

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ TEMPORELLE ET SPATIALE DES SÉRIES CLIMATIQUES DU NORD DU TOGO ENTRE 1960 ET 2010

Badjana Hèou Maléki

Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale, Faculté des Sciences
Université de Lomé, Togo

Houngpè koffi

Banque Mondiale, Bureau du Togo, Lomé, Togo

Wala Kpérkouma

Batawila Komlan

Akpagana Koffi

Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale, Faculté des Sciences
Université de Lomé, Togo

Edjamé Kodjovi Sidéra

Departement de Geographie, Faculte de Lettres et Sciences Humaines
Université de Lomé, Togo

Abstract

Understanding the spatial and temporal climate variability at reduced scales is fundamental for answering many questions that arise about the impacts of climate change, local vulnerability and development projects. This study consisted to analyze the spatial and temporal variability of rainfall and temperature time series in the North of Togo between 1960 and 2010, using Hanning low-pass filter of first order, rainfall indexes, statistical tests of stationarity of climate time series and Kriging. The results show that climate variability has resulted particularly in strong interannual fluctuations in rainfall and a succession of dry and wet periods on the one hand and periods of high and low temperature on the other hand. Unlike temperature that has increased at all stations, the temporal at-site analysis shows that rainfall is stationary at the stations of Dapaong, Niamtougou and Kara while it has a decreasing trend at the stations of Borgou, Mango and Sokodé. Several break points were also detected and causes deserve a particular analysis. Though the results of this study constitute important and necessary indicators for climate risks assessments, the improvement and strengthening of monitoring systems become important to better characterize and predict

local climate changes in order to reduce the vulnerability of local populations.

Keywords: Temporal and spatial variability, stationarity, trend, break point, North of Togo

Résumé:

La compréhension et la caractérisation de la variabilité climatique aux échelles réduites s'avèrent fondamentales pour la compréhension des impacts des changements climatiques, de la vulnérabilité locale et pour les projets de développement. La présente étude a consisté à analyser la variabilité spatio-temporelle des séries climatiques dans le nord du Togo entre 1960 et 2010, à partir du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 1, des indices pluviométriques, des tests statistiques de stationnarité et du Krigeage. Les résultats montrent que le climat a connu de fortes fluctuations interannuelles, une succession de périodes sèches et humides puis de hausses et basses températures. Contrairement aux températures qui connaissent une nette tendance à la hausse à toutes les stations, l'analyse temporelle au site montre que les précipitations sont stationnaires aux stations de Dapaong, Niamtougou et Kara tandis qu'elles connaissent une tendance à la baisse aux stations de Borgou, Mango et Sokodé. L'analyse spatiale montre une baisse générale des précipitations sur toute la région étudiée à partir des années 70 mais une légère reprise à la hausse sur la décennie 2000-2009. Cette baisse des précipitations s'est traduite par un décalage des isohyètes du nord vers le sud. Plusieurs ruptures ont été également détectées dont les causes méritent une analyse particulière. Bien que les résultats de cette étude constituent des indicateurs importants pour l'évaluation des risques climatiques, l'amélioration et le renforcement des systèmes d'observation se révèlent importants pour mieux caractériser et prévoir l'évolution du climat local en vue de contribuer à réduire la vulnérabilité des populations locales.

Mots clés: Variabilité temporelle et spatiale, stationnarité, tendance, rupture, Nord du Togo

Introduction

L'occurrence des changements climatiques peut se traduire par d'importantes modifications brutales dans les régimes climatiques (MERF, 2010). Dans ce contexte, la compréhension et la caractérisation de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques et les tendances de leur évolution s'avèrent importantes pour la gestion et la protection durable de l'environnement (Meddi et Meddi, 2007).

Le Togo à l’instar de toute l’Afrique de l’Ouest subit depuis la fin des années soixante d’importantes variations spatio-temporelles des régimes climatiques avec des conséquences sur l’agriculture, activité principale des populations (MERF, 2008). A l’échelle régionale, l’Afrique de l’Ouest a vécu une sécheresse à partir de années 70 (Paturel *et al.*, 1995) et qui s’est prolongée de près de trente ans avec des conséquences majeures sur les économies et les populations des zones affectées.

Au nord du Togo, la pluviométrie a considérablement varié au cours des dernières décennies entraînant des sécheresses par ci et des inondations par là. L’occurrence de ces événements extrêmes suppose un changement probable de la stationnarité des régimes climatiques à l’échelle locale. Les études de Badjana *et al.* (2012) ont montré l’existence de fortes fluctuations interannuelles des précipitations avec une hausse générale des températures et une baisse des précipitations à certaines stations dans la plaine de l’Oti. Toutefois, des incertitudes subsistent encore sur l’évolution spatiale des précipitations et très peu d’études existent dans le nord du Togo sur la thématique. Pour pallier à ce manque et mieux comprendre les enjeux de probables futurs impacts des changements climatiques en vue de la réduction de la vulnérabilité des populations, il convient d’étudier l’évolution spatio-temporelle du climat à une échelle plus générale étant donné que le nord du Togo soit caractérisé par un et même régime climatique.

C’est dans ce contexte que se situe la présente étude qui se propose d’analyser la variabilité temporelle et spatiale des précipitations et des températures dans le nord du Togo.

1. Présentation de la zone d’étude

La zone d’étude est localisée entre les longitudes 0° et 1° 30’ Est et les latitudes 8° et 11° 30’ Nord (figure 1). Avec une superficie de 26086,3 km², elle englobe les Régions de la Kara, des Savanes et une partie de la Région Centrale selon le découpage administratif. Les trois régions totalisent une population de 2216035 habitant avec 79.5% de ruraux (DGSCN, 2010). Les principales activités socio-économiques sont l’agriculture, l’élevage et la pêche. C’est sur cette zone d’étude que s’étend une vaste pénéplaine, la plaine de l’Oti drainée par la rivière Oti et ses affluents. Le climat est de type soudano-guinéen caractérisé par une saison pluvieuse aux pluies très irrégulières et inégalement réparties (avril à octobre) et une saison sèche très marquée le reste de l’année. Les précipitations moyennes annuelles varient entre 1000 et 1400 mm du nord au sud de la zone. Les températures sont généralement élevées. La station de Mango enregistre le maximum absolu des températures au Togo (41°C) pendant le mois d’avril (MERF, 2001).

La zone d’étude se situe à cheval sur le bassin des Volta. Le substratum est constitué de roches éruptives et de formations sédimentaires

ou épimétamorphiques (Lamouroux, 1969, Tairou *et al.*, 2012). Les formations pédologiques regroupent les sols hydromorphes peu humiques à pseudogley dans les vallées ou lits de l’Oti et ses affluents et dans certaines zones dépressionnaires, les sols ferrugineux tropicaux sur les plaines, les sols ferralitiques et les sols peu évolués (Lamouroux, 1969). La végétation est constituée essentiellement de savanes.

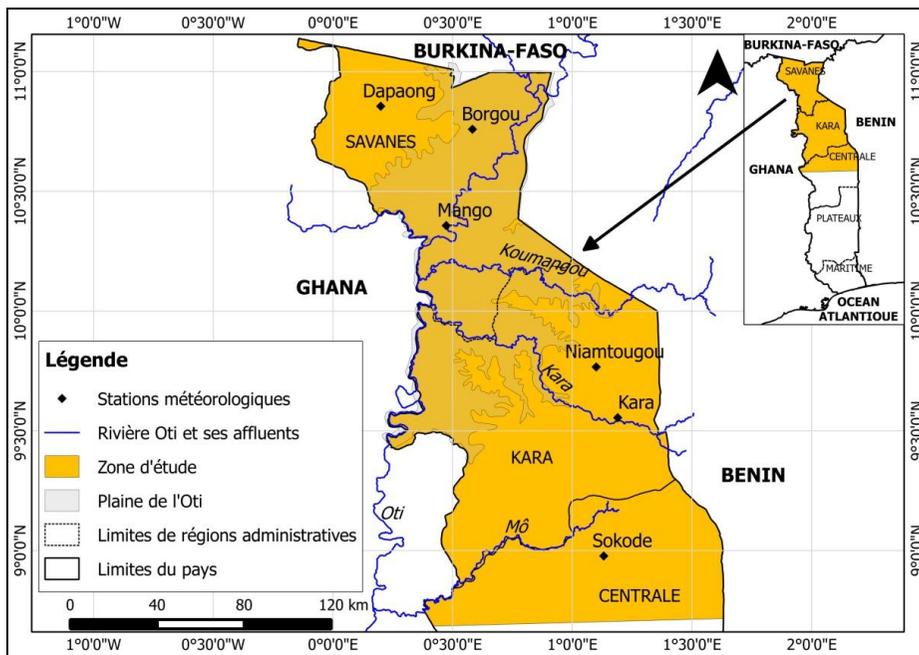


Figure 1 : Carte de la zone d'étude avec les stations météorologiques.

2. Méthodologie

2.1. Données

Les données nécessaires à la réalisation de cette étude sont de deux types:

- les données climatiques : ce sont les données concernant les températures et les précipitations collectées auprès de la Direction Générale de la Météorologie Nationale ;
- les données cartographiques : cartes existantes, coordonnées géographiques.

Six stations météorologiques ont été retenues pour mieux couvrir la zone. Il s'agit des stations de Borgou, Dapaong, Mango, Niamtougou, Kara et Sokodé qui possèdent des séries de données climatiques relativement longues avec moins de lacunes. La période retenue pour cette étude s'étend sur 51 ans (1960-2010) pour toutes les stations sauf celle de Borgou pour laquelle les données pluviométriques ne sont disponibles que pour 39 ans (1960-1998). Cette période reste valable selon les recommandations de

l'Organisation Météorologique Mondiale (Robson *et al.*, 2000) qui requièrent des séries de plus de 30 ans pour une analyse climatique acceptable. Il n'existe pas de données de températures pour la station de Borgou sur toute la période et pour celle de Kara de 1960 à 1976 (tableau I).

Il faut signaler l'existence de plusieurs lacunes (tableau I) au sein des données mais celles-ci ont été comblées par interpolation linéaire et validation croisée.

2.2. Méthodes

Parmi tant d'approches qui permettent d'analyser la variabilité climatique, il a été utilisé dans la présente étude le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 1 (équation (1)), les indices pluviométriques (Nicholson, 1983) (équation (2)), et les tests statistiques de stationnarité des séries pour l'analyse temporelle d'une part puis d'autre part le Krigeage pour l'analyse spatiale.

Tableau I : Périodes d'étude retenues et taux de lacunes dans les données de chaque station

Stations	Coordonnées géographiques		Précipitations		Températures	
	Longitude Est	Latitude Nord	Période d'étude	Pourcentage des lacunes (%)	Période d'étude	Pourcentage des lacunes (%)
Borgou	00° 57'	10° 75'	1960-1998	0	-	-
Dapaong	00° 25'	10° 88'	1960-2010	3,56	1961-2010	2,9
Mango	00° 47'	10° 37'	1960-2010	0	1961-2010	0
Niamtougou	01° 08'	09° 80'	1960-2010	3,23	1961-2010	3,8
Kara	01° 17'	09° 55'	1960-2010	0	1977-2010	3,82
Sokodé	01°09'	09°00'	1960-2010	1.9	1961-2003	0

2.2.1. Analyse temporelle

2.2.1.1. Le Filtre Passe-bas de Hanning d'ordre 1

Pour réduire les erreurs dans les données liées aux mesures et mieux visualiser les périodes sèches et humides ainsi que celles de hausses et de basses températures, le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 1 a été appliqué aux valeurs de précipitations et de températures. Ce filtre a déjà été utilisé dans de nombreuses études (Goula *et al.*, 2006 ; Kanohin *et al.*, 2009).

Le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 1 se présente comme suit :

$$X_{(t)} = 0,06X_{(t-2)} + 0,25X_{(t-1)} + 0,38X_{(t)} + 0,25X_{(t+1)} + 0,06X_{(t+2)}$$

(1)

$$\text{Pour } 3 \leq t \leq (n-2)$$

Où $X_{(t)}$ est la valeur annuelle des précipitations ou des températures pondéré du terme t , $X_{(t-2)}$ et $X_{(t-1)}$ sont les valeurs annuelles observées de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t , et $X_{(t+1)}$ et $X_{(t+2)}$ sont celles qui suivent immédiatement le terme t . Les valeurs annuelles pondérées des deux premiers $[X_{(1)}, X_{(2)}]$ (équations (3) et (4)) et des deux derniers $[X_{(n-1)}, X_{(n)}]$ (équations (5) et (6)) termes de la série sont calculées au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

$$X_{(1)} = 0,54X_{(1)} + 0,46X_{(2)} \quad (2)$$

$$X_{(2)} = 0,25X_{(1)} + 0,50X_{(2)} + 0,25X_{(3)} \quad (3)$$

$$X_{(n-1)} = 0,25X_{(n-2)} + 0,50X_{(n-1)} + 0,25X_{(n)} \quad (4)$$

$$X_{(n)} = 0,54X_{(n)} + 0,46X_{(n-1)} \quad (5)$$

2.2.1.2. Les indices pluviométriques ou variables centrées réduites

L'indice pluviométrique ou variable centrée réduite est calculée à partir de la formule d'expression :

$$IP = \frac{X_i - X_m}{\sigma} \quad (6)$$

Avec IP = Indice pluviométrique (ou de température pour les données de températures), X_i (mm) = Pluviométrie (ou température) annuelle pour une station pendant une année i , X_m (mm) = Moyenne annuelle de la pluviométrie (ou de la température) à la station pendant la période d'étude, σ = écart-type de la pluviométrie ou de la température de cette période.

2.2.1.3. Les tests statistiques

Pour mettre en évidence le caractère stationnaire ou non des séries chronologiques de températures et de précipitations, il a été utilisé des tests statistiques portant l'analyse de tendance et de rupture en moyenne.

Le terme de tendance fait référence au changement dans les propriétés d'un processus aléatoire qui survient graduellement à l'échelle de la période d'échantillonnage alors qu'une rupture correspond à une modification qui survient subitement, étant entendu que les propriétés demeurent stables de part et d'autre de l'année de rupture (Perreault, 2000).

Le test de corrélation sur le rang de Kendall (Kendall and Stuart, 1943 ; Lubès-Niel *et al.*, 1998) a été utilisé pour analyser les tendances dans les séries.

La détection de ruptures a été réalisée aux moyens du test de Buishand et l'Ellipse de contrôle, du test de Pettitt, de la méthode Bayésienne de Lee et Heghinian puis la procédure de segmentation de Hubert utilisés dans de nombreuses études pour analyser la stationnarité des séries climatiques (Lubès-Niel *et al.*, 1998 ; Hubert *et al.*, 1998 ; Hubert and Bendjoudi, 1999 ; Servat *et al.*, 1999 ; Auterives, 2000).

La description détaillée de tous ces tests est aussi disponible dans le logiciel Khronostat utilisé (libre d'accès) conçu par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

2.2.2. Analyse spatiale

Dans le souci de mieux apprécier la variabilité spatiale du climat, l'interpolation spatiale des précipitations, dont les données observées sont disponibles sur un nombre important de stations aussi bien dans la zone d'étude que tout autour de celle-ci, a été réalisée par Krigeage.

Le Krigeage est une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui estime la ou les valeur(s) de la variable régionalisée étudiée aux points non échantillonnés par une combinaison de données aux points mesures tout en tenant compte de la distance et du degré de variation entre ceux-ci (Baillargeon, 2005). C'est une méthode d'estimation linéaire sans biais et qui minimise la variance d'estimation (Lawin *et al.*, 2012).

Il a été utilisé dans la présente étude le Krigeage ordinaire qui est le plus fréquemment utilisé (Gratton, 2002).

La première étape consiste à construire le variogramme expérimental et estimer le variogramme model, qui est une fonction mathématique qui modélise la tendance dans le variogramme expérimental.

Le variogramme expérimental est estimé par:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (7)$$

$\gamma(h)$ est la valeur du variogramme expérimental pour une distance h , $Z(x_i)$ et $Z(x_i + h)$ représentent les valeurs de la variable aléatoire Z aux stations x_i et $x_i + h$ respectivement et $N(h)$ est le nombre de paires de stations séparées par la distance h .

La seconde étape consiste à utiliser le variogramme model pour déterminer les poids des échantillons qui seront utilisés pour le Krigeage.

L'équation de base du Krigeage ordinaire est la suivante :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (8)$$

$Z^*(x_0)$ est l'estimateur de la variable aléatoire Z au point x_0 , W_i sont les poids du Krigeage et $Z(x_i)$ est la valeur observée de la variable aléatoire Z au point x_i , n est le nombre de points voisins qui seront utilisés pour l'estimation de $Z^*(x_0)$.

Pour chaque décennie, les variogrammes expérimental et model sont respectivement construits. L'estimation des paramètres du variogramme model dans chaque cas s'est faite par ajustement à l'œil nu des variogrammes empiriques, par les méthodes des moindres carrés et de vraisemblance (Ribeiro & Diggle, 2001). Les paramètres de la méthode qui ajustait le mieux la tendance du variogramme expérimental ont ainsi été retenus pour le Krigeage.

Le Krigeage a été implémenté à l'aide du logiciel de programmation R et le package geoR (Ribeiro & Diggle, 2001).

3. Résultats

3.1. Analyse temporelle

3.1.1. Station de Borgou

La pluviométrie à Borgou est marquée par des fluctuations interannuelles très remarquables avec une succession de périodes sèches et de périodes humides (figure 2). Les périodes 1960-1969 et 1974-1976 ont été humides avec un léger déficit en 1966 tandis qu'une longue période sèche s'observe nettement à partir de 1977 jusqu'aux années 90. L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang de la chronique des précipitations met en évidence une tendance à la baisse de la pluviométrie au seuil de confiance de 95%. La statistique de Buishand et l'Ellipse détectent une rupture en 1975 au seuil de confiance de 90% (Annexe I).

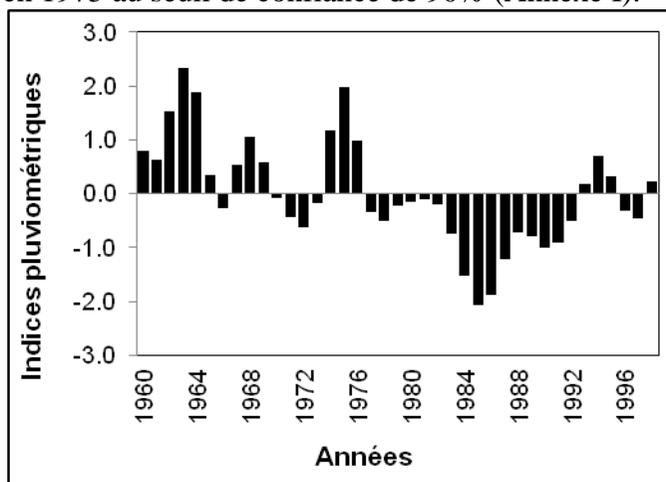


Figure 2 : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Borgou (1960-1998).

3.1.2. Station de Dapaong

La station de Dapaong a connu une forte variabilité interannuelle des précipitations avec une grande période déficitaire entre 1976-1996 et des périodes humides se situant entre 1997-2010 et 1962-1966 (figure 3a). L'analyse statistique ne met en évidence aucune tendance dans les précipitations mais une légère rupture en 1996 (Annexe I). Les températures ont accru sur les périodes 1978-1989 et 1996-2010 (figure 3b). Une tendance à la hausse et une rupture en 1976 sont mises en évidence (Annexe I).

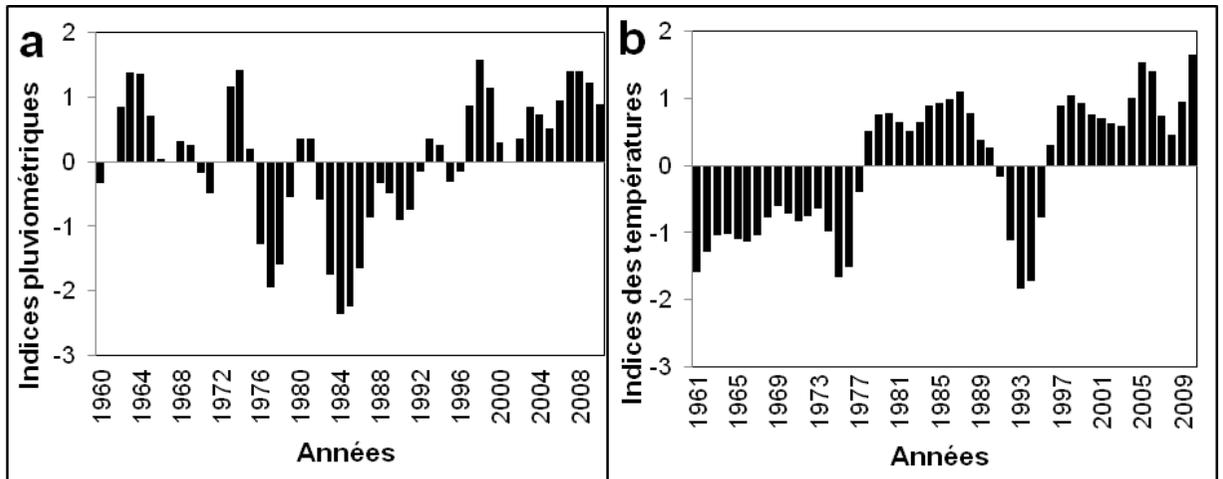


Figure 3 : Variabilités interannuelles de la pluviométrie (a) et des températures (b) à la station de Dapaong respectivement entre 1960-2010 et 1961-2010.

3.1.3. Station de Mango

Les précipitations à Mango ont connu d'importantes variations interannuelles avec trois périodes déficitaires assez importantes notamment de 1971 à 1977, entre 1988-1996, de 2000 à 2006 (figure 4a). Les périodes 1963-1969, 1997-1999 et 2007-2010 ont été humides. La période 1960-1961 a connu un léger déficit (figure 4a). L'analyse statistique n'a mis en évidence qu'une tendance à la baisse au seuil de confiance de 90%. Les températures ont connu dans l'ensemble une élévation progressive depuis les années 60 jusqu'en 2005 elles baissent légèrement avant de se relever (figures 4b). Depuis 1985 jusqu'en 2010, les températures se sont rehaussées progressivement et sont restées plus élevées avec un maximum de réchauffement en 2005 (figure 4b). Une tendance à la hausse au seuil de 99% et des ruptures en 1978 et 1986 ont été mises en évidence (figure 5, Annexe I).

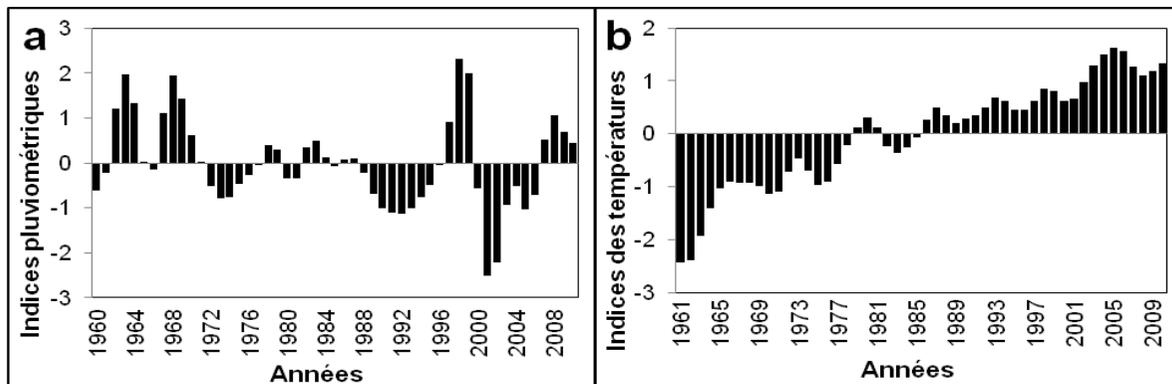


Figure 4 : Variabilités interannuelles de la pluviométrie (a) et des températures (b) à Mango respectivement entre 1960-2010 et 1961-2010.

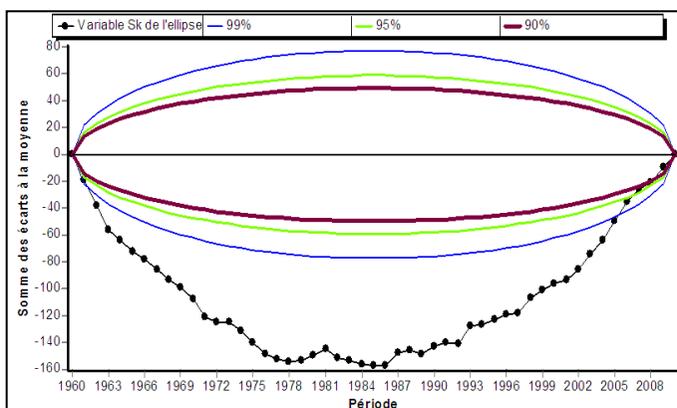


Figure 5: Mise en évidence de la présence de ruptures par l'Ellipse du Bois dans la série des températures de Mango à tous les seuils de confiance.

3.1.4. Station de Niamtougou

A Niamtougou, les variations interannuelles des précipitations sont assez importantes (figure 6a). La station a connu deux grandes périodes sèches : une première très longue s'étendant de 1974 à 1993 et une seconde de 2000 à 2006 (figure 6a). Les autres périodes de la chronique ont été humides sauf 1960-1961 qui a connu un petit déficit. L'analyse statistique montre que les précipitations sont stationnaires. Des ruptures avec une densité de probabilité de 0,22 et un seuil de confiance de 90% ont été détectées respectivement en 1972 et 1974 (Annexe I).

Les températures connaissent également une forte variabilité interannuelle avec deux périodes très chaudes notamment en 1978-1980 et 1996-2010 (figure 6b). Les tests statistiques ont permis de mettre en évidence une tendance à la hausse des températures et une rupture entre 1995 et 1996 (Annexe I).

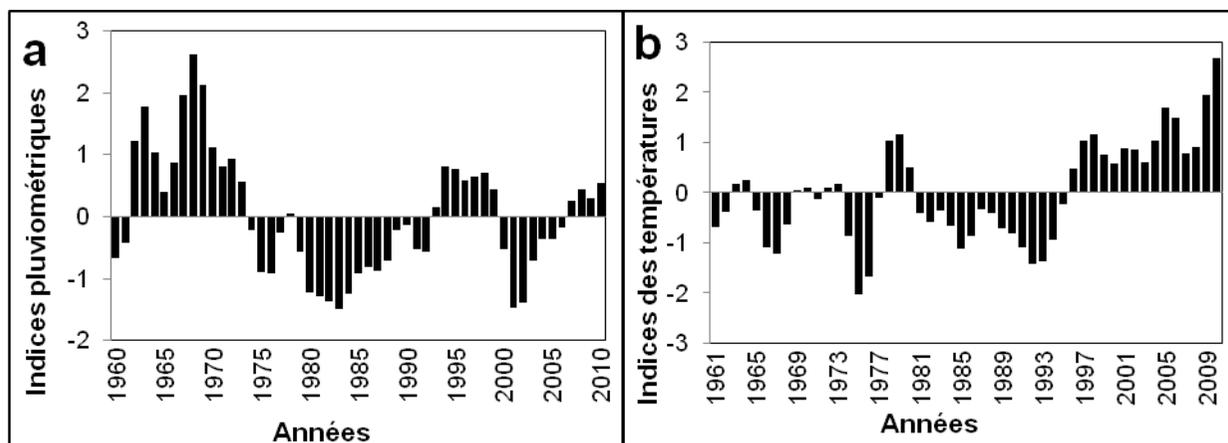


Figure 6 : Variabilités interannuelles de la pluviométrie (a) et des températures (b) à la station de Niamtougou respectivement entre 1960-2010 et 1961-2010.

3.1.5. Station de Kara

Egalement marquée par de fortes fluctuations interannuelles, la station de Kara a connu des périodes sèches dont les plus marquées sont les périodes 1980-1989 et 2004-2008 (figure 7a). Aucune tendance, ni de rupture n'a été mis en évidence dans la série pluviométrique par l'analyse statistique (Annexe I).

Les températures connaissent également des fluctuations interannuelles et ont été particulièrement plus élevées en 1995-1999 et surtout en 2003-2010 avec un maximum de réchauffement en 2010 (figure 7b). L'analyse statistique a permis de mettre en évidence une tendance à la hausse des températures et une rupture en 1994 (Annexe I).

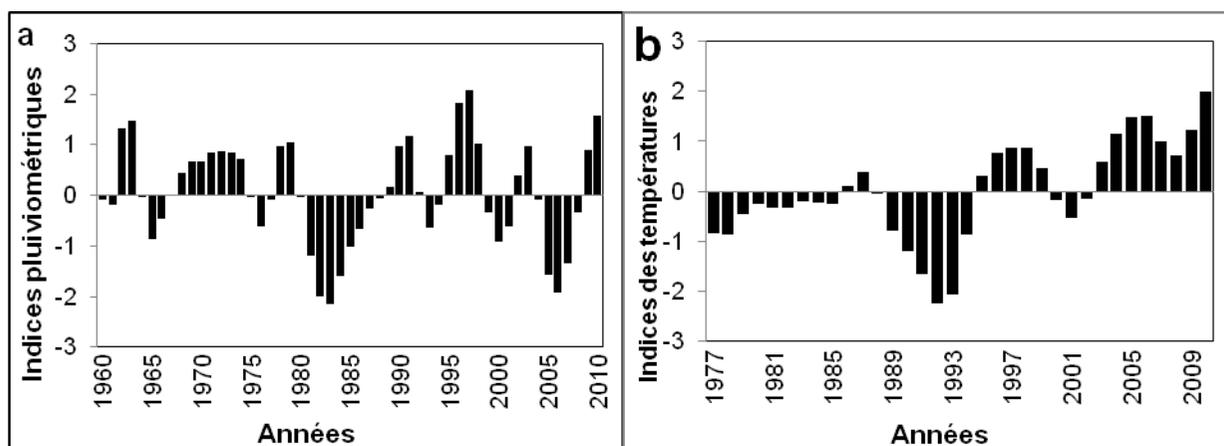


Figure 7: Variabilités interannuelles de la pluviométrie (a) et des températures (b) à la station de Kara respectivement entre 1960-2010 et 1977-2010.

3.1.6. Station de Sokodé

La station de Sokodé connaît également des fluctuations interannuelles mais surtout un déficit pluviométrique à partir des années 70 qui persiste jusqu'en 2010 (figure 8a). La période 1963-1970 a été très humide. L'analyse statistique montre une tendance à la baisse au seuil de confiance de 99% tandis que des ruptures sont détectées en 1970 par la méthode Bayésienne et la segmentation de Hubert puis en 1976 par le test de Pettitt au seuil de confiance de 99% (Annexe I).

Les températures ont connue une hausse progressive depuis les années 60 jusqu'en 2003 et demeurent toujours élevées (figure 8b). Les périodes chaudes ont été plus remarquables à partir de 1980. Le test de corrélation sur le rang de Kendall met en évidence une tendance à la hausse au seuil de confiance 99%. Des ruptures sont détectées au seuil de 99% en 1978 et 1979 respectivement par les tests de Buishand et de Pettitt (Annexe I).

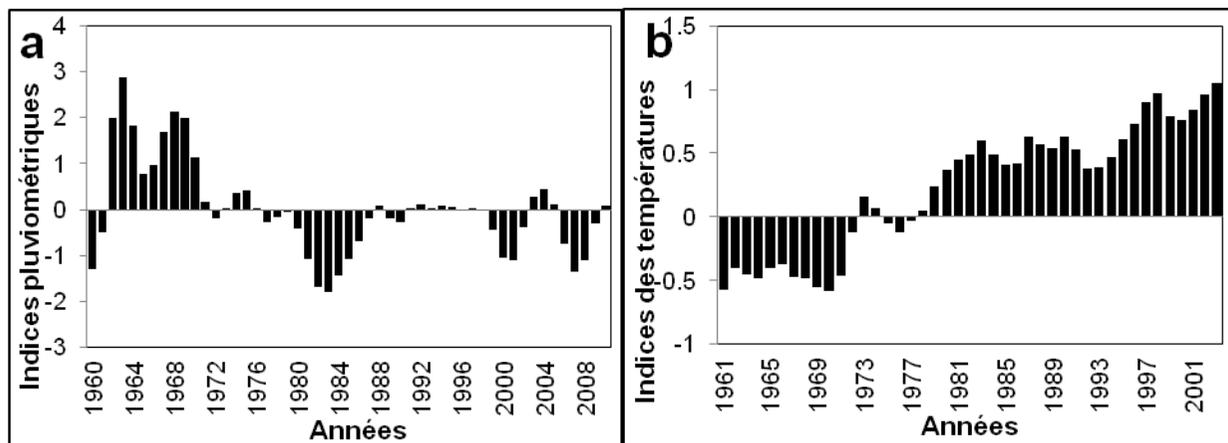


Figure 8: Variabilités interannuelles de la pluviométrie (a) et des températures (b) à la station de Sokodé respectivement entre 1960-2010 et 1961-2003.

3.2. Analyse spatiale

L'interpolation spatiale effectuée sur les moyennes décennales des précipitations illustre une variabilité spatiale bien contrastée (figure 10).

Les précipitations moyennes de la décennie 1960-1969 varient entre 1000 et 1600 mm, les maxima se situant entre Niamtougou et Sokodé et les minima au nord de Borgou. Avec la même variation latitudinale, les précipitations moyennes évoluent de 850 et 1400mm sur la décennie 1970-1979, de 800 à 1400 mm sur les décennies 1980-1989 et 1990-1999 puis de 1050 à 1300mm entre 2000 et 2009. Une hausse des précipitations minimales se fait remarquer sur les deux dernières décennies.

Dans l'ensemble, l'évolution des moyennes décennales de précipitations montre une baisse aussi bien dans les minimales que les

maximales. Cette baisse s’est traduite par un décalage des isohyètes vers le sud dans la zone moins pluvieuse située autour de Borgou tandis que celles-ci se resserrent dans les zones à fortes précipitations qui sont situées entre Niamtougou et Sokodé.

4. Discussion

L’ensemble des résultats s’accordent sur l’occurrence de forte fluctuations interannuelles des précipitations et une tendance à la hausse des températures pour toutes les stations étudiées. Ces résultats montrent également la succession de périodes sèches et de périodes humides.

Le nord du Togo, hormis la petite sécheresse enregistrée au cours des années 1961-1962, a été victimes d’importantes périodes sèches entre les années

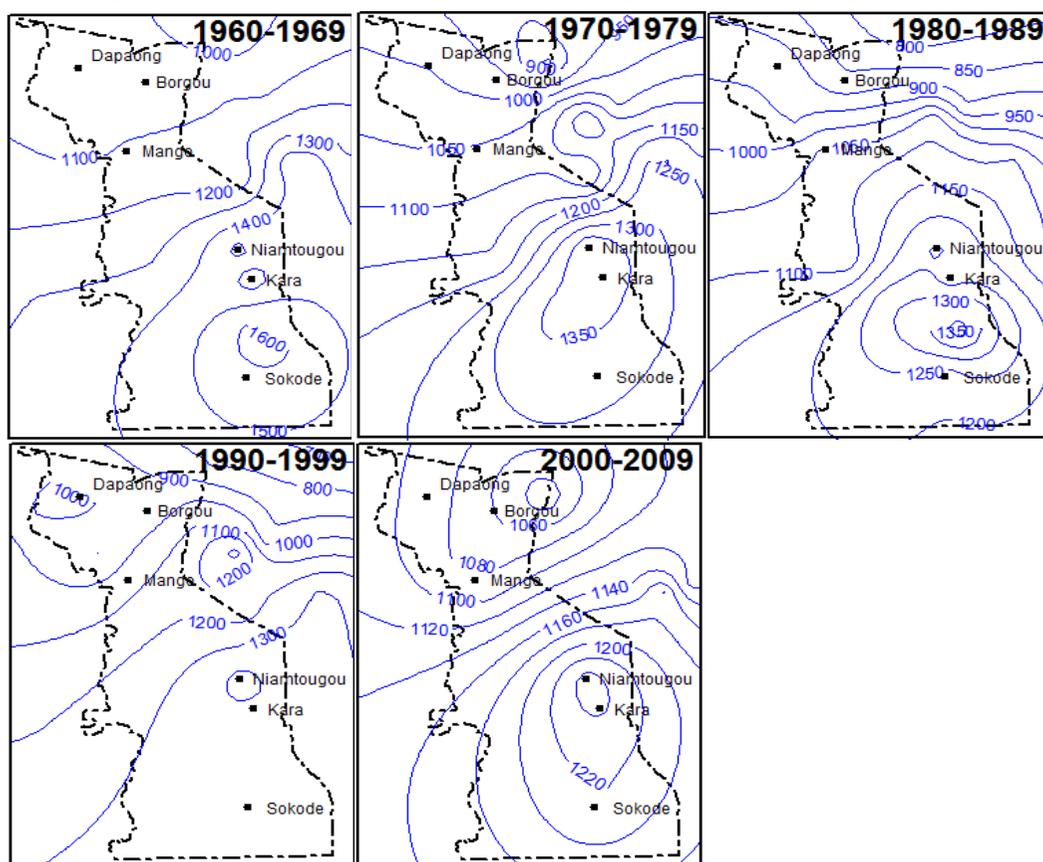


Figure 10: Répartition spatiale des moyennes décennales de précipitations (suite)

1970 et 1980 puis 1990 et 1996. Ces périodes sèches peuvent être interprétées comme les manifestations de la grande sécheresse qui a frappé l’Afrique de l’Ouest à partir de la fin des années 60 et au milieu des années

90 (Paturel *et al.*, 1997 ; Servat *et al.*, 1999 ; Lubès-Niel *et al.*, 1998). Ce déficit pluviométrique a été également mis en évidence en Côte d'Ivoire par de nombreux auteurs (Kanohin *et al.*, 2009 ; Soro *et al.*, 2006).

La petite sécheresse enregistrée par toutes les stations en 1961-1962 concorde avec les études de Servat *et al.* (1999) selon lesquelles le Togo, le Bénin et quelques stations du sud de la Côte d'Ivoire avaient connu un déficit pluviométrique en 1962 mais peu significatif.

Les différentes ruptures détectées aussi bien dans les précipitations que les températures sont nombreuses avec parfois des seuils de confiance de 90% et des modes de densités de probabilité a posteriori très faible ($< 0,1$). Ces diverses ruptures qui ne sont pas identiques pour toutes les stations seraient plutôt liées aux causes artificielles telles que les changements d'instrumentation, de l'environnement immédiat de la station, de l'exposition ou d'emplacement de la station (Cantat, 2004 ; Beaulieu, 2009), les erreurs de mesure ou les pannes. La station de Niamtougou qui présente une rupture en 1978 peut servir d'exemple. En effet les données de cette station proviennent d'un premier site créé depuis 1955 et d'un deuxième créé en 1979. Les emplacements et les instruments étant différents, ceci aurait agit sur les données. Par ailleurs, la majorité de ruptures détectées parfois au seuil de confiance de 99% et pour l'ensemble des stations se situent autour des années 1976, 1986 et 1993. Ces changements brusques coïncident avec d'importantes sécheresses qu'a connu l'Afrique subsaharienne dont celles de 1986-1987 et de 1991-1992 puis particulièrement le Togo en 1976-1977 (Bhavnani and Vordzorgbe, 2008). Ces ruptures seraient donc beaucoup plus liées aux changements dans les caractéristiques statistiques des paramètres climatiques qu'aux causes artificielles comme soulignées précédemment. Une estimation de la moyenne de la pluviométrie avant et après 1976 à la station de Borgou montre une baisse de 13%, ce qui témoigne d'un changement brusque effectif de la moyenne. La même opération effectuée sur les précipitations de Sokodé avant et après 1970 qui a été détectée comme année de rupture montre que les précipitations ont baissé de 17,89% entre 1970-2000 par rapport à la période 1960-1969. La comparaison des moyennes des températures de la station de Mango calculées sur les périodes proposées par la segmentation notamment 1964-1976, 1977-1992 et 1993-2008 par rapport à la période 1961-1963 montre des augmentations respectives de 3, 6 et 7%.

La différence dans les résultats des différents tests a été discutée par Lubès-Niel *et al.* (1998). En effet, les analyses menées sur des séries simulées ont montré d'une part qu'une rupture peut être identifiée avec une marge d'incertitude de quelques années, et d'autre part que les tests mis en œuvre ne sont pas très puissants lorsque les taux de rupture en moyenne sont faibles (Niel *et al.*, 2005 ; Lubès-Niel *et al.*, 1998).

Même si les séries de précipitations aux stations de Dapaong, Niamtougou et Kara ont connu elles aussi des ruptures avec des changements sensibles de la moyenne, elles ne connaissent pas de tendance significative sur la période d'étude comme les autres stations d'après l'analyse aux points de mesure. Cette stationnarité peut être influencée par la reprise des précipitations après des périodes sèches surtout au cours de la dernière décennie.

L'hétérogénéité des quantités de pluies d'une station à une autre nécessite une complémentarité de l'analyse spatiale à celle temporelle afin de mieux cerner l'évolution régionale du phénomène étudié.

Les résultats de l'analyse spatiale montrent que les précipitations connaissent une baisse à toutes les stations. Cette baisse montre que la diminution des précipitations mis en évidence en Afrique de l'Ouest en générale se manifeste également à l'échelle la zone d'étude. La concentration des valeurs les plus importantes des précipitations dans la zone située entre Niamtougou et Sokodé peut s'expliquer par l'influence de la topographie. Cette zone est en effet très accidentée car traversée par la chaîne de l'Atakora. Les collines qui traversent cette zone arrêtent donc l'alizé maritime du sud-ouest appelé mousson qui souffle du sud-ouest vers le nord-est et favorise la formation des nuages et par conséquent de fortes précipitations dans cette zone et une décroissance de la pluviométrie au-delà de celle-ci.

Le décalage des isohyètes qui traduit la baisse significative des précipitations a été également mis en évidence par de nombreuses études dans la sous-région (Paturel *et al.*, 1995, Lawin *et al.*, 2012). En effet, les études de Paturel *et al.* (1995) ont montré que la courbe isohyète 1000 mm qui se situait au nord du Togo dans les années 50 a totalement migré vers le sud dans les années 70 puis a poursuivi au cours des années 80. Ce décalage n'a pas affecté que le Togo seulement mais aussi le Bénin et la Côte d'Ivoire selon les auteurs. Lawin *et al.* (2012) ont montré que les isohyètes ont connu un décalage dans le nord du Bénin à partir de 1970, l'amplitude du décalage variant dans l'espace. Les résultats de la présente étude confirment également la baisse des précipitations et la hausse des températures et mises en évidence dans la plaine de l'Oti au Togo (Badjana *et al.*, 2012).

Par ailleurs, depuis les latitudes de Niamtougou jusqu'à l'extrême nord, une augmentation des précipitations s'observe sur la période 2007-2008 suite à l'analyse temporelle aux points de mesure tandis que l'analyse spatiale montre une augmentation sur toute la décennie 2000-2009. Cette hausse justifie en partie la cause des inondations qui se sont produites dans le Nord-Est en 2007 et 2008 infligeant des pertes en vies humaines, en infrastructures économiques et environnementales.

Conclusion

La présente étude montre qu'au cours des cinquante dernières années, le Nord du Togo a connu une forte variabilité climatique avec une succession de périodes sèches et de périodes humides. L'analyse aux points de mesure des séries temporelles montre que les précipitations aux stations de Borgou, Mango et Sokodé connaissent une tendance significative à la baisse tandis que celles de Kara, Niamtougou et Dapaong sont stationnaires. Par contre les températures tendent à la hausse à toutes les stations étudiées. Plusieurs ruptures ont été détectées dans les séries dont les causes sont aussi bien naturelles qu'artificielles. L'analyse spatiale des moyennes décennales de précipitations montre que tout le nord du Togo connaît un décalage des isohyètes du nord vers le sud et un resserrement de ces courbes dans les régions à forte pluviométrie.

Le réchauffement climatique qui est aujourd'hui sans équivoque est un fait avéré dans le Nord du Togo et son impact sur les précipitations se traduit par des fortes fluctuations interannuelles et une tendance à la baisse.

Les résultats de cette étude constituent une importante base de données pour l'évaluation des risques climatiques mais aussi de la vulnérabilité aux changements climatiques. Dans ce contexte, l'amélioration et le renforcement des systèmes d'observation s'avèrent nécessaires pour avoir des données fiables et suffisantes afin de mieux caractériser l'évolution du climat et faire de bonnes prévisions devant contribuer à une meilleure adaptation aux probables effets néfastes des changements climatiques.

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour le soutien financier du programme RIPIECSA dont a bénéficié le Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale de l'Université de Lomé. Nous remercions également la Direction Générale de la Météorologie Nationale du Togo, particulièrement Mr LAOGBESSI Egbesem Tchitchi-The pour avoir fourni les données météorologiques nécessaires à la réalisation de cette étude. Nos remerciements vont à l'endroit des reviewers anonymes pour leurs remarques et suggestions constructives ayant amélioré la qualité de cet article.

Références:

Auterives, C. (2002). *Impact du changement climatique sur la ressource en eau en région Languedoc-Roussillon*. Rapport de stage de DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie ; Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives. Montpellier, 49p.

- Badjana, H. M., Batawila, K., Wala, K., & Akpagana, K. (2012). Evolution des paramètres climatiques dans la plaine de L'Oti (Nord-Togo) : Analyse statistique, perceptions locales et mesures endogènes d'adaptation. *African Sociological Review*, 15(2), 77-95.
- Baillargeon, S. (2005). *Le krigeage: revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations*. Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec. 2005.
- Beaulieu, C. (2009). *Homogénéisation des séries de précipitations : identification des techniques les plus prometteuses et nouveaux développements*. Thèse de doctorat, Université du Québec, INRS-ETE.
- Bhavnani, R., & Vordzorgbe, S. (2008). *Rapport sur l'état de la réduction des risques de catastrophes en Afrique subsaharienne*. Commission of the AU, UN/International Strategy for Disaster Reduction, the World Bank, 96p.
- Cantat, O. (2004). Analyse critique sur les tendances pluviométriques au 20ème siècle en Basse-Normandie : réflexion sur la fiabilité des données et le changement climatique. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, 1, 11-32.
- Direction Générale de la Statistique et de la Comptabilité Nationale (DGSCN). (2010). *Quatrième Recensement General de la Population et de l'Habitat du Togo. Résultats définitifs*. 57p.
- Goula, B. T. A., Savané, I., Konan, B., Fadika, V., & Kouadio, G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 1-12.
- Gratton, Y. (2002). Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, www.iag.asso.fr
- Hubert, P., & Bendjoudi, H. (1999). Introduction à l'étude des longues séries pluviométriques. XIIèmes journées hydrologiques de l'Orstom, Montp., 16p.
- Hubert, P., Servat, E., Paturel, J.-E., Kouame, B., Bendjoudi, H., Carbonnel, J.-P., & Lubès-Niel, H. (1998). La procédure de segmentation, dix ans après. *IAHS Publication*, 252, 267-273.
- Kanohin, F., Saley, M.B., & Savané, I. (2009). Impacts de la Variabilité Climatique Sur Les Ressources en Eau et Les Activités Humaines en Zones Tropicale Humide: Cas de la Région de Daoukro en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 26, 209-222.
- Kendall, S .M., & Stuart, A. (1943). *The Advanced Theory of statistics*. London : Charles Griffin, 1943 ; 7239.
- Lamouroux, M. (1969). Carte pédologique du Togo au 1/100000. Notice explicative N 34. ORSTOM, 91p, ed RAMBOLT GUIOT.
- Lawin, E. A., Oguntunde, P. G., Lebel, T., Afouda, A. & Gosset, M. (2012). Rainfall variability at regional and local scales in the Ouémé Upper Valley in

- Bénin. *International Journal of Science and Advanced Technology*, 2 (6): 46-55 (ISSN 2221 -8386).
- Lubès-Niel, H., Masson, J.M., Paturel, J.E., & Servat, E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Révue des Sciences de l'Eau*, 3, 383-408.
- Meddi, H., & Meddi, M. (2007). Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. LERP-Centre Universitaire de Khemis Miliana, 44225, Algérie. *Geographia Technica*, 2, 49-55.
- Ministère de l'environnement et des ressources forestières (MERF). (2010). *Etude de la vulnérabilité et de l'adaptation aux changements climatiques, secteur « établissements humains et santé »*. Togo, 77p.
- Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (MERF). (2008). *Plan d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques (PANA)*; Togo, 88p.
- Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (MERF). (2001). *Etude sur les circonstances nationales*. Togo, 102p.
- Nicholson, S.E., 1983. Sub-Sahara rainfall in the years 1976-1980: evidence of continued drought. *Monthly weather Review*, 3, 1946-1954.
- Niel, H., Leduc, C., & Dieulin, C. (2005). Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles sur le bassin du lac Tchad au cours du 20ème siècle. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 221-243.
- Paturel, J.-E., Servat, E., Delattre, M.O., Lubès, H. et Fritsch, J.M., 1997. Etude de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *IAHS Publication*, 246, 249-255.
- Paturel, J.-E., Servat, E., Kouame, B., & Boyer, J.-F. (1995). Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Secheresse*, 6, 95-102.
- Perreault, L. (2000). *Analyse bayésienne retrospective d'une rupture dans les séquences de variables aléatoires hydrologiques*. Thèse en cotutelle ENGREF/GRESE et Univ. Quebec/INRS-Eau, 29 septembre 2000, 200p.
- Ribeiro, Jr. P. J. & Diggle, P.J. (2001). geoR: A package for geostatistical analysis. *R-NEWS* 1, (2), 15–18. ISSN 1609-3631.
- Robson, A., Bardossy, A., D., J., & Kundzewicz, Z. W. (2000). Statistical methods for testing for change. In World Climate Data and Monitoring Programme (WCDMP-45). Detecting trend and other changes in hydrological data (pp. 46-62). Geneva, Switzerland.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J.-M., Travaglio, M., & Marieu, B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne « Regarding rainfall in non sahelian western and central Africa ». *Révue des Sciences de l'Eau*, 12, 363-387.

Soro, N., Lasm, T., Kouadio, B.H., Soro, G., Ahoussi, K.E., 2006. Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. *Sud Sciences & Technologies*, 14, 30-40.

Tairou, M.S., Affaton, P., Anum, S., & Fleury, T. J. (2012). Pan-African paleostresses and reactivation of the Eburnean basement complex in Southeast Ghana (West Africa). *Journal of Geological Research*, 2012, 1-15.

Annexe I: Résultats des tests statistiques appliquées aux chroniques de précipitations et de températures

		Caractère aléatoire	Pettitt	Buishand	Ellipse du Bois	Lee et Heghinian	Hubert
Borgou	P	Non à 90%	-	Rupture à 90%	1975 à 90%	1964	-
	P	Oui	-	-	1996 à 90%	1996	-
Dapaong	T	Non à 99%	Rupture à 99% en 1976	Rupture à 99%	1976 à 99%	1976	1961-1976 1977-2010
	P	Non à 90%	-	-	1999 à 90%	1999	-
Mango	T	Non à 99%	Rupture en 1986 à 99%	Rupture à 99%	1978 à 99% (et 1986)	1978	1961-1963 1964-1976 1977-1992 1993-2010
	P	Oui	Rupture à 90% en 1974	Rupture à 90%	1974 à 99%	1972	1960-1972 1973-2010
Niamtougou	T	Non à 90%	Rupture à 95% en 1995	-	1995 à 99%	1996	1961-1996 1997-2010
	P	Oui	-	-	2003 à 90%	2004	-
Kara	T	Non à 90%	Rupture à 95% en 1994	Rupture à 90%	1994 à 99%	1994	1977-1993 1994-2010
	P	Non à 99%	Rupture à 99% en 1976	Rupture à 99%	1976 à 99%	1970	1960-1970 1971-2010
Sokodé	T	Non à 99%	Rupture à 99% en 1979	Rupture à 99%	Rupture à 99% en 1978	1962	-

P = Précipitation

T = Température

- = Test non appliqué ou pas de résultat