

Soumis le: 15/01/2018

Forme révisée acceptée le: 14/02/2019

Correspondant: [afadd\\_bouandes@yahoo.fr](mailto:afadd_bouandes@yahoo.fr)



**Nature et Technologie**

**Nature & Technology**

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – EISSN : 2437-0312

# Changement climatiques observés sur le littoral sénégalais (Région de Dakar) depuis 1960 : Etude de la variabilité des tendances sur les températures et la pluviométrie

Cheikh FAYE

*Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, UASZ, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor (Sénégal)*

## Résumé

Le changement climatique, une des plus grandes préoccupations actuelles de la planète, est caractérisé par une augmentation de la température, la diminution de la pluviométrie, l'accentuation des catastrophes naturelles... L'augmentation globale de la température de la surface du globe au cours du 20ème siècle est de l'ordre de 0,6 à 0,2 °C. De tous les éléments du climat, les températures et les précipitations jouent un rôle fondamental dans la détection du changement climatique. Cet article analyse la variabilité et les tendances du climat de la ville de Dakar, capitale de la République du Sénégal, sur la période 1960-2013 à partir de quatre variables climatiques : températures minimales, températures maximales, températures moyennes et cumuls annuels de précipitations. Les résultats de l'analyse indiquent une tendance sur les températures quasi-stable de 1960 à 1994. Après 1994, année de rupture, l'augmentation des températures devient très significative. Cette augmentation entre 1995-2013 et 1960-1994 est en moyenne de 0,9 °C (soit une hausse de 3,5 %), n'a pas été constante durant toute la période et est plus importante sur la saison sèche (soit une hausse de 4,4 %) et sur les températures minimales (soit une hausse de 4,9 %). Pour les précipitations, aucune tendance significative n'est observée, malgré une baisse de 211 mm (soit 36,2 %), à partir de 1969, des totaux pluviométriques de l'ordre de - 0,020 mm/an. Ces différents résultats mettent en exergue la présence du phénomène de changement climatique à Dakar et dont les conséquences pour l'homme et le milieu sont multiples.

Mots-clés : changement climatique, réchauffement climatique, tests statistiques, tendance, rupture

## Abstract

Climate change, one of the biggest current concerns of the planet, is characterized by an increase of the average temperature of the oceans and the atmosphere, the decrease of the rainfall in quantity and in duration, the accentuation of natural disasters ... The global increase of the temperature of the surface of the globe in the 20th century is of the order of 0.6 in 0.2 °C. All the elements of the climate, the temperatures and the precipitation play a fundamental role in the detection of climate change. This article analyzes the variability and the trends of climate of the city of Dakar, capital of the Republic of Senegal, during the period 1960-2013 from four climatic variables: minimal temperatures, maximal temperatures, average temperatures and totals rainfalls. The results of the analysis indicate a trend on the temperatures quasi-stable from 1960 to 1994. After 1994, year of break, the increase of the temperatures becomes very significant. This increase between 1995-2013 and 1960-1994 is on average 0.9 °C (that is an increase of 3.5 %), was not constant during all the period and is more important on the dry season (1 °C or an increase of 4.4 %) and on the minimal temperatures (1 °C or an increase of 4.9 %). For rainfall, no significant trend was observed, though a decline of 211 mm (or 36.2 %), from 1969, rainfall totals of about - 0.020 mm/year. These different results highlight the presence of climate change in the Dakar area, with multiple consequences for man and the environment.

Keywords: climate change, global warming, statistical tests, trend, rupture

## 1. Introduction

Les changements climatiques désignent le phénomène d'augmentation, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années, de la température moyenne des océans

et de l'atmosphère, de la diminution de la pluviométrie en quantité et en durée, de l'accentuation des catastrophes naturelles... [1]. L'augmentation de la température de la surface du globe au cours du siècle dernier est de l'ordre



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attributions 4.0 International.

This article is available under Creative Commons Attribution 4.0 International License.

de  $0,6 \pm 0,2$  °C [2]. Selon les hypothèses retenues et les modèles employés, les prévisions pour les 50 années à venir vont de 2 à 6 °C [1]. Bien que la planète Terre ait déjà connu des périodes de réchauffement, la hausse des paramètres n'a jamais été aussi rapide. Dans son acception commune, ce terme est appliqué au changement climatique observé depuis la fin du XXe siècle. Les experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont constaté la hausse deux fois plus importante des minimas par rapport aux maximas des températures, 0,2 °C contre 0,1 °C par décennie respectivement [2]. Le changement climatique est une importante question environnementale, sociale et économique qui menace la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le développement [3].

De récents rapports produits par le GIEC concluent le changement du climat mondial. Cette tendance au réchauffement semble plus corrélée à la forte augmentation dans l'atmosphère de la concentration de gaz à effets de serre tels que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le dioxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [1]. Ces gaz seraient les principaux responsables du changement climatique. Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et l'apparition du changement climatique dans le monde n'est plus discutable [4]. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer. Les tendances relevées dans plus de 89 % de 29 000 séries de données vont dans le sens d'un réchauffement du climat [5]. On s'attend également à des événements météorologiques extrêmes, notamment les inondations, les sécheresses et les tempêtes tropicales qui vont augmenter en fréquence et en intensité à travers le continent africain.

Les changements climatiques sont devenus une grande menace quotidienne pour la planète en raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel. Ils ont pour effets le réchauffement atmosphérique de l'ordre +0,74 °C entre 1906 et 2005, la réduction de la production agricole, la détérioration de la sécurité alimentaire, l'incidence accrue des inondations et de la sécheresse, la propagation des maladies et l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres et de l'eau et l'avancée des mers sur les continents suite à la fonte des calottes glaciaires [1].

Ces projections sont conformes aux récentes tendances climatiques en Afrique de l'Ouest. Les variations de pluies mensuelles et interannuelles au Sahel aux horizons 2031-2040 et 2091-2100 par rapport aux valeurs observées de la période 1991-2000, ont été calculées et montrent que contrairement à la température dont les évolutions futures sont à la hausse, les précipitations connaissent des évolutions très variables en fonction de la zone géographique [6]. La zone de l'Afrique de l'Ouest (le Sénégal y compris) est insérée dans un contexte de réchauffement global tel que souligné par le GIEC [7], Diop [8], Leroux [9, 10], Sagna [11, 12]. Le réchauffement global conjugué à la variabilité accrue des précipitations et la recrudescence de phénomènes extrêmes peut avoir des impacts importants sur les systèmes naturels et humains des territoires, d'où l'importance de l'étude de leur évolution climatique.

L'étude de l'évolution climatique à l'échelle d'un territoire (régional par exemple) est une préoccupation croissante tant pour la communauté scientifique que pour les acteurs territoriaux. Elle vise à caractériser les variations climatiques récentes et à définir les futures évolutions afin de mettre en place des stratégies d'adaptation sur des échelles spatiales opérationnelles comme la région [13]. Ces stratégies cherchent à réduire la vulnérabilité du territoire étudié face aux changements climatiques. La présente étude s'inscrit dans cette démarche qui a pour objectif, d'étudier certains impacts liés aux changements climatiques et de proposer des mesures d'adaptation nécessaires. Ainsi, l'article porte sur la première étape de l'élaboration d'une stratégie qui est un diagnostic des variations climatiques récentes dans la région de Dakar (Figure 1).

La région de Dakar est une presqu'île d'une superficie de 550 km<sup>2</sup> située à l'extrême ouest du Sénégal. Plus petite région du pays (0,28 % du total national), Dakar renferme l'essentiel des infrastructures et concentre 3 137 196 habitants [14]. Le climat de la région de type canarien, subit fortement l'influence des facteurs géographiques et atmosphériques [11] ; [8]. Par la présence d'une façade maritime ceinturant presque toute la région, il est caractérisé, pendant une bonne (à préciser) (1/2, 2/3 de l'année) période de l'année, par un microclimat marqué par l'influence de l'alizé maritime, d'où l'existence d'une fraîcheur et d'une humidité quasi-permanente et relativement forte de l'ordre de 25%.

---

Toutefois, l'harmattan, alizé continental saharien, se fait sentir faiblement en saison sèche. La température y varie entre 17 et 25° C de décembre à avril et de 27 à 30° C de mai à novembre. Quant à la pluviométrie, elle est caractérisée par une durée de l'hivernage relativement courte, variant entre 3 et 4 mois (entre juillet et octobre).

La région de Dakar se situe généralement entre les isohyètes 300 et 600 mm.

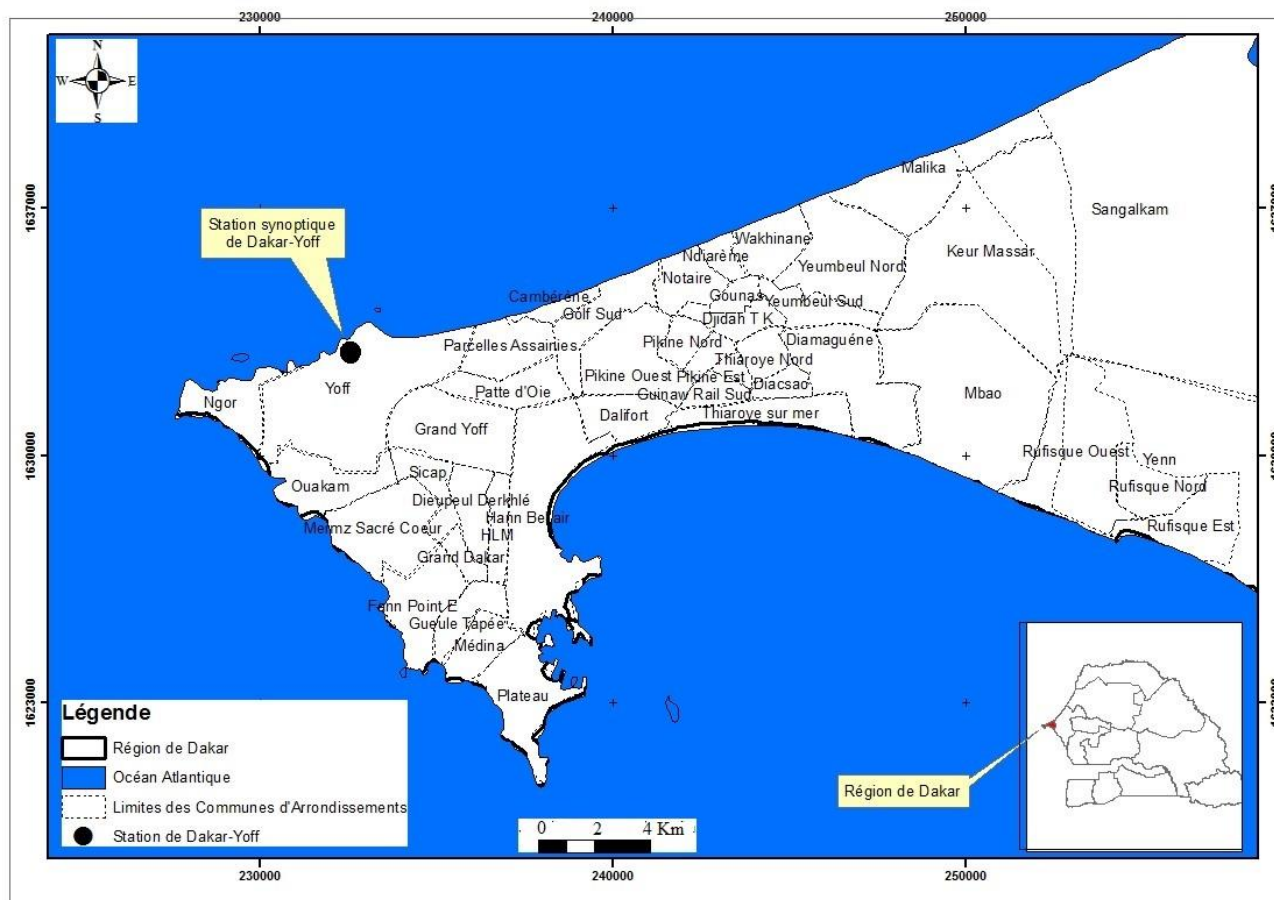


Figure 1: Localisation de la station synoptique de Dakar-Yoff dans la région de Dakar et (Source : CSE/Sénégal)

Dans cette étude, la variabilité et les tendances des températures et des précipitations annuelles, saisonnières et mensuelles de la ville de Dakar sont examinées. Les données climatologiques utilisées concernent les variables annuelles de températures maximales, minimales et moyennes, et de cumuls de pluie sur la période 1960-2013. Les séries de températures et de précipitations sont soumises à deux tests: tests de Mann-Kendall et de Pettitt, qui permettent de caractériser la variabilité et la détection de tendance. Les résultats obtenus sont analysés et discutés.

## 2. Données et méthodes

Pour mener à bien toute étude sur la détection de changements graduels ou brusques dans les séries climatiques, Kundzewicz et Robson [15] ont proposé la démarche suivante : préparation d'un jeu de données convenable ; analyse exploratoire ; mise en œuvre de tests statistiques appropriés et interprétation des résultats. Ces tests statistiques nécessitent la vérification de quelques hypothèses de base.

### 2.1. Données

A Dakar, le réseau d'observations pluviométriques est constitué de stations dont une synoptique. Parmi

celles-ci seule la station de Dakar-Yoff a été retenue. Cette station localisée à 14°7' de latitude Nord et 17°5' de longitude Ouest est située à proximité de la côte nord, à Dakar. Le choix de cette station a été fait en fonction du nombre important d'années d'observations et de l'absence de lacunes. Le critère lié à la taille de l'échantillon est basé sur les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui préconise l'utilisation d'une période minimale d'observation de 30 ans pour toute étude sur l'évolution du climat [16]. La présence de lacunes dans les séries pluviométriques concernées est susceptible de biaiser leur analyse. Les séries de données de températures et de précipitations ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM).

## 2.2. Méthodes : tests statistiques

L'évolution de toutes les variables de températures et de précipitations est évaluée à l'aide de tests statistiques. Cette section présente les deux tests utilisés dans cette étude. Précisons que les tests présentés dans cette section font l'hypothèse que les données sont temporellement indépendantes.

### 2.2.1. Test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall (MK) permet de détecter d'éventuels changements graduels dans les séries de variables extrêmes. Selon Mann [17] et Kendall [18], ce test non paramétrique, basé sur le rang permet de déterminer si la corrélation entre le temps et la variable d'étude est significative ou pas. Soit  $(x_1, \dots, x_n)$  un échantillon de valeurs indépendantes relative à une variable aléatoire  $X$  dont on cherche à évaluer la stationnarité. La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit:

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

où  $x_i$  et  $x_j$  sont les valeurs séquentielles des données et  $n$  la taille de l'échantillon. La statistique du test est calculée en dénombrant, pour tous les couples  $(x_i, x_j)_{i < j}$ , le nombre de cas où la seconde valeur est supérieure à la première, et le nombre de cas où elle est inférieure, puis en faisant la différence entre ces deux quantités. La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en utilisant la valeur de  $Z$  :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

En présence de valeurs identiques dans la série, la variance  $S$  peut être définie comme suit:

$$\text{ar}(S) = n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1) / 18 \quad (3)$$

où,  $t_i$  désigne le nombre d'égalités impliquant  $k$  valeurs.

Une valeur positive (ou négative) de  $Z$  indique une tendance ascendante (ou descendante) et sa significativité est comparée à la valeur critique ou seuil de significativité du test.

### 2.2.2. Test de Pettitt

Le test de Pettitt [19] est un test non paramétrique de détection d'une rupture unique à date inconnue. Les hypothèses du test sont  $H_0$ : la série est stationnaire,  $H_1$ : la série présente une rupture. La statistique de test  $Z$  est calculée de la façon suivante:

$$Z = \max |U(k)|, k = 1, \dots, n-1 \quad (4)$$

avec :

$$S = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{signe}(x_j - x_i) \quad (5)$$

Asymptotiquement, la fonction de répartition de  $Z$  peut être approchée par la formule suivante :

$$P(Z \leq z) = 1 - 2 \exp\left(\frac{-6z^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (6)$$

On rejettera donc  $H_0$  au risque  $\alpha$  si la valeur observée de  $Z$  est supérieure au quantile de probabilité  $1-\alpha$  de la distribution ci-dessus. On peut noter que le test fournit également une estimation de la position de la rupture en utilisant l'indice  $k$  correspondant au maximum  $|U(k)|$ .

### 2.2.3. Indice de tendance

Les indices de tendance sont utilisés pour présenter les résultats relatifs aux tests de Mann-Kendall et de régression linéaire. L'indice de tendance  $IT$  (%) est lié au

niveau de significativité  $\alpha$  (%) des tests statistiques. Les indices de tendance sont définis comme suit [20]:

$$IT = \begin{cases} 100 - \alpha & \text{pour les tendances positives} \\ -(100 - \alpha) & \text{pour les tendances négatives} \end{cases} \quad (7)$$

La valeur de l'indice de tendance varie entre - 100 % et + 100 %. Les valeurs négatives correspondent aux tendances à la baisse et les valeurs positives aux tendances à la hausse. Une tendance significative à la baisse au risque de 10 % aura un indice de tendance de - 90 %.

#### 2.2.4. Indice de variation

Cette méthode permet de déterminer le pourcentage de variations de la moyenne de la série considérée d'une sous période  $T_i$  autour de la période T considérée [21]. Pour les variables dont la série chronologique présente une rupture, cette méthode précise le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture et s'obtient par la formule suivante :

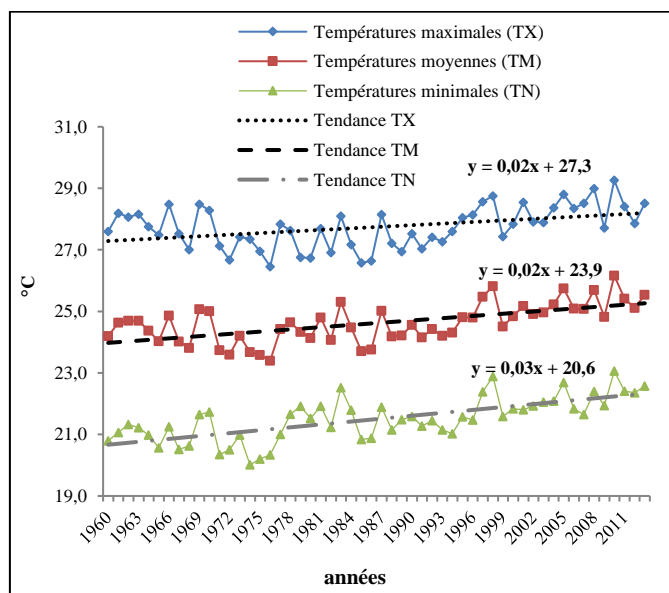
$$D = \left( \frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_i} - 1 \right) \times 100 \quad (8)$$

où  $\bar{X}_j$  est la moyenne de la période après la rupture et  $\bar{X}_i$  la moyenne de la période avant la rupture.

### 3. Résultats

#### 3.1. Variabilité du climat (températures et précipitations)

Les moyennes annuelles des températures ont été calculées avec les deux variables étudiées, les températures minimales (TN) et maximales (TX). La tendance globale est la variation annuelle des températures à la station de Dakar-Yoff. Le coefficient de variation est légèrement plus élevé sur les températures minimales (TN) et moyennes (TM) avec 0,03 que sur les températures maximales (TX) avec 0,02. Les trois variables des températures TM, TX et TN sont représentées sur figure 2.



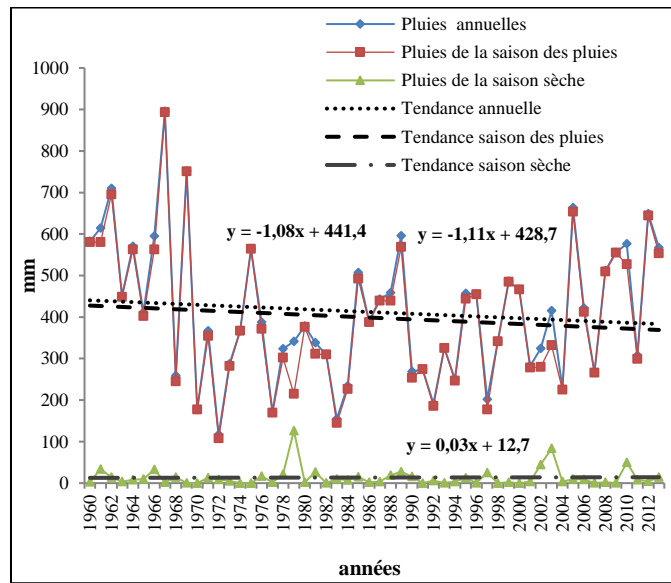


Figure 2: Evolution des températures et des pluies annuelles: moyennes annuelles de TN, de TX et leur moyenne; totaux de précipitations en saison sèche, en saison des pluies et sur toute l'année. En traits discontinus, la tendance respective de chaque paramètre

Ces trois variables TM, TX et TN ont subi une légère augmentation de 1960 à 2013. En conformité à la variation planétaire [22], ce réchauffement de 1960 à 2013 semble avoir été plus important pour les températures minimales (avec 0,51 °C/an) que pour les températures maximales (avec 0,27 °C/an), bien que la différence entre les deux soit très faible (0,24). L'écart type est de 0,6 °C sur la moyenne globale et indique la faiblesse de la variabilité interannuelle par rapport au réchauffement sur la période. La température moyenne à

Dakar est donc passée d'une valeur minimale de 23,4 °C (en 1976) à une valeur maximale de 26,2 °C (en 2010) sur un total de 54 ans. Durant l'année 2010, l'année la plus « chaude » de la série, la température maximale a atteint 29,3 °C et la température minimale 23,1 °C. Quant à 1976, année la plus « froide » de la série, la température maximale n'a pas dépassé 26,5 °C et la minimale seulement 20,3 °C.

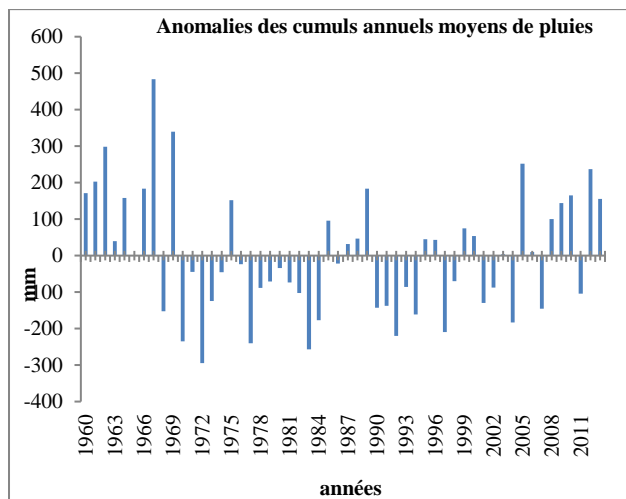
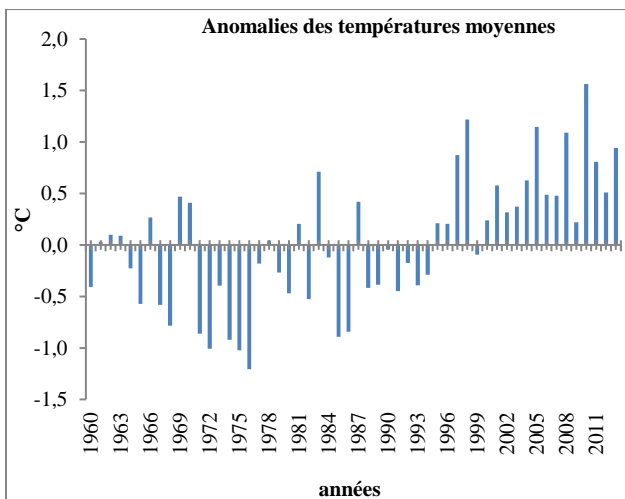


Figure 3: Anomalies de températures moyennes et des cumuls annuels moyens de pluies à Dakar par rapport à la moyenne de la période 1960-2013

La figure 2 présente également l'évolution des totaux de précipitations annuelles et saisonnière (saison des pluies et saison sèche) de 1960 à 2013. Les totaux annuels de précipitations varient entre 895,4 mm en 1967 et 116,7 mm en 1972. L'écart entre le maximum et le minimum de la série est de 778,7 mm. La pluviométrie connaît donc une grande variabilité avec un coefficient de variation de 0,41. Toutefois, la pluviométrie de la saison sèche est plus aléatoire et variable avec  $CV = 1,62$  que celle de la saison des pluies où  $CV = 0,42$ . Contrairement aux températures, il n'y a pas de tendance significative à l'augmentation ou à la diminution des précipitations sur la période 1960-2013.

Les moyennes annuelles sont standardisées par la moyenne de la période 1960-2013. Il en résulte une série d'anomalies annuelles de températures et de précipitations (Figure 3). Ces séries se composent aussi bien d'anomalies négatives que positives.

Pour les températures moyennes annuelles, on distingue une première partie où les anomalies sont majoritairement négatives (le minimum étant de  $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et une seconde partie où elles sont majoritairement positives (le maximum étant de  $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). De plus, les anomalies négatives paraissent moins élevées par rapport à la moyenne que les anomalies positives qui seraient de plus en plus élevées à la fin de la série traduisant une non homogénéité dans le réchauffement. La figure 3 permet de retenir l'année 1976 comme étant exceptionnellement « froide » avec une TM de  $23,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , alors que la valeur moyenne de la série des TM est de  $24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  et 2010 comme une année exceptionnellement « chaude » sur laquelle la TX est de  $29,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  par rapport à une valeur moyenne de  $27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Par rapport aux précipitations, les anomalies des cumuls annuels moyens de pluies de la période 1960-2013 ne sont pas clairement réparties en fonction du temps comme pour les températures moyennes. Elles changent de signe d'une année sur l'autre et le maximum d'années successives de même signe atteint rarement une décennie entière, ce qui appuie l'idée qu'il n'y a pas de tendance significative de l'évolution des précipitations à Dakar. Néanmoins, les trois décennies 1970, 80 et 90

représentent la période la plus déficitaire de la série. Sur la figure 3, l'année 1972 apparaît comme étant exceptionnellement « sèche » avec une anomalie de 295 mm et l'année 1967 comme exceptionnellement « pluvieuse » dont l'anomalie est de 483,7 mm.

### 3.2. Tendances du climat (températures et précipitations)

Les résultats précédents à préciser montrent que la tendance au réchauffement ne semble pas régulière durant toute la période à préciser. Notre objectif a été de chercher des changements de tendances ou une présence de rupture dans les séries de températures et de précipitations mensuelle, annuelle et saisonnière. Pour cela, deux tests sont appliqués: le test de Pettitt et le test de Mann-Kendall.

#### 3.2.1. Tendances annuelles (températures et précipitations)

Le tableau 1 indique les résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures et les précipitations à l'échelle annuelle enregistrées à la station de Dakar-Yoff de 1960 à 2013. Sur les températures minimales, maximales et moyennes, les deux tests (Pettitt et Mann-Kendall) montrent la présence d'une rupture et/ou tendance. Le test de Pettitt indique 1994 comme date de rupture pour les TX et 1996 pour les TN. Ces ruptures sont confirmées par le test de Mann-Kendall qui présente des  $\tau$  de Kendall positifs avec 0,271 pour le TX, 0,511 pour le TN et 0,431 pour le TM. Ainsi la tendance est à la hausse et elle est plus significative sur les TN que sur les TX. Pour quantifier la variation des températures à travers la date de rupture, nous avons découpé la série temporelle en deux sous-périodes: 1960-1994 et 1995-2013. La comparaison des deux sous-périodes montre l'existence d'un excédent de 1,5% entre 1995-2013 enregistré, par rapport à 1960-1994, pour le TX, soit une hausse de  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de 3,6% pour le TM, soit une hausse de  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  et de 4,9% pour le TN soit une hausse de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tableau 1:

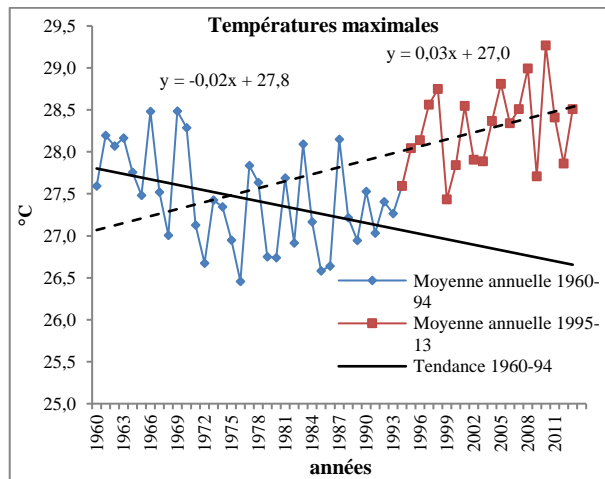
Résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures et les précipitations annuelles enregistrées à la station de Dakar-Yoff de 1960 à 2013.

Test de Mann-Kendall					Test de Pettitt				
Descripteurs	P (mm)	TX	TN	TM	Descripteurs	P (mm)	TX	TN	TM
Tendance	N	O	O	O	Rupture	N	O	O	O
Sens de la tendance	-	hausse	hausse	hausse	p du test	0,065	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
$\tau$ de Kendall	-0,020	0,271	0,511	0,431	Date de rupture	-	1994	1996	1994
S	-29	388	731	616	Moyenne avant rupture	-	27,4	21,2	24,3
p du test	0,835	0,004	< 0,0001	< 0,0001	Moyenne après rupture	-	27,8	22,2	25,2
Pente	-0,42	0,019	0,033	0,026	Excédent en %	-	1,5	4,9	3,6

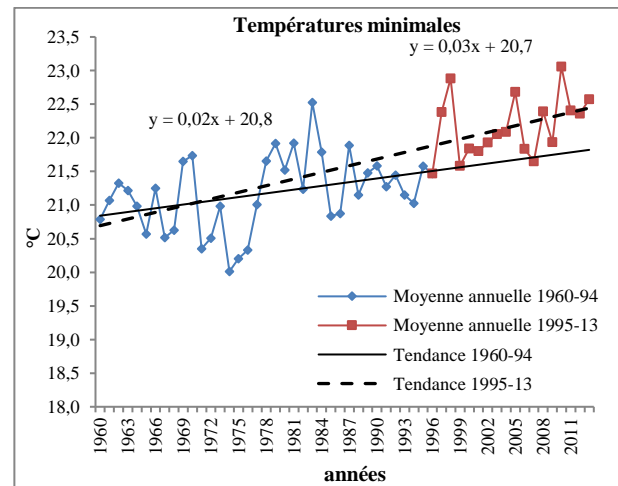
O (oui) = présence d'une tendance ou d'une rupture; N (Non) = absence d'une tendance ou d'une rupture  $\tau$  = Tau de Kendall ; S = S statistique; p du test = p-value unilatérale; TX = Températures maximales; TN = Températures minimales; TM = Températures moyennes; P (mm) = Précipitations

Pour confirmer la non stationnarité des séries de températures à partir de 1994 (pour les TX) et 1996 (pour les TN), la figure 4 des températures annuelles sur la Bourgogne a été scindée en deux parties : la première de 1960 à 1994 et la deuxième de 1995 à 2013. Leurs droites de régression respectives confirment clairement la stabilité de la première période et l'évidence du réchauffement moyen régional pendant la deuxième période.

Pour les précipitations, les tests de Pettitt et de Mann-Kendall n'indiquent ni rupture ni tendance significative, les p des deux tests étant supérieurs au seuil de signification de 0,01. Néanmoins, la courbe d'évolution des totaux annuels de pluies montre une baisse des valeurs notamment à partir des années 70, en illustrent le  $\tau$  et la pente de Kendall qui sont négatifs avec respectivement -0,020 et -0,42. La figure 4 montre une tendance quasiment stable entre 1960-2013.

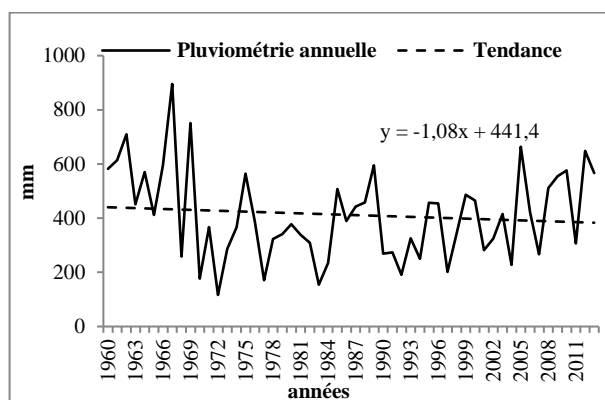


(a)



(b)





(c)

Figures 4: Mise en évidence du changement des tendance sur les températures annuelles à partir de 1994 pour les TX (a), à partir de 1996 pour les TN (b), et évolution des précipitations à la station de Dakar-Yoff 1960-2013 (c)

### 3.2.2. Tendances saisonnières (températures et précipitations)

La zone de Dakar est localisée dans le climat sahélien et enregistre deux saisons au cours de l'année : une saison des pluies et une saison sèche. Pour cette étude et conformément à la position géographique de la zone, la

saison des pluies dure 3 à 4 mois [8,11] de juillet à octobre et la saison sèche 8 à 9 mois, de novembre à juin. Après le découpage, les moyennes des températures (maximales, minimales et moyennes) et des précipitations sont calculées sur la période 1960-2013 à la station de Dakar-Yoff pour chaque saison et les résultats soumis aux deux tests retenus. Le tableau 2 indique les résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures et les précipitations à l'échelle saisonnière. Les résultats des tests sur les variables de la saison des pluies confirment ceux obtenus à l'échelle annuelle.

Pour la saison des pluies, les variables de températures connaissent des ruptures correspondant à une tendance significativement à la hausse. Cette dernière est plus significative sur les TN, le  $\tau$  et la pente de Kendall avec respectivement 0,540 et de 0,024. La rupture est notée en 1994 et l'excédent entre la période 1995-2013 et la période 1960-1994 est de 3% pour les TN, 2,8% pour les TM et 2,6% pour les TX. La pluviométrie de la saison des pluies ne connaît pas de rupture. Sa tendance à la baisse est non significative, le  $\tau$  et la pente de Kendall étant négatifs mais faibles.

Tableau 2:

Résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures et les précipitations saisonnières à la station de Dakar-Yoff (1960-2013)

Descripteurs	Saison des pluies				Saison sèche			
	P (mm)	TX	TN	TM	P (mm)	TX	TN	TM
Tendance	N	O	O	O	N	N	O	O
Sens de la tendance	-	hausse	hausse	hausse	-	-	hausse	Hausse
$\tau$ de Kendall	-0,020	0,370	0,540	0,501	-0,024	0,209	0,472	0,361
S	-29	529	773	717	-34	299	675	517
p du test	0,835	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,805	0,026	< 0,0001	0,0001
Pente	-0,352	0,018	0,024	0,021	-0,01	0,018	0,035	0,028
Descripteurs	Saison des pluies				Saison sèche			
	P (mm)	TX	TN	TM	P (mm)	TX	TN	TM
Rupture	N	O	O	O	N	O	O	O
p du test	0,0535	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,8694	0,0009	< 0,0001	< 0,0001
Date de rupture	-	1994	1994	1994	-	1994	1995	1994
Moyenne avant rupture	-	30,1	24,6	27,3	-	26,1	19,8	22,8
Moyenne après rupture	-	30,8	25,4	28,1	-	27,0	20,5	23,8
Excédent en %	-	2,6	3,0	2,8	-	3,6	3,7	4,4

Par rapport à la saison sèche, le constat reste le même que précédemment avec une rupture (généralement en 1994) et une tendance significative à la hausse sur les

variables de températures, alors que la série des précipitations est stationnaire. Dans ce cas aussi, les TN enregistrent la tendance la plus significative ( $\tau$  de

Kendall = 0,472) alors que les TX ont une tendance non significative. L'excédent entre la période 1995-13 et la période 1960-94 est de 3,7% pour les TN, 3,6% pour les TM et 4,4% pour les TX. Aucune rupture n'est notée sur les pluies de « heug » de la saison sèche.

De façon générale, le réchauffement de la saison des pluies est supérieur au réchauffement de la saison sèche sur les trois variables de précipitations, alors que pour la pluviométrie, le déficit est plus intense en saison sèche qu'en saison des pluies.

### *3.2.3. Tendances mensuelles (températures et précipitations)*

Le  $\tau$  elle ne soit pas significative représente les résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures et les précipitations à l'échelle mensuelle à la station de Dakar-Yoff entre 1960 et 2013.

Sur les températures, les ruptures et ou tendances notées à l'échelle annuelle et saisonnière sont répertoriées à l'échelle mensuelle. Cependant, elles ne sont pas généralisées sur les douze mois de l'année. En effet, l'analyse des résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall permet de diviser l'année en deux sous-périodes : une sous-période sur laquelle une rupture est notée et une autre sur laquelle il n'y a pas de rupture. Les mois sur lesquels une rupture est notée avec le test de Pettitt sont au nombre de 6 (juillet à décembre) sur les variables TX et de 10 mois sur les TN (seuls mai et juin sont exclus).

La comparaison des régimes thermiques mensuels avant et après rupture montre clairement une tendance à l'augmentation des températures tout au long de l'année. Cette augmentation atteint son maximum pendant l'été et spécialement au mois d'août. De façon générale, lorsqu'une rupture est présente (test de Pettitt), une tendance (test de Mann-Kendall) est également repérée et inversement. Toutefois, les mois de juillet pour les TX et juin pour les TN présentent un résultat atypique. Ainsi, même les autres mois qui ne présentent pas de rupture ont des  $\tau$  et des pentes de Kendall positifs, ce qui indique une tendance à un réchauffement malgré qu'elle ne soit pas significative

Les totaux mensuels de pluies n'ont connu, à l'image des totaux annuels de pluies, aucune rupture ou tendance significative car les  $p$  des tests sont supérieurs au seuil de signification qui est de 0,01. La tendance générale est à la baisse (mais une baisse non significative) des valeurs sur 9 mois avec des  $\tau$  de Kendall négatifs (à l'exception

des mois de septembre, mars et novembre avec respectivement 0,026 ; 0,133 et 0,192). Le mois de juin enregistre la baisse la plus élevée avec un  $\tau$  de Kendall de -0,057 soit une diminution de 79 mm/an et le mois de novembre la hausse la plus importante.

### **3. Discussion**

Les résultats des tests statistiques ont permis de déceler des ruptures dans les séries de températures majoritairement situées sur la décennie 1990. La période 1960-2013 a été marquée par une augmentation des températures et une quasi-stationnarité des précipitations.

Contrairement à la précipitation qui a connu une baisse, la température annuelle moyenne a augmenté d'environ 0,9 °C au cours de la période 1960-2013 dans la ville de Dakar avec un maximum de 2,3 °C. La tendance au réchauffement est principalement enregistrée au cours des saisons estivales, avec une différence de valeurs maximales atteignant 3 °C en juin. Cette hausse des températures peut être expliquée soit par l'influence croissante des systèmes de hautes pressions subtropicales qui favorisent des conditions de stabilité de masses d'air et une insolation maximale [23], soit par l'action de la North Atlantic Oscillation (NAO) dont le saut a appuyé les effets du réchauffement global [24].

Cette tendance au réchauffement est plus importante sur les températures minimales qui connaissent une hausse moyenne de 1 °C que sur les maximales dont la hausse moyenne est de 0,4 °C. Ce constat confirme l'étude du CILSS [6] qui indique une hausse toutefois plus importante sur les températures minimales (jusqu'à plus de +1 °C) que sur les maximales (jusqu'à +0,5 °C). Selon les observations sur le climat [1], il s'avère que l'Afrique a subi une hausse des températures, de l'ordre de 0,6 à 0,7 °C, plus rapide que la moyenne mondiale, comme nous le signalons.

Ces résultats sont en conformité avec ceux du GIEC [7], de Diop [8], de Leroux ([9, 10] et de Sagna [11, 12] qui ont souligné un contexte de réchauffement global. Toutefois, ce réchauffement est en contradiction avec l'étude de Sagna [25] sur la ville de Dakar qui en analysant la situation météorologique des 16 et 17 février 2014 a indiqué un refroidissement du temps. Cet événement météorologique surprenant par son importance constitue un important refroidissement du temps à Dakar dans un contexte de réchauffement

climatique. Ainsi, il n'entrave en rien le réchauffement constaté dans la zone.

Il est également possible que la hausse des températures soit contaminée par la croissance des

agglomérations et par conséquent par l'impact des îlots de chaleur urbains [24]-

Tableau 3:

Résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures (maximales, minimales et moyennes) et les précipitations mensuelles à la station de Dakar-Yoff (1960-2013)

<b>Températures maximales (TX)</b>		<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
<b>Test de Mann-Kendall</b>	Tendance	N	N	N	N	N	N	N	O	O	O	O	O
	Sens de la tendance	-	-	-	-	-	-	-	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse
	$\tau$ de Kendall	0,101	0,050	0,050	0,057	0,111	0,132	0,206	0,262	0,356	0,374	0,253	0,280
	S	144	71	72	81	158	189	295	374	509	535	361	401
	p du test	0,28	0,601	0,596	0,551	0,241	0,161	0,028	0,005	0,000	< 0,0001	0,007	0,003
	Pente	0,016	0,008	0,006	0,008	0,015	0,013	0,014	0,014	0,020	0,020	0,027	0,029
<b>Test de Pettitt</b>	Rupture	N	N	N	N	N	N	O	O	O	O	O	O
	p du test	0,185	0,304	0,398	0,310	0,094	0,023	0,001	0,001	< 0,0001	< 0,0001	0,001	0,001
	Date de rupture	-	-	-	-	-	-	1994	2000	1994	1994	1993	1993
	Moyenne avant rupture	-	-	-	-	-	-	29,6	30,0	30,3	30,4	28,9	26,3
	Moyenne après rupture	-	-	-	-	-	-	30,4	30,7	31,1	31,4	30,3	27,8
	Excédent en %	-	-	-	-	-	-	2,5	2,5	2,6	3,2	4,8	5,7
<b>Températures minimales (TN)</b>		<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
<b>Test de Mann-Kendall</b>	Tendance	O	O	O	O	N	O	O	O	O	O	O	O
	Sens de la tendance	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	-	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse	Hausse
	$\tau$ de Kendall	0,351	0,310	0,317	0,309	0,211	0,256	0,459	0,456	0,439	0,496	0,398	0,447
	S	502	443	453	441	301	366	655	649	626	708	568	638
	p du test	0,0002	0,001	0,001	0,001	0,025	0,006	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
	Pente	0,042	0,033	0,025	0,029	0,023	0,024	0,023	0,017	0,020	0,036	0,039	0,054
<b>Test de Pettitt</b>	Rupture	O	O	O	O	N	N	O	O	O	O	O	O
	p du test	0,0001	0,001	0,003	0,004	0,037	0,013	< 0,0001	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	0,0001	0,0001
	Date de rupture	1990	1988	1994	1978	-	-	1994	1982	1978	1996	1996	1988
	Moyenne avant rupture	17,2	17,0	17,6	18,2	-	-	24,6	24,7	24,4	24,5	22,3	19,3
	Moyenne après rupture	18,6	18,1	18,6	19,1	-	-	25,3	25,2	25,1	25,8	23,8	20,7
	Excédent en %	8,3	6,5	5,7	5,4	-	-	3,0	2,2	2,9	4,9	6,7	7,3
<b>Précipitations (P mm)</b>		<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
<b>Test de Mann-Kendall</b>	Tendance	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Sens de la tendance	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\tau$ de Kendall	-0,090	-0,045	0,133	-0,062	-0,029	-0,057	-0,003	-0,002	0,026	-0,068	0,192	-0,001
	S	-75	-41	72	-17	-16	-79	-4	-3	37	-96	136	-1,000
	p du test	0,414	0,681	0,242	0,608	0,805	0,556	0,982	0,988	0,788	0,478	0,083	1,000
	Pente	0	0	0	0	0	0	-0,01	-0,02	0,24	-0,08	0	0
<b>Test de Pettitt</b>	Rupture	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	p du test	0,585	0,985	0,205	0,672	0,580	0,684	0,837	0,317	0,549	0,257	0,302	0,866

Dans cette étude, une rupture statistique est détectée en 1994 sur la température moyenne annuelle. Cette rupture est cependant plus tardive comparée aux résultats de Bigot et Rome [26] et de Cuccia [24] qui signalent la présence d'une rupture en 1987 dans des territoires en France comme les Préalpes françaises (dans la région de Auvergne-Rhône-Alpes) et la Bourgogne. Dans la ville de Dakar, des augmentations de +3 °C sont enregistrées en juin depuis 1960, soit près de 6 fois le taux de réchauffement indiqué par le GIEC [1]. Ce constat traduit comme le signalent Leroy *et al.* [13] un réchauffement très rapide des températures moyennes de l'air durant la saison des pluies et une évolution du climat vers des influences plus chaudes, de l'ordre de +1,1 °C à l'échelle annuelle [13].

De plus, le changement de tendance observé dans la ville de Dakar en 1994 a été plus tardif comparé au changement de tendance à l'échelle mondiale intervenu à la fin des années 70 [22]. Il y a donc un effet retard du réchauffement à Dakar causé hypothétiquement par la North Atlantic Oscillation [24] et le El Niño Southern Oscillation [27] qui ont masqué le réchauffement global en Afrique et en particulier à Dakar.

De part et d'autre de la date de rupture 1994, les différences de moyennes des variables ont permis de quantifier le réchauffement entre 1995-2013 et 1960-1994, et indiquent une augmentation moyenne annuelle de 0,9 °C. Ces résultats sont en concert avec ceux de Sarr [28] pour qui, la période actuelle 1990-2007 a été particulièrement chaude en Afrique et les écarts de température comparée à la période 1951-1979 ont atteint 0,99 °C pour les températures moyennes, 1,44 °C pour les minimales et 0,53 °C pour les maximales. Il en est de même que ceux de recherches menées, au Sénégal, sur la base de scénarios d'émission de GES et qui prédisent un réchauffement de l'ordre de 2 à 4 °C [29, 30]. Ces résultats sont dans la marge de ceux du GIEC [1] qui prédit d'ailleurs la hausse des températures moyennes entre 1980-99 et 2080-99 qui s'échelonne entre 3 et 4 °C sur l'ensemble du continent africain, soit 1,5 fois plus qu'au niveau mondial. Cette hausse serait de l'ordre de 3 °C au sein des espaces côtiers semblables à ceux du Sénégal en général et de Dakar en particulier.

Les précipitations annuelles sont restées quasi-stationnaires sur l'ensemble de la région bien qu'une baisse des cumuls annuels de précipitations a été notée. L'affaiblissement de la cyclogenèse dans la ville de Dakar lié à une diminution en fréquence des régimes de temps associés à un flux de sud sud-est semble être à l'origine de la baisse des précipitations. Cette évolution

est confirmée par l'analyse des tendances à la baisse indiquées par la diminution des totaux et du nombre de jours de pluie à Dakar [8], notamment durant la phase de sécheresse des années 70. Cette diminution importante et continue du nombre de jours de pluie s'observe un peu partout au Sahel [31-34] et a des conséquences sur les caractéristiques de la saison des pluies. Dans la zone, la transition vers cette sécheresse fut d'autant plus violente qu'elle succédait directement à la période la plus arrosée du siècle des années 1950 et 1960 [35, 36].

Les déficits pluviométriques entre les périodes 1970-2013 et 1960-1969 sont de 211 mm (soit une baisse de 36,2 %) et ont confirmé la tendance générale à la baisse de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest [36] ; Mahé et L'Hôte [36], notamment au Sénégal [11,8,37]. Ces déficits pluviométriques sont cependant moins importants que ceux indiqués par L'Hôte *et al.* [36] au Sahel (15 à 20%) et Faye [37] au Sénégal (13,9 à 30,5%). Les déficits pluviométriques montrent que le fait marquant à partir de 1970 est la diminution persistante des pluies comme l'ont notée L'Hôte *et al.* [36] ; Mahé et L'Hôte [38] dans toute l'Afrique de l'Ouest notamment le Sahel.

Les précipitations moyennes annuelles, mesurées à Dakar, connaissent une augmentation depuis la fin des années 1990, une amélioration pluviométrique qui contraste avec les années précédentes de sécheresse pluviométrique. Cette amélioration pluviométrique a poussé certains auteurs comme Sene et Ozer [39] ; Niang *et al.* [40] ; Hountondji *et al.* [41] ou encore Ozer *et al.* [34] à estimer la fin de la sécheresse, ce qui ne semble pas être le cas ailleurs au Sahel. Ainsi, pour Hote *et al.* [36] ou [33], la sécheresse évolue peu depuis la fin des années 1960 et le sahel reste dramatiquement déficitaire.

#### 4. Conclusion

L'analyse des températures maximales, minimales et moyennes, et des précipitations à Dakar, aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle, permet de dégager les conclusions suivantes :

- Les températures de l'air montrent une tendance à la hausse sur la période 1960-2013. Elles se caractérisent également par une forte variabilité interannuelle illustrée par une rupture pendant la décennie 1990. Ce réchauffement récent moyen, de 0,51 °C/an et 0,27 °C/an respectivement pour les températures minimales et maximales, n'a pas été

homogène sur l'ensemble de l'année. Les températures étaient quasi-stables entre 1960 et 1994 et un changement de tendance est observé à partir de 1995. Ainsi, un réchauffement est mis en évidence avec un effet de retard. Entre 1995-2013 et 1960-1994, une augmentation moyenne annuelle de 0,9 °C (soit une hausse de 3,5 %) est notée. A l'échelle saisonnière, le réchauffement est plus important en saison des pluies (avec 0,8 °C en moyenne) qu'en saison sèche (avec 0,7 °C en moyenne). Du point de vue mensuel, le réchauffement a été plus marqué en octobre avec une hausse moyenne de 1 °C. De façon générale, les températures minimales (avec une hausse moyenne de 1 °C) augmentent plus que les températures maximales (avec une hausse moyenne de 0,4 °C).

- Les précipitations connaissent d'abord une diminution durant les décennies 1970 et 80, et ensuite une augmentation depuis la fin des années 1990. Cette amélioration pluviométrique contraste avec les années précédentes de sécheresse pluviométrique. La réalité statistique des séries présentées rompt d'ailleurs avec l'idée couramment admise d'une baisse à venir des précipitations sur le continent africain. Les tendances sur les précipitations ne sont pas significatives bien qu'il semble clairement exister une baisse générale des cumuls de pluie, aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle, de l'ordre de -0,02 mm/an. Avec l'installation de la sécheresse durant les années 1970, cette baisse entre 1970-2013 et 1960-1969 à Dakar-Yoff est très importante avec 221 mm soit un déficit de 36,2%.

Le tournant climatique des années 1970 pour les précipitations, mais aussi des années 1990 pour les températures est donc confirmé à la lumière des résultats obtenus. Néanmoins, devant la difficulté à saisir toute la complexité de la dimension temporelle du signal climatique, l'étude devra être étendue à d'autres dimensions (spatiale), d'autres phénomènes (*upwelling* côtier) et d'autres variables (évapotranspiration potentielle et réelle, directions de vents, nombre d'orages ou encore variations de types de temps depuis 1960) pour mieux caractériser le changement climatique dans la ville de Dakar.

Finalement, du point de vue méthodologique, nous montrons que les méthodes de Mann-Kendall (1975) et de Pettitt (1979) utilisés pour la détermination respective d'une tendance et d'une rupture sur des séries, sont adaptées pour caractériser la variabilité des températures

et des précipitations dans la zone d'étude. Toutefois, ils éprouvent souvent certaines difficultés à détecter une date exacte de rupture et une tendance significative à la baisse de la pluviométrie annuelle à Dakar.

## REFERENCES

- [1] GIEC, 2007: *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., A. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA, 18 p.
- [2] DENEUX M., Rapport sur l'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2(2002) : 296-329.
- [3] Climate Change and the Millennium Development Goals. Disponible sur : [http://www.undp.org/climatechange/cc\\_mdgs.shtml](http://www.undp.org/climatechange/cc_mdgs.shtml) (consulté le 05/01/2016)
- [4] YANDA P. Z., Climate change impacts, vulnerability and adaptation in Southern Africa, *Sarua Leadership Dialogue Series*, 2 (4) (2010): 11-30.
- [5] Changements Climatiques 2008. Rapport de synthèse. IPCC, OMM, PNUE. ISBN 92-9169-222-0, 114 p.
- [6] CILSS, 2008: Climate and Climate Change. The Atlas on Regional Integration in West Africa. Environment Series. CEDEAO-Club /Sahel/OCDE Disponible sur : [www.atlas-westafrica.org](http://www.atlas-westafrica.org) (consulté le 08/01/2016)
- [7] GIEC, 2013 : Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. OMM, PNUE, 14 p.
- [8] DIOP C., 2013, « *Etude comparative des quartiers de Ndénatte, Nord-Foire-Azur, Hann-Montagne-IV et Hann Mariste à Dakar : Caractérisation climatique, dégradation du cadre environnemental et impacts sanitaires* », Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 287 p.
- [9] LEROUX M., 2005. *Global warming: Myth or reality? The erring ways of climatology*, Praxis-Springer-Sciences, Environment Sciences, London, Berlin, New York, 506 p.
- [10] LEROUX M., 2010: *Dynamic analysis of weather and climate*, Atmospheric Circulation, Perturbations, Climate Evolution, Springer, Praxis Publishing, UK, 422 p.
- [11] SAGNA P., 2008 : L'évolution du climat au Sénégal, Forum régional sur les changements climatiques en Afrique de l'Ouest, Dakar, 6 et 7 septembre 2008, 15 p.
- [12] SAGNA P., 2005, « *Dynamique du climat et de son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique occidentale* », Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 786 p.
- [13] LEROY E., ROME S., BIGOT S., 2012: Variabilité spatio-temporelle de la température de l'air (1950-2009) dans le département de la Drôme (région Rhône-Alpes, France). *Bigot & Rome. Association Internationale de Climatologie*, Grenoble, France. 25 (2012) : 469-474.
- [14] AGENCE NATIONALE DE LA STATISTIQUE ET DE LA DEMOGRAPHIE, 2013: Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage (RGPHAE). Rapport provisoire, mars 2014, 36 p.
- [15] KUNDZEWICZ Z. W. and ROBSON A., Change detection in river flow records-review of methodology, *Hydrological Sciences Journal*, 49 (1) (2004): 3 - 6.

- [16] OMM. 1994 : Guide des pratiques hydrologiques: acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. Organisation Météorologique Mondiale- N°168, Genève, 829 p.
- [17] MANN H. B., Non-parametric tests against trend, *Econometrica*, 13 (1945): 245 - 259.
- [18] KENDALL M. G. 1975: Rank correlation methods. Griffin, London, 202 p.
- [19] PETTITT A. N., A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28 (2) (1979) 126-135.
- [20] KUNDZEWICZ Z. W., GRACZYK D., MAURER T., PINSKWAR I., RADZIEWJEWISKI M., SVENSSON C., SZWED. M., Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow, *Hydrological Sciences Journal*, 50 (5) (2005) 797 - 810.
- [21] MAHE G., OLIVRY J-C., Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989, *Sécheresse*, 6 (1) (1995) 109-117.
- [22] IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller H.L. (Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K. and New York, U.S.A., 996 p.
- [23] LESPINAS F., 2008, « *Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon* ». Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan, 334 p.
- [24] CUCCIA C., 2008 : Changements climatiques observés en Bourgogne depuis 1961 : Etude des variations de températures et de précipitations. Mémoire de Master Recherche Géobiosphère, Université de Bourgogne, 52 p.
- [25] SAGNA P., 2013 : Important refroidissement du temps à Dakar dans un contexte de réchauffement climatique : analyse de la situation météorologique des 16 et 17 février 2014. *Annales de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines*, 43(B), 95-117.
- [26] BIGOT S. ET ROME S., 2010: Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures. *EchoGéo*, 14, mis en ligne le 16 décembre 2010. URL : <http://echogeo.revues.org/12160>
- [27] LOUVET S., 2008, « *Modulations intrasaisonnières de la mousson d'Afrique de l'ouest et impacts sur les vecteurs du paludisme à Ndiop (Sénégal) : diagnostics et prévisibilité* ». Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 253 p.
- [28] SARR B., 2010: Le réchauffement climatique » In : Le Sahel face aux changements climatiques Centre Régional. Enjeux pour un développement durable. AGRHYMET/CILSS, Bulletin Mensuel Numéro spécial, 5-8.
- [29] GAYE, A.T., DABO, E.M.F., SALL, S.M., SAMBOU, E., FONGANG, S., 1998 : Scénarios de changements climatiques pour des études d'impacts sur l'agriculture et les zones côtières du Sénégal. Ministère Environnement, Dakar, 16 p.
- [30] MALOU R., DACOSTA H., TANDIA A.A., GAYE A. DIENE M., 1999 : Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques dans la deuxième communication. Dakar, Direction de L'Environnement et des Etablissements Classés (DEEC), 89 p.
- [31] SANE T., DIOP M., SAGNA P., Etude de la qualité de la saison pluvieuse en Haute-Casamance (Sud Sénégal). *Sécheresse*, 19 (2008) : 23-28.
- [32] FRAPPART F., HIERNAUX P., GUICHARD F., MOUGIN E., KERGOAT L., ARJOUNIN M., LAVENU F., KOITE M., PATUREL J.E., LEBEL T., Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375 (2009): 128-142.
- [33] LEBEL T., ET ALI A., Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 375 (2009): 52-64.
- [34] OZER P., HOUNTONDJI Y.C., NIANG A.J., KARIMOUNE S., LAMINO MANZO O., SALMON M., Désertification au Sahel : Historique et perspectives. *BSGL*, 54 (2010) : 69-84.
- [35] OZER P., ERPICUM M., Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse*, 6 (1995) : 103-108.
- [36] L'HÔTE Y, MAHÉ G, SOME B, TRIBOULET JP., Analysis of a Sahelian rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues. *Hydrological Sciences* 47(4) (2002): 563-572
- [37] FAYE C., 2013, « *Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé* », Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 p.
- [38] MAHE, G. ET L'HOTE, Y., Sahel : une sécheresse persistante et un environnement profondément modifié. *La Météorologie*, 8 (44) (2004) : 2-3.
- [39] SENE S., OZER P., Evolution pluviométrique et relation inondations - événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42 (2002) : 27-33.
- [40] NIANG, A.J., OZER, A., OZER, P. Fifty years of landscape evolution in South-Western Mauritania by means of aerial photos. *Journal of Arid Environments*, 72 (2008): 97-107
- [41] HOUNTONDJI Y.C., SOKPON N., NICOLAS J., OZER P., Ongoing desertification processes in the Sahelian belt of West Africa: an evidence from the rain-use efficiency. In: *Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment*; Röder A., Hill J. ISPRS Series, Taylor and Francis, 2009, 173-186.