

Perception scientifique du changement climatique dans la zone soudano-sahélienne du Cameroun

Abou SALE^{1*}, Anselme WAKPONOU² et Natali KOSSOUMNA LIBA'A¹

¹Université de Maroua (UMa), Ecole Nationale Supérieure Polytechnique (ENSP), Département de Météorologie et Climatologie (MC), Cameroun

²Université de Bertoua, Ecole Normale Supérieure (ENS), Département de Géographie, Cameroun

(Reçu le 19 Février 2024 ; Accepté le 23 Avril 2024)

* Correspondance, courriel : saleabou@yahoo.fr

Résumé

Le présent article traite de la perception scientifique du changement climatique dans le Sahel, en particulier dans la région semi-aride du Cameroun. Son objectif consiste à identifier la tendance d'évolution des précipitations et températures, et de leurs corrélations dans la région. Les données pluviométriques (1951-2013) et thermométriques (1960-2004) ont été collectées à la Direction Régionale de la Météorologie, puis analysées grâce aux outils statistiques du logiciel XL-STAT. Il ressort de cette étude que la tendance générale des précipitations est à la baisse, évaluée à environ 0,1467 mm par an de 1951 à 2013, soit une baisse totale d'environ 9 mm. La décennie 1980 reste la plus sèche, alors que les décennies 1950, 1960, 1970, 1990 et 2000 sont globalement excédentaires, et donc humides. Il ressort qu'il n'y a pas encore de rupture pluviométrique dans la région malgré la baisse et la forte variabilité interannuelle des précipitations. Les températures moyennes annuelles maximales et minimales sont en constante hausse, respectivement d'environ 0,0384°C et 0,037°C, correspondant à des hausses de 1,73°C et 1,67°C. Les décennies 1970 et 1990 constituent les plus chaudes, aussi bien pour les températures moyennes maximales que minimales. Les températures contrairement aux précipitations, ont connu des ruptures durant les années 1989 et 1978, respectivement pour les températures maximales et minimales. Il ressort également que la forte corrélation entre les précipitations et les températures indique que dans un avenir proche, les précipitations connaîtront une probable rupture.

Mots-clés : *perception scientifique, changement climatique, précipitations, températures, soudano-sahélienne.*

Abstract

Scientific perception of the climate change in the sudano-sahelian zone of Cameroon

This article deals with the scientific perception of the climate change in the Sahel, particularly in the semi-arid region of Cameroon. Its objective is to identify the precipitations and temperatures' trends, and their correlations in the region. The pluviometric data (1951-2013) and thermometric data (1960-2004) were collected at the Meteorology Regional Delagation, then analyzed using the statistical tools of the XL-STAT software. It emerges from this study that the general trend of precipitations is decreasing, estimated at approximately

0.1467 mm per year from 1951 to 2013, corresponding approximately to a total drop of 9 mm. The 1980 decade remains the driest, while the 1950, 1960, 1970, 1990 and 2000 decades are generally wet. It emerges that there is not yet a rainfall break in the region despite the drop and high interannual variability of the precipitations. The average annual maximum and minimum temperatures are constantly increasing, respectively by approximately 0.0384°C and 0.037°C , corresponding to an increase of $1,73^{\circ}\text{C}$ et $1,67^{\circ}\text{C}$. The 1970 and 1990 decades are the warmest, both for the annual maximum and minimum average temperatures. The temperatures, contrary to the precipitations, experienced breaks periods, during the years 1989 and 1978 respectively for the maximum and minimum temperatures. It also comes out that the strong correlation between precipitations and temperatures indicates that in the near future, precipitations will experience a probable break.

Keywords : *scientific perception, climate change, precipitations, temperatures, Sudano-Sahelian.*

1. Introduction

Le réchauffement climatique est une réalité irréversible car même si toutes les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) émanant de tous les secteurs d'activités sont réduites à zéro, ce réchauffement se poursuivra encore durant des décennies [1]. Ce réchauffement climatique est à l'origine du changement climatique, défini par le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat) comme étant un changement progressif du climat induit par la conjugaison des facteurs anthropiques et naturels [2]. Dans la région sahélienne en particulier, à cause de la forte dépendance des populations de l'agriculture, les précipitations et les températures constituent les principaux paramètres climatiques d'intérêt des scientifiques [3]. L'analyse des diverses perceptions scientifiques de l'évolution des précipitations et des températures dans le Sahel montre de profondes divergences dans et entre les différentes régions sahéliennes [4, 5]. Pour ce qui est des précipitations, la répartition dans le temps de bonnes et mauvaises années n'est pas la même dans l'ensemble du Sahel, c'est-à-dire qu'il existe des régimes pluviométriques différents, non corrélés, dans les grandes régions climatiques du continent ; de plus, dans une même sous-région sahélienne, les pluies sont caractérisées par une grande variabilité interannuelle et intrasaisonnière, et une tendance au regroupement de bonnes et mauvaises années [6, 7]. Même comme la tendance à la hausse des précipitations observée dans la zone à partir de la décennie 1990 fait l'unanimité, et constitue un autre mode de variabilité interannuelle de la pluviométrie qui est due à une alternance brutale entre années sèches et années humides [5], elle correspond simplement pour d'autres auteurs, à une variabilité naturelle dans une longue série d'évolution anthropique à travers une croissante aridification pour [8] ; d'autres encore ont adopté une position intermédiaire et estiment que la sécheresse se poursuit dans le Sahel Ouest au moment où le Sahel Est continue de s'humidifier [5] ; de même, d'autres auteurs soutiennent une thèse contraire à ces derniers et estiment que certes il y a une tendance à l'humidification dans le Sahel Est, mais dans le Sahel Ouest, la tendance n'est pas claire [9]. La perception scientifique des températures quant à elle fait l'unanimité, et pour beaucoup de scientifiques, même avec des mesures d'atténuation suffisantes, la concentration des GES (Gaz à Effets de Serre) va continuer à s'accroître pendant des décennies, et la température moyenne à la surface de la terre va également s'accroître après avoir traversé un pic [1, 4] ; et il en est de même des projections de la température, car tous les différents modèles climatiques tendent à une plus grande uniformité, et prévoient une augmentation notable, surtout pendant la saison pluvieuse [10]. Dans l'ensemble donc, la réalité de l'augmentation de la température moyenne dans le Sahel, n'est plus mise en doute [11, 12] ; néanmoins, pour ce qui est des précipitations, il est reconnu que le climat est marqué d'incertitudes dues d'une part à la diversité du climat et à la grande variabilité des précipitations, et d'autre part aux réseaux d'observation souvent mal entretenus, rendant imprécises les analyses du climat passé et les prévisions futures [13, 14]. Finalement, la poursuite de ce réchauffement anthropique

suscite une inquiétude croissante pour le climat futur du Sahel, étant donné que la population accuse une forte dépendance vis-à-vis de l'agriculture, et que le changement climatique risque de modifier profondément les ressources en eau disponibles [11, 15, 16]. C'est donc dans le but d'identifier davantage la véritable tendance d'évolution du climat (précipitations, températures) dans la région sahélienne du Cameroun, afin d'établir les similitudes et les différences avec le Sahel Ouest, de même que les impacts futurs sur les activités socioéconomiques des populations (agriculture, élevage, pêche), que ce travail de recherche a été réalisé. Contrairement à la majorité des travaux qui utilisent données satellitaires, les données de ce travail sont issues des stations météorologiques ; et les données aussi bien pluviométriques que thermométriques couvrent les décennies 1960, 1970 et 1980 qui sont dans beaucoup de cas identifiées comme étant celles des ruptures. Conformément aux résultats des travaux effectués dans le Sahel Ouest, les périodes humides ou sèches et les périodes chaudes ou froides sont presque identiques ; les précipitations sont à la baisse et les températures en constante hausse avec une rupture nette ; néanmoins, contrairement à la plupart de ces résultats, la région sahélienne du Cameroun ne connaît pas encore de rupture pluviométrique ; néanmoins, la forte corrélation entre les précipitations et les températures, présage une probable prochaine rupture thermométrique.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

Le Sahel est défini comme étant la semi-aride ceinture de savane tropicale située au sud du désert du Sahara, qui s'étale de l'océan atlantique à la mer rouge [17] ; elle est également définie comme l'aire géographique tropicale semi-aride et aride dans laquelle règnent les climats soudano-sahélien et sahélo-soudanien (Sahel sud), puis sahélien [18]. Conformément à une certaine délimitation qui a été faite, on peut également scinder le Sahel en Sahel Ouest, regroupant la zone sahélienne des pays tels que la Mauritanie, le Sénégal, le Mali et le Burkina Faso, puis le Sahel Est, regroupant celle des pays tels que le Niger, le Tchad, le Nigeria, auxquels on pourrait ajouter le Cameroun, et enfin l'Est de l'Ethiopie [19]. Le département du Diamaré qui constitue la zone d'étude, est situé dans la région de l'Extrême-nord du Cameroun en pleine zone sahélienne autour du lac Tchad (Sahel Est) (**Figure 1**). Ce département fait partie des six autres qui forment ladite région. Il abrite la ville de Maroua qui est la capitale régionale. Il occupe une position centrale dans la région, entre le 10° et le 11° de latitude Nord (10° 30' 00") et le 14° et 15° de longitude Est (14° 30' 00"). Il est limité à l'est par le département du Mayo-Danay, au nord par le département du Logone et Chari, au nord-ouest par le département du Mayo-Sava, à l'ouest par le département du Mayo-Tsanaga, au sud par le département du Mayo-Kani et la région du Nord. Il est subdivisé en neuf (9) arrondissements dont ceux de Maroua 1^{er}, Maroua 2^è, Maroua 3^è, Méri, Gazawa, Pétté, Bogo, Dargala, et Ndoukoula.

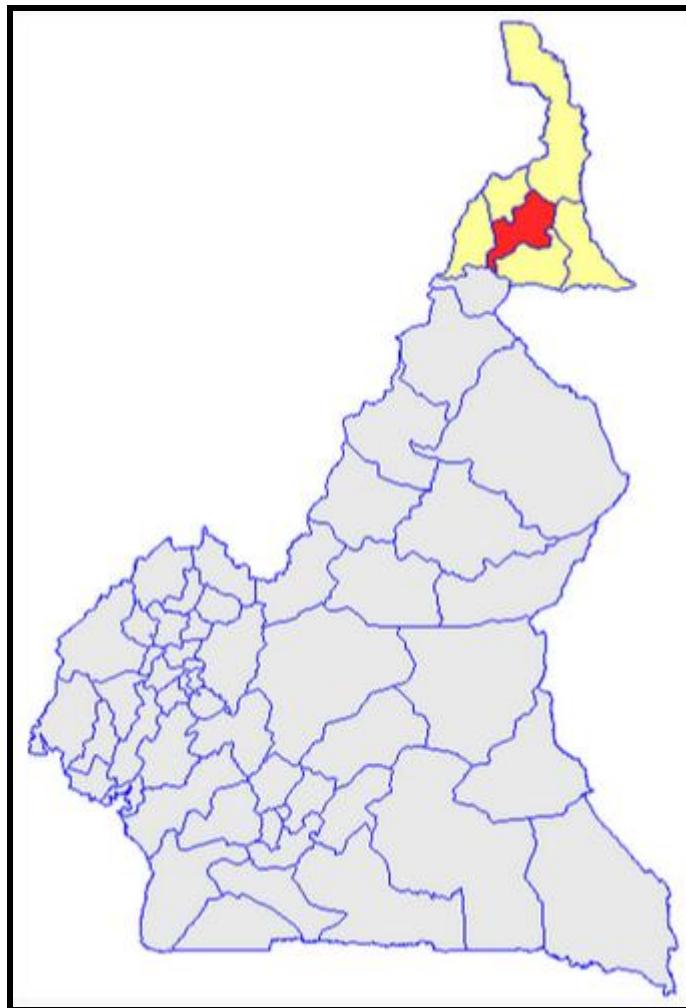


Figure 1 : Le département du Diamaré dans la Région de l'Extrême-nord du Cameroun

Source : [11]

Le processus prépondérant qui régit le climat de cette région est le système de la mousson de l'Afrique de l'Ouest (MAO), vaste schéma de circulation saisonnière à basse latitude généré par le gradient d'énergie statique sèche et humide de la couche limite méridionale entre le continent subsaharien chaud et généralement sec et l'océan Atlantique tropical. Ce système, qui se met en place d'avril à octobre, entraîne une migration de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT), et de la pluviosité maximale qui y est associée, vers sa localisation la plus septentrionale en août [20]. Dans l'ensemble, le climat est de type tropical au sens large ou soudanien sec, avec comme principales caractéristiques :

- une seule et courte saison des pluies de 4 à 5 mois (mai ou juin à octobre), avec une quantité d'eau maximale au mois d'août et une moyenne annuelle située entre 400 mm et 1 100 mm (zones montagneuses) ;
- une longue saison sèche d'au moins 7 mois, qui va généralement d'octobre ou novembre à avril ou mai suivant les années ;
- une importante insolation et des fortes températures ;
- des vents chauds et secs durant la deuxième moitié de la saison sèche ;
- un froid sec provoquant une baisse marquée des températures, et une brume sèche pendant la période froide de la première moitié de la saison sèche ;

- la rigueur de la saison sèche accentue l'évapotranspiration potentielle et les amplitudes thermiques, augmente la durée de l'insolation et renverse le régime des vents au profit de l'harmattan ;
- la région soudano-sahélienne du Cameroun présente quelques variantes imposées par le relief, en particulier dans les Monts Mandara situés à des altitudes supérieures à 500 m, où le climat est plus doux et des précipitations annuelles supérieures à 800 mm (850 mm à 1 100 mm) ;
- enfin, pendant la saison sèche, le couvert végétal se déhydrate, et en dehors du Logone qui est pérenne, la plupart des cours d'eau tarissent et se réduisent à des inferoflux enfouis dans leurs alluvions sableuses [11].

2-2. Collecte et analyse des données

Les données pluviométriques (1951-2013) et thermométriques (1960-2004) ont été collectées à la Direction Régionale de la Météorologie de la Région de l'Extrême-nord à Maroua. Ces données ont été analysées grâce aux outils statistiques du logiciel XL-STAT. Le **Tableau 1** suivant récapitule les différentes analyses statistiques opérées avec les données pluviométriques et thermométriques.

Tableau 1 : Différentes analyses statistiques opérées avec les données pluviométriques et thermométriques

N°	Précipitations	Températures
1	-Courbe d'évolution et droite de tendance des précipitations moyennes annuelles ; -Coefficient de régression linéaire de la courbe de tendance des précipitations ;	-Courbe d'évolution et droites de tendance des températures moyennes annuelles (minimales et maximales) ; -Coefficient de régression linéaire de la courbe de tendance des températures ;
2	-Analyse de l'évolution des séquences pluvieuses et sèches annuelles ; -Indices pluviométriques annuels ;	-Courbes des anomalies centrées-réduites des températures moyennes annuelles maximales et minimales ;
3	-Analyse de l'évolution des séquences pluvieuses et sèches décennales ; -Indices pluviométriques décennaux ;	
4	-Probable rupture pluviométrique et année de rupture ; -Test bilatéral de tendance de Mann-Kendall ;	-Test bilatéral de tendance de Mann-Kendall et Test d'homogénéité de Pettit ;
5	-Coefficient de corrélation linéaire de Pearson pour évaluer la force et le sens du lien entre l'évolution des températures et celle des précipitations dans la région ;	

3. Résultats et discussion

3-1. Précipitations caractérisées par la baisse constante, la forte variabilité temporelle, et l'absence de rupture pluviométrique

La **Figure 2** suivante indique la dynamique des précipitations moyennes annuelles durant la période 1951-2013 dans le département du Diamaré.

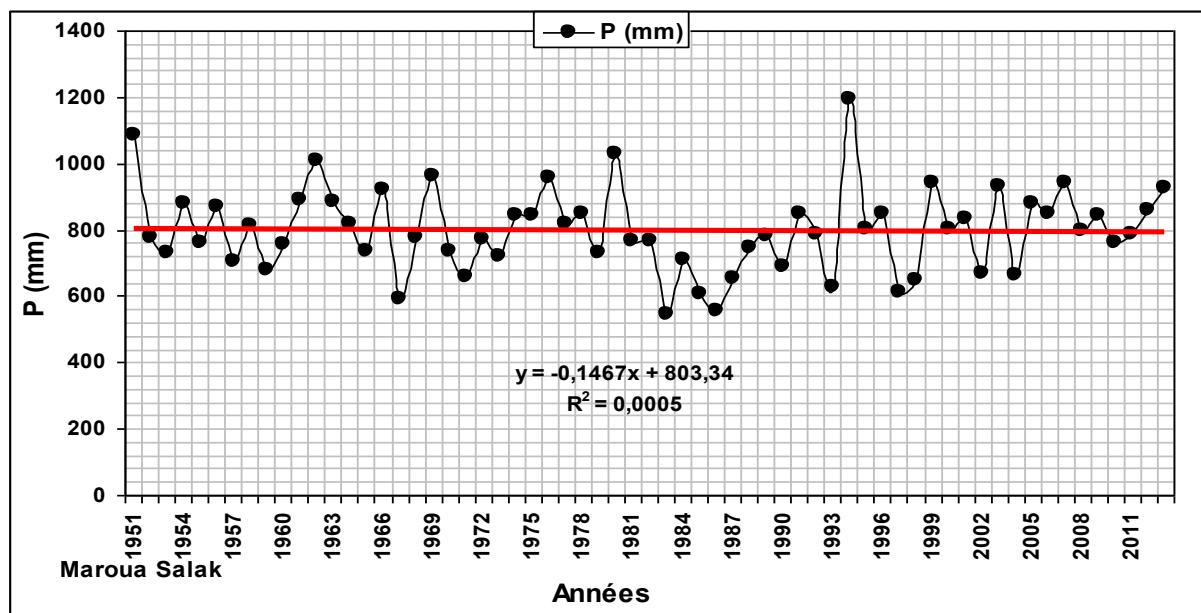


Figure 2 : Évolution des précipitations moyennes annuelles de la période 1951-2013 dans le département du Diamaré

La courbe de tendance de la normale pluviométrique indique une baisse graduelle des précipitations de 1951 à 2013. Cette baisse des précipitations obtenue à l'aide du coefficient de régression linéaire de la courbe de tendance, montre une évolution régressive d'environ -0,1467 mm par an de 1951 à 2013, soit une baisse totale d'environ 9 mm. Il est à priori important de reconnaître que toutes les analyses des données des précipitations en zone sahélienne indiquent que leur évolution interannuelle et intra-annuelle ne fait jamais l'unanimité et prête donc à controverses, et est caractérisée à la fois par la baisse ou la hausse des précipitations moyennes annuelles suivant les régions [14]. Contrairement à nos résultats, certains travaux réalisés dans la zone sahélienne du Cameroun, montrent une tendance à la hausse des précipitations pendant la période 1976-2011 [15] ; ce qui est en accord avec les résultats des travaux réalisés dans la zone sahélienne de l'Afrique Orientale où les précipitations sont à la hausse [14]. Cette perception de la tendance à la hausse des précipitations pourrait probablement se justifier par la diversité des climats sahéliens, mais aussi par le fait que ces auteurs aient inclus dans leurs séries pluviométriques, les données des décennies 1990 et 2000 pour lesquels il y a unanimité quant à la tendance à l'humidification du climat dans tout le Sahel. Conformément aux résultats de cette étude, un auteur sur la base des données de précipitations des années 1960 à 2000 dans le Sahel camerounais, a trouvé que la pluviométrie est en constante baisse [11]; il en est de même en Afrique de l'Ouest où la pluviométrie est en constante baisse [21]. Dans la région sahélienne du Cameroun, la baisse des précipitations a été estimée à environ 25% pendant la période 1960-2000 [22], et à 50 mm durant la période 1950-2015 [23]. En Afrique de l'Ouest, cette baisse a été estimée à environ 100 à 200 mm avant et après la décennie 1970, soit 15 % à plus de 35 % [24], et cela selon les zones, avec comme conséquence, le glissement des isohyètes d'environ 200 km vers le sud ; de même, des baisses des précipitations équivalentes à une régression linéaire de l'ordre de -1,47 mm/an et -0,56 mm/an ont été enregistrées respectivement à Abomey et à Zangrano durant la période 1941-2001 [25], ; de plus, dans cette même région, d'autres travaux ont permis d'obtenir une baisse des précipitations moyennes journalières de -0,1 à -0,4 mm/j/décennie, équivalent à une diminution de 40% entre 1950-1969 et 1970-1989 [24]. Ces résultats divergents obtenus dans la zone sahélienne confirment l'observation faite par certains scientifiques selon laquelle il est reconnu que le climat dans le Sahel est marqué des incertitudes dues d'une part à la diversité du climat et à la grande variabilité des précipitations,

et d'autre part aux réseaux d'observation souvent mal entretenus, rendant imprécises les analyses du climat passé et les prévisions futures [14, 25] ; de même, plusieurs études climatologiques actuelles attribuent cette évolution différentielle de la sécheresse dans le Sahel au déplacement vers l'Ouest du foyer chaud de l'océan indien, qui a eu pour conséquence de déplacer la zone de sécheresse vers l'Ouest [25]. Dans l'ensemble, une analyse de la répartition des périodes sèches et humides avant et après l'année 1970 a permis de distinguer qu'il existe en gros trois (3) cas de figure avec des effets très différents de la baisse pluviométrique, suivant les régions :

- des régions ayant connu deux grandes périodes sèches en 1973-1974 et 1982-1984, séparées par des années plus normales ;
- des régions dans lesquelles ont alterné des années sèches et des années à pluviométrie normale ;
- enfin, des régions où la baisse pluviométrique a été relativement continue sur l'ensemble de la période [18].

C'est effectivement pour cette raison donc qu'on suggère qu'au lieu de parler d'un seul type de sécheresse, il serait judicieux de parler des « sécheresses » au pluriel dans le Sahel [18]. L'analyse des séquences pluvieuses et sèches de la série 1951-2013, effectuée sur la base des indices pluviométriques annuels, a donné les résultats indiqués sur la **Figure 3** suivante.

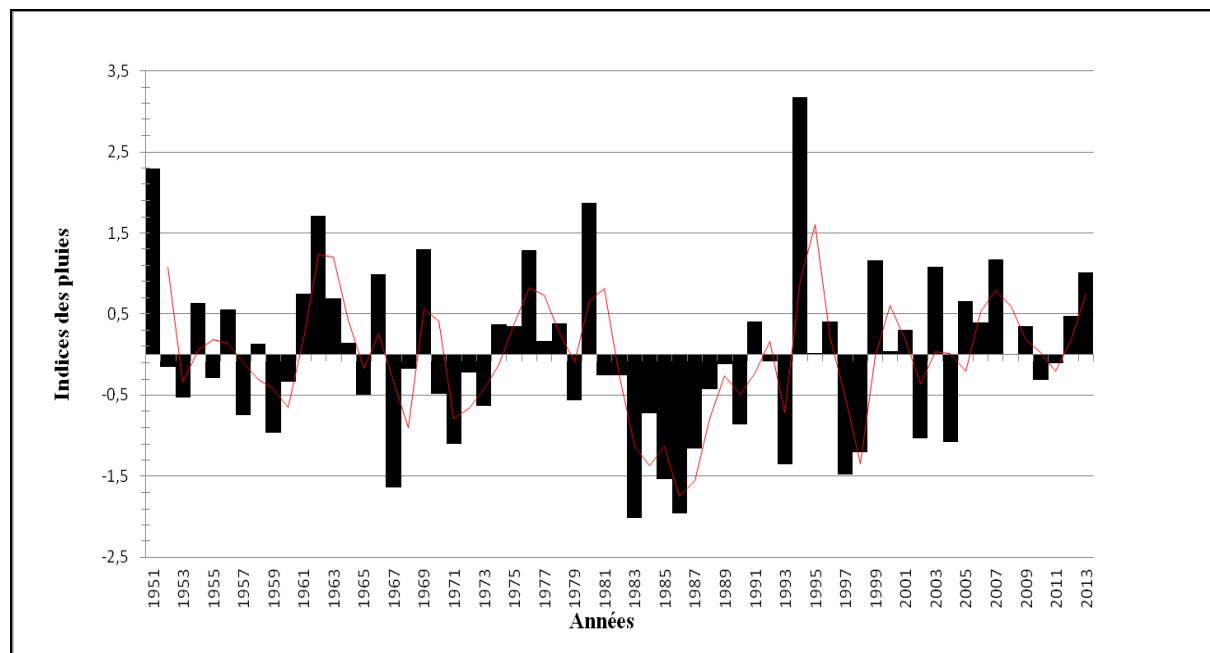


Figure 3 : Évolution des séquences pluvieuses et sèches annuelles de la série 1951-2013

L'observation de la courbe de variabilité pluviométrique interannuelle indique :

- la décennie 1980, avec plus d'années sèches que d'années humides (succession régulière de huit années déficitaires) semble à priori être la plus sèche, la décennie 1970 semble être mitigée avec autant d'années sèches que humides, alors que celles 1950, 1960, 1990 et 2000 sont globalement plus humides ;
- une intensification de la variabilité interannuelle des précipitations, avec une alternance plus fréquente et très aléatoire entre les années sèches et humides, surtout après la décennie 1990.

Suivant les résultats des travaux effectués dans le Sahel camerounais, les décennies 1950 et 1960 sont excédentaires ou humides avec une pluviosité au-dessus de la moyenne, les décennies 1970 et 1980 sont

déficitaires et caractérisées par une extrême sécheresse (1971-1973 et 1981-1986 étant très déficitaires), alors que celles 1990 et 2000 sont humides (avec 1997 très sèche), et caractérisées par une tendance à un retour à la normale avec des années humides ; ce qui correspond presqu'exactement à nos résultats [11]. Dans le Sahel Ouest, l'analyse de la variation des indices pluviométriques des années 1940-2000 indique que les décennies 1940, 1970, 1980 et 1990 sont globalement déficitaires, alors que celles 1950 et 1960 sont excédentaires, donc plus humides [18]. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par quelques auteurs dans le Sahel camerounais [11]; et la seule dissension reste au niveau de la décennie 1990 que ces derniers ont qualifié d'excédentaire alors les autres l'ont trouvée déficitaire [18]; et cela pourrait s'expliquer par la longueur de la période d'analyse. La grande variabilité spatiotemporelle des pluies constitue certes l'une des principales caractéristiques des climats sahéliens, mais elle s'est renforcée à partir de la décennie 1990 [16, 18], traduisant ainsi l'intensification des événements pluviométriques extrêmes mentionnée (sécheresses, inondations) [7]. La **Figure 4** suivante indique l'évolution des séquences pluvieuses et sèches décennales de la série 1951-2013, obtenues sur la base des indices pluviométriques décennaux.

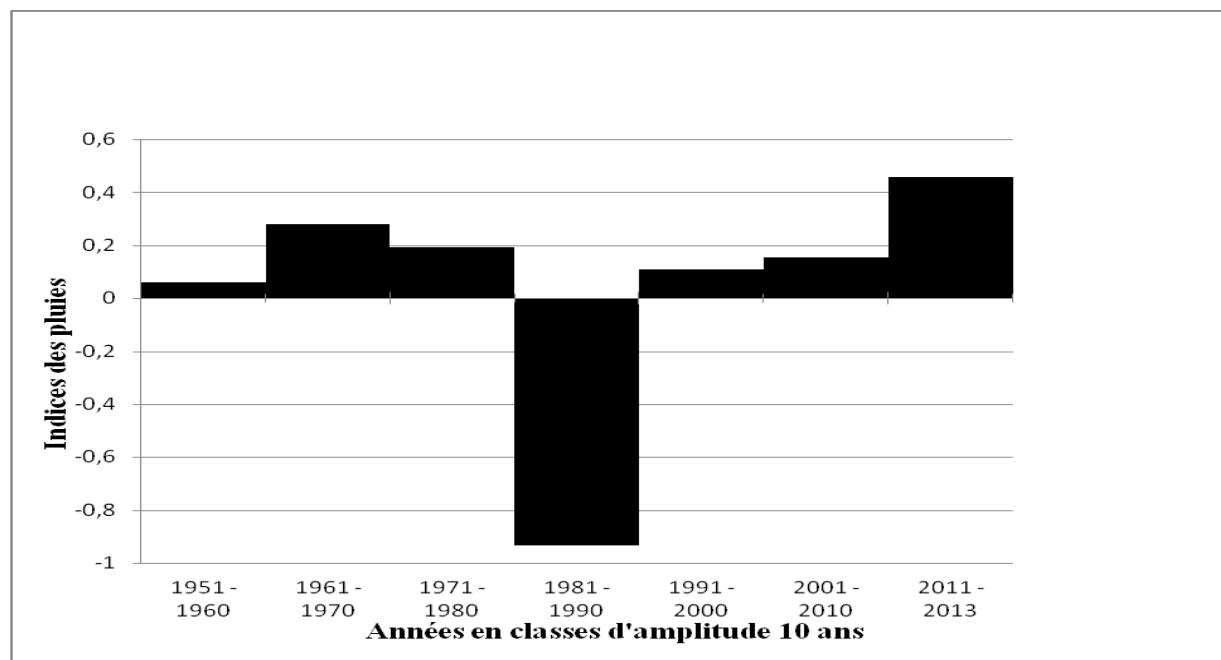


Figure 4 : Évolution des séquences pluvieuses et sèches décennales de la série 1951-2013

L'analyse de ces séquences décennales permet de constater que :

- seule la décennie 1980 reste déficitaire, alors que les décennies 1950, 1960, 1970, 1990 et 2000 sont globalement excédentaires, et donc humides ; et cela malgré les épisodes de sécheresses qu'ont connu les populations durant les décennies 1970 et 1980 ;
- à partir de la décennie 1990, il y a une tendance à l'humidification croissante de la région.

Pour certains auteurs, le début de la décennie 1990 semble marquer une tendance à un retour à la normale avec des années humides [11]; néanmoins pour d'autres, cela correspond à un climat plus mitigé (plus forte variabilité interannuelle des précipitations perceptible à travers les alternances brutales entre années sèches et humides), avec une aridification dans l'ouest sahélien (Mauritanie, Sénégal, Mali, Burkina Faso), et une humidification dans l'est sahélien (Niger, Tchad, Nigeria, Cameroun) [15, 19]. De même, il est vrai qu'il y a une tendance à l'humidification dans le Sahel Est, mais dans le Sahel Ouest, la tendance n'est pas claire [18]. Face à cette situation, certains scientifiques par contre ont une position tranchée et estiment que dans

l'ensemble du Sahel, cela correspond simplement à une variabilité naturelle dans une longue série d'évolution anthropique à travers une croissante aridification [26]. D'autres expliquent cette évolution des précipitations en affirmant que dans une région donnée, plus l'aridité est élevée, plus la variabilité interannuelle et décennale des précipitations et de l'évapotranspiration est forte [14]. Enfin, d'autres encore par contre restent sceptiques, et pensent que la perception de l'évolution future des précipitations à partir de la décennie 1990 est divergente : elle est à la baisse dans le Sahel Ouest, à la hausse à l'Est de l'Ethiopie, mais pour la région entourant le lac Tchad (Sahel Est), les données ne sont pas encore suffisantes pour déterminer avec certitude si les précipitations auront plutôt tendance à augmenter ou à diminuer [11]. Afin d'identifier une probable rupture pluviométrique dans la série 1951-2013, et éventuellement l'année de rupture, l'on a d'abord cherché à identifier une tendance dans cette série à l'aide du Test bilatéral de tendance de Mann-Kendall dont les résultats sont mentionnés dans le **Tableau 2** suivant.

Tableau 2 : Résultats du Test bilatéral de tendance de Mann-Kendall appliqué aux données pluviométriques (1951-2013)

Tau de Kendall	0,450
S	431,000
Var(S)	10345,000
p-value (bilatérale)	< 0,1
alpha	0,05

Puisque la p-value calculée est supérieure au seuil de signification alpha (0,05), l'interprétation des résultats du test indique qu'il n'y a pas de rupture pluviométrique dans cette série ; ceci dit, la tendance de la série pluviométrique 1951-2013 est certes à la baisse, mais jusqu'à lors elle n'a pas encore connu de rupture pluviométrique nette. Contrairement à ces résultats, dans la même zone sahélienne du Cameroun, un auteur a obtenu pour la série pluviométrique 1950-2015, deux ruptures, respectivement en 1960 et 1983 [27] ; de même, en Afrique de l'Ouest, des travaux ont montré que l'année 1970 correspond bien à celle de la rupture pluviométrique au Niger [18]; pourtant, dans une autre région du Bénin, l'année 1968 a été identifiée comme étant celle de la rupture [17] ; et selon d'autres auteurs encore, la région Ouest africaine dans son ensemble a connu une rupture nette des séries pluviométriques autour des années 1968-1972, avec 1970 comme année charnière [14]; ce qui revient à dire que le début des intenses sécheresses sahéliennes se situerait au début de la décennie 1970. Ces résultats pourraient confirmer l'observation faite par d'autres scientifiques selon laquelle dans le Sahel Est (Niger, Nord Nigeria, Nord Cameroun, Tchad) la tendance est à l'humidification, alors que dans le Sahel Ouest, la sécheresse se poursuit [18].

3-2. Températures caractérisées par la hausse constante, la forte variabilité temporelle, et une rupture thermométrique nette

La tendance générale des températures moyennes annuelles minimales et maximales de la période 1960-2004, a été évaluée sur la base des courbes d'évolution et des droites de tendance de ces températures. La **Figure 5** suivante indique respectivement les courbes d'évolution et les droites de tendance des températures annuelles moyennes minimales et maximales sur la période 1960-2004.

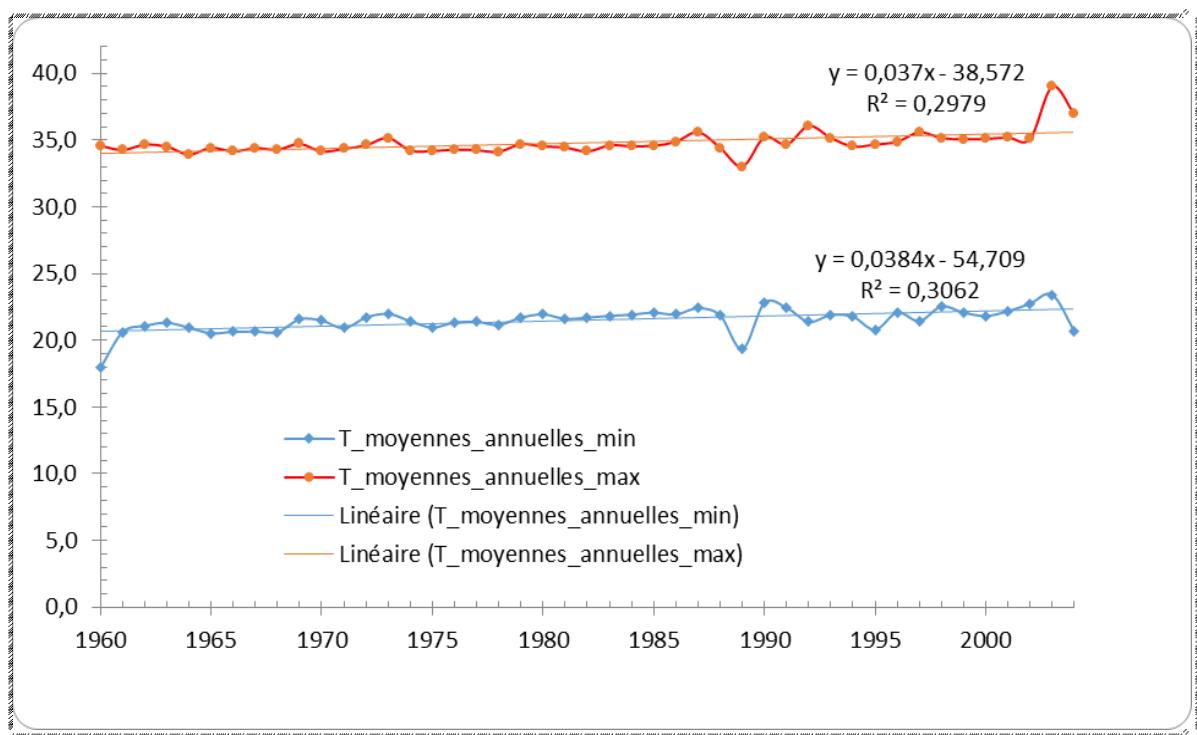


Figure 5 : Courbes d'évolution et droites de tendance des températures moyennes annuelles minimales et maximales de 1960 à 2004

Les courbes d'évolution et les droites de tendance des températures moyennes annuelles maximales et minimales indiquent une hausse croissante des températures sur la période 1960-2004 ; les valeurs annuelles de ces hausses sont estimées respectivement à $0,0384^{\circ}\text{C}$ et $0,037^{\circ}\text{C}$; ce qui correspond à des hausses respectives de $1,73^{\circ}\text{C}$ et $1,67^{\circ}\text{C}$ entre 1960 et 2004. Une augmentation d'environ $1,5^{\circ}\text{C}$ à 2°C , très proche des résultats de cette étude, a été obtenue dans la même région du Cameroun pour la série thermométrique 1950-2015 [23], contrairement à d'autres travaux qui ont donné des valeurs de l'ordre 3°C entre 1970 et 2002 [15]. En Afrique de l'Ouest, des hausses de l'ordre de $+1,44^{\circ}\text{C}$ pour les températures minimales et de $+0,53^{\circ}\text{C}$ pour les températures maximales ont été observées, puis des hausses de $0,2^{\circ}\text{C}$ à $0,8^{\circ}\text{C}$ par décennie depuis la fin des années 1970 ont été obtenues dans les zones sahélo-saharienne, sahélienne et soudanienne [22, 28]. Ces résultats confirment l'observation faite par toute la communauté scientifique selon laquelle le réchauffement du climat est une réalité globale au regard de l'évolution actuelle des températures observées depuis le 19^e siècle [12, 15]. L'identification des périodes les plus chaudes et les plus froides a été évaluée à l'aide des courbes d'évolution des températures annuelles minimales et maximales, et des courbes des anomalies centrées-réduites de ces températures. Les **Figures 6** et **7** suivantes indiquent respectivement les périodes chaudes et froides durant la période 1960-2004.

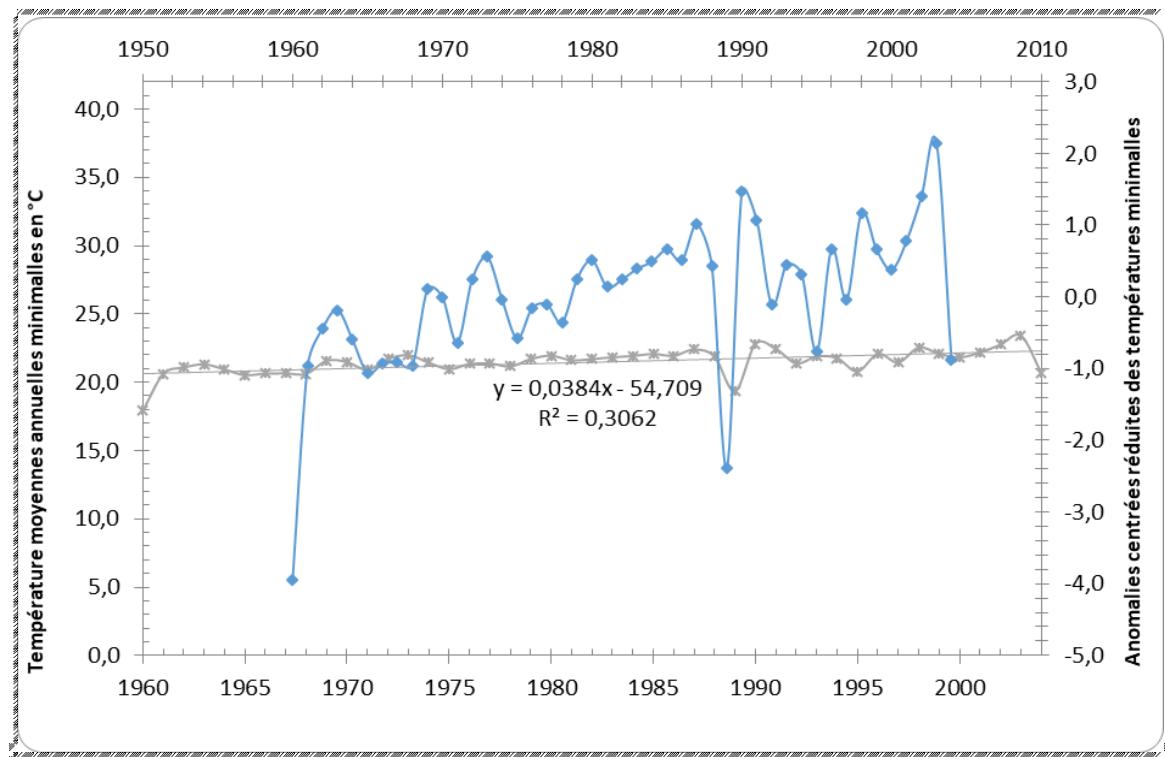


Figure 6 : Courbe des anomalies centrées réduites des températures moyennes annuelles minimales indiquant les périodes chaudes et froides

Il apparaît pour les températures minimales que :

- les années les plus froides sont 1960, 1967, 1971, 1973, 1976, 1979, 1981, 1983, 1987, 1989, 1991, 1993, 1995, 1997 et 2004, avec les années 1967 et 1989 comme chânières ; les années les plus chaudes quant à elles sont celles 1963, 1970, 1972, 1974, 1977, 1980, 1982, 1990, 1992, 1994, 1996, et 1999, avec comme chânières les années 1990 et 1999 ;
- les décennies 1970 et 1990 apparaissent comme étant les plus chaudes, alors que celles 1980 et 1990 apparaissent comme étant les plus froides sur toute la période 1960-2004 ; ce qui revient à dire que la décennie 1990 qui constitue la plus chaude, apparaît également comme étant la plus froide ; ce qui confirme le lien évident entre les précipitations et les températures ;
- il semblerait que les années chaudes et froides sévissent tous les deux (2) ou trois (3) ans ;
- la courbe d'évolution des températures minimales peut être scindée en deux périodes bien distinctes, 1960-1980 et 1980-2004 dont la première est caractérisée par une hausse régulière et lente des températures, et la deuxième caractérisée à la fois par une hausse plus rapide des températures, et des fluctuations à fortes amplitudes.

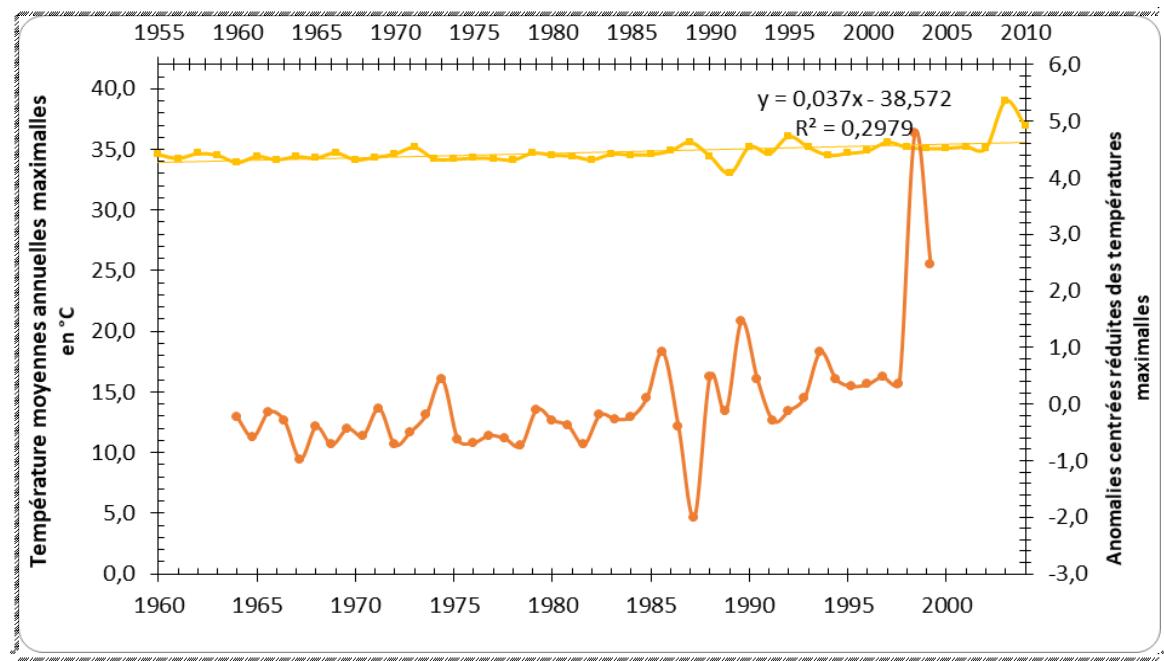


Figure 7 : Courbes des anomalies centrées réduites des températures moyennes annuelles maximales indiquant les périodes chaudes et froides

Il apparaît également pour les températures maximales que :

- les années les plus froides sont 1965, 1967, 1969, 1971, 1973, 1976, 1978, 1982, 1984, 1987, 1989, 1991, 1996, 1998, et 2000, avec comme années charnières, les années 1967 et 1987 ; par contre, les années les plus chaudes sont 1964, 1966, 1968, 1970, 1974, 1977, 1979, 1983, 1986, 1988, 1990, 1994, 1997 et 1999, avec comme années charnières 1974, 1986, 1990, 1994 et 1999 ;
- les décennies 1970 et 1990 apparaissent comme étant les plus chaudes, alors que celles 1970 et 1980 constituent les plus froides sur toute la période 1960-2004 ;
- il semblerait que les années chaudes et froides sévissent tous les deux (2) ou quatre (4) ans, voire cinq (5) ans.
- la courbe d'évolution des températures maximales peut être scindée en deux périodes bien distinctes, 1960-1980 et 1980-2004 dont la première est caractérisée par une hausse régulière et lente des températures, et la deuxième caractérisée à la fois par une hausse plus rapide des températures, et des fluctuations à fortes amplitudes.

Selon les résultats de certains travaux réalisés en Afrique de l'Ouest, les décennies 1990 et 2000 ont été les plus chaudes du 20^e siècle [24, 25], alors que pour d'autres, les décennies 1980 et 1990 constituent les plus chaudes, au moment où la décennie 1970 est la plus froide [18] ; de même, selon ces derniers, les années 1998, 2002, 2003, et 2005, ont été les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1861. Ces résultats sont en accord avec nos résultats pour la décennie 1990, mais en désaccord avec nos résultats pour les décennies 1980 et 2000 ; de même, pour ce qui est des années chaudes, aucune des années citées par ces derniers comme étant les plus chaudes ne correspond aux résultats de cette étude. Conformément aux résultats de cette étude, d'autres auteurs ont trouvé que la décennie 1965-1979 a connu une hausse lente, alors que celle 1980-2004 a connu une hausse rapide, et correspond aux décennies les plus chaudes [24]. Afin de déterminer avec exactitude le seuil de significativité des tendances précédentes observées des températures moyennes annuelles maximales et minimales, nous avons procédé au test bilatéral de Mann-Kendall dont les résultats sont mentionnés dans le *Tableau 3* suivant.

Tableau 3 : Résultats du test bilatéral de tendance de Mann-Kendall appliquée aux données thermométriques

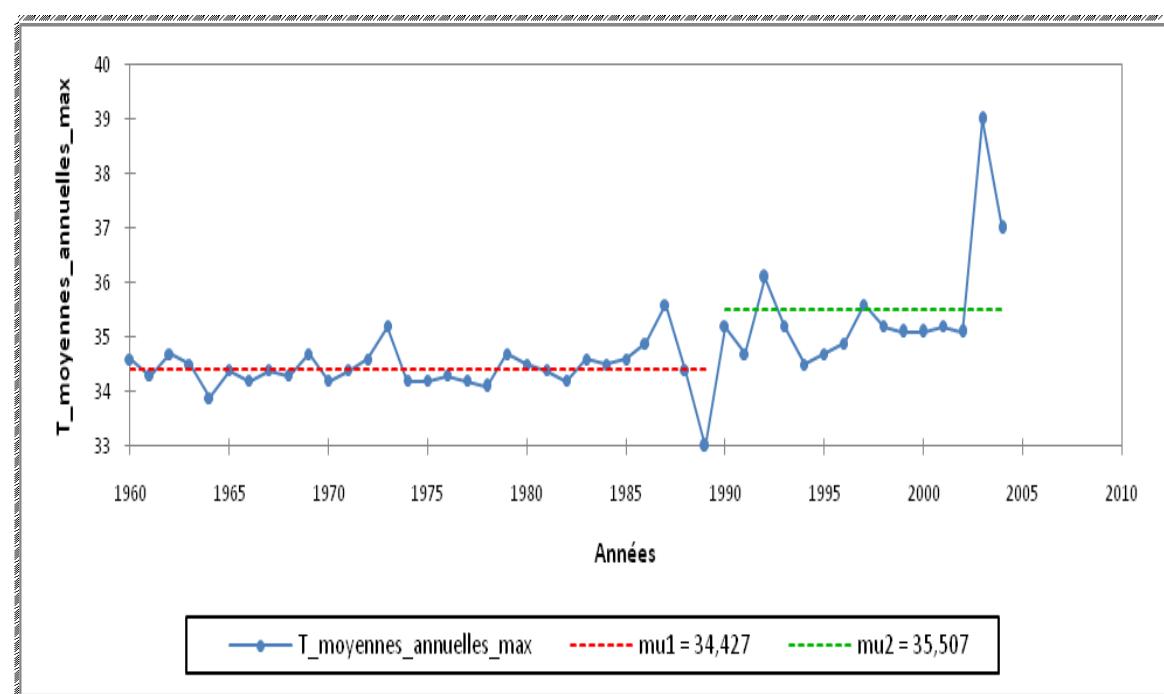
	Températures moyennes Max	Températures moyennes Min
Tau de Kendall	0,600	0,505
S	581,000	492,000
Var (S)	10391,000	10408,000
p-value (bilatérale)	< 0,0001	< 0,0001
alpha	0,05	0,05

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au seuil de signification alpha (0,05), on peut dire qu'il y a une tendance aussi bien dans la série des températures annuelles maximales que dans celle des températures annuelles minimales. Dans la mesure où il existe une tendance dans les deux séries, il semble important d'identifier la période exacte de rupture de ces séries à l'aide du test d'homogénéité de Pettit. Les résultats de ces tests sont mentionnés dans le **Tableau 4** suivant.

Tableau 4 : Résultats du test d'homogénéité de Pettit appliquée aux données thermométriques

	Températures Moyennes Max	Températures Moyennes Min
K	379,000	361,000
t	1989	1978
p-value (bilatérale)	< 0,0001	< 0,0001
alpha	0,05	0,05

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au seuil de significativité alpha (0,05), on conclut qu'il existe une rupture nette aussi bien dans les températures maximales que minimales ; autrement dit, la tendance à la hausse des températures moyennes minimales et maximales dans cette région, est hautement significative au seuil alpha égal à 5 %. Les **Figures 8 et 9** suivantes indiquent respectivement les années de ruptures des températures moyennes annuelles maximales et minimales.

**Figure 8 : Courbe et période de rupture des températures moyennes annuelles maximales**

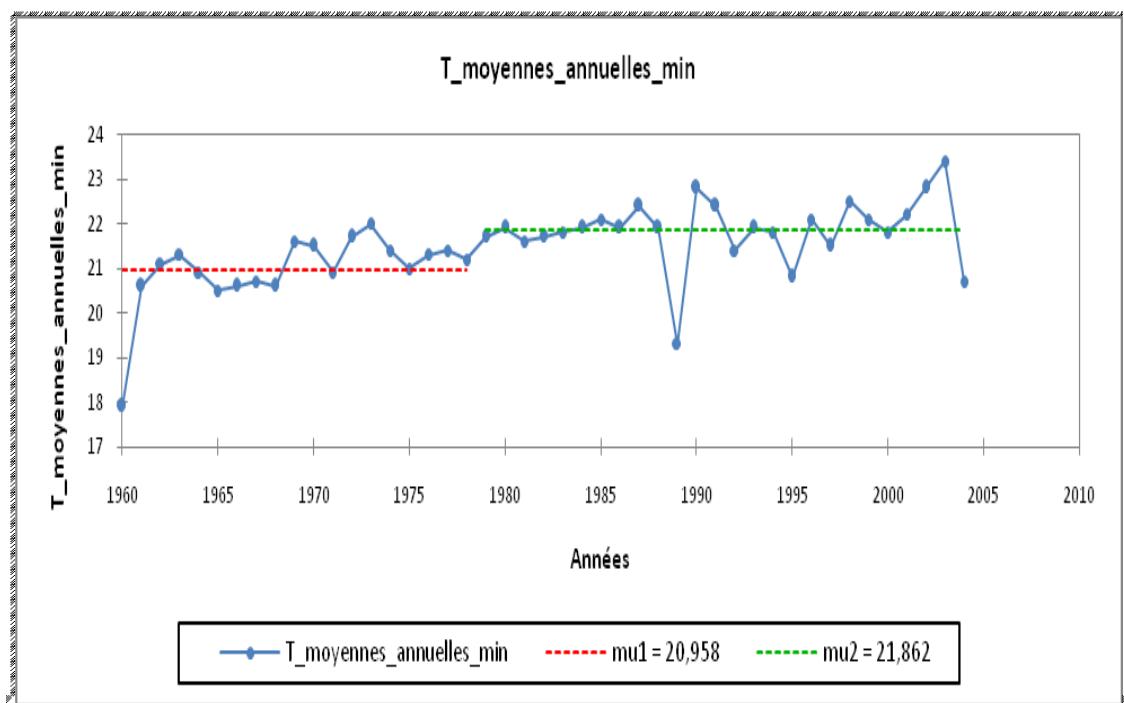


Figure 9 : Courbe et période de rupture des températures moyennes annuelles minimales

Les années 1989 et 1978 représentent respectivement celles des ruptures des températures moyennes maximales et minimales, et marquent ainsi le début de l'accélération de l'augmentation de ces températures sur la période 1960-2004 ; de ce résultat, il ressort que les périodes de ruptures de ces températures maximales et minimales correspondent au début et à la fin de la décennie 1980 qui constitue la plus sèche sur toute la période 1951-2013. Suite aux travaux réalisés à Bohicon et Cotonou au Benin en Afrique de l'Ouest, des auteurs ont montré que les années 1970 et 1980 constituent respectivement celles des ruptures des températures minimales et maximales [24] ; mais pour d'autres par contre, c'est plutôt l'année 1993 qui constitue celle de la rupture thermométrique des températures moyennes annuelles [18] ; de même, pour d'autres encore, c'est l'année 1976 qui correspond à celle de la rupture thermométrique [29]. Cette différence dans les résultats traduit la forte variabilité de l'évolution des températures entre les différentes zones climatiques ; et elle pourrait trouver d'explications dans la nature même de ces zones qui est plus humide pour les premiers (Cotonou, Bohicon), et plus sèche pour les seconds (zone sahélienne). Dans l'ensemble, il convient de constater que pour la majorité des zones d'étude, les années de rupture thermométrique se situent dans les décennies 1970 et 1980, qui constituent les plus sèches durant tout le 20^e.

3-3. Précipitations et températures dont la corrélation présage un assèchement futur probable de la zone avec tous ses impacts et conséquences

La concordance entre les périodes les plus sèches (décennie 1980) et les années des ruptures thermométriques (1978, 1989) semble indiquer un probable lien entre les températures et les précipitations ; et pour cela, il a semblé judicieux de chercher à évaluer ce lien (force, sens) entre l'évolution des températures et des précipitations dans cette région du Sahel. Le coefficient de corrélation de Pearson calculé, d'une valeur de -0.03131555, a donné une p-value calculée de 0.8382, qui est inférieure au seuil de signification bilatérale qui est de 0,853 ; et dans ce cas, l'hypothèse alternative est donc vraie, et confirme l'existence certes d'une corrélation négative différente de zéro, mais faible entre les précipitations et les températures. La **Figure 10** ci-dessous donne une idée des différentes corrélations entre les précipitations et les températures.

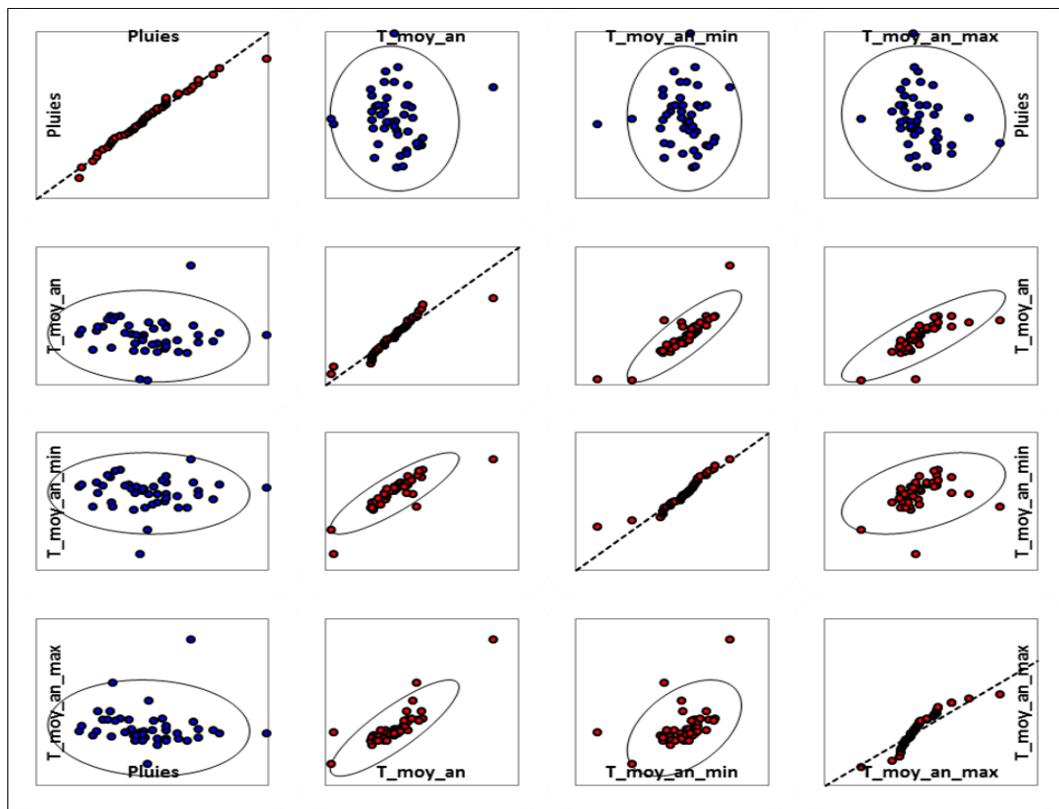


Figure 10 : Nuages de points indiquant les différentes corrélations entre les précipitations et les températures

Ce résultat confirme que l'évolution des précipitations et celle des températures sont liées mais négativement ; c'est-à-dire plus les températures augmenteront dans la région, plus les précipitations baisseront et deviendront très variables dans l'espace et le temps ; ce qui confirme la tendance actuelle à la hausse des températures (dont la rupture est confirmée) et à la baisse des précipitations (dont la rupture prochaine est certaine). Le fait que la rupture thermométrique soit enclenchée dans la décennie 1980 et l'accroissement de la variabilité spatiotemporelle des précipitations apparaisse dans la décennie 1990, confirme également que c'est la hausse significative des températures qui est à l'origine de la modification des précipitations. Certains travaux confirment cette corrélation, et estiment que l'expansion de la sécheresse en Afrique subsaharienne est attribuée dans l'ensemble à l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), causée elle-même par l'augmentation de la radiation nette de surface et le déficit de la pression évaporative (fortes températures) [18]. De plus, certains auteurs confortent cette idée dans le Sahel, et pensent que confrontée à l'incertitude, la zone sahélienne semble engagée dans un processus d'aridification du climat lié sans doute au réchauffement global [30] ; ceci dit, l'intensification de la variabilité pluviométrique observée à partir de la décennie 1990 dans la zone sahélienne constitue un indicateur de l'aridification de la zone, conformément à l'observation faite par certains scientifiques [8]. Comme conséquence prochaine très probable de cette corrélation, l'assèchement futur du Sahel semble évident, et il en est de même de ses corollaires environnementaux et socioéconomiques (assèchement des ressources hydriques, prolifération des ravageurs des cultures et des maladies animales, baisse de la production agricole et agropastorale, pauvreté, insécurité alimentaire, recrudescence des conflits d'accès aux ressources, migrations des populations, accroissement de la demande de l'aide alimentaire). Conformément à ce résultat, les projections effectuées par quelques scientifiques sur la base des MCG (Modèle de Circulation Générale), indiquent également de fortes sécheresses au centre du Sahel, de fortes variations à l'échelle locale, et des incertitudes spatiales et temporelles dans ces changements prévus [13]. Contrairement à ces résultats, suivant le quatrième rapport du GIEC, les projections climatiques obtenues à base des MCG prévoient que dans le Sahel, les saisons extrêmement humides, les épisodes pluvieux de fortes intensités, et les inondations associées sont supposés s'accroître de 20 % durant les prochaines décennies [30].

4. Conclusion

L'objectif de ce travail de recherche consiste à identifier l'évolution des précipitations et des températures (tendance d'évolution, existence ou pas de rupture, existence de corrélations entre ces paramètres) dans la région sahélienne du Cameroun. Il ressort donc que la tendance générale des précipitations est à la baisse, évaluée à environ 0,1467 mm par an de 1951 à 2013 ; soit une baisse totale d'environ 9 mm ; et il n'y a pas encore de rupture pluviométrique dans la région, malgré la baisse et la forte variabilité interannuelle des précipitations. Les températures moyennes annuelles maximales et minimales sont en constante croissance, respectivement d'environ 0,0384 °C et 0,037 °C, correspondant à des hausses de 1,73°C et 1,67°C ; mais les températures maximales et minimales contrairement aux précipitations, ont connu des ruptures dont les périodes sont respectivement 1989 et 1978, marquant ainsi le début de l'accélération de leur augmentation ; ce qui revient à dire le changement climatique dans la zone est effectif sur le plan thermométrique depuis la décennie 1980. Enfin, il existe une forte corrélation entre les précipitations et les températures qui indique que la hausse des températures est à l'origine de la perturbation observée des précipitations. Dans l'ensemble, on pourrait dire que la tendance d'évolution des précipitations et des températures dans le Sahel Camerounais est identique à celle observée dans le Sahel Ouest ; néanmoins, si la rupture thermométrique y est effective comme dans le Sahel Ouest, celle pluviométrique reste encore attendue avec une grande certitude.

Références

- [1] - M. K. ROSEGRANT, M. EWING, G. YOHE, I. BURTON, S. HUG and R. VALMONTE-SANTOS, "Climate change and agriculture : Threats and opportunities", Editions GIZ, Eschborn, (2008) 356 p.
- [2] - IIEE, "Manuel technique de gestion intégrée des ressources en eau", Editions IIEE, Ouagadougou, (2010) 145 p.
- [3] - C. O. CODJIA, "Perceptions, savoirs locaux et stratégies d'adaptations aux changements climatiques des producteurs des communes d'Adjohoun et de Dangbo au Sud-Est Bénin". Mémoire d'Ingénieur Agronome, Université d'Abomey-Calavi, (2009)
- [4] - R. DIMON, "Adaptation aux changements climatiques : perceptions, savoirs locaux et stratégies d'adaptation développées par les producteurs de Kandi et de Banikoara, au Nord Bénin". Mémoire d'Ingénieur Agronome, Université d'Abomey-Calavi, (2008)
- [5] - A. ABDOU (b), La variabilité et les changements climatiques au Sahel : comprendre la situation actuelle de par l'observation, *Bulletin Mensuel du Centre Régional Agrhymet*, Numéro spécial, (2010) 17 - 20
- [6] - FAO & NDMC, "A review of drought occurrence and monitoring and planning activities in the Near East Region", Editions FAO, Rome, (2008) 67 p.
- [7] - A. ABDOU (a), Variabilité et changements du climat au Sahel : ce que l'observation nous apprend sur la situation actuelle, *Grain de sel*, N° 49 (2010) 13 - 14
- [8] - R. SCHUBERT, "Climate change as a risk security", WBGU (German Advisory Council on Global Change) Editions, Berlin, (2009) 248 p.
- [9] - CEDEAO-CSAO/OCDE, "Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest (Série Environnement): le climat et les changements climatiques", Ed. CEDEAO, Abuja, (2008)
- [10] - P. HEINRIGS, "Incidences sécuritaires du changement climatique au Sahel : Perspectives politiques", Ed. Secrétariat du Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest (SICCS), Paris, (2010) 54 p.
- [11] - Y. L'HOTE, "Climatologie", In C. Seignobos, and O. IYEBI-MANDJECK (Eds), "Atlas de la province de l'Extrême-Nord Cameroun (Planche 2)", Editions IRD, Paris, (2000) 14 p.

- [12] - E. MARLEAU, "Adaptation au changement climatique dans les pays en développement: Quelles pratiques pour une approche à base communautaire?", Essai de Maîtrise, Centre Universitaire de formation en Environnement de Sherbrooke, Québec, (2011)
- [13] - N. LEARY, J. KULKARMI and C. SEIPT, "Assessments of impacts and adaptation to climate change : Summary of the final report of the AIACC project", Technical Report, Ed. START. Washington, (2007)
- [14] - S. A. KIMA, A. A. OKHIMAMHE, A. A. KIEMA, N. ZAMPALIGRE and I. SULE, Adapting to the impacts of climate change in the sub-humid zone of Burkina-Faso. *Pastoralism: springer open journal*, 5 (16) (2015) 1 - 14
- [15] - PNUD, "Evaluation des risques, de la vulnérabilité et d'adaptation aux changements climatiques au Cameroun", Rapport d'étape, Ed. PNUD, Yaoundé, (2011) 47 p.
- [16] - MINISTÈRE BRITANIQUE DES AFFAIRES ETRANGERES ET DU COMMONWEALTH (MBAEC), "Climat sahélien : rétrospectives et projections", Rapport Technique, Ed. MBAEC, Exeter/Devon, (2010)
- [17] - C. NHEMACHENA and R. HASSAN, "Micro-level analysis of farmers' adaptation to climate change in southern Africa", IFPRI discussion paper 00714, IFPRI Editions, Washington, (2007) 29 p.
- [18] - B. SARR et S. TRAORE, Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Sahel. *Bulletin Mensuel du Centre Régional Agrhymet*, Numéro spécial, (2011) 21- 24
- [19] - NEPAD et FPA, "Les changements climatiques et l'Afrique", Papier présenté lors de la 8è réunion du Forum pour le Partenariat avec l'Afrique, Ed. NEPAD, Berlin, (2007, mai)
- [20] - H. LO et A. KAERE, L'Afrique et les changements climatiques : enjeux et défis multiples. *AGRIDAPE LEISA-Magazine on Low External Input and Sustainable Agriculture*, 4 (2009) 6 - 7
- [21] - P. TSCHAKERT, R. SAGOE, G. OFORI-DARKO and S. NII CODJOE, "Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and anticipatory learning", *Zef Research Article*, Site web http://www.zef.de/module/register/media/40a1_FloodsinSahel.pdf, (2010)
- [22] - P. JOUVE, "Adaptation des systèmes de production à l'aridité au Maroc et au Sahel", Thèse de Doctorat, Université Paul Valéry de Montpellier III, Montpellier, (1993)
- [23] - C. BERGER, "Vulnerability analysis in the Far north region of Cameroon : Key findings of the desk study", Rapport technique, Ed. Cabinet ECO consult, Maroua, (2013b) 48 p.
- [24] - R. OGOUWALE, JC. HOUNDAGBA et C. HOUSSOU, Dynamique hydro-climatique et gestion des ressources en eau dans le bassin du Zou, Article présenté au 2è colloque de l'UAC des Sciences, Cultures, *Technologies et Géographie*, Abomey-Calavi Cotonou, (2009)
- [25] - ECOWAS, "Atlas on regional integration in West Africa: Climate and climate change", ECOWAS Editions, Abuja, (2008)
- [26] - B. SARR, Recrudescence des fortes pluies et des inondations dans un contexte de changement climatique, *Bulletin Mensuel du Centre Régional Agrhymet*, Numéro spécial, (2010) 9 - 11
- [27] - UICN, "Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation", Ed. UICN, Cambridge, (2004) 56 p.
- [28] - C. FABRE, "L'adaptation des agriculteurs vivriers du Sénégal au changement climatique: cas de la communauté rurale de Sessène, Région de Thiès", Mémoire de maîtrise en Géographie, Université de Montréal, (2010) 72 p.
- [29] - N. P. M. BOKO, E. VISSIN, E. OGOUWALE, S. C. HOUSOU et M. BOKO, *Contribution à l'étude des tendances thermométriques au sud du Bénin*, Article présenté lors du 2è colloque de l'UAC des Sciences, Cultures, Technologies et Géographie, Cotonou, (2009, mai)
- [30] - A. JALLOH, B. SARR, J. KUISEU, H. ROY-MACAULEY and P. SEREME, "Review of climate in West and Central Africa to inform farming systems research and development in the sub-humid and semi-arid agroecologies zones of the region", Ed. CORAF/WECARD, Dakar, (2011)