

## **VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE AU SAHEL SÉNÉGALAIS : ÉVALUATION DU RETOUR PROGRESSIF VERS LA NORMALE**

**Demba GAYE\* et Seydou Alassane SOW**

*Laboratoire Leïdi, Dynamiques des territoires et développement, Université  
Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal*

---

\* Correspondance, e-mail : [gaye.demba@ugb.edu.sn](mailto:gaye.demba@ugb.edu.sn)

### **RÉSUMÉ**

Sur la période 1951-2015, le Sahel sénégalais a connu de très fortes fluctuations pluviométriques aussi bien à l'échelle inter-annuelle que décennale. Au Sahel, de façon générale et comparativement à la moyenne de la période, la pluviométrie a d'abord été excédentaire, puis fortement déficitaire et avant de revenir progressivement vers la normale (normale entendue ici comme la situation avant sécheresse). L'objectif de ce travail est justement de vérifier le niveau de ce retour à des conditions humides au Sahel sénégalais après la longue période déficitaire caractéristique des années de sécheresse climatique sahélienne. Dans ce sens, nous avons appliqué le test de Buishand aux séries pluviométriques de 10 stations de la zone d'étude. Ceci nous permet de détecter les ruptures dans l'évolution de la pluviométrie. Les résultats révèlent que le retour à des conditions plus humides est beaucoup plus manifeste au nord de la région où un point de reprise est identifié pour chacune des stations. La division de la série en sous-série nous a renseigné sur la tendance (l'importance de la reprise) actuellement observée dans la région. L'évolution des paramètres clés qui déterminent en grande partie le comportement de la pluviométrie, à savoir le nombre de jours de pluie, les dates de début et de fin (durée) de l'hivernage et le nombre de jours de pluies intenses, est aussi analysée. Le résultat indique que ces paramètres ont tous connu une forte augmentation de la période déficitaire à la période actuelle. Ceci témoigne du retour à des conditions de plus en plus humides dans ce Sahel sénégalais.

**Mots-clés :** *Sahel sénégalais, pluviométrie, retour, conditions humides, période actuelle.*

**ABSTRACT****Rainfall variability in the Senegalese Sahel : assessment of the gradual return to normal**

Over the period 1954 to 2013, the Sahel of Senegal has experienced considerable fluctuations in rainfall both at the inter-annual and decadal. In the Sahel, in general and compared to the average over the period, the rainfall was initially surplus, then heavily deficit and before returning gradually to normal (normal understood here as the situation before drought). The objective of this work is precisely to verify the level of this return to humid conditions in the Sahel of Senegal after the long deficit period characteristic of years of Sahelian climatic drought. In this sense, we applied the Buishand test to the rainfall series of 10 stations in the study area. This allows us to detect ruptures in the evolution of rainfall. The results show that the return to more humid conditions is much more obvious in the north of the region where a checkpoint is identified for each station. The division of the series in subseries has informed us about the current trend (the importance of the recovery) in the region. The evolution of the key parameters that largely determine the rainfall behavior, namely the number of rainy days, the start and end dates (duration) of wintering and the number of days of intense rain, is also analyzed. The result indicates that all of these parameters experienced a sharp increase from the deficit period to the current period. This testifies to the return to more and more humid conditions in this Sahel of Senegalese.

**Keywords :** *Sahel of Senegal, rainfall, return, humid conditions, current period.*

**I - INTRODUCTION**

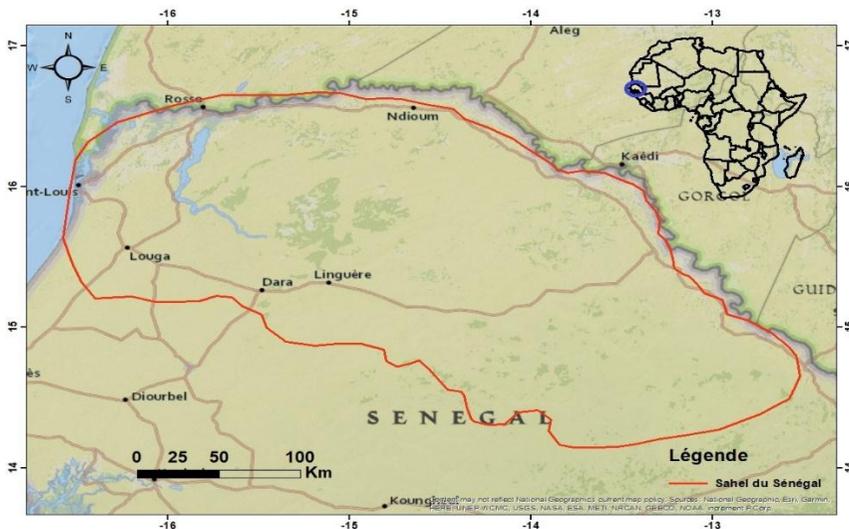
Au Sahel Sénégalais, la caractéristique principale de la pluviométrie reste sa variabilité aussi bien à l'échelle saisonnière et inter-annuelle. En outre, la distribution interannuelle des précipitations dans cette région est étroitement liée à la pénétration des flux de mousson, au comportement des lignes de grains et par conséquent reste tributaire de l'ensemble du système climatique ouest-Africain. Le suivi de la pluviométrie annuelle sur une longue série dans les stations sahéliennes révèle une véritable alternance des déficits et excédents. Cependant deux constats majeurs caractérisent la pluviométrie en cette grande région climatique. Le premier est relatif à la rupture de tendance généralisée qui, depuis les années 50, ne serait détectée qu'une seule fois [1]. Si pour l'essentiel des stations sahéliennes ce point de rupture est notée en 1968, « *date correspondant au début d'une succession d'années très sèches en zone sahélienne* » [2], aux stations du Sahel sénégalais, la rupture ne sera notée qu'une voire deux années plus tard. Ceci s'explique par le fait qu'au Sahel, la

sécheresse s’amorce un peu plus tardivement au fur et à mesure que l’on avance vers le sud. Or le Sahel sénégalais correspond justement à la limite méridionale de la région sahélienne. Le second constat, d’ailleurs la problématique de cette étude, est le probable retour à la normale que [3, 4] qualifient de « *retour apparent vers les conditions humides* », qui serait noté dès la fin des années 90 dans plusieurs stations du Sahel, ceci après la longue et intense période de sécheresse qu’a connue la région. Au Sahel sénégalais cette reprise est amorcée au courant de la décade 1990-1999, pour l’essentiel des postes présentant un retour à des conditions humides. L’objectif de ce travail est d’évaluer à travers les différentes stations de la région, le niveau du retour vers les conditions humides au Sahel sénégalais, après une longue période de rupture de tendance. Il s’agira spécifiquement de détecter pour chacune des stations le point de reprise dans la série et d’évaluer ainsi à travers les hauteurs d’eau annuelle, le nombre de jours de pluie, la durée de l’hivernage et le nombre de pluies intenses, l’importance de la reprise comparativement à la période de rupture.

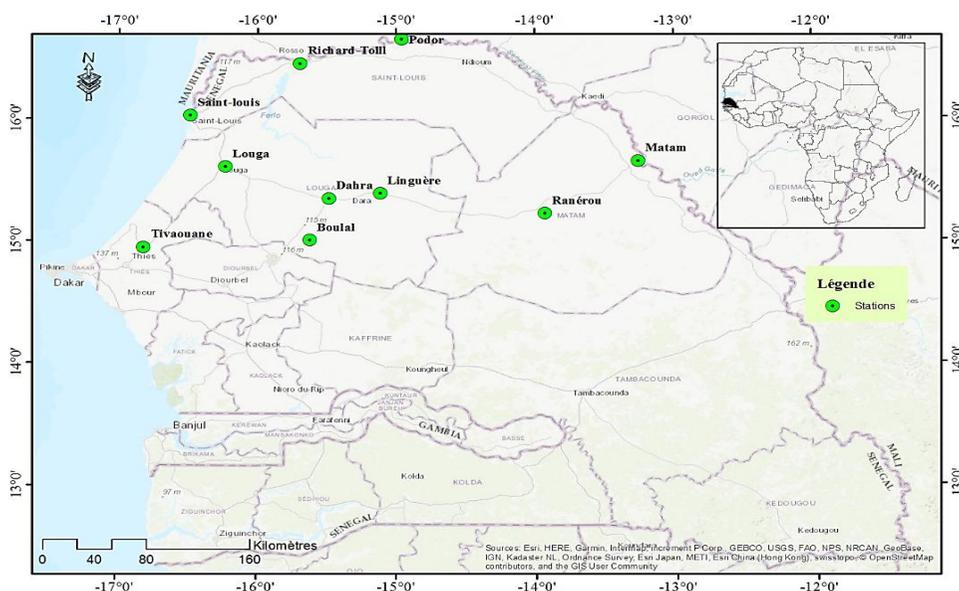
## II - DONNÉES ET MÉTHODES DE TRAITEMENT

### II-1. Présentation de zone d’étude et positionnement des stations utilisées

Le Sahel sénégalais s’étend approximativement entre les latitudes 14°30 Nord et 16°15 Nord et entre les longitudes 12°50 Ouest et 16° Ouest (**Figure 1**). De façon précise, il s’étend entre la latitude de Linguère (15°23’N) au sud jusqu’à la latitude de Podor (16°38’N) au nord. En longitude, il va de l’axe Saint-Louis-Potou (16°27’W) jusqu’à Matam (14°56’W), soit une superficie de 40 680 km<sup>2</sup>.



**Figure 1 :** Localisation du Sahel sénégalais. La carte est faite à partir de la base en ligne ArcGIS



**Figure 2 : Positionnement des stations utilisées**

Cette définition du Sahel sénégalais est faite selon les conditions physiogéographiques (la couverture végétale est en générale composée d'épineuses et est dominée par des espèces comme le *Balanites aegyptiaca* et des acacias, typiquement sahéliennes) mais aussi et surtout compte tenu des cumuls pluviométriques appliquée à la grille d'analyse (0-2000 mm) utilisée en Afrique de l'ouest et délimitant le Sahel entre les isohyètes 100 et 500 mm. Cette zone se caractérise en général par une faiblesse des totaux pluviométriques. Ici, les pluies d'hivernage constituent l'essentiel des précipitations et se concentrent quasiment sur trois mois (juillet, août et septembre), elles s'étalent exceptionnellement jusqu'au mois d'octobre. Dans cette région, la fréquence et l'intensité de l'harmattan, la durée de l'ensoleillement sont à l'origine d'une importante demande évaporatoire surtout en période d'hivernage. Les longues pauses pluviométriques entraînent souvent un comblement du réseau hydrographique, sous l'effet des débris de sable amenés par l'érosion éolienne. La sécheresse climatique persistante explique une forte concurrence des espèces végétales au sol pour l'extraction de l'eau.

## II-2. Origine et types de Données

Les données utilisées dans cette étude ont été recueillies à l'ANACIM (l'Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie) du Sénégal et concerne les séries pluviométriques journalières et les totaux annuels, le nombre de jours de pluies. À partir des données pluviométriques journalières,

nous avons obtenu celles de dates de début et de fin d'hivernage ainsi que celles du nombre de jours de pluie intense (supérieure à 40 mm). Le **Tableau 1** présente les stations utilisées dans cette étude ainsi que les périodes d'observation. La **Figure 2** indique le positionnement de ces stations.

**Tableau 1 :** *Caractéristiques des stations utilisées, périodes d'observation et années de rupture et de reprise de tendances pluviométriques. Les coordonnées géographiques sont de type métrique*

Stations	Coordonnées		Période d'observation	Année de rupture	Année de reprise
	Latitude	Longitude			
Saint-Louis	341431	1773221	1951-2015	1969	1997
Podor	504335	1841958	1951-2015	1970	1992
Matam	686750	1732098	1951-2015	1969	1998
Linguère	488058	1702146	1951-2015	1969	pas de reprise
Louga	368281	1726667	1951-2015	1969	pas de reprise
Tivaouane	305127	1653921	1951-2013	1970	pas de reprise
Richard-Toll	425905	1819853	1951-2013	1970	1992
Ranérou	626204	1747778	1963-2015	1970	1986
Dahra	448163	1697749	1951-2004	1970	pas de reprise
Boulal	442376	1579307	1951-2012	1969	pas de reprise

### II-3. Détection des ruptures

L'objectif premier de ce travail étant de détecter les différentes ruptures et reprises majeures intervenues au cours de la série pour chaque station, nous avons appliqué le test de Buishand, capable d'estimer la position d'un changement de moyenne, marquant le début d'une phase pluviométrique. Ce test statistique est défini à partir du maximum de la somme cumulée des écarts à la moyenne et à la médiane. Il fait référence au modèle simple qui suppose un changement de la moyenne dans la série. Pour tout changement de moyenne survenant au milieu de la série, la statistique  $U$  (moyenne avant le changement) du test s'avère performante. [5] démontre par ailleurs que la série  $Sk/O$  (écarts cumulatifs des moyennes) suit une loi normale de moyenne nulle et de variance  $k(n-k) O^2/n$  (sous l'hypothèse de stationnarité). Le but de ce test est de détecter un changement de la moyenne dans une série chronologique après  $m$  observations.

$$E(x_i) = \mu \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

$$E(x_i) = \mu + \Delta \quad i = m + 1, m + 2, \dots, n \quad (2)$$

Où  $\mu$  est la moyenne avant le changement et  $\Delta$  est le changement de moyenne. Les écarts cumulatifs des moyennes sont calculés comme suit :

$$S'_O S'_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

Les sommes partielles ajustées et remesurées sont obtenues en divisant les valeurs de  $S_k^*$  par l'écart type :

$$S^* k = s_k^* / D_{\mathbf{x}} \quad (4)$$

$$D_k^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5)$$

La *Formule* statistique du test est par conséquent :

$$Q = \max |S'_k| \quad (6)$$

Le test de Buishand a été appliqué sur les hauteurs annuelles de pluies à l'aide du logiciel de l'IRD *Kronostat*. Les ellipses représentent la somme des écarts cumulés et son intervalle de confiance. Après détection de reprise, nous procéderons pour les stations concernées à la division de la série en sous-séries (de l'avant rupture à l'année de rupture, de l'année de rupture à l'année de reprise et de l'année de reprise à l'actuel) pour suivre l'évolution de la situation avant et après les ruptures et surtout voir la situation au cours de la période de reprise comparée aux autres sous périodes (périodes avant sécheresse et période de sécheresse). Ceci dans le but d'évaluer le niveau de retour à des conditions humides comparativement à la période précédente.

#### II-4. Détermination des dates de début et de fin de l'hivernage

Pour la détermination des dates de début et de fin d'hivernage, nous appliquerons nos séries de données pluviométriques journalières aux critères de [6, 7] pour qui, la date du début de l'hivernage est le premier jour où la pluviométrie cumulée avec celles des deux jours précédents atteint 20 mm et

plus, sans qu'il soit suivi pendant les 30 jours suivants d'une séquence sèche excédant 7 jours [8]. La date de fin de l'hivernage est le dernier évènement de plus de 10 mm non précédé par un épisode sec de plus de 20 jours [6]. Ce travail sera fait à l'aide du logiciel Excel et ces dates seront identifiées suivant les périodes avant et après les points de reprise, ceci dans le but de vérifier le comportement de l'hivernage du point de vue de la durée (éventuel allongement) comparativement à la période pré-reprise.

## II-5. L'interpolation spatiale

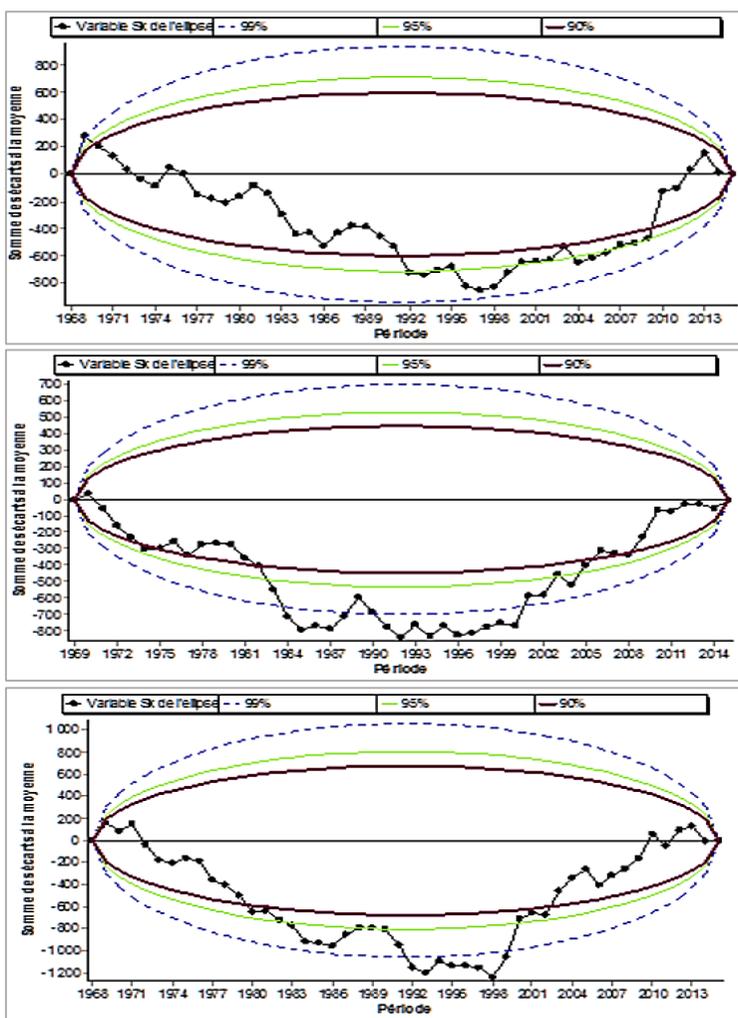
L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation des points avec des valeurs connues pour des valeurs estimées à d'autres points dont les valeurs sont inconnues. La méthode d'interpolation utilisée dans le cadre de cet article est celle de la Pondération par l'Inverse de la Distance (IDW). Dans la méthode d'interpolation IDW, les points d'échantillons sont pondérés durant l'interpolation de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre décline avec la distance du point inconnu à créer. La pondération est appliquée à un échantillon de points par le biais de l'utilisation d'un coefficient de pondération qui contrôle comment l'influence de pondération diminuera quand la distance des nouveaux points augmente. Plus le coefficient de pondération est grand, moins les points auront d'effet s'ils sont loin du point inconnu durant le processus d'interpolation. Quand le coefficient augmente, la valeur du point inconnu s'approche de la valeur du point d'observation le plus proche. Il est important de noter que la méthode d'interpolation IDW a aussi des désavantages : la qualité du résultat d'interpolation peut diminuer si la distribution des échantillons est irrégulière.

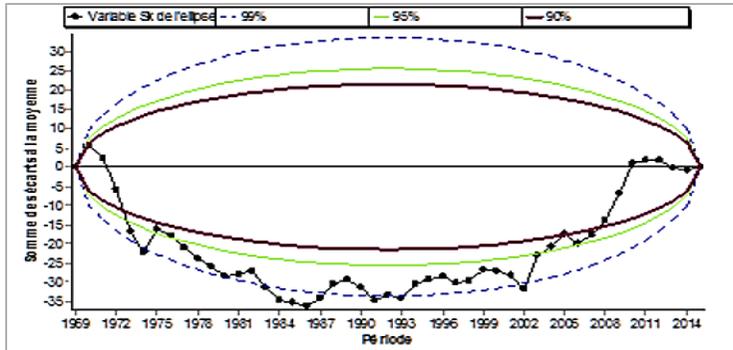
De plus, les valeurs maximales et minimales dans la surface interpolée peuvent seulement se produire aux points de données. Il en résulte souvent des petits pics et creux autour des points de données échantillon. Il faut aussi ajouter la faible densité du nuage de points car seulement, des données de 10 stations ont été considérées. Ceci se justifie par la faiblesse de la densité du réseau de pluviomètre dans cette zone sahélienne du Sénégal. Au total, nous avons généré cinq quartes d'interpolation grâce à la fonction *Outil 3D Analyst* du logiciel Arc Gis. Les données utilisées sont obtenues par exploitation de la base de données de l'ANACIM et s'échelonne sur une durée de 65 années (1951-2015). Il s'agit de la variation en pourcentage de la reprise pluviométrique, de la variation du nombre de pluies intenses avant et après la reprise pluviométrique, de la variation du Nombre Total de Jours de Pluies (NTJP) avant et après les reprises pluviométriques. L'ensemble de ces techniques méthodologiques employées dans ce travail nous permettra d'abord de détecter les éventuels points de reprise suivant les stations du Sahel sénégalais et ensuite de vérifier à travers les différents paramètres le niveau de la reprise et donc l'importance du degré de retour à des conditions humides.

### III - RÉSULTATS

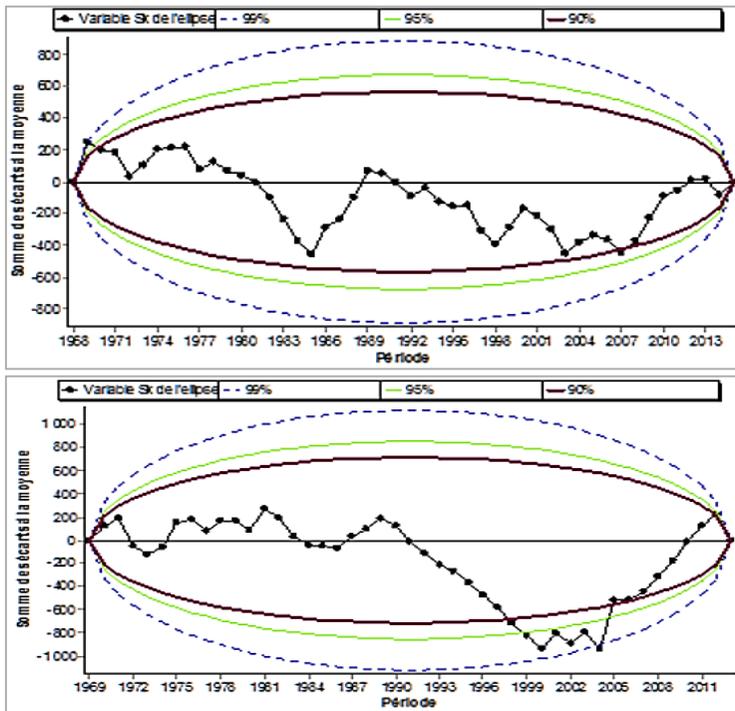
#### III-1. Retour vers des conditions de plus en plus humides, Stations concernées et années de reprise

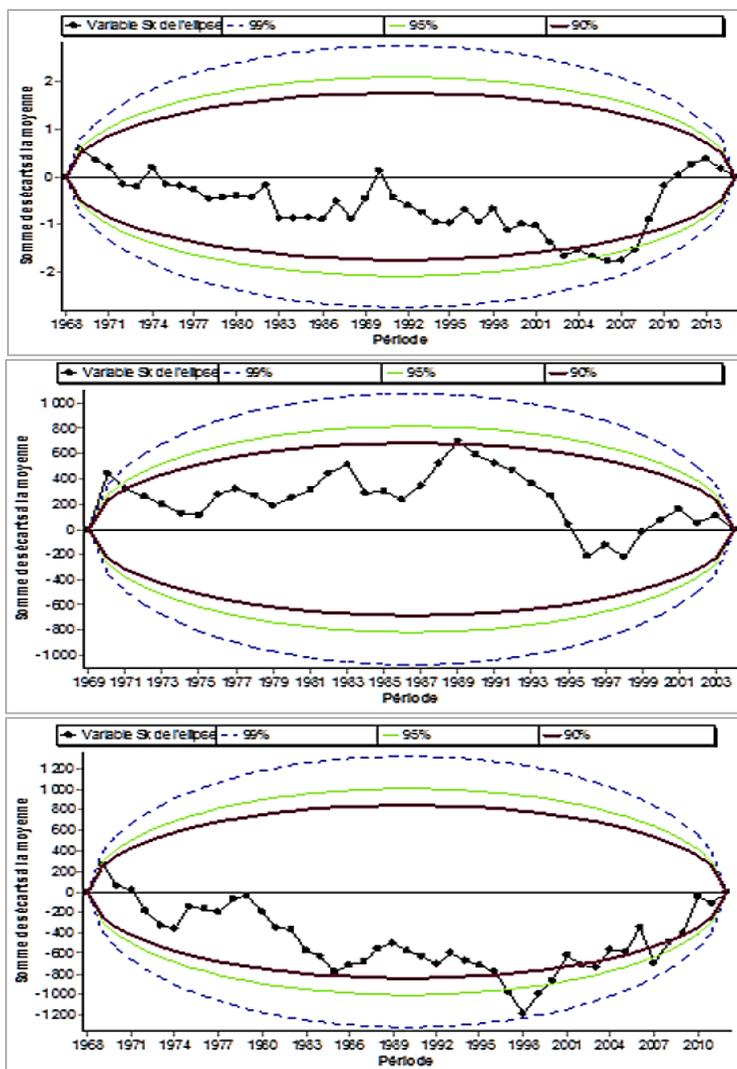
Les résultats du test de Buishand sont présentés sous forme d'ellipses (*Figures 3 et 4*). Elles permettent de constater que les séries chronologiques de pluies suivent une loi normale et témoignent l'existence de rupture (reprise) pour 5 de nos 10 stations (Saint-Louis, Podor, Matam, Richard-Toll, Ranérou) utilisées dans ce travail. Aucune reprise n'est notée pour les stations de Louga, Tivaouane, Linguère, Dahra et Boulal.





**Figure 3 :** Ellipses de Bois des séries de pluies annuelles des stations présentant un retour pluviométrique : (du haut en bas) Saint-Louis, Podor, Richard-Toll, Matam, Ranérou





**Figure 4 :** *Ellipse de Bois des séries de pluies annuelles des stations ne présentant pas un retour pluviométrique : (du haut en bas) Louga, Tivaouane, Linguère, Dahra, Boulal*

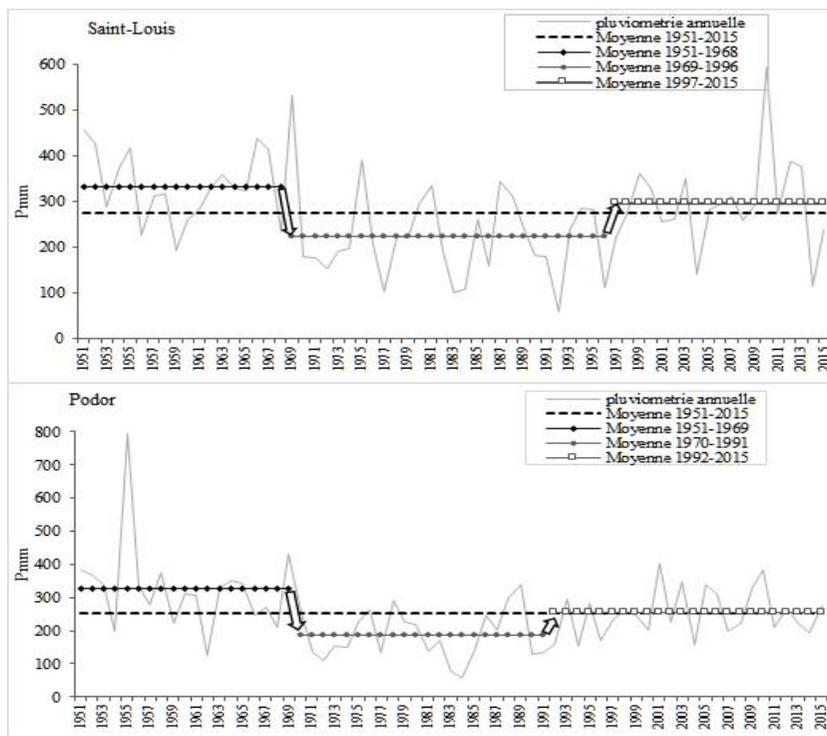
Il importe ainsi de noter que le retour progressif à la normale est beaucoup plus manifeste au nord de la région où un point de reprise est identifié pour chacune des stations. Hormis celles-ci, Ranérou, situé au cœur du Ferlo est la seule station de la région où un retour à des conditions plus humides est constatée. L'allure des variables  $Sk$  (somme des écarts à la moyenne) des ellipses des séries de pluviométrie de ces stations où un retour est noté (Saint-Louis, Podor, Richard-Toll, Matam et Ranérou) révèle une non-stationnarité. En effet, plusieurs points correspondant à la somme des écarts cumulés à la moyenne

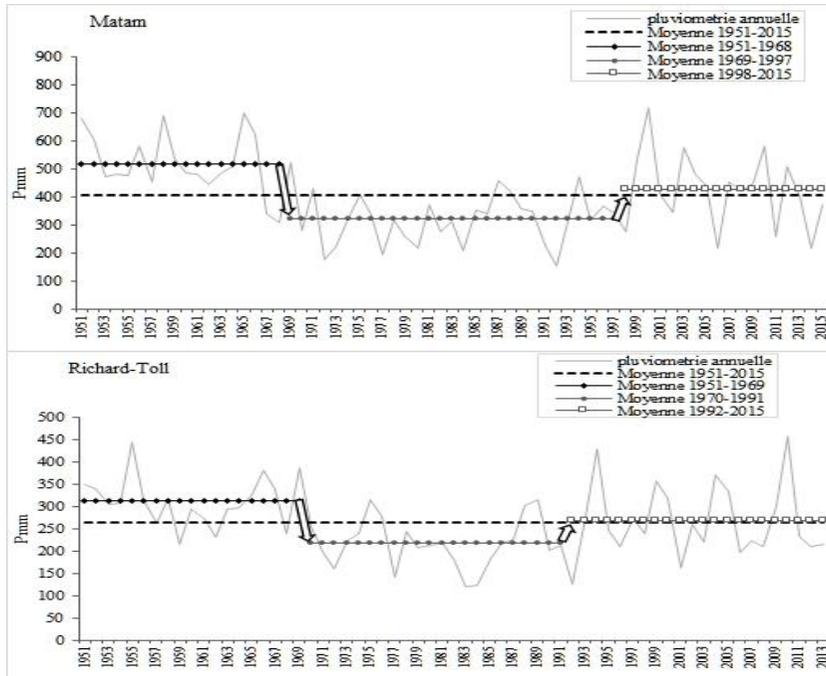
sortent des intervalles de confiance qui sont respectivement de 99 %, 95 % et 90 %. Le test place l'essentiel des reprises des séries pluviométriques de ces stations dans la décade 1990-1999 (1992 pour les stations de Podor et Richard-Toll, 1997 pour la station de Saint-Louis et 1998 pour la station de Matam). Seule la station de Ranéroou présente un point de reprise un peu plutôt, en 1986.

### III-2. L'importance de la reprise selon les stations

#### III-2-1. Évaluation des totaux annuels et du nombre de jours de pluie avant et après reprise

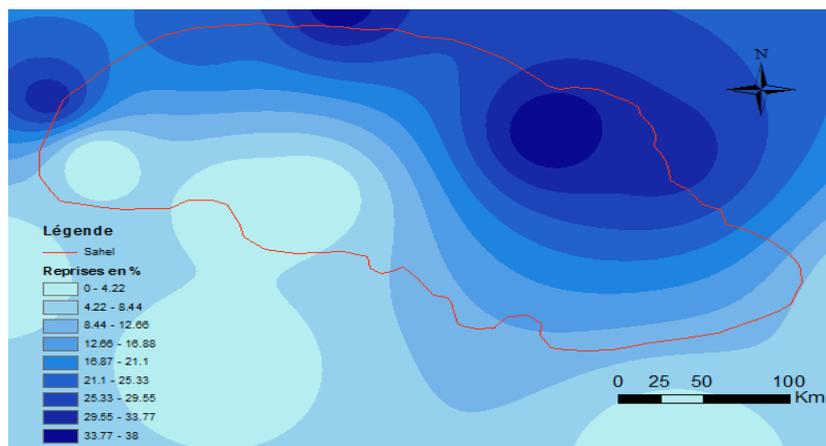
Au regard de la **Figure 5** on remarque pour chaque station que la période précédant les années de retour pluviométrique a été caractérisée par des années de forts déficits pluviométriques. Au Sahel sénégalais, elle a constitué une véritable « période de sécheresse » avec comme ce fut le cas dans la bande sahélo-soudanienne, une baisse dramatique des précipitations [9]. La spécificité de cette anomalie réside dans sa durée et sa persistance. Cependant, on constate qu'une tendance de retour progressif vers la normale pluviométrique est notée pour la plupart des stations de la région notamment celles du nord entre la fin des années 1980 et durant la décennie 1990-1999 (**Figure 5**).





**Figure 5 :** Périodes de rupture et de reprise aux stations de Saint-Louis, Podor, Matam, Richard-Toll et Ranérou (1954-2013)

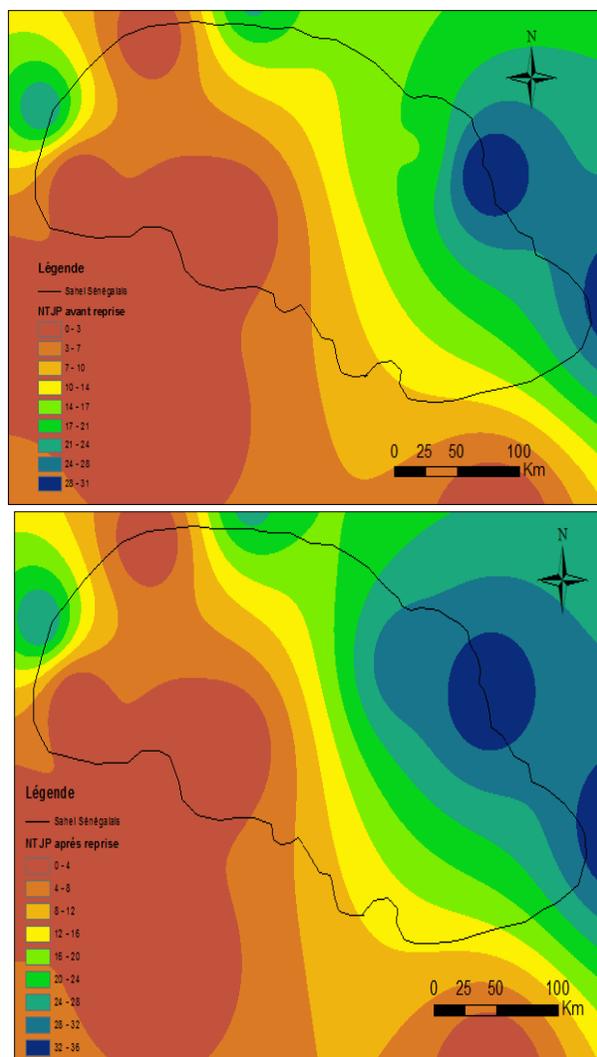
Quand on compare les moyennes de sous-séries pluviométriques de la période suivant la rupture et celle actuelle (après reprise) pour chacune des stations, on observe l'ampleur de cette tendance de retour vers des conditions de plus en plus humides, évoluant ainsi petit à petit vers la situation de l'avant sécheresse.



**Figure 6 :** Variation spatiale de la reprise de pluviométrie (en pourcentage d'augmentation de la période sèche à la période actuelle) au Sahel Sénégalais

L'analyse de la **Figure 6** montre que la reprise pluviométrique varie fortement à l'échelle de la zone sahélienne du Sénégal. Les stations du nord présentent les plus importantes reprises même si comparativement à la période avant sécheresse un gap "plus ou moins considérable" reste à combler. En effet, par rapport à la période avant sécheresse, nous sommes (à la période actuelle) à "seulement" à -18 % à la station de Matam, à -23 % à Podor, à -11 % à Saint-Louis et à -14 % à la station de Richard-Toll, soit respectivement une reprise de 32 % ; 36 % ; 32 % et 23 % comparée à la période de sécheresse. Cependant, au niveau des stations plus au sud de la région, les reprises pluviométriques après les années de rupture ont été très timides voire même nulles. C'est le cas des stations de Linguère, Louga, Dahra et Boulal qui, depuis la rupture pluviométrique des années 1970, n'ont pas connu de reprise vers la normale, autrement dit qu'elles présentent jusqu'ici les caractéristiques pluviométriques annuelles sans une variabilité remarquable.

Dans cette partie méridionale du Sahel sénégalais, seule la station de Ranérou a connu une reprise estimée à 38 %. Le cas de Ranérou est un peu particulier du fait non seulement qu'elle est la seule station hors de la zone du nord de la région à présenter un point de reprise pluviométrique après les années de sécheresse, mais aussi parce qu'ici la reprise est amorcée bien avant qu'au niveau des stations du nord, seule zone du Sahel sénégalais où le retour à des conditions humides est générale. La station de Ranérou présente un point de reprise dès 1986 soit seulement deux années après la seconde vague de sécheresse climatique sahélienne 1983-1984 et 6 années avant la reprise aux stations de Podor et Richard-Toll voire même une décennie avant que les stations de Saint-Louis et Matam n'amorcent le retour à des conditions plus humides. De façon générale, une reprise d'environ 25 à 40 % des hauteurs d'eau est notée suivant les stations concernées, ce qui témoigne un retour considérable durant la période actuelle comparée aux années de rupture pluviométrique.



**Figure 7 :** Variation spatiale du NTJP avant (à gauche) et après (à droite) les reprises pluviométriques dans le Sahel sénégalais

Dans une étude sur le suivi de la pluviométrie au nord Sénégal, [10] a montré qu'il existe une corrélation assez parfaite entre le nombre de jours de pluie et le comportement pluviométrique annuel. L'analyse de ce paramètre serait dès lors très intéressante dans l'étude comparative des tendances pluviométriques. Les cartes avant et après les reprises pluviométriques (**Figure 7**) mettent encore en évidence une variation de ce paramètre à l'échelle du Sahel sénégalais. Il faut constater que le nombre de jours de pluies a connu une hausse après les reprises pluviométriques qui se sont opérées au niveau de certaines stations du Sahel. Avant les reprises, les stations plus au sud comme

Linguère, Dahra ou Boulal avaient des nombres de jours de pluies pas trop importantes. C'est plutôt la station de Matam qui prenait le dessus avec des valeurs moyennes oscillant entre 24 et 31 jours annuels de pluies. Après les reprises, le nombre de jours de pluies a connu une hausse surtout au niveau des stations du nord de la région (Matam, Podor et Richard Toll) contrairement aux stations du sud de la région où aucune hausse remarquable n'est notée depuis les années de sécheresse. Si nous comparons les moyennes annuelles du nombre de jours de pluie au niveau des stations où la reprise est notée, on observe partout une hausse de 5 (comme à Saint-Louis, Podor et Matam) à 10 jours de plus (c'est le cas à Ranérou) de plus durant la période actuelle comparativement à l'avant reprise. Ce qui, compte tenu de la corrélation avec le comportement pluviométrique annuel révélé, témoigne parfaitement le retour progressif à la normale pluviométrique dans ces stations du Sahel sénégalais. L'évaluation des reprises pluviométriques doit aussi se faire à travers celle des dates de début et de fin de l'hivernage mais aussi en tenant en compte de l'évaluation du nombre moyen de pluies intenses avant et après les périodes de reprises pluviométriques.

### ***III-2-2. Allongement de l'hivernage et hausse des pluies journalières intenses***

Au Sénégal, en moyenne la saison des pluies démarre en juillet (le 4 juillet selon [11]). Cependant, les dates de début et de fin des pluies restent très aléatoires. Pour la détermination de ces dates de début et de fin au Sahel sénégalais, nous avons appliqué nos séries de données journalières aux critères de [6, 7] pour qui, la date du début des pluies est le premier jour où la pluviométrie cumulée avec celles des deux jours précédents atteint 20 mm et plus, sans qu'il soit suivi pendant les 30 jours suivants d'une séquence sèche excédant 7 jours [8]. Dans toutes les stations où un retour vers la normale pluviométrique est détecté, un allongement de l'hivernage est constaté par rapport à la période de sécheresse et l'on tend progressivement vers une durée de la saison des pluies similaire que celle de l'avant sécheresse. En effet la date de début a connu une précocité d'une décade comparée à la période des années de rupture pluviométrique et celle de fin d'hivernage un décalage d'une décade à deux semaines suivant les stations.

**Tableau 2 :** Observation (%) des dates de début et de fin d'hivernage avant et après la reprise pluviométrique aux stations de Saint-Louis (en haut), Matam (au milieu) et Ranérou (en bas)

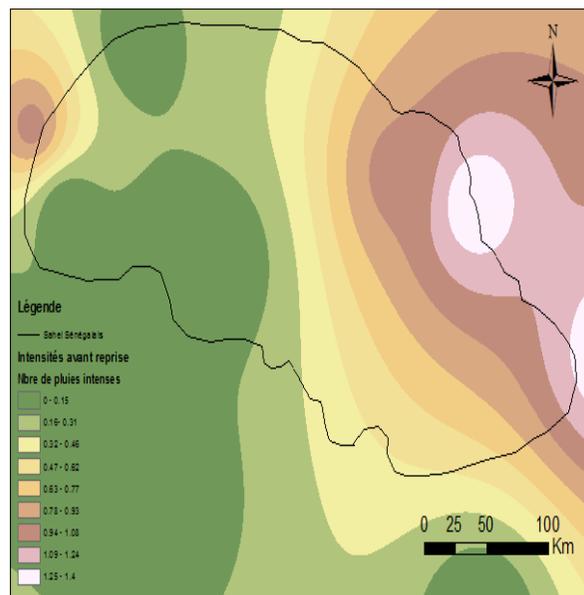
		Juin			Juillet			Aout			Septembre			Octobre		
Décade		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Date de Début	Avant sécheresse			16	28	24	20	12								
	Avant reprise (%)				4	15	19	22	19	15	4	4				
	Après reprise (%)				16	24	20	24	4	12						
Date de Fin	Avant sécheresse													38	48	14
	Avant reprise (%)										20	40	16	12	12	
	Après reprise (%)										5	18	45	23	9	

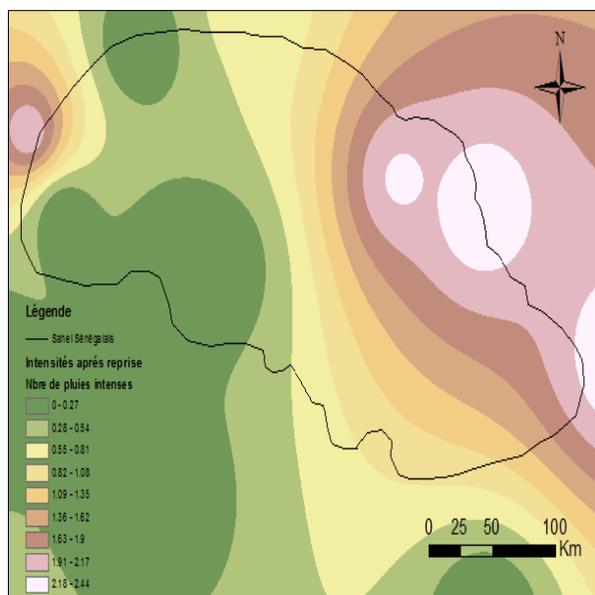
		Juin			Juillet			Aout			Septembre			Octobre		
Décade		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Date de Début	Avant sécheresse			11	70	19										
	Avant reprise (%)				3	34	38	7	17							
	Après reprise (%)				56	33	6	6								
Date de Fin	Avant sécheresse													25	50	25
	Avant reprise (%)										29	21	21	21	7	
	Après reprise (%)										6	39	11	33	11	

		Juin			Juillet			Aout			Septembre			Octobre		
Décade		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Date de Début	Avant sécheresse			13	72	15										
	Avant reprise (%)				25	33	42									
	Après reprise (%)				55	24	21									
Date de Fin	Avant sécheresse													19	52	29
	Avant reprise (%)										29	21	43	7		
	Après reprise (%)										4	14	25	36	21	

Si nous prenons l'exemple des stations de Saint-Louis, Matam et Ranérou (**Tableau 2**), on observe parfaitement un retour progressif à des conditions similaires que celles avant sécheresse. En effet, pour ces trois stations les résultats montrent qu'avant sécheresse, respectivement 52 %, 89 % et 87 % des dates de début de la saison de pluie oscillèrent entre les première et deuxième décades du mois de juillet, alors qu'à la période actuelle, Saint-Louis, Matam et Ranérou enregistrent entre ces deux décades (1<sup>er</sup>-20 juillet), respectivement 40 %, 89 % et 79 % des dates de début de l'hivernage. La même similitude entre ces deux périodes s'observe aussi pour les dates de fin d'hivernage, traduisant ainsi allongement de la durée de la saison de pluie à la période actuelle. Cet allongement de la durée de la saison de pluies à la période actuelle se confirme lorsque l'on compare la situation de l'avant reprise à celle après reprise. À la station de Saint-Louis, de 1969 (année de rupture) à 1996, 56 % des dates de début de l'hivernage oscillent entre le 1<sup>er</sup> et le 31 août contre 34 %, soit une année sur trois entre les deuxième et troisième décades du mois de juillet, alors que de 1997 (début de la reprise) à 2015, plus de deux années sur trois (68 %) connaissent un début d'hivernage entre la deuxième décade de

juillet et la première décade du mois d'août avec environ une année sur deux entre le 11 et le 31 juillet. Ce qui témoigne alors un début beaucoup précoce de l'hivernage depuis 1997 comparée à la période sèche. Quant à la date de fin de l'hivernage, elle oscillait à 60 % des cas, soit environ 2 années sur 3 entre les deuxième et troisième décades de septembre durant la période de rupture (1969-1996), contrairement à la période de reprise (1997-2015) où plus de 70 % des hivernages ont connu une fin oscillant entre les 1<sup>ère</sup> et 3<sup>e</sup> décades d'octobre. Ce qui révèle une fin d'hivernage beaucoup plus tardive depuis l'année de reprise (1997) comparativement aux années de rupture. Un début d'hivernage beaucoup plus précoce avec une fin beaucoup plus tardive traduisent par conséquent un allongement de l'hivernage, qui en partie, constitue un élément important de ce retour à des conditions plus humides. Cette situation observée à la station de Saint-Louis est partout la même au niveau des stations où une reprise pluviométrique est notée. Aux stations de Matam et de Ranérou, les observations confirment suffisamment cette situation relative aux dates de début et de fin de l'hivernage à la période actuelle comparativement à celle précédente. Présentement à Matam, environ 9/10<sup>e</sup> des dates de début d'hivernage sont connues entre les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> décades du mois juillet dont plus ½ entre le 1<sup>e</sup> et le 10 juillet, contrairement aux années avant reprise où 72 % des dates de début de l'hivernage oscillaient entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> décades de juillet. Quant aux dates de fin d'hivernage, plus 8/10<sup>e</sup> (82 %) ont exclusivement été connues au courant du mois d'octobre à la station de Ranérou dont 57 % entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> décades à la période de reprise, alors que durant la période pré-reprise, 93 % des dates de fins de l'hivernage oscillaient entre la 2<sup>e</sup> décade du mois de septembre et la 1<sup>ère</sup> décade d'octobre. Ces résultats obtenus au niveau de ces différentes stations confirment parfaitement cet allongement de l'hivernage et donc le retour vers la normale pluviométrique.





**Figure 8 :** *Variation spatiale du nombre de pluies intenses avant (à gauche) et après (à droite) les reprises pluviométriques dans le Sahel sénégalais*

Si nous considérons à présent les pluies journalières intenses ( $> 40$  mm, selon la définition de [12]), l'analyse de cartes (**Figure 8**) témoigne une forte variabilité spatiale du nombre de pluies journalières intenses au niveau de cette zone sahélienne du Sénégal. Il apparaît que le nombre de pluies journalières intenses a progressivement augmenté après les reprises pluviométriques. En effet, les pluies journalières intenses avant les reprises pluviométriques étaient plus marquées au niveau de la partie nord du Sahel sénégalais, Saint-Louis, Podor et Matam. La partie plus au sud (stations de Tivaouane, Dahra, Linguère et Boulal) sont défavorisées par leur situation, le nombre de pluies journalières intenses est faible par rapport au nord. Après les reprises pluviométriques, la situation garde un schéma analogue avec le précédant, avec cependant une hausse progressive d'une année à une autre du nombre total de pluies intenses à l'échelle du Sahel sénégalais plus particulièrement aux stations du nord de la région, témoin d'un retour progressif vers la normale de la pluviométrie. En moyenne annuelle, le rapport pluies journalières intenses avant reprise et après reprise est de 0,5/1 à Saint-Louis et à Matam soit une hausse de 50 % et de 0,3/1 à Podor soit trois fois plus de pluies journalières intenses à la période actuelle. Ce qui est clairement révélateur de ce retour à la normale pluviométrique détecté au niveau de ces stations du Sahel sénégalais.

#### IV - DISCUSSION

Aux stations sahéliennes du Sénégal, la série 1951-2015 reste marquée par une forte variabilité inter-annuelle des précipitations. Ceci est en total accord avec le constat de [1] « *les grands écarts pluviométriques interannuels sont une des caractéristiques du climat sahélien* ». Ces fluctuations pluviométriques en ce Sahel sénégalais sont aussi en phase avec les résultats des études prenant en considération toute la région ouest africaine telle celle de [13] et fortifiées par les travaux de [14 - 16]. Toutes ont observé la très grande variabilité interannuelle des précipitations. Dans ce sens, il ressort de cette étude qu'un retour à la normale, autrement dit à des conditions de plus en plus humides est amorcé dans la plupart des stations de cette région notamment dans sa partie nord où toutes les stations affichent un point de reprise comparativement à la tendance observée depuis les années de sécheresse. Ces résultats sont en phase avec la quasi-totalité des travaux ayant suivi l'évolution de la pluviométrie notamment dans la région du Sahel. C'est le cas de [17] qui, analysant les caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015, notent qu'après que la région ait connu une modification de son régime pluviométrique depuis la fin des années 1960, qui s'est traduite par une période de baisse des cumuls pluviométriques et des pluies journalières, « *la pluviométrie régionale a amorcé un retour vers des périodes plus humides depuis la fin des années 1980 et les décennies 1990 et 2000* ».

[18] généralisent ce retour progressif à la normale à l'échelle du Sahel en soulignant que « *l'espoir de retrouver un Sahel reverdi semble cependant renaître avec le regain des activités pluvieuses et des cumuls pluviométriques supérieurs à la normale des années 1961-1990* ». Par ailleurs, alors que comme le soulignent [19] « *les postes sahéliens ne connaissant de reprise que durant la décennie 2001-2010* », au Sahel sénégalais la reprise est amorcée pour l'essentiel des stations affichant un retour pluviométrique au courant de la décennie 1990-1999. Nos résultats ne sont cependant pas identiques à ceux de [20] qui observent un retour à des meilleures conditions pluviométriques depuis le milieu des années 1990. La comparaison des sous-séries avant et après reprise, révèle une différence des hauteurs d'eau annuelle de l'ordre de 25 à 40% suivant les stations. [21] constatent sous ce même registre que le retour à des conditions plus humides dans certaines régions sahéliennes distingue ces dernières années aux décennies sèches 1970 et 1980. Ces observations sont donc en phase avec les résultats de cette étude. L'analyse du retour à la normale pluviométrique a aussi été abordée en tenant en compte notamment de l'évolution de la durée de l'hivernage et celles des pluies journalières intenses. Nos résultats indiquent que dans toutes les stations où un retour est noté, on assiste de plus en plus à un allongement de l'hivernage (début plus précoce et fin plus tardive) qui, depuis les années de rupture de

tendance connaissait un raccourcissement sans précédent. [22] ont comparé la durée de l'hivernage entre les périodes 1961-1974, 1975-1998 et 1999-2012, et ont noté que la durée de l'hivernage de la troisième période se rapprochait de celle de la première période, et est donc plus favorable que celle de la période 1975-1998 qu'ils qualifient d'ailleurs de défavorable. Par ailleurs, il ressort de cet article que le nombre de pluies intenses a progressivement augmenté depuis les reprises pluviométriques avec un facteur 2 à 3 selon les stations. Ce retour progressif des pluies intenses corrélativement au retour à des conditions plus humides a aussi été constaté par [23], qui notent dans ce sens que « *le nombre de jours de pluies très intenses connaît une amélioration perceptible dans toutes les stations de l'Ouest nigérien après les années 2000* ». [24] ont fait les mêmes observations au bassin du Niger moyen et constatent « *que les pluies de plus forts cumuls (plus de 40 et 50 mm respectivement) ont atteint durant la décennie 2001-2010 les plus hauts niveaux qu'elles avaient dans les années 1951-1970, tant en nombre d'évènements qu'en cumul des précipitations correspondant à ces évènements* ». L'étude de [17] révèle que l'amélioration de la pluviométrie au centre-nord de Burkina Faso est due à une augmentation des évènements pluvieux quotidiens de forte intensité, épisodes qui avaient connu une baisse durant la période 1961-1990. De telles observations ont d'ailleurs été faites dans d'autres régions du Sahel ouest-africain par [25 - 27]. Ces différentes observations sont donc en phase avec nos résultats et confirment d'ailleurs l'assertion de [28] qui soutenaient que « *si un retour à des conditions climatiques plus humides se vérifie, des pluies journalières importantes devraient être à nouveau de plus en plus fréquentes* ».

## V - CONCLUSION

L'une des réalités climatiques du Sahel sénégalais reste sans doute les très fortes fluctuations pluviométriques qu'a connues la région au cours des dernières décennies. À partir de 1969-1970, la région Sahel sénégalais a connu une rupture de tendance marquant le début d'une longue période de fort déficit pluviométrique. Cependant, l'application du test de Buishand aux séries pluviométriques de 10 stations de la zone d'étude révèle qu'après cette rupture, plusieurs de ces stations ont connu un retour à des conditions plus humides. La vérification de cette tendance basée sur des éléments clés qui déterminent en grande partie le comportement de la pluviométrie à savoir le nombre de jours de pluie, les dates de début et de fin (durée) de l'hivernage et le nombre de jours de pluies intenses, révèle que tous ont connu une forte augmentation à la période actuelle comparativement à la période de sécheresse. Cependant, cette étude montre que ce retour à des conditions de plus en plus humides dans ce Sahel sénégalais est beaucoup plus manifeste aux stations nord de la région. Hormis celles-ci, la station de Ranérou, situé au cœur du Ferlo est la seule du reste de la région où un retour à des conditions plus humides est constatée.

## RÉFÉRENCES

- [1] - P. OZER, *Les Lithométéores en région sahélienne, un indicateur climatique de la désertification*. GEO-ÉCOTROP, *Revue internationale d'Écologie et de Géographie tropicales*, (2001) 327 p.
- [2] - S. BIGOT, P. CAMBERLIN, V. MORON, Y. RICHARD, « Structures spatiales de la variabilité des précipitations en Afrique : une transition climatique à la fin des années 1960 ? ». *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série II, Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre*, (1997) 181 - 188 p.
- [3] - S. E. NICHOLSON, « On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel », *Journal of Arid Environment*, N°63 (2005) 615 - 41 p.
- [4] - T. LEBEL, A. ALI, « Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007) », *Journal of Hydrology*, N°375 (2009) 52 - 64 p.
- [5] - T. A. BUIHAND, « Some methods for testing the homogeneity of rainfall records ». *Journal of Hydrology*, N°58 (1982) 11 - 27 p.
- [6] - M. V. K. SIVAKUMAR, « Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa », *Agric For Meteorol*, N°42 (1988) 295 - 305 p.
- [7] - M. V. K. SIVAKUMAR, *Drought Spells and Drought Frequencies in West Africa*, Research Bulletin, Icrisat Sahelian Center Patancheru, Andhra Pradesh, India, (1991) 180 p.
- [8] - C. HOUNDENOU, K. HERNANDEZ, « Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale) », *Sécheresse*, Vol. 9, N°1 (1998) 23 - 34 p.
- [9] - V. MORON, « Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992) », *Sécheresse*, Vol.7, N°1 (1996) 25 - 32 p.
- [10] - D. GAYE, « Suivi de la pluviométrie au Nord-Sénégal de 1954 à 2013 : étude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis », *Noroi*, Vol. 3, N° 244 (2017) 63 - 73 p.
- [11] - P. CAMBERLIN, R. OKOOLA, M. DIOP, P. VALIMBA, « Identification des dates de démarrage et de fin de saison des pluies : applications à l'Afrique de l'est et au Sénégal », *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, N°15 (2003) 295 - 303 p.
- [12] - P. CAMBERLIN, G. BELTRANDO, B. FONTAINE, Y. RICHARD, « Pluviométrie et crises climatiques en Afrique Tropicale : changements durables ou luctuations interannuelles ? », *Historiens et Géographes*, N°379 (2002) 263 - 273 p.
- [13] - R. MOREL, « Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest », *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*, (1998) 200 - 211 p.
- [14] - P. SAGNA, « L'évolution de la mousson et des précipitations au Sénégal de 1974 à 1993 », *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, N°7 (1994) 311 - 317 p.
- [15] - J.-B. NDONG, « L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la sécheresse récente sur l'environnement », *Revue de géographie de Lyon*, Vol. 70, N°3-4 (1995) 193 - 198 p.

- [16] - H. DACOSTA, Y. K. KONATE, R. MALOU, « La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle », *IAHS Publ.*, N°274 (2002) 499 - 506 p.
- [17] - P. N. KABORE, A. OUEDRAOGO, M. SANON, P. YAKA et L. SOME, « Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015 », *Climatologie*, N°14 (2017) 82 - 95 p.
- [18] - S. SENE et P. OZER, « Evolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal ». *Bulletin de la Société géographique de Liège*, N°42 (2002) 27 - 33 p.
- [19] - L. DESCROIX, DIOGUE A. NIANG, G. PANTHOU, A. BODIAN, Y. SANE, H. DACOSTA, M. MALAM ABDOU, J.-P. VANDERVAERE, G. QUANTIN, « Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : la Ségambie et le Bassin du Niger Moyen », *Climatologie*, N°12 (2015) 25 - 43 p.
- [20] - E. A. ALAMOU, G. M. L. D. QUENUM, E. A. LAWIN, F. D. BADOU, A. ABEL, A. A. AFOUDA, « Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'Ouémé, Bénin », *Afrique SCIENCE*, Vol. 3, N°12 (2016) 315 - 328 p.
- [21] - M. BALME, T. LEBEL, A. AMANI, « Années sèches et années humides au Sahel : quo vadimus? », *Hydrological Sciences Journal*, Vol.2, N°51 (2006) 254 - 271 p.
- [22] - P. C. SAMBOU, P. SAGNA et M. YADE, « Evolution climatique récente, productions agricoles et stratégies d'adaptation des paysans dans les communautés rurales de Mbediène et de Léona (département de Louga) », *Revue de géographie du laboratoire Leïdi*, N°13 (2015) 117 - 31 p.
- [23] - I. M. BAHARI, I. B. MOUSSA et O. F. MAIGA, « Evolution des caractéristiques pluviométriques et recrudescences des inondations dans les localités riveraines du fleuve Niger », *Vertigo, revue électronique en sciences de l'environnement*, Regards/Terrain, (2018) 1 - 14 p.
- [24] - L. DESCROIX, A. D. NIANG, H. DACOSTA, G. PANTHOU, G. QUANTIN et A. DIEDHIOU, « Evolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel) », *Climatologie*, N°10 (2013) 37 - 49 p.
- [25] - F. FRAPPART, P. HIERNAUX, F. GUICHARD, E. MOUGIN, L. KERGOAT, M. ARJOUNIN, F. LAVENU, M. KOITE, J.-E. PATUREL et T. LEBEL, « Rainfall regime across the Sahelian band in the Gourma region, Mali », *Journal of Hydrology*, N°375 (2009) 128 - 142 p.
- [26] - G. PANTHOU, T. VISCHÉL et T. LEBEL, « Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel », *International Journal of Climatology*, N° 34 (2014) 3998 - 4006 p.
- [27] - A. BAMBA, B. DIEPPOIS, A. KONARE, T. PELLARIN, A. BALOGUN, N. DESSAY, B. KAMAGATE, I. SAVANE et A. DIEDHIOU, Changes in vegetation and rainfall over West Africa during the last three decades (1981-2010). *Atmospheric and climate Sciences*, N°5 (2015) 367 - 379 p.
- [28] - P. OZER et K. CRESSMAN, « Return period analysis of the daily rainfall in West Africa within the scope of the Météo-France daily rainfall database import into SWARMS ». *FAO, AGPP, DLIS, Rome, (2000) 7 p.*