Norois

Environnement, aménagement, société

244 | 2017

**Sport, immigration, urbanisation littorale, climat
sahélien, biodiversité**

Suivi de la pluviométrie au Nord-Sénégal de 1954 à 2013 : étude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis

Monitoring rainfall in North Senegal from 1954 to 2013 : case study of synoptic stations of Matam, Podor and Saint Louis

Demba Gaye

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/norois/6165>

DOI : 10.4000/norois.6165

ISBN : 978-2-7535-7420-5

ISSN : 1760-8546

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 30 décembre 2017

Pagination : 63-73

ISBN : 978-2-7535-7418-2

ISSN : 0029-182X

Référence électronique

Demba Gaye, « Suivi de la pluviométrie au Nord-Sénégal de 1954 à 2013 : étude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis », *Norois* [En ligne], 244 | 2017, mis en ligne le 30 décembre 2019, consulté le 05 janvier 2021. URL : <http://journals.openedition.org/norois/6165> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/norois.6165>

Suivi de la pluviométrie au Nord-Sénégal de 1954 à 2013 : étude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis

*Monitoring Rainfall in North Senegal from 1954 to 2013:
Case Study of Synoptic Stations of Matam, Podor and Saint-Louis*

Demba GAYE

Géographe/Climatologue, Laboratoire Leïdi « Dynamiques des territoires et développement », Université Gaston Berger de Saint-Louis (Sénégal). (gaye.demba@ugb.edu.sn) (gaye_demba@yahoo.fr)

Résumé : Sur la série 1954-2013, le Nord-Sénégal a connu de très fortes fluctuations pluviométriques tant du point de vue de répartition intra-annuelle qu'en termes d'évolution interannuelle. Le démarrage de la véritable saison hivernale, défini par les occurrences, ainsi que sa durée reste une problématique majeure notamment dans le domaine agricole alors que l'évolution interannuelle y est révélatrice de tendances souvent généralement observées dans tout le Sahel avec toutefois des réalités propres à la zone d'étude et qui donc l'identifient au reste de la région. Plusieurs méthodes sont utilisées dans cet article dans le but de suivre ces différentes fluctuations. Le décellement des occurrences du maximum pluviométrique nous permet de localiser la véritable saison des pluies notamment son démarrage et sa durée. La méthode des écarts à la moyenne est utilisée dans le but de vérifier les variabilités (déficits et excédents) interannuelles. Nous avons par la suite appliqué le test non-paramétrique de Pettitt aux données de notre série (1954-2013) dans le but de détecter la/les rupture (s) de tendance dans l'évolution de la pluviométrie sur nos 60 années d'étude. La division de la série en sous-série nous a renseigné sur la tendance actuellement observée dans la région. Nous avons enfin corrélé à l'aide de la corrélation r de Pearson la hauteur d'eau annuelle et le nombre de jours de pluie afin d'exprimer l'intensité de la pluviométrie. Les résultats montrent que la saison des pluies qui dure généralement de juillet à septembre se concentre sur seulement deux mois qui enregistrent à eux seuls l'essentiel des abats annuels (juillet-août à Matam avec 87 % et août-septembre à Saint-Louis et Podor avec respectivement 87 et 84 %). Ces observations traduisent ainsi un démarrage de l'hivernage dans la deuxième quinzaine de juillet et une fin au plus tard dans la 1^{re} décennie du mois d'octobre. Les écarts à la moyenne révèlent une très grande variabilité interannuelle avec une forte présence d'années déficitaires (29/60 à Saint-Louis, 33/60 à Podor et la moitié de la série à Matam). L'application du test de Pettitt indique un seul point de rupture de tendance dans la série (1969 à l'ouest et à l'est de la zone et 1970 au centre) alors que la division de la série en sous-série y révèle un retour à la normale depuis les années 2000. La corrélation de Pearson montre une forte relation entre hauteur d'eau annuelle et nombre de jours de pluie ($r = 0,58$ à la station de Saint-Louis, $r = 0,7$ à la station de Podor et $r = 0,59$ à la station de Matam).

Abstract: From 1954 to 2013, the north of Senegal has experienced considerable fluctuations in rainfall from the point of view of intra-annual distribution and in terms of inter-annual evolution. The start of real winter season, defined by the occurrence and its duration remains a major problem especially in the agricultural field while the inter-annual evolution is often suggestive of general trends across all the Sahel but with the realities characteristic of the study area and therefore identify it with the rest of the region. Several methods are used in this article in order to follow these different fluctuations. The detection of occurrences of maximum rainfall allows us to locate the real rainy season particularly its start and duration. The method of differences in the average is used in order to verify the variability (deficits and excesses) inter-annual. We subsequently applied the non-parametric Pettitt test to the data in our series (1954-2013) in order to detect the rupture (s) trend in the evolution of rainfall on our 60 years' study. The division of the series in subseries has informed us about the current trend in the region. Finally the r Pearson correlation between annual water height and number of rainy days was used

to show the intensity of rainfall. The results show that the rainy season, which usually lasts from July to September, concentrates during only two months which record the main part of the annual rains (July-August in Matam with 87 % and August-September in Saint-Louis and Podor with respectively 87 and 84 %). These observations reflect a start of the rainy season in the second fortnight of July and an end in the first decade of October at the latest. The values of standard deviation show a high interannual variability with a strong presence of deficit years (29/60 in Saint-Louis, Podor 33/60 and half of the series in Matam). The application of Pettitt test indicates a single break point in the trend series (1969 to the west and east of the area and in 1970 to the center), while the division of the series in sub-series reveals a return to normal since the 2000s. Pearson correlation shows a strong relationship between high annual water and number of rainy days ($r = 0.58$ at the station of Saint-Louis, $r = 0.7$ at the station of Podor and $r = 0.59$ at the station of Matam).

Mots clés : pluviométrie – variabilité – sécheresse – saisonnalité – agriculture

Keywords: drought – rainfall – variability – seasonality – agriculture

INTRODUCTION

Les pluies d'hivernage constituent l'essentiel des précipitations au Nord-Sénégal et se concentrent quasiment sur trois mois (juillet, août et septembre), elles s'étalent exceptionnellement jusqu'au mois d'octobre. D'une manière générale, on peut retenir deux types de pluies d'hivernage : les orages organisés ou lignes de grains dont le passage se manifeste par une accélération de la vitesse du vent. Ils sont responsables de la plupart des pluies enregistrées au Sahel avec plus de 60 % du total annuel enregistrées selon Courel (1984), voire même une proportion de 80 % du total des précipitations d'après Peters et Tetzlaff (1988) et Sagna (1988) ; les pluies continues et non orageuses où les conditions dynamiques et énergétiques les plus favorables sont réunies pour que se développent sans entrave les mouvements ascendants permettant la formation de nuages à grande extension verticale du type cumulonimbus. Mais, la caractéristique principale de la pluviométrie aux stations du Nord-Sénégal reste sa forte variabilité aussi bien en termes de saisonnalité qu'à l'échelle des années (Gaye, 2017). Si la forte variabilité interannuelle des précipitations reste l'une des réalités les plus partagées au Sahel, le Nord-Sénégal s'identifie cependant du reste de son voisinage par sa variabilité inter-mensuelle particulière. En effet, si trois mois sont retenus jusqu'ici comme constituant la période hivernale, la véritable saison des pluies ne s'y déroule que sur deux mois notamment en ses parties ouest et centre. Ce qui revient à dire que l'essentiel des hauteurs d'eau annuelles est enregistré sur ces deux mois. Ces occurrences témoignent du début de la saison des pluies noté, depuis quelques années, dans la deuxième quinzaine du

mois de juillet (Sy, 2008). La fin brutale des pluies, généralement notée dans la 1^{re} dizaine du mois d'octobre, renseigne également sur sa durée. Cette variabilité inter-mensuelle provoque d'importantes répercussions dans la répartition et le déroulement saisonniers des pluies, déroulement qui semble un peu différent de ce qui était observé précédemment (Servat *et al.*, 1998). Ce comportement spécifique à cette région sahélienne du Sénégal est dû au fait que le renforcement de l'alizé de nord-ouest issu de l'anticyclone des Açores (durant cette période) pour la partie ouest de la zone et celui de l'alizé continental issu de la dépression saharienne pour les stations centre et est (figure 1) freinent très souvent la remontée de l'Équateur Météorologique. L'épaisseur de la mousson étant ainsi limitée, on observe dans la plupart des cas des retards pour le démarrage de la saison pluvieuse qui peuvent être déterminants pour la durée de celle-ci. Ces éléments revêtent un caractère extrêmement important, tant pour la quantité d'eau collectée que du fait des conséquences qu'ils engendrent dans la maîtrise du calendrier hivernal (début et fin) par les paysans de cette région de la vallée du Sénégal (la plus importante zone agricole du pays), constituant dès lors une problématique majeure dans le domaine agronomique. En effet, comme tous les paysans ouest Africains, ceux de l'extrême Nord-Sénégal continuent, en dépit de toutes les difficultés liées en partie au manque de maîtrise de ce calendrier hivernal, à dépendre quasi exclusivement des pluies de la saison de Mousson. De ce fait, tout retard et/ou toute fin précoce de celles-ci affectent fortement la saison agronomique et donc les rendements agricoles.

En outre, la distribution interannuelle des précipitations dans ce Sahel sénégalais 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 fondent la pluviométrie sahélienne.

Le premier est relatif à la rupture de tendance généralisée qui, depuis les années 50, ne serait détectée qu'une seule fois (Ozer, 2001). Si pour l'essentiel des stations ce point de rupture est notée en 1968, « *date correspondant au début d'une succession d'années très sèches en zone sahélienne* » (Bigot *et al.*, 1997), il semblerait qu'aux stations Nord-Sénégal, 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 l'une des problématiques majeures de cette étude, est le probable retour à la normale que Nicholson (2005) et Lebel et Ali (2009) 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. Mais, au Nord-Sénégal cette « *reprise* » ne serait véritablement amorcée qu'au début des années 2000. À la distribution spatiale de la pluviométrie qui identifie le Nord-Sénégal au grand ensemble sahélien, s'ajoute une distribution temporelle des hauteurs d'eau annuelle. Cette variabilité temporelle du cumul pluviométrique annuel serait tributaire du nombre de jours de pluie (Ndong, 1995) car, du fait de l'absence de pluies longues et de forte intensité dans ce Nord-Sénégal, la hauteur d'eau annuelle serait fortement proportionnelle au nombre de jours de pluies. Là encore ces observations ont d'importantes conséquences tant du point de vue de cumuls pluviométriques que de leurs corolaires dans le domaine agronomique.

L'objectif de ce travail est ainsi de vérifier ces différents paramètres qui caractérisent la pluviométrie de cette partie sahélienne du Sénégal. Pour certains, il s'agira d'une véritable mise à jour, pour d'autres il sera question d'une toute première mise en évi-

Figure 1 : Localisation des stations météorologiques de référence (Saint-Louis, Podor et Matam) dans la zone d'étude au Nord-Sénégal

Localisation of the Saint-Louis, Podor et Matam weather stations in the North-Senegal studied area

dence. Le suivi de ces variables et leur remplacement dans le contexte sahélien, ont pour objectif de préciser le caractère particulier de la zone d'étude. En ce sens, ce travail se fixe pour objectifs de vérifier :

- les fluctuations pluviométriques annuelles ;
- la/les rupture(s) de tendance dans la série (1954-2013) et les tendances de « retour à la normale » ;
- la répartition mensuelle des précipitations, les occurrences du maximum pluviométrique ;
- les dates de début et de fin de l'« hivernage », l'intensité pluvieuse ;
- la proportionnalité entre hauteur d'eau annuelle et nombre de jours de pluie.

ORIGINE DES DONNÉES ET MÉTHODE DE TRAITEMENT

Si sur le plan administratif le Nord-Sénégal englobe aussi une partie de la région de Louga, dans le cadre de cet article, la zone d'étude couvre les stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis que nous considérons d'ailleurs comme véritable région nord du Sénégal. Les données utilisées dans cette étude ont été recueillies à l'ANACIM (L'Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie) du pays et concerne les moyennes

pluviométriques ainsi que le nombre de jours de pluies des stations de Matam, Podor et Saint-Louis. Il s'agit d'une série de soixante ans (1954-2013) à pas de temps mensuel et annuel. En premier, nous considérerons les moyennes pluviométriques dans le but de suivre les différentes fluctuations au cours de cette série. Quatre principaux objectifs sont visés en ce sens. Il s'agit d'abord d'analyser la variabilité interannuelle des précipitations. Plusieurs méthodes permettent de monter ce paramètre. Nous utiliserons ici la méthode « des écarts à la moyenne interannuelle ». Sa formule est la suivante :

EM (valeurs absolues) = $P_i - P_m$ ou EM (valeurs relatives) = $\{(P_i - P_m) / P_m\} * 100$

EM = Écart à la moyenne ; P_i = Pluie de l'année i ; P_m = Pluie moyenne interannuelle.

Cette méthode permet, comme il en est d'ailleurs l'objectif de cette analyse de la variabilité interannuelle des précipitations, d'évaluer les excédents ou les déficits d'une année quelconque par rapport à la moyenne de la série. Elle présente l'avantage de décrire et de caractériser la distribution des précipitations dans le temps, ce qui permettra ainsi d'apprécier l'ampleur des déficits et des excédents. Nous utiliserons le logiciel SPSS (Statistical Package on Socials Sciences) pour la représentation graphique de ces écarts à la moyenne. Le choix de ce logiciel est dû au fait qu'il soit très adapté à de telles analyses et présente une lecture facile des graphiques. L'objectif 2 est de détecter les différentes ruptures majeures intervenues au cours de cette série de 60 ans et pour chaque station. Pour cela, nous appliquerons le test non-paramétrique de Pettitt (1979), capable d'estimer la position d'un changement de moyenne, marquant le début d'une phase pluviométrique. Le logiciel Khronostat sera utilisé dans ce sens du fait qu'il intègre le test non-paramétrique de Pettitt et l'application de ce dernier est très facile avec ce logiciel. Ensuite nous procéderons à la division de la série en sous-séries pour suivre l'évolution de la situation avant et après les ruptures et surtout voir la situation au cours des récentes années comparées aux autres sous périodes (périodes avant-sécheresse et période de sécheresse). Ceci dans le but de savoir s'il y a « retour à la normale » en cette partie nord du Sénégal. Enfin, nous décèlerons les occurrences pluviométriques. L'objectif est de vérifier parmi les mois de la saison des pluies lequel enregistre le plus souvent le maximum pluviomé-

trique, ce qui pourrait être significatif puisque traduisant le début de la saison des pluies. Justement, les dates de début et de fin de la saison des pluies ainsi que l'intensité pluvieuse seront brièvement étudiées. Le but de cette étude est de détecter les éventuelles modifications notées dans l'évolution de ces paramètres suivant les différentes périodes de notre série d'observation.

Au dernier point de cet article, nous analyserons la variabilité du nombre de jours de pluie pour chacune des stations. La corrélation r de Pearson a été utilisée pour corréler pour chaque station les hauteurs d'eau annuelles au nombre de jours annuels de pluie. La formule de corrélation r de Pearson utilisée est :

$$r = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Avec:

– Cov (XY) : covariance de XY ;

– σ_x : écart-type de X ;

– σ_y : écart-type de Y.

L'objectif de cet exercice est de vérifier l'intensité des liens qui existeraient entre ces deux paramètres dans cette partie sahélienne du Sénégal. La raison d'une telle vérification est que justement au Sahel et surtout dans sa partie sud, les hauteurs annuelles restent très proportionnelles au nombre de jours de pluies pour cause de la rareté de pluies de forte intensité dans cette région (Gaye, 2017).

VARIABILITÉ TEMPORELLE DE LA PLUVIOMÉTRIE

Les fluctuations annuelles de la pluviométrie

L'analyse du cumul annuel des précipitations est pertinente pour effectuer une étude de variabilité. Cette étude des précipitations annuelles présente l'avantage de décrire et de caractériser leur distribution dans le temps et dans l'espace. Elle permet également d'apprécier l'ampleur des déficits et des excédents.

La figure 2 couvrant toute la période d'observation (1954-2013) met en évidence l'alternance d'excédents et de déficits pluviométriques annuels. Celle-ci montre que la variation de la pluviométrie d'une année à l'autre est presque une règle.

Sur les 60 années d'analyse de la pluviométrie, 29 sont inférieures à la moyenne interannuelle à la station de Saint-Louis (soit plus de 48 %), 33 à la station de Podor (soit 55 %) et 30 à la station de Matam (soit 50 %). La moyenne interannuelle s'élève respectivement à 272 mm, 247 mm et 400 mm pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam. Le minimum pluviométrique est intervenu en 1992 pour Saint-Louis et Matam avec respectivement un déficit de -213 mm, soit -78,3 % et de -248 mm soit -62 %. Pour la station de Podor, le minimum est survenu en 1984 avec un déficit de -190 comparé à la moyenne interannuelle (1954-2013), soit -77 %. Ces deux années sont très importantes pour ce qui est du contexte climatique Sahélien. 1984 marque le début de la seconde vague de sécheresse climatique dans les stations plus au sud de la région sahélienne. Paturol *et al.* (1998) parle d'une généralisation et une intensification du phénomène déficitaire qui se manifeste dès le début des années 1970. Soulignons que dans la majeure partie des stations nord et centre du Sahel, cette seconde vague de sécheresse est amorcée depuis 1982 où les déficits et les très forts déficits représentent respectivement 94,7 et 73,7 % des observations (Courel, 1984). L'année 1992 est quant à elle retenue comme marquant la fin de la grande sécheresse climatique amorcée depuis le début des années septante. L'année suivant 1992 (1993) enregistre 180 mm de plus et 160 mm que celle-ci respectivement aux stations de Saint-Louis et de Matam. Ce qui aurait fortement influencé la rétention de cette année comme marquant la fin de cette sécheresse climatique sahélienne qui se distingue des événements précédents par sa durée, son intensité et son extension (Le Borgne, 1988).

Le maximum pluviométrique, pour sa part est survenu en 2010 pour Saint-Louis et en 2000 pour Matam avec un excédent respectif de 322 mm (soit plus de 118 %) et de 317 mm (soit 79 %) par rapport à la moyenne interannuelle respective des stations. Au centre de la région (station de Podor), certes 1955 reste l'année la plus pluvieuse sur notre période d'étude (1954-2013) avec 793 mm mais le maxi secondaire, par ailleurs maxi principal depuis les années de la grande Sécheresse sahélienne est enregistré en 2001 avec 155 mm de plus que la moyenne interannuelle soit 63 %. Ces maxima (principaux et/ou secondaires) connus au courant des années 2000, attestent le « retour à la normale » noté dans la majeure partie des stations centre et sud du Sahel.

Figure 2 : Écarts à la moyenne pluviométrique aux stations du Nord-Sénégal (1954-2013)

Rainfall average deviations at the North-Senegal weather stations (from 1954 to 2013)

Détection du/des point(s) de rupture par l'application du test de PETTITT

À partir des données obtenues pour chaque station de notre zone d'étude (Saint-Louis, Podor et Matam), il est possible de mettre en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques survenues pendant une longue période. Cela revient à dire qu'il est possible d'isoler les périodes d'anomalies pluviométriques (périodes fortement pluvieuses

ou de sécheresse). Pour ce faire, le test non-paramétrique de Pettitt (1979), capable d'estimer la position d'un changement de moyenne (point de rupture) dans une série, a été appliqué à notre série (1954-2013) pour chacune de nos stations. La figure 3 résulte de l'application du test de Pettitt.

Figure 3 : Évolution des précipitations de 1954 à 2013 aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam suite à l'application du test de Pettitt
Evolution of rainfall from 1954 to 2013 at Saint-Louis, Podor and Matam weather stations following the application of the Pettitt test

Il ressort de l'application de ce test que pour chaque station considérée, un seul point de rupture est identifié. Contrairement à plusieurs stations sahéniennes où le point de rupture est noté en 1968 c'est-à-dire l'année du début de la grande sécheresse climatique, au Nord-Sénégal, ce point de rupture est identifié en 1969 pour les stations de Saint-Louis et Matam et en 1970 pour la station de Podor. Quand on compare les moyennes des sous-séries pluviométriques avant et après le point de rupture, on se rend compte de l'ampleur de la transition brutale qui caractérise la « grande sécheresse » (Ozer, 2001) (figure 4). Pour la station de Saint-Louis, 84 mm séparent les périodes 1954-1969 et 1970-2013 dont la pluviométrie moyenne est respectivement de 334 et 250 mm. À la station Podor la différence est plus énorme comparée à celle de la station de Saint-Louis puisque près de 100 mm (97 mm) séparent les années avant (1954-1970) et après (1971-2013) le point de rupture pour lesquelles la pluviométrie moyenne est respectivement de 317 et 220 mm. Mais en cette zone Nord-Sénégal, c'est à l'extrême est (la station de Matam) que la différence entre les années avant le point de rupture et celles après ce point bat le record. Ici environ 150 mm, plus précisément 146 mm séparent les périodes 1954-1969 et 1970-2013 pour lesquelles la pluviométrie est respectivement de 507 et 361 mm. Le fait que l'ampleur de la rupture soit beaucoup plus manifeste à la station de Matam en termes de différence de pluviométrie moyenne est peut-être dû à la position plus au sud de la station comparée aux stations de Saint-Louis et Podor. Selon Morel (1998), Gautier *et al.* (1998) et Paturel *et al.* (1998), la rupture de tendance généralisée s'est progressivement marquée bien plus au sud jusqu'à approximativement 10° N de latitude.

Étudiant cette question de rupture de tendance au Sahel de façon générale, plusieurs auteurs ont corrélé la forte différence de pluviométrie moyenne entre les années avant et après les points de ruptures aux différentes modifications tant du point de vue de répartition diurne des précipitations et de l'évolution du nombre de jours de pluies. Ainsi selon Shinoda *et al.* (1999) la fréquence diurne maximum des précipitations se produit entre 3 et 6 heures du matin, or que le déficit pluviométrique enregistré en région sahénienne serait dû, en grande partie, à l'importante diminution de la fréquence des précipita-

tions (pouvant atteindre 75 %) durant cette période de la journée. D'autres auteurs comme Demarée (1990), Tarhule et Woo (1998) se sont penchés sur l'évolution du nombre de jours de pluies et notent la modification dramatique de ce paramètre approximativement dès 1968.

Au regard de la figure 4 on remarque que la période 1972-1992 a été caractérisée par des années de forts déficits pluviométriques. Au Nord-Sénégal, elle a constitué une véritable « période de sécheresse » avec comme ce fut le cas dans la bande sahélo-soudanienne, une baisse dramatique des précipitations (Moron, 1996). La spécificité de cette anomalie réside dans sa durée et sa persistance. Cependant, on constate que depuis les années 2000, une tendance de retour à la « normale » est notée partout au Nord-Sénégal comparée à la période sèche des années 1972-1992 (figure 4). Quand on compare les moyennes de sous-séries pluviométriques 1972-1992 et 2000-2013, on observe l'ampleur de cette tendance de « reprise ». Pour la station de Saint-Louis 103 mm séparent ces deux périodes soit près de 50 %. À la station centre de Podor un peu moins de 90 mm séparent la période sèche 1972-1992 et celle de 2000-2013 soit une reprise de 48 %. Quant à la station est de la zone d'étude (station de Matam) 148 mm séparent la période 1972-1992 et celle amorcée depuis 2000 soit également une reprise de 50 %. Ce qui est également intéressant sur cette question de tendance progressif de « retour à la normale » c'est le rapport années excédentaires et années déficitaires aux niveaux des différentes stations de la zone. À la station de Saint-Louis, de 2000 à 2013 seule 2004 a connu une saison de pluie considérablement déficitaire comparée à la moyenne interannuelle (1984-2013) alors qu'à la station de Matam seules 3 des 13 années après 2000 ont été déficitaires. À la station de Podor par contre la situation est plutôt ambiguë. Ici, alors que de 1984 à 2000 la période a été beaucoup plus déficitaire qu'excédentaire ou normale (par rapport à la moyenne interannuelle), sur les 13 années qui s'ensuivent on assiste à une alternance d'années excédentaires et déficitaires. Ce qui retient le plus notre attention c'est la succession quasi égale de ces années humides et sèches. Néanmoins quand on compare la période 2000-2013 à la celle des années de rupture (1972-1992), on note véritablement une tendance de retour vers la « normale ». Ce retour petit à petit à la « normale » dans le Nord-Sénégal peut s'expliquer

Figure 4 : Périodes de rupture et de reprise aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1954-2013). La flèche rouge indique une diminution de la moyenne pluviométrique entre les périodes avant et après les années de rupture [(-25 % à la station de Saint-Louis), (-31 % à la station de Podor), (-29 % à la station de Matam)] et la flèche bleue indique une augmentation entre la période de sécheresse (1972-1992) et la période actuelle (2000-2013) [(+49 % à la station Saint-Louis), (+48 % à la station de Podor), (+50 % à la station de Matam)].

Periods of rupture and rebound at Saint-Louis, Podor et Matam weather stations (from 1954 to 2013).

par l'éloignement progressif des années de grandes sécheresses climatiques sahéliennes.

Si les années sont jugées excédentaires, normales ou déficitaires, c'est par rapport aux hauteurs d'eau annuelles qu'elles enregistrent. Cependant du fait de la rareté de pluies de forte intensité dans le Sahel et surtout dans sa partie sud comme c'est le cas au Nord-Sénégal, les hauteurs annuelles restent très proportionnelles au nombre de jours de pluie. Ce

qui justifie l'importance de considérer ce dernier dans l'analyse de la variabilité pluviométrique.

La répartition mensuelle de la pluviométrie

Le diagnostic de la variabilité pluviométrique à l'échelle mensuelle permet de distinguer trois types de comportements pluvieux qui sont :

- les mois à pluviométrie relativement faible ;
- les mois à pluviométrie intermédiaire ou modérée ;
- les mois à pluviométrie relativement forte.

La figure 5 présente les précipitations moyennes mensuelles sur la période allant de 1954 à 2013 aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam.

Figure 5 : Pluviométrie moyenne mensuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1954-2013)

Average monthly rainfall at the Saint-Louis, Podor et Matam weather stations (from 1954 to 2013)

Les mois à pluviométrie faible n'ont qu'une influence très limitée sur le climat, si ce n'est pas le type de temps dont elles sont la résultante. Il convient de distinguer deux catégories. D'une part les pluies nées d'une dépression septentrionale s'étendant sur l'Atlantique Nord-Oriental et amenant des types de pluies fines et continues analogues au crachin, notable en janvier et en février, pouvant atteindre jusqu'à plus de 5 mm. Sont concernés les mois de novembre, décembre, janvier et février. Ces mois marquent la grande saison sèche au Nord-Sénégal comme sur l'ensemble du territoire national. Au cours de cette période de l'année pour la série 1954-2013, les précipitations recueillies aux différentes stations de la zone représentent entre 1 et 3 % du total annuel. Proportionnellement aux hauteurs d'eaux précipitées, le nombre de jours de pluie reste faible et n'excède pas 13 jours durant toute cette période, tous mois confondus. Cependant, contrairement à ce que l'on croit usuellement, ces pluies, malgré leur hauteur insignifiante, apparaissent dans les moyennes générales. Si la hauteur journalière maximale pour chacun des mois n'atteint pas 15 mm, quelques singularités peuvent toutefois être relevées au cours de certaines années où le mois de janvier et/ou février fait exception comme en témoigne janvier 2002 avec 66,2 mm à la station de Saint-Louis, 115,8 mm à la station de Podor et 30,5 mm à la station de Matam. Notons cependant que ce cas de janvier 2002 ne peut en aucun cas être pris en compte dans cette catégorie car ce type de pluie est d'une nature différente. Il s'agit là d'une véritable pluie de mangue appelée aussi *heug* (Seck, 1962) qui contrairement à ces pluies fines nées d'une dépression septentrionale peut souvent atteindre une hauteur supérieure même à celle des mois de la saison de pluies comme ça a d'ailleurs été le cas aux stations de Saint-Louis et de Podor en 2002.

En cette partie extrême Nord-Sénégal, seul le mois de juin peut être considéré comme mois intermédiaire à pluviométrie modérée. Il annonce l'arrivée de la grande saison pluvieuse débutant généralement dans la première quinzaine du mois de juillet. En fait, ce sont des pluies courtes, peu mouillantes, accompagnées de décharges électriques annonçant les pluies importantes. Les précipitations ne sont cependant pas en concordance absolue de phases préparatoires, véritable mise en place des régimes pluviométriques. Au cours de cette période intermédiaire, l'atmosphère se

sature et s'agence pour laisser place à l'état nécessaire au développement de dépressions migratoires génératrices de pluies. On remarque une hausse sensible des précipitations sur l'ensemble du Nord-Sénégal. Au cours de ces mois, le nombre de jours de pluie connaît également une hausse, comparativement au mois précédent. C'est durant ce mois que l'augmentation du nombre de jours de pluie devient véritablement sensible sur la quasi-totalité de la région. Les événements pluviométriques journaliers commencent également à devenir importants. Les hauteurs pluviométriques journalières au cours de ce mois peuvent dépasser 25 mm. En mars ces événements restent principalement localisés au Sud-Ouest du pays.

Dans cette bande purement sahélienne du pays, les mois de juillet, août et septembre constituent les mois de la saison des pluies communément appelée « *Hivernage* » ou encore « *saison de mousson* ». Cette réalité pluviométrique reste quasiment identique à toutes les stations du Sahel austral. C'est au mois de juillet que débute la véritable saison des pluies. À ces différentes stations de l'extrême Nord-Sénégal, elle dure généralement trois mois mais peut parfois se prolonger jusqu'au mois d'octobre. Ce sont des mois de moyenne et forte pluviométrie. Le mois de juillet connaît la valeur pluviométrique la moins forte à l'ouest et au centre de la zone par rapport aux autres mois de l'hivernage, son total y est moins important comparativement au total des mois d'août et septembre, alors qu'à l'est de la zone c'est plutôt le mois de septembre qui connaît une récession pluviométrique. Aux stations de Saint-Louis et de Podor, août et septembre représentent à eux seuls l'essentiel des abats pluviométriques soit plus de 80 % (87 % à la station de Saint-Louis et 84 % à la station de Podor) sur l'ensemble des observations. À la station de Matam, 87 % des abats pluviométriques sont enregistrés seulement de juillet à août. Notons toutefois que sur ces 87 %, 70 % sont spécifiquement enregistrés au mois d'août. Ces mois de la saison de mousson sont aussi caractérisés par un nombre de jours de pluie important, où les valeurs mensuelles dépassent facilement 10 jours de pluie.

S'agissant des occurrences du maximum pluviométrique c'est le mois d'août qui enregistre la valeur la plus élevée au centre et à l'est du Nord-Sénégal avec environ 50 % des observations pour la station de Podor et 70 % des observations pour la station de Matam sur la période 1954-2013, alors qu'à la par-

tie ouest de la zone c'est le mois de septembre qui domine les occurrences avec 50 % des observations sur la même série.

La localisation de ces occurrences du maximum pluviométrique durant l'hivernage reste importante, pas forcément pour la quantité d'eau collectée mais plutôt parce que renseignant sur le démarrage de la saison des pluies, pouvant lui-même être déterminant pour la durée de celle-ci. Or comme tous les paysans ouest africains, ceux de l'extrême Nord-Sénégal continuent en dépit de toutes les difficultés liées en partie au manque de maîtrise du calendrier hivernal à dépendre quasi exclusivement des pluies de la saison de mousson. Le retard et/ou la fin précoce de celles-ci affectent fortement la saison agromique et donc les rendements agricoles.

Figure 6 : Répartition mensuelle des occurrences du maximum pluviométrique aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1954-2013)

Monthly distribution of maximum rainfall occurrence probabilities, for Saint-Louis, Podor et Matam weather stations (from 1954 to 2013)

L'« hivernage » : dates de début, de fin et l'intensité pluvieuse

Au Sénégal, en moyenne la saison des pluies démarre en juillet (le 4 juillet selon Camberlin *et al.* 2003). 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 Nord-Sénégal, nous avons appliqué nos séries de données journalières aux critères de Sivakumar (1988, 1991) 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 (Houndénou et Hernandez, 1998). Les résultats indiquent qu'aux stations du nord-Sénégal, dans 64 % des cas, la date du début oscille entre le 15 et 29 juillet, c'est-à-dire un début pouvant connaître jusqu'à deux semaines de décalage. Les mêmes résultats montrent une fin oscillant entre le 21 septembre et le 6 octobre quel que soit la période considérée, soit aussi un possible étalement sur 15 jours. Si la date du début a très souvent connu des modifications sur la période 1954-2013 avec un démarrage plus tardif depuis 1970, celle de fin des pluies reste quasiment la même. C'est qui y témoignent d'ailleurs un raccourcissement de l'hivernage.

En outre, dans cette région septentrionale du Sénégal, le comportement pluviométrique se traduit aussi par une forte variabilité de l'intensité pluvieuse. En effet, quand nous comparons la période actuelle à la période humide 1954-1969, nous notons une baisse de 37,5 % de la fréquence des pluies journalières intenses (> 40 mm, selon la définition de Camberlin *et al.*, 2002). Cependant, depuis les années 2000, une augmentation des épisodes pluvieux intenses est notée, en corrélation avec le retour progressif de la pluviométrie à la normale amorcé depuis ces mêmes années.

Distribution et variabilité du nombre de jours de pluies

Cette analyse sur la période 1954 à 2013, c'est-à-dire sur une série de 60 ans fait apparaître une inégalité dans la distribution temporelle de la pluviométrie aux stations de Matam, Podor et Saint-

Louis. Cette distribution est en grande partie tributaire du balancement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et il est impossible de parler de continentalité et d'effets orographiques puisqu'il s'agit d'une distribution temporelle et non spatiale. L'analyse du nombre de jours de pluie nous amènera à remarquer leur proportionnalité aux hauteurs d'eau précipitées annuellement.

Aux stations de Matam, Podor et Saint-Louis, sur la période 1954-2013, le nombre de jours de pluie varie respectivement entre un maximum principal de 53 en 2010, 36 en 1969, 39 en 2008, un maximum secondaire de 48 en 2008, 35 en 1989, 37 en 1995 et un minimum principal respectif de 21 jours en 1990, 12 en 1984, 12 en 1972 et 1984, un minimum secondaire de 25 en 1982, 15 en 1972, 15 en 1977. La majeure partie des maxi principaux et/ou secondaires du nombre de jours de pluie est notée durant la période actuelle (2000-2013). Les années enregistrant les minima principaux et secondaires sont caractérisées par un fort à très fort déficit pluviométrique, comparé à la moyenne interannuelle, et restent toutes connues durant la période de sécheresse (1972-1992).

Si nous partons de l'affirmation de Nicolas (1959), selon laquelle « nous observons qu'il n'existe pas de pluies de type équatorial, violentes et longues. Les pluies les plus longues sont faibles et ne dépassent pas 5 mm/h », nous comprendrons alors que le nombre de jours de pluie influe de façon non moins importante sur la variabilité des hauteurs d'eau précipitée annuellement, et par conséquent son analyse serait très intéressante dans l'étude comparative des précipitations annuelles. De façon générale le constat semble être normal du moins non surprenant ; les années à fort excédent enregistrent le taux le plus élevé de nombre de jours de pluie alors que celle à très fort déficit connaissent un taux faible à très faible. De 1954 à 2013 les années à pluviométrie supérieure à la moyenne enregistrent une moyenne annuelle de 39 jours de pluie à la station de Matam, 30 à la station de Podor et à la station de Saint-Louis alors que les années à la pluviométrie annuelle inférieure à la moyenne interannuelle connaissent une moyenne annuelle de nombre de jours de pluie de 7 à 10 jours de moins.

La corrélation r de Pearson (tableau 1) montrant un coefficient de corrélation $r = 0,58$ à la station de

Saint-Louis, $r = 0,7$ à la station de Podor et $r = 0,59$ à la station de Matam, les données expriment une forte corrélation positive entre précipitation annuelle et nombre de jours de pluie. Corrélation qui s'observe également sur les séries chronologiques comparatives de ces deux variables (figure 7).

	Saint-Louis	Podor	Matam
Corrélation de Pearson (r)	+0,585	+0,724	+0,595
Nombre d'observations	49	49	49
Sig (bilatérale)	0.000	0.000	0.000

Tableau 1 : Corrélation r de Pearson hauteur d'eau annuelle/ nombre de jours de pluie aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam sur la période 1965-2013. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatérale).

Pearson correlation between annual height of the water and number of rainy days for Saint-Louis, Podor et Matam weather stations from 1954 to 2013.

La variabilité du nombre de jour de pluie aux cours des années serait due à la stabilité de la présence de la mousson (Wade, 2008), qui est fortement soumise aux influences maritimes et/ou continentales. En effet, les effets de l'harmattan (alizé continental) qui détermine le plus les stations continentales de Matam et de Podor et l'alizé maritime qui domine fortement la station de Saint-Louis varient d'une année à une autre. Or c'est cette variabilité des effets de ces alizés qui conditionnent non seulement la montée, la mise en place et le retrait de la mousson qui est le vent porteur de la quasi-totalité de la pluie à cette partie, la plus sahélienne du pays mais aussi c'est en fonction du degré d'influence de ces alizés que la présence de la mousson est stable

ou instable. Ce qui fait que ce sont les effets de ces alizés qui constituent le principal responsable de cette variabilité du nombre de jour de pluie en ces stations nord du Sénégal. On peut alors tirer la conclusion selon laquelle les années enregistrant un faible taux de jours de pluie sont marquées par une instabilité de la mousson et qu'à *contrario* celles qui connaissent un taux « élevé » seraient caractérisées par une stabilité de la mousson.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Aux stations sahéliennes de Matam, de Podor et de Saint-Louis, la série 1954-2013 reste marquée par une forte variabilité interannuelle des précipitations. Ceci est en total accord avec le constat de Ozer (2001) « les grands écarts pluviométriques interannuels sont une des caractéristiques du climat sahélien ». Ces fluctuations pluviométriques en cette partie sahélienne du Sénégal sont en phase aussi avec les résultats des études prenant en considération toute la région ouest africaine telle celle de Morel (1998) et fortifiées par les travaux de Sagna (1994), Ndong (1995), Dacosta *et al.* (2002) qui ont concerné uniquement le Sénégal. Toutes ont observé la très grande variabilité interannuelle des précipitations. En outre, ces fluctuations sont fortement marquées par une forte présence d'années déficitaires, 29 des 60 à Saint-Louis, 33 sur les 60 à Podor et la moitié de la série à Matam. Sur la seule période 1984-2000 soit sur 17 années, 10 sont déficitaires à Saint-Louis et à Podor et 12 à Matam. L'application du test non-paramétrique de Pettitt nous révèle un seul point de rupture pour chaque station. Ozer (2001) avait appliqué

Figure 7 : Exemple de corrélation entre le nombre de jours de pluies et les hauteurs d'eau annuelle d'après les relevés de la station de Podor (coefficient de corrélation $r=0.724$) sur la période 1965-2013

Example of a correlation between the number of rainy days and the annual height of the water from the Podor station readings (correlation coefficient $r = 0.724$) during the 1965-2013 period

ce même test de Pettitt aux différentes stations du Sahel et notait qu'« il ressort de l'application de ce test qu'un seul point de rupture est identifié en 1968 [...] l'application de ce test aux sous-séries [...] ne détecte pas d'autres ruptures ». Ces résultats sont d'ailleurs en phase avec plusieurs études précédentes dont celle de Carbonnel et Hubert (1985). Ces différents résultats restent donc en parfait accord avec nos observations. Cependant, contrairement à une bonne partie des stations sahéliennes qui présentent toutes le point de rupture en 1968, au Nord-Sénégal, la rupture est notée une année après (1969) à l'ouest (station de Saint-Louis) et à l'est (station de Matam), et deux ans après (1970) au centre (station de Podor). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Carbonnel et Hubert (1992) qui situèrent la probabilité maximale de rupture de l'ensemble des séries des 42 stations soudano-sahéliennes étudiées au niveau de la transition 1969-1970. Cette situation pour les stations nord-Sénégalaises serait due à leur position plus au sud, comparée à celles connaissant cette rupture un peu plus tôt. En effet si une chose est unanime en ce qui concerne la rupture de tendance observée au Sahel, c'est qu'elle est notée bien après aux stations plus au sud du Sahel par rapport au reste de la région. Ozer (2001) notait dans ce sens que « toutes les stations n'ont pas été touchées de manière similaire ». Les observations de Morel (1998) fortifiaient déjà ces résultats « cette rupture de tendance serait apparue progressivement suivant deux axes : du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est ». L'apparition de cette rupture en 1969-1970 dans cette partie du Sénégal est parfaitement en phase avec les observations de Servat *et al.* (1998) qui, appliquant le test de Pettitt à 103 bassins (en Afrique de l'Ouest et Centrale), montrent que 75 % présentent une rupture entre 1969 et 1971. En outre, il ressort aussi de notre étude qu'un « retour à la normale » semble être amorcé depuis les années 2000. La comparaison des sous-séries 1972-1992 (période de sécheresse) et 2000-2013 (période actuelle), révèle une différence des hauteurs d'eau annuelles de 50 % à Matam et à Saint-Louis et de 48 % à la station de Podor. Ce retour à la normale serait d'ailleurs constaté un peu partout à la région sahélienne. Descroix *et al.*, (2015) soulignait dans ce sens que « les postes sahéliens ne connaissant de reprise que durant la décennie 2001-2010 ». Balmé

et al. (2006) 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. Par ailleurs, nos résultats montrent que les fluctuations pluviométriques en ces stations nord du Sénégal restent fortement proportionnelles au nombre de jours de pluies. La corrélation r de Pearson révèle une forte relation entre ces deux paramètres. Ces résultats corroborent les observations de Ndong (1995) qui, suivant l'évolution de la pluviométrie au Sénégal notait que la décroissance des totaux pluviométriques s'accompagne, d'une manière générale, d'une diminution du nombre de jours de pluie.

En outre, dans ce Nord-Sénégal, la saison des pluies se concentre généralement sur trois mois (juillet, août et septembre). Mais ici, quelle que soit la station considérée, l'essentiel des abats pluviométriques est enregistré sur deux mois. Ceci traduit clairement que la véritable saison des pluies ne s'y installe qu'en ces deux mois. Ces observations sont en phase avec celles de Le Borgne (1988) qui estimait que la véritable saison des pluies ne s'installe au Sahel ouest africain qu'en août-septembre. Toutefois cette situation concerne moins l'est de la région (station de Matam) où le mois de juillet domine les occurrences du maximum pluviométrique derrière le mois d'août. Ce qui traduit qu'il y est concerné par la véritable saison de mousson. La détermination des dates de début et de fin de l'« hivernage », indique que, comparée aux années 1954-1969, la période actuelle connaît un début tardif, alors la date de fin reste quasi toujours intacte, généralement centrée entre le 21 septembre et le 6 octobre, ce qui traduit une réduction de la durée de la saison pluvieuse. Caractérisant la saison des pluies dans le centre-ouest du Sénégal, Ndong (2003) avait fait ces mêmes observations en soulignant que « les débuts étaient généralement plus précoces sur la période 1951-1969 puis tardifs à partir des années 1970, [...] la fin de la saison des pluies ne montre pas un changement significatif entre les deux périodes ». Ces résultats sont aussi fortifiés par Camberlin *et al.* (2003) qui parlaient d'un raccourcissement de la saison des pluies au Sénégal. Parallèlement, le suivi de l'évolution des pluies journalières intenses révèle actuellement une forte baisse de la fréquence

comparée à la période 1954-1969. Ce constat est le même que celui fait par Lubès-Niel *et al.* (2001) qui avaient mis en évidence des modifications des pluies intenses à la station de Niamey avant et après 1969. Le Lay et Galle (2005) avaient fait la même comparaison et avaient noté que la contribution relative des très gros événements au cumul annuel passe de 11 % à 4 % entre les deux périodes en Afrique de l'Ouest. Ceci traduit alors une corrélation entre fréquence de pluies intenses et comportement pluviométrique de la période (humide/sèche) considérée. Ce constat est d'autant plus manifeste qu'au Nord-Sénégal, le retour progressif à la normale pluviométrique amorcée depuis les années 2000 coïncide parfaitement avec l'augmentation des gros événements (> 40 mm).

Remerciements

Nous remercions les deux relecteurs anonymes pour leurs avis et conseils ainsi que le comité de rédaction de la revue *Norois* pour l'aide apportée à la finalisation de ce manuscrit.

Bibliographie

- BALME M., LEBEL T., AMANI A., 2006. Années sèches et années humides au Sahel : quo vadimus?, *Hydrological Sciences Journal*, n° 51, vol. 2, p. 254-271.
- BIGOT S., CAMBERLIN P., MORON V., RICHARD Y., 1997. Structures spatiales de la variabilité des précipitations en Afrique : une transition climatique à la fin des années 1960?, in *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série II, Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre*, p. 181-188.
- CAMBERLIN P., BELTRANDO G., FONTAINE B., RICHARD Y., 2002. Pluviométrie et crises climatiques en Afrique Tropicale : changements durables ou fluctuations interannuelles?, *Historiens et Géographes*, n° 379, p. 263-273.
- CAMBERLIN P., OKOOLA R., DIOP M., VALIMBA P., 2003. 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*, vol. 15, p. 295-303.
- CARBONNEL J.-P., HUBERT P., 1992. Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Remise en cause de la stationnarité des séries, in *L'aridité : une contrainte au développement*, ORSTOM, p. 37-51.
- CARBONNEL J.-P., HUBERT P., 1985. Sur la sécheresse au Sahel de l'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex Haute-Volta). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 301, série II, p. 941-944.
- COUREL M.-F., 1984. *Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites*. Thèse de doctorat, Paris 1. 407 p.
- DACOSTA H., KONATE Y.K., MALOU R., 2002. *La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle*, Friend 2002-Regional Hydrolog : Bridging the Gap between Research and Practice (Proceedings of the Fourth International FRIEND, Conference held at Cape Town. South Africa), IAHS Publ. n° 274, p. 499-506.
- DEMAREE G. R., 1990. An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station, *Theoretical and Applied Climatology*, 42, p. 139-147.
- DESCROIX L., DIOGUE NIANG A., PANTHOU G., BODIAN A., SANE Y., DACOSTA H., MALAM ABDOU M., VANDERVAERE J.-P., QUANTIN G., 2015. Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le Bassin du Niger Moyen, *Climatologie*, vol. 12, p. 25-43.
- GAUTIER F., LUBES-NIEL H., SABATIER R., MASSON J.-M., PATUREL J.-E., SERVAT E., 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989, *Hydrological Sciences Journal*, 43, p. 921-935.
- GAYE D., 2017. *Fréquence des aérosols désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal (Stations de Saint-Louis, Podor et Matam) : effets radiatifs, conséquences sur la visibilité horizontale et impacts sanitaires*. Thèse de Doctorat unique de Géographie, Université Gaston Berger de Saint-Louis (Sénégal), Parcours : Écosystèmes et environnement, Option : Climatologie, 385 p.
- HOUNDENOU C., HERNANDEZ K., 1998. Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale), *Sécheresse*, n° 1, vol. 9, p. 23-34.
- LE BORGNE J., 1988. *La pluviométrie au Sénégal et en Gambie*, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Département de Géographie, Laboratoire de Climatologie, 96 p.
- LEBEL T., ALI A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, n° 375, p. 52-64.
- LE LAY M., GALLE S., 2005. Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien, *Hydrological Sciences Journal*, n° 50, vol. 3, p. 509-524.
- MOREL R., 1998. Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest, in Demaree G., Alexandre J., De DAPPER M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*, Brussels, Royal Meteorological Institute of Belgium and Royal Academy of Overseas Sciences, p. 200-211.
- MORON V., 1996. Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992), *Sécheresse*, n° 1, vol. 7, p. 25-32.
- NDONG J.-B., 1995. L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la sécheresse récente sur l'environnement, in *Revue de géographie de Lyon*. Vol. 70, n° 3-4, Sahel, la grande sécheresse. p. 193-198.

- NICHOLSON S.E., 2005. On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel, *Journal of Arid Environment*, n° 63, p. 615-41.
- NICOLAS J.-P., 1959, *Bioclimatologie humaine de Saint-Louis (Essai de Méthodologie bioclimatologique)*. Mémoire de l'Institut Française d'Afrique Noire (IFAN)-Dakar, n° 57, 340 p.
- OZER P., 2001. Les Lithométéores en région sahélienne, un indicateur climatique de la désertification, *GEO-ECOTROP*, Revue internationale d'Écologie et de Géographie tropicales, vol. 24, 327 p.
- PATUREL J.-E., SERVAT E., DELATTRE M. O., LUBES-NIEL H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique, *Hydrological Sciences journal*, 43, p. 937-946.
- PETERS M., TETZLAFF G., 1988. A composite study of early summer squallines and their environment over west Africa, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 38, p. 153-163.
- PETTITT A. N. (1979) : A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), p. 126-135.
- SAGNA P., 1994. L'évolution de la mousson et des précipitations au Sénégal de 1974 à 1993. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 7, p. 311-317.
- SAGNA P., 1988. *Étude des lignes de grains en Afrique de l'Ouest*. Thèse de doctorat de 3^e cycle de Géographie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, t. 1, 291 p.
- SECK A., 1962. Le « Heug » ou pluie de saison sèche au Sénégal. *Annales de Géographie*, 71 (385), p. 225-246.
- SERVAT E., PATUREL J.-E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., BOYER J.-F., 1988. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale, *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte-d'Ivoire, November 1998)*. IAHS Publ. n° 252, p. 323-337.
- SHINODA M., OKATANI T., SALOUM M., 1999. Diurnal variations of rainfall over Niger in the West African Sahel: A comparison between wet and drought years. *International journal of climatology*, 19, p. 81-94.
- SIVAKUMAR M.V.K., 1991. Drought Spells and Drought Frequencies in West Africa. Research Bulletin, Icrisat Sahelian Center Patancheru, Andhra Pradesh, India, 13, 180 p.
- SIVAKUMAR M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa, *Agric For Meteorol*, 42, p. 295-305.
- SY B.A., 2008, *Milieus, sécheresse climatique et érosion éolienne : étude géomorphologique du Sahel sénégalais*. Thèse de doctorat d'État Es Lettres et Sciences humaines, Université Gaston Berger de Saint Louis, 429 p.
- TARHULE A., WOO M., 1998. Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. *International journal of Climatology*, 18, p. 1261-1271.
- WADE C.T., 2008, *Problématique de la gestion durable des usages littoraux au niveau de la Grande Côte sénégalaise*. Thèse de Doctorat, spécialité Écosystème et Environnement, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 302 p.