
 43. Pettitt, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28, 2 (1979) 126-135.
 44. Ishak, E.H. Effects of climate variability and change on flood magnitude and frequency in Australia. PhD thesis. Sydney, Australia. University of Western Sydney (2014).
 45. Almedej, J. Drought Analysis for Kuwait Using Standardized Precipitation Index (2014). Disponible : doi: 10.1155/2014/451841
 46. Awange, J.L.; Mpelasoka, F.; Goncalves, R.M. When every drop counts: Analysis of droughts in Brazil for the 1901–2013 periods. *Science of the Total Environment*, 566 (2016) 1472–1488.
 47. Zhou, H.; Liu, Y. SPI based meteorological drought assessment over a humid basin: Effects of processing schemes. *Water*, 8, 9 (2016) 1–16.
 48. Faye C. Caractéristiques de la Sécheresse au Sénégal : Méthodes d'analyses, Types d'impacts et Modèles de gestion. *Editions Universitaires Européennes* (2017) 233 p.
 49. Faye, C.; Ndiaye, A. et Mbaye, I. Une évaluation comparative des séquences de sécheresse météorologique par indices, par échelles de temps et par domaines climatiques au Sénégal. *Journal. wat. env. sci.*, 1, 1 (2017) 11-28.
 50. Rashid, M.; Shaofeng, J.; and Wenbin, Z. Analysis of climate variability, trends, and prediction in the most active parts of the Lake Chad basin, Africa *Scientific Reports* 9, 9:6317 (2019)| <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42811-9>
 51. Segura, C.; Sun, G.; McNulty, S.; Zhang, Y. Potential impacts of climate change on soil erosion

- vulnerability across the conterminous United States. *J. Soil WaterConserv.* 69, 2 (2014) 171–181.
52. Logah, F.Y.; Obuobie, E.; Ofori, D.; Kankam-Yeboah, K. Analysis of Rainfall Variability in Ghana. *International Journal of Latest Research In Engineering and Computing (IJLREC)*, 1, 1 (2013) 1-8.
53. Marega, O. Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahélienne: étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger) », thèse de doctorat, Université Diderot-Paris 7 (2016) 700 p.

Please cite this Article as:

Faye C., Sané T., Diéye E.H.B., Variation spatiale et temporelle des précipitations de 1971 à 2010 dans le bassin versant du Sine Saloum (Sénégal), *Algerian J. Env. Sc. Technology*, **6:2 (2020) 1310-1322**