

ANALYSE RÉTROSPECTIVE DES TENDANCES DE L'ÉVOLUTION RÉCENTE DES TEMPÉRATURES EN ZONE CÔTIÈRE SÉNÉGALAISE SUR NORMALE 1991-2020 : CAS DES STATIONS DE SAINT-LOUIS ET DE CAP SKIRRING

Fatoumata Binetou SANE et Demba GAYE*

*Université Assane Seck, Département de Géographie, Laboratoire de
Géomatique et d'Environnement, BP 523, Ziguinchor, Sénégal*

(reçu le 29 Mai 2025; accepté le 30 Juin 2025)

* Correspondance, e-mail : demba.gaye@univ-zig.sn

RÉSUMÉ

En zone côtière sénégalaise, les pluies et les variations thermiques sont essentiellement les éléments qui caractérisent le climat. Actuellement, l'accent est plus mis sur les précipitations. Pourtant, les températures connaissent des variations importantes dans le temps et dans l'espace avec une tendance globale au réchauffement. L'objectif de cette étude est de faire une analyse comparative des tendances récentes de l'évolution des températures aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring sur la dernière normale climatique (1991 - 2020). Le calcul de l'indice de Lamb ainsi que l'application des tests de Mann-Kendall et de Pettitt ont permis de déterminer la variabilité, les tendances et ruptures des températures. Les résultats montrent que les zones côtières peuvent aussi être plus sensibles au réchauffement climatique. Les fluctuations au niveau de ces deux stations diffèrent sur la dernière normale climatique. L'évolution des températures varie d'une station à une autre voire du niveau local à supra local et dans le temps, même si de façon générale la tendance est à la hausse comme quasiment partout dans le monde.

Mots-clés : *analyse rétrospective, tendances, température, zone côtière, Sénégal.*

ABSTRACT

Retrospective analysis of recent temperature trends in Senegal's coastal zone over the last normal period 1991-2020 : the case of the Saint-Louis and Cap Skirring stations

In the Senegalese coastal zone, rainfall and thermal variations are essentially the elements that characterize the climate. Currently, the focus is more on precipitation. However, temperatures are experiencing significant variations in time and space with a global warming trend. The objective of this contribution is to make a comparative analysis of recent trends in temperature evolution at the Saint-Louis and Cap Skirring stations on the last climate normal (1991-2020). The calculation of the Lamb index as well as the application of the Mann-Kendall and Pettitt tests made it possible to determine the variability, trends and breaks of temperatures. The results show that coastal areas may also be more sensitive to global warming. The fluctuations at these two stations differ from the last climate normal. The evolution of temperatures varies from one station to another, even from the local to supralocal level and over time. Even if in general the trend is upwards as almost everywhere in the world.

Keywords : *retrospective analysis, trends, temperature, coastal zone, Senegal.*

I - INTRODUCTION

L'évolution du climat mondial se déroule selon une alternance de périodes chaudes et froides, d'une part, humide et sèche, d'autre part [1]. Ces alternances contrôlent le processus d'évolution du climat, changeant de façon sensible à l'échelle géologique, ce qui impacte l'évolution des sociétés humaines [2]. Les manifestations majeures du climat affectent la santé physique, les activités économiques et aussi très souvent le niveau de développement des pays [3]. Ces modifications influencent significativement sur plusieurs domaines de la vie tels que l'hydraulique, l'économie, la santé et l'environnement [4]. Le fonctionnement du climat est ainsi l'une des clés de compréhension de la mutation des environnements passés, actuels et à venir [5]. Les données statistiques couvrant le XXe siècle présentent une hausse des températures moyennes globales de 0,7 °C. Mais cette moyenne ne doit pas dissimuler des disparités dans l'espace et des irrégularités dans le temps. Si le réchauffement est très marqué de 1910 à 1940, il s'infléchit entre les années 1940 et 1970 pour reprendre la hausse jusqu'à nos jours, la tendance à l'augmentation de la température moyenne avoisinant les 0,2 °C par décennie pour cette dernière période [5]. Ainsi, l'année 2017 a été la troisième année la plus chaude jamais enregistrée sur les terres continentales africaines depuis 1950, au Sénégal en particulier, après 2010 et 2016. Au cours des neuf premiers

mois de 2017, la température moyenne sur le continent était supérieure de 1,20°C à la moyenne de 1961-1990. En comparaison, la température était de 1,41°C supérieure à la moyenne en 2010 et de 1,26°C en 2016. L'Afrique de l'Ouest expérimente déjà un réchauffement des températures de 1°C depuis 1950 [6]. En effet, en ce qui concerne les tendances climatiques actuelles et futures, il ressort que les tendances actuelles des températures sont marquées par une hausse accompagnée d'une irrégularité spatio-temporelle qui se renforcera dans le futur, à l'horizon 2100, quel que soit le scénario [7]. Les effets du réchauffement global sur la biosphère, induits par le changement climatique sont multiples et s'observent déjà par l'enregistrement des extrêmes thermiques. L'évolution des températures en Afrique de l'Ouest, et plus spécifiquement au Sahel est marquée par une augmentation de 0.2 à 0.8°C depuis la fin des années 1970 [7]. Dans le monde en général et au Sénégal en particulier, les zones côtières représentent des espaces d'enjeux, sièges d'écosystèmes complexes. Ainsi, dans le domaine climatologique, plus précisément dans celui des températures, les zones côtières sont les plus favorisées et convoitées par les populations du fait de leur dite douceur. Cependant, elles sont parfois soumises à des intempéries comme des vagues de chaleur ou même de fraîcheur qui ont des impacts non négligeables sur la quasi-totalité des secteurs d'activité. Il est ainsi prévu une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée de ces derniers selon les zones géographiques [6]. Les stations de Saint-Louis et Cap Skirring ont donc, comme le reste du pays subi les effets du réchauffement climatique en termes de fluctuations thermiques. Cet article est une contribution au phénomène mondial de changement climatique, s'intéressant spécifiquement aux données thermiques.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Zone d'étude

Les espaces côtiers de l'Afrique de l'Ouest s'étendent sur environ 4 400 km, dont le littoral sénégalais, qui s'étale sur près de 700 Km au niveau de l'océan atlantique. Ainsi, les stations de Saint-Louis et Cap Skirring sont très bien réparties de part et d'autre de la côte et représentent parfaitement deux des six domaines climatiques du pays (**Figure 1**). La station de Saint-Louis appartient au domaine sahélien côtier. Elle est située à l'extrême nord-ouest du Sénégal. Son climat est étroitement dépendant de la rosée de l'anticyclone des Açores, source des alizés maritimes qui soufflent tout au long de l'année, de l'Harmattan qui vient de la dépression saharienne et de la Mousson de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Il est caractérisé par l'alternance de deux saisons : la saison sèche et la saison humide ; et recevant en moyenne 200 mm [8]. De plus, l'influence adoucissante des alizés maritimes lui confère une

double saisonnalité en termes de températures à savoir la saison froide et la saison chaude. La température moyenne annuelle à Saint-Louis a augmenté en 50 ans, passant de 24,8°C à 26,0°C. La station de Cap Skirring quant à elle appartient au domaine sud-soudanien côtier. Elle est située à l'extrémité sud-ouest de la région de Ziguinchor. Son climat est également déterminé par une intermittence de deux saisons : une saison sèche et une saison des pluies. En outre, la tendance pluviométrique notée ces dernières années est favorable à un retour timide des précipitations. Les températures moyennes mensuelles oscillent entre 25 et 26°C.

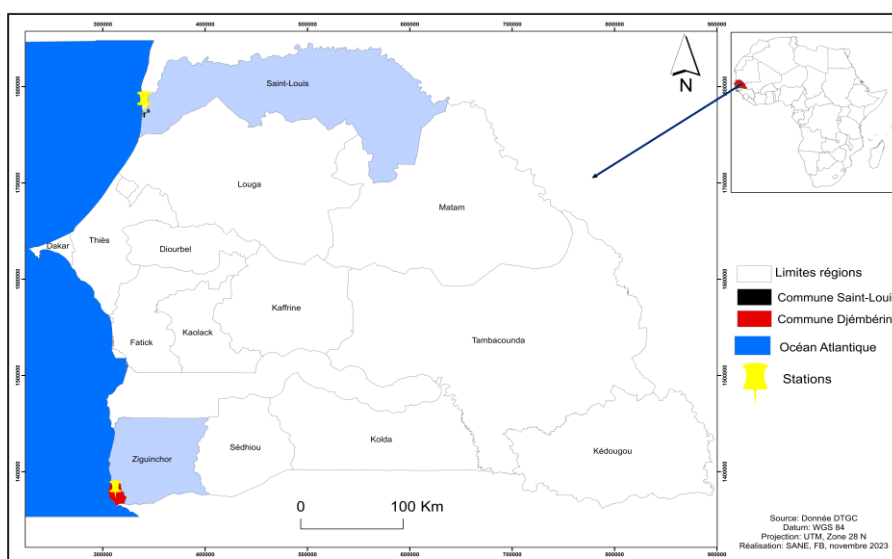


Figure 1 : Localisation des stations de Saint-Louis et Cap Skirring

II-2. Données utilisées

Dans le cadre de cette étude, les tendances des températures mensuelles, saisonnières, annuelles et décennales sont analysées. Les données utilisées proviennent de l'ANACIM, du site <https://fr.tutiempo.net/climat> et du site de NASA Power (<https://power.larc.nasa.gov>). Il s'agit des températures moyennes journalières sur la dernière normale climatique (1991-2020) pour les maxima, les minima et les moyennes de chacune des deux stations étudiées.

II-3. Méthodes

La démarche adoptée consiste d'abord à calculer les moyennes mensuelles, annuelles et décennales pour les maxima, minima et moyennes et pour chaque station avec des données d'observation journalières. Ensuite, il s'agit de déterminer les anomalies de température (maxima, minima et moyenne) à

travers le calcul de l'indice de Lamb. Enfin, les tests de [9, 10] sont appliqués afin de déterminer les tendances, les ruptures et de caractériser la variabilité. Ils ont été recommandés par l'OMM pour l'analyse de l'évolution des variables hydro-climatiques.

II-3-1. Variabilité interannuelle des températures

Les outils non statistiques comme les indices de températures permettent d'étudier la variabilité climatique. Ces indices traduisent un excédent ou un déficit pluviométrique ou dans ce cas précis, thermique pour l'année considérée par rapport à une période de référence. Il est donné par la **Formule** suivante :

$$IL = \frac{Xi - Xm}{E} \quad (1)$$

où, IL est l'indice de Lamb ; Xi ($^{\circ}C$) = la température moyenne d'une station pour une année i ; Xm ($^{\circ}C$) = la température moyenne annuelle d'une station durant la période étudiée ; E = l'écart-type de la période étudiée.

Ainsi, un indice positif ou négatif indique qu'on a une augmentation ou une baisse de la température.

II-3-2. Détection des tendances de températures

Afin de déterminer et d'analyser les tendances récentes des températures aux deux stations étudiées, le test de [9] a été retenu. Il permet de détecter la présence d'une tendance monotone au sein d'une série chronologique. C'est un test statistique non paramétrique qui permet de détecter l'existence ou non d'une tendance linéaire. Il ne tient pas compte de la saisonnalité ou autres cycles lorsqu'il s'effectue [6]. Alors, pour un échantillon de n variables, constituant une série chronologique, supposées aléatoires et indépendantes, la statistique S du test est donnée par l'**Équation** :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(xi - xj) \quad (2)$$

x_i et x_j étant les valeurs séquentielles des données, n la taille de l'échantillon ou la longueur de la série et $\text{Sign}()$ est une fonction dont la **Formule** est la suivante :

$$\text{Sign}(xi - xj) = \begin{cases} 1 & \text{si } (xi - xj) > 0 \\ 0 & \text{si } (xi - xj) = 0 \\ -1 & \text{si } (xi - xj) < 0 \end{cases}$$

La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en utilisant la valeur de Z (positive ou négative) calculée à partir de la variance de S qui est formulée comme suit

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (3)$$

La valeur de Z étant donnée par la formule qui suit :

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} \text{ si } S > 0 \quad (4)$$

$$Z = 0 \text{ si } S = 0 \quad (5)$$

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} \text{ si } S < 0 \quad (6)$$

Une valeur positive (ou négative) de Z (Tau de Mann-Kendall) indique une tendance haussière (ou baissière) et sa significativité est comparée à la valeur qui constitue le pic ou seuil de significativité du test.

II-3-3. Détection de rupture

Pour déterminer la présence de rupture sur la série de températures aux deux stations, on a appliqué le test de Pettitt. Ce dernier est souvent retenu pour sa simplicité d'utilisation, la lisibilité de ses résultats et sa capacité d'estimer la position d'un changement de moyenne, marquant le début d'une phase thermique. Ainsi, c'est un test non paramétrique qui permet de détecter une rupture unique avec une méconnaissance des dates. L'hypothèse H_0 indique que *la série est stationnaire* et l'hypothèse H_1 montre que *la série présente une rupture*. La statistique de test Z est calculée de la manière suivante :

$$Z = \max\{U(k) \mid k = 1, \dots, n-1\} \quad (7)$$

Le calcul de la probabilité P , probabilité de dépassement de la valeur k prise par la statistique Z du test sur la série observée est donné par la **Relation** :

$$P = Z(Z \geq k) = 2\exp(-6k^2/n^3 + n^2) \quad (8)$$

Si $P < \alpha$ alors l'hypothèse nulle est rejetée.

Les résultats obtenus par l'application conforme de la démarche méthodologique sont analysés et discutés dans les lignes qui suivent.

III - RÉSULTATS

III-1. Variabilité interannuelle des températures aux stations de Saint Louis et cap Skirring

III-1-1. Station de Saint-Louis

La variabilité interannuelle des températures à la station de Saint-Louis a été distinguée par l'analyse de l'indice de Lamb. Les résultats montrent une évolution irrégulière durant la dernière normale climatique 1991-2020, aussi bien pour les moyennes que pour les maxima et les minima (**Figure 2**). Des anomalies de températures sont visibles à l'image de la séquence 1991-1995 considérée comme une période froide (diminution des températures interannuelles) pour les moyennes et les maxima. Mais pour les minima, elle apparaît mitigée (alternance d'années chaudes et froides) même si les deux premières années (1991 et 1992) sont caractérisées par une baisse des températures (années froides). À partir des années 2000, il est constaté une augmentation importante des températures moyennes. Cela est en phase avec les travaux de [6] qui montrent un réchauffement des températures à la station de Saint-Louis, au courant de la dernière normale climatique 1991-2020. Pour les maxima, une séquence d'augmentation des maxima est globalement notée à partir de 1996 et jusqu'en 2008. Certes, la séquence 2009-2012 est caractérisée par une baisse des maxima interannuels et pour chaque année de cette séquence. Cette situation peut s'expliquer par la position côtière de la station, bénéficiant ainsi des vents froids de l'Alizé maritime. L'analyse des minima montre qu'elles se sont globalement réchauffées au courant de la période 1991-2020 avec une augmentation des années chaudes notamment à partir de 1997. Si l'année 2018 a enregistré la baisse des minima la plus considérable avec un indice de -3,6. 2020 a inversement enregistré la hausse des minima la plus importante de la période avec un indice de 2,1. Nous retenons qu'à la station Saint-Louis les températures ont commencé à augmenter vers la fin des années 1990 pour les moyennes et les maxima même si quelques années froides peuvent être isolées. Cependant, l'augmentation des minima a débuté depuis le début des années 1990. Les minima ont donc commencé à réchauffer plus tôt (échelle temporelle) que les maxima à cette station.

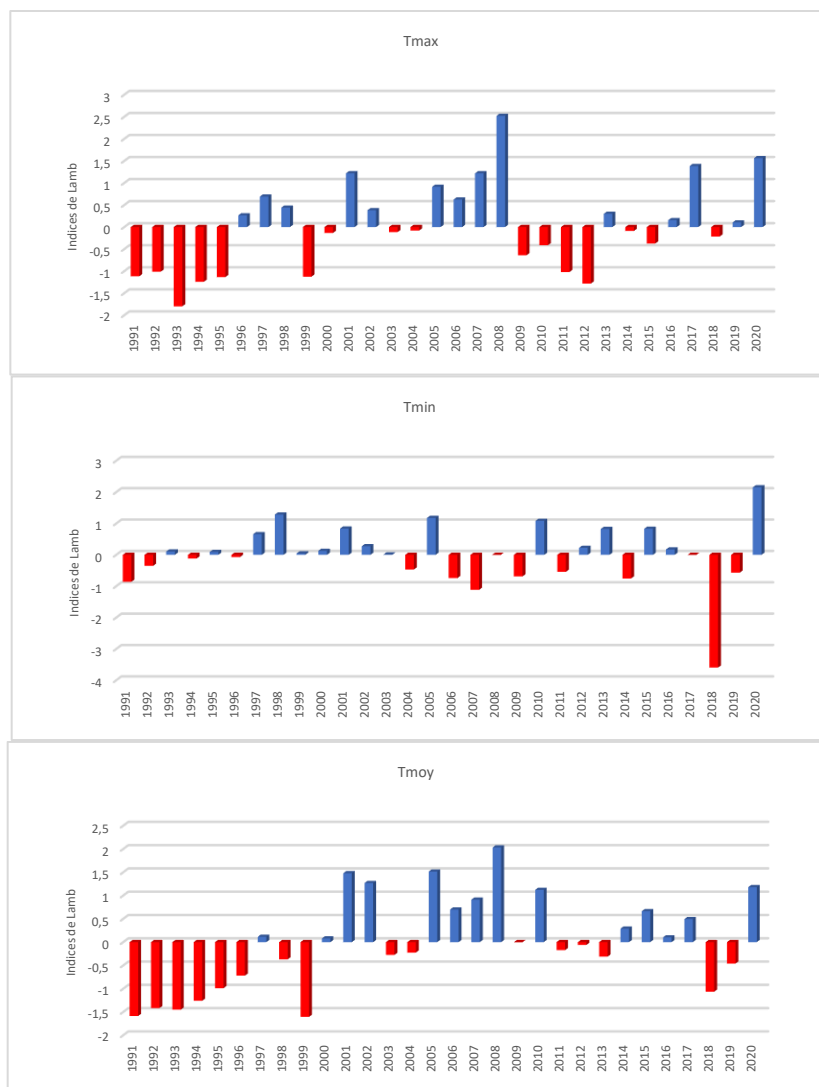
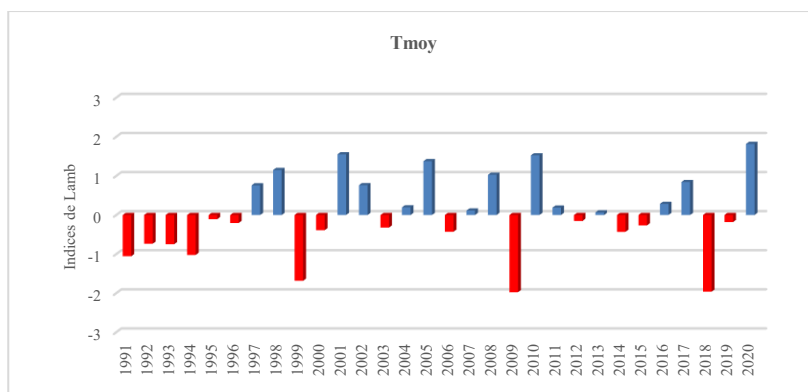


Figure 2 : Variabilité interannuelle des températures à la station de Saint-Louis

III-1-2. Station de Cap Skirring

La détermination de l'indice de Lamb a également permis de caractériser la variabilité interannuelle des températures à la station de Cap Skirring. Il a été calculé (indice de Lamb) pour les moyennes, maxima et minima, et a permis de différencier les années les plus chaudes (augmentation des températures interannuelles) des années les moins chaudes (diminution des températures interannuelles), lors de la dernière normale climatique 1991-2020 (**Figure 3**). À la station de Cap Skirring, les températures (moyennes, maxima et minima) ont aussi connu une évolution irrégulière pendant la dernière normale

climatique. Cette variabilité des températures se matérialise à travers des fluctuations interannuelles importantes (**Figure 3**). L'alternance d'années chaudes et froides est un fait commun aux trois catégories de températures. La séquence 1991-1996 est caractérisée dans les trois cas par une baisse des températures annuelles. Pour les températures moyennes, 16 années froides ont été enregistrées contre 14 années chaudes, dans l'ensemble. L'année 2009 a enregistré la baisse des températures la plus remarquable avec un indice de -1,9 et l'année 2020, la hausse la plus représentative avec 1,8 comme valeur d'indice. En considérant les températures maximales, 17 années froides ont été enregistrées contre 13 années chaudes. 2009 a aussi enregistré la baisse la plus remarquable avec un indice de -2,5 et 2001, la hausse la plus importante avec un indice de 2,6. Quant aux températures minimales, on note 16 années froides contre 14 années chaudes comme pour les températures moyennes. L'année 2018 a enregistré ici la baisse la plus importante avec un indice de -2,1 et 2005, la hausse la plus remarquable avec un indice de 1,9. Cette situation peut aussi être justifiée par le fait que Cap Skirring est une station côtière comme Saint-Louis qui bénéficie des vents froids de l'Alizé maritime. Mais aussi par la conscientisation progressive des populations de ces dernières générations, différentes de celles des périodes qui jouxtent la révolution industrielle, quant au phénomène mondial de changement climatique. A partir de la fin des années 1990, une augmentation des températures interannuelles est observée, même avec quelques années froides. Des anomalies de températures ont été aussi notées durant cette période (1991-2020) à la station de Saint-Louis. C'est le cas de l'année 2019 considérée comme une année froide pour les moyennes et les minima alors que pour les maxima c'est une année chaude caractérisée par une augmentation nette des températures. Cette importante variabilité interannuelle des températures au courant de la dernière normale (1991-2020), aux stations de Saint-Louis et de Cap Skirring, va dans le sens des changements climatiques qui sévissent dans le monde. Le Sénégal, et ces deux stations en particulier, n'en demeurent pas moins des exceptions.



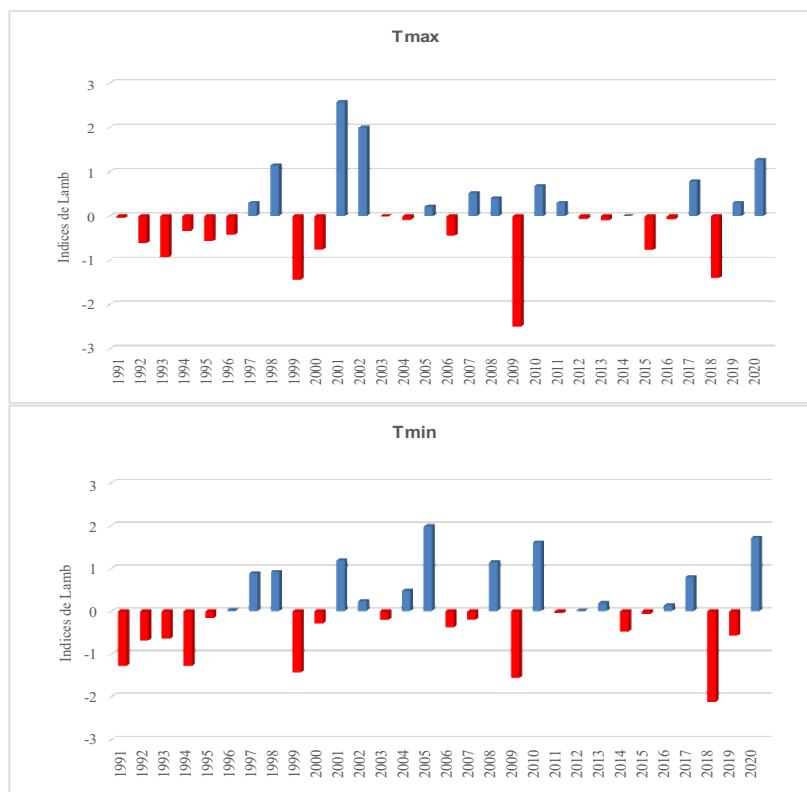


Figure 3 : Variabilité interannuelle des températures à la station de Cap Skirring

III-2. Tendances des températures aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring

La tendance au réchauffement dans les précédents résultats ne semble pas régulière sur toute la période étudiée (1991-2020). Il existe des disparités dans l'espace et des irrégularités dans le temps. Dans le but de chercher des changements de tendances ou une présence de rupture dans les séries de températures des deux stations, les tests de Mann-Kendall et de Pettitt ont été appliqués à la série de données (1991-2020) aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring (maxima, minima, moyennes).

III-2-1. Tendances annuelles des températures sur la dernière normale (1991 - 2020)

L'application du test de Mann-Kendall aux données de températures annuelles (maxima, moyennes et minima) de la dernière normale climatique (1991-2020) des stations de Saint-Louis et Cap Skirring, révèle une tendance globale à la hausse (**Tableau 1**). Dans les deux stations les maxima, minima et moyennes ont une tendance haussière d'autant plus que leurs τ sont tous positifs. Cependant, la tendance à la hausse des températures maximales est plus

significative que celle des minima. Les températures moyennes quant à elles présentent une augmentation plus significative que celles des maxima et des minima à la station de Saint-Louis. Alors qu'à la station de Cap Skirring leur significativité reste similaire à celle des TX ($\tau=0,1724$). Ces tendances haussières sont confirmées par les valeurs de pente positive des températures pour les deux stations. Ces valeurs de pente permettent en réalité de mettre en évidence l'amplitude de ces tendances. La pente a une valeur de 0,05. Cela est peut-être dû à la taille de l'échantillon, c'est-à-dire la longueur de la série (30 ans).

Tableau 1 : Résultats du test de Mann-Kendall sur les températures observées aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring de 1991 à 2020

	Station Saint-Louis			Station Cap Skirring		
	TX	TM	TN	TX	TM	TN
Tendance	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Sens de la tendance	hausse	hausse	hausse	hausse	hausse	hausse
τ	0,2414	0,3103	0,0023	0,1724	0,1724	0,1494
S	105	235	1	75	75	65
P du test	0,0635	0,0168	1	0,1868	0,1868	0,2535
Pente	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Oui = présence d'une tendance ; τ = Tau de Mann-Kendall ; S = S statistique ; P du test = p-value unilatérale ; TX = Températures maximales ou maxima ; TN = Températures minimales ou minima ; TM = Températures moyennes ou moyennes.

III-2-2. Tendances mensuelles des températures sur la dernière normale (1991 - 2020)

L'application du test de Mann Kendall aux données de températures mensuelles à la station de Saint-Louis montre également qu'une tendance à la hausse se dessine, même si l'intensité ou la fréquence varie d'un mois à l'autre (**Tableau 2**). Pour les températures moyennes, tous les mois affichent un réchauffement au courant de la dernière normale climatique (1991-2020) avec une tendance plus significative aux mois d'avril-septembre-octobre ($\tau= 0,3333$; 0,3149 et 0,4345). Une tendance générale à la hausse est également observée avec les maxima mensuels (**Tableau 2**) où 9/12 des mois (janvier-mars-avril-juillet-aout-septembre-octobre-novembre-décembre) affichent un τ positif. Les mois de janvier, avril et septembre ($\tau= 0,3655$; 0,2368 et 0,2368) enregistrent la tendance à la hausse la plus significative. Au courant de la dernière normale climatique (1991-2020), c'est durant les saisons sèches que quelques tendances baissières s'observent. Pour les minima, les résultats montrent plutôt une tendance stable (**Tableau 2**). Globalement, il y a autant de mois à tendances haussière (avril-mai-juillet-aout-octobre-novembre) que baissière (janvier-février-mars-juin-septembre-décembre). La tendance à la hausse est plus significative aux mois de juillet et octobre

($\tau = 0,1402$ et $0,2327$) alors que la plus significativement à la baisse est enregistrée aux mois de mars et juin ($\tau = -0,0575$ et $-0,0391$). Ces résultats révèlent ainsi que la tendance des maxima mensuels influence le plus la tendance globale à la hausse. Ce qui confirme également que les maxima augmentent plus vite que les minima à la station de Saint-Louis. Pour la station de Cap Skirring, les résultats du test de [8] montrent également une tendance générale à la hausse des températures sur la normale 1991-2020. Les températures moyennes mensuelles de la période affichent une tendance globalement à la baisse. En effet, seuls les mois de janvier-juillet- octobre affichent une tendance à la hausse sur toute la période. Les tendances les plus significatives à la baisse se retrouvent aux mois d'avril et août avec un τ respectif de $-0,0296$ et $-0,0148$. Une situation inverse s'observe pour les maxima et les minima qui affichent globalement une hausse des températures avec respectivement des tendances plus significatives aux mois de juillet et octobre ($\tau = 0,4299$ et $0,5540$) et en septembre et octobre ($\tau = 0,4115$ et $0,5339$). Contrairement à la station de Saint-Louis, la tendance globalement à la baisse pour les moyennes mensuelles à la station de Cap Skirring est entraînée ou plus influencée par les minima mensuels. Ce qui signifie qu'à cette station c'est plutôt les minima qui augmentent plus vite que les maxima au niveau de cette station.

Tableau 2 : Tendance des températures mensuelles à la station de Saint-Louis (1991-2020)

Températures maximales (Saint-Louis)												
Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
τ	0,36	- 0,01	0,22	0,24	-0,05	-0,01	0,22	0,18	0,24	0,21	0,14	0,17
P-value	0,04	0,98	0,25	0,21	0,79	0,96	0,27	0,37	0,25	0,27	0,47	0,40
Tendance	Hausse	Baisse	Hausse	Hausse	Baisse	Baisse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse
Températures maximales (Cap-Skirring)												
Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
τ	0,09	-0,02	-0,01	-0,22	-0,23	-0,01	0,43	0,30	0,26	0,55	0,15	0,09
P-value	0,47	0,83	1,00	0,09	0,07	0,91	0,01	0,02	0,04	0,01	0,25	0,50
Tendance	Hausse	Baisse	Baisse	Baisse	Baisse	Baisse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse
Températures moyennes (Saint-Louis)												
Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
τ	0,22	0,12	0,23	0,33	0,08	0,12	0,24	0,25	0,31	0,43	0,23	0,10
P-value	0,23	0,52	0,23	0,08	0,70	0,54	0,21	0,19	0,12	0,03	0,24	0,58
Tendance	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse
Températures moyennes (Cap-Skirring)												
Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
τ	0,10	-0,10	-0,04	-0,02	-0,03	-0,06	0,05	-0,01	-0,06	0,14	-0,02	-0,06
P-value	0,59	0,57	0,80	0,89	0,87	0,73	0,77	0,94	0,75	0,45	0,88	0,72
Tendance	Hausse	Baisse	Baisse	Baisse	Baisse	Baisse	Hausse	Baisse	Baisse	Hausse	Baisse	Baisse
Températures minimales (Saint-Louis)												

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
τ	-0,12	-0,13	-0,06	0,07	0,07	-0,04	0,14	0,07	-0,06	0,23	0,11	-0,10
P-value	0,54	0,49	0,77	0,71	0,73	0,85	0,48	0,72	0,75	0,22	0,54	0,59
Tendance	Baisse	Baisse	Baisse	Hausse	Hausse	Baisse	Hausse	Hausse	Baisse	Hausse	Hausse	Baisse
Températures minimales (Cap-Skirting)												
Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
τ	-0,01	-0,08	0,05	0,01	-0,01	0,05	0,37	0,40	0,41	0,53	0,13	-0,04
P-value	0,97	0,52	0,72	0,94	0,94	0,69	0,01	0,01	0,01	0,00	0,33	0,77
Tendance	Baisse	Baisse	Hausse	Hausse	Baisse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Baisse

III-2-3. Tendances décennales des températures moyennes

Les **Figures 4 et 5** représentent les résultats du test de [8] appliqué à chaque décennie pour les températures moyennes mensuelles aux stations de Saint-Louis et Cap Skirting afin d'avoir une vue d'ensemble par rapport au réchauffement selon les décennies. A la station de Saint-Louis, les températures moyennes décennales montrent des tendances globalement à la hausse, mais avec des disparités selon les décennies (**Figure 4**). La deuxième décennie (2001-2010) est la plus chaude de toute la période (26,7°C), en termes de moyennes décennales. La dernière décennie (2011-2020) vient en seconde position avec une moyenne de 26,1°C. Et la première décennie (1991-2000) est donc la moins chaude des trois qui constituent la période, avec 25,4°C. L'écart entre la 1^{re} (2001-2010) et la 2^e (2011-2020) décennie la plus chaude étant de +0,6°C en termes de réchauffement.

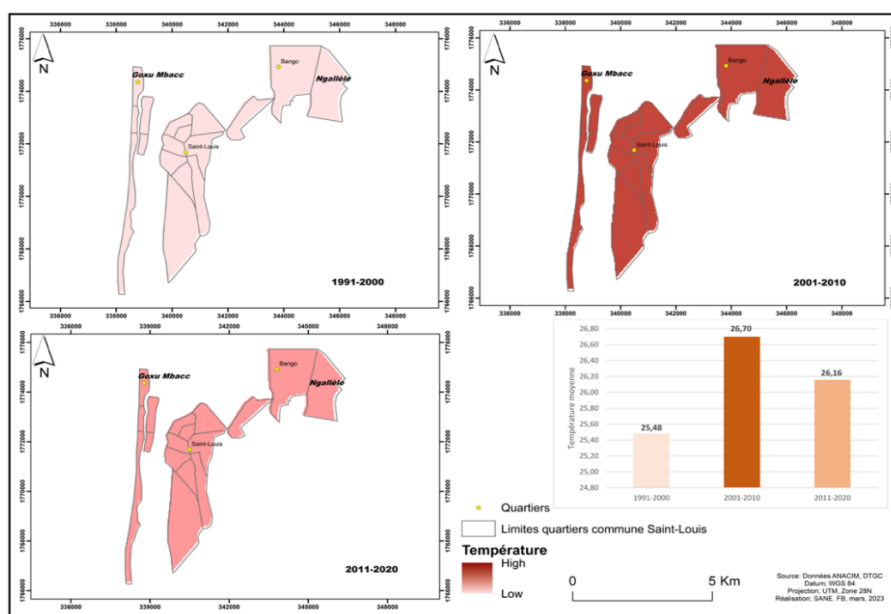


Figure 4 : Carte des températures moyennes décennales à la station de Saint-Louis

En termes de moyennes décennales à la station de Cap Skirring, la deuxième décennie (2001-2010) est également la plus chaude de la période avec une moyenne de $26,5^{\circ}\text{C}$ (**Figure 5**). Comme à la station de Saint-Louis, la dernière décennie (2011-2020) constitue la deuxième décennie la plus chaude des trois avec $26,3^{\circ}\text{C}$ soit $-0,2^{\circ}\text{C}$ par rapport à la plus chaude (2001-2010). La première décennie est également la moins chaude de la période. L'écart entre la 1^{re} (2001-2010) et la 2^e (2011-2020) décennie la plus chaude étant de $+0,2^{\circ}\text{C}$ en termes de réchauffement.

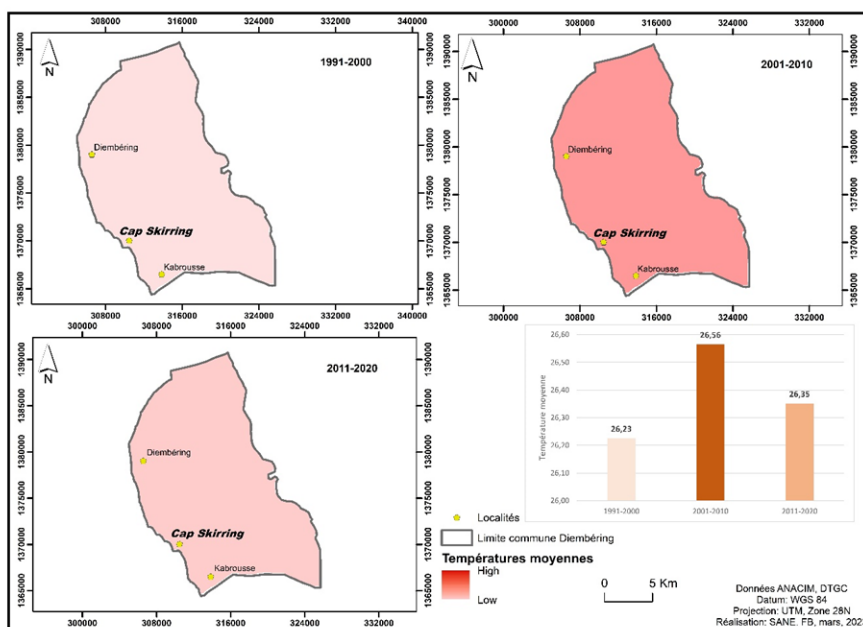


Figure 5 : *Températures moyennes décennales à la station de Cap Skirring*

III-3. Détection de ruptures sur la dernière normale climatique (1991 - 2020)

De façon générale, lorsqu'une tendance est présente, une rupture (test de Pettitt) est également repérée et inversement. Le test de Pettitt a été appliqué aux données de températures (moyennes, maxima, minima) des stations de Saint-Louis et Cap Skirring pour la dernière normale climatique. Les résultats ont été répertoriés dans le **Tableau 3**. Le test de [9] pour les températures aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring a révélé l'existence de ruptures pendant la dernière normale climatique, mais à des dates différentes. A la station de Saint-Louis, les températures moyennes montrent une rupture en 1999. Un réchauffement de $+1,36^{\circ}\text{C}$ est noté entre la période avant ($22,7^{\circ}\text{C}$) et après ($24,06^{\circ}\text{C}$) rupture. Les maxima ont aussi augmenté de $+1,1$ entre la période avant (31°C) et après ($32,1^{\circ}\text{C}$) même si la rupture est

intervenue un peu plus tard (2006) par rapport à celle des moyennes. Cependant, les minima ont plutôt connu une baisse de $-0,27$ entre les deux périodes ($16,30^{\circ}\text{C}$ avant et $16,03$ après rupture). Leur rupture a été notée en 1998, un an avant celle des moyennes (1999). Ce qui montre encore l'augmentation plus rapide des maxima par rapport aux minima dans cette station entre les deux sous-périodes avant et après rupture. A la station de Cap Skirring, les températures moyennes ont connu une rupture beaucoup plus tard (2013) que celle des moyennes de la station de Saint-Louis (1999). Une augmentation de $+1,13^{\circ}\text{C}$ a été enregistrée entre les deux périodes ($23,90^{\circ}\text{C}$ avant et $25,03^{\circ}\text{C}$ après la rupture). Les maxima ont aussi augmenté de $+0,2^{\circ}\text{C}$ entre la période avant ($27,9^{\circ}\text{C}$) et après ($28,1^{\circ}\text{C}$) rupture enregistrée un peu plus tôt (en 2000) par rapport aux moyennes (2013). Une augmentation de $0,5^{\circ}\text{C}$ des minima a été notée entre la période avant rupture ($23,3^{\circ}\text{C}$) et celle après rupture ($23,8^{\circ}\text{C}$). La rupture étant intervenue en 1995. Contrairement à la station de Saint-Louis, entre les deux sous-périodes avant et après rupture, les minima augmentent plus vite que les maxima au niveau de la station de Cap Skirring. Les températures moyennes ont connu une rupture plus tôt à la station de Saint-Louis (1999) comparée à celle de Cap Skirring (2013), même si le réchauffement entre la période avant et après rupture est plus marqué à Saint-Louis. En revanche, les maxima et les minima ont enregistré des ruptures plus tôt à la station de Cap Skirring (respectivement 2000 et 1995) par rapport à celle de Saint-Louis (2006 et 1998). De plus, les maxima et moyennes ont respectivement connu un réchauffement plus significatif à la station de Saint-Louis ($+1,1^{\circ}\text{C}$ et $+1,36^{\circ}\text{C}$) comparée à celle de Cap Skirring ($+0,2^{\circ}\text{C}$ et $+1,13^{\circ}\text{C}$) entre les périodes avant et après rupture. Contrairement aux minima qui ont enregistré une augmentation plus significative au niveau de la station de Cap Skirring ($+0,5^{\circ}\text{C}$) par rapport à celle de Saint-Louis ($-0,27^{\circ}\text{C}$), entre les deux sous-périodes.

Tableau 3 : Résultats du test de Pettitt sur les températures
(maxima, moyennes et minima) observées aux stations de
Saint-Louis et Cap Skirring de 1991 à 2020

	Station Saint-Louis			Station Cap Skirring		
	TX	TM	TN	TX	TM	TN
Rupture	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
P du test	0,0795	0,7636	0,6944	0,2583	0,8836	0,3092
Date de rupture	2006	1999	1998	2000	2013	1995
Moyenne avant rupture	31	22,7	16,30	27,9	23,90	23,3
Moyenne après rupture	32,1	24,06	16,03	28,1	25,03	23,8
Excédent en $^{\circ}\text{C}$	1,1	1,36	-0,27	0,2	1,13	0,5

Oui = Présence d'une rupture ; N (Non) = absence d'une rupture ;
P du test = p-value unilatérale.

IV - DISCUSSION

Cette contribution a pour objectif de faire une analyse comparative des tendances récentes de l'évolution des températures aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring sur la dernière normale climatique (1991-2020). Les résultats issus de ces travaux affichent une tendance générale à la hausse des températures même s'il y a des disparités. Ce constant est semblable à celui de [11, 12] qui notaient une augmentation des températures minimales et maximales à l'échelle du Sénégal. Dans le contexte du Sahel, les résultats sont similaires aux conclusions de travaux de [13, 14] qui confirment la hausse des caractéristiques de températures. Lors de la dernière normale climatique (1991-2020), aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring, les températures maximales ont connu des augmentations respectives de $0,2^{\circ}\text{C}$ et $0,1^{\circ}\text{C}$. Quant aux températures minimales, elles ont plutôt enregistré des diminutions respectives de $-0,3^{\circ}\text{C}$ et $-0,06^{\circ}\text{C}$. La tendance à la hausse des températures maximales est plus significative que celle des minima sur toute la période (1991-2020). Ces résultats sont en phase avec des études qui montrent une augmentation plus significative des maxima par rapport aux minima, au Sénégal [15]. La hausse des températures minimales est moins importante [16].

Ce qui signifie que la hausse des températures moyennes est liée à celle des températures maximales. Cette baisse des températures (notamment les minima) peut s'expliquer par l'influence des flux d'alizé maritimes issus de l'anticyclone des Açores. Ces derniers entraînent un adoucissement (diminution) des températures du fait de l'augmentation de l'humidité atmosphérique. Ces résultats sont également en conformité avec d'autres études qui mettent en exergue l'effectivité du réchauffement des températures observé au Sénégal [17, 19]. Cependant, ces observations sont contraires à d'autres concluant une augmentation plus rapide et plus importante des températures minimales à l'échelle mondiale [20, 13]. Dans ce pays (Sénégal), l'analyse des données thermiques montre une forte variabilité interannuelle (saison sèche/saison des pluies) et une évolution contrastée selon les domaines, mais aussi au sein d'un même domaine climatique. Comme l'indiquent également des travaux réalisés avec les stations du Ferlo [21]. Ils ont montré que la tendance à la hausse des températures en Afrique du Nord-Ouest, à l'exception du Sud-Est de la Mauritanie, s'inscrit ainsi dans un processus de réchauffement que connaît l'espace subtropical est-atlantique depuis les années 1950. Et que l'Afrique du Nord-Ouest est entrée depuis les années 1970 dans un mode de circulation atmosphérique dit homogène, propice à un réchauffement des températures de surface et à un affaiblissement des anticyclones. Les résultats ont aussi attesté que la quasi-totalité des mois ont été en proie à un réchauffement sans précédent lors de la dernière normale

climatique. Ces derniers sont en harmonie avec des travaux qui montrent la conformité entre le réchauffement observé au Sénégal et les descriptions données par les scénarios du GIEC [17]. Il est confirmé que l'augmentation de la température moyenne s'est accélérée durant la dernière décennie du XXe siècle pour atteindre $+0,1^{\circ}\text{C}$ à Saint-Louis, $+0,8^{\circ}\text{C}$ à Dakar et $+0,4^{\circ}\text{C}$ à Ziguinchor [22]. Cette hausse se poursuit durant la 1^{re} décennie du XXIe siècle : $+1,0^{\circ}\text{C}$ à Saint-Louis, $+0,7^{\circ}\text{C}$ à Dakar et $+1,3^{\circ}\text{C}$ à Ziguinchor. Cette étude a aussi révélé que c'est la décennie 2001-2010, qui est la plus chaude des trois qui constituent la dernière normale climatique (1991-2020). Elle est suivie de la décennie 2011-2020 qui en est la 2^e la plus chaude aux des stations de Saint-Louis et Cap Skirring. Ces conclusions sont également en accord avec les études montrant que 2017 a été la troisième année la plus chaude jamais enregistrée sur les terres continentales africaines depuis 1950, au Sénégal en particulier, après 2010 (année la plus chaude) et 2016 (2^e année la plus chaude) [23]. Certes, la tendance au réchauffement ne semble pas régulière pendant toute la période considérée (1991-2020). Dans cette étude, des ruptures ont également été détectées aux deux stations aussi bien pour les TX que pour les TM et TN. Cependant, ces ruptures sont tardives comparées à d'autres résultats qui ont montré une rupture en 1994 aux stations de Dakar, Ziguinchor et Kolda [24, 19]. Les ruptures ont été notées vers la fin des années 1990-début 2000. Ces ruptures avancées semblent être enregistrées à l'échelle du pays (Sénégal) et sont également tardives comparées aux changements de tendances observés dans le monde depuis la fin des années 70. Les tests statistiques de Mann-Kendall et de Pettitt ont confirmé cette hausse générale des températures aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring lors de la dernière normale climatique (1991-2020) avec des changements de tendances relativement lambines. Ces observations sont en phase avec celles d'autres travaux qui notaient globalement une tendance croissante des températures [25]. Cependant, un constat qui demeure est la grande variabilité thermique à toutes les échelles spatiales et temporelles dans le monde, au Sénégal et aux stations de Saint-Louis et Cap Skirring en particulier.

V - CONCLUSION

Cette étude révèle une tendance haussière thermique au fil des années. Des ruptures relativement tardives ont été enregistrées pour la plupart vers la fin des années 90 et au début des années 2000. Le test de Mann-Kendall avec des τ pour la plupart positifs et les ruptures attestées par le test de Pettitt, mettent en exergue le changement de tendances (réchauffement) constaté dans ces deux stations. Cette hausse thermique est beaucoup plus notée avec les maxima qu'avec les minima. Par ailleurs, devant la difficulté à saisir toute la complexité de la dimension temporelle du signal climatique, notamment de l'évolution thermique, l'étude devra être étendue à d'autres dimensions (spatiales), d'autres phénomènes et d'autres variables pour mieux caractériser et comprendre le phénomène de changement climatique et ses implications.

RÉFÉRENCES

- [1] - Z. NOUACEUR, La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne, *Physio-Géo*, 15 (2020) 89 - 109, <https://doi.org/10.4000/physio-geo.10966>
- [2] - M. SOW, Étude rétrospective et prospective des vagues de chaleur au Sénégal : caractéristiques et mécanismes, Évolution et implications socio- économiques et sanitaires, Thèse de doctorat, Université Gaston Berger (UGB) de Saint-Louis, Sénégal, (2024)
- [3] - I. DIOMANDE, Initiation à la climatologie et l'hydrologie, Université Alassane Ouattara de Bouake, UFR Communication-Milieu et Société, Département d'Histoire, (2014) 21, https://ekladata.com/W-pBtRXMvHCVhbL0MvV_FXmZUNs.pdf
- [4] - G. C. HEGERL, F. W. ZWIERS, P. BRACONNOT, N. P. GILLET, Y. LUO, J. A. MARENGO ORSINI, N. NICHOLLS, J. E. PENNER & P. A. STOTT, in "Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", S. D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR AND H. L. MILLER (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (2007) 664 - 745, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter9-1.pdf>
- [5] - E. DE BELIZAL, V. FOURAULT-CAUËT, M. A. GERMAINE et T. B. ÉLISE, "Géographie de l'environnement", Armand Colin, Collection Portail, (2007)
- [6] - F. B. SANE, Évolution des températures en zones côtières sur la normale 1991-2020 : tendances et perception des impacts dans le secteur de l'éducation aux stations de Saint-Louis et de Cap Skirring, Mémoire de master, Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, (2023), <https://rivieresdusud.uasz.sn/xmlui/handle/123456789/1887>
- [7] - M. NOBLET, A. FAYE, I. CAMARA, A. SECK, M. SADIO et A. BAH, Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière, Report produced, Climate Analytics GmbH, Berlin, (2018). https://cal-clm.edcdn.com/assets/vf_pas-pna_sn_etat_des_lieux_scientifiques_11012019.pdf
- [8] - D. GAYE, Suivi de la pluviométrie au Nord-Sénégal de 1954 à 2013 : étude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis, *Noroi*, 244 (2007) 63 - 73. <https://doi.org/10.4000/noroi.6165>
- [9] - M. G. KENDALL, "Rank Correlation Methods", Griffin, London, (1975)
- [10] - A. PETTITT, A non-parametric approach to the change point problem, *Appl. Statist.*, 8 (2) (1979) 126 - 135. <https://www.jstor.org/stable/2346729>

- [11] - M. SOW et D. GAYE, Projected trends in extreme heat in Senegal from 2020 to 2080, *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 22 (3) (2025) 134 - 152. doi:10.36922/AJWEP025150107
- [12] - M SOW, D. GAYE et M. M. DIAKHATE, Analyse de l'évolution spatiotemporelle de la tendance des extrêmes chauds au Sénégal, *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, Regards / Terrain, (2024) 1 - 22. doi.org/10.4000/12jq1
- [13] - S. ROME, G. CANIAUX, J. RINGARD, B. DIEPPOIS et A. DIEDHIOU, Identification de tendances récentes et ruptures d'homogénéité des températures : Exemple en Afrique de l'Ouest et sur le Golfe de Guinée, 28^e colloque international de l'AIC, 28 (2015) 591 - 596
- [14] - M. L. LY, S. B TRAORE, A. ALHASSANE et B. SARR, Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel, *Weather and Climate Extremes*, 1 (2013) 19 - 25
- [15] - P. M. NDIAYE, D. GAYE et S. A. SOW, Caractérisation Spatiotemporelle Et Analyse De La Tendance Des Températures Au Sénégal, *European Scientific Journal, ESJ*, 16 (33) (2020) 105 - 121. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p105>
- [16] - N. S. DIOUF, Évolution spatio-temporelle des vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest et risques sanitaires associés, Mémoire de master, Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan, Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, (2018)
- [17] - P. SAGNA, O. NDIAYE, C. DIOP, A. DIONGUE-NIANG et P. C. SAMBOU, Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ?, *Pollution atmosphérique*, 227 (2015) 1 - 17. <https://dx.doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5320>
- [18] - A. B. BA, Variabilité climatique au Sénégal : comparaison entre Saint-Louis et Podor sur la période 1951-2000, Mémoire de Master, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, (2006)
- [19] - B. E DIEMÉ., A. FALL, P. THIOUNE, B. DIOP et E. H. B. DIAW, Étude de la variation des températures au Sénégal: cas des stations de Ziguinchor et de Kolda en Casamance (Sénégal), *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 29 (3) (2020) 771 - 784. <https://ijias.issr-journals.org/abstract.php?article=IJIAS-20-125-03>
- [20] - D. L. HARTMANN, A. M. G. KLEIN-TANK, M. RUSTICUCCI, L. V. ALEXANDRE, S. BRÖNNIMANN, Y. CHARABI, F. J. DENTENER, E. J. DLUGOKENCKY, D. L. EASTERLING, A. KAPLAN, B. SODEN, P. W. THORNE, M. WILD et P. M. ZHAI, in "climate change 2013, the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change", J. HURRELL, J. MARENGO, F. TANGANG, P. VITERBO (eds.), Cambridge university Press, (2013) 15 - 24

- [21] - L. AMRAOUI, M. A. SARR et D. SOTO, Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest, *Physio-Géo*, 5 (1) (2011) 125 - 142. <https://journals.openedition.org/physio-geo/1959>
- [22] - J. B. NDONG, Évolution climatique récente sur le littoral sénégalais, *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, 2 (4) (2015) 151 - 168
- [23] - African Centre of Meteorological Application for Development (ACMAD), "The state of climate in Africa: 2018", USAID, WMO, NRC, (2019). https://rcc.acmad.org/archive_bulletin/ACMAD_bulletin_annuel_2018.pdf
- [24] - C. FAYE, Changement climatiques observés sur le littoral sénégalais (Région de Dakar) depuis 1960 : Etude de la variabilité des tendances sur les températures et la pluviométrie, *Nature & Technology Journal*, 20 (2019) 65 - 78. <https://rivieresdusud.uasz.sn/xmlui/bitstream/handle/123456789/323/11%20Faye%20Article.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [25] - R. ROME, B. OUESLATI, V. MARON, B PHOL et A. DIEDHIOU, les vagues de chaleur au Sahel : Définition et principales caractéristiques spatio-temporelles (1973-2014), 29^e colloque international de climatologie, (2016)