

Variabilité spatio-temporelle des pluies de 1950 à 2014 dans le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès (De Pout à Darou Khoudoss), Sénégal

Table des matières

I.	Introduction.....	543
II.	Données et méthodes	544
1.	Zone d'étude	544
2.	Les données brutes	545
3.	Méthodologie.....	547
3.1.	Méthodes d'analyse de séries chronologiques	547
3.2.	Répartition spatiale des pluies	549
3.3.	Caractérisation de la variabilité interannuelle des pluies	549
3.4.	Caractérisation des indices standardisés des précipitations	549
III.	Résultats	550
1.	Homogénéisation des pluies annuelles	550
2.	Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques	552
3.	La pluviométrie moyenne dans le bassin	554
3.1.	Analyse comparative des normales pluviométriques	554
3.2.	Analyse comparative des décennales pluviométriques	556
4.	Analyse de la variabilité interannuelle de la pluviométrie	558
5.	Les indices standardisés des précipitations	562
IV.	Conclusion et discussion	565

I. Introduction

Devant l'immensité des défis économiques, sociaux et environnementaux qui caractérisent l'état de la planète en ce début de 21e siècle, les communautés scientifiques et universitaires du Nord et du Sud ont un rôle spécifique à jouer par leur contribution aux avancées mondiales de la connaissance et à la promotion de recherches utiles pour atteindre les Objectifs de Développement Durable (ODD) adoptés par l'ONU en 2015¹.

La question du changement climatique fait l'objet d'un grand débat au sein de la communauté scientifique internationale entre ceux qu'on appelle climato-sceptique ou « réaliste » et climatologue ou « réchauffiste ».

Cependant, ce qui paraît intéressant c'est que tous les spécialistes du climat sont d'accord sur le fait qu'il y a une forte variabilité climatique à l'échelle de notre planète. Tous les pays du monde sont témoins des graves répercussions du changement climatique (augmentation de la température, sécheresse, fonte des glaces...). Cette prise de conscience a poussé la communauté scientifique internationale à organiser plusieurs rencontres et à publier plusieurs rapports sur les conséquences possibles de la modification de la composition chimique de l'atmosphère.

Les progrès de la science ont permis, dès lors, de dépasser le simple stade du constat d'un changement climatique et de s'intéresser à ses impacts, qui sont bien souvent locaux. Parmi les différents impacts du changement climatique, ceux affectant le cycle de l'eau sont une des préoccupations majeures des sociétés humaines (coalition eau, 2014)².

Le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès connaît une variabilité spatiotemporelle des précipitations. A cela s'ajoute l'exploitation des nappes pour l'approvisionnement en eau potable et industrielle (usine de concassage des roches calcaires des cimenteries, usine d'extraction d'eau douce). Cette situation se traduit par un abaissement rapide du plan d'eau et l'inaccessibilité des eaux souterraines. L'essentiel des mares temporaires, bas-fonds de la zone et lieu de convergence des eaux de ruissellement, ont vu leur période de stagnation des eaux diminuée, passant de 6 mois à moins de 3 mois. Dans le bassin versant de Diender, le lac Tamna, exutoire naturel de plusieurs bas-fonds, s'est asséché. Dans le bassin versant de Darou Khoudoss, le lac Wangal, qui participe à la recharge des nappes des

¹ <https://www.ird.fr/ecole-dete-des-objectifs-de-developpement-durable>

² www.coalition-eau.org

Niayes, ne reçoit plus suffisamment d'eau pour la recharge de la nappe phréatique (Ndour, T., 2000). Les ressources édaphiques sont soumises aux effets de l'érosion hydrique et éolienne mais aussi à la salinisation et au comblement de l'essentiel des bas-fonds qui jouent le rôle de véritable support de l'activité agricole. Cela traduit une perte significative de terres arables, perturbant le développement agricole.

Cet article a pour objectif d'apporter une contribution à la connaissance de la variabilité pluviométrique dans le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès, pour mieux comprendre les anomalies pluviométriques.

De manière spécifique, il s'agit de l'analyse de la pluviométrie inter-normale, inter-décennale et interannuelle avec l'application d'indices et de tests de rupture.

II. Données et méthodes

1. Zone d'étude

Le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès, objet de cette recherche, est composé de deux sous-bassins versants contigus qui couvrent une superficie de 636 km². Ils se situent entre la latitude 14°45'et 15°5'Nord et la longitude 16°35'et 17' Ouest et s'insinue entre le cordon de dune littorale et le front de la cuesta, le long des axes du réseau hydrographique (Michel, P., 1972).

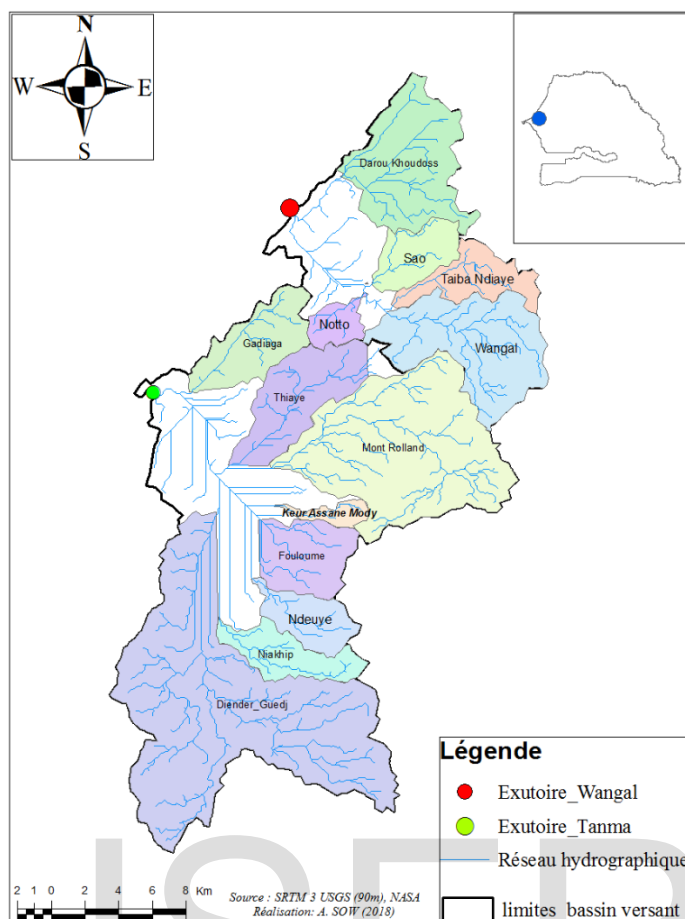


Figure 1 : Situation des bassins versants de la dépression de la cuesta de Thiès

2. Les données brutes

L'analyse de la pluviométrie porte sur 11 stations : une station synoptique (Thiès), et 10 stations pluviométriques (Tivaouane, Mboro, Pout, Taïba Ndiaye, Kayar, Keur Mousseu, Sébikotane, Notto Gouye Diama, Pambal, et Mont-Rolland). Le critère de sélection des stations repose sur la base :

- la longueur de leur série chronologique ;
- de leur position géographique par rapport au bassin ;
- et la régularité de leurs observations

L'information pluviométrique pour notre étude provient du réseau de l'ANACIM, du Laboratoire de Morphologie et d'hydrologie du Département de Géographie et de la Direction Départementale de l'Agriculture et de l'Élevage de Tivaouane.

Le Laboratoire de Morphologie et d'Hydrologie du Département de Géographie nous a permis de recueillir les données pluviométriques pour les stations de Thiès de 1918 à 2010 et de

Tivaouane de 1918 à 1990, nous avons complété la série de données jusqu'en 2014 pour la station de Tivaouane à partir des données recueillies à la Direction Départementale de l'Agriculture et de l'Elevage de Tivaouane. Les stations de Tivaouane, avec 96 ans d'observations, de Thiès, 92 ans d'observation et de Mboro, 64 ans d'observation présentent les séries les plus complètes et les plus longues. Les autres stations des bassins versants présentent des durées d'observations moins longues. Les données pluviométriques collectées « passent souvent un certain nombre d'opérations dont la transcription et la saisie sur divers supports » (Brunet-Moret, 1969b). Elles présentent parfois des erreurs. Parmi les plus notées : les décalages du jour de pluie, le mauvais placement des virgules sur les valeurs, l'absence ou l'oubli de l'agent chargé de l'observation de la station. Ces « erreurs systématiques » sont souvent à l'origine des valeurs aberrantes, des lacunes journalières, mensuelles, voire annuelles, enregistrées sur les séries chronologiques de certaines stations. Ces lacunes entachent la qualité de ces données. Une homogénéisation des données est nécessaire.

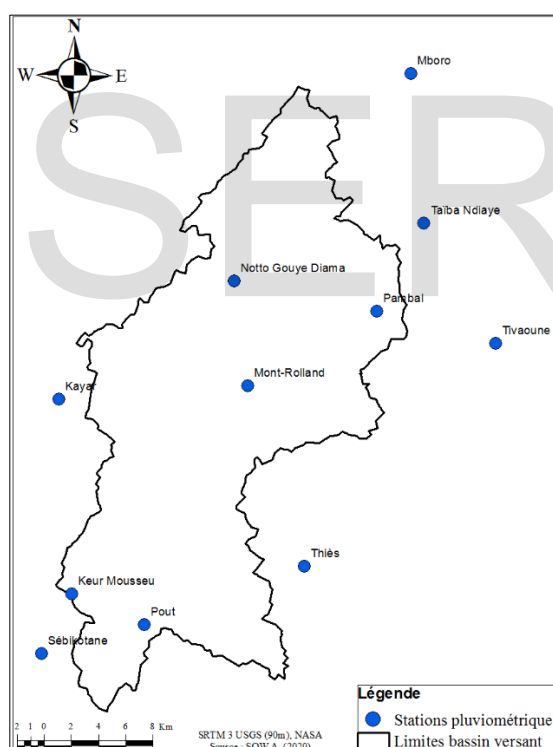


Figure 2 : Stations pluviométriques du bassin de la dépression de la cuesta de Thiès

Tableau 1 : liste des stations pluviométriques de l'étude.

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Début d'observation
Thiès	14.8	-16.95	75	1918

Tivaouane	14.95	-16.82	56	1918
Mboro	15.13	-16.88	34	1950
Mont-Rolland	14.92	-16.99	130	1986
Notto-Gouye-Diama	14.99	-17	41	1980
Pambal	14.97	-16.9	91	1986
Taïba-NDIAYE	15.03	-16.87	68	1980
Sébikotane	14.74	-17.13	34	1980
Pout	14.76	-17.06	95	2005
Keur Mousseu	14.78	-17.11	46	2004
Kayar	14.91	-17.12	9	1989

3. Méthodologie

La méthode du vecteur régional (Brunet-Moret, 1979) a servi à l'homogénéisation des séries pluviométriques annuelles. Elle consiste en l'élaboration d'une série chronologique d'indices pluviométriques, issus de l'extraction de l'information la plus « probable » – au sens de la plus fréquente – contenue dans les données d'un ensemble de stations d'observation groupées en « région ». Le vecteur régional est donc « une suite chronologique d'indices annuels de précipitations prenant en compte les effets de persistance, de tendance, de pseudo-cycles de la zone climatique, mais homogène dans le temps » Brunet-Moret (1979). « Le vecteur possède un potentiel informatif élevé car à l'encontre d'un poste d'observation, il fournit la « signature » des événements hydroclimatologiques, débarrassée du « bruit » inhérent aux procédés d'acquisition de l'information ou provoqué par une anomalie localisée au point de mesure » (Hiez *et al.*, (non daté). L'indice Z_i d'une année i est calculé, avec les observations de toutes les stations prises en compte et dont le nombre peut varier d'une année à l'autre, par la formule :

$$Z_i = \frac{\Sigma(P_{ai}/P_{am})}{n}$$

Où :

Σ : représente la somme des valeurs pour les stations de 1 à n ,

P_{ai} : la pluie annuelle de l'année i à la station a ,

P_{am} : la moyenne de la série des pluies annuelles à la station a et n le nombre de stations.

3.1. Méthodes d'analyse de séries chronologiques

Durant le siècle dernier, la situation climatique mondiale a connu de profonds bouleversements zonaux parmi lesquels la zone intertropicale en général et l'Afrique de l'Ouest en particulier se démarquent le plus. Ces bouleversements souvent « brutaux » sont détectés à travers l'étude des séries chronologiques pluviométriques.

La détection des ruptures au sein des séries chronologiques s'est faite par l'application de plusieurs tests et méthodes. Ces tests (le test de Mann Whitney modifié par Pettitt (1979), statistique U de Buishand, (1982, 1984) et ellipse de contrôle de Bois (1971, 1986), la méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977), la segmentation de Hubert et le test de normalité) sont intégrés au logiciel KhronoStat développé au sein du Programme Grands Bassins Tropicaux de l'ORSTOM (Lubes *et al.*, 1994 ; Ecole des Mines de Paris et l'UMR GBE de l'Université de Montpellier II, 1998).

Les résultats de l'analyse des séries chronologiques par le test de normalité concluent que les données des séries des stations étudiées suivent une loi normale (avec une transformation logarithmique). En outre tous les admettent une rupture avec des degrés de confiance entre 99 et 90 %.

- Statistique de Buishand : Son approche Bayésienne est performante pour détecter une rupture en milieu de série mais il ne permet pas de donner de manière précise la date de la rupture en cas de rejet de l'hypothèse nulle. (Khodja *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1999).
- Test non paramétrique de Pettitt : Réputé pour sa robustesse. Ce test s'appuie sur le découpage de la série en deux sous échantillons à l'image du test de Lee et Heghinian.
- Test de segmentations de Hubert : Il est plus approprié à la détection de plusieurs ruptures liées à la variation de la moyenne. Ce test découpe la série d'observations en plusieurs « sous séries contigües, et ceci pour des ordres (nombre de segments ou sous-séries) croissants ». Pour chaque ordre de segmentation, « la meilleure segmentation est celle qui minimise une distance égale à la somme des écarts quadratiques entre chacune des valeurs de la série et sa moyenne locale (moyenne de la sous-série à laquelle appartient une valeur) » (Hubert *et al.*, 1989). Parmi les tests de rupture regroupés dans KhronoStat, quatre sont retenus pour cette étude, à savoir le test de Pettitt, de Buishand, celui de LEE et Heghinian et la méthode de segmentation de Hubert. Comme le souligne A.J. Niang (2008), ces tests sont réputés pour leur robustesse et leur puissance et ont fait l'objet de plusieurs applications dans différentes régions d'Afrique (S. Vannitsen et G. Demarée, 1991 ; É. Servat *et al.*, 1997, 1998, 1999 ; J.E. Paturel *et al.*, 1998 ; A. Kingumbi *et al.*, 2001 ; A. Goula *et al.*, 2005) cité par Bodian (2015).

3.2. Répartition spatiale des pluies

La spatialisation des précipitations annuelles sur le bassin a été faite avec Surfer 8.0. Il existe plusieurs méthodes de spatialisation ou interpolation spatiale (les méthodes de Thiessen, de l'inverse du carré de la distance ($1/\text{distance}^2$) et du krigeage). La méthode utilisée est celle du krigeage. C'est « une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui estime la valeur d'une variable en des points non observés par une combinaison linéaire sans biais et une variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins » Baillargeon (2005). La spatialisation a été faite sur deux périodes différentes : les moyennes pluviométriques glissantes de 30 ans se succédant les unes aux autres tous les 10 ans (Kouassi *et al.*, 2010) et les moyennes pluviométriques décennales (10 ans), de 1951 à 2010.

La normale 1951-1980 et la décennie 1951-1960 servent de référence pour l'analyse de la variabilité spatiale de la pluie moyenne.

Au Sénégal, la dégradation climatique a entraîné une translation des isohyètes du nord vers le sud (Sagna P. 2005). La représentation spatiale de la pluviométrie a permis de voir l'évolution spatiale des isohyètes au fil des années et de caractériser ainsi la dynamique des pluies dans le bassin versant.

3.3. Caractérisation de la variabilité interannuelle des pluies

Les données utilisées proviennent de l'homogénéisation avec le Vecteur Régional.

L'analyse porte sur la période 1950 à 2014. L'évolution de la pluviométrie sur cette période de 65 ans permet de comprendre les modifications qui ont contribué à la dégradation des ressources naturelles et à l'adoption de nouvelles méthodes de cultures par les paysans

Ces variations interannuelles sont mises en évidence par des variations en dents de scie L'évolution montre deux périodes distinctes qui seront analysées :

- La première période pluvieuse va de 1950 à 1969 (19 ans)
- La seconde période va de 1970 à 2014 (45 ans)

3.4. Caractérisation des indices standardisés des précipitations

Plusieurs indices sont utilisés pour caractériser la variabilité interannuelle de la pluviométrie dont l'Indice pluviométrique (I_i) défini par Lamb en 1982 (Paturel *et al.*, 1998 et Dao *et al.*, 2010). Ce dernier est connu sous appellation : l'indice de Nicholson et/ou l'Indice Standardisé des Précipitations ou *Standardized Precipitation Index* (SPI en anglais). Cet indice sert à mettre

en évidence les déficits et les excédents annuels d'une série pluviométrique donnée à travers la formule ci-dessous :

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S}$$

La moyenne interannuelle d'une série correspond à l'indice nul (0) selon l'indice. Une période normale est une période pendant laquelle une fluctuation identique s'observe de part et d'autre de cette moyenne.

Avec :

X_i : pluviométrie de l'année i .

X : pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence, et

S : écart-type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence.

Nous avons utilisé l'Indice pluviométrique pour approfondir l'analyse de la variation interannuelle ; car en plus de son efficacité dans la mise en évidence des excédents et des déficits pluviométriques (figure 64), cet indice permet de mesurer « l'ampleur de la sécheresse (ou de l'humidité) pour chacune des années de la série chronologique (Wu *et al.*, 2005) cité par Dao *et al.*, 2010) ».

Les Indices Standardisés de Précipitations (SPI) sont classés en 6 principales gammes de valeurs dont chacune représente l'effet du phénomène climatique.

Ces gammes de valeurs et leur interprétation (tableau 12) sont obtenues à partir de l'équation suivante :

$$A_i = \left(\frac{n_i}{N} \right) * 100$$

Avec

A_i : le pourcentage des années concernées par la classe i ,

n_i : le nombre d'année de la classe i , et

N : le nombre total d'années sur la période d'étude.

III. Résultats

1. Homogénéisation des pluies annuelles

Le vecteur régional a été calculé à l'aide du logiciel Hydraccess (Vauchel, 2000) sur la période 1950-2014, les années 1918 et 1949 ayant été éliminées pour insuffisance de stations.

Les séries d'indices pluviométriques couvrent la période 1950-2014. L'illustration (figure 03 et 04) des indices pluviométriques des stations des principales régions drainées par le bassin versant corrélée avec le Vecteur Régional montre l'efficacité de celui-ci à reproduire la parfaite évolution pluviométrique d'un ensemble combiné de stations pluviométriques d'une région donnée. Les années lacunaires ont été comblées.

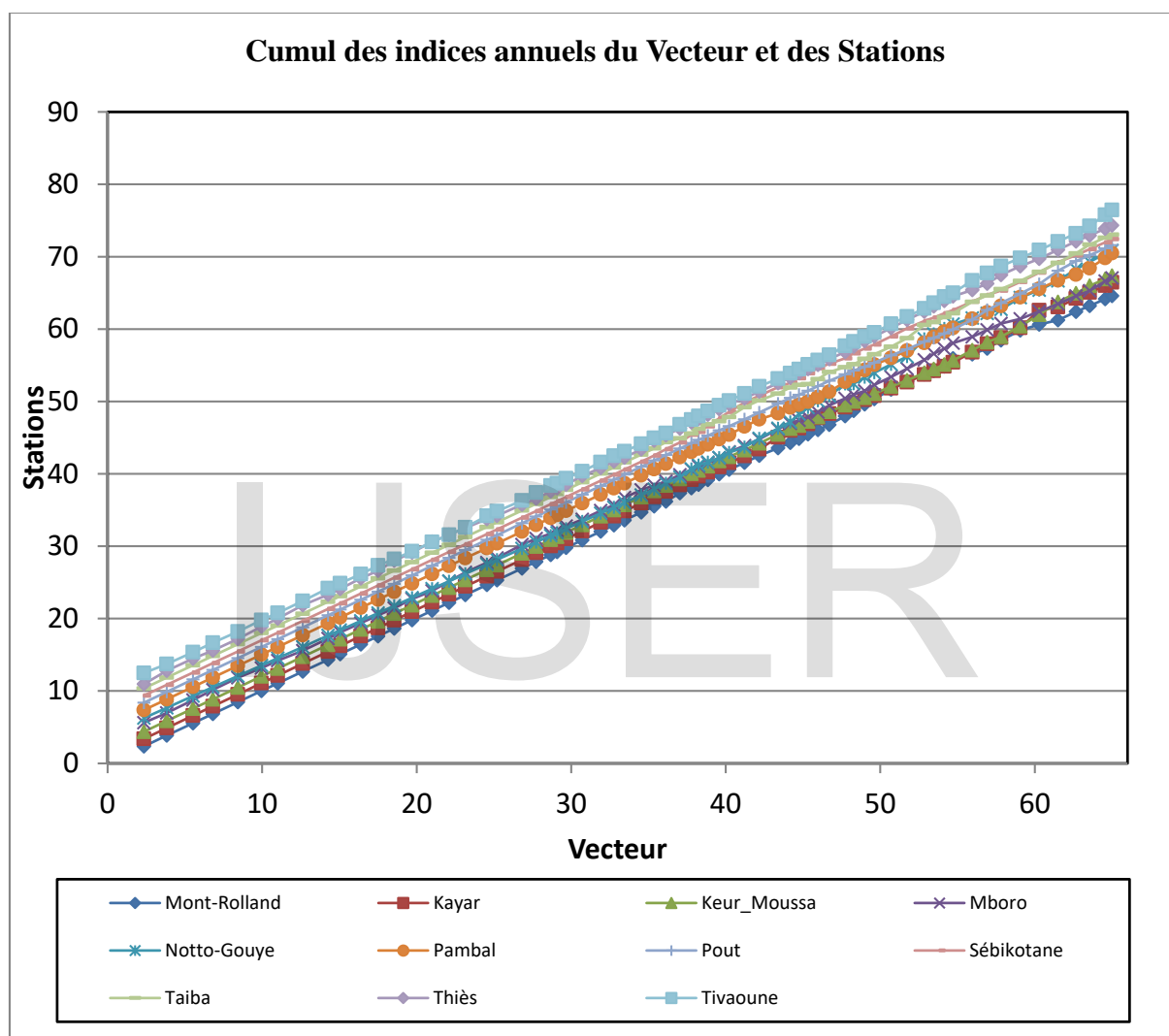


Figure 3 : Cumul des indices annuels du vecteur et des stations

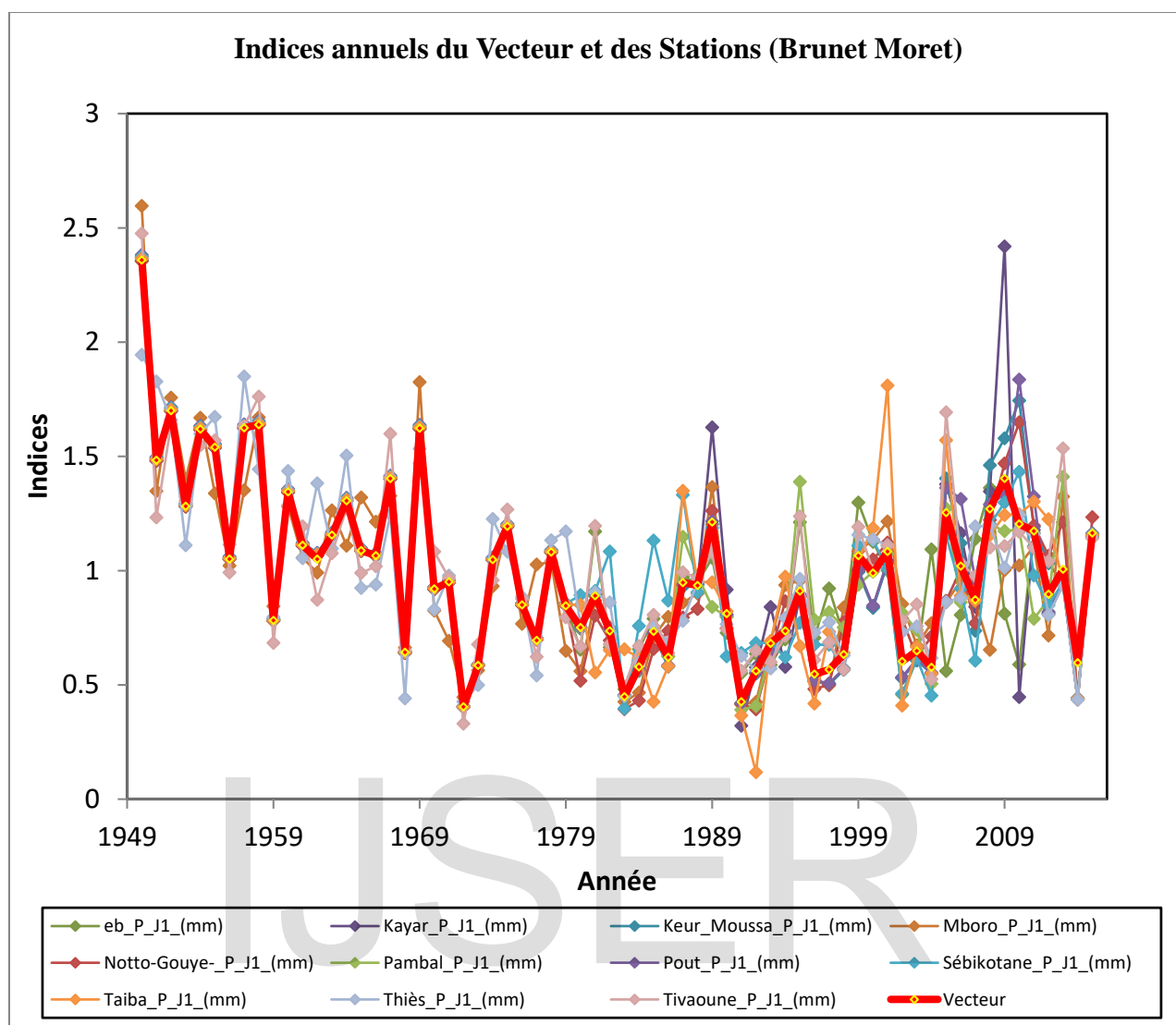


Figure 4 : indices du vecteur régional

2. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques

Les résultats de la détection des ruptures (tableau 2) montrent que les séries de pluies annuelles ne sont pas stationnaires, comme l'ont montré de nombreux travaux (Snijders 1986 ; Musy et Meylan, 1987 ; Hubert et Carbonnel, 1989 ; Hubert *et al.*, 1989 ; Khodja *et al.*, 1998 ; Lubès-Niel *et al.* ; 1998). Elles présentent des ruptures sur 3 dates différentes comprises entre 1967 (Keur Moussa) et 1970 (Tivaouane). L'essentiel des ruptures est détecté en 1969.

Les moyennes pluviométriques annuelles des sous séries de chaque station, calculées avant et après la rupture, montrent une baisse de 183,1 mm (Pout) à 228,8 mm (Tivaouane) après la rupture. Cette baisse correspond à des déficits estimés entre 37,9 % (Pout) et 37,7 % à Tivaouane, soit en moyenne 37,8 %.

Tableau 2 : détection des ruptures au sein des séries

Station	Méthodes	Moyennes	Ecart type	Rupture
Thiès				
Moyenne 1950-2014	Test de Pettitt			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		684,40	161,23	1969/7
Moyenne après rupture (1970-2014)		426,15	128,3	
Mboro				
Moyenne 1950-2015	Lee et Heghinian/TOUT			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		517,81	121,99	1969
Moyenne après rupture (1970-2014)		322,43	97,07	
Tivaouane				
Moyenne 1950-2014	Test de Pettitt			
Moyenne avant rupture (1950-1970)		606,57	142,89	1970
Moyenne après rupture (1971-2014)		377,71	113,71	
Mont-Rolland				
Moyenne 1950-2014	Test de Pettitt			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		622,33	146,6	1969
Moyenne après rupture (1970-2014)		387,5	116,67	
Sébikotane				
Moyenne 1950-2014	Test de Pettitt			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		624,49	147,12	1969
Moyenne après rupture (1970-2014)		388,85	117,06	
Pout				
Moyenne 1950-2014	Test de Pettitt			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		483,14	113,83	1969

Moyenne après rupture (1970-2014)		300,85	90,57	
Pambal				
Moyenne 1950-2014	Test d'Hubert/PTT			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		580	136,64	1969
Moyenne après rupture (1970-2014)		361,16	108,73	
Notto Gouye Diama				
Moyenne 1950-2014	Test Pettitt			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		560,16	131,97	1969
Moyenne après rupture (1970-2014)		348,82	105,01	
Keur Moussa				
Moyenne 1950-2014	Test Lee et Heghinian			
Moyenne avant rupture (1950-1967)		536,72	126,45	1967
Moyenne après rupture (1968-2014)		334,2	100,62	
KAYAR				
Moyenne 1950-2014	Test Buishand			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		433,71	102,17	1969
Moyenne après rupture (1970-2014)		270,06	81,3	
Taïba NDIAYE				
Moyenne 1950-2015	Test d'Hubert			
Moyenne avant rupture (1950-1969)		464,6	109,46	1969
Moyenne avant rupture (1970-2014)		289,3	87,09	

3. La pluviométrie moyenne dans le bassin

3.1. Analyse comparative des normales pluviométriques

L'analyse des cartes de variations des isohyètes (figure 5) montre que le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès est situé sur une zone de pluviométrie moyenne variant entre les isohyètes 330 mm à l'ouest et 550 mm à l'est. Les deux premières normales (1951-1980, 1961-1990) ont été les plus humides dans la zone. Elles se caractérisent par une migration des

isohyètes en direction du sud-est. L'isohyète 550 mm n'est apparu que sur la normale 1951-1980 puis elle a migré hors du bassin à l'est. Cette migration des isohyètes s'est beaucoup amplifiée avec la normale 1971-2000. En effet, sur cette période les isohyètes 450 mm, 500 mm et 550 mm migrent complètement hors du bassin versant à l'est (avec l'apparition des 330 mm à l'ouest). Cette disparition de ces isohyètes explique la longue sécheresse des années 1970, 1980 et 1990 dans la zone. Enfin à la dernière normale (1981-2010), les isohyètes ont entamé une nouvelle mais faible migration en direction de l'ouest avec une réapparition à l'est des 400mm.

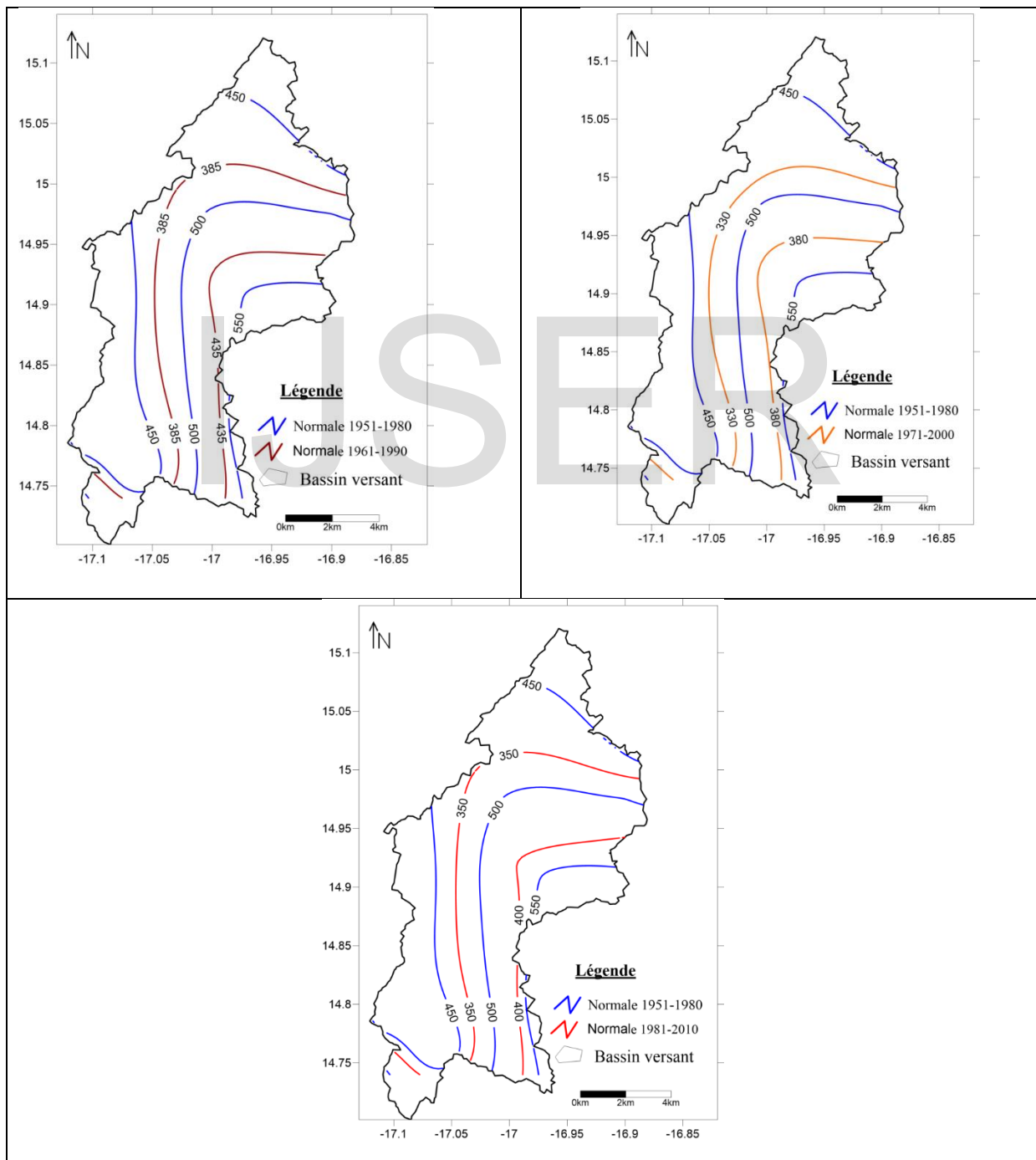


Figure 5 : Carte de spatialisation des pluies moyennes inter-normales

3.2. Analyse comparative des décennales pluviométriques

L'observation des cartes des isohyètes inter-décennales (figure 6) donne un aperçu plus détaillé de la diminution de la pluviométrie. Celle-ci a progressivement baissé dans le temps de 1951 à 2000 avec une migration des isohyètes en direction de l'est. La décennie 1951-1960 est la plus humide avec des moyennes annuelles comprises, d'ouest en est, entre 550 mm et 700 mm.

La décennie 1961-1970, tout comme la précédente, s'est révélée aussi pluvieuse malgré le basculement des isohyètes de 600 mm, 650 mm et de 700 mm vers l'est hors du bassin versant. Les périodes 1971-1980 et 1981-1990 sont moins pluvieuses. Le secteur étudié est balayé par les isohyètes comprises entre 340 mm et 400 mm. Les quantités de pluie recueillies sont, entre 350 mm et 400 mm sur la période 1971-1980 et 340 mm à 390 mm sur la décennie 1981-1990. La période de 1991-2000 est beaucoup moins pluvieuse. En effet, elle est marquée par l'apparition de l'isohyète 290 mm à l'ouest du bassin versant. Enfin les années 2000 sont marquées par une tendance au redressement des moyennes pluviométriques ; mais elles restent toujours faibles. La remontée des isohyètes 410 mm et 460 mm met en évidence l'amélioration de la pluviométrie comme plusieurs travaux récents l'ont montré dans les autres régions soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest (Eklundh, Olsson, 2003 ; Olsson *et al.*, 2005 ; Fensholt, Rasmussen, 2010 ; Fall, 2014 ; Marega, 2016), alimentant ainsi le débat sur le reverdissement du Sahel cité par (Faye B. et al. 2018).

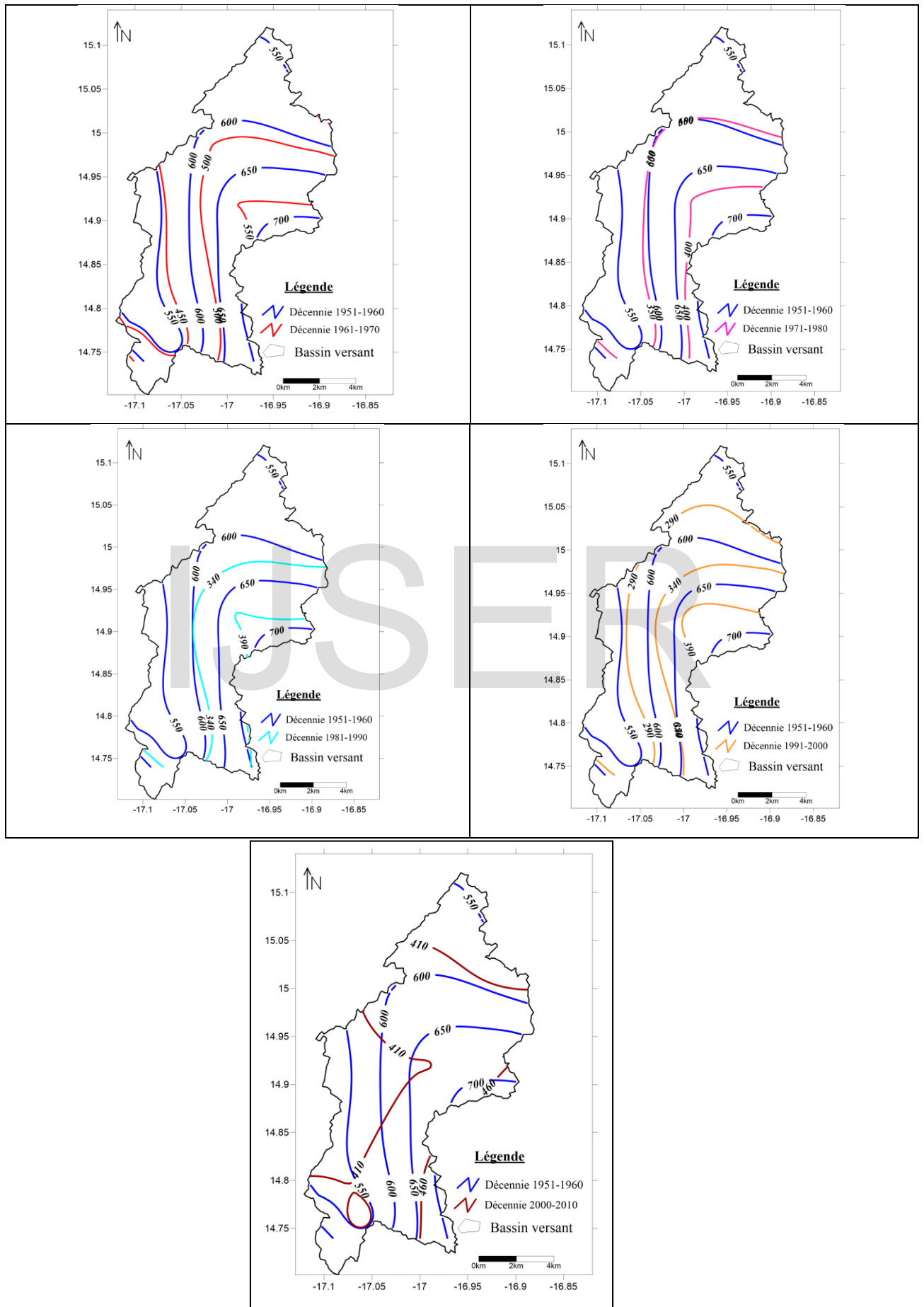


Figure 6 : Carte de spatialisation des pluies moyennes inter-décennales

4. Analyse de la variabilité interannuelle de la pluviométrie

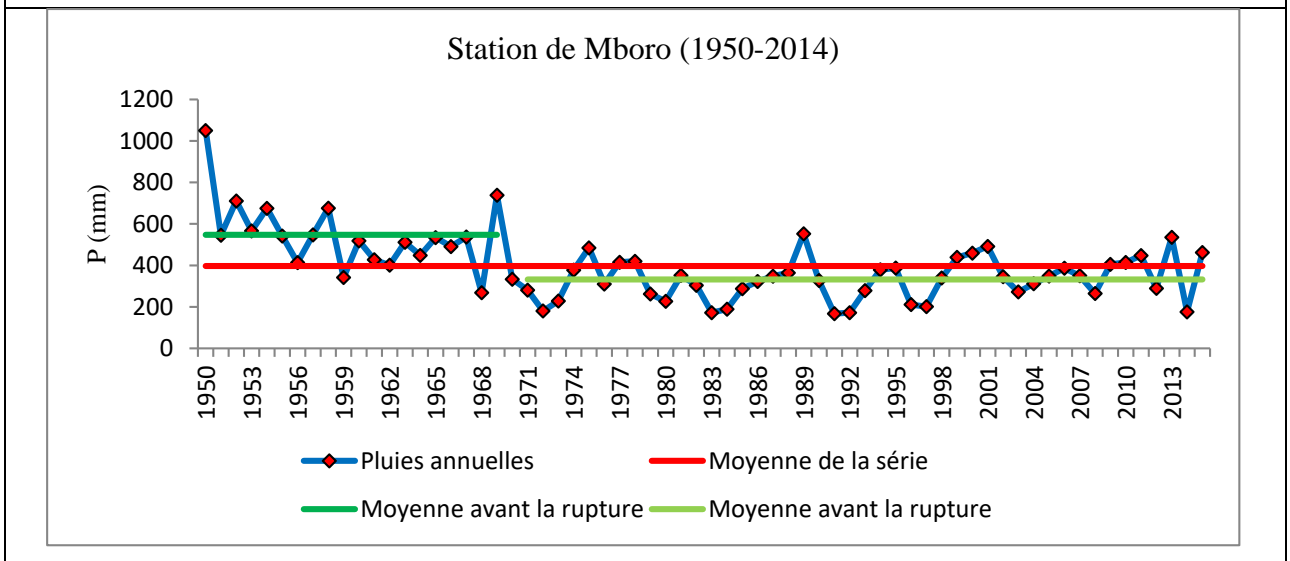
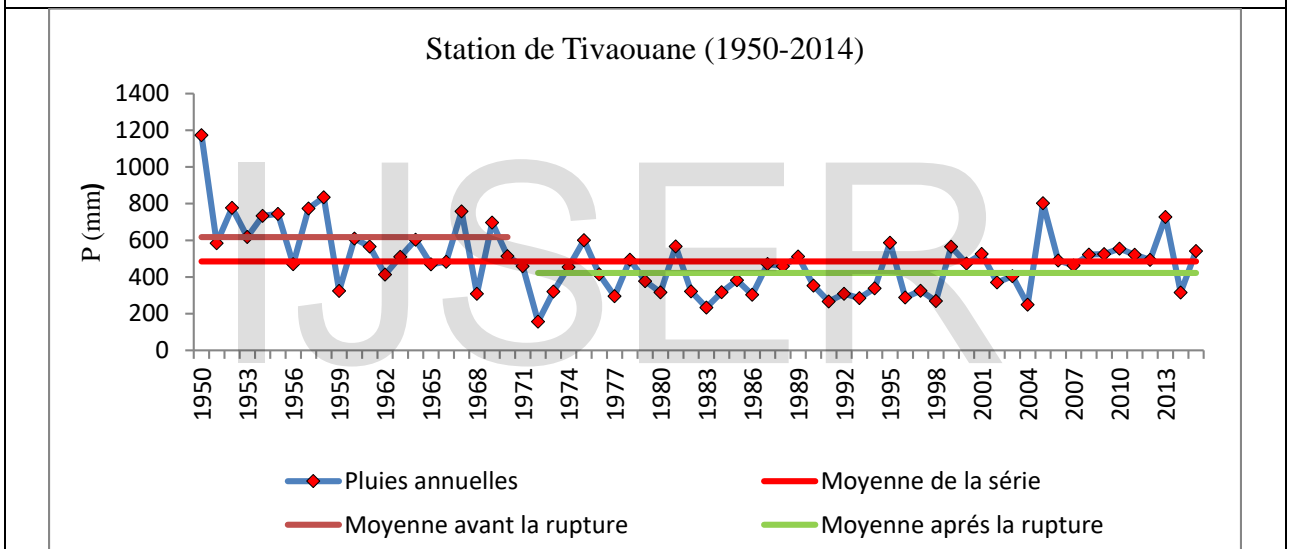
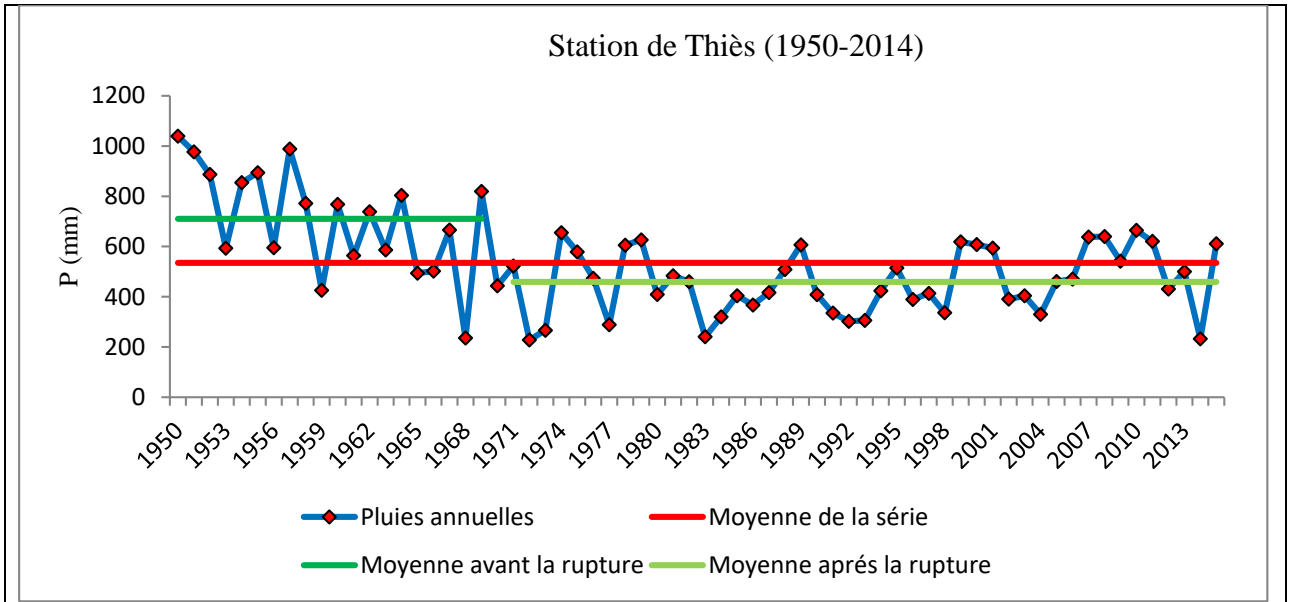
La répartition interannuelle des précipitations est à la fois témoin et acteur des variations climatiques (Mahé 1992). Le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès enregistre des moyennes annuelles pluviométriques assez importantes. Jusqu'en 1970, la moyenne pluviométrique annuelle atteignait à la station de Thiès 710 mm (données de 1950 à 1969). On observe ensuite une diminution globale des pluies, sur la période 1970 à 2014, la moyenne annuelle est de 458,8 mm. Cela est à l'image de toutes les autres stations de la zone d'étude qui ont connu des déficits importants.

A Tivaouane les précipitations annuelles ont beaucoup varié entre 1950 et 2014. L'analyse de la pluviométrie montre un déficit pluviométrique important (figure 7). En 1950 la moyenne annuelle se situait à plus de 600 mm et aujourd'hui (2014) cette moyenne n'est plus que 400 mm soit une diminution de 200 mm en l'espace de 64 ans. Le maximum de la série se situe en (1950) avec 1173,7 mm et le minimum en 1972 (154,6 mm). Entre 1970 et 2014, la pluviométrie annuelle n'a dépassé que deux fois 600 mm (2005 et 20013) avec respectivement 802,7 mm et 727,7 mm.

Comme la station de Tivaouane, la station de Mboro a connu une très forte variation de la pluviométrie annuelle. Le déficit pluviométrique est très marqué entre 1950 et 2014 (figure 7). En 1950 la moyenne annuelle se située 547.12 mm, aujourd'hui (2014), cette moyenne n'est plus que 450 mm, soit une diminution de 250 mm à l'espace de 65 ans. L'année 1950 est la plus humide, elle atteint 1050,2 mm et l'année la plus sèche correspond à 1991 avec 167.4 mm. Entre 1970 et 2014, la moyenne annuelle n'a pas dépassé 600 mm.

Les déficits pluviométriques installent une période de sécheresse qui a eu des conséquences non négligeables sur les ressources naturelles. Ils ont contribué à la dégradation de l'environnement de la zone des Niayes par l'augmentation de la salinité des sols et leur acidification consécutive, l'assèchement très rapide des eaux de surface notamment dans les bas-fonds d'où une importante perte de terres cultivables pour le maraîchage. (SOW A., 2015).

Toutefois, dans la période 2005 à 2013 une légère reprise de la pluviométrie est notée sans toutefois jamais atteindre la moyenne d'avant 1970. Cette tendance sèche s'est maintenue malgré quelques années excédentaires. De nos jours les quantités d'eau reçues tournent en moyenne autour de 400 mm par an. Par ailleurs, les précipitations présentent une grande variabilité annuelle.



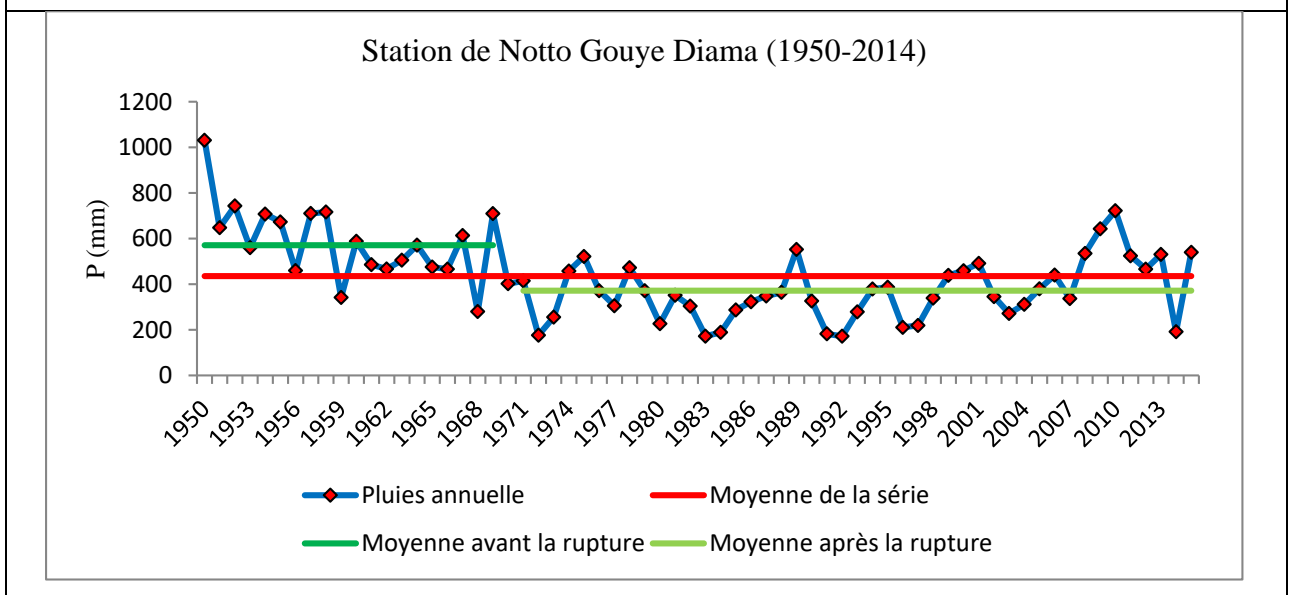
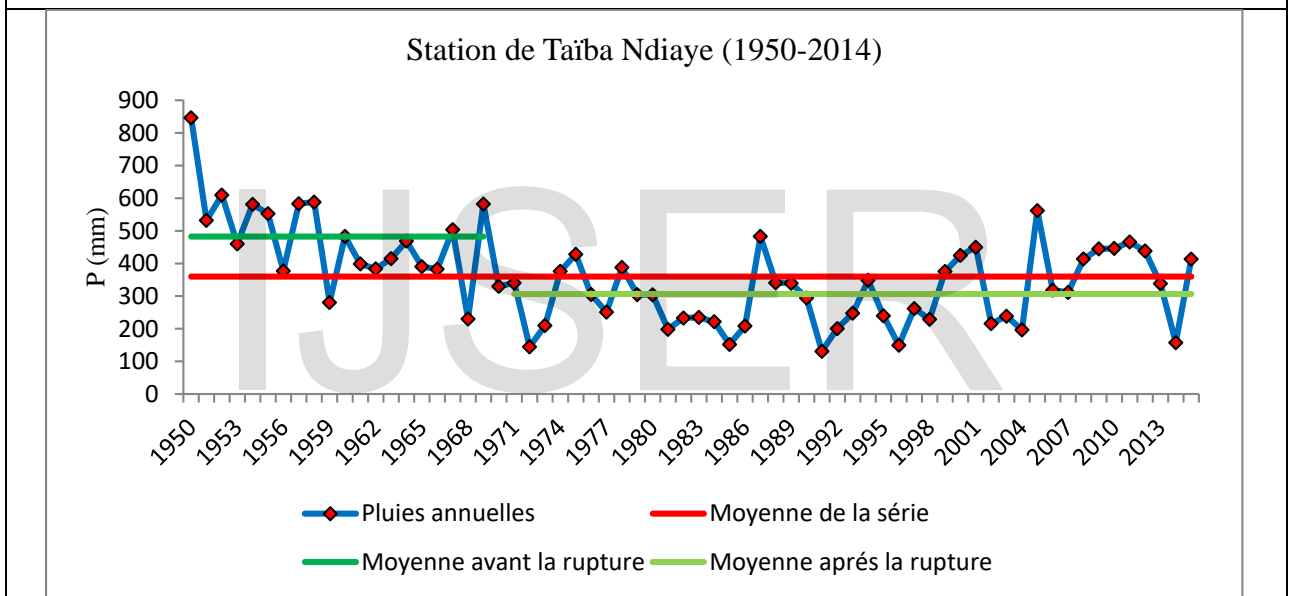
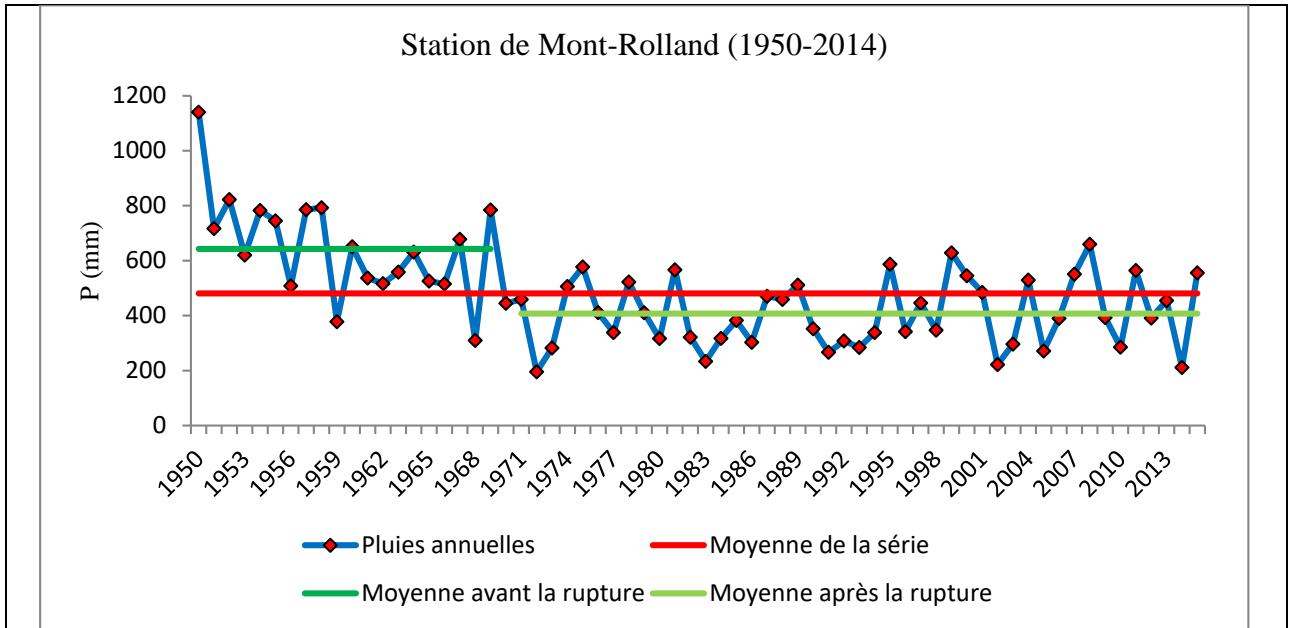


Figure 7 : variabilité interannuelle de la pluviométrie (1950-2014)

- la 1^{ère} période s'étend de 1950 à 1969. La courbe de la pluviométrie est beaucoup plus observée au-delà de la moyenne de la série qu'en deçà de celle-ci. Il s'agit d'une période où la pluviométrie est globalement humide dans le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès. Les années excédentaires sont plus importantes que celles sèches. Le maximum pluviométrique annuel principal a été enregistré durant cette période humide en 1950 aux stations de Tivaouane, Mboro et Thiès, avec respectivement 1173,7 mm, 1050,2 mm et 1039,1 mm. L'année 1950 représente la plus humide de toutes les années dans les bassins versant de la dépression de la cuesta de Thiès. Cette période peut être qualifiée de période humide, globalement elle est excédentaire, avec un excédent de 172,6 mm à la station de Thiès, 135,97 mm à Tivaouane et 147,66 mm à Mboro par rapport aux moyennes de la série 1950-2014 des trois stations.

- la seconde commence de 1970 jusqu'en 2014. A partir de l'année 1970, c'est la situation inverse. La pluie dépasse rarement et/ou faiblement, la moyenne de la série. En effet, la faible quantité de pluie, 333,6 mm notée en 1970 à la station de Mboro, annonce une baisse significative de la pluviométrie et par conséquent une dégradation du climat. Cette situation de baisse généralisée de la pluviométrie annuelle est notée un peu partout au niveau de l'Afrique Sub-saharienne (Leborgne, 1990). Elle est imputable à la grande sécheresse de 1970 dont les impacts se sont répercutés sur les trente dernières années. Depuis les années 1970, les cumuls pluviométriques ne dépassent guère les 750 mm/an. L'année 1972 est la plus sèche de cette période. La plus faible quantité de pluie annuelle enregistrée est de 156,4 mm en 1972 à la station de Tivaouane, 228 mm à la station de Thiès pour la même année et 167,4 mm en 1991 à la station de Mboro. Cette baisse des hauteurs pluviométriques entraîne un stress sur les ressources naturelles et une forte salinisation des cours d'eau. (SOW A. A., 2015)

Tableau 3 : Moyennes pluviométrique des séries de 1950 à 2014

Stations	Pluie Moyenne
Thiès	534.8
Tivaouane	484.6
Mboro	397.2
Mont-Rolland	480.8

Pambal	451.1136
Notto Gouye Diama	435.5955
Taïba Ndiaye	359.5288
Kayar	336.0727
Keur Mousseu	396.0061
Pout	374.7152
Sébikotane	487.2727

5. Les indices standardisés des précipitations

La figure des indices pluviométriques met en évidence la pluviosité annuelle d'une série chronologique donnée. On remarque à partir de 1970, une quasi absence d'indices positifs caractéristiques d'années excédentaires. La période 1950-1954 est une suite d'années excédentaires pour toutes les stations.

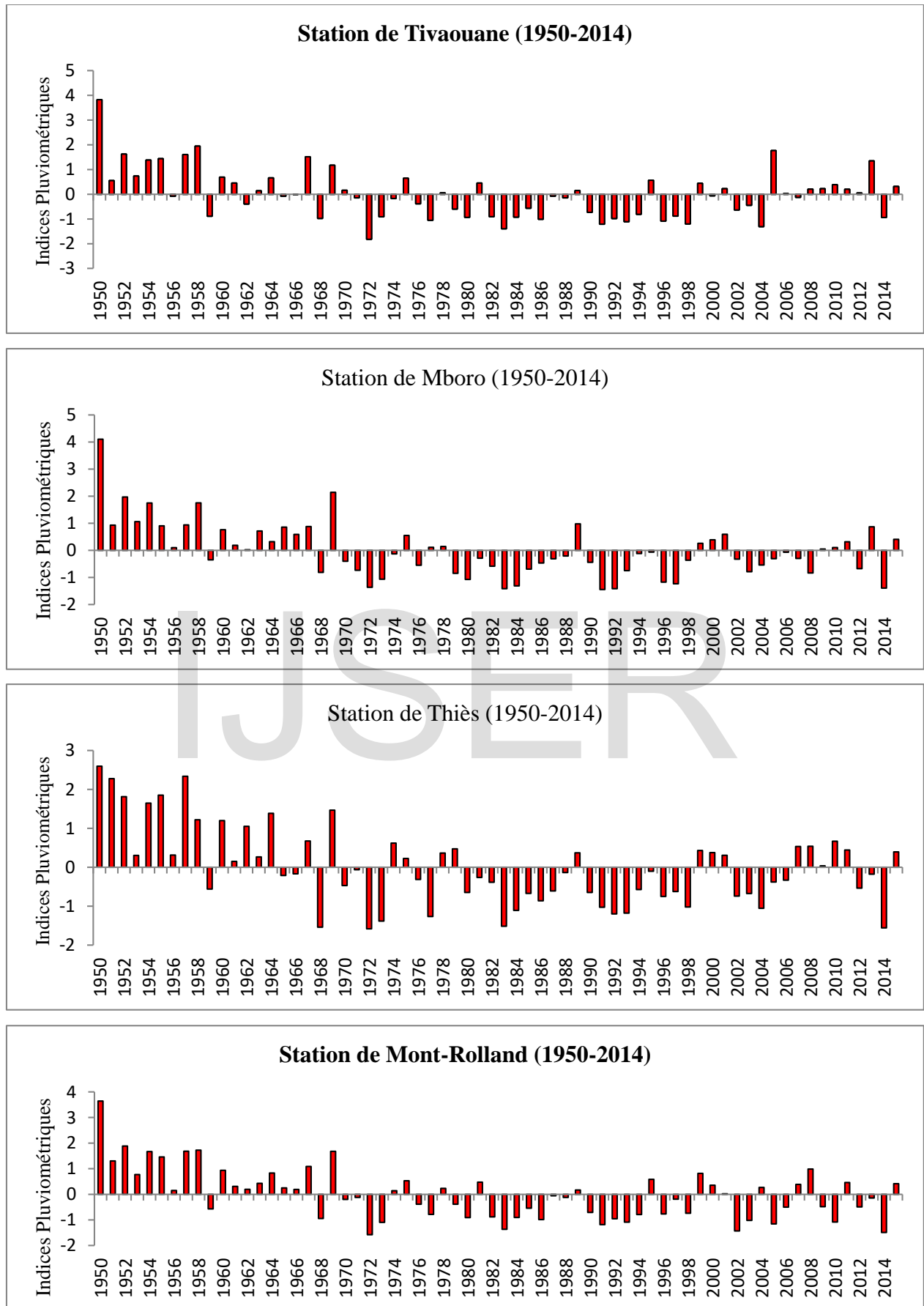


Figure 8 : Indices Standardisés des Précipitations annuelles de quelques stations des bassins versants

L'interprétation des données pluviométriques issues du calcul des SPI par station montre que les variations annuelles des précipitations tournent légèrement à l'avantage de la sécheresse. Suivant la station et la période d'observation, les années sèches représentent 50 % et plus (50 % à Notto Gouye Diama, 54,4 % à Thiès, Mboro et 54,5 % à Pambal). Dans les deux régimes (secs et humides), les années ont subi des influences modérées. Par exemple à Tivaouane et à Mboro, 39,3 % des années ont connu une sécheresse modérée contre 31,8 et 36,3 % d'années à humidité modérée. Les proportions d'années à forte sécheresse et à forte humidité sont aussi assez représentatives. Elles sont comprises entre 12,1 % (Pambal) et 21,2 % (Kayar) concernant la sécheresse ; et 6,06 (Mboro) et 18,1 % (Keur Mousseu) pour l'humidité.

Le bassin versant de la cuesta de Thiès n'a pas connu de sécheresse extrême durant la période 1950 à nos jours ; mais la région a eu quelques années extrêmement humides. Il s'agit des années 1950, 1951, 1952, 1957 et 1969 qui sont généralement identifiées au niveau de toutes les stations.

Tableau 3 : Proportions (en %) d'années sèches et humides par station

Classe SPI	SPI<-2	-2<SPI<-1	-1<SPI<0	0<SPI<1	1<SPI<2	SPI>2
Interprétation	Sécheresse extrême	Sécheresse forte	Sécheresse modérée	Humidité modérée	Humidité forte	Humidité extrême
Bassin versant (1950-2014)	0	15,2	36,3	34,8	12,2	1,5
Sébikotane (1950-2014)	0	16,6	34,8	33,3	13,6	1,5
Thiès (1950-2014)	0	18,1	36,3	28,7	12,1	4,5
Tivaouane (1950-2014)	0	13,6	39,3	31,8	13,6	1,5
Taïba Ndiaye (1950-2014)	0	16,6	34,8	33,3	13,6	1,5
Pout (1950-2014)	0	18,1	34,8	30,3	13,6	1,5
Pambal (1950-2014)	0	12,1	42,4	28,7	15,1	1,5
Notto Gouye Diama (1950-2014)	0	15,1	34,9	33,3	15,1	1,5
Mont-Rolland (1950-2014)	0	15,1	36,3	34,8	12,1	1,5

Keur Mousseu (1950-2014)	0	19,6	33,3	27,2	18,1	1,5
Kayar (1950-2014)	0	21,2	33,3	28,7	15,1	1,5
Mboro (1950-2014)	0	15,1	39,3	36,3	6,06	3,03

IV. Conclusion et discussion

Pour les onze stations considérées, l'analyse des données pluviométriques homogénéisées de la période 1950-2014 montre que les chroniques ne sont pas stationnaires et qu'elles ont subi des ruptures sur 3 dates différentes comprises entre 1967 (Keur Moussa) et 1970 (Tivaouane). L'essentiel des ruptures est détecté en 1969.

Les normales pluviométriques trentenaires montrent une migration des isohyètes en direction d'Ouest-est entre les périodes 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000. Par rapport à la période initiale, les déficits ont atteint respectivement : 115 mm pour 1961-1990 ; 170 mm pour 1971-2000 ; et 150 mm pour 1981-2010. La période 1971-2000 est la plus déficitaire. Le retour des saisons pluviométrique humide à partir de l'an 2000 a favorisé la réduction du déficit dans la normale 1981-2010.

L'observation des cartes des isohyètes inter-décennales donne un aperçu plus détaillé de la diminution de la pluviométrie. Celle-ci a progressivement baissé dans le temps de 1951 à 2000 avec une migration des isohyètes en direction de l'est. La décennie 1951-1960 est la plus humide avec des moyennes annuelles comprises, d'ouest en est, entre 550 mm et 700 mm. La décennie 1961-1970, tout comme la précédente, s'est révélée aussi pluvieuse malgré le basculement des isohyètes de 600 mm, 650 mm et de 700 mm vers l'est hors du bassin versant. Les périodes 1971-1980 et 1981-1990 sont moins pluvieuses. Avec la décennie 2001-2010, on constate une amélioration des conditions pluviométriques avec la réapparition de l'isohyète 460 mm à l'est.

Le bassin versant de la dépression de la cuesta de Thiès enregistre une variabilité interannuelle des moyennes pluviométriques assez importantes. Jusqu'en 1970, la moyenne pluviométrique annuelle atteignait à la station de Thiès 710 mm (données de 1950 à 1969). On observe ensuite une diminution globale des pluies, sur la période 1970 à 2014, la moyenne annuelle est de 458,8mm, soit un déficit de 251.2 mm entre les deux périodes. Cela est à l'image de toutes les autres stations de la zone d'étude qui ont connu des déficits importants.

Les indices pluviométriques complètent l'information car ils mettent en évidence la pluviosité annuelle d'une série chronologique donnée. On remarque à partir de 1970, une quasi absence d'indices positifs caractéristiques d'années excédentaires. La période 1950-1954 est une suite d'années excédentaires pour toutes les stations. Le bassin versant n'a pas connu le phénomène de sécheresse extrême durant la période 1950 à nos jours ; mais la région a eu quelques années extrêmement humides. Il s'agit des années 1950, 1951, 1952, 1957 et 1969 qui sont généralement identifiées au niveau de toutes les stations.

L'étude de la variabilité pluviométrique fournit donc d'importantes informations sur les précipitations. Ces informations pourraient servir pour des travaux futurs sur l'étude hydrologique du bassin versant autant que sur la productivité de l'agriculture en rapport avec la variabilité climatique.

IJSER

Référence bibliographique

Ambroise B. (1999), «Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 2 - Modélisation systémique et dynamique»; Revue des sciences de l'eau/ Journal of Water Science, vol. 12, n° 1, p. 125-153

Ardoin-bardin S. (2004) - *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de l'Université Montpellier II. 440 p.

Bodian A. (2014) - Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, vol. VIII, p. 297-312. |

Bodian A., Dacosta H. et Dezetter A. (2011) - Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du Haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Physio-Géo*, vol. V, p. 107-124.

Bodian A., et al., (2013), Impact du changement climatique sur les ressources en eau du haut bassin du fleuve Sénégal. 16 pages.

Bois. P.H. (2000), Hydrologie générale. 180 pages.

Bois-Obled-Zin. (2007), Introduction au traitement des données en hydrologie. 265 pages.

Bonfils P, Faure J. (1956) : *Les sols de la région de Thiès: annales du CRA Bambey*, 92 pages.

Boyer J.F. (-) - Logiciel KhronoStat. [Téléchargement en ligne](#).

Brunet-Moret Y. (1960) - Méthode d'analyse de la répartition des précipitations dans le temps et dans l'espace. *AISH Publication*, n° 53, p. 268-277.

Brunet- Moret Y. (1970) - *Étude hydrologique en Casamance*. Édit. ORSTOM, rapport final, Dakar, 52 p.

Brunet-Moret Y. (1971) - Étude de l'homogénéité des séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. *Cahiers ORSTOM*, série Hydrologie, vol. VIII, n° 4, p. 3-31.

Brunet-Moret Y. (1979) - Homogénéisation des précipitations. *Cahiers ORSTOM*, série hydrologie, vol. XVI, n° 3-4, p. 147-170.

Buishand T.A. (1982) - Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, vol. 58, p. 11-27.

Buishand T.A. (1984) - Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, vol. 73, p. 51-69.

Dacosta H. (1989), Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance, Thèse de doctorat de 3ème cycle, Département de Géographie, UCAD 283 pages.

Diomande B. I. (2011), Evolution climatique récente dans les régions nord-ouest de la côte d'ivoire et ses impacts environnementaux et socio-economiques, 222 pages.

Dr Dembélé. Y. (2010), Intérêt du développement des bas-fonds en Afrique de l'Ouest. Implication des bénéficiaires et inventaire du potentiel. 18 pages.

Dubreuil. P. (1974), Initiation à l'analyse hydrologique. 224 pages.

Ducharne A., et al., (2003), Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine.

Elsa. M. (2011), Analyse des facteurs de réussite de l'aménagement de bas fond en Guinée Forestière. Cas du bas fond de soumanso appuyé par le projet ACORH. Mémoire de fin d'études.

FAO (2012), Tendances de l'hydrologie des petits bassins versants dans le massif du Fouta Djallon. 47 Pages.

Fournier. J., Durand. J. M. Le diagnostic rapide des bas-fonds soudano-sahéliens. 10 pages.

G. and Michel, C. (2017). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.0.9.64. URL: <https://webgr.irstea.fr/en/airGR/>

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91, doi: [10.1016/j.jhydrol.2009.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003).

GWP et RIOB. (2009), Gestion intégrée des ressources en eau par bassin. 112 pages.

Hiez G. (1977) : «Homogénéisation des données pluviométriques». Cahier- ORSTOM, vol 19, n°2, pp 129-172.

Hreiche, A. 2003 Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen. Hydrologie. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2003 ; 257 pages. Français. fftel-00004188

Ird-Orstom (1998), *Khronostat version 1.0. Logiciel, Orstom, Montpellier*

Kanoute M. (1990). Thiès : une région de potentialités. Une stratégie de planification.

Thèse 3^e cycle Urbanisme, 159 p.

Laborde. J. B. (2000), *Eléments d'hydrologie de surface*. 204 pages.

Le Borgne J. (1988), *La pluviométrie au Sénégal et en Gambie*, 96 pages.

Manga A V. (2012) : Variabilité pluviométrique et estimation des écoulements dans le bassin versant du Sine - Saloum, mémoire de master II, Département de Géographie, UCAD, 100 p.

Morell. M. (1999), *Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base*. 205 pages.

Musy. A. (1995), *Hydrologie appliquée*. 368 pages.

Musy A. (2003) : *Cours d'hydrologie*, 195 p.

Ndiaye A. L. (1995). Étude et cartographie des paysages de la «Grande Côte» Sénégalaise : Applications à la mise en valeur et à la conservation des ressources naturelles. UCAD, ORSTOM, 508 p. Thèse de doctorat 3^e cycle.

Ndiaye E. O. (2016), Contribution à la connaissance des phénomènes d'inondation en domaine sahélien au Sénégal : analyse des précipitations, du réseau hydrographique et modélisation pluie-débit dans le bassin versant de Bambey, 279 pages.

Ndour. T. (2000), *Dégradation des sols au Sénégal : L'exemple des communautés rurales de Kaymor, Mont-Rolland*. Thèse de 3^e cycle département de géographie. 301 pages.

Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall {runo model Part 2 {Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall {runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4) : 290.

OMM. (1994), *Guide des pratiques hydrologiques : Acquisition et traitement des données, analyses, prévision, et autres explications*. 829 pages.

Pagney P. (1986) : *Etude de climatologie tropicale, Paris-cedex, Ed. Masson*, 196 p.

Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). — Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4) : 275-289.

Pierre Etchevers et Eric Martin (2002), Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne.

Raunet. M., Bas fond et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. 33 pages.

Raunet M. (1984). Les potentialités agricoles des bas-fonds en régions intertropicales : l'exemple de la culture du blé de contre-saison à Madagascar, in *L'Agronomie Tropicale*, 1984, 39, 2, pp. 121-135

Richard J.F. (1990), la dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest, 313 pages

Roche. M. (1963), Hydrologie de surface. 413 pages.

Sagna P. (1988), Etude des lignes de grains en Afrique de l'Ouest, tome 1 ; textes, cartes, figures et tableaux. Thèse de 3ème cycle, UCAD, Dakar, 291 p.

Sagna P. (1995), L'évolution pluviométrique récente de la Grande-Côte du Sénégal et de l'archipel du Cap-Vert, 7 pages.

Sagna P. (2005), Climatologie du sahara et de ses marges, 8 pages

Sané. M. E. (2008), La communauté rurale de Taïba Ndiaye : Etude Diagnostique. Mémoire de maîtrise

Sarr. J. (2007), Les bas-fonds du bassin versant de Tarare (Bassin Arachidier Centre Ouest).Thèse de doctorat de troisième cycle de Géographie, 331 pages.

Servat, E., Dezetter A.1990. Modèles conceptuels globaux et critères numériques de calage, 3° Journée ULM - 28 Juin, ORSTOM pp. 41-54.

Sow A A. (1984), Pluie et écoulement dans le bassin du fleuve Sénégal: contribution à l'hydrologie fluviale en domaine tropical humide Africain. Thèse de doctorat de 3ème cycle, Nancy II, Lab. Géographie physique, 442 p

SOW A. (2015), Mise en valeur du bas-fond de Wangal, 96 pages.

Vissin E., (2007), Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de doctorat de troisième cycle de Géographie, 311 pages.

Vauchel P. (2004) : Hydraccess, logiciel de gestion et de traitements des données hydrologiques. Montpellier, IRD, 11 p.

Dègla H. K. et al. (2014) : Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin, 12 p.

Laboratoire Pierre Pagney ‘‘Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement’’ (LACEEDE/UAC),
BP 922 Abomey Calavi, Cotonou, Bénin

IJSER