

Étude de la variation des températures au Sénégal: cas des stations de Ziguinchor et de Kolda en Casamance (Sénégal)

[Study of temperature variation in Sénégal: case of the Ziguinchor and Kolda stations in Casamance (Senegal)]

Barnabé Ephrem A. Dieme¹, Ababacar Fall¹, Papa B. D. Thioune¹⁻², and El Hadji Bamba Diaw¹

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LaSTEE), Ecole Polytechnique de Thiès BPA 10 Thiès, Senegal

²Université Alioune DIOP de Bambey, Institut Supérieur Formation Agricole et Rural (ISFAR) BP 54, Bambey, Senegal

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The tropical world is experiencing an unprecedented climate crisis. This is most often approached from the angle of excess or scarcity of rain. Temperatures are relegated to the background. However, they play a major role in the balance of environments.

This article is a contribution on the phenomenon of climate change by focusing on thermal data. It puts in opposition a station close to the coast (Ziguinchor) and another more continental (Kolda). With simple tools (annual normal, seasonal and annual average, Pettitt and Mann-Kendal test), the recent thermal evolution of the study area was analyzed. This study shows an increase in temperatures since the 1970s, the existence of breaks and an increasing trend in the thermal series around the 1990s, but also a higher sensitivity of Ziguinchor to global warming.

KEYWORDS: Temperature, global warming, cool season, recent trend, Casamance.

RESUME: Le monde tropical vit une crise climatique sans précédent. Celle-ci est abordée le plus souvent sous l'angle de l'excès ou de la rareté des pluies. Les températures sont reléguées au second plan. Pourtant, elles jouent un rôle majeur dans l'équilibre naturel des milieux.

Cet article est une contribution sur le phénomène du changement climatique en s'intéressant aux données thermiques. Il met en opposition une station proche de la côte (Ziguinchor) et une autre plus continentale (Kolda). A travers différents paramètres statistiques (normale annuelle, saisonnière et moyenne annuelle, test de Pettitt et de Mann-Kendal), l'évolution thermique récente de la zone d'étude a été analysée. Il ressort de cette étude une hausse progressive des températures depuis les années 1970, l'existence de ruptures et d'une tendance à la hausse dans les séries thermiques autour des années 1990 mais aussi une plus forte sensibilité thermique de Ziguinchor au réchauffement climatique.

MOTS-CLEFS: Températures, réchauffement climatique, saison fraîche, tendance récente, Casamance.

1 INTRODUCTION

Le monde tropical est en proie à un bouleversement climatique sans précédent. En effet, en Afrique tropicale, les précipitations sont désormais marquées par leur irrégularité. Dans certaines régions, les pluies sont excédentaires et provoquent des inondations [1], dans d'autres, les sécheresses sont très sévères et catastrophiques [2], [3], [4].

Au même moment, les manifestations des litho-météores sous forme de brumes sèches sont de plus en plus intenses et récurrentes [1], [5]. Durant plusieurs jours consécutifs, l'atmosphère est remplie de particules de poussières même dans les régions peu sujettes à ce phénomène.

A cela s'ajoute les vagues de chaleur toujours plus intenses, plus longues et plus fréquentes dans le domaine soudano-sahélien [6]. Elles affectent la santé des populations les plus fragiles [6] mais aussi favorisent la disparition précoce des points d'eau temporaires par évaporation excessive tout en impactant négativement sur les disponibilités en eau de surface et sur les activités humaines [7]. Ce dérèglement climatique inquiète la communauté scientifique.

Ainsi, plusieurs travaux de recherche sont consacrés à ce phénomène. Le GIEC dans ses rapports s'est beaucoup investi sur l'évolution climat dans la période post-révolution industrielle. Les rapports de 1992 [8] et 2007 [9] mettent en évidence une hausse globale des températures. Celle-ci est chiffrée à +0,75°C à l'échelle mondiale, entre +3°C et 4°C en Afrique à l'horizon 2050 et 2100. A cet effet, le GIEC recommande de maintenir l'augmentation en dessous de +2°C pour atténuer les effets négatifs désormais inéluctables du réchauffement climatique [8], [9].

Dans le contexte du Sénégal, des publications ont mis en évidence la conformité des variations climatiques en rapport avec les scénarii du GIEC [1]. Dans le même ordre d'idées, elles révèlent que la Haute Casamance subit encore des péjorations climatiques majeures. Elles ont mis en rapport le changement climatique et la dégradation des ressources forestières [10]. Ce phénomène du changement climatique menace directement les potentialités agricoles, halieutiques et touristiques de la région naturelle de la Casamance [11].

De façon plus spécifique, [7] a travaillé sur l'évolution des températures sur le littoral Sénégalais entre Saint Louis au nord-ouest et Ziguinchor au sud-ouest en passant par Dakar, Mbour et Fatick sur la période 1951-2010. Il conclue que chaque année est plus chaude que la précédente et que tous les mois sont affectés par le réchauffement.

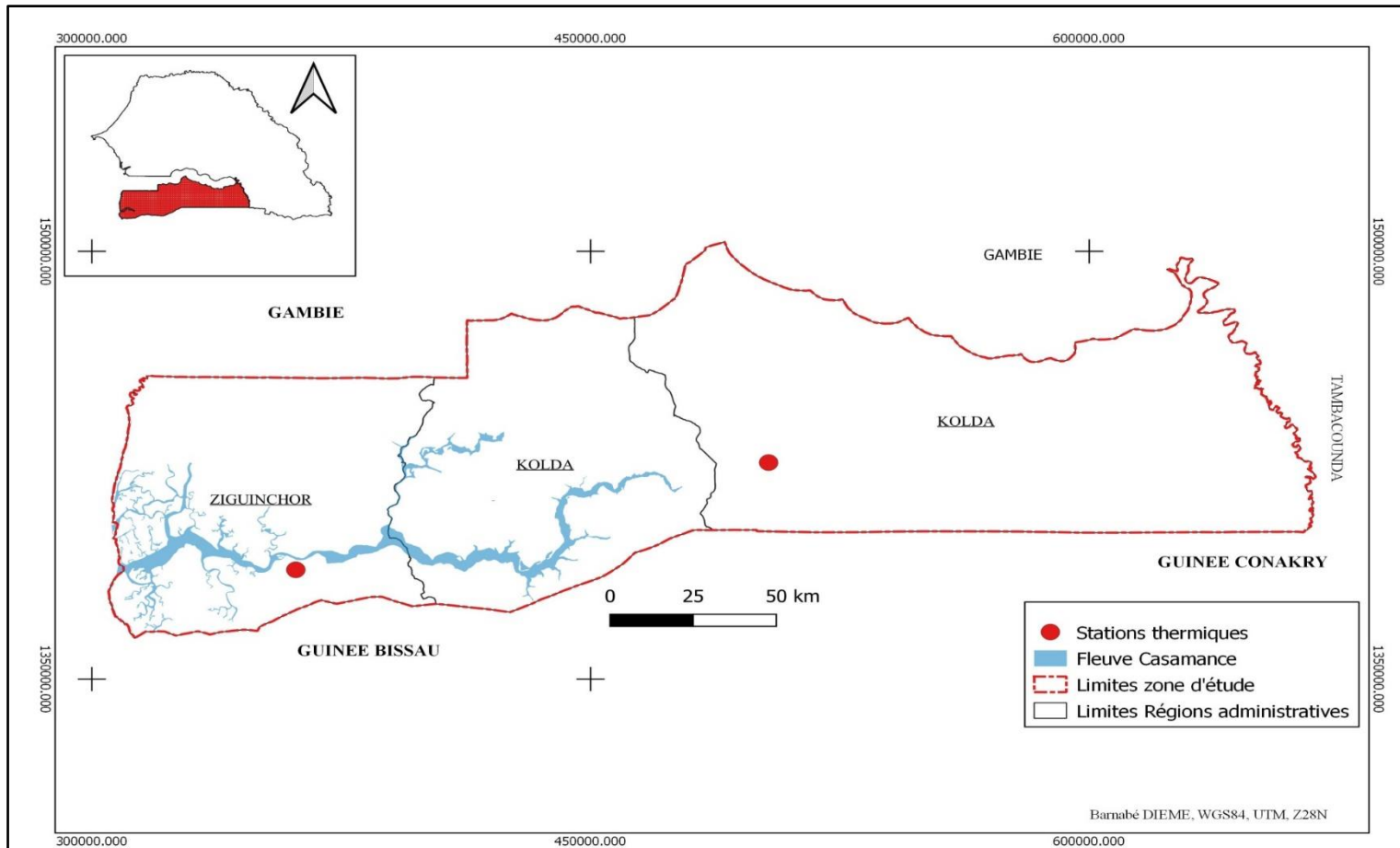
Enfin, les travaux de [12] à Sédhiou (Moyenne Casamance) introduisent l'usage de données satellitaires pour l'étude du climat. Ils prévoient certes une amélioration des pluies mais aussi une hausse des températures surtout durant la saison sèche.

Ces péjorations climatiques sont souvent abordées sous le prisme de la réduction des précipitations et du ruissellement. L'étude des températures est reléguée au second plan. Or, celles-ci constituent un facteur important dans le fonctionnement des milieux. Leur variation positive ou négative peut impacter dans un sens ou un autre sur l'équilibre des milieux, la vulnérabilité des populations et des économies. Cette variation des températures est mal connue à l'échelle locale. Elle commence seulement à faire l'objet d'une étude approfondie. C'est pourquoi, cette étude s'intéresse à l'évolution des températures en Casamance sur la période 1971-2018. Elle a pour objectif de quantifier et de déceler les tendances récentes du réchauffement climatique en Casamance. Sa particularité repose sur la mise en relief des stations côtières et continentales.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Casamance naturelle est la région la plus australe du Sénégal. Elle est limitée au nord par la Gambie, au sud par les deux Guinées, l'Océan Atlantique et la rivière Koulontou constituent respectivement ses frontières ouest et est. Elle représente le septième du territoire sénégalais. Aujourd'hui, elle est constituée de trois circonscriptions administratives que sont Ziguinchor (Basse Casamance) à l'ouest, Sédhiou (Moyenne Casamance) au centre et de Kolda (Haute Casamance) à l'est. Cette région est caractérisée par un climat soudanien. Les deux stations météorologiques qu'elle abrite feront l'objet de cette étude. Elles sont situées à Ziguinchor et à Kolda soit distante de 196 km l'une de l'autre. La région de Sédhiou ne dispose pas d'une station de mesure de la température.



Carte 1: Délimitation de la zone d'étude

2.2 DONNÉES ET MÉTHODES

Les données utilisées dans cette étude proviennent de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal (ANACIM). Elles concernent les stations de Ziguinchor et de Kolda. Elles sont les seules à relever les variations thermiques dans toute la Casamance. Les températures maximales et minimales mensuelles ont été exploitées sur la période 1971-2018. Le traitement statistique des données de température est effectué avec le tableur Microsoft Excel.

La caractérisation du profil thermique des deux stations est effectuée aux échelles temporelles annuelles saisonnières et mensuelles.

A l'échelle annuelle, trois indicateurs sont mis à contribution. D'abord, l'écart à la normale de référence 1961-1990 a permis de suivre l'évolution des températures moyennes annuelles sur la période 1971-2018. Ensuite, le calcul de la moyenne 1971-2018 a servi de base de comparaison avec les 4 dernières décennales (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010) et la moyenne des 8 dernières années de la série (2011-2018). Cette démarche a mis en évidence les décennies et les années les plus chaudes de la période 1971-2018. Enfin, la détection des ruptures et les tendances dans les séries annuelles a nécessité l'usage des tests de Pettitt et de Mann-Kendall.

A l'échelle mensuelle, l'année est divisée en deux saisons thermiques, l'une « fraîche » couvrant les mois de novembre à mars (NDJFM) et l'autre « chaude » entre avril-octobre (AMJJASO). Le calcul des normales saisonnières a permis de constater les variations saisonnières des températures.

Puis les températures maximales, minimales, moyennes et l'amplitude thermique des 8 dernières saisons (2011-2018) sont comparées avec les normales mensuelles 1981-2010. Ce procédé a donné une idée de la situation de chaque mois. Enfin, l'application des tests de Pettitt et de Mann-Kendall ont aidé à mettre en évidence l'existence de rupture ou de tendance pour chaque mois.

3 RÉSULTATS

L'application de la méthodologie définie précédemment a permis d'obtenir des résultats intéressants. Ils montrent une augmentation des températures à Ziguinchor et à Kolda.

3.1 UNE HAUSSE GÉNÉRALISÉE DES TEMPÉRATURES

Dans la zone tropicale, les pluies et les variations thermiques sont les éléments qui caractérisent le climat. Leur variation positive ou négative est un facteur majeur dans l'équilibre des écosystèmes. Actuellement, l'accent est mis sur les pluies. Pourtant, les températures connaissent des variations importantes dans le temps et dans l'espace avec en toile de fond une tendance au réchauffement climatique.

3.1.1 UNE VARIABILITÉ INTERANNUELLE DES TEMPÉRATURES MOYENNES

La Casamance est caractérisée par de fortes températures toute l'année. La température moyenne, calculée sur la période 1971-2018, est de 27, 9°C à Ziguinchor et 28, 2°C à Kolda. Cette chaleur permanente n'empêche pas de déceler des températures plus fortes que d'habitude. La **Figure 1** présente l'évolution interannuelle des températures moyennes à Ziguinchor et à Kolda sur la période 1971-2018 comparée à la normale de référence 1961-1990. Son analyse révèle deux choses. D'une part, les températures augmentent depuis le début des années 1970. En effet, elles passent de -0, 6°C à +2, 8°C et de -0, 6°C à 1, 7°C, respectivement à Ziguinchor et à Kolda. L'écart négatif au départ devient positif après 1979.

D'autre part, le graphique montre une évolution des températures moyennes relativement synchrones dans les deux localités. Entre 1971 et 1983, les températures moyennes sont majoritairement en dessous de la normale de référence (1961-1990). De 1984 à 2004, celles-ci sont légèrement supérieures à la normale sans dépasser +1°C. A partir de 2005, les valeurs dépassent largement le degré Celsius (>+1°C). L'augmentation durant la dernière séquence est plus intense à Ziguinchor. L'écart atteint +1, 9°C en 2005, +2, 1°C en 2010 et 2012 et +2, 8°C en 2016. L'écart maximum ne dépasse pas +1, 7°C à Kolda. Au vue de ce graphique, la température est en constante augmentation depuis 1971.

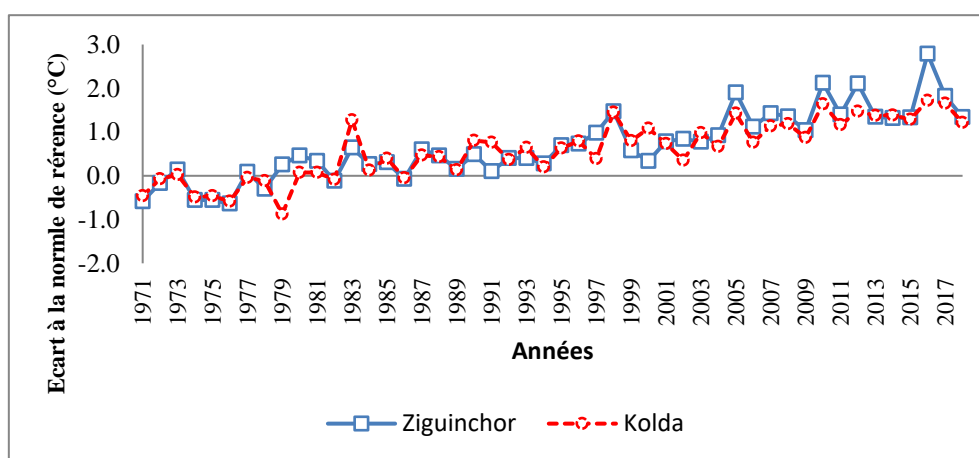


Fig. 1. Évolution des écarts à la normale 1961-1990 des températures moyennes de Ziguinchor et de Kolda de 1971 à 2018

3.1.2 DES DÉCENNIES SUCCESSIVES DE PLUS EN PLUS CHAUDES

La **Figure 2** représente l'évolution décennale des moyennes annuelles. Elles sont comparées à la moyenne de 1971-2018 (Ziguinchor: 27, 9°C; Kolda: 28, 2°C). Chaque décennie est plus chaude que la précédente. A Ziguinchor (28, 3°C) comme à Kolda (28, 6°C), la décennie 2001-2010 est la plus chaude de toutes. La différence avec la moyenne de la période 1971-2018 est de +0, 4°C pour Ziguinchor et +0, 2°C pour Kolda.

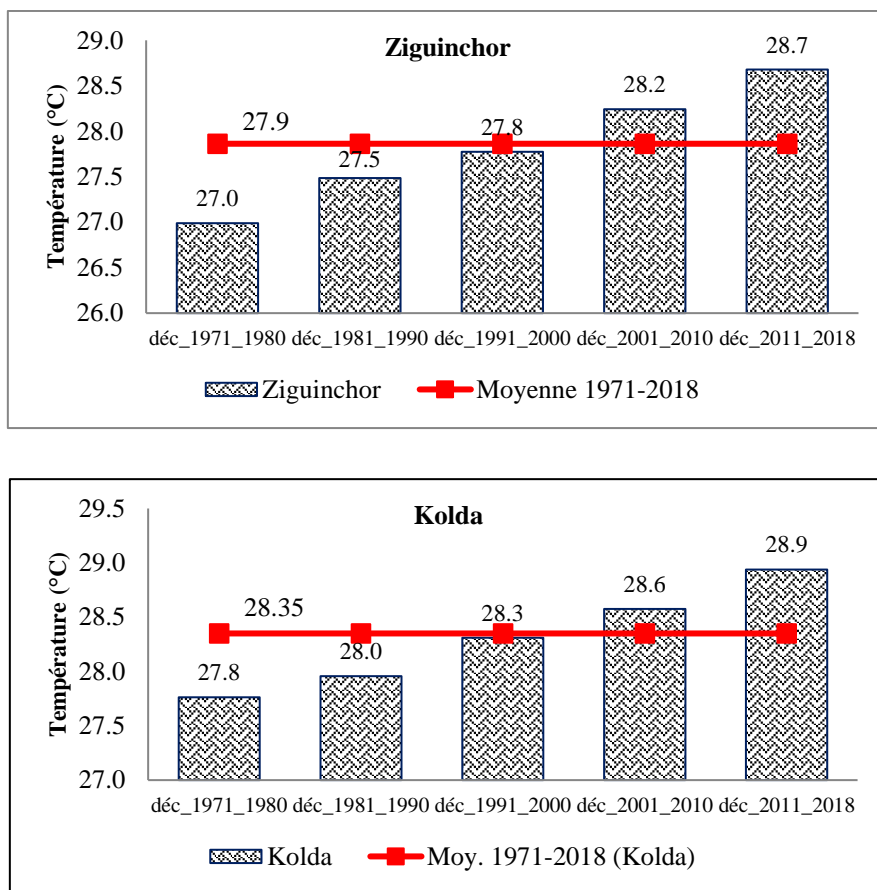


Fig. 2. Évolution décennale des températures moyennes annuelles

Le **Tableau 1** illustre parfaitement ce renversement thermique. Ainsi, durant les premières décennies (1971-1980; 1981-1990), toutes les valeurs sont globalement inférieures à la moyenne de la période 1971-2018 à Ziguinchor et à Kolda. C'est une période que nous qualifions de « fraîche ». Par contre à partir de la décennie 1991-2000, la situation s'inverse progressivement. Dans la décennie 2001-2010, 9 années sur 10 sont supérieures à la moyenne 1971-2018 à Ziguinchor et à Kolda. Cette période plus « chaude » que la précédente.

Tableau 1. Rapport années chaudes/années fraîches par décennie

	Moyenne (1980-2015)	Nombre d'années \geq moyenne	Nombre d'années $<$ moyenne
Ziguinchor	27,86279167		
Déc_1971_1980		0	10
Déc_1981_1990		0	10
Déc_1991_2000		6	6
Déc_2001_2010		9	1
Kolda	28,29516493		
Déc_1971_1980		0	10
Déc_1981_1990		2	8
Déc_1991_2000		7	3
Déc_2001_2010		9	1

Le **Tableau 2** présente un classement des 10 années les plus chaudes de la période 1971-2018. A Ziguinchor, l'année 2010 est la plus chaude avec un écart de +1,4°C suivi de de 2005 (+1,2°C), de 2007 (+0,7°C), 2008 (+0,6°C), de 2006 (+0,4°C), 2004 (+0,2°C) et 2002 (+0,1°C). Elles sont toutes situées dans la dernière décennie (2001-2010) soit 8 années sur 10 les plus chaudes de la période.

La situation de ville de Kolda est plus contrastée. Elle partage avec Ziguinchor les années 2010 (+0, 9°C) et 2008 (0, 5°C) respectivement 1^{ère} et 4^{ème} années les plus chaudes des 4 dernières décennies. Sur toute la période, seules 4 années sur les 10 les plus chaudes ne sont de la décennie 2001-2010. Il s’agit de 1998 (+0, 8°C), 1983 (+0, 6°C), 2000 (+0, 4°C) et 1990 (+0, 1°C).

Tableau 2. Les dix années les plus chaudes dans les stations de Ziguinchor et de Kolda sur la période 1971-2018

Rang	Années	T°C (Ziguinchor)	Années	T°C (Kolda)
1	2010	1, 4	2010	0, 9
2	2005	1, 2	1998	0, 8
3	1998	0, 8	2005	0, 7
4	2007	0, 7	1983	0, 6
5	2008	0, 6	2008	0, 5
6	2006	0, 4	2007	0, 4
7	2009	0, 3	2000	0, 4
8	1997	0, 3	2003	0, 3
9	2004	0, 2	2009	0, 2
10	2002	0, 1	1990	0, 1

3.1.3 LE TOURNANT DES ANNÉES 1990 ET LES TENDANCES RÉCENTES

Nous avons procédé à la détection des ruptures et tendances dans les différentes séries grâce aux tests de Pettitt et de Mann-Kendall [13].

Ces tests non paramétriques s’appuient sur une hypothèse nulle notée H0 et une hypothèse Ha. La confirmation de H0 est synonyme d’absence d’effet ou de rupture. Par contre, le rejet de cette hypothèse révèle l’existence d’une rupture ou d’une tendance.

La p-value permet d’adhérer à l’une ou l’autre hypothèse. Si celle-ci est inférieure à la valeur seuil $\alpha = 0, 05$, l’hypothèse nulle (H0) est rejetée car le risque de se tromper en la rejetant est très faible. Les deux tests s’écrivent ainsi:

Test de Pettitt

$$U(t) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{signe}(x_i - x_j)$$

T = max { |U (t) |, t=1...n }

Variante:

$$K = \max \left\{ \left| \frac{u(t)}{\sqrt{nt - t^2}} \right|, t = 1 \dots n \right\}$$

Notation

La fonction signe est définie comme suit

Signe: $\Re \rightarrow \Re$

$\forall x \in \Re, x \rightarrow \text{signe}(x)$

Telle que $\begin{cases} \forall x > 0, \text{signe}(x) = 1 \\ x = 0, \text{signe}(x) = 0 \\ \forall x < 0, \text{signe}(x) = -1 \end{cases}$

Calcul de la probabilité p, probabilité de dépassement de la valeur k prise par la statistique T du test sur la série observée.

P = T (T ≥ k) = 2exp ($\frac{-6k^2}{T^3+T^2}$) si $p < \alpha$ alors l’hypothèse nulle est rejetée

En ce qui concerne la statistique K, « p » peut être calculé à l’aide de la méthode du bootstrap.

Source: [14]

Test de Mann-Kendall

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}[(y_j - y_i)(x_j - x_i)]$$

Où la fonction sgn est définie par:

$\text{Sgn}(X) = 1$ pour $X > 0$;

$\text{Sgn}(X) = 0$ pour $X = 0$

Et $\text{sgn}(X) = -1$ pour $X < 0$

Mann (1945 et Kendall (1975) ont démontré que

$E(S) = 0$

$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$

Dès que l'échantillon contient une dizaine de données, la loi de la statistique de test 2 ci-dessous peut être approché par une progression gaussienne centrée-réduite

$$Z = \frac{S - 1}{\text{Var}(S)^{\frac{1}{2}}} \text{ si } S > 0$$

$Z = 0$ si $S = 0$

$$Z = \frac{S + 1}{\text{Var}(S)^{\frac{1}{2}}} \text{ si } S < 0$$

S'il y a des ex-aequo dans la série, la variance de S est corrigée de la façon suivante:

$$\text{Var}(S) = 1/18 [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g tp(p-1)(2p+5)]$$

Où tp est le nombre d'égalités impliquant p valeurs.

Source: [14]

L'application de ce test sur les séries thermiques maximales, minimales et moyennes a permis de d'établir le **Tableau 3**. Les séries de Ziguinchor présentent toutes des ruptures. Elles interviennent en 1994 pour les températures minimales et moyennes annuelles (**Figure 3**). La rupture est plus tardive pour les températures maximales annuelles car intervenant en 1995.

Le test de Mann-Kendall est révélateur de l'existence d'une tendance. Celle-ci est à la hausse car la valeur τ de Mann-Kendall est positif c'est-à-dire 0,7 pour les températures minimales et moyennes et 0,6°C pour les températures maximales. La pente de Sen est relativement forte (0,04).

Pour Kolda (**Tableau 3**), la rupture est plus précoce. Elle intervient dès 1982 pour les températures minimales. Ce qui n'est pas le cas pour les températures maximales et moyennes (**Tableau 3**) dont les ruptures interviennent respectivement en 1994 et 1995. L'analyse du test de Mann-Kendal révèle une tendance positive avec 0,5°C pour les températures minimales et 0,6 pour les températures maximales et moyennes et une pente de Sen compris entre 0,03 et 0,04 (**Tableau 3**).

De façon générale, il existe une rupture dans les séries selon le test de Pettitt (**Figure 3**) et une tendance à la hausse qui est plus remarquable à Ziguinchor (τ de Mann-Kendall $> 0,6$) qu'à Kolda (τ de Mann-Kendall $< 0,6$).

Tableau 3. Rupture et tendance dans les séries thermiques moyennes annuelles à Ziguinchor et à Kolda

Ziguinchor			
	T°C min	T°C max	T°C moy
Test de Man-Kendal			
T Man-Kendall	0, 7	0, 6	0, 7
Pente de Sen	0, 04	0, 04	0, 04
P-value	< 0, 0001	< 0, 0001	< 0, 0001
Alpha	0, 05	0, 05	0, 05
Test de Pettitt			
T (année de rupture)	1994	1995	1994
P-value	< 0, 0001	< 0, 0001	< 0, 0001
Alpha	0, 05	0, 05	0, 05
Kolda			
	T°C min	T°C max	T°C moy
Test de Man-Kendal			
T Man-Kendall	0, 5	0, 6	0, 6
Pente de Sen	0, 03	0, 04	0, 04
P-value	< 0, 0001	< 0, 0001	< 0, 0001
Alpha	0, 05	0, 05	0, 05
Test de Pettitt			
T (année de rupture)	1982	1994	1995
P-value	0, 000	< 0, 0001	< 0, 0001
Alpha	0, 05	0, 05	0, 05

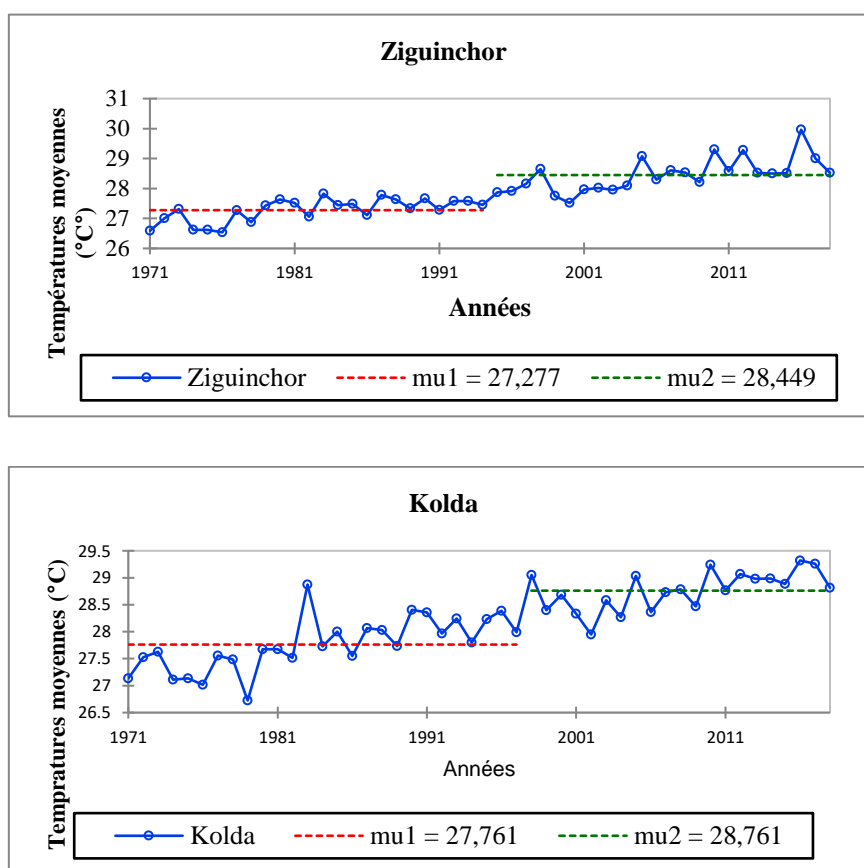


Fig. 3. Résultats du test de Pettitt sur la période 1971-2018 à Ziguinchor et à Kolda

3.2 EVOLUTION MENSUELLE DES TEMPÉRATURES

A l'échelle intra-annuelle, nous avons procédé à l'analyse des moyennes saisonnières d'une part et d'autre part à celle des maximas, minimas et de l'amplitude thermique mensuelle. L'idée est de détecter dans quelle mesure ces paramètres thermiques sont affectés dans les deux localités.

3.2.1 UN RÉCHAUFFEMENT SAISONNIER

Concernant les moyennes saisonnières, nous distinguons deux périodes dans l'évolution des températures (**Figure 4**).

A Ziguinchor, les écarts à la normale saisonnière 1981-2010 (27, 0°C) de la « saison fraîche » sont en général négatifs jusque dans les années 1990. Ils sont compris entre -1, 6°C et -0, 1°C. Les saisons 1971 (-1, 6°C), 1975 et 1976 (-1, 5°C), toutes situées dans la décennie 1971-1980, sont les plus froides de la période 1971-2018. Dans la seconde moitié des années 1990, les écarts par rapport à la normale saisonnière (+27, 0°C) deviennent positifs. Ils sont compris entre +0, 1°C et +1, 9°C. Les saisons 2005 (+1, 4°C), 2010 (+1, 7°C), 2016 (+1, 9°C) sont les plus chaudes de la période (1971-2018). Elles sont situées dans les deux dernières décennies la période 1971-2018. Par contre, à Kolda même si les moyennes saisonnières restent inférieures à la normale saisonnière (26, 5°C), elles ne cessent de s'approcher de celle-ci (26, 5°C) et la dépasse dans les années 1990. Les saisons 1974 (-1, 5°C), 1975 (-1, 4°C) et 1986 (-1, 4°C) sont les plus froides de la période. Les saisons 2005 et 2012 (+1, 1°C), 2010 (+1, 5°C) et 2016 (+1, 3°C) sont les plus chaudes de la période.

Les « saisons chaudes » sont aussi affectées. Les normales saisonnières (Ziguinchor: 28, 5°C; Kolda: 29, 5°) sont dépassées dans la seconde moitié des années 1990 (**Figure 4**). Les écarts les plus significatifs à Ziguinchor sont enregistrés durant la décennie 2001-2010 et la période 2011-2018. A partir de 2001, les écarts ne tomberont plus jamais en dessous de +0, 1°C à Ziguinchor. Les saisons 2005 (+1, 1°C), 2010 (+1, 2°C), 2016 (+2, 2°C) et 2012 (+2, 4°C) sont les plus chaudes durant cette période de hausse des températures. A Kolda, les températures de la « saison chaude » sont largement au-dessus de la normale saisonnière avec des pics en 2005 (+1, 1°C), 2015 (+1, 2°C), 2016 (+1, 3°C) et 2010 (+1, 5°C).

L'analyse de ce graphique témoigne d'un réchauffement des moyennes saisonnières autant pour la saison chaude que la saison fraîche.

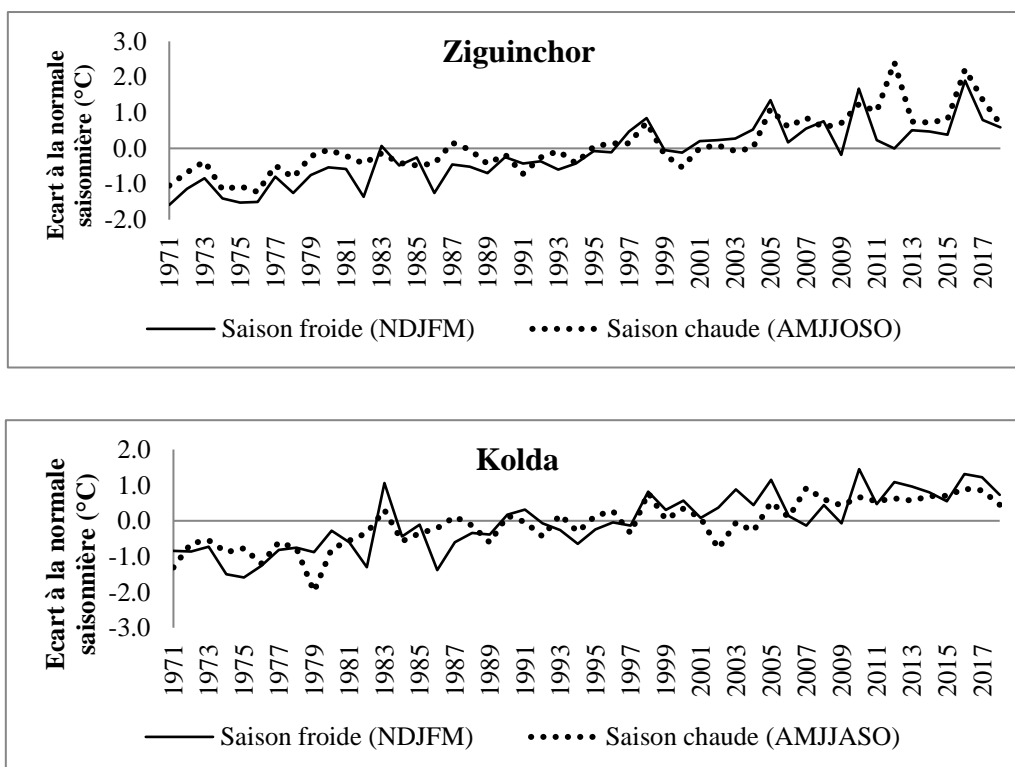


Fig. 4. Écart des moyennes par rapport à la normale saisonnière 1981-2010 à Ziguinchor et à Kolda

3.2.2 DES TEMPÉRATURES MENSUELLES TORRIDES LES HUIT DERNIÈRES ANNÉES DE LA SÉRIE (2011-2018)

Les **Figures 5** représentent les températures mensuelles maximales, minimales et moyennes calculées sur la période 1981-2010. Celles-ci sont comparées avec la moyenne de la période 2011-2018.

Les températures maximales ont augmenté de façon très significative les 8 dernières années (2011-2018) à Ziguinchor et à Kolda (**Tableau 4**). En effet, à Ziguinchor, les écarts mensuels entre la période 2011-2018 et 1981-2010 sont positifs pour tous les mois. Ils sont compris entre +0, 2°C et +2, 6°C (**Tableau 4**). Les mois de mai (+2, 0°C), juin (+2, 6°C) et octobre (+2, 1°C) enregistrent les écarts les plus significatifs. Ces mois correspondent au maximum principal et secondaire des températures maximales. A Kolda, les écarts sont moins significatifs et ne dépassent pas +1, 3°C. Les plus importants sont enregistrés en mars (+1, 3°C), en juin (+1, 2°C) et en octobre (+1, 0°C).

La hausse des températures minimales est moins importante (**Tableaux 4**). Elle ne dépasse pas +1, 1°C pour les deux localités. Ce qui signifie que la hausse des températures moyennes est lié à celle des températures maximales.

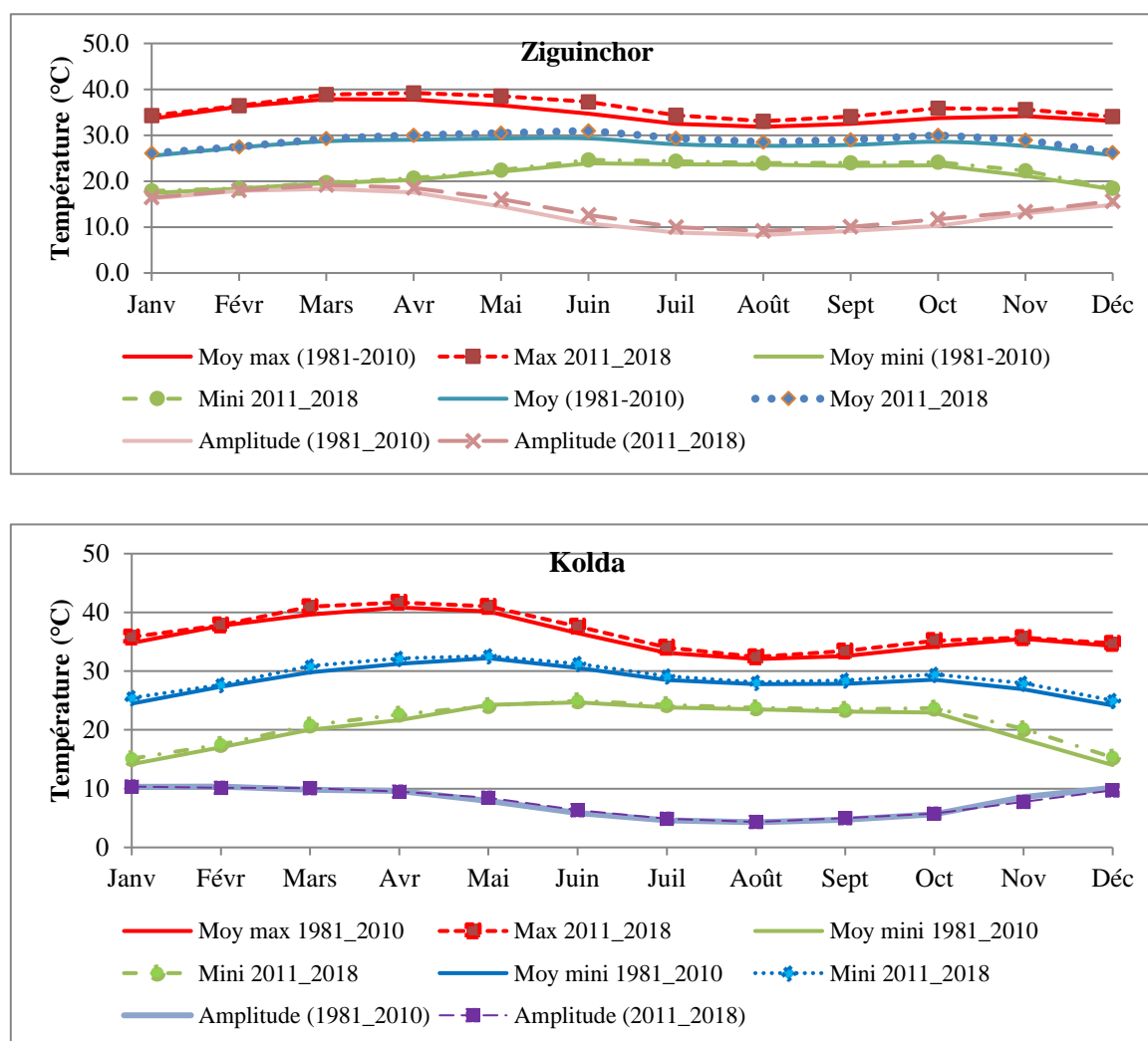


Fig. 5. Comparaison entre la normale 1981-2010 et 8 dernières années à Ziguinchor et à Kolda

Les amplitudes (**Tableau 4**) sont obtenues en comparant les amplitudes thermiques mensuelles des 8 dernières années par rapport à celles de la période 1981-2010. La hausse des températures se manifeste par les écarts positifs pour la plupart du temps. Ainsi, à Ziguinchor, l'écart est compris entre +0, 1°C et +1, 8°C. Tous les mois sont affectés par l'augmentation des températures. Les mois de la « saison chaude » sont les plus affectés avec des écarts de plus +1°C (**Tableau 4**) en mai (+1, 6°C), juin (+1, 8°C) et juillet (+1, 2°C).

La situation de Kolda est plus mitigée (**Tableau 4**). La « saison fraîche » résiste mieux à l'augmentation des températures. L'amplitude thermique mensuelle reste inférieure à la normale mensuelle (1981-2010) pour les mois de février (-0, 2°C), d'avril

(-0, 1°C), de novembre (-0, 8°C) et de décembre (-0, 4°C). Par contre mars (+0, 3°C), mai (+0, 5°C), juin (+0, 4°C), juillet (+0, 3°C), août (+0, 1°C), septembre (+0, 3°C) et octobre (0, 1°C) sont affectés par le réchauffement climatique.

Tableau 4. *Variation des températures moyennes mensuelles de Ziguinchor et de Kolda*

	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Température max (°C)	0,7	0,2	1,0	1,4	2,0	2,6	1,9	1,2	1,6	2,1	1,5	1,0
Température moy. (°C)	0,6	0,1	0,6	0,9	1,2	1,7	1,3	0,8	1,1	1,4	1,3	0,6
Température mini (°C)	0,5	0,1	0,2	0,4	0,4	0,7	0,7	0,4	0,7	0,7	1,1	0,2
Amplitude thermique (°C)	0,2	0,1	0,9	1,0	1,6	1,8	1,2	0,9	0,9	1,5	0,4	0,8

	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Température max (°C)	1,0	0,1	1,3	0,9	0,9	1,2	0,9	0,4	0,9	1,0	0,2	0,4
Température moy. (°C)	1,0	0,5	0,8	1,0	-0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,8	1,8	1,3
Température mini (°C)	1,0	0,3	1,1	0,9	0,4	0,7	0,7	0,3	0,6	0,9	1,0	0,8
Amplitude thermique (°C)	0,0	-0,2	0,3	-0,1	0,5	0,4	0,3	0,1	0,3	0,1	-0,8	-0,4

3.3 TENDANCES MENSUELLES

Le **Tableau 5** présente les résultats des tests de Mann-Kendal et de Pettitt à l'échelle mensuelle. A Ziguinchor, il existe bien une tendance à la hausse des températures minimales et moyenne avec des τ de Mann-Kendal positifs ($\tau \geq 0,3$ et des p-value $< \alpha$) pour tous les mois. Ce qui revient à dire que le risque de se tromper à propos de l'existence d'une tendance est très faible. La rupture dans les séries des températures mensuelles intervient de façon différée dans temps et selon le mois. Elle intervient entre 1979-1987 pour les mois de janvier à mai, en 2004 pour les mois de juin, juillet et septembre et 1993 et 1994 pour août, octobre, novembre et décembre. Pour les températures moyennes, les ruptures interviennent entre 1992 et 1997 sauf pour septembre (2004). Concernant les températures maximales, la tendance est aussi à la hausse. Cependant, pour les mois janvier et de février, l'hypothèse H_0 n'a pu être rejeté. Donc, il y a une tendance à la hausse même s'il n'y a pas de ruptures nettes dans les séries mensuelles.

A Kolda, la tendance à la hausse est moins affirmée voire même rejetée en avril avec des p-values proches ou supérieurs au seuil α pour les températures minimales et maximales (**Tableau 5**). Cette manifestation peu vigoureuse de la tendance à la hausse affecte les mois de novembre, de décembre et janvier comme décelée un peu plus haut avec les amplitudes thermiques. Par contre, les températures moyennes présentent une rupture pour tous les mois. Elles surviennent entre 1992-1997 pour la plus part des mois sauf janvier (2009) et décembre (2005).

Tableau 5. Rupture et tendance des températures moyennes mensuelles à Ziguinchor et à Kolda 1971-2018

Ziguinchor	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Températures minimales												
τ Mann-kendall	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5
Pente de Sen	0,07	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05
P-value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,002	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T(année de rupture)	1989	1987	1982	1979	1982	2004	2004	1994	2004	1994	1993	1994
P-value	< 0,0001	< 0,0001	0,000	0,002	0,025	0,001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Températures maximales												
τ Mann-Kendall	0,1	0,1	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,4	0,3	0,3
Pente de Sen	0,01	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04
P-value	0,160	0,051	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,000	0,000
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T(année de rupture)	1995	1993	1997	2000	1995	1994	1994	1995	1995	2004	2003	1999
P-value	0,068	0,056	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,000	0,000
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Températures moyennes												
τ Mann-Kendall	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
Pente de Sen	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
P-value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T(année de rupture)	1995	1992	1996	1997	1995	1994	1994	1994	1994	2004	1993	1994
P-value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Kolda	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillt	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Températures minimales												
τ Mann-kendall	0,2	0,04	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3	0,2
Pente de Sen	0,03	0,07	0,04	0,01	0,02	0,07	0,02	0,01	0,01	0,03	0,05	0,03
P-value	0,025	< 0,0001	0,000	0,076	0,020	0,002	< 0,0001	< 0,0001	0,000	< 0,0001	0,001	0,027
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T(année de rupture)	1997	1997	1997	1997	1982	1986	1984	1986	1993	1995	1996	2001
P-value	0,04	0,000	0,023	0,246	0,057	0,049	< 0,0001	0,000	0,003	< 0,0001	0,014	0,247
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Températures maximales												
τ Mann-Kendall	0,2	0,2	0,5	0,6	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3
Pente de Sen	0,02	0,02	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03
P-value	0,019	0,017	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,000	0,001
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T(année de rupture)	1995	1993	1997	1997	1992	1989	1994	1995	1994	1996	1994	1989
P-value	0,017	0,002	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,002
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Températures moyennes												
τ Mann-Kendall	0,1	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,3
Pente de Sen	0,01	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03
P-value	0,111	0,000	< 0,0001	0,000	0,000	0,000	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T(année de rupture)	2009	1995	1997	1997	1992	1989	1994	1995	1994	1996	1996	2002
P-value	0,168	< 0,0001	< 0,0001	0,000	0,001	0,001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,002
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

4 DISCUSSIONS

L'analyse des données thermiques a permis de répondre à un certain nombre de questions posées dans le cadre de cette étude. Les résultats mettent en évidence l'effectivité du réchauffement climatique en Casamance.

En effet, à l'échelle annuelle, il convient de remarquer une forte variabilité thermique à Ziguinchor et à Kolda. Une analyse plus fine montre une augmentation des températures depuis 1971, chaque décennie étant plus chaude que la précédente. La décennie 2001-2010 et les huit dernières années (2011-2018) sont les plus chaudes des 47 dernières années avec une augmentation de 2, 8% à Ziguinchor et 1, 9% à Kolda par rapport à la moyenne de la période (1971-2018). Aussi, 8 années sur les 10 les plus chaudes de la période 1971-2018 se trouvent dans les décennies dans la période 2001-2018.

Cette augmentation s'inscrit dans une tendance à la hausse. Les ruptures durant la décennie 1991-1999 montrent que cette décennie est un tournant dans l'évolution des températures. Les tests de Pettitt et Mann-Kendal mettent en évidence cette tendance à la hausse. Les températures vont continuer à augmenter dans les prochaines années.

Ces résultats ne sont pas isolés dans l'espace. Les différents rapports du GIEC prévoient une augmentation des températures de +1°C à +2°C en Afrique de l'ouest [2], [9]. Le CILSS abonde dans le même sens et prévoit +4°C de plus dans le Sahel et la zone soudano-sahélienne [4]. Aussi, une étude sur la Haute Casamance fixe cette hausse dans la décennie 1991-2000 [10]. Cette hausse thermique est d'ailleurs en phase avec le réchauffement global de la planète [1]. Les GES sont responsables de ce réchauffement car leur accumulation dans l'atmosphère accroît l'effet de serre global et par conséquent celui de la zone d'étude. Nous pensons également que cette augmentation n'est pas seulement liée au réchauffement global. De façon très localisée, Ziguinchor et Kolda sont des villes secondaires qui connaissent une croissance de plus de 40% [15]. L'urbanisation est synonyme d'une artificialisation de la surface du sol. Ce phénomène a tendance à augmenter les températures localement et vient amplifier le phénomène [7], [13], [16].

L'application des tests de Pettitt et de Mann-Kendall mettent aussi en évidence une rupture et une tendance à la hausse des séries mensuelles. Les saisons fraîches sont de plus en plus chaudes (jusqu'à +1, 0°C) et les saisons chaudes le sont d'avantage (+2, 4°C). La communauté scientifique se penche souvent sur une tentative d'explication du réchauffement. Elle l'attribue à la grande sécheresse des années 1970. En effet, durant la période humide (avant 1968), les températures saisonnières ont régulièrement baissé. La hausse est intervenue à partir des années 1970 correspondant à la grande sécheresse [12]. Elle continue en ce moment même si la reprise pluviométrique est en cours. En tout état de cause, la hausse est d'autant plus inquiétant qu'elle impacte sur les productions agricole [17], [18]. A court terme, la hausse des températures moyennes saisonnières affecte la floraison [19]. A long terme, elle provoque une baisse des rendements céréaliers. Ainsi, les rendements du riz chutent de 9% par degré de hausse de la température saisonnière [20]. Or, la sécurité alimentaire de ces populations dépend de la production agricole et surtout céréalière. C'est dans ce sens que la communauté doit accorder une grande attention à la variation des températures et trouver des formes d'adaptation préservant leurs activités durant toute l'année.

En géographie physique, la continentalité est un facteur important dans la variabilité thermique. Les localités situées à l'intérieur des terres sont plus sensibles aux variations thermiques. La proximité d'une grande étendue d'eau réduit les amplitudes thermiques. Alors, la logique voudrait que la hausse des températures soit plus faible à Ziguinchor car étant plus proche de la mer (60 km). Pourtant, les écarts sont plus faibles et plus stables à Kolda située à 255 km de la mer. Le réchauffement des eaux marines peut en partie expliquer cette hausse plus importante des températures [21]. Ziguinchor est aussi une zone de rencontre entre les alizés maritimes et continentaux. Des études ont montré le renforcement de la présence des alizés continentaux dans le secteur [5]. Ce vent venant de l'est après avoir traversé le désert du Sahara est connu pour la chaleur et l'aridité qu'elle draine surtout durant la saison sensée être la plus fraîche de l'année. Cela nous conforte dans l'idée que les zones côtières peuvent être aussi plus sensibles au réchauffement climatique.

5 CONCLUSION

Les variations récentes du climat ont été appréhendées à travers l'étude de l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes. Il en est ressorti une hausse thermique décennie après décennie. Des ruptures sont observées dans les années 90. Le test de Mann-Kendall met en évidence une tendance positive. L'appréciation de tous ces éléments renforce l'idée que la zone est en proie à un réchauffement climatique.

La saison fraîche est de plus en plus chaude avec des écarts de $\geq 1^\circ\text{C}$ à Kolda et 2, 8°C à Ziguinchor. L'amplitude thermique augmente dans les deux localités. Tous les mois sont touchés par le réchauffement. Cet état de fait renforce la vulnérabilité de la zone d'étude dont la survie dépend exclusivement des performances agricoles.

Dans l'espace, Ziguinchor est plus sensible à la variabilité thermique que Kolda située à 255 km de la mer. Les stations côtières peuvent être plus concernées par le réchauffement climatique que les stations à l'intérieur. Avec cette tendance à la hausse des températures, la Casamance fait déjà face à des perturbations des équilibres des écosystèmes. L'impact de ce

réchauffement et les formes d'adaptation sont des pistes de réflexion pouvant aider à réduire la vulnérabilité des populations locales.

REFERENCES

- [1] SAGNA P, NDIAYE O., DIOP C., NIANG A. D., SAMBOU P. S., Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ?, POLLUTION ATMOSPHERIQUE N°227, 2015.
- [2] GIEC, Changements climatiques en Afrique, Guide à l'attention des journalistes: Deuxième partie Focus sur le problème, UNESCO, 103 pages, 2014).
- [3] GIEC, Réchauffement planétaire à 1.5°C, résumé à l'attention des décideurs, 26 pages, 2019.
- [4] CILSS, Lutte contre le changement climatique: les réalisations du CILSS, Bulletin spécial, 30 pages, 2016.
- [5] NOUACEUR Z., Les vents de sable en Afrique saharienne et subsaharienne, The Annals of Valahia University of Târgoviște, Geographical Series, Tome 4-5, 2004-2005.
- [6] ROME S., POHL B., OUESLATI B., MORON V., RAYMOND F., JANICOT S. Et DIEDHIOU A., Durée et fréquence des vagues de chaleur en Afrique tropicale septentrionale, selon 5 indices des chaleurs, xxxiième Colloque Internationale de l'aic, pages 259-264, 2019.
- [7] NDONG J. B., Evolution climatique récente sur le littoral sénégalais; Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou, N° 04, Sept. 2015, Volume 2, pages 152 168, 2015.
- [8] GIEC, Le changement climatique: les évaluations du GIEC de 1990 et 1992, Premier Rapport d'évaluation du GIEC, Aperçu général et Résumés destinés aux décideurs et Supplément 1992 du GIEC, 182 pages, 1992.
- [9] GIEC, Résumé à l'intention des décideurs, In: Changements climatiques 2007: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor et H.L. Miller (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA; 2007.
- [10] DIAW A. T., SANE T., SAGNA P., DIOP M., Péjoration climatique et dégradation des formations forestières en Haute-Casamance, Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University, n°-42, p.-31-40, 2007.
- [11] SANE T., BENGA A. Et SALL O., La Casamance face aux changements climatiques: enjeux et perspectives, 23e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, 7 pages, 2010.
- [12] BACCI M., DIOP M., PASQUI M., CLIMAT: Encadrement climatique et évaluation du changement climatique dans les régions d'étude, rapport N°6, 152 pages, 2013.
- [13] CURSIA C., Changements climatiques observé en Bourgogne depuis 1961: étude des variations de températures et des précipitations, mémoire master 2, 52 pages, 2008.
- [14] CROISSET N., LOPEZ B, SURDYK N., BRUGERON A., Développement d'outils d'aide à l'évaluation des tendances dans les eaux souterraines au titre de la DCE, rapport final, ONEMA-BRGM, p 34-40, 2012.
- [15] ANSD, Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage (RGPHAE), Rapport provisoire, 418 pages, 2014.
- [16] MPOUNZA M., SAMBA G., BOUKA BIONA C. Et MASSOUANGUI-KIFOUALA M., l'évolution des températures dans le sud du Congo-Brazzaville (1650-1998), Publication de l'Association Internationale de Climatologie, Vol. 15, pp 6428-433, 2003.
- [17] Sultan B, ROUDIER P, TRAORE S., Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'ouest, In: Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest, Chapitre 10, 464 pages, 2015.
- [18] OMM, Déclaration de l'omm sur l'état du climat mondial en 2018, 44 pages, 2018 (<https://www.oecd.org/fr/csao/publications/47093854.pdf>).
- [19] ABROL Y. P.et. INGRAM K.T, Les effets de la hausse des températures diurnes et nocturnes sur la croissance et les rendements de certaines plantes cultivées, In: Les effets directs et indirects du changement des processus hydrologiques, pédologiques et physiologiques des végétaux, chapitre 6, FAO, 472 pages, 1997. <http://www.fao.org/3/w5183f08.htm>.
- [20] KROPFF, M.J., CENTENO G., BACHELET D., LEE M.H., MOHAN DASS S., HORIE T., DE FENG S., SINGH, S. AND PENNING DE VRIES F.W.T. (1993): Predicting the impact of CO2 and temperature on rice production, IRRI Seminar Series on Climate Change and Rice. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1993.
- [21] AMRAOUI L., SARR M. A. Et SOTO D., « Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest », Physio-Géo, Volume 5, 125-142, 2011.
<https://www.youtube.com/watch?v=BBW6GuYSQVo>