



Journal Homepage: - www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/10152

DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/10152>



RESEARCH ARTICLE

EVOLUTION PLUVIO-THERMIQUE DE 1950 A 2013 AU SENEGAL ORIENTAL : CAS DE LA REGION DE TAMBACOUNDA.

M. Faye¹, A. Fall², D. Tine³, C. S. Faye⁴, B. Faye⁵ and A. Ndiaye⁶.

1. Laboratoire de Climatologie et d'Environnement (LCE)- Département de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal.
2. Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LaSTEE), École polytechnique de Thiès, BP A10 Thiès, Sénégal. Chercheur associé à l'EA 7338 PLEIADE, Université Paris 13, 99 avenue Jean Baptiste Clément, 93 430 villetaneuse.
3. Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA)- Institut des Sciences de la Terre (IST), Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal.
4. Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LaSTEE), École Polytechnique de Thiès BP A10 Thiès, Sénégal.
5. Laboratoire de Climatologie et d'Environnement (LCE)- Département de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal.
6. Département de géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 03 October 2019

Final Accepted: 05 November 2019

Published: December 2019

Key words:-

Rainfall and Temperature Evolution, Standardized Rainfall Index, climatic domain, Eastern Senegal, Tambacounda region.

Abstract

This study aims to analyze climate change (1950-2013) in eastern Senegal through two parameters: temperatures and rainfall. Température datas only date back to 1960. Data analysis indicates a downward trend in rainfall and rising temperatures. Like the West African countries, the rainfall recession of the 1970s and 1980s affected rainfall totals for all the country's stations. The decline in rainfall since the late 1960s has continued until the 1980s with the disappearance of the regional isohyet 1000 mm between 1981 and 1990. This decline is also noted during the 1960s despite some exceptions of years wet. Most dates of serial rupture, according to Pettitt's (1979) test, are noted during this period. Only the Bakel and Goudiry stations recorded respectively their rupture in 1993 and 1975. The years 1950, 2000 and 2010 turn out to be like the rainiest ones. Nevertheless, rainfall is not the only one to fluctuate. The results of the Pettitt test and standardized anomalies show an increase in temperature throughout the Tambacounda region since the second half of the 1980s despite the small difference between the northern (warmer) and the southern (less hot).

Copy Right, IJAR, 2019.. All rights reserved.

Introduction:-

La variabilité climatique a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques et de rencontres internationales. C'est un phénomène qui se décline différemment selon les régions du globe et les propriétés de surface (Cuccia, 2008 ; CILSS-AGRHYMET, 2010). Elle peut être appréhendée à travers une modélisation ou des observations et mesures.

Corresponding Author:- M. Faye.

Address:- Laboratoire de Climatologie et d'Environnement (LCE)- Département de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal.

Selon les observations, cette variabilité climatique se manifeste, aujourd'hui, par la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, la modification des températures (récurrence des canicules) et du régime des pluies (sécheresses accrues ou inondations). Des études récentes (GIEC 2001, 2007 ; Khoualdia et al 2014) ont montré son ampleur et le degré de préoccupation des décideurs à trouver des moyens d'atténuation et d'adaptation à ce phénomène. D'après Baud et al. 2013, cette variabilité est réelle et suscite des impacts négatifs sur l'environnement. En effet, 13 des 15 années les plus chaudes qu'a connues notre planète, sur les 150 ans des observations météorologiques mondiales, se situent entre 1997 et 2011. Les modèles climatiques prévoient qu'environ 20 à 30 % des espèces végétales et animales évaluées à ce jour sont susceptibles d'être exposées à un risque accru d'extinction si l'augmentation moyenne de la température mondiale dépasse 1,5 à 2 °C (UNEP, 2002). Ces perturbations climatiques risquent d'aggraver la mortalité des arbres, la destruction des sous-bois et la dégradation des sols.

Au Sénégal, à l'instar des pays de l'Afrique de l'ouest, la pluviométrie et les températures sont de loin les éléments les plus déterminants pour caractériser l'évolution du climat (Sarr, 2008 ; Sarr, 2011 ; Bodian, 2014 ; Amoussou, 2016). Après des phases humides (années 1950 et 1960) et sèches (années 1970 et 1980), nous observons dans cette partie du Sénégal une amélioration de la pluviométrie depuis le début des années 2000. S'agit-il d'une alternance de période humide et de période sèche ? Cette période actuelle caractérisée par certains chercheurs (Bodian, 2014 ; Ndong, 2015) de « reprise » pluviométrique est en réalité très contrastée (Faye et al. 2018). Contrairement aux années 1950, elle reste marquée par une alternance d'années de forte pluviosité et d'années sèches. C'est une période qui se caractérise principalement par la récurrence des phénomènes extrêmes (sécheresses accrues ou inondations, vagues de chaleur). Par exemple en 2003, la chute de 1066,7 mm de pluie à Tambacounda avait entraîné le déplacement de plusieurs familles de la zone bananière (notamment les villages de Sankagne, Nguène ou Adiaf) et la perte de 747 ha de bananeraie avec des dégâts estimés à environ 4 milliards de francs CFA soit 6 millions euros. Cette période d'amélioration de la pluviométrie, sous-entendu par le terme « reprise » des précipitations, est, par conséquent, une période de « catastrophes » climatiques.

Cadre géographique et données:-

Cadre géographique:-

Située entre 12° 50' et 15° 10' N et entre 11° 50' et 14° 50' W (figure 1), Tambacounda est la région la plus vaste du Sénégal et fait partie des mieux arrosées. Avec une superficie de 42 706 km², sa population était de 681 310 habitants en 2013 (ANSD, 2015), soit une densité de 16 habitants/km².

Cette région est frontalière avec la République Islamique de la Mauritanie au Nord-est, le Mali à l'est, la Guinée Conakry au sud et la Gambie à l'ouest. Ses limites régionales sont Matam au nord, Kédougou au Centre-sud, Kolda au Sud-ouest et Kaffrine au Nord-ouest.

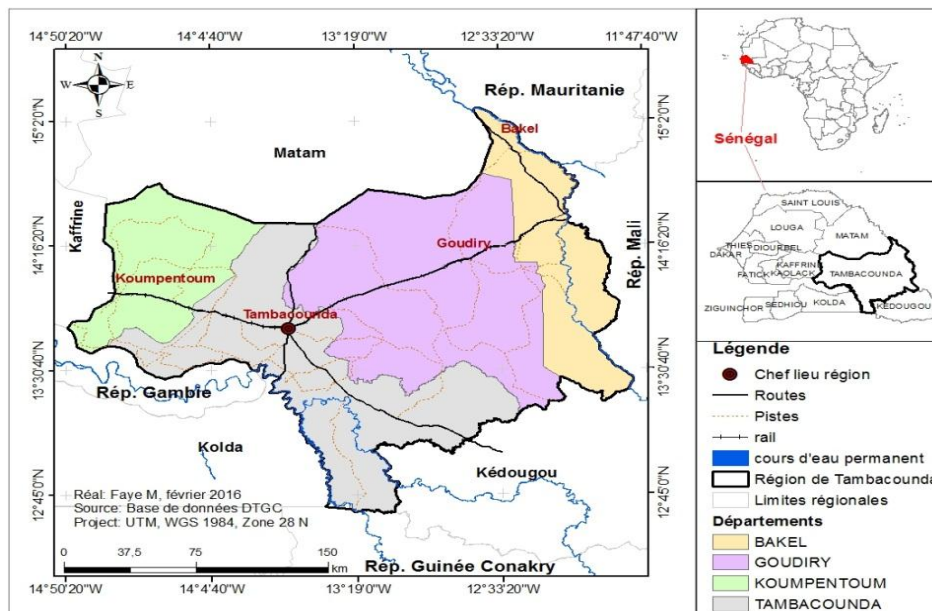


Figure 1:- Localisation de la Région de Tambacounda dans le Sénégal.

Tambacounda appartient essentiellement au domaine climatique soudanien qui occupe tout le sud du pays, avec une pluviométrie variant entre 600 et 1200 mm (Sagna, 2007) répartie entre la région nord-soudanienne (600 mm à 800 mm) et celle sud-soudanienne (800 à 1200 mm). La partie nord-soudanienne est représentée par la station de Tambacounda et les postes de Koumpentoum, Goudiry et Kidira et la zone sud correspond à la station de Kédougou (cf. figure 2). La partie septentrionale de la région plus particulièrement la station de Bakel est occupée par le domaine climatique sud-sahélien. Pour rappel, les stations fournissent des mesures sur les conditions de surface (pression, température, humidité, vent, insolation et précipitations) et sur les phénomènes météorologiques. Par contre, les postes se limitent à la hauteur des précipitations journalières, dont on déduit les hauteurs de pluie mensuelles et les nombres de jours de pluie.

Données:-

Cette étude est basée sur les données de trois stations météorologiques et de trois postes pluviométriques. Il s'agit des stations de Tambacounda, de Bakel et de Kédougou et les postes pluviométriques de Koumpentoum, de Kidira et de Goudiry (figure 2). Ces données climatiques sont gérées par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) du Sénégal. Les postes retenus obéissent aux critères d'ancienneté des observations, de la disponibilité des données mais également du rayon de couverture du site de mesure. Les stations retenues possèdent des séries de données climatiques relativement longues (plus de 50 ans) et ne présentent aucune donnée manquante.

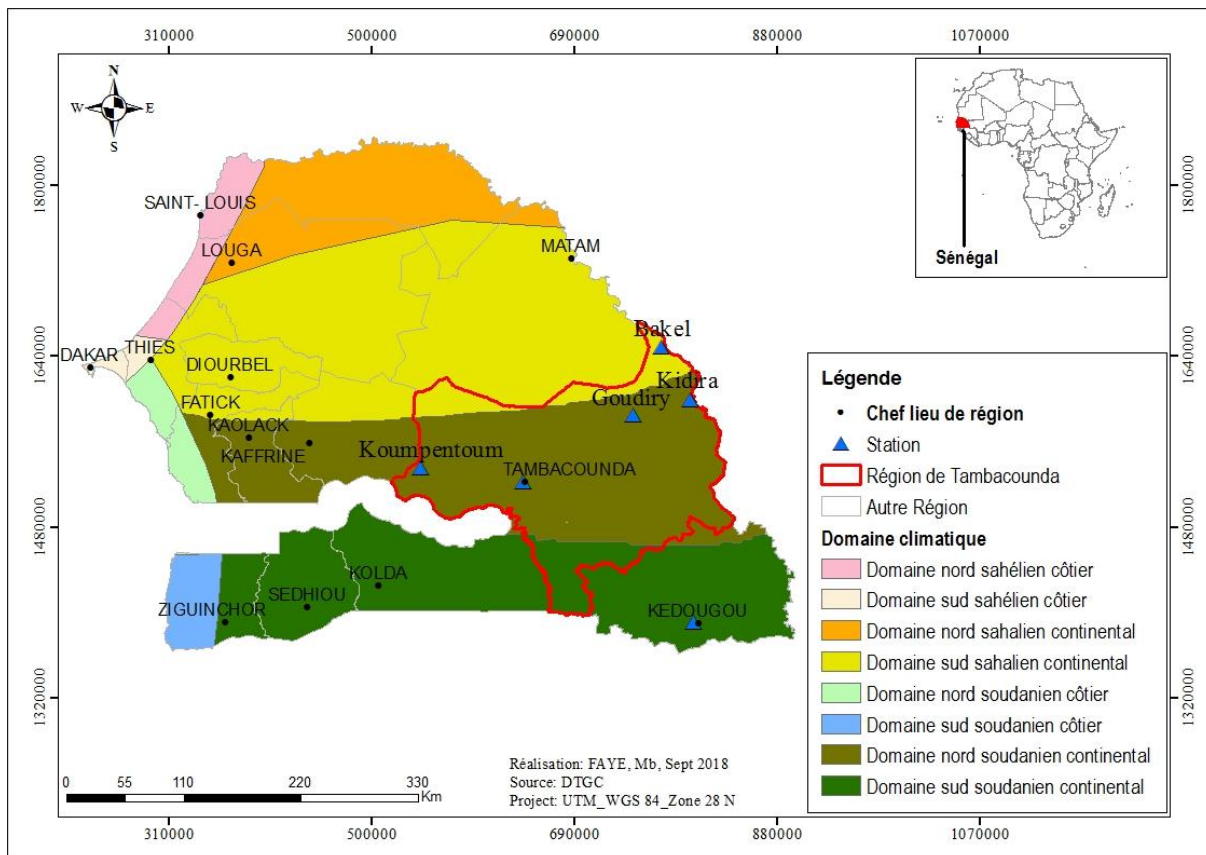


Figure 2:- Situation des domaines climatiques du Sénégal et des stations de mesure étudiées.

L'analyse des températures porte sur la période 1960-2013 (54 ans) pour les stations de Tambacounda et de Kédougou, et 1980-2013 (34 ans) pour Bakel. Les données, au-delà de cette période, pour Bakel, sont très lacunaires, ce qui justifie le choix de cette courte série. Les températures étudiées sont évaluées en degré Celsius et concernent les moyennes minimales et maximales mensuelles et annuelles.

En ce qui concerne les données pluviométriques, elles s'étendent sur 64 ans (1950-2013) pour les stations de Bakel, de Tambacounda, de Kédougou et de Kidira, et de 53 ans (1961-2013) pour les postes de Goudiry et de Koumpentoum. Cette étude s'appuie sur les moyennes pluviométriques mensuelles et annuelles. L'analyse de ces

données permet de comprendre la situation pluviométrique de la région de Tambacounda des années avant, pendant et après la grande sécheresse. Elle revêt, donc, un intérêt particulier dans la détermination des phases sèches et celles humides.

Méthodes:-

L'étude de la variabilité climatique est effectuée par des méthodes de représentations cartographiques, de l'écart à la normale 1961-1990, de l'Indice des Températures Standardisé (ITS), de l'Indice Pluviométrique Standardisé (IPS) et de la méthode statistique de détection de rupture dans les séries (test de Pettitt 1979). Ces techniques sont appliquées sur les données de températures et de la pluviométrie.

L'ITS et l'IPS ou SPI (acronyme en anglais de Standardized Precipitation Index) (McKee et al. 1993) permettent de déterminer respectivement les années chaudes ($ITS > 0$) et celles douces ($ITS < 0$), et les années humides ($IPS > 0$) et celles sèches ($IPS < 0$).

Il est déterminé par la formule suivante : ITS ou $IPS = (V_i - V_m)/S$ avec :

V_i = Valeur (pluie ou température) pour une année i ;

V_m = moyenne annuelle sur la série considérée ;

S = écart type des valeurs sur la même période.

Les valeurs de l'indice sont classées en différentes catégories (McKee et al. 1993). Une période normale est une période pendant laquelle la moyenne annuelle est sensiblement égale à la moyenne de la série (tableau 1).

Tableau 1:- Classification des valeurs de l'Indice des Températures Standardisé (ITS) et de l'Indice Pluviométrique Standardisé (IPS) (McKee et al. 1993).

Valeurs	ITS	IPS
2,0 et plus	Extrêmement chaud	Extrêmement humide
1,5 à 1,99	Très chaud	Très humide
1,0 à 1,49	Moins chaud	Modérément humide
-0,99 à 0,99	normale	Proche de la normale
-1,0 à -1,49	doux	Modérément sec
-1,5 à -1,99	Moyennement doux	Très sec
-2 et moins	Très doux	Extrêmement sec

Le test de Pettitt est utilisé pour mettre en évidence le caractère stationnaire ou non des séries chronologiques de températures et de précipitations. Le test examine l'existence d'une rupture à un instant (t) inconnu de la série à partir d'une formule dérivée de Mann-Whitney (Servat et al., 1998). L'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Le test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne (Hubert et al. 1989 ; Lubès-Niel et al. 1998).

Pettitt définit la variable $U_{t,N}$:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(Z) = 1$ si $Z > 0$, 0 si $Z = 0$ et -1 si $Z < 0$.

Il propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour (t) variant de 1 à $N - 1$. Si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, le test propose une estimation de la date de rupture.

L'interpolation des températures et des précipitations sont également appliquées dans cette étude pour mieux caractériser la variabilité du climat dans la région. Son intérêt est de visualiser l'évolution des isohyètes dans l'espace régional en rapport avec la péjoration pluviométrique observée. Cette analyse spatiale est basée sur les moyennes décennales (de 1951 à 2010) et trentenaires c'est-à-dire les normales pluviométriques 1931-1960 et 1961-1990. En ce qui concerne les températures moyennes annuelles, la spatialisation porte sur les trois dernières décennies, c'est-à-dire de 1984 à 2013 ; faute de série chronologique qui remonte jusqu'aux années 1960 pour la station de Bakel.

Résultats:-**Évolution des températures annuelles:**

Les températures, de manière générale, sont élevées dans les régions tropicales. La Région de Tambacounda, située dans la partie Orientale du Sénégal (Afrique de l'ouest) est naturellement chaude. Les températures augmentent suivant un gradient sud-nord. Les températures moyennes annuelles maximales les plus élevées sont notées à Bakel (37,4 °C) et à Tambacounda (36 °C) (tableau 2). Les valeurs moyennes annuelles minimales sont similaires à Tambacounda et à Kédougou.

Tableau 2:- Statistique descriptive des températures minimales, maximales et moyennes annuelles de Bakel (1984-2013) de Kédougou et de Tambacounda (1960-2013).

Stations	Périodes	T °C	Mini	Maxi	Moy	Ecart-type
Bakel	1980-2013	Tn	17,9	26,1	23,0	1,4
		Tx	35,5	38,8	37,5	0,8
Kédougou	1960-2013	Tn	18,8	23,6	21,7	1,0
		Tx	32,8	36,1	35,1	0,6
Tambacounda	1960-2013	Tn	20,2	23,2	22,0	0,7
		Tx	34,5	37,1	36,0	0,6

Tn = Température minimale ; **Tx** = Température maximale.

La cartographie des températures décennales (de 1984 à 2013) permet de mieux apprécier la répartition de celles-ci dans l'espace régional. Les résultats montrent que les températures ont connu de fortes fluctuations spatiales au cours des trois dernières décennies. Les températures moyennes annuelles varient, globalement, entre 28 et 31,5 °C (figure 3). Le Nord-est, particulièrement le secteur de Bakel, est le milieu le plus chaud. Il a enregistré les valeurs maximales pendant toute la série.

La décennie 1984-1993 est moins chaude. Les localités de Koumpentoum, Tambacounda et Dialacoto étaient entièrement couvertes par des températures comprises entre 28 et 29 °C. Par contre, les deux dernières décennies (1994-2003 et 2004-2013) sont marquées par une augmentation de la chaleur. Les températures moyennes comprises entre 30 et 31 °C suivent une dynamique spatiale avec de fortes proportions dans l'espace régional. En effet, ce réchauffement est en phase avec les résultats du GIEC 2001, 2007 et les travaux effectués en Afrique de l'ouest (Badjana et al., 2014 ; Djohy, 2015 ; Ndong, 2015).

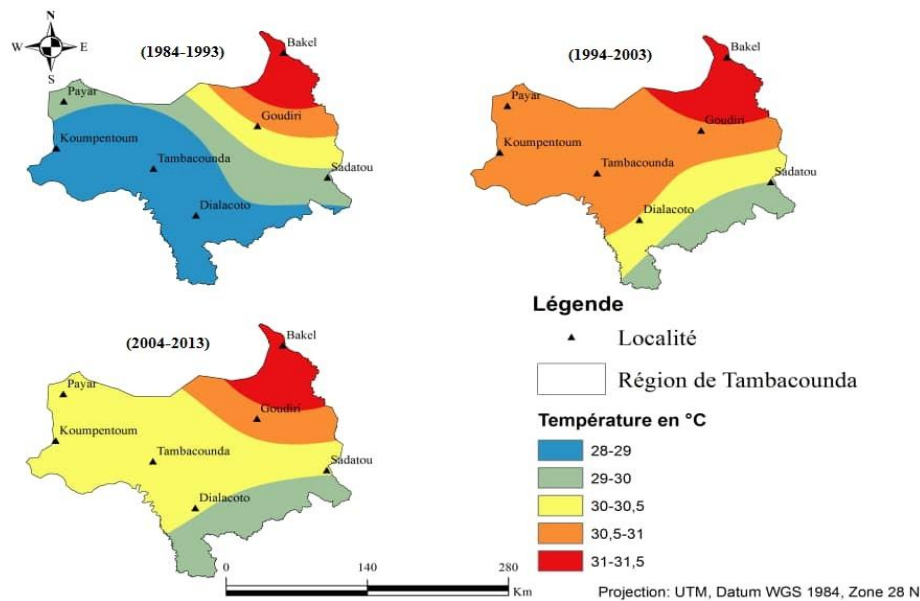


Figure 3:- Evolution spatiale des températures moyennes de la région de Tambacounda.

Les températures annuelles standardisées laissent apparaître deux phases distinctes : une première phase où les anomalies sont majoritairement négatives (phase à température modérée) et une seconde phase où elles sont pour l'essentiel positives (phase de hausse des températures).

Les anomalies des températures minimales montrent de courtes périodes de baisse. Ce qui montre que cette variable n'a pas beaucoup évolué dans la région. L'indice standardisé a accusé une regression conséquente en 1965 et 1966 dans les stations de Tambacounda et Kédougou ainsi qu'en 1999 à Bakel et 2003 à Kédougou (figure 4). Les valeurs positives des anomalies les plus importantes sont notées en 2005 (à Bakel), en 1993 (à Tambacounda) et 2012 (à Kédougou). Par ailleurs, l'analyse séquentielle révèle, à Bakel, une phase (1980-1999) qui alterne des années chaudes et douces, et une phase chaude (2000-2013), deux phases douces (1961-1976 et 1989-2004) et deux phases chaudes (1977-1988 et 2005-2013) à Kédougou et deux phases douces (1961-1976 et 2006-2013) et une phase chaude (1977-2005) à Tambacounda.

Les anomalies négatives des températures maximales ont modestement évolué dans les trois stations. La figure 4 permet de retenir que Bakel a connu un climat très doux en 1996 ainsi que Tambacounda en 1967 et 1976, et Kédougou en 1967. En effet, les indices positifs sont instables et affichent une hétérogénéité du réchauffement. Ils augmentent au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin de la série. Contrairement à l'évolution des températures moyennes minimales, deux périodes (une phase chaude et une phase douce) simplifient l'évolution des températures moyennes maximales. A bakel, la période douce correspond à 1980-1996 et celle chaude à 1997-2013. Kédougou et Tambacounda ont une évolution similaire. La période moins chaude correspond, pour les deux stations, à 1961-1989 et celle chaude à 1990-2013.

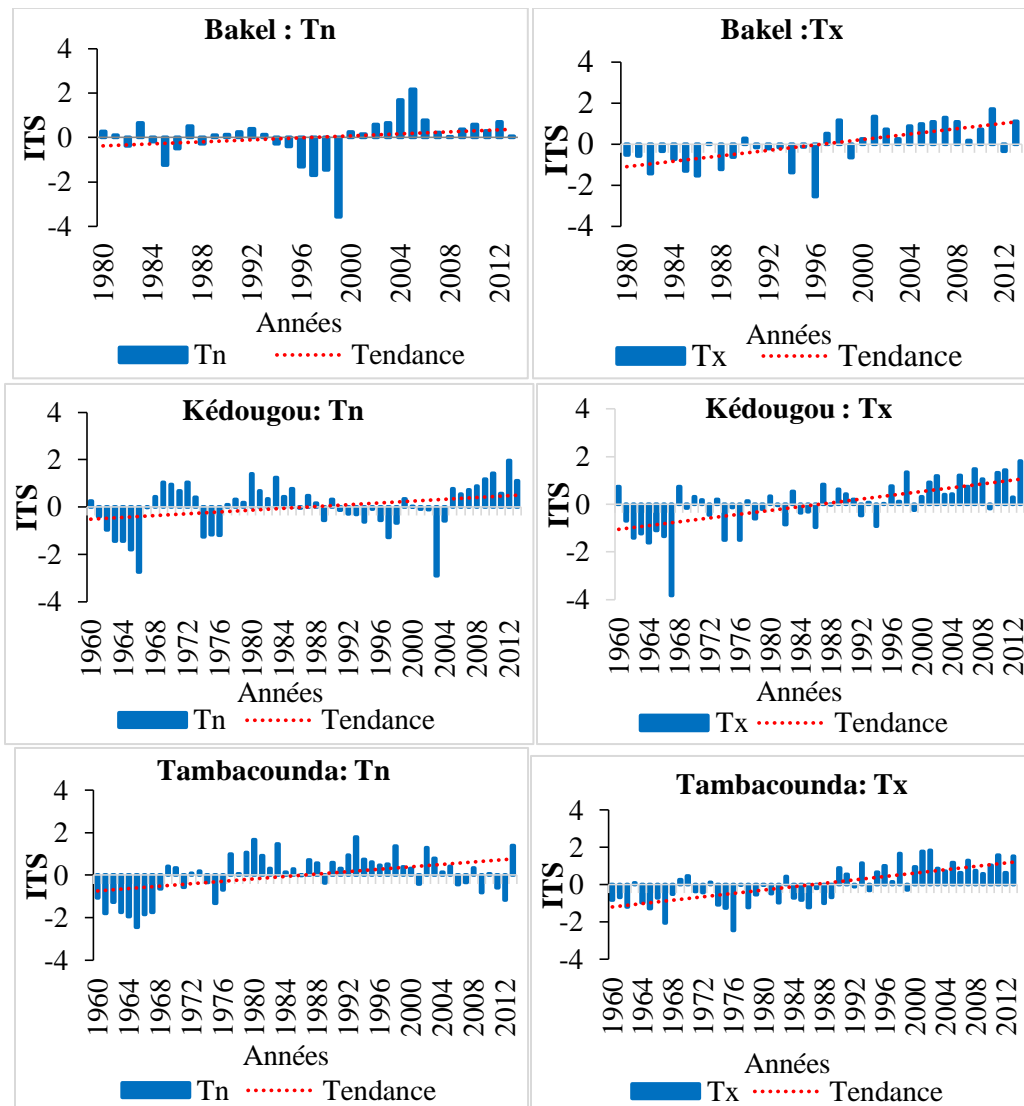


Figure 4:- Evolution de l'Indice des Températures minimales et maximales Standardisées de Bakel (1980-2013), de Tambacounda et de Kédougou (1960-2013).

Les deux variables étudiées (températures maximales et minimales) montrent une tendance générale à la hausse (figure 5). Le test de Pettitt (1979) révèle une absence de stationnarité des séries de températures dans toutes les trois stations. L'hypothèse nulle est rejetée à un seuil de 95 %.

A Bakel, une rupture positive a été observée en 1996 pour les températures maximales et en 1999 pour celles minimales soit un écart de 4 années. La moyenne des températures minimales, avant la date de rupture, était de 22,3 °C et celle après la rupture s'élevait à 23,7 °C. La différence entre les moyennes des maxima est estimée à 1,15 °C et de 1,37 °C pour les minima (figure 5). Au niveau de la station de Tambacounda, la date de rupture des minima était plus précoce. Elle a été observée 14 ans avant que ne survienne celle des maxima (1989). La différence des moyennes entre les deux variables (maximales 0,92°C et minimales 1,03 °C) est faible malgré la durée de la séquence de hausse des minima. A Kédougou, le changement de tendance des températures minimales est récent ; il date de 2004 alors que celui des températures maximales a été observé en 1986 soit un intervalle de 19 années. Comme la station de Tambacounda, les températures ont faiblement évolué. Les moyennes maximales ont augmenté de 0,68 °C et celles minimales de 1,19 °C.

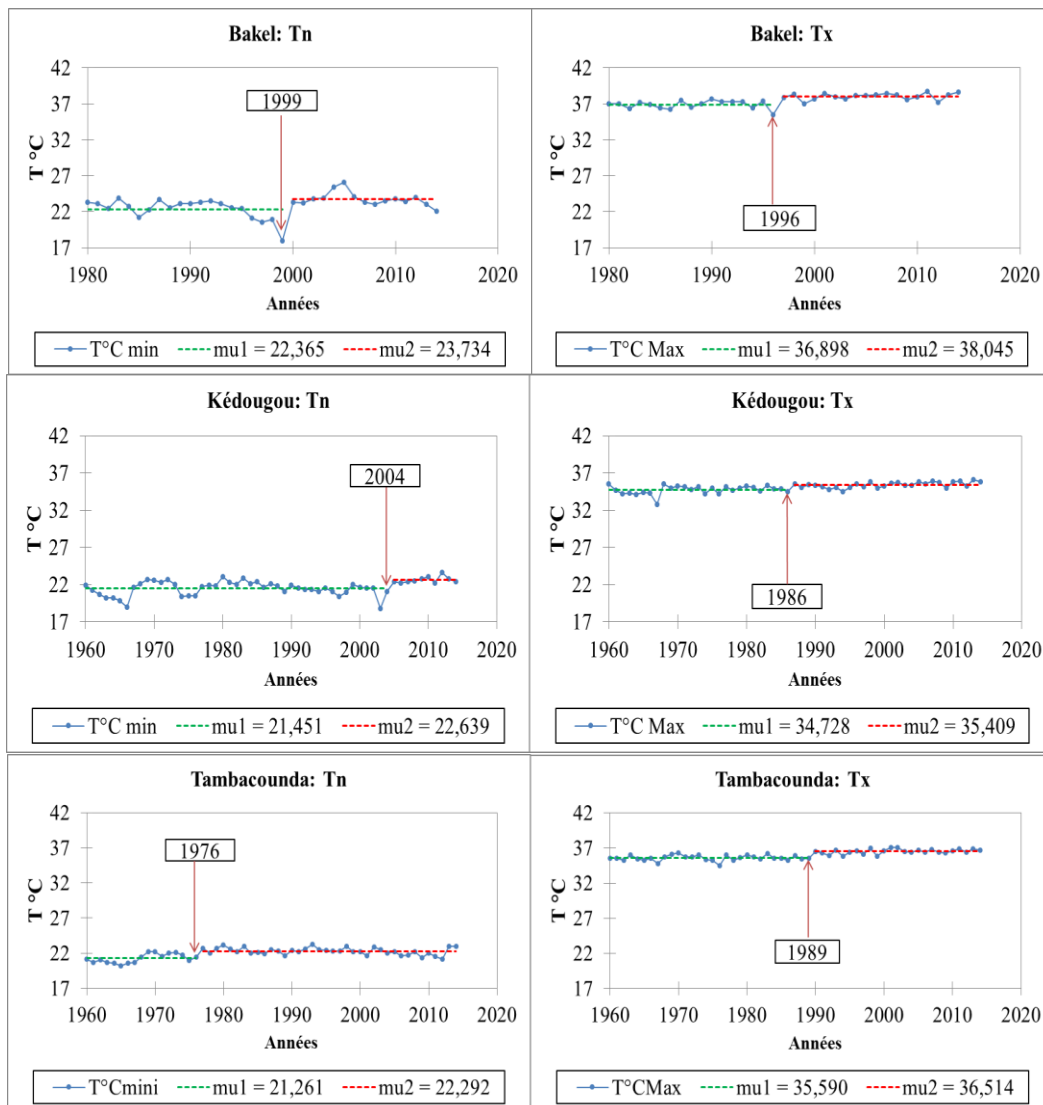


Figure 5:- Rupture dans l'évolution des températures moyennes minimales et maximales selon le test de Pettitt des stations de Bakel (1980-2013), de Kédougou et Tambacounda (1960-2013).

Évolution des températures mensuelles:-**Les températures maximales:-**

La station de Bakel, dont les données de températures ne remontent que jusqu'aux années 1980, n'est pas documentée dans cette partie. Le choix s'est porté sur les longues séries (plus de 50 ans).

Le tableau 3 donne une idée sur l'évolution mensuelle des températures maximales de 1961 à 2013 par rapport à la moyenne de la période 1961-1990. Deux périodes se distinguent : 1961-1989 et 1990-2013.

Pendant la première période, les températures étaient moins élevées dans les deux stations (Tambacounda et Kédougou). Cette phase est marquée par une alternance de baisse et de hausse des températures. Les années qui révèlent plus d'écart négatifs se concentrent entre 1961 et 1968. En effet, les mois les moins chauds s'étendent, pendant cette courte période, d'avril à décembre à Tambacounda et de décembre à février à Kédougou. En dehors de cette séquence, l'essentiel des écarts négatifs sont notés durant les mois de janvier, février, mars, juin, juillet août et décembre dans les deux stations. Nous relevons plus d'écart négatifs à Tambacounda qu'à Kédougou. Les années 1969, 1970, 1971, 1972 et 1973 qui sont marquées, dans le Sahel, par une baisse de la pluviométrie, révèlent aussi une hausse des températures dans la région pendant la saison non pluvieuse notamment aux mois de janvier, février, mars et avril et de 1970 à 1973 pour les mois de septembre, octobre et novembre. Cette hausse est observée encore de 1977 à 1979 pour janvier et février et de 1979 à 1984 au cours des mois de juillet, août, septembre, octobre et novembre.

De 1990 à 2013, les températures ont globalement augmenté. Elles sont partout supérieures à la moyenne de la période 1961-1990, à l'exception de quelques écarts négatifs relevés durant certains mois. En effet, les valeurs négatives sont plus importantes au sud de la région (Kédougou) que le centre et le nord (Tambacounda).

Néanmoins, le mois d'avril est naturellement chaud dans la région de Tambacounda. Il enregistre plus de valeurs positives que négatives de 1961 à 2013.

De 1961 à 1976, les températures minimales étaient majoritairement inférieures à la moyenne de la période 1961-1990. Tous les mois ont révélés des écarts négatifs de 1961 à 1968 et de 1974 à 1976. Une courte période de hausse des températures est relevée dans cette phase. Il s'agit de la séquence 1969-1973. Elle coïncide avec la grande sécheresse de la fin des années 1960 et le début des années 1970.

Contrairement à la première période, la deuxième (1977-2003) est marquée par une hausse globale des températures. Les écarts négatifs et nuls se situent pour la plupart dans le mois de janvier et dans la saison pluvieuse (de juin à octobre).

A partir de 2004, nous constatons une baisse continue des températures du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre. Cette baisse est aussi notée durant le mois de janvier de 2008 à 2013.

Contrairement à la station de Tambacounda, nous observons deux périodes de baisse et deux autres de hausse des températures minimales à Kédougou. Les phases de baisse sont 1961-1976 et 1989-2004 ; celles de hausse concernent 1977-1988 et 2005-2013.

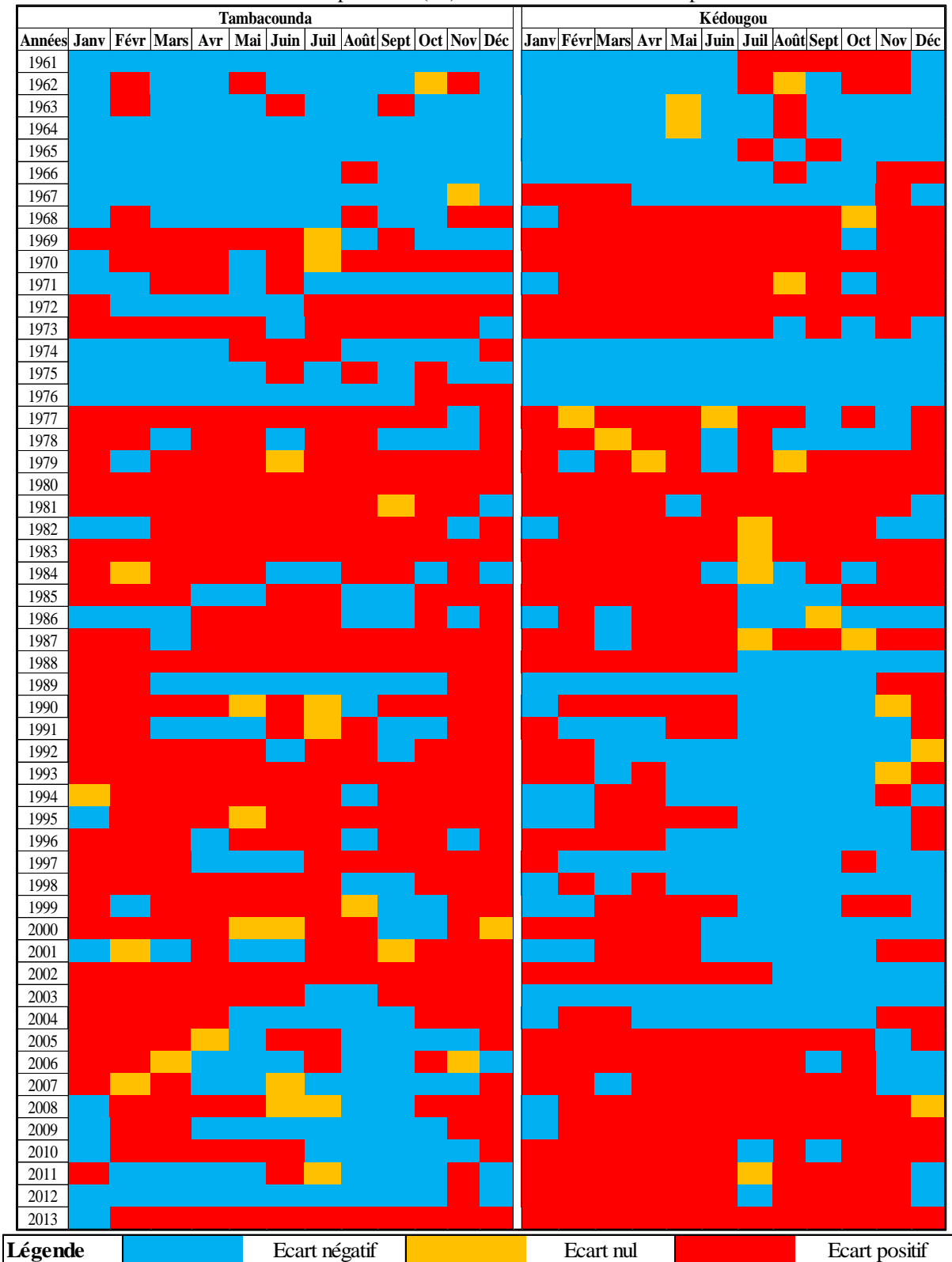
La période 1961-1976, comme à Tambacounda, était entrecoupée de séquence chaude. Cette dernière s'étire de 1968 à 1973, période marquant la rupture des pluies (selon le test de Pettitt 1979) dans cette station. Cette séquence est marquée par une augmentation des températures minimales durant tous les mois. En dehors de ces années de hausse, cette période est caractérisée par la dominance des écarts négatifs.

L'intervalle 1977-1988 est chaud. Les valeurs sont, en majorité, supérieures à la normale 1961-1990. En effet, les mois les plus chauds concernent principalement janvier, février, mars, avril, mai et juin. Les mois allant de juillet à décembre restent marqués par une alternance de hausse et de baisse des températures avec la prédominance d'écarts positifs.

La période 1989-2004 est marquée par une baisse notoire des températures minimales. Elle révèle plus d'écarts négatifs que positifs. Les valeurs supérieures à la moyenne 1961-1990 sont relevées majoritairement entre décembre et mai. Les mois de juillet, août, septembre et octobre étaient les plus froids de cette période.

La dernière période (2005-2013) est chaude. Les températures sont dans l'ensemble supérieures à la moyenne de référence (1961-1990) durant tous les mois. Quelques écarts négatifs et nuls sont enregistrés en novembre, décembre, janvier, mars, juillet et septembre.

Tableau 4:- Ecarts des températures (°C) minimales mensuelles à la période 1961-1990.



Tendances pluviométriques:- Cumuls annuels:-

La Région de Tambacounda, comme partout dans le reste du pays, est caractérisée par une grande variation de la pluviométrie. La représentation cartographique des isohyètes met bien en évidence cette variabilité pluviométrique. En effet, la normale 1931-1960 a coïncidé avec une pluviométrie abondante au Sénégal (Ndong 1996). Le centre et le sud de la région est occupé par l'isohyète 1050 mm (figure 6). La normale 1961-1990, contrairement à la précédente, était moins pluvieuse. Les isohyètes ont toutes migré vers le sud avec la disparition de celle de 1050 mm du territoire régional. Si les courbes 600 mm et 750 mm se sont légèrement déplacées par rapport aux précédentes, la courbe 900 mm a largement décliné vers le sud.

Pour la décennie 1951-1960, comme la normale 1931-1960, est pluvieuse. L'isohyète 600 mm couvre le secteur de Bakel. La pluviométrie augmente progressivement du nord vers le sud. Elle atteint des proportions de 750 mm au sud de Goudiry, 900 mm au nord de Sadatou avant de plafonner à l'isohyète 1050 mm au sud de Dialacoto. La décennie 1961-1970 s'est révélée aussi pluvieuse, malgré le léger basculement des isohyètes 900 mm et 1050 mm au sud. La période 1971-1980 est moins pluvieuse. Ce déficit pluviométrique est mis en exergue par le basculement méridionale des isohyètes avec la disparition totale de celle de 1050 mm du territoire régional. Si la sécheresse a débuté dans la zone sahélienne en 1968 (Ndong 1996), elle s'est manifestée dans la zone soudanienne pendant la décennie 1971-1980. L'isohyète 600 mm se trouve totalement au sud de celles des deux normales. La situation de 1981-1990 est beaucoup plus alarmante. L'isohyète 600 mm décale de manière notable au sud pour recouvrir le nord et le Nord-est de Goudiry. L'isohyète 750 mm occupe les 2/3 du territoire régional pendant cette période. Une légère remontée des isohyètes est notée pendant la période 1991-2000. Cette remontée est matérialisée par le retour de l'isohyète 1050 mm. L'isohyète 600 mm remonte légèrement pour se confondre avec celle de la normale 1931-1960. Au sud, la courbe 1000 mm décale vers le nord tandis que celle de 1050 se confine à l'extrémité sud de la région. Enfin pendant la décennie 2001-2010, nous constatons un retour pluviométrique assez important. Moins pluvieuse que la normale 1931-1960, cette période est mieux arrosée que celle de 1961-1990.

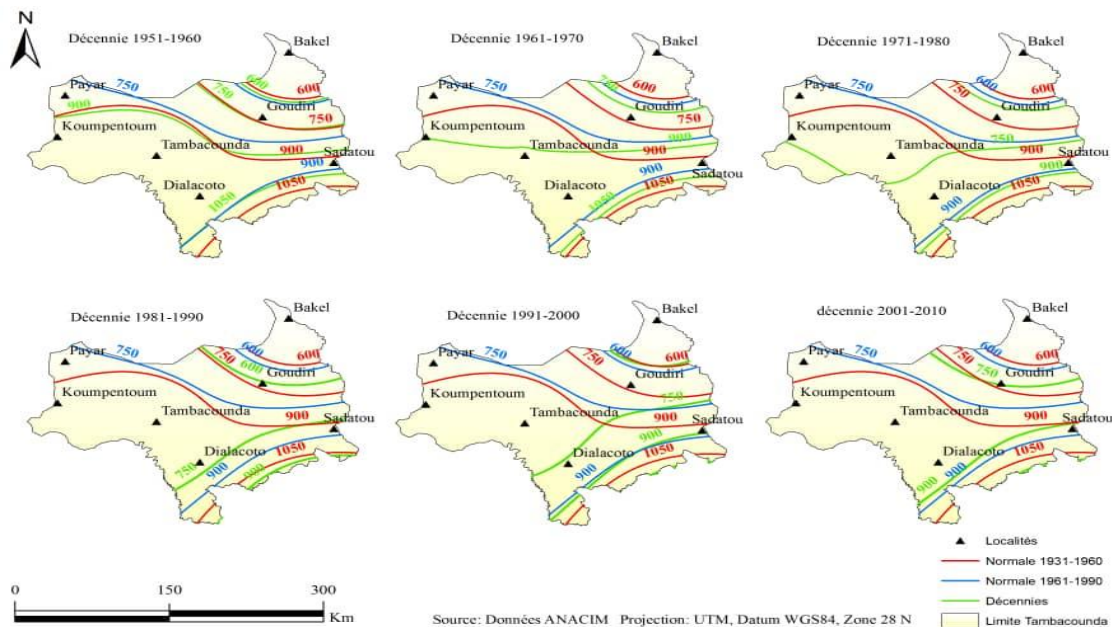


Figure 6:- Evolution spatiale des moyennes décennales pluviométriques de la région de Tambacounda (Faye et al. 2018).

Pour caractériser les années sèches et les années humides, nous nous sommes appuyés sur le calcul de l'Indice Standardisé de Précipitations (IPS) pour l'ensemble des stations et postes retenus. Le calcul de l'IPS et la comparaison des résultats par rapport aux valeurs indiciaires ont permis de déterminer la fréquence des années sèches, normales et celles humides pour chaque station et poste. Ainsi, il ressort de l'analyse du tableau 5 que la fréquence des années sèches oscille entre 10,9 % à Bakel et 18,8% Tambacounda; et celle des années humides varie entre 18,8 % à Bakel et 10,9 % à Kédougou. Les fréquences extrêmes (EH et ES) sont moins importantes pour

l'ensemble des stations. La fréquence humide la plus élevée est notée à Koumpentoum avec 5,7 % suivi de Kidira (4,7 %) ; tandis que celle extrêmement sèche se plafonne à 3,1 % dans la station de Bakel. Les sécheresses modérées évoluent irrégulièrement d'une station à une autre. Elles s'intercalent entre 4,7 % à Bakel et 12,5 % à Tambacounda alors que les humidités modérées varient de 12,5 % à Bakel et 3,8 % à Koumpentoum.

Tableau 5:- Fréquence (en %) des classes de l'IPS pour 6 stations climatiques sénégalaises de la région de Tambacounda.

Stations	Humidité			PN	Sécheresse			% années humides	% années sèches
	EH	TH	MH		MS	TS	ES		
Bakel	1,6	4,7	12,5	70,3	4,7	3,1	3,1	18,8	10,9
Tambacounda	3,1	4,7	10,9	62,5	12,5	6,3	0	18,7	18,8
Kédougou	3,1	3,1	4,7	76,6	7,8	4,7	0	10,9	12,5
Kidira	4,7	1,6	7,8	71,9	9,4	3,1	1,6	14,1	14,1
Koumpentoum	5,7	1,9	3,8	75,5	9,4	1,9	1,8	11,4	13,1
Goudiry	1,9	3,8	9,4	67,9	11,3	3,8	1,9	15,1	17

(EH = Extrêmement Humide ; TH = Très Humide ; MH = Modérément Humide ; PN = Proche de la Normale ; MS = Modérément Sec ; TS = Très Sec ; ES = Extrêmement Sec).

L'analyse de la pluviométrie à partir de l'IPS montre une discordance dans l'évolution selon les stations (figure 7).

Les décennies 1951-1960 et 1961-1970 se révèlent pluvieuses pour les stations de Tambacounda, Kédougou et Kidira mais elles sont déficitaires pour Bakel surtout pendant la première décennie. La période 1961-1970 amorce un nouvel épisode des précipitations dans cette station. Les totaux pluviométriques annuels augmentent occasionnant ainsi la succession des années humides. Dans les stations de Kédougou, Kidira et Tambacounda, la majorité des années présente un IPS positif avec parfois des extrêmes. Ainsi, nous relevons une année extrêmement humide à Kédougou (1954), deux années à Tambacounda (1956 et 1964) et deux années à Kidira (1951 et 1961). A Koumpentoum et à Goudiry la décennie 1961-1970 est modérément humide.

Les décennies 1971-1980, 1981-1990 et 1991-2000 ont véritablement fluctué pour l'ensemble des stations. Les hauteurs de pluies ont considérablement chuté pendant cette période entraînant des sécheresses extrêmes dans certaines stations comme Bakel, Kidira, Koumpentoum et Goudiry.

De 2001 à 2010, les valeurs de l'indice se redressent lentement alternant quelques fois des années sèches et des années humides. A Bakel, l'IPS est devenu de plus en plus significatif mais il est fortement variable pour les autres stations. A l'exception de Bakel, il est partout sec en début de période passant de sécheresse modérée à normale.

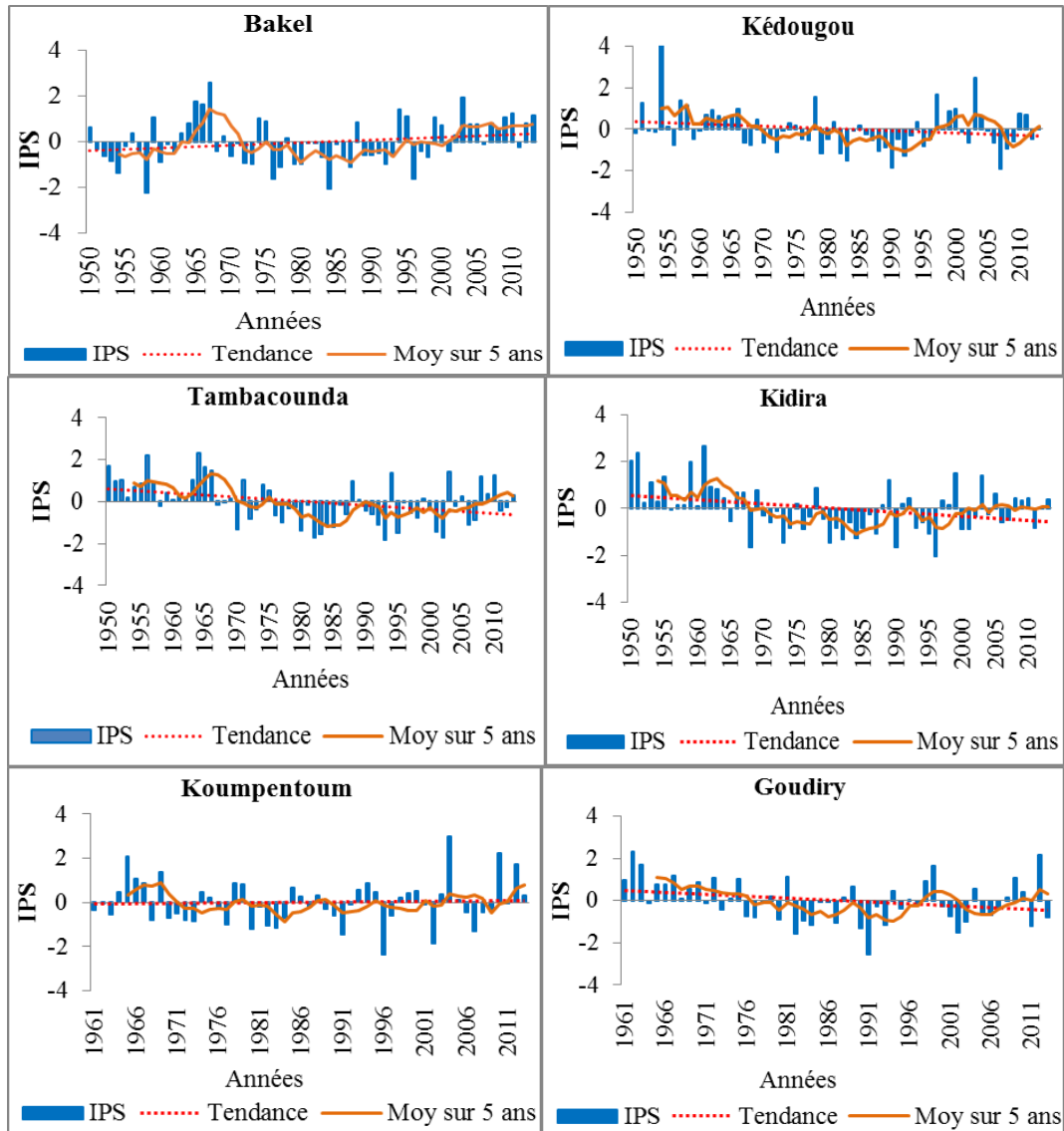


Figure 7:- Evolution de l'Indice Pluviométrique Standardisé de Bakel, Kédougou, Tambacounda et Kidira (1950-2013), de Koumpentoum et Goudiry (1961-2013).

L'application du test de Pettitt (1979) aux séries chronologiques a montré, d'une manière générale, un changement dans l'évolution des données pluviométriques (figure 8). L'hypothèse nulle est rejetée à un seuil de 99 % pour Kidira et Tambacounda, 95 % pour Bakel, Goudiry et Kédougou. Par contre, elle est acceptée à 99 % pour Koumpentoum. A l'exception de la station de Bakel dont l'évolution pluviométrique est particulière, nous notons, dans les autres stations et postes, d'une rupture à une autre, une diminution de la moyenne. Cette situation de Bakel est, peut-être, liée à des problèmes techniques. Le poste de Kidira, pourtant proche de Bakel, révèle une phase de hausse des pluies en début de série et de baisse à la fin. Selon l'OMM, le réseau des pays sahéliers sont souvent confrontés à des problèmes de défaillance des instruments et des systèmes, insuffisance de la maintenance et de l'étalonnage, faiblesse des infrastructures de communication et le coût élevé de l'exploitation.

L'analyse des résultats du test de Pettitt permet de constater qu'en dehors du poste de Koumpentoum tous les postes et stations présentent des ruptures. En effet, cette absence de rupture n'est pas liée à la longueur de la série car le poste de Goudiry, situé légèrement plus au nord et qui présente la même longueur de série, a enregistré une rupture en 1975.

Les ruptures sont globalement situées entre la deuxième moitié des années 1960 et le début des années 1970. Ces observations sont en phase avec les résultats des travaux qui ont été effectués en Afrique Occidentale et dans le Sahel (Servat et al., 1997, 1999 ; Niang, 2008 ; Bodian, 2011).

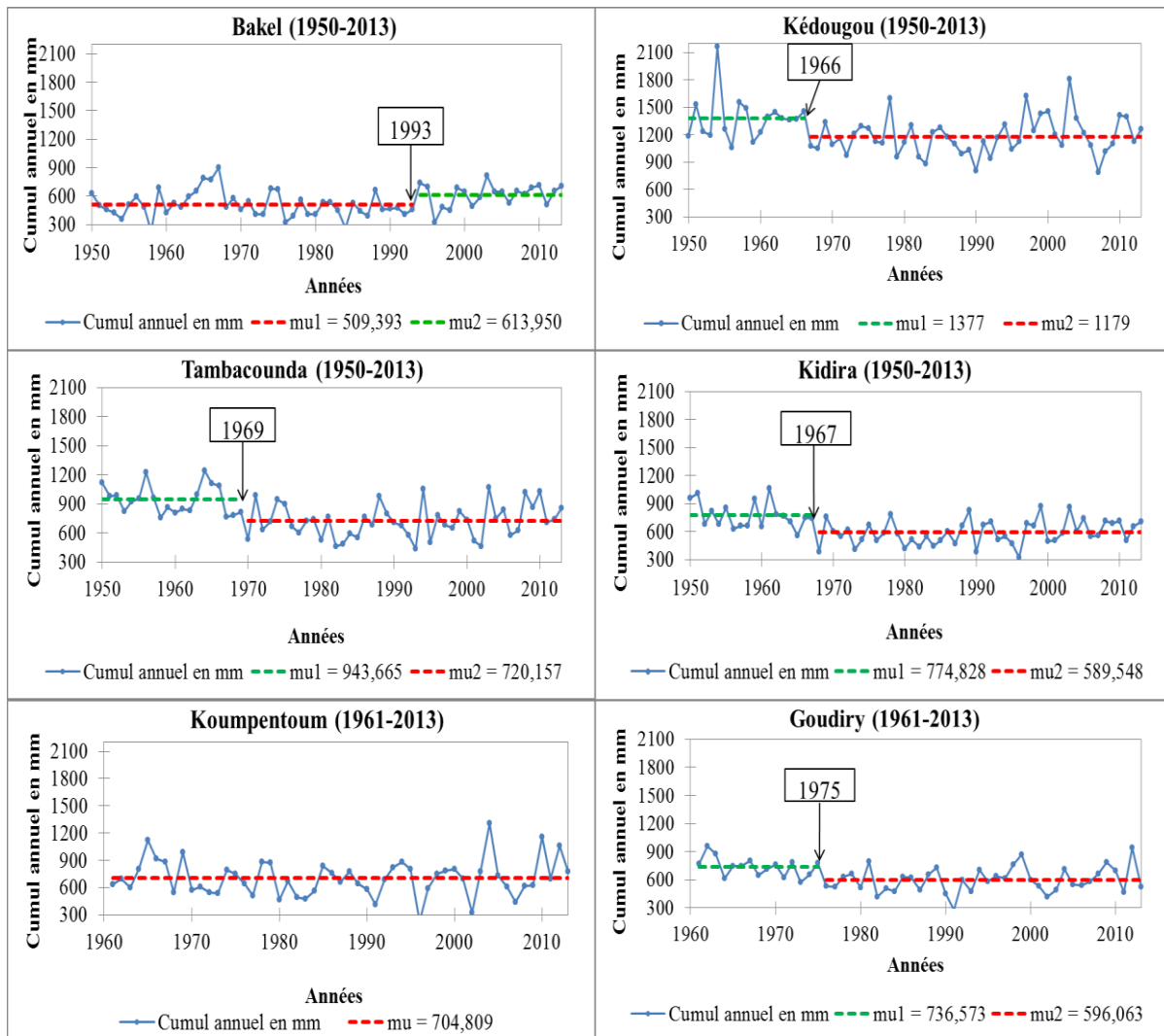


Figure 8:- Rupture dans l'évolution pluviométrique selon le test de Pettitt (1979).

Cumuls mensuels:-

Les écarts décennaux et mensuels de la pluviométrie par rapport à la période 1961-1990 montrent que la décennie 1961-1970 est la mieux arrosée (tableau 6). Les mois de juin et octobre sont très excédentaires (pluie supérieure à 120 %) à Bakel, Goudiry et Koumpentoum. A Kédougou et à Tambacounda, la pluviométrie est, pendant cette période, très excédentaire en octobre et excédentaire (supérieure à 110 %) en juin.

Les décennies 1971-1980, 1981-1990 et 1991-2000 sont marquées par une baisse des pluies. La sécheresse notée dans le Sahel pendant les années 1970 et 1980 n'a pas épargné cette partie du Sénégal même si elle n'a pas la même ampleur. Le mois de juin était très déficitaire au cours de la décennie 1971-1980, et déficitaire entre 1991-2000 à Bakel, déficitaire à Goudiry (1971-1980). Les chutes de pluie étaient aussi, pendant ce mois, inférieures à 90 % à Kédougou et à Tambacounda (1981-1990) et très faibles au cours de la décennie 1991-2000. Cette baisse de la pluie est constatée au mois juillet pendant la période 1981-2000 dans la station de Tambacounda. De grands déficits pluviométriques sont aussi relevés en octobre à Goudiry (1971-1980), et à Bakel, Koumpentoum et Tambacounda entre 1981-1990. Le mois d'août qui est considéré comme le plus pluvieux était déficitaire à Bakel et à Tambacounda pendant la période 1971-1980, à Goudiry et à Kédougou entre 1981 et 1990.

La dernière décennie reste caractérisée par une amélioration de la pluviométrie. Tous les mois de cette période enregistrent des volumes pluviométriques supérieurs à la moyenne de la période 1961-1990 sauf à Goudiry pour les mois de septembre et octobre. A Kédougou et à Koumpentoum, seul le mois d'octobre était déficitaire.

Tableau 6:- Ecart décennaux de la pluviométrie à la période 1961-1990 (en %).

Bakel						Goudiry					
Décennies	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Décennies	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
1961-1970	Très déficitaire	Très déficitaire	Excédentaire	Normale	Très déficitaire	1961-1970	Très déficitaire	Excédentaire	Excédentaire	Excédentaire	Très déficitaire
1971-1980	Très déficitaire	Excédentaire	Excédentaire	Normale	Normale	1971-1980	Excédentaire	Normale	Normale	Normale	Normale
1981-1990	Normale	Excédentaire	Normale	Normale	Très déficitaire	1981-1990	Normale	Excédentaire	Excédentaire	Très déficitaire	Très déficitaire
1991-2000	Excédentaire	Excédentaire	Normale	Très déficitaire	Normale	1991-2000	Normale	Très déficitaire	Normale	Normale	Normale
2001-2010	Normale	Excédentaire	Excédentaire	Très déficitaire	Très déficitaire	2001-2010	Normale	Normale	Excédentaire	Excédentaire	Très déficitaire

Kédougou						Koumpentoum					
Décennies	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Décennies	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
1961-1970	Normale	Normale	Normale	Excédentaire	Très déficitaire	1961-1970	Très déficitaire	Normale	Normale	Normale	Très déficitaire
1971-1980	Normale	Normale	Normale	Normale	Excédentaire	1971-1980	Excédentaire	Normale	Normale	Normale	Excédentaire
1981-1990	Excédentaire	Normale	Excédentaire	Excédentaire	Excédentaire	1981-1990	Normale	Normale	Normale	Très déficitaire	Très déficitaire
1991-2000	Normale	Normale	Normale	Normale	Excédentaire	1991-2000	Très déficitaire	Excédentaire	Très déficitaire	Excédentaire	Normale
2001-2010	Normale	Normale	Excédentaire	Normale	Excédentaire	2001-2010	Excédentaire	Très déficitaire	Très déficitaire	Excédentaire	Excédentaire

Tambacounda					
Décennies	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
1961-1970	Normale	Normale	Excédentaire	Très déficitaire	Très déficitaire
1971-1980	Normale	Excédentaire	Excédentaire	Excédentaire	Normale
1981-1990	Excédentaire	Excédentaire	Normale	Excédentaire	Très déficitaire
1991-2000	Très déficitaire	Excédentaire	Normale	Normale	Excédentaire
2001-2010	Normale	Normale	Normale	Normale	Excédentaire

Légende	Valeurs	Signification
■	$P \leq 70 \%$	Très déficitaire
■	$70 \% < P \leq 90 \%$	Déficitaire
■	$90 \% < P \leq 110 \%$	Normale
■	$110 \% < P \leq 120 \%$	Excédentaire
■	$P > 120 \%$	Très excédentaire

Discussion:-

Les températures sont élevées dans la région de Tambacounda malgré le faible contraste entre la partie septentrionale et celle méridionale. La saison sèche est, en effet, la plus chaude particulièrement les mois de mars, avril et mai. Les vents chauds et secs issus de l'anticyclone maghrébin appelé harmattan, en gagnant cette partie, favorisent les canicules. Pendant cette période, les maxima dépassent souvent 40 °C. Les basses valeurs sont notées pendant les mois de janvier et février et pendant la saison pluvieuse (de juin à octobre). L'arrivée de la mousson adoucit les températures qui peuvent descendre jusqu'à 27 °C en moyenne. Néanmoins, nous constatons un réchauffement durant ces dernières décennies. Les résultats du test de Pettitt et les anomalies standardisées montrent que les années en fin de séries sont les plus chaudes.

Dans la Région de Tambacounda comme partout dans le reste du pays, la variation du climat a entraîné un glissement des isohyètes du nord vers le sud. La péjoration pluviométrique amorcée depuis la fin des années 1960 a beaucoup affecté les volumes de pluies enregistrés dans cette partie. L'analyse des données a montré que les saisons pluvieuses des années 1950 et 1960 étaient humides. Les périodes 1970 et 1980, coïncidant avec la grande sécheresse qui avait frappé le Sahel, sont marquées par une baisse prononcée des pluies. Le mois d'août considéré comme le plus humide a accusé des déficits de plus de 50 mm par rapport à la moyenne 1961-1990 durant ces années.

La fin des années 1990 est marquée par une amélioration des quantités de pluie tombées. Cette évolution est mise en exergue par les moyennes décennales et les valeurs pluviométriques des mois de juillet, août et septembre. Toutefois, malgré ce retour timide des pluies à la fin des années 1990, la pluviométrie ne cesse de varier dans le temps et dans l'espace. La précarité des pluies en début et fin d'hivernage raccourcit la durée de la saison pluvieuse

et compromet les activités agricoles. Pendant certaines années, le volume pluviométrique enregistré en juin et en octobre est le résultat de quelques averses seulement. Selon Descroix et al. 2013 et 2015 ; Bodian, 2014, Kaboré et al. 2017, l'amélioration de la pluviométrie, notée depuis la fin des années 1990 et le début des années 2000, est due à une augmentation des événements pluvieux quotidiens de forte intensité. Ces résultats corroborent avec les projections du GIEC, 2007 qui prévoient une accentuation des phénomènes climatiques extrêmes durant les prochaines décennies. Les faibles cumuls annuels résultent, en effet, de la diminution du nombre d'événements pluvieux, de l'augmentation du nombre d'épisodes secs et une baisse des volumes d'eau des mois de juillet et août considérés comme les plus pluvieux (Sarr, 2011).

Néanmoins, malgré la péjoration pluviométrique constatée depuis 1968, Tambacounda reste parmi les régions les plus arrosées du pays. Cela est surtout dû à sa position géographique. Elle fait partie de la première zone de contact avec les flux de mousson et la dernière à en bénéficier. Les différentes analyses et les représentations cartographiques ont révélé une augmentation des pluies pendant les années 2000.

Conclusion:-

La péjoration climatique notée depuis les années 1970 dans le Sahel n'a pas épargné les régions soudaniennes du Sénégal. Cette modification du climat s'est manifestée dans la Région de Tambacounda par un basculement des isohyètes vers le sud entraînant ainsi la disparition de l'isohyète 1200 mm du territoire régional. L'application de l'IPS et du test de Pettitt 1979 met en exergue ce dérèglement climatique. En effet, la pluviométrie a considérablement fluctué depuis la deuxième moitié des années 1960. Des ruptures successives ont été notées dans l'ensemble des sites étudiés à l'exception du poste pluviométrique de Koumpentoum. Les décennies 1971-1980 et 1981-1990 ont été dans l'ensemble déficitaires. Néanmoins, la pluviométrie n'est pas la seule à fluctuer. Les températures ont aussi varié. Si la pluviométrie est marquée, depuis les années 2000, par une augmentation du volume, les températures quant à elles, sont caractérisées par une hausse. L'ITS révèle une augmentation de la chaleur dans l'ensemble de la région depuis la deuxième moitié des années 1980.

Il serait intéressant d'étudier, dans le futur, les débuts et fins d'hivernage, la durée et la fréquence des pauses pluviométriques pour mieux appréhender la variabilité pluviométrique dans cette partie du Sénégal. Cette étude permettra de mieux gérer les ressources en eau et d'aider les cultivateurs à s'adapter à la mutation du climat, particulièrement de la pluviométrie.

Bibliographie:-

1. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie. (2015) : Situation économique et sociale régionale de Tambacounda en 2013..Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), 126 p.
2. Amoussou, E., Totin Vodounon, S-H., Cledjo, F-P., Allagbe, Y.B.S., Akognongbe, J.S.A., Houndenou, C., Mahe, G., Camberlin, P., Boko, M. et Perard, J. (2016) : Evolution climatique du Bénin de 1950 à 2010 et son influence sur les eaux de surface. XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne – Besançon, 231-236.
3. Badjana, H.M., Hounkpe, K., Wala, K.P., Batawila, K., Akpagana, K. et Edjame, K.S. (2014) : Analyse de la variabilité temporelle et spatiale des séries climatiques du nord du Togo entre 1960 et 2010. European Scientific Journal, 10 (11), 257-275.
4. Baud, P., Bourgeat, S. et Bras, C. (2013) : Dictionnaire de géographie. Paris: Hatier, 607 p.
5. Bodian, A. (2011) : Approche par modélisation pluie-débit de la Connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du Fleuve Sénégal. Sénégal/Dakar: UCAD, Thèse de doctorat, 287 p.
6. Bodian, A. 2014 : Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Revue Physio-Géo, 8, 1, 297-312.
7. CILSS-AGRHYMET. (2010) : Le Sahel face aux changements climatiques: Enjeux pour un développement durable. Ouagadougou, Burkina Faso/Ouagadougou: CILSS-AGRHYMET, Bulletin mensuel, numéro spécial, 43 p.
8. Cuccia, C. (2008) : Changements climatiques observés en Bourgogne depuis 1961: études des variations de températures et de précipitations. Bourgogne: CRC-UB-CNRS-Météo France, 52p.
9. Descroix, L., Diongue-Niang, A., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G. et Diedhiou, A. (2013) : Evolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger Moyen (Sahel). Climatologie, 10, 37-49.

10. Descroix, L., Diongue-Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J.P. et Quantin, G. (2015) : Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : La Sénégalie et le bassin du Niger Moyen. *Climatologie*, 12, 25-43.
11. Djohy, G.L., Boï Wosso, E. et Kinzo, N.E. (2015) : Variabilité climatique et production cotonnière dans la Commune de Kandi au Nord-Bénin. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège: AIC, 325-330.
12. Faye, M., Fall, A., Faye, G. et Van Hecke, E. (2018) : La variabilité pluviométrique et ses incidences sur les rendements agricoles dans la région des Terres Neuves du Sénégal oriental. *Revue belge de géographie (Belgeo)*, 17 p.
13. Fossou, R.M.N., Lasm, T., Soro, N., Soro, T., Soro, G., De Lasme, O.Z., Baka, D., Onetie, O-Z. et Orou, R. (2015) : Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au centre-est de la COTE D'IVOIRE (Afrique de l'ouest). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°21, 97-120.
14. GIEC. (2001) : Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques. Rapport du groupe de travail I du GIEC. Contribution du Groupe de travail I au 3e Rapport d'évaluation du GIEC, Genève : GIEC, 97 p.
15. GIEC. (2007) : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II, III au 4e Rapport d'évaluation du GIEC. Equipe de rédaction principale, Pachauri R. K et Reisinger A., Genève, Suisse, 114 p.
16. Giuffrida, A. et Sansosti, G. (2011) : Manuel de météorologie: Un guide pour comprendre les phénomènes atmosphériques et climatiques. (Gremese, Éd.) Rome, Italie: Gremese, 140 p.
17. Hubert, P., Carbonnel, J.P. et Chaouche, A. (1989) : Segmentation des séries hydrométéorologiques – applications à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. of Hydrol.*, 110, 349-367.
18. Kaboré, P.N., Ouedraogo, A., Sanon, M., Yaka, P. et Somé, L. (2017) : Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. *Association Internationale de Climatologie*, 14, 82-95
19. Khoualdia, W., Djebbar, Y. et Hammar, Y. (2014) : Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de la Medjerda (Nord-Est algérien). *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 29, 6-23.
20. Lubes-Niel, H., Masson, J.M., Paturel, J.E. et 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. *Revue des sciences de l'eau*, 3, 383-408.
21. Mckee, T.B., Doesken, N.J. et Kleist J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the eighth conference on applied climatology*, Anaheim, California, Boston, American Meteorological Society, 179-184.
22. Ndong, J.B. (1996) : L'évolution du climat au Sénégal et les conséquences de la sécheresse récente sur l'environnement. Lyon: Université Lyon 3 Jean Moulin, Thèse de doctorat, 510p.
23. Ndong, J.B. (2015) : Evolution climatique récente sur le littoral sénégalais. *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, 4 (2), 151-168.
24. Niang, A.J. (2008) : Les processus morpho-dynamiques, indicateurs de l'état de la désertification dans le sud-ouest de la Mauritanie. Approche par analyse multi source. Thèse de 3ème cycle, Liège, France: Université de Liège, 277 p.
25. Pettit, A.N. (1979): A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, 2, 126-135.
26. Sagna, P. (2007) : Caractéristiques climatiques, in *Atlas du Sénégal*, Paris, éditions Jeune Afrique, 66-69.
27. Sarr, B., Kafando, L. et Atta, S. (2011) : Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. *International Journal of Biological and chemical sciences*, 5 (4), 1659-1675.
28. Sarr, M.A. (2008) : Variabilité pluviométrique en Afrique de l'ouest : dynamique des espaces végétaux à partir des images satellitales. Exemple du bassin versant du Ferlo (Sénégal). *Journées de Climatologie*, Nantes, Climat et société : Climat et végétation, 57-76.
29. Servat, E., Paturel, J.E., Lubes-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J.M., Travaglio, M. et Marieu, B. (1998) : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12, 2, 363-387.
30. UNEP. (2002): *Africa Environment Outlook - Past, present and future perspectives*, <http://www.grida.no/publications/other/aeo/?src=http://www.grida.no/aeo/french/031.htm>, 422 p.6.