

Critique statistique des séries des pluies annuelles dans le bassin amont du Fleuve Sénégal

SOUSSOU SAMBOU¹ & EDMOND NICAISE MALANDA NIMY²

¹ *Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Physique, BP 5005 Dakar-Fann, Senegal*
sousamb@refer.sn

² *Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP 5005 Dakar-Fann, Senegal*

Résumé Une étude des propriétés statistiques des séries de hauteurs de pluie annuelles observées dans le bassin amont du fleuve Sénégal situé au Mali et au Sénégal est effectuée à l'aide de tests d'indépendance et d'homogénéité. Les premiers ont fait ressortir une forte irrégularité interannuelle, une tendance au déficit pluviométrique, et dans certains cas une persistance de type markovien. Les seconds ont tous détecté une réduction sensible de la moyenne sur la période étudiée. L'analyse en composantes principales réduites a confirmé l'unité climatique de la zone d'étude. La station de Bakel a cependant un comportement différent face aux tests d'homogénéité et à l'analyse en composantes réduites. Ce comportement singulier de la station de Bakel ne peut pas se justifier par des erreurs systématiques et une analyse plus poussée mériterait d'être menée pour élucider cette singularité.

Mots clés Fleuve Sénégal; variabilité climatique; tests statistiques; analyse en composantes principales

Statistical analyses of the annual rainfall of the upper Senegal basin

Abstract Classical tests for independence and homogeneity have been applied to annual series of rainfall in the upper part of the Senegal River basin. The first have outlined the different properties of the series, i.e. Markovian persistence for some of them, strong irregularity from one year to the other for all and a long-term trend of decrease of the rainfall except for Bakel; and the second demonstrated a sharp reduction in the mean of the annual rainfall. The statistical tests and principal components analysis show that the rain gauge at the Bakel station behaves quite differently. One explanation of this could be the occurrence of systematic errors during the sampling of the observations. But, given the importance of the rain gauge station at Bakel for the Senegal River, it is important to explain this singularity.

Key words Senegal River; climatic variability; statistical tests; principal components analyses

INTRODUCTION

La tendance climatique d'une région donnée peut être connue à travers les séries de hauteurs de pluies annuelles, particulièrement lorsque celles-ci sont suffisamment longues. Ces séries constituent en effet les entrées des modèles statistiques et probabilistes. Pour cela, elles doivent être homogènes et représentatives de la population dont est tiré l'échantillon d'une part, et, d'autre part, les observations qu'elles contiennent doivent être indépendantes. La série est représentative lorsque les différentes observations qui la constituent proviennent des mêmes processus physiques; elle est homogène lorsque ces observations sont issues de la même population ou si elles peuvent être représentées par la même loi statistique. En pratique, l'homogénéité est vérifiée à travers l'étude de la stationnarité de la moyenne.

Dans cet article, nous avons utilisé les tests statistiques d'indépendance et d'homogénéité pour étudier la tendance climatique et la structure des hauteurs de pluies annuelles observées dans le bassin amont du fleuve Sénégal, situé au Mali et au Sénégal en amont de Bakel. Ces tests ont pour la plupart été appliqués à l'étude de la variabilité climatique, particulièrement en Afrique Occidentale et Centrale, par des chercheurs provenant d'horizons divers (Aka *et al.*, 1996; Mirza, 1997; Paturel *et al.*, 1998; Ardoin *et al.*, 2003; Sambou, 2005). En comparant les résultats des tests d'indépendance et les graphiques d'évolution interannuelle, nous avons constaté que chaque test d'indépendance illustre une particularité de la pluviométrie annuelle dans la zone d'étude: persistance markovienne ou non, tendance au déficit, forte irrégularité interannuelle. Par contre, les tests d'homogénéité font tous ressortir la non stationnarité de la moyenne des séries annuelles. La série des hauteurs de pluies annuelles à la station de Bakel se singularise par sa stationnarité et son homogénéité, comme l'indiquent tous les tests effectués et les représentations graphiques associées. L'analyse en composantes principales réduites confirme cette opposition entre la station de Bakel et les autres. Ce comportement, que l'hypothèse d'erreurs systématiques dans la collecte

des observations ne justifie pas, devrait être élucidé par une critique plus approfondie et si nécessaire par recours aux modèles de circulation générale.

MÉTHODOLOGIE

La variabilité climatique en Afrique Occidentale et Centrale est devenue une composante très importante dans la gestion des ressources en eau, et son étude a suscité l'intérêt de la communauté scientifique internationale. L'analyse des propriétés statistiques des séries de cumuls annuels de hauteurs de pluies à partir de tests statistiques a connu un essor. Dans cet article, des tests statistiques éprouvés en Afrique Occidentale et Centrale ont été appliqués: le test de Pettitt (Pettitt, 1979), le test du cumul des résidus (Paturel *et al.*, 1998) et la procédure de segmentation des séries (Hubert, 1989) pour vérifier l'homogénéité des séries, avec comme hypothèse nulle H_0 = "la série est homogène"; le test basé sur l'analyse de l'auto corrélogramme et le test du coefficient d'auto corrélation d'ordre 1 pour détecter une persistance de type markovienne; le test des points de rebroussement (Kottegoda, 1980) pour mesurer le caractère aléatoire de la série et par conséquent l'irrégularité interannuelle; le test de corrélation des rangs de Kendall (Kendall & Stuart, 1961) pour mettre en évidence toute tendance à long terme. L'hypothèse nulle pour ces tests est H_0 = "la série est aléatoire". Nous renvoyons à ces références bibliographiques pour la définition de ces tests.

NATURE ET PROVENANCE DES DONNEES

Les données de base que nous avons utilisées dans cette étude sont constituées des cumuls annuels de hauteurs de pluies journalières que nous avons obtenues, de l'origine à 1965, à partir des publications du CIEH, de l'ORSTOM-Hydrologie et de l'ASECNA (CIEH, 1973–1979), puis de 1966 à 1980 (CIEH, 1989–1990). La période allant de 1981 à 1995 a été obtenue pour certaines stations à partir de la banque ORSTOM. Nous avons critiqué les séries de la zone d'étude et retenu comme stations de référence les stations de Bakel, Kayes, Kidira, Kita, Nioro, Mourdali, Bafoulabé, Toukoto, Faladyé, Kéniéba, Yélimané, Galougo (Fig. 1), et comme période de référence la période 1931-1995. Les calculs ont été faits soit sur tableur Excel (tests du cumul des résidus), à l'aide de programmes écrits en Fortran (test de Pettitt, test de corrélation des rangs de Kendall, coefficients d'autocorrélation) ou à partir d'un exécutable développé par Hubert *et al.* (1989) pour le test de segmentation des séries. Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus.

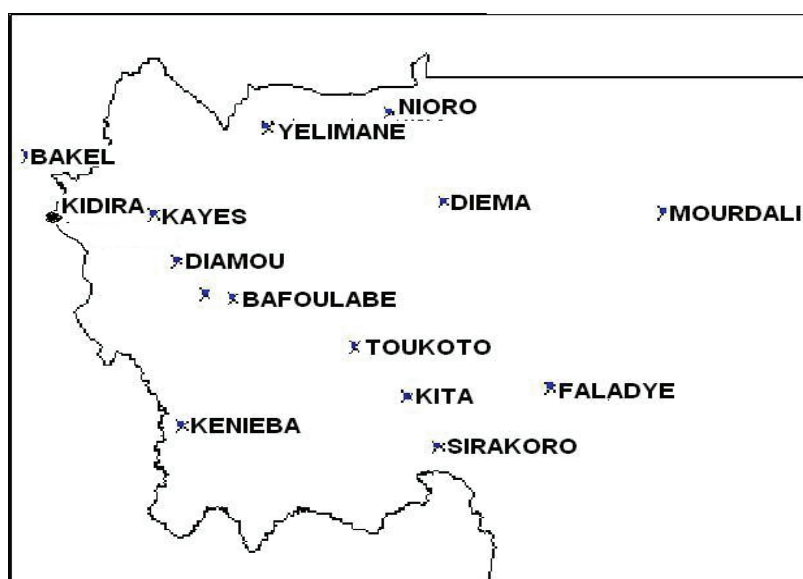


Fig. 1 Emplacement des stations retenues.

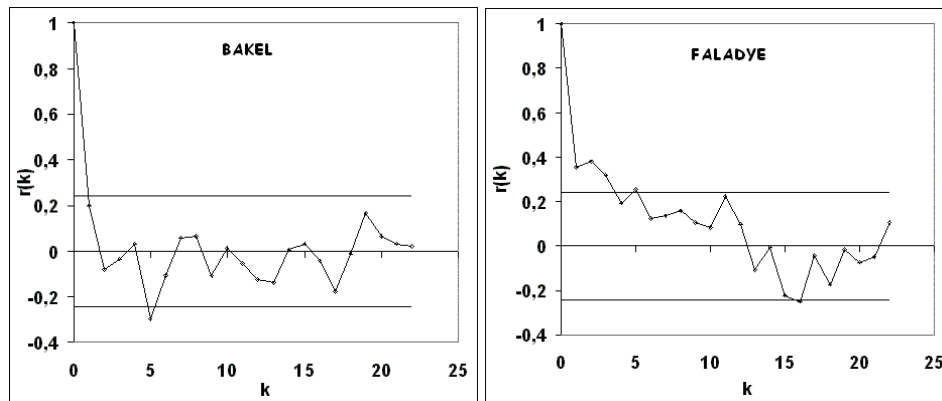


Fig. 2 Auto corrélogramme des séries de hauteurs de pluies annuelles.

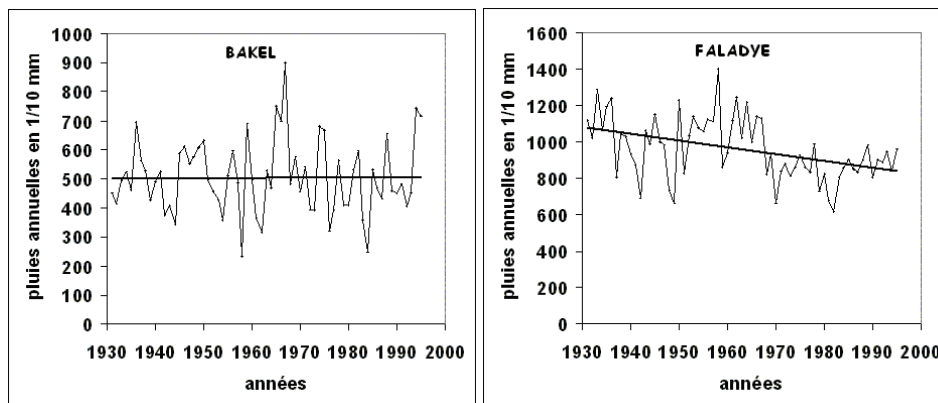


Fig. 3 Evolution inter - annuelle des hauteurs de pluies annuelles.

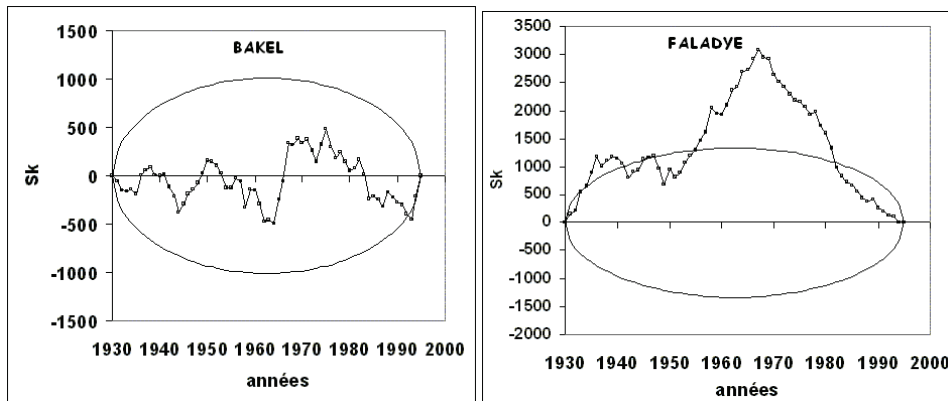


Fig. 4 Tests du cumul des résidus: ellipses de Bois.

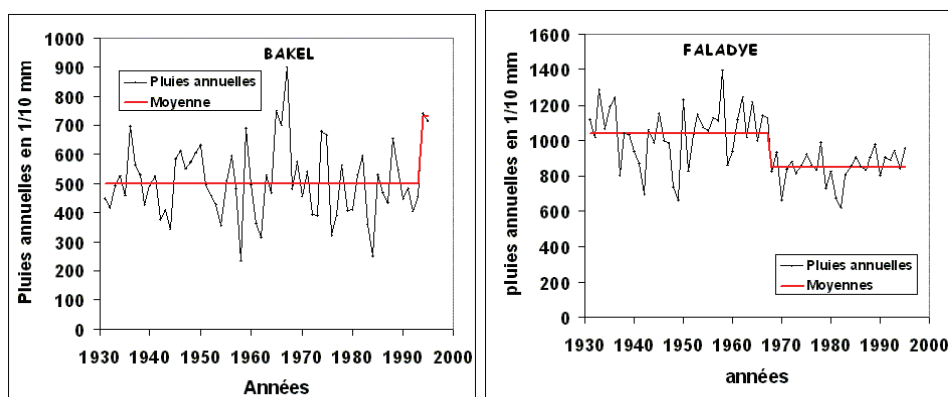


Fig. 5 Tests de segmentation des séries.

REGIONALISATION PAR ANALYSE EN COMPOSANTES REDUITES

Analyse de la matrice de corrélation des variables

La moyenne et l'écart-type des séries de pluies annuelles ainsi que les éléments de la matrice de corrélation ont été calculés (Tableau 4). De l'analyse des éléments de cette matrice, il ressort une faible corrélation entre les stations de Kéniéba et de Bakel et les autres stations (1ère et 10ème colonne). Ce comportement singulier est confirmé par la faible valeur du coefficient de corrélation moyen entre ces stations et les autres.

Tableau 4 Matrice de corrélation des pluies annuelles aux stations retenues.

Stations	Bak	Kay	Kid	Kit	Nio	Mou	Baf	Tou	Fal	Kén	Yél	Gal
Bak	1	0.25	0.22	0.18	0.03	0.20	0.04	0.09	0.00	0.16	0.15	0.07
Kay	0.25	1	0.62	0.49	0.47	0.50	0.38	0.47	0.41	-0.03	0.62	0.55
Kid	0.22	0.62	1	0.37	0.41	0.43	0.30	0.35	0.35	-0.04	0.57	0.33
Ki	0.18	0.49	0.37	1	0.50	0.54	0.31	0.51	0.56	0.02	0.49	0.59
Nio	0.03	0.47	0.41	0.50	1	0.62	0.66	0.52	0.72	-0.00	0.68	0.57
Mou	0.20	0.50	0.43	0.54	0.62	1	0.56	0.49	0.51	-0.10	0.57	0.51
Baf	0.04	0.38	0.30	0.31	0.66	0.56	1	0.31	0.53	0.08	0.53	0.36
Tou	0.09	0.47	0.35	0.51	0.52	0.49	0.31	1	0.52	0.12	0.46	0.45
Fal	0.00	0.41	0.35	0.56	0.72	0.51	0.53	0.52	1	-0.13	0.52	0.51
Kén	0.16	-0.03	-0.04	0.02	0.00	-0.10	0.08	0.12	-0.13	1	0.04	-0.12
Yél	0.15	0.62	0.57	0.49	0.68	0.57	0.53	0.46	0.52	0.04	1	0.62
Gal	0.07	0.55	0.33	0.59	0.57	0.51	0.36	0.45	0.51	-0.12	0.62	1
Moyenne	0.20	0.48	0.401	0.46	0.51	0.49	0.42	0.44	0.42	0.08	0.52	0.45

Analyse du nuage des variables

Les variables sont représentées dans le plan des deux premiers axes factoriels (Fig. 6). Les variables stations de Nioro, Yélimané, Kayes, Kita, Mourdali, Faladyé, Galougo, Kidira, Bafoulabé et Toukoto forment un nuage de points relativement corrélé avec le premier axe (axe horizontal) qui rassemble 46.5% de la variance totale. Les stations de Bakel et de Kéniéba par contre sont très faiblement corrélées avec cet axe: Bakel est fortement corrélée avec le second axe vertical ($\hat{r} = 0.76$) (10.70 % de la variance totale), et Kéniéba avec le troisième axe factoriel. Les stations se répartissent donc en trois groupes: un premier rassemblant la majeure partie d'entre elles (10 stations), deux autres constituées chacune d'une seule station: Bakel pour le deuxième groupe, Kéniéba pour le troisième.

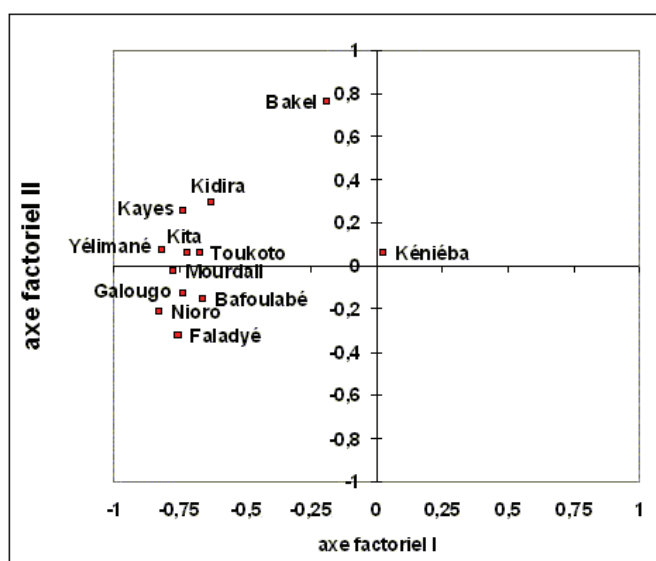


Fig. 6 Analyse en composantes principales réduites : nuage des variables.

Analyse en composantes principales réduites et variabilité climatique

Les résultats des tests d'indépendance et surtout des tests d'homogénéité montrent que le premier groupe rassemble les stations ayant le même comportement climatique sur la série étudiée : tendance linéaire à la baisse des précipitations et une rupture de la moyenne de la série des pluies annuelles dans le sens d'un déficit. Le premier axe factoriel, relativement mieux corrélé avec le nuage, représente donc cette variabilité climatique. La station de Bakel est stationnaire du point de vue climatique ; cette stationnarité est représentée par le second axe factoriel avec laquelle elle est fortement corrélée. La station de Kéniéba est soumise aux mêmes effets de la variabilité climatique tout comme les stations du nuage; par contre sa pluviométrie moyenne annuelle sur la période analysée est la plus élevée, et, surtout, elle se trouve en altitude dans la zone soudanienne. Le troisième axe factoriel avec laquelle elle est fortement corrélée, peut être associée à l'influence soudanienne combinée à l'altitude.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les tests d'indépendance que nous avons utilisés ont permis de faire ressortir la forte irrégularité inter annuelle, la tendance à long terme à la décroissance, et dans certains cas la persistance de type markovien dans les séries étudiées. Les tests d'homogénéité quant à eux ont mis en évidence une baisse généralisée et prolongée des précipitations dans la zone d'étude, à l'exception de la station de Bakel. Cette station se distingue par des observations successives indépendantes entre elles et surtout une stationnarité de la moyenne des pluies annuelles. L'analyse en composantes réduites confirme l'effet de la variabilité climatique sur l'ensemble des stations de la zone d'étude et sur la période analysée, et met en relief le comportement singulier des stations de Kéniéba et Bakel. La première est, en plus de la variabilité climatique, soumise à l'influence du relief et à celle de la zone climatique à dominante soudanienne dans laquelle elle se trouve. La seconde est la seule à ne pas subir l'influence de la variabilité climatique. L'hypothèse d'erreurs systématiques survenues au cours de la collecte et de la mise en forme des observations pourrait être avancée, mais ne résiste pas à l'analyse car de telles erreurs se produiraient uniquement pour cette station. La station de Bakel est l'une des plus anciennes du bassin du fleuve Sénégal ; elle revêt une grande importance pour la connaissance de l'évolution du climat du bassin versant du fleuve. Les travaux de recherche visant à déterminer l'origine de ce comportement singulier devraient être poursuivis au moyen d'autres techniques (GCM par exemple)

REFERENCES

- Aka, A., Lubès, H., Mason, J. M., Servat, E., Paturel, J. E. & Kouamé, B. (1996) Analysis of temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization. *Hydrol. Sci. J.* **41**, 959–970.
- Ardoin, S., Lubès-Niel, H., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, F., Mahé, G. & Paturel, E. (2003) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990. In: *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc & A. Shakeel), 223–228. IAHS Publ. 278, IAHS Press, Wallingford, UK.
- CIEH, Orstom, Hydrologie, Asecna (1973–1979) Services Météorologiques Nationaux. *Précipitations journalières de l'origine à 1965. Républiques du Dahomey, Tchad, Côte d'Ivoire, Mali, Sénégal, Niger, Haute-Volta, Mauritanie, Togo, Gabon, Cameroun (début à 1972)*, 12 volumes. ORSTOM, Paris, France.
- CIEH, Orstom, Hydrologie, Asecna, (1989–1990) Services Météorologiques Nationaux. *Précipitations journalières de 1966 à 1980. Républiques du Dahomey, Tchad, Côte d'Ivoire, Mali, Sénégal, Niger, Haute-Volta, Mauritanie, Togo, Gabon, Cameroun*, 14 volumes. ORSTOM, Paris, France.
- Hubert, P., Carbonnel, J. M. & Chaouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques – Application à des séries des précipitations et de débits en Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349–367.
- Kottegoda, N. T. (1980) *Stochastic Water Resources Technology*. The MacMillan Press Ltd, Hong Kong.
- Kendall, M. G. & Stuart, A. (1961) *The Advanced Theory of Statistics*, vol. 2. Hafner, New York, USA.
- Mirza, M. Q. (1997) Hydrological changes in the Ganges system in the Bengla Desh in the post Farakka period. *Hydrol. Sci. J.* **42**, 613–632.
- Paturel, J. E., Servat, E., Delattre, M. O. & Lubès-Niel, H. (1998) Analyse des séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol Sci J.* **43**, 937–946.
- Pettitt, A. N. (1979) A non parametric approach of the change – point problem. *Appl. Statist.* **28**, 126–135.
- Sambou, S. (2005) Modélisation des processus hydrologiques sur l'exemple du bassin amont du fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat ès Sciences. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.