

Variabilité et tendances spatio-temporelles des aspects du climat (températures et précipitations) dans la cuvette nord du lac Tchad, entre 2001 et 2024

Achiron Tchiroma Souleymane¹; Kiari Fougou Hadiza², Saley Mahaman Bachir³, Mahé Gil⁴,

¹Doctorant à l'Université de Diffa/Niger,

²Maître de Conférences, Université de Diffa ; Institut Supérieur en Environnement et Ecologie (IS2E) de l'Université de Diffa ; BP : 78 Diffa, Niger.

³Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT, Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan Côte d'Ivoire).

⁴HydroSciences Montpellier (HSM), CNRS, IRD, Université de Montpellier, Montpellier, France

Résumé

Cette étude utilise les données satellitaires MODIS_LST et CHIRPS qui sont comparées statistiquement aux données in situ des stations dans la partie nigérienne du lac Tchad. Les résultats montrent une corrélation hautement significative avec un coefficient de Pearson supérieur ou égal à 0,79 dans tous les cas de figure, ainsi des erreurs MAE et RMSE minimales dans tous les cas. Ensuite, ces données MODIS_LST et CHIRPS sont traitées et interprétées sur la période 2001-2024, afin d'analyser l'évolution des températures et des précipitations sur la cuvette nord du lac Tchad. Les températures varient entre 40°C et 45°C et marquent ainsi une tendance décroissante démontrée par le test non paramétrique de Mann Kendall. Les précipitations sont inégalement réparties du centre vers le nord-ouest et le sud-ouest, évoluant entre 100 mm et plus de 350 mm à l'échelle de la cuvette nord du lac Tchad. Le test non paramétrique de Mann Kendall montre que la décennie 2011-2024 est marquée par une tendance croissante de la pluviométrie. Le traitement et l'analyse des données est réalisé au moyen des outils open sources dont R, Google Earth engine et ArcMap.

Mots clés : Variabilité Climatique, Télédétection, SIG, MODIS_LST, CHIRPS, Lac Tchad,

Spatio-temporal variability and trends in aspects of climate (temperature and precipitation) in the Northern basin of Lake Chad, between 2001 and 2024.

Abstract

This study uses MODIS_LST and CHIRPS satellite data which are statistically compared with in situ data from stations in the Niger part of Lake Chad ; the result shows a highly significant correlation with a Pearson coefficient greater than or equal to 0.79 in all cases, so the MAE and RMSE errors are minimal in all cases. Next, these MODIS_LST and CHIRPS data were processed and interpreted over the period 2001 to 2024, in order to analyse changes in temperature and rainfall over the northern basin of Lake Chad. Temperatures vary between 40°C and 45°C, with a decreasing trend demonstrated by the non-parametric Mann Kendall test. Rainfall is unevenly distributed from the centre to the north-west and south-west, ranging from 100 mm to over 350 mm across the northern basin of Lake Chad. The non-parametric Mann Kendall test shows that the decade 2011-2024 is marked by an increasing trend of precipitations. Data processing and analysis is carried out using open source tools including R, Google Earth engine and ArcMap.

Keywords: Climate variability, remote sensing, GIS, MODIS_LST, CHIRPS, Lake Chad.

¹ Corresponding author: tchiromas@gmail.com

Introduction

L'étude de l'évolution des éléments du climat (températures et précipitations) d'une région, permet de caractériser l'évolution des eaux et des activités productives d'un bassin versant, (Ouedraogo, et al., 2024, p.134) ; l'idée est souvent d'estimer l'évolution spatio-temporelle des températures et précipitations sur un bassin versant plus large comme le bassin conventionnel du lac Tchad, puis ensuite évaluer l'impact sur les eaux d'une partie, en l'occurrence sa cuvette nord. Cette partie est une zone de forte densité de peuplement, surtout que les régions nigériennes regroupent à elles seules plus de la moitié de la population dans les environs, alors que la région de Diffa n'en représente que seulement 3 %, (Magrin et Pérouse de Montclos, 2018, p.38-39) ; en d'autres termes, ce peuplement est estimé à l'échelle du bassin du lac Tchad à une moyenne de 50 hab/km², avec une densité de moins de 20 hab/km² sur la cuvette nord. Cette densité de peuplement suit l'évolution du gradient pluviométrique qui favorise les pratiques des activités productives et l'attractivité d'un flux migratoire important (Lemoalle et Magrin, 2014, p.41-48).

Cependant, cette zone est sujette des problèmes de sécheresse du fait d'une variabilité pluviométrique caractérisée par une incertitude de cumul annuel important, à laquelle s'ajoute l'évolution des températures intenses sur l'ensemble du bassin conventionnel du lac Tchad, particulièrement dans le bassin de la Komadouou Yobé et l'étendue de la cuvette nord qui est souvent asséchée en situation du petit lac Tchad sec, (Sylvestre, 2015, p.40-42). Il est ainsi plus que nécessaire d'étudier la tendance de la variabilité climatique de cette région préoccupée par le problème de l'insécurité politique, qui limite l'accès aux données in situ et aux postes de mesures, (Magrin et Raimond, 2018, p.215-216).

Cela évoque la nécessité de trouver des moyens de substitution permettant d'utiliser des sources des données satellitaires de température comme MODIS_LST, et des précipitations tel que CHIRPS, afin d'étudier l'évolution du climat dans cette région, malgré l'insécurité existante.

1) Présentation de la zone d'étude

Le Lac Tchad est situé dans un bassin endoréique, au centre de l'Afrique et sans exutoire sur la mer. Sa position géographique est comprise entre 12°20', 14°20' de latitude nord et 13°00', 15°20' de longitude est, (Lemoalle, 2015, p.20 ; USGS, 2024). Il s'agit d'un lac peu profond, très variable et centré approximativement sur 13°30'N et 14°00'E, (Leblanc et al., 2011, p.89). Espace original situé en zone sahélienne entre quatre états (Cameroun, Niger, Nigeria, Tchad), le lac Tchad est d'autant plus un écosystème d'une grande importance écologique, économique, mais aussi humaine par ses fonctions et ses services.

Du fait de sa situation dans un bassin endoréique, le niveau du lac Tchad dépend étroitement du climat et des précipitations sur son bassin versant actif. Sa caractéristique principale est donc la variabilité de son niveau et de sa surface ; il a connu une longue histoire de périodes humides et sèches couvrant plusieurs échelles de temps, de l'échelle géologique à l'échelle annuelle et saisonnière, (Lemoalle, 2015, p.20).

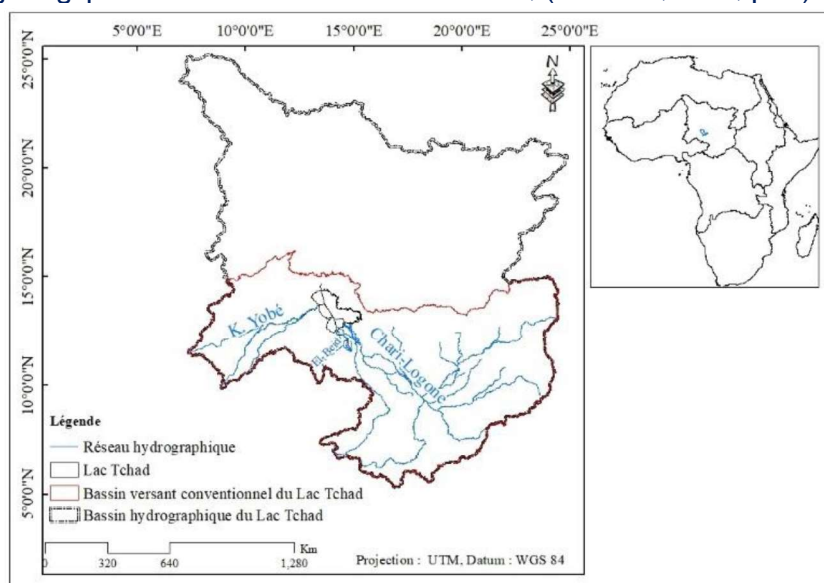


Figure 1 : Localisation du lac Tchad dans son bassin conventionnel

2) La cuvette nord dans le lac Tchad

La cuvette nord du Lac Tchad est la partie du Lac située au nord de la grande barrière ; sa profondeur dans sa zone centrale est plus élevée que la cuvette sud (5,3 m par rapport à 2,7 m) Cette différence de niveau fait que la cuvette nord est très souvent complétée en eaux par les débordements des apports du Chari et Logone, qui représentent entre 80 et 85% des apports totaux au lac Tchad, (Leblanc et al., 2011, p.88 ; Lemoalle et Sedick, 2015, p.33). Ce débordement est mis en scène entre le 11 et 18 Novembre 1988, à travers les images du satellite Météosat, (Citeau, et al., 1988, p.29).

La cuvette nord dispose d'un seul affluent nord qui est la Komadougou Yobé, ces apports représentent moins de 1% des totaux au lac Tchad, comparé aux apports des affluents sud évaluées entre 80 et 85%, (Leduc et al., 1998, p.283; Lemoalle et Sedick, 2015, p.33). Cette situation conjuguée au changement climatique, provoque souvent des assèchements sur la cuvette nord durant les années de pluviométrie minimale, dans un contexte du climat sahélo-saharien variable dans le bassin de la Komadougou Yobé, comparativement à un climat humide sur le bassin du Chari et Logone.

II. Matériel et méthodes

1) Présentation des données

Cette étude utilise les données satellitaires de température MODIS_LST et précipitations CHIRPS dans l'optique de remédier aux contraintes des données caractérisées par l'insécurité qui se vit à l'échelle du bassin de lac Tchad, (Magrin et Raimond, 2018, p.215-216). Ces données s'accordent très bien aux mesures in situ grâce à la résolution spatiale raisonnée de 0,05° pour CHIRPS et 1 km pour MODIS_LST et à leur couverture spatio-temporelle depuis 2000 et 1981 pour CHIRPS, (Wan, 2008, p.59; Sohrabinia et al., 2012, p.3501; Ghaderpour et al., 2024, p.6).

a) Régression linéaire et test de corrélation entre températures in situ et MODIS_LST (2001-2010)

Le croisement entre deux sources de données de température, MODIS_LST et in situ, permet de déterminer le lien statistique qui existe entre ces deux sources de données.

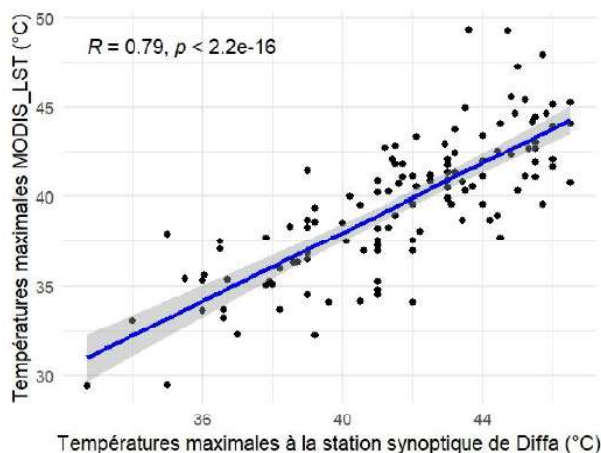


Figure 2 : Diagramme de dispersion des températures MODIS_LST en fonction des températures in situ à la station de Diffa, entre 2001 et 2010.

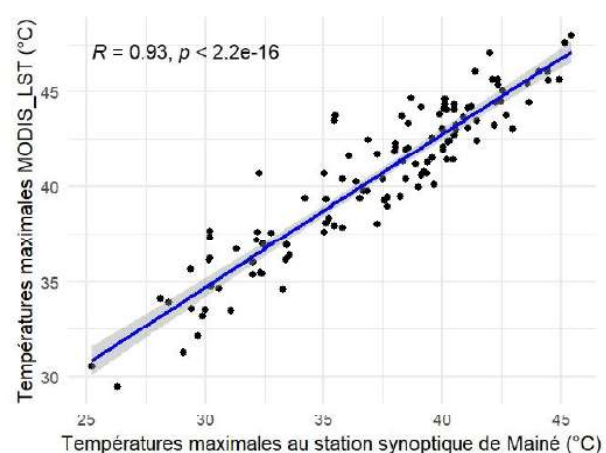


Figure 3 : Diagramme de dispersion des températures MODIS_LST en fonction des températures in situ la station de Mainé-Soroa, entre 2001 et 2010.

Les données satellitaires de MODIS_LST évoluent de façon assez proche que les données in situ mesurés au sol, avec $R = 0,79$ et $R = 0,93$. Ainsi, le coefficient p-value est extrêmement faible ($p\text{-value} < 2.2e-16$) dans les deux cas, cela signifie que la relation statistique entre les deux sources de données est hautement significative. Le coefficient de corrélation de Pearson compris entre -1 et 1 indique une relation très forte, quand les valeurs sont proches de 1 ; cependant quand il est proche de 0 les deux variables sont liées mais ne sont pas corrélées (Held, 2010, p.652-653 ; Patrick et al., 2018, p.1763). La relation statistique entre les données est d'autant plus forte lorsque le coefficient de corrélation de Pearson est inclus dans l'intervalle de confiance, (Held, 2010, p.652-653). Pour cette étude, le coefficient de Pearson $R = 0.79$ est compris dans l'intervalle de confiance $[0.70 \text{ à } 0.84]$ et $R = 0.93$ est situé dans l'intervalle $[0.90 \text{ et } 0.95]$.

Le R^2 définit comme une mesure de l'adéquation d'un modèle de régression linéaire aux données par rapport à une version restreinte du modèle, (Bartels, 2015, p.2) ; il est ici $R^2 = 0.61$, cela dit que 61% de la variance de Y est expliqué par X, et $R^2 = 0.82$ indique que 82% de la variance de Y est expliqué par X.

b) Régression linéaire et test de corrélation entre les précipitations *in situ* et CHIRPS (2001-2010)

Les données *in situ* recueillies au niveau des stations de Diffa, Mainé-Soroa et N'guigmi ont suivi des tests statistiques suivants pour tester leurs concordances avec les données satellitaires de précipitations (CHIRPS).

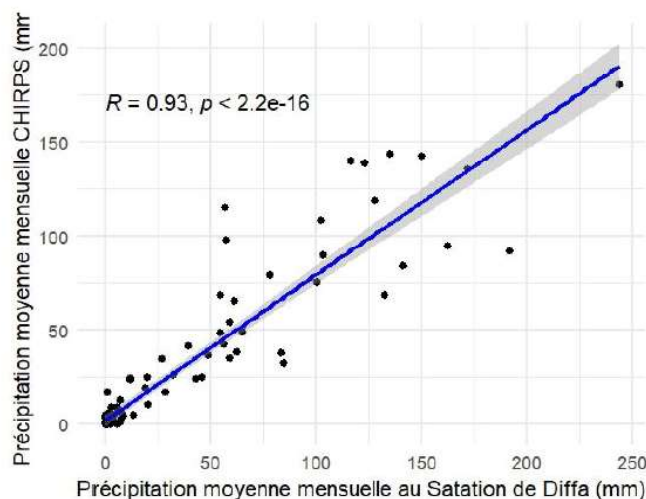


Figure 4 : Diagramme de dispersion des précipitations CHIRPS en fonction des précipitations *in situ* à la station de Diffa, entre 2001 et 2010.

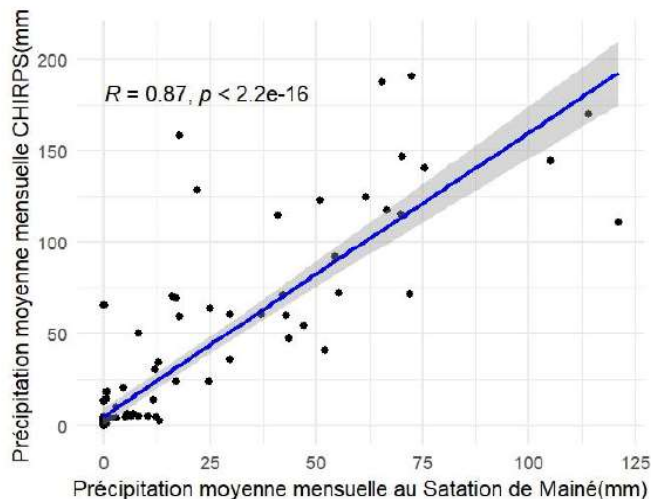


Figure 5 : Diagramme de dispersion des précipitations CHIRPS en fonction des précipitations *in situ* à la station de Mainé-Soroa, entre 2001 et 2010.

:

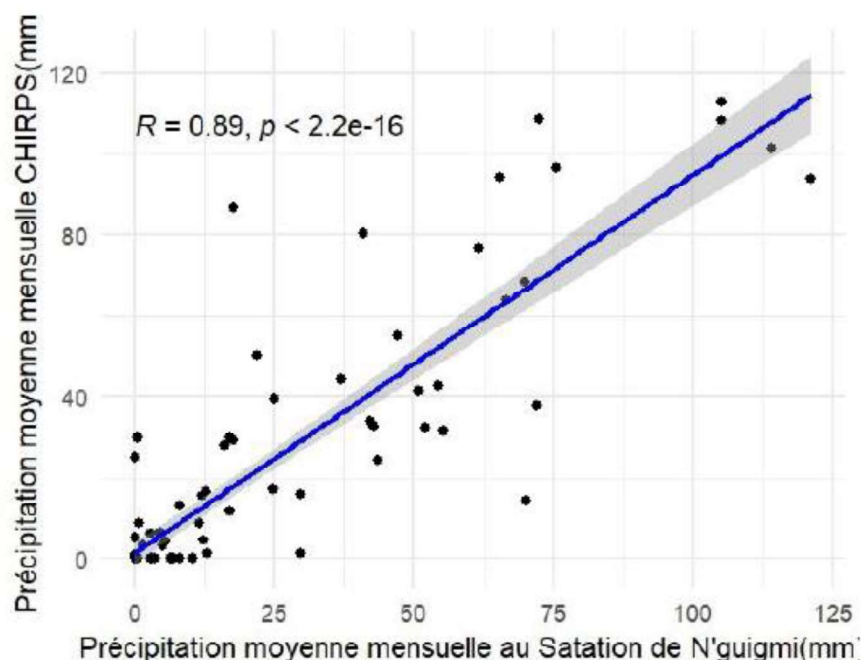


Figure 6 : Diagramme de dispersion des précipitations CHIRPS en fonction des précipitations *in situ* à la station de N'guigmi, entre 2001 et 2010

La dispersion entre les précipitations CHIRPS et in situ est réalisée avec un coefficient de Pearson $R = 0.93$, $R = 0.87$ et $R = 0.89$; de plus $p\text{-value} < 2.2e-16$ respectivement dans les trois cas de figure, cela suppose qu'il y a une forte corrélation entre les précipitations in situ et CHIRPS. Cela dit qu'il y'a une forte variation des précipitations spatiales en fonction des précipitations in situ. L'intervalle de confiance inclut le coefficient de Pearson avec un taux appréciable dans les trois cas avec $R = 0.93$ compris dans $[0.90, 0.95]$, puis $R = 0.87$ compris dans $[0.81, 0.91]$; et $R = 0.89$ compris dans $[0.84, 0.92]$. Les variances des précipitations CHIRPS sont nettement expliquées par celles des précipitations in situ à plus de 75% dans les trois cas successifs, ce qui autorise un $R^2 = 0.86$, $R^2 = 0.75$ et $R^2 = 0.79$. Cependant la dispersion du nuage de points entre données d'origine spatiale et données in situ est plus élevée avec CHIRPS qu'avec MODIS LST.

c) La détermination et l'analyse des erreurs statistiques

Les erreurs statistiques dont appréciés à travers deux métriques dont : le RMSE (Root Mean Squared Error), ou l'écart quadratique moyenne et le MAE (Mean Absolute Error) ou l'erreur absolue moyenne, les deux sont nécessaires pour évaluer la performance d'un modèle statistique, (Hodson, 2022, p.5482).

Dans ce cas les erreurs examinées par ces métriques sont les suivants :

Tableau 1 : Erreurs du modèle de prédiction entre température MODIS_LST et In Situ

Cor Température MOD_LST/In Situ	MAE	RMSE
Station de Diffa	2,5	3,1
Station de Mainé-Soroa	3,3	3,7

A la station de Diffa l'écart entre les deux métriques MAE et RMSE est de $0,6^{\circ}\text{C}$, ainsi au niveau de la station de Mainé-Soroa l'écart s'élève à $0,4^{\circ}\text{C}$. La notion d'écart entre le MAE et la RMSE indique que le modèle fonctionne dans la plupart des cas mais échoue à quelques exceptions seulement.

Sur ce, les erreurs entre les précipitations satellitaire CHIRPS et in situ se présentent dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Erreurs du modèle de prédiction entre précipitations CHIRPS et In Situ

Cor Précipitations CHIRPS/In Situ	MAE	RMSE
Station de Diffa	8,5	18,10
Station de Mainé-Soroa	14,4	31,3
Station de N'guigmi	6,3	13,2

Les erreurs sont plus élevées avec CHIRPS à chaque station, avec des écarts moyens de $6,9\text{ mm}$ à la station de Diffa, $16,9\text{ mm}$ à la station de Mainé-Soroa et $6,9\text{ mm}$ à la station de N'guigmi. Malgré la différence de performance entre CHIRPS et MODIS_LST, ces taux d'erreurs dans le modèle statistique montrent que les deux sources de données sont bien en parfait accord, quand bien même ces erreurs sont souvent fonction des aberrations entre les deux sources de données dû au report manuel au niveau des stations in situ.

d) La portée des données MODIS_LST et CHIRPS dans le contexte de lac Tchad

Ces données s'accordent bien avec les données in situ avec moins des erreurs, tout comme cela est bien le cas dans d'autres contextes similaires ; en Afrique de l'ouest, (Mahamadou et al., 2018, p.58 ; Dembélé et Zwart, 2016, p.4002) ; et ailleurs dans la vallée viticole de Waipara en Nouvelle-Zélande, (Morin et al., 2018, p.62), et dans d'autres région du monde, (2023 Kouakou et al., 2023, p.1).

Ces données satellitaires (MODIS_LST et CHIRPS) ont été acquises pour une période de 2001 à 2024, pour cette étude.

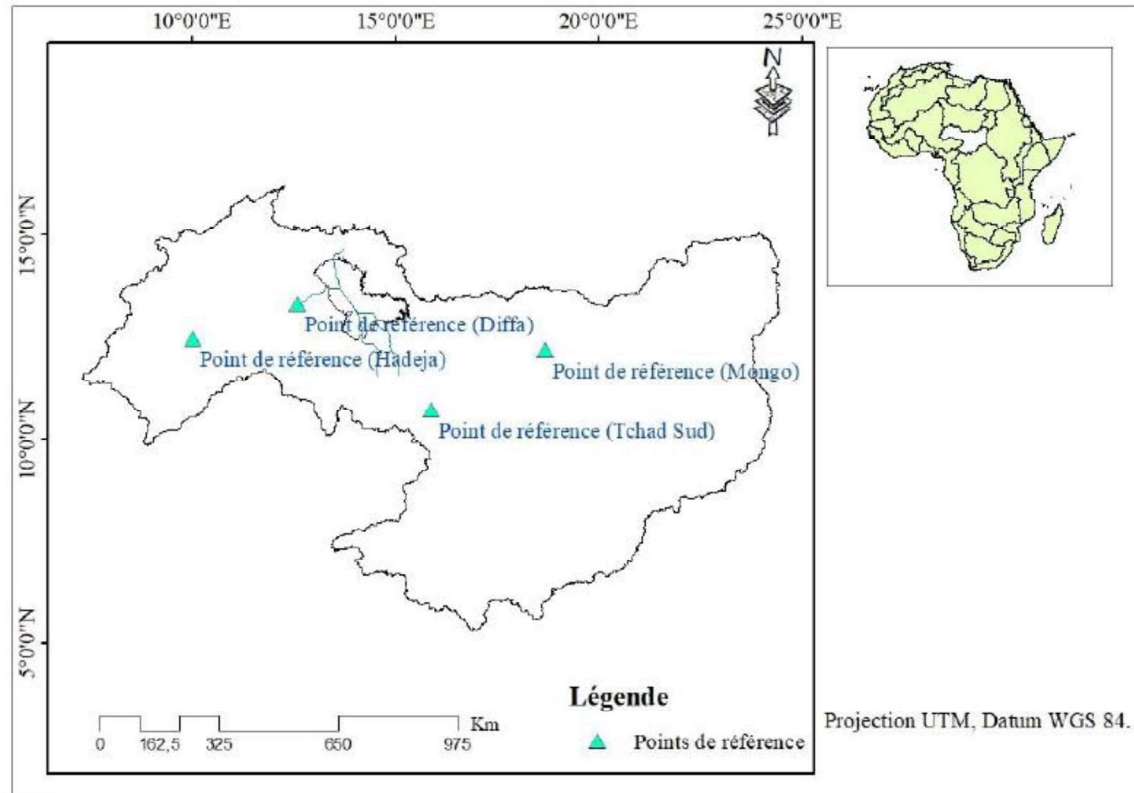


Figure 7 : Répartition des points de référence, sur le bassin conventionnel du Lac Tchad

II- MÉTHODE DE TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES

Cette étude utilise les données de température satellitaire de MODIS_LST et les précipitations de CHIRPS pour la période de 2001 à 2024. Ces données satellitaires peuvent enrichir le suivi spatio-temporel des éléments climatiques, qui influence l'évolution des eaux sur des bassins versant ; pour quels que soient les objectifs, (Legay et al., 2022, p.1).

A cet effet, ces données MODIS_LST et CHIRPS sont télécharger sur un total de 4 points de référence à l'échelle du bassin conventionnel du lac Tchad, du centre vers l'ouest. Ainsi des outils statistiques comme les libraires ggplot2, dplyr, et lubridate du packages R ont permis de réaliser des graphiques décrivant les évolutions des températures MODIS_LST et précipitations CHIRPS ; l'application de la librairie changepoint du packages R a contribué à identifier les points de rupture avec la méthode PELT (Pruned Exact Linear Time), c'est une méthode récursive conçue pour identifier le nombre et l'emplacement des points de changement dans un segment de données, et détermine une tendance selon la moyenne ou la variance, (Auger et Lawrence, 1989, p.41-49) ; pour ce cas c'est la moyenne (cpt.mean) qui est utilisée pour identifier l'évolution des ruptures à travers l'espace et le temps ; cette méthode s'applique selon le processus suivant décrit par (Killick et al., 2012, p.3-5).

Input :

Un ensemble de données de la forme, (y_1, y_2, \dots, y_n) où $y_i \in \mathbb{R}$;

Une mesure d'ajustement $C(\cdot)$ dépendante des données ;

Une pénalité β indépendante du nombre ou de l'emplacement des points de changement.

Initialiser : Soit n = longueur des données et définissons $F(0) = -\beta$, $cp(0) = 0$, $pts = 0$.

Iterate for $\tau^* = 1, \dots, n$

1. Calculate $F(\tau^*) = \min_{\tau \in (0, pts, \tau^* - 1)} [F(\tau) + C(y(\tau + 1) : \tau^*) + \beta]$.

2. Let $\tau_1 = \arg \{ \min_{0 \leq \tau < \tau^*} [F(\tau) + C(y(\tau + 1) : \tau^*) + \beta] \}$.

3. Set $cp(\tau^*) = [cp(\tau_1), \tau_1]$.

4. Set $pts = \arg T \{ F(\tau) + C(y(\tau + 1) : \tau^*) + \beta + K > F(\tau^*) + \beta \}$.

Output Afficher les points de changement enregistrés dans $cp(n)$.

Ensuite le test non paramétrique de Mann Kendall est appliqué afin d'identifier la tendance des évolutions des températures et des précipitations sur l'ensemble des graphiques ; ce test exploite la librairie trend du R packages, la statistique du test de Mann Kendall est donnée par l'équation :

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

La fonction sgn traduit le signe de x qui se présente sous la forme de l'équation suivante :

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j > x_i \\ 0 & \text{si } x_j = x_i \\ -1 & \text{si } x_j < x_i \end{cases}$$

Ce test est validé en comparant la variable p-value à un seuil de référence généralement de 0,05, (Toure et al., 2022, p.124-125). Les cartes de températures et précipitations sont générées à partir de Google Earth Engine Open accès, et la mise en forme est faite sur ArcsMap.

III- RÉSULTATS

Les données de température MODIS_LST et précipitation CHIRPS entre 2001 et 2024 ont été traitées et examinées au niveau des divers points de référence dans l'optique de caractériser le contexte de la cuvette nord du lac Tchad.

1) Analyse et interprétation des tendances d'évolution des températures sur l'étendue de la cuvette nord du lac Tchad.

Au centre, aux points de référence Mongo-Tchad et Tchad-sud

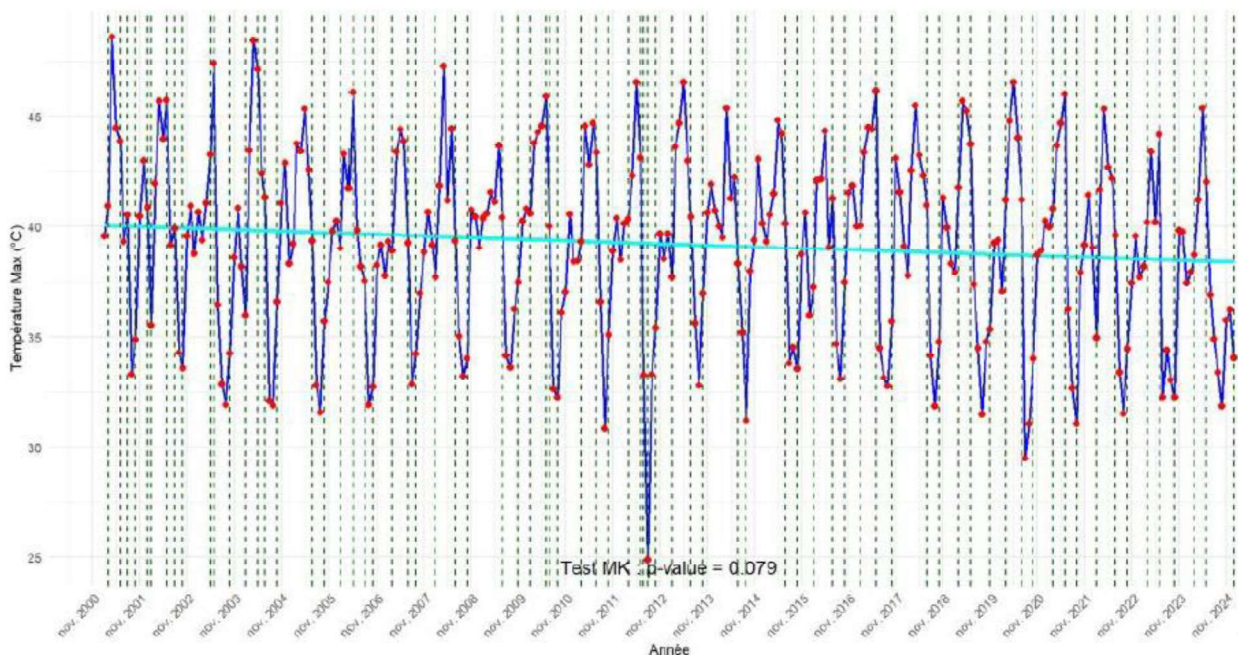


Figure 8 : Tendence d'évolution des températures maximales démontrée par le test de Mann Kendall (p-value = 0,079) au point de référence de Mongo entre 2001 et 2024.

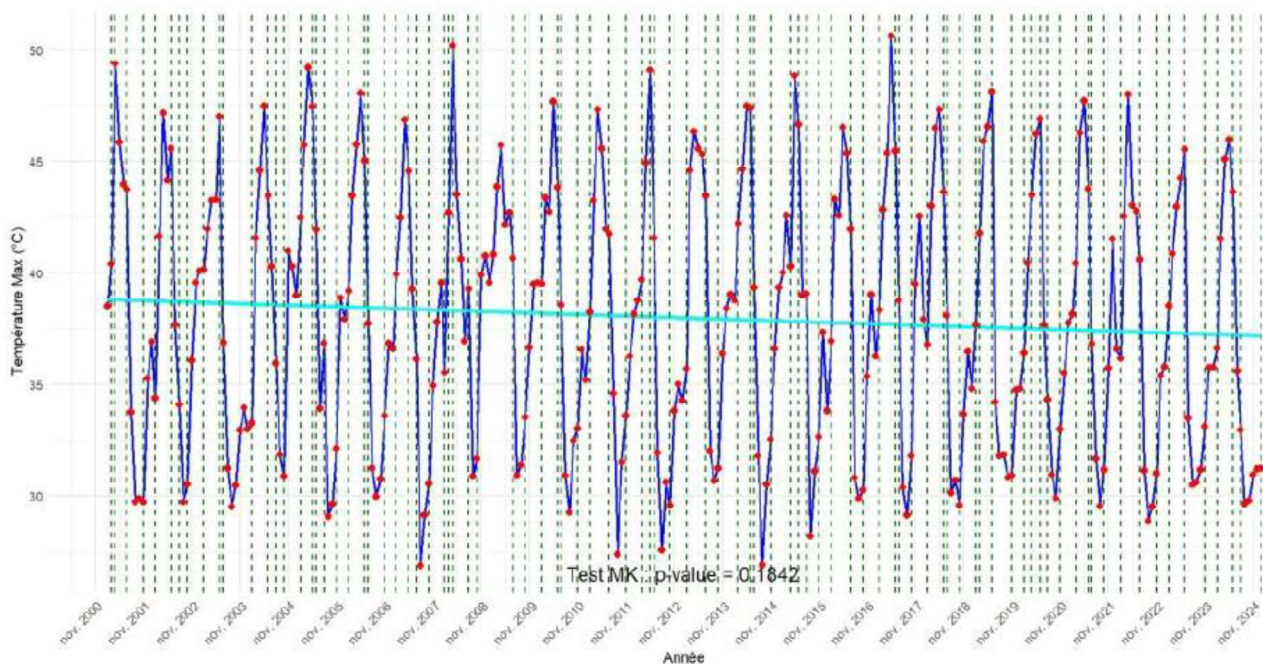


Figure 9 : Tendence d'évolution des températures maximales démontrée par le test de Mann Kendall (p-value = 0,1842) au point de référence Tchad sud entre 2001 et 2024.

A l'ouest, aux points de référence Diffa, Hadéja

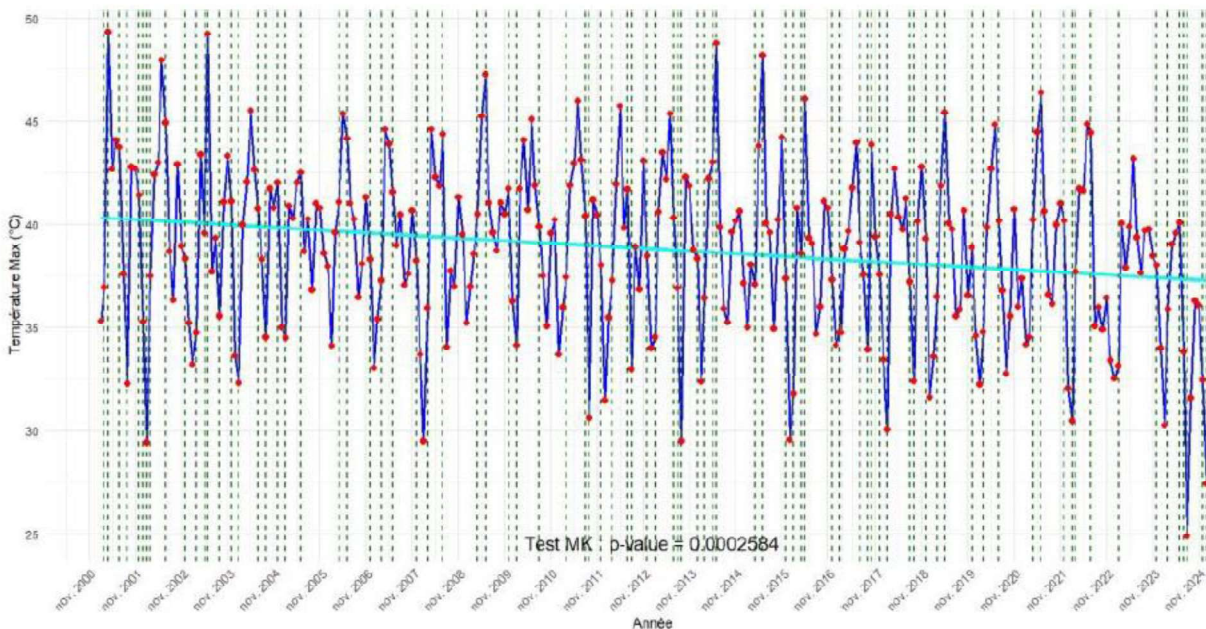


Figure 10 : Tendence d'évolution des températures maximales démontrée par le test de Mann Kendall (p-value = 0,0002584) au point de référence de Diffa entre 2001 et 2024.

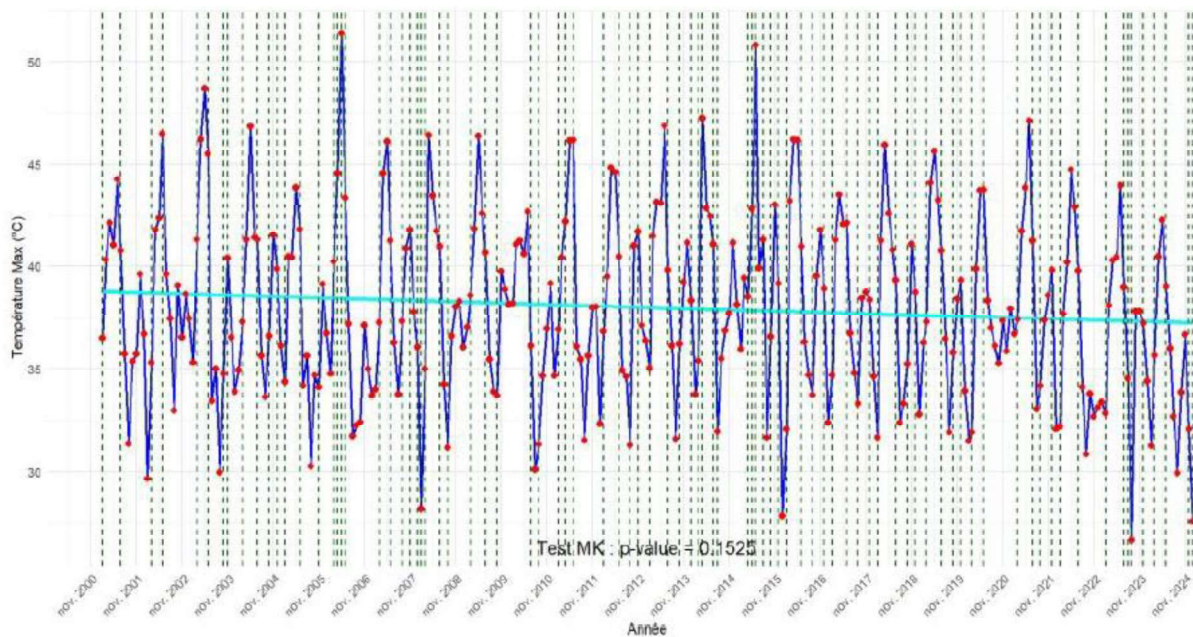


Figure 11 : Tendence d'évolution des températures maximales démontrée par le test de Mann Kendall (p-value = 0,1525) au point de référence de Hadeja entre 2001 et 2024.

Du centre vers l'ouest, ces tendances et évolutions caractérisent le contexte climatique de la cuvette nord, l'évolution des températures au centre est caractérisée par des records qui atteignent 40°C et 45°C, voir 50°C ; ces températures élevées sont généralement retrouvées surtout entre Avril et Mai et s'étendent sur l'ensemble du bassin nord du lac Tchad, ce qui inclut les points de référence de Diffa et Hadeja. Le climat est à l'étendue de cette région du lac de type sahélo-saharien ; caractérisé par une évaporation qui varie entre 1 800 mm et 2 400 mm, (Adeyeri et al., 2017, p.5).

Ces variations de températures sont caractérisées par des ruptures des tendances de réchauffement qui s'interrompent par des tendances de refroidissement, et vice-versa ; ainsi les points de rupture indiqués en lignes vertes verticales ; représentent les moments où ces ruptures de tendance sont observées. Il y'a au total 75 points de ruptures au point de référence de Mongo-Tchad contre 91 au point de référence Tchad sud ; puis à l'ouest 85 sont enregistrés au point de Diffa contre 87 au point de Hadeja.

Le test de Mann Kendall montre quand les tendances sont nettement significatives, comparant la variable p-value à un seuil de 5% (0,05), (Liu et al., 2022, p.10-15 ; Toure et al., 2022, p.124-125).

Concernant cette étude, les tendances sont positives et légèrement décroissante au niveau de tous les points de référence entre 2001 et 2024, avec un taux de significativité différent.

Tableau 3 : Taux de signification de la tendance des températures

Test de Mann Kendall	P-value	Sens de la tendance
Point de référence Mongo	0,079	Très significative
Point de référence de Tchad sud	0,1842	Significative
Point de référence de Diffa	0,0002584	Hautement significative
Point de référence de Hadeja	0,1525	Significative

Le teste de la tendance de Mann Kendall démontre que l'inclinaison de la tendance intervient toutefois entre 2011-2024, cette dernière est moins chaude que sa précédente (2001-2011).

2) Analyse décennale des températures maximales entre 2001 et 2024

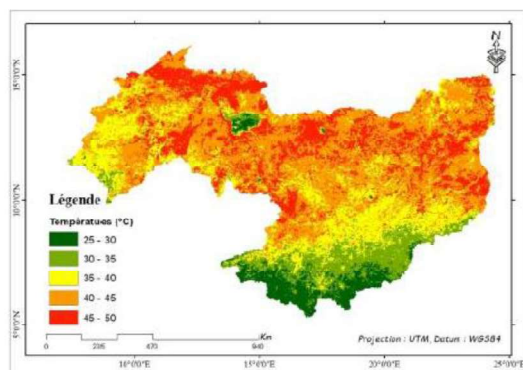


Figure 12 : Répartition spatiale des températures maximales entre 2001-2011

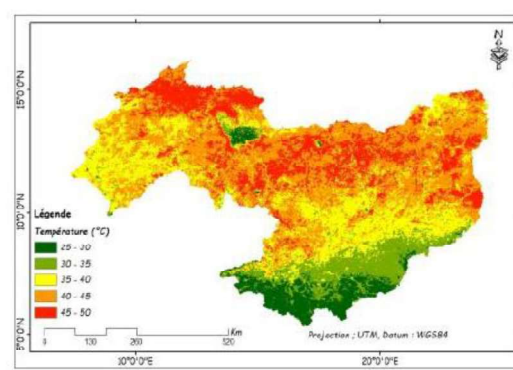


Figure 13 : Répartition spatiale des températures maximales entre 2011-2024

La décennie 2001-2010, est marquée par des températures élevées qui atteignent 40/45°C ou plus, ce record s'observe à travers la spatialisation des températures sur la cuvette nord du lac Tchad, dont le nord-ouest est très marqué par rapport au sud-ouest ; sauf au niveau des retenues d'eau du lac, quand même la cuvette nord du lac se voit en majorité absorbée par la répartition spatiale des températures très chaude. Cependant, la décennie suivante 2010-2024, est caractérisée par une atténuation de ces hautes températures on n'y voit que les températures élevées sont beaucoup plus concentrées au nord-ouest et au centre, la cuvette nord est donc moins concernée dans la période récente par rapport à 2001-2010.

3) Analyse et interprétation des tendances d'évolution des précipitations sur l'étendue de la cuvette nord du lac Tchad.

Au centre, aux points de référence Mongo-Tchad et Tchad-sud

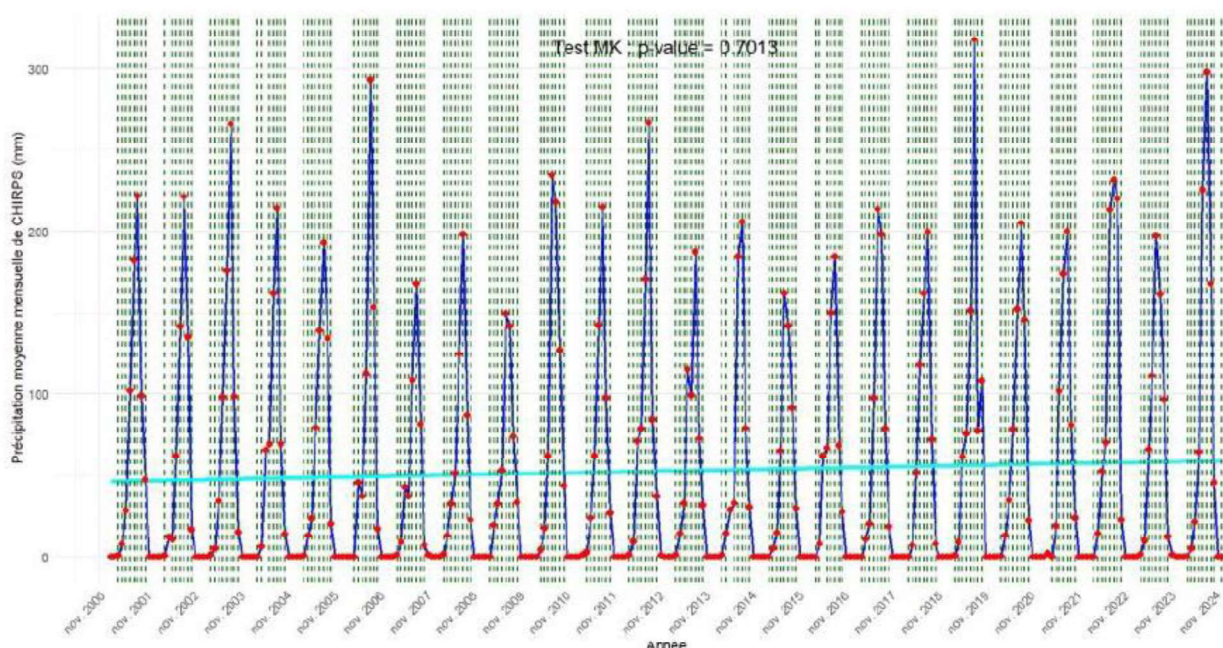


Figure 14 : Tendence d'évolution des précipitations démontrée par le test de Mann Kendall (0,7013) au point de référence de Mongo-Tchad entre 2001 et 2024.

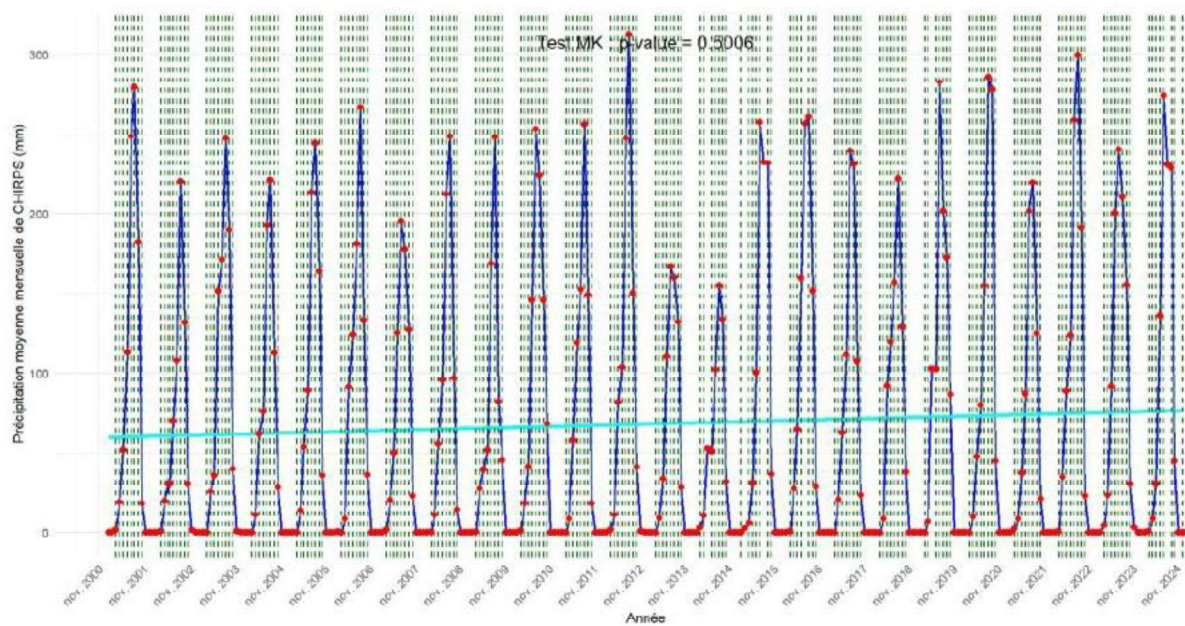


Figure 15 : Tendance d'évolution des précipitations démontrée par le test de Mann Kendall (0,5006) au point de référence de Tchad sud entre 2001 et 2024.

A l'ouest, aux points de référence Diffa et Hadéja.

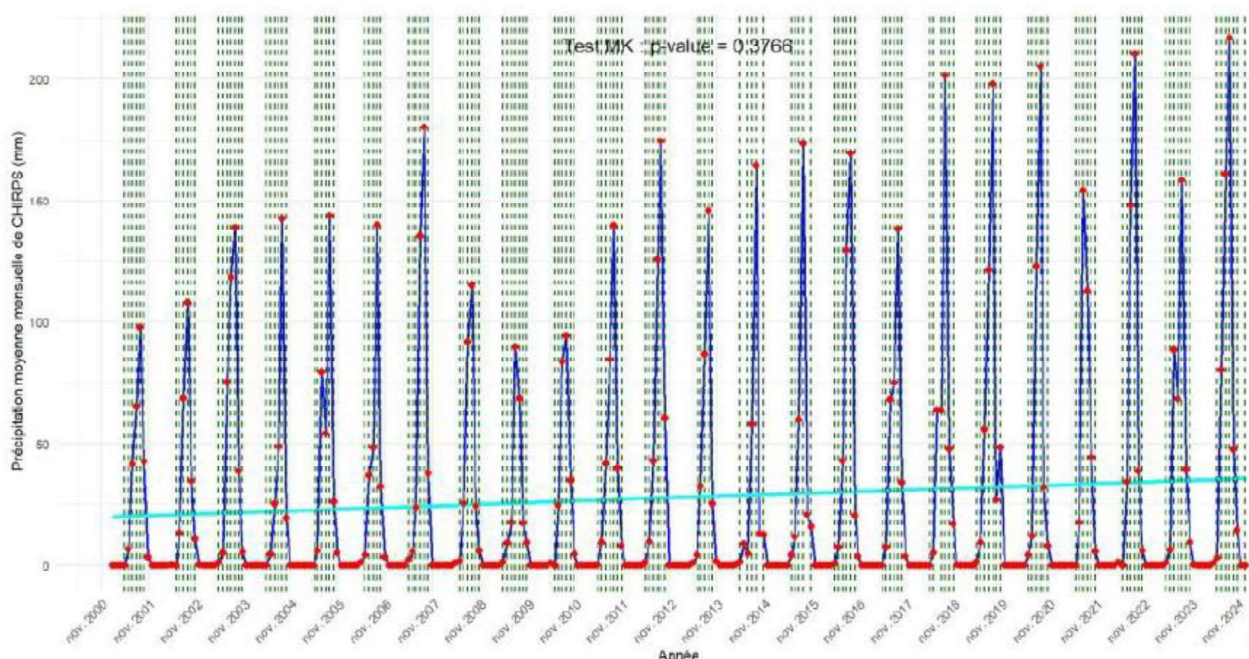


Figure 16 : Tendance d'évolution des précipitations démontrée par le test de Mann Kendall (0,3766) au point de référence de Diffa entre 2001 et 2024.

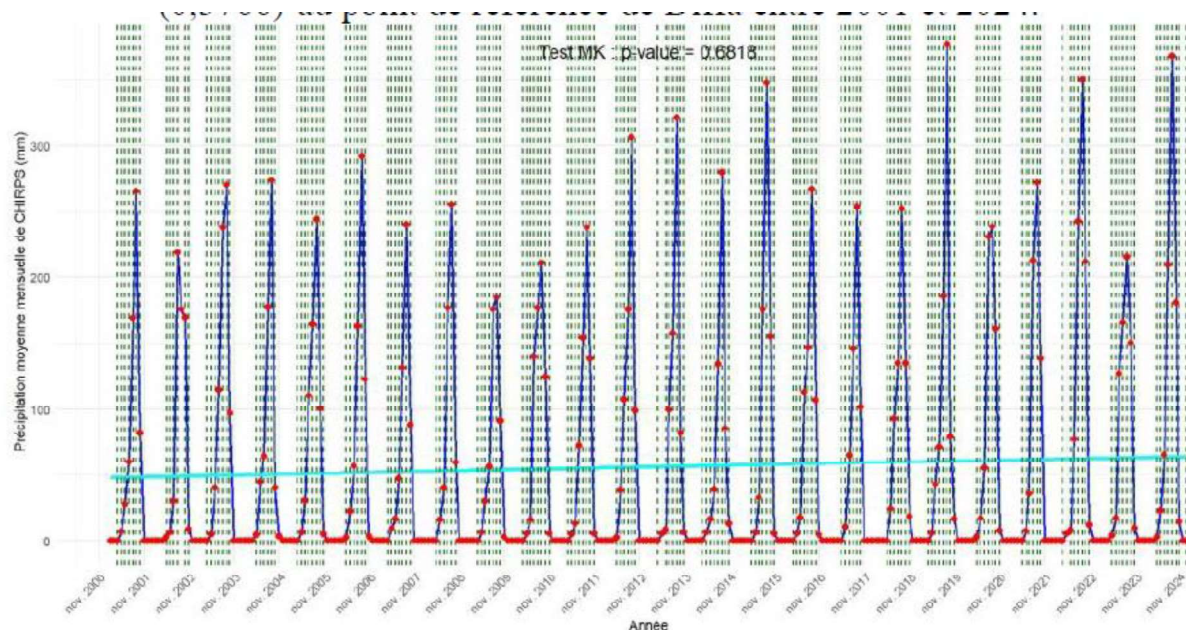


Figure 17 : Tendence d'évolution des précipitations démontrée par le test de Mann Kendall (0,6818) au point de référence de Hadeja entre 2001 et 2024.

Au centre du bassin conventionnel du lac Tchad, l'évolution des pluies moyennes annuelles dans le bassin des tributaires au lac et à la cuvette nord est située entre 250 mm et plus de 310 mm au point de référence Mongo Tchad et Tchad sud. Dans le bassin de la Komadougou Yobé principal affluent à la cuvette nord, au nord-ouest au niveau de la station de Diffa et au sud-ouest au point de référence de Hadéja, les pluies évoluent entre 250 mm et 350 mm ; le gradient pluviométrique annuel moyen varie entre 300 et 1200 mm dans le bassin du lac Tchad.

Le test de Mann Kendall montre une tendance monotone, croissante sur la décennie 2011-2024 par rapport à la décennie précédente (2001-2011), comme le montre le tableau.

Tableau 4 : Taux de signification des tendances des températures

Test de Mann Kendall	P-value	Sens du tendance
Point de référence Soudan	0,4808	Très significative
Point de référence RCA	0,6131	Significative
Point de référence Mongo	0,7013	Significative
Point de référence de Tchad sud	0,5006	Significative
Point de référence de Diffa	0,3766	Très significative
Point de référence de Hadéja	0,6818	Significative

4) Analyse décennale des précipitations entre 2001 et 2024

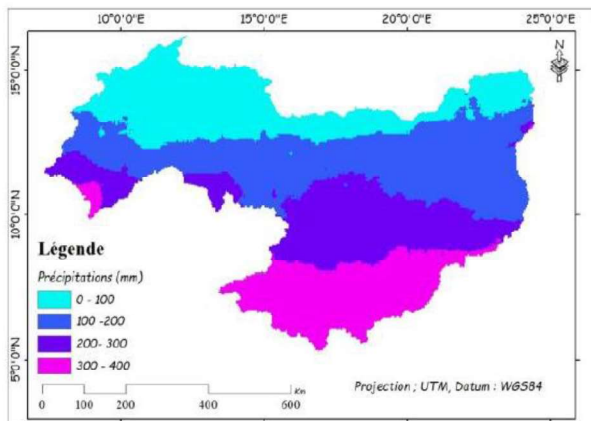


Figure 13 : Répartition spatiales des précipitations à l'échelle décennale entre 2001-2011.

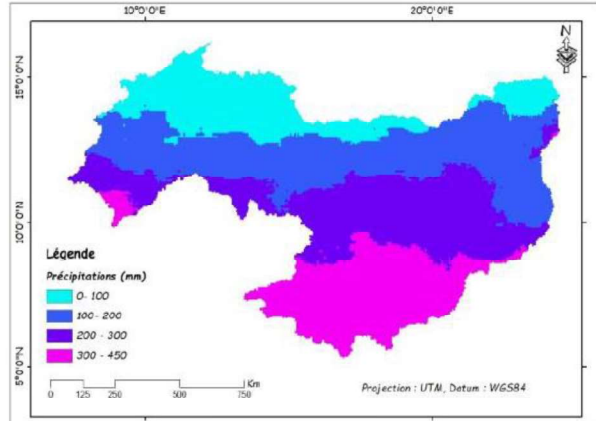


Figure 14 : Répartition spatiales des précipitations à l'échelle décennale entre 2011-2024.

D'après les cartes des précipitations, la pluviométrie décroît du sud vers le nord du bassin conventionnel du lac Tchad, le nord-ouest est le plus marqué par des pluies minimales de 100 mm et 200 mm, la cuvette nord du lac Tchad est souvent séchée en cas des précipitations minimales. La décennie 2011-2024 est plus pluvieuse que la précédente 2001-2011, ce qui s'observe sur les deux cartes respectivement, du sud au nord avec une densité élargie des pluies de plus de 100 mm et plus de 200 mm sur la cuvette nord.

IV- DISCUSSION

L'évolution des éléments climatiques dans la cuvette nord du lac Tchad est marquée par des températures élevées qui atteignent très souvent 40°C et 45°C, voir 50°C ; ces températures interviennent généralement entre Avril et Mai et s'étendent sur l'ensemble de la cuvette nord du lac Tchad, (Mbevo & Voundi, 2021, p.44-45). Le test de Mann Kendall montre que l'évolution des températures suit une tendance décroissante située entre significative et très significative ; cette tendance est marquée par des ruptures allant du moins chaud au plus chaud. Cela explique combien cette région est sujette à l'augmentation du gradient thermique qui est évalué à 1,4 °C entre 1950 et 2020 à l'entour des régions tchadiennes, (Magrin et Lemoalle, 2019, p.292) ; cela s'étend sur l'ensemble de la cuvette nord avec une variation chiffrée entre 0,8 et 1 °C, (Funk et al., 2012, p.2). En d'autres termes, cette région fait face aux futures intenses augmentations spatiales des températures qui pourrait être de l'ordre de 6% en 2050 et de 11% en 2100, selon les projections, (Magrin et Lemoalle, 2019, p.292). Certains travaux sur l'analyse des extrêmes climatique dans le bassin de la Komadougou Yobé montrent en substance que le climat dans cette région est caractérisé par une tendance continue des indices extrêmes de températures, fréquents dans un futur proche et lointain, (Adeyeri et al., 2019, p.3).

Quant aux pluies moyennes annuelles, leur évolution est située entre 250 mm et plus de 350 mm d'est en ouest à l'échelle de la cuvette nord ; tandis que le gradient pluviométrique annuel moyen varie entre 300 et 1200 mm, (Adeyeri et al., 2017, p.3). Le test de Mann Kendall montre que la pluie suit une tendance monotone, légèrement croissante sur la décennie 2011-2024 par rapport à la décennie précédente (2001-2011), la variation de cette tendance est marquée par des ruptures comprises entre très significative et significative. Les pluies sont inégalement réparties à travers l'espace et le temps ; jusqu'en 1990 les pluies sur la cuvette nord et le bassin de la Komadougou Yobé sont minimales, puis ont passé à un rétablissement modéré entre 1990 à 2015, (Magrin et Lemoalle, 2019, p.293). Les apports de la Komadougou Yobé sont réduits, passant de 0,9 % des apports totaux en période de Moyen Tchad, (Lemoalle et al., 2012, p.247) ; à 0,5 km³/an entre 1990-2000, (Bader et al., 2011, p.413). L'évolution du climat futur dans le bassin de la Komadougou Yobé à travers le test de Mann Kendall, montre une tendance des indices continue des précipitations extrêmes plus fréquentes dans le futur, (Adeyeri et al., 2019, p.5). Les récentes simulations du GIEC concernant les mois de juin-juillet-août pour la période 2081-2100, présumant que le bassin Tchadien est au centre d'une zone de grande incertitude au sens de la variation pluviométrique, (Sylvestre, 2015, p.40).

Les origines de cette légère baisse des tendances de température et de la légère hausse des tendances précipitations dans la cuvette nord sont souvent mal connues. Toutes les projections de futur proche et

lointaine prévoient des augmentations de températures couplée à la diminution des pluies dont la cause est le réchauffement de la planète même au déçu de l'Afrique sur presque 100 ans, bien qu'elle émette moins de gaz à effet de serre, il y'a aussi les actions anthropiques, la circulation atmosphérique, le phénomène de El Ninio entre autres, (Sarr, 2012, p.108; Pattnayak et al., 2019, p.1149). Sur le bassin des tributaires centraux du lac Tchad, les tendances des températures dans cette région impacte considérablement sur la cuvette nord, ainsi les tendances récentes étudiées ne s'arrêtent pour la plupart de cas que vers 2014 ; les températures antérieures sont toujours dominées par des tendances croissantes par rapport aux températures de décennie récente qui sont estimée par les données et les modèles climatiques globaux, (Collins, 2011, p.3649 ; Sarr, 2012, p.108, Mahmood et al., 2019, p.1). En d'autres termes, l'évolution des précipitations est aussi frappée par le même phénomène, les travaux exploitant les données des stations locales concernent les décennies antérieures, à partir de l'an 2000 (L'Hôte et al., 2002, p.566-570), ont pensé que les années des tendances des précipitations décroissante étaient à leur fin, puis aussitôt un retour à ces années et marqué par les données terrain dans la région. Les auteurs (Niel et al., 2005, p.223), confirment à partir des données de 47 stations dans le bassin du lac Tchad que l'ensemble de ce bassin est marqué par une tendance décroissante des précipitations, durant le 20ème siècle, surtout à la veille de l'an 2000 ; cela implique le bassin de la Komadougou Yobé dans la cuvette nord et même sur le bassin de Chari-Logone, (Nkiaka et al., 2017, p.1). La tendance des températures et précipitations durant la décennie récente 2011-2024 est reste estimée par les estimations du climat futur ; différemment de cette présente démarche qui exploite les données de températures de MODIS_LST et CHIRPS, pour démontrer la tendance antérieure (2001-2011) et récente (2011-2024), qui est légèrement croissante pour les précipitations.

L'estimation des évolutions des températures et précipitations sur la cuvette nord du lac Tchad au moyen des données MODIS_LST et CHIRPS se distingue surtout par l'étude statistique de ces données ; et le test non paramétrique de Mann Kendall appliqué pour démontrer le sens des tendances surtout pour la décennie récente (2011-2024) ainsi que les ruptures des tendances identifiées. L'entrave se situe surtout autour du manque des données d'autres stations au centre et à l'est, sur l'étendue du bassin conventionnel du lac Tchad, qui permettraient de faire des tests de corrélation plus larges.

V. CONCLUSION

L'étude de corrélation entre les données satellitaire MODIS_LS, CHIRPS et les données in situ montre que les deux sources de données suivent significativement la même tendance ; l'augmentation de l'une suppose l'évolution de l'autre, c'est ce qui a permis d'exploiter ces données sur un champ plus large après une expérimentation restreinte. Il est justement nécessaire de disposer des données in situ à la hauteur de répondre au besoin de comparaison avec les données satellitaires pour une analyse cadrée dans le temps et l'espace.

En plus cette approche présente d'atout à être priorisée dans un contexte d'insécurité incessante, c'est une option primordiale permettant de mieux explorer, analyser et étudier l'évolution des aspects climatique des régions enclavés ou caractérisées par des insuffisances des données in situ.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ADEYERI O. E., LAMPTEY B. L., Lawin A. E. et SANDA I. S. (2017). Spatio-Temporal Precipitation Trend and Homogeneity Analysis in Komadugu-Yobe Basin, Lake Chad Region. *J Climatol Weather Forecasting* 2017, 5:3, 12p.
- [2] ADEYERI O. E., LAUX P., LAWIN A. E., IGE S. O. et KNSTMANN H. (2020). Analysis of hydrometeorological variables over the transboundary Komadugu-Yobe basin, West Africa. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), p. 1339-1354.
- [3] Adeyeri, O. E., Lawin, A. E., Laux, P., Ishola, K. A., & Ige, S. O. (2019). Analysis of climate extreme indices over the Komadugu-Yobe basin, Lake Chad region: Past and future occurrences. *Weather and Climate Extremes*, 23, 100194. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100194>.
- [4] AUGER I. E. et C. E. LAWRENCE (1989). Algorithms for the optimal identification of segment neighborhoods. *Bulletin of Mathematical Biology* 51(1), p. 39–54.
- [5] BADER J.-C., LEMOALLE J. et LEBLANC M. (2011). Modèle hydrologique du Lac Tchad. *Hydrol. Sci. J.* 56(3), p. 411–425.
- [6] BARTELS R., (2015). Re-interpreting R2, regression through the origin, and weighted least squares, University of Sydney Business School, NSW 2006, Australia, 23p.
- [7] CHAI, T., et DRAXLER, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature, In *Geoscientific Model Development* · June 2014, DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014, pp : 1247–1250.

- [8] CHUNG, J., LEE, Y., JANG, W., LEE, S., KIM, S. (2020). Correlation Analysis between Air Temperature and MODIS Land Surface Temperature and Prediction of Air Temperature Using TensorFlow Long Short-Term Memory for the Period of Occurrence of Cold and HeatWaves, Remote Sens. 2020, 12, 3231; doi:10.3390/rs12193231.
- [9] CITEAU J. DEMARCO H., MAHÉ G. et FRANC J. (1988). Une nouvelle station est née. Océanographes de l'ORSTOM au CRODT, BP 2241, Dakar, p. 23-29.
- [10] DEMBÉLÉ, M., et ZWART, S. J. (2016). Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. International Journal of Remote Sensing Volume 37, 2016 - Issue 17. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1207258>.
- [11] FUNK C. C. ROWLAND J. ADOUM A. A. EILERTS G. et WHITE L. (2012). A climate trend analysis of Chad. Famine Early Warning Systems Network – Informing Climate Change Adaptation Series Fact Sheet 2012-2070, 4 p.
- [12] GANA B. A., HARIR A. I., BOGORO A. G. et OLADOSU R. O. (2018). Stream Ordering As a Tool For Effective River Basin Development : Examples From Komadugu –Yobe River Basin, Nigeria. Journal of Resources Development and Management. Vol.44, 2018, ISSN 2422-8397, p. 67-78.
- [13] GELMAN, A., et CARLIN, J. (2014). Beyond Power Calculations: Assessing Type S (Sign) and Type M (Magnitude) Errors, Perspectives on Psychological Science 2014, Vol. 9(6) 641 –651 © The Author(s) 2014 Reprints and permissions: sagepub.com/journalsPermissions.nav. pp : 642-651.
- [14] GHADPOUR E. MAZZANTI P. BOZZANO F. MUNGNNOZZA G. S. (2024). Trend Analysis of MODIS Land Surface Temperature and Land Cover in Central Italy. Land 2024, 13(6), 796p.
- [15] HALLOUZ F., MEDDI M., MAHÉ G., KARAHACANE H. et ALI RAHMANI S-E., (2019). Tendence des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique : bassin versant de l'oued Mina en Algérie. Journal of Water Science Volume 32, numéro 2, 2019, p. 83-204.
- [16] HECTOR B., GENTHON P., LUXEREAU A., DESCLOITRES M., MOUSSA A. M. et ABDOU H. (2012). Surface water-Groundwater relationship in the downstream part of the Komadougou Yobe River (Eastern Sahelian Niger). Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, 1.
- [17] HELD, U. (2010). Pièges des corrélations: les coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman. Forum Médical Suisse.Forum Med Suisse 2010;10(38). pp: 652–653.
- [18] HODSON, T. O. (2022). Erreur racine-mean-carre (RMSE) ou erreur absolue moyenne (MAE): quand les utiliser ou non, Geosci. Model Dev., 15, pp :5481-5487, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>.
- [19] KILLICK R., FEARNHEAD P. et ECKLEY I. (2012). Optimal detection of changepoints with a linear computational cost, in Journal of the American Statistical Association · December 2012, 19p.
- [20] KOUAKOU, C., PATUREL, J-E., SATGÉ, F., TRAMBLAY, Y., DEFANCE, D., ROUCHÉ, N. (2023). Comparison of gridded precipitation estimates for regional hydrological modeling in West and Central Africa. Journal of Hydrology: Regional Studies Volume 47, June 2023, 101409, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101409>.
- [21] LEBLANC M., LEMALLE J., BADER J.-C., TWEED S. et MOFOR L. (2011). Thermal remote sensing of water under flooded vegetation: new observations of inundation patterns for the 'Small' Lake Chad. J. Hydrol. 2011, 404, p. 87-98.
- [22] LEDUC C., SALIFOU O. et LEBLANC M. (1998). Evolution des ressources en eau dans le departement de Diffa (bassin du lac Tchad, sudest nigerien), Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Cote d'Ivoire. November 1998). IAHS Publ. no. 252, 1998, p. 281-288.
- [23] LEGAY T., AUBERT Y., VERDRONCK J., GUILHEN J., PARIS A., MARTINEZ J-M., SAUVAGE S., DATOK P., SANTOS V. D., SANCHEZ-PEREZ J. M., BRUXELLES S., LAVERGNE E. et MERCIER F. (2022). Peut-on compléter la donnée in situ par la donnée satellite ?, LHB, 108:1, 2090289.
- [24] LEMOALLE J. et SEDICK A. (2015). Bilan hydrique du lac Tchad : le lac comme amplificateur des variations de la pluie sur le bassin. In : Magrin G. (ed.), Lemoalle Jacques (ed.), Pourtier R. (ed.), Déby Itno I. (pref.), Fabius L. (pref.), Moatti Jean-Paul (postf.), Pourtier N. (cartogr.), Seignobos Christian (ill.). Atlas du lac Tchad. Passages, numero spécial 183, p. 33-35.
- [25] LEMOALLE J. MAGRIN G. (dir.), (2014). Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles. Marseille, IRD Editions, coll. Expertise collégiale, bilingue français-anglais, 216 p. + clé USB.
- [26] LEMOALLE J. (2015). Le bassin du lac Tchad : plusieurs définitions possibles. In : Magrin G. (ed.), Lemoalle Jacques (ed.), Pourtier R. (ed.), Déby Itno I. (pref.), Fabius L. (pref.), Moatti Jean-Paul (postf.), Pourtier N. (cartogr.), Seignobos Christian (ill.). Atlas du lac Tchad. Passages, numero spécial 183, p. 20-22.
- [27] LEMOALLE J., BADER J.-C., LEBLANC M., SEDICK A., (2012). Recent changes in Lake Chad: observations, simulations and management options (1973-2011). Global and Planetary Change 80-81: 247-254.
- [28] LEMOALLE, J., BADER, J.-C., LEBLANC, M., et SEDICK, A. (2011). L'évolution récente du Lac Tchad: contexte général et données de base. HAL Id: ird-00579534, P : 9. Récupéré sur <https://ird.hal.science/ird-00579534>.
- [29] LÉVY, P., (1924). Théorie des erreurs. La loi de Gauss et les lois exceptionnelles, Bulletin de la S. M. F., tome 52 (1924), pp : 49-85.

- [30] L'HOTE, Y., MAHÉ G., SOME B., TRIBOULET J.-P. (2002). Analyse d'un indice des précipitations sahéniennes de 1896 à 2000; la sécheresse se poursuit, Hydrological Sciences-Journat-des Sciences Hydrologiques, 47(4) August. p. 563-572.
- [31] LIU S., XIE Y., FANG H., DU H. et XU P. (2022). Trend Test for Hydrological and Climatic Time Series Considering the Interaction of Trend and Autocorrelations. Water 2022, 14, 3006.
- [32] MAGRIN G. et LEMOALLE J. (2019). L'avenir du lac Tchad : les échelles de l'incertitude. In : Raimond C. (ed.), Sylvestre Florence (ed.), Zakinet D. (ed.), Moussa A. (ed.). Le Tchad des lacs : les zones humides sahéniennes au défi du changement global. Marseille : IRD, 2019, p. 289-303.
- [33] MAGRIN G. et PÉROUSE DE MONTCLOS M.-A. (2018). Crise et développement, La région du lac Tchad à l'épreuve de Boko Haram, Agence Française de Développement, 294p., en ligne : <http://editions.afd.fr/>.
- [34] MAGRIN G. et RAIMOND C. (2018). La région du lac Tchad face à la crise Boko Haram : interdépendances et vulnérabilités d'une charnière sahénienne, <https://doi.org/10.4000/bagf.31117>, p. 203-221.
- [35] MAHAMADOU, Y., SALEY, M. M., FODE, M. (2018). Analyse multimodèle régional de climat des régimes de précipitations et de températures au Niger. La Météorologie - n° 101 - mai 2018, pp : 50-61.
- [36] MARTINSSON J. (2010). Changes in the course of the river Komadugu Yobe during the 20th century at the border between Niger and Nigeria. Lund: Lund University, 57 p. multigr. Master, Lund University. 2010.
- [37] MBEVO P. F. et VOUNDI É. (2021). Suivi par télédétection de la dynamique des eaux du lac Tchad et les transformations paysagères et socio-économique (1987-2015). Revue canadienne de géographie/Canadian journal of tropical geography [En ligne], Vol. (8) 1. En ligne le 15 août 2021, p. 43-47.
- [38] MORIN, G., LE ROUX, R., STURMAN, A., QUÉNOL, H. (2018). Évaluation de la relation entre températures de l'air et températures de surface issues du satellite modis : application aux vignobles de la vallée de waipara (nouvelle-zélande). Climatologie, vol. 15 (2018). pp : 62-83.
- [39] OLIVRY J.-C., CHOURET A., VUILLAUME G., LEMOALLE J. et BRICQUET J.-P. (1996). Hydrologie du lac Tchad. Paris : ORSTOM (Monographies Hydrologiques ; 12) ISBN 2-7099-1353-4. ISSN 0335-6906, 302p.
- [40] OUEDRAOGO I., ZOUNDI M. et BONKOUNGOU J. (2024). Constat scientifique de l'évolution des précipitations et des températures dans la commune de korsimoro au centre nord du burkina faso. HYBRIDES VOL. 2, N° 3 – MAI. 2024, p.134-164.
- [41] PATRICK S., CHRISTA B., LOTHAR A. S., (2018). Correlation Coefficients : Appropriate Use and Interpretation. Anesthesia & Analgesia 126(5): pp : 1763-1768, May 2018.
- [42] SOHRABINA M., RACK W. et ZAWAR-REZA P. (2012). Analysis of MODIS LST Compared with WRF Model and in situ Data over the Waimakariri River Basin, Canterbury, New Zealand. Remote Sens. 2012, 4, p. 3501-3527.
- [43] SYLVESTRE F. (2015). Le lac Tchad dans le réchauffement climatique ouest-africain, In Atlas du lac Tchad, p. 40-42.
- [44] TAN, J. CHE, T. WANG, J. LIANG J. ZHANG Y. et REN Z. (2021). Reconstruction of the Daily MODIS Land Surface Temperature Product Using the Two-Step Improved Similar Pixels Method. Remote Sens. 2021, 13, 1671. 27p.
- [45] USGS. (2024, 05 10). Science for a changing world. Récupéré sur science for a changing world, en ligne : <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- [46] WAN Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. Remote Sensing of Environment, 112(1), p. 59-74.
- [47] COLLINS J. M., (2011). Temperature Variability over Africa, Journal of Climate 24, pp: 3649-3666, <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3753.1> (2011).
- [48] SARR, B. (2012). Present and future climate change in the semi-arid region of West Africa: a crucial input for practical adaptation in agriculture. Atmospheric Science Letters 13, pp: 108–112, <https://doi.org/10.1002/asl.368>;
- [49] PATTNAYAK, K. C., ABDEL-LATHIF, A. Y., RATHAKRISHNAN, K. V., SINGH, M., DASH, R., et MAHARANA, P. (2019). Changing climate over Chad: Is the rainfall over the major cities recovering? Earth and Space Science, 6, 1149–1160. <https://doi.org/10.1029/2019EA000619>. (p.1149).
- [50] R. MAHMOOD, S. JIA, et W. ZHU, (2019). Analysis of climate variability, trends, and prediction in the most active parts of the Lake Chad basin, Africa. Scientific REPORTS. (2019) 9:6317, 18p. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42811-9>.
- [51] NIEL, H., LEDUC, C. DIEULIN, C. (2005) Caractérisation de la Variabilité Spatiale et Temporelle des Précipitations Annuelles sur le Bassin du Lac Tchad au Cours du 20ème Siècle/Spatial and Temporal Variability of Annual Rainfall in the Lake Chad Basin During the 20th Century. Hydrological Sciences Journal 50, pp: 223-243, <https://doi.org/10.1623/hysj.50.2.223.61800> (2005).
- [52] NKIAGA, E., NAWAZ, N. R. LOVETT, J. C. (2017). Analyse de la variabilité pluviométrique dans le bassin de Logone, bassin du lac Tchad. Int. J. Climatol. 37, 3553-3564, <https://doi.org/10.1002/joc.4936> (2017).