

Etudes Des Anomalies Des Variables Climatiques : ETP, Précipitations, Températures, Ruissellement, NDVI Avec Outils Géomatiques Et Télédétection : De 1980 A 2023

Mokili Enasi Emmanuel¹, Kazadi Tshamala Evariste², Mokili Enasi Josué³, Osako Longongo Willy⁴, Minga Stéphane⁵, Kabasele Yenga Yenga Albert⁶

¹Chef de travaux et Enseignant de l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics de Kisangani ; Spécialité Géomatique et Géodésie Spatiale

²Assistant du premier mandat et Enseignant à l'Université de Pédagogie National de Kinshasa ; Spécialité : Physique spatiale

³Assistant du premier mandat et Enseignant de l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics de Kisangani ; Spécialité en Géo Risques et Aménagement du Territoire

⁴Assistant du premier mandat et Enseignant de l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics de Kisangani, Expert en Géomatique et Télédétection ;

⁵Professeur des Universités et enseignant à l'Université Pédagogique Nationale de Kinshasa ; Spécialité : Physique Spatiale

⁶Professeur Ordinaire des Universités et enseignant de l'Université Pédagogique Nationale de Kinshasa ; Spécialité : Géomatique, Sig, Télédétection et Physique Spatiale

Auteur Correspondant: Mokili Enasi Josué, jmokili08@gmail.com



Résumé : La rivière Tshopo qui est un affluent majeur de la rivière LINDI, où les aménagements hydroélectriques avec les installations de la centrale subit de temps en deux phénomènes majeurs qui sont : l'immersion des machines d'une part avec comme conséquence la pénurie de du courant électrique, et d'autre part la fermeture complète des vannes pour alimenter la centrale hydroélectrique ; une analyse de variation des variables climatiques s'avère nécessaire pour en déceler la cause. A partir des données récoltées des stations satellitaires des 44 ans a produit des valeurs pour les analyses. Cinq variables climatiques font l'objet de nos études dont les résultats sont les suivants : i) La tendance du profil de variations annuelles des températures annuelles est à la hausse avec un degré de réchauffement qui dépasse 1°C en province de la Tshopo, le pic up a été atteint en 2023 tandis que le pic down a été atteint en 1989 ; ii) La tendance de variations des anomalies est que les précipitations annuelles enregistrent une tendance générale à la baisse avec au moins 40 mm d'eau déjà perdues depuis 1980 jusqu'en 2023. La plus grande quantité d'eau de pluie était enregistrée en 1995 (pic up) ; iii) La tendance générale de variation annuelles des anomalies des ETP est à la baisse aussi comme celle des précipitations, avec une perte 12 mm d'eau dans l'atmosphère (pic down) ; le pic up a été atteint en 2010 ; iv) La tendance générale de variations annuelles des anomalies des ruissellements est à la baisse comme celle des précipitations ; v) La tendance générale de variation annuelle des anomalies de l'indice de végétation est à la baisse avec une chute observée à partir de 2012 ; vi) Pendant notre période d'études, sur graphique du profil de la courbe ombrothermique annuelle produit du logiciel SPSS 26.0 ; il s'observe que les données se groupent en deux grandes périodes, à partir des années 1980 jusqu'aux années 2010 est dit période humide car la courbe des précipitations est au-dessus de la courbe des températures ; et de 2011 jusqu'en 2023 car la courbe des précipitations est en-dessous de celle des températures.

Après une analyse approfondie sur le graphique du profil Variation mensuelles des anomalies des précipitations et des ruissellements en fonction des évapotranspirations avec SPSS 26.0, il s'observe que les trois variables ETP, Précipitations et ruissellement varient proportionnellement en saisons sèche comme en saison de pluie ; et sur Graphique du profil Variation annuelle des anomalies des précipitations et ruissellement en fonction des évapotranspirations, aussi les précipitations et les ruissellements sont proportionnels au cours de la période et une tendance générale à la baisse.

Mots Clés : Etudes, anomalies, variables climatiques, outils géomatiques et Télédétection.

I. Introduction

La rivière Tshopo, un des affluents de la rivière LINDI est du point de vue énergétique une ressource très importante pour la ville de Kisangani car en elle, un barrage a été construit depuis 1955. Etant dans la ville, elle est influencée par le climat de la province de la Tshopo dont elle se retrouve. C'est pourquoi nous voulons étudier les anomalies des variables climatiques qui vont beaucoup influencer le comportement hydrologique et hydraulique de la rivière Tshopo.

II. Problématique

La ville de Kisangani se trouve dans la région équatoriale où il pleut abondamment chaque année avec une précipitation de 1800 mm par an ; or pendant la nuit il se malheureusement qu'il fait très chaud et la population s'interroge sur ce phénomène. En plus, il s'observe que la rivière Tshopo au point du barrage hydroélectrique, les vannes sont fermées pour conserver la totalité d'écoulement au niveau de la centrale hydroélectrique ; cela nous pousse à se poser certaines questions de la manière suivante :

- Quels sont les variables climatiques étudiés pour une période de 44 ans de 198 à 2023 dans la ville de Kisangani ses périphéries?
- Comment se comportent les anomalies des variables climatiques ?
- Quelle est la tendance générale de ces variables ?

III. Hypothèse

Comme dit-on, les hypothèses sont des réponses anticipées dans une recherche scientifique ; nous tenterons de répondre de la manière que voici :

- Les précipitations, les Evapotranspirations, les ruissellements, les températures et les indices de végétation sont les 5 variables de notre recherche ;
- Les températures et les Evapotranspirations sont la cause des anomalies climatiques de la ville de Kisangani et ses périphéries ;
- La tendance générale est à la hausse car la température est à la hausse ainsi que l'augmentation des Evapotranspirations.

IV. Méthodologie

4.1. Présentation du milieu d'étude

Notre site de travail est le bassin de la rivière Tshopo se trouvant dans la province qui porte le même que le site de travail appelé « Tshopo » qui est une des provinces de la République Démocratique du Congo dont Kisangani est le chef-lieu avec 0° 31' 09" de latitude Nord et 25° 11' 46" de longitude Est, pour une Superficie : Environ 1 910 km², la ville est située dans une cuvette à une altitude moyenne de 400 mètres et la population est estimée en 2025 0 environ 1 547 000 habitants (données de projection

urbaine), en 2026 Les projections suggèrent un total de 1 613 000 habitants (croissance annuelle d'environ 4,3 %) ¹ (**Lisenga Bolila, Joël, 2021**) .

La ville de Kisangani et la province de la Tshopo se situent au cœur de la cuvette centrale congolaise. Cette position géographique détermine un climat de type **Af** (équatorial chaud et humide) selon la classification de Köppen. Avec les caractéristiques climatiques suivantes : La région se caractérise par une **grande stabilité thermique** tout au long de l'année. Les températures oscillent généralement entre **22°C** (minimum) et **31°C** (maximum). La **Saisonnalité** : Bien qu'il n'y ait pas d'hiver, une période légèrement plus chaude est observée de janvier à mars. C'est l'un des points les plus pluvieux de la République Démocratique du Congo. Les **Précipitations** : Elles sont abondantes et réparties sur toute l'année, totalisant souvent plus de **1 800\$ mm** par an. Le **Régime** : Il n'existe pas de saison sèche au sens strict, mais plutôt des périodes de moindres pluies (janvier et juillet). Le pic de précipitations se situe généralement en **octobre**. L'**Humidité** : L'humidité relative est extrêmement élevée, dépassant souvent les **80%**, ce qui rend le climat particulièrement oppressant (chaleur lourde) ². (**BAMBALE, A. J., et al.; 2024**).

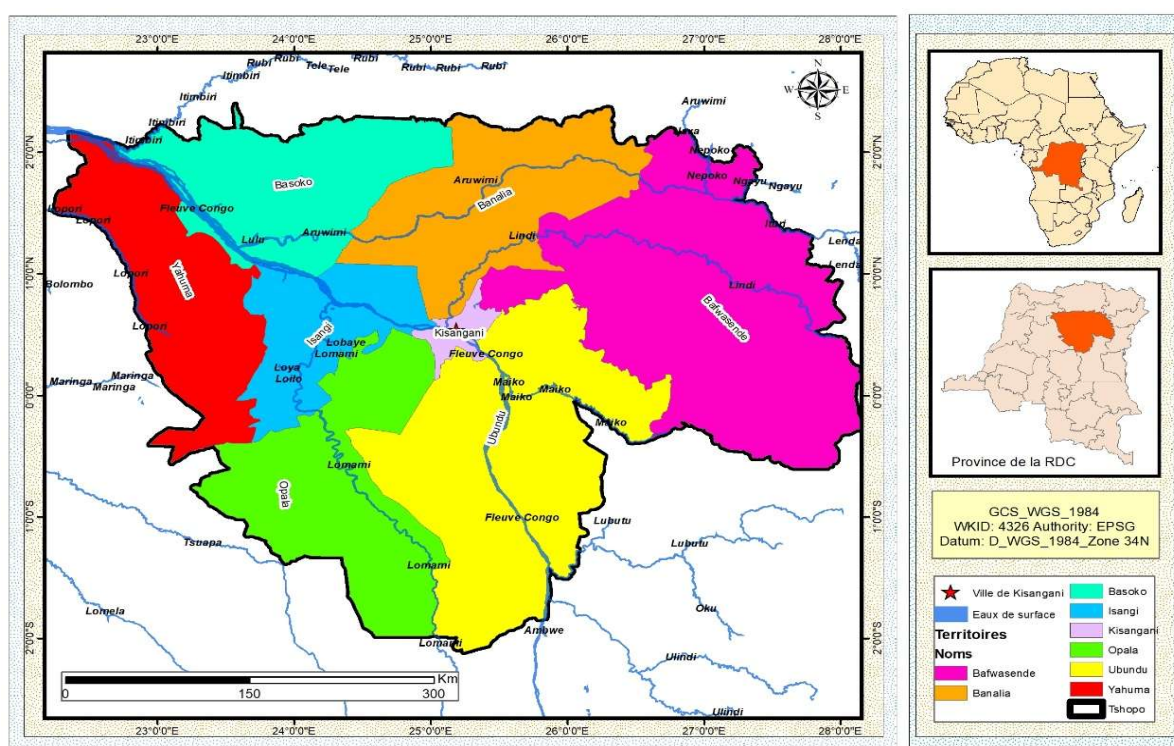


Figure 1: Administrative map of Tshopo Province using ArcGIS 10.8 software

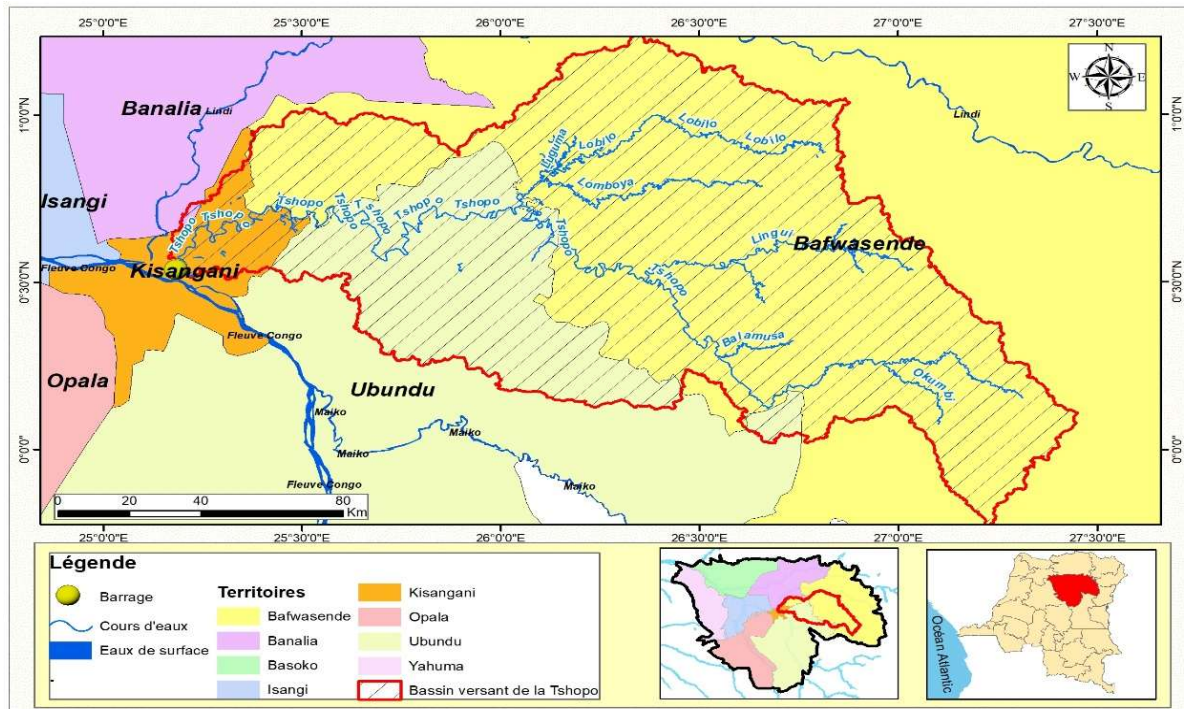


Figure 2: Map showing the location of the Tshopo River within the territory using ArcGIS 10.8 software

4.2. Méthodes et Techniques

4.2.1. Méthodes adoptées

La méthode analytique nous a beaucoup aidé pour interpréter les anomalies et tiré la conclusion sur les tendances observées

4.2.2. Technique utilisée

Dans cette recherche, la technique utilisée de télédétection nous était très favorable et efficace pour la récolte des données spatiales dans des stations satellitaires.

4.2.3. Outils et logiciels utilisés

Nous avons utilisé les outils géomatiques comme les logiciels SPSS 26.0 pour générer les graphiques des profils des anomalies mensuelles et annuelles de chaque variable et Arcgis 10.8 pour la confection des cartes.

4.2.4. Données récoltées

Comme dit ci-haut, à l'aide de l'outil de Télédétection le Satellite NOAA nous avons récolté **les données journalières** des hauteurs des précipitations, et des ruissellements de la rivière Tshopo, la quantité journalière des Evapotranspirations, les températures (maximales, minimales et moyennes) journalières et des indices de végétation (NDVI) journalières pour 44 ans ; allant de 1980 à 2023 et le tableau synthèse est présenté ci-dessous :

Tableau 1 : synthèse des valeurs des variables

Statistiques descriptives des variables					
	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Tmax[°C]_Tshopo	528	27,800	36,100	30,71888	1,203481
Tmin[°C]_Tshopo	528	17,980	24,020	20,68343	,843777
Ppt[mm]_Tshopo	528	7,600	364,700	134,06420	61,822215
ETPt[mm]_Tshopo	528	10,700	130,400	95,43807	19,464702
Ruissel[mm]_Tshopo	528	,400	264,700	38,68561	46,491036
NDVI_Tshopo	263	,370	,614	,51942	,047509
N valide (liste)	263				

N : nombre des mois des variables

Variation mensuelle des anomalies des températures maximales et minimales

Le tableau ci-haut reprend les variables de l'étude avec leurs valeurs minimales, moyennes, maximales et écarts-types.

Nous constatons ce qui suit :

1. La valeur minimum de la t° maximum (enregistrées pendant la journée) est de : 27,800 °C et la valeur maximale de la température journalière jamais dépassée à Tshopo de 1980 à 2023 est de 36, 100 °C avec une moyenne de 30, 718 °C ;
2. La température minimum enregistrée la nuit à Tshopo est de 17,98°C tandis que la nuit la plus chaude à Tshopo a enregistré une température de 24,02°C avec une moyenne de 20,68°C ;
3. Précipitations (pluie), pendant cette période le mois le plus sec a enregistré une quantité de 7,60 mm d'eau par mois et le mois le plus pluvieux a enregistré une quantité de 364,7 mm d'eau par mois avec une moyenne mensuelle de 134,06 mm d'eau par mois ;
4. Evapotranspirations potentielles (ETP), nous constatons une évapotranspiration la plus basse d'une quantité de 10,70 mm tandis que la plus haute d'une quantité de 130,40 mm avec une moyenne de 95, 43 mm ;
5. Le ruissellement pendant cette période de 1980 à 2023, a enregistré le ruissellement le plus élevée de 0,400 mm tandis que le ruissellement le plus bas est de 264, 70 avec une moyenne de 38,69 mm ;
6. L'indice de Végétation (NDVI), a enregistré une valeur plus basse de 0,37 et une valeur maximale de 0,61 avec une moyenne de 0,52

5. Résultats et discussions

5.1. Résultats :

5.1.1. Variation mensuelle des anomalies des températures maximales et minimales

L'étude de la **variation mensuelle des anomalies des températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin)** est un pilier de la climatologie moderne. Elle ne se contente pas de regarder s'il fait "chaud" ou "froid", mais mesure l'écart (l'anomalie) entre la température observée et une moyenne de référence (généralement calculée sur 30 ans, comme la nôtre période 1980-2023) ³. (Huard, B. & Girot, P. ; 2024).

□ **Anomalie** : C'est la différence mathématique. Si la moyenne historique d'un mois de juillet est de 25°C et qu'on enregistre 27°C, l'anomalie est de +2°C.

□ **Asymétrie thermique** : L'étude compare souvent l'évolution des Tmax (le jour) et des Tmin (la nuit). On observe souvent que les températures minimales augmentent plus vite que les maximales, réduisant ainsi l'amplitude thermique quotidienne.

□ **Saisonnalité** : L'analyse mensuelle permet d'identifier si le réchauffement est plus marqué en hiver (dégel précoce) ou en été (vagues de chaleur).

A l'aide du logiciel SPSS 26.0 nous avons eu le graphique ci-dessous

Diagramme en Lignes : multiple Moyenne de Ano_Tmax[°C]_Tshopo, Moyenne de Ano_Tmin[°C]_Tshopo par Mois...

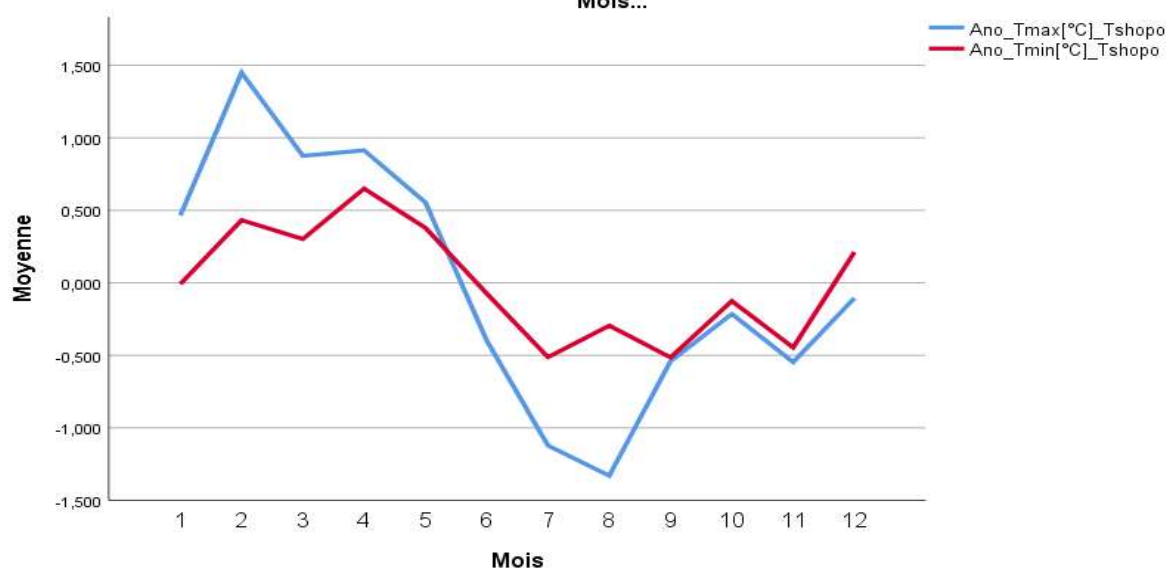


Figure 3 : graphique du profil mensuelle des anomalies de températures tiré SPSS 26.0

Commentaires

La figure 3, décrit le profil mensuel des anomalies des températures maximales et minimales.

Nous constatons que les températures maximales enregistrent un pic up au mois de février (saison de pluie) et un pic down au mois d'Août (saison sèche) et la température minimale enregistre un pic up au mois au mois d'Avril, le pic down aux mois de juillet et septembre.

On observe que pendant la saison de pluie, les jours sont plus chauds que les nuits et pendant la saison de pluie les jours sont plus froids que la nuit ; donc la courbe des températures maximales est en-dessous de la courbe des températures minimales.

5.1.2. Variation annuelle des anomalies des températures maximales et minimales

L'étude des variations annuelles des anomalies de température (minimales, maximales et moyennes) est une analyse statistique visant à quantifier l'écart entre les températures observées au cours d'une année et une **normale climatologique** (généralement une moyenne calculée sur 30 ans, comme la période 1991-2020).⁴ [(Tan, X., et al. 2023 et Moussa, R. & Al-Qudah, O.; 2025)].

Contrairement à l'analyse mensuelle qui observe la saisonnalité, l'analyse annuelle permet de lisser les variations de court terme pour dégager une **tendance de fond** sur le réchauffement global ou régional.

➤ L'analyse repose sur trois piliers méthodologiques :

- **Tmax (Températures maximales)** : Souvent liées à l'insolation et aux vagues de chaleur diurnes. Leur anomalie positive indique des étés plus précoces ou plus intenses.
- **Tmin (Températures minimales)** : Représentent généralement le réchauffement nocturne. Une hausse marquée des anomalies de Tmin est un indicateur fort du changement climatique global (effet de serre nocturne).
- **Tmoy (Température moyenne)** : La demi-somme des deux précédentes, utilisée pour suivre la tendance globale annuelle.

➤ Méthode de calcul

Le calcul de l'anomalie annuelle se repose sur l'équation :

$$A_y = T_y - \bar{T}_{ref}$$

Où A_y est l'anomalie de l'année y , T_y la température observée et $\bar{T}_{ref}$ la moyenne de référence. L'analyse porte ensuite sur la **pente de la tendance** (souvent via le test statistique de Mann-Kendall) pour déterminer si l'évolution est significative.

- Une **anomalie positive** indique une année plus chaude que la normale.
- Une **anomalie négative** (de plus en plus rare) indique une année plus froide.

L'asymétrie du réchauffement : On compare si les Tmin (la nuit) augmentent plus vite que les Tmax (le jour). Cette réduction de l'amplitude thermique quotidienne est un marqueur fort de l'effet de serre anthropique.

L'analyse des fréquences : Au-delà de la moyenne, l'étude comptabilise le nombre de jours où les anomalies dépassent des seuils.

Pour trouver la Variation annuelle des anomalies des températures maximales et minimales, nous avons utilisé le logiciel SPSS 26.0 dont le résultat se trouve dans la figure ci-dessous :

Diagramme en Lignes : multiple Moyenne de Ano_Tmax[°C]_Tshopo, Moyenne de Ano_Tmin[°C]_Tshopo par Années...



Figure 4 : profil des anomalies des températures annuelles produites par SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

La tendance de ce profil est à la hausse avec un degré de réchauffement qui dépasse 1°C sur Tshopo, le pic up a été atteint en 2023 tandis que le pic down a été atteint en 1989

5.1.3. Variation mensuelle des anomalies des précipitations

L'étude des variations mensuelles des anomalies de précipitations consiste à analyser l'écart entre le cumul de pluie mesuré au cours d'un mois précis et la moyenne historique de ce même mois sur une période de référence (souvent 1991-2020).

Contrairement aux températures, les précipitations sont spatialement et temporellement très hétérogènes. Ces études visent à identifier des phénomènes de **rupture de stationnarité**, des cycles de **sécheresse** ou des épisodes de **précipitations extrêmes**.

Les axes principaux de l'étude

- **Calcul de l'anomalie relative** : Souvent exprimée en pourcentage par rapport à la normale pour mieux illustrer l'impact (ex: un déficit de 20 mm est plus grave dans une zone aride que dans une zone tropicale).
- **Indice de Précipitation Normalisé (SPI)** : Utilisation de calculs statistiques complexes (souvent basés sur la loi Gamma) pour transformer les données brutes en un indice standardisé permettant de comparer des mois de saisons différentes.
- **Analyse de la saisonnalité** : Détection des décalages des saisons des pluies (début précocé ou tardif) qui impactent directement l'agriculture et les ressources en eau.⁵ N'Guessan, A. K., et al. (2023).

Pour ce concerne notre étude, la Variation mensuelle des anomalies des précipitations a été trouvée grâce à l'outil géomatique (logiciel SPSS 26.0) voir figure 5

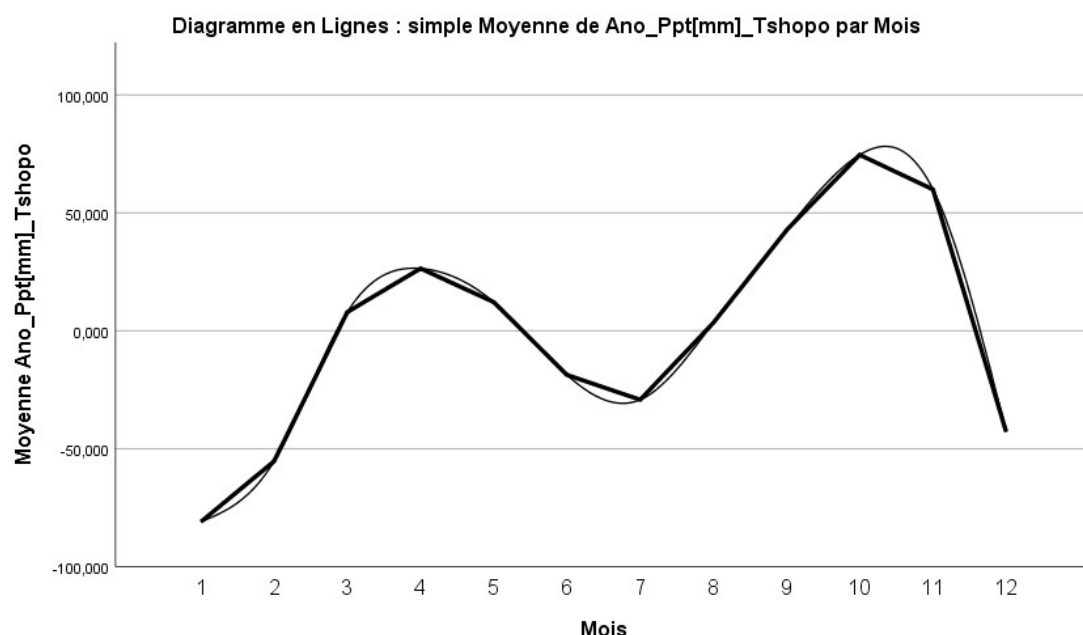


Figure 5 : Graphique du profil des anomalies des précipitations mensuelles avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

Il se dessine deux saisons sèches et deux saisons de pluie, la première saison de pluie de mars, avril, mai (la petite saison de pluie) et septembre, octobre et novembre (la grande saison de pluie) ; et décembre, janvier, février (petite saison sèche) et juin, juillet, Août (grande saison sèche)

5.1.4. Variation annuelle des anomalies des précipitations

L'étude des **variations annuelles des anomalies de précipitations** consiste à analyser les fluctuations des cumuls pluviométriques totaux à l'échelle d'une année civile ou d'une année agricole. Contrairement aux études mensuelles qui scrutent la saisonnalité, l'approche annuelle permet de dégager des tendances de fond sur la disponibilité en eau et de caractériser les années comme « sèches », « humides » ou « normales » ⁶ (Gérard, L. (2024).

➤ Les enjeux de l'analyse annuelle ⁷[(Leroux, S. (2025) et (Muller, C. & Roche, D. ; 2023)]

- **Bilan hydrique global** : Évaluer si le cumul annuel permet de recharger les nappes phréatiques, indépendamment de la répartition saisonnière.
- **Calcul de l'anomalie** : Elle s'exprime soit en valeur absolue (mm), soit en pourcentage (écart à la moyenne) :

$$\%Anomalie = \left(\frac{P_{an} - \{barP_{an}\}}{\{barP_{an}\}} \right)$$

Nous avons produit le graphique de variation annuelle des anomalies des précipitations à l'aide du logiciel SPSS 26.0 (voir figure ci-dessous)

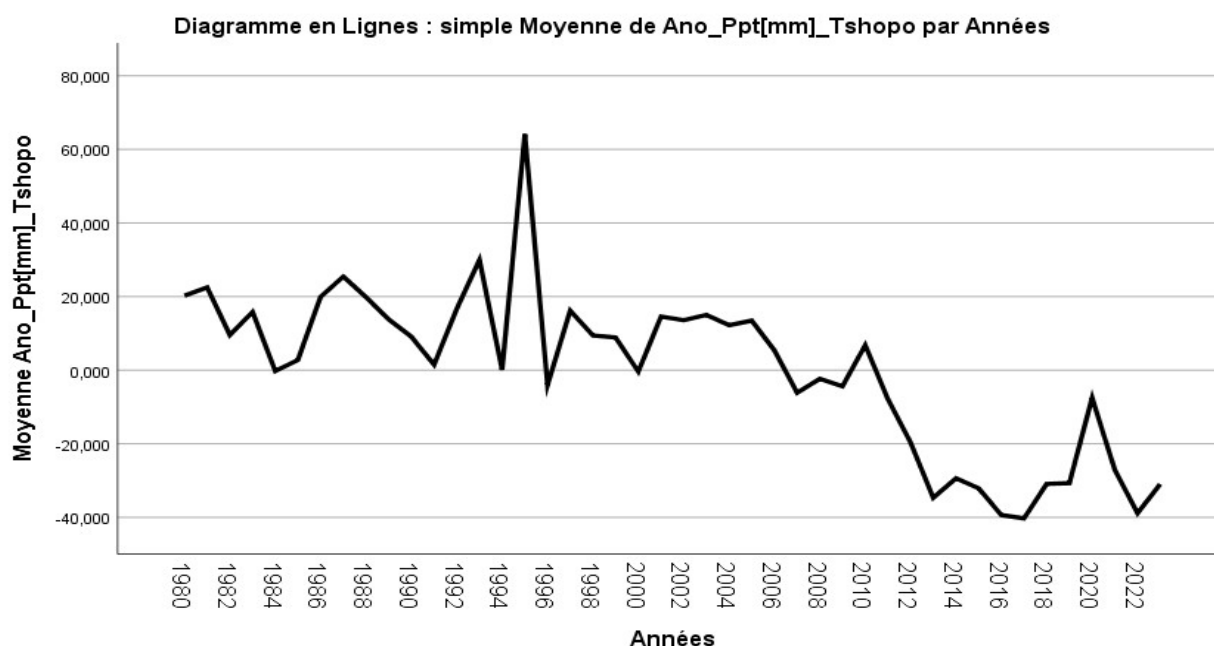


Figure 6 : profil en long des anomalies annuelles des précipitations avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

La tendance est que les précipitations enregistrent une **tendance générale à la basse** avec au moins 40 mm d'eau déjà perdues depuis 1980 jusqu'en 2023. La plus grande quantité d'eau de pluie était enregistrée en 1995 (pic up)

5.1.5. Variation mensuelle des anomalies des évapotranspirations

L'étude des **variations mensuelles des anomalies de l'évapotranspiration (ETP)**, particulièrement en Afrique tropicale, consiste à mesurer l'écart entre la quantité d'eau renvoyée vers l'atmosphère (via le sol et la transpiration des plantes) et la moyenne historique mensuelle.

En zone tropicale, ces études sont cruciales car l'évapotranspiration consomme souvent plus de **70% à 80%** des précipitations. Analyser ses anomalies mensuelles permet de détecter des stress hydriques « invisibles » (sécheresses agricoles) avant même que les niveaux des rivières ne chutent.⁸ cité par [(Tshimanga, R. M., et al. (2024)) et (Okonjo, E., et al. (2024))]. Les composantes de l'étude

- **ETP & ETR** : On distingue l'évapotranspiration **potentielle** (demande climatique maximale) de l'évapotranspiration **réelle** (ce que l'environnement peut réellement évaporer selon l'humidité disponible).
- **Anomalies et Phénologie** : En Afrique tropicale, une anomalie négative d'ETR durant la saison des pluies indique souvent un flétrissement des cultures ou un dysfonctionnement de la forêt dense.
- **Indicateurs dérivés** : On utilise souvent l'EDDI (Evaporative Demand Drought Index) pour cartographier ces anomalies et anticiper les famines.⁹ [(Bamba, A., et al. (2023)) et (Moussa, K. & Diallo, B. (2025))]. Pour ce qui est le profil de variation mensuelle des anomalies des Evapotranspirations potentielles est représenté par la figure ci-dessous.

La Variation mensuelle des anomalies des évapotranspirations a été déterminée à l'aide du logiciel SPSS 26.0

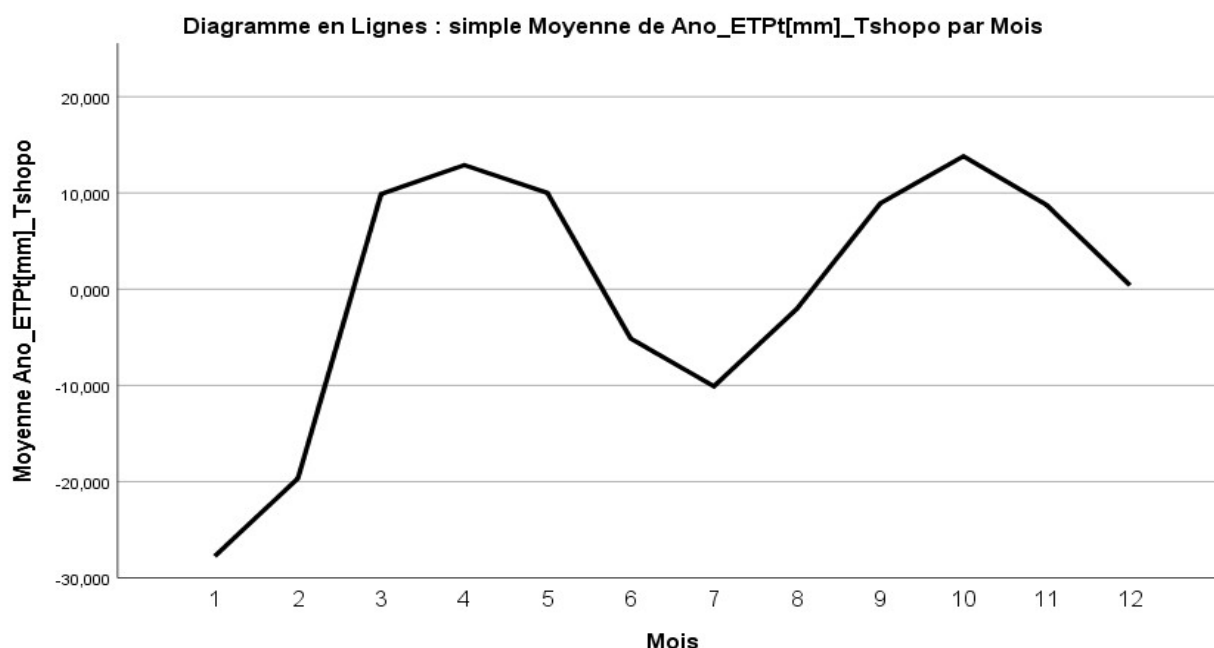


Figure 7 : profil des anomalies des évapotranspirations mensuelles avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

Les ETP (pluie ascendantes), sont abondantes dans l'atmosphère de Tshopo au mois de mars, avril, mai et septembre, octobre, novembre ; ce qui correspond aux deux saisons humides et moins abondantes au mois de juin, juillet, août, décembre, janvier, février

5.1.6. Variation annuelle des anomalies des évapotranspirations

Les études de variations annuelles des **anomalies d'Évapotranspiration Potentielle (ETP)** en Afrique équatoriale consistent à analyser l'évolution de la "soif de l'atmosphère". Contrairement à l'évapotranspiration réelle, l'ETP représente la quantité maximale d'eau que l'atmosphère peut absorber si la ressource en eau est illimitée.

En Afrique équatoriale (Bassin du Congo, Golfe de Guinée), où l'humidité est élevée, ces études sont fondamentales pour comprendre le **stress thermique** et la modification des cycles hydrologiques sous l'effet du réchauffement global ¹⁰ [(Nguimalet, C. R. & Foto, E. ; 2025) et Mba, S. A., et al.; 2023)]

Les spécificités de l'étude en zone équatoriale ¹¹ (Tshimanga, R. M., et al. ; 2024).

- **Le moteur énergétique :** L'ETP est principalement pilotée par le rayonnement solaire et la température. En Afrique équatoriale, une anomalie positive d'ETP annuelle traduit souvent une baisse de la couverture nuageuse et une hausse des températures de surface.
- **L'indice de sécheresse atmosphérique :** Les chercheurs utilisent les anomalies d'ETP pour calculer le bilan hydrique climatique ($P - ETP$). Une hausse annuelle de l'ETP, même sans baisse des pluies (P), peut entraîner un assèchement des sols par simple augmentation de la demande évaporative.
- **Calcul via Penman-Monteith :** La méthode standard de la FAO (Penman-Monteith ET0) est privilégiée, intégrant la température, l'humidité, le vent et le rayonnement.

Pour ce qui nous concerne, nous avons utilisé le logiciel SPSS 26.0 pour déterminer le profil de variation annuelle des anomalies des Evapotranspirations potentielles représenté dans la figure ci-dessous.

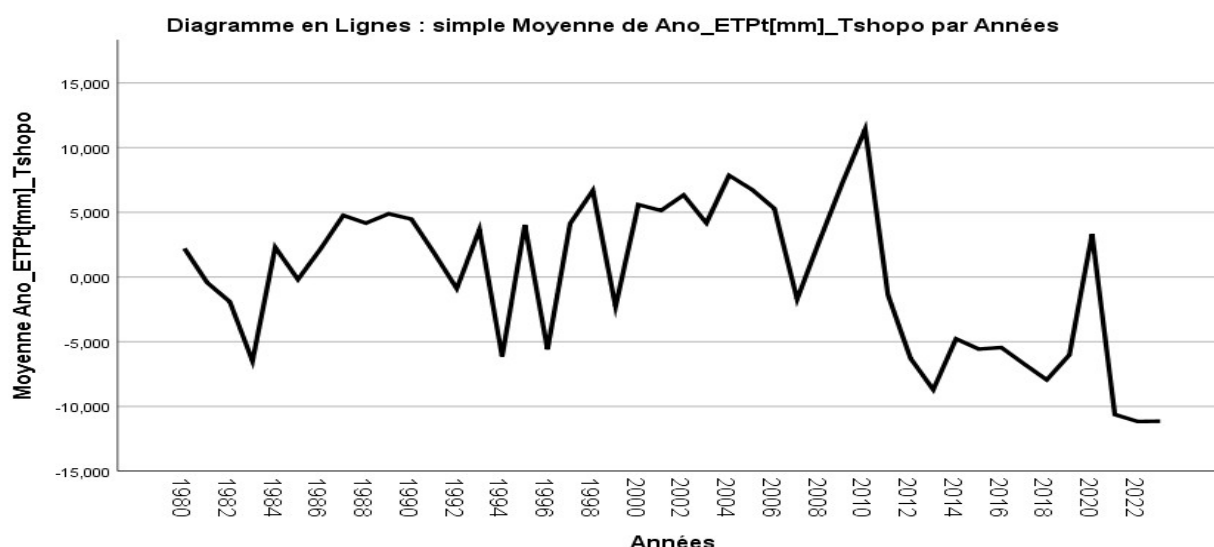


Figure 8 : profil des anomalies des évapotranspirations annuelles avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

La tendance générale est à la basse aussi comme celle des précipitations, avec une perte 12 mm d'eau dans l'atmosphère (pic down) ; le pic up a été atteint en 2010.

5.1.7. Variation mensuelle des anomalies des ruissellements

L'étude des **variations mensuelles des anomalies de ruissellement** consiste à analyser les écarts entre le volume d'eau s'écoulant à la surface d'un bassin versant durant un mois donné et la moyenne historique (normale) de ce même mois.

Contrairement aux précipitations, le ruissellement est une variable "intégratrice" : son anomalie dépend non seulement de la pluie du mois en cours, mais aussi de l'état de saturation préalable des sols et de l'évapotranspiration. En Afrique centrale et de l'Ouest, ces études sont vitales pour la gestion des barrages hydroélectriques et la prévention des crues soudaines.

Les axes majeurs de l'analyse

- **Coefficient de ruissellement** : L'étude cherche à comprendre pourquoi, à pluie égale, le ruissellement peut présenter une anomalie positive (sols saturés ou imperméabilisés) ou négative (sols secs ou forte infiltration).
- **Propagation des anomalies** : On analyse comment une anomalie de pluie se traduit, avec un certain décalage temporel (lag time), en une anomalie de ruissellement.
- **Modélisation hydrologique** : Utilisation de modèles (comme GR4J ou HBV) pour isoler l'impact du changement climatique de celui des changements d'occupation du sol (déforestation, urbanisation) ¹² (Musy, A., Higy, C. & Baud, C. A. ; 2021).

A l'aide du logiciel SPSS 26.0, nous avons déterminé le profil de variation mensuelle des anomalies des Ruissellements (voir figure ci-dessous)

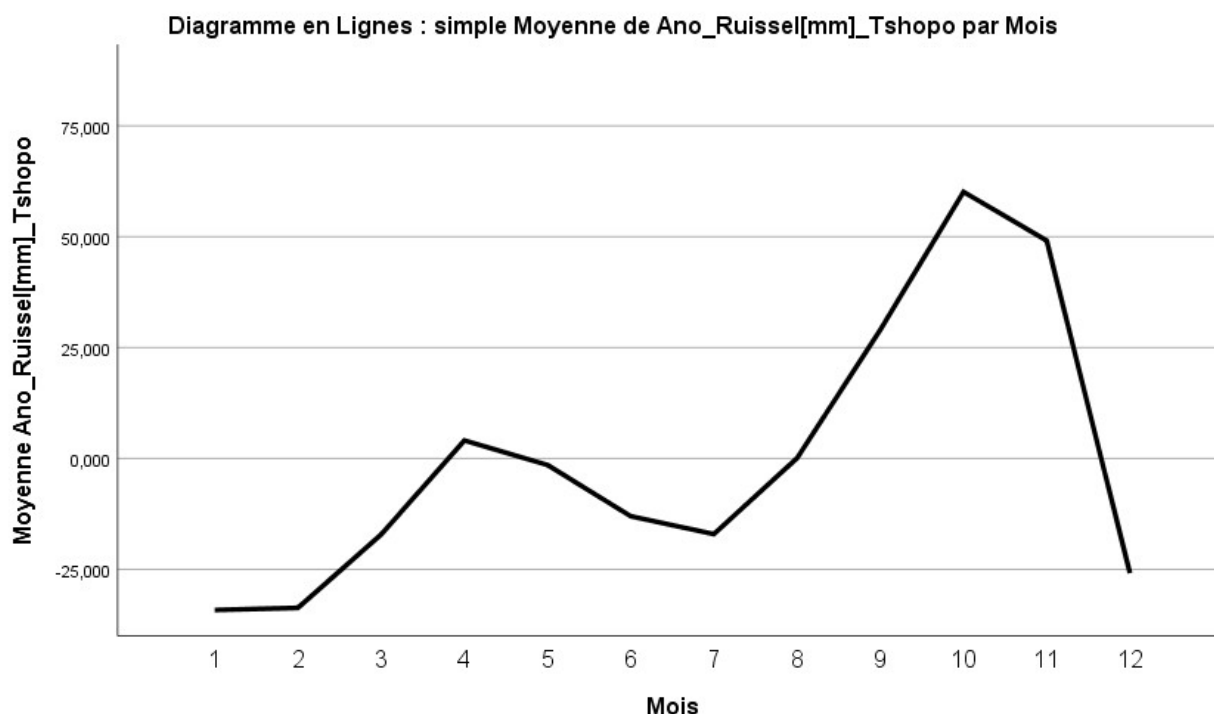


Figure 9 : Graphique du profil de Variation mensuelles des anomalies des ruissellements mensuelles avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

on constate que les ruissellements se regroupent aussi en saison dont on observe la petite saison sèche aux mois de mars, avril, mai avec un ruissellement moyen et la grande saison de pluie aux mois de septembre, octobre, novembre avec un ruissellement très prononcé causant même des inondations dans plusieurs quartiers de la ville de Kisangani.

5.1.8. Variation annuelle des anomalies des ruissellements

L'étude des **variations annuelles des anomalies de ruissellement** consiste à évaluer l'excès ou le déficit du volume d'eau s'écoulant à l'exutoire d'un bassin versant sur l'ensemble d'une année, par rapport à une moyenne interannuelle de référence.

Contrairement aux études mensuelles qui se focalisent sur la saisonnalité, l'échelle annuelle permet de caractériser la **réponse globale du bassin** face aux changements climatiques à long terme et aux modifications anthropiques (déforestation, urbanisation, barrages).

Les points clés de l'étude

- **Bilan de masse annuel** : Déterminer si l'année est "hydrologiquement déficitaire" ou "excédentaire". Cela aide à la planification pluriannuelle des ressources en eau.

- **Le "Paradoxe Hydrologique"** : En Afrique (notamment sahélienne et tropicale), on étudie souvent pourquoi les anomalies de ruissellement augmentent annuellement alors que les anomalies de précipitations peuvent être stables ou négatives (souvent dû à l'imperméabilisation des sols).
- **Indice de Ruissellement Standardisé (SRI)** : Similaire au SPI pour les pluies, le SRI annuel permet de classer la sévérité des sécheresses hydrologiques à l'échelle d'un pays ou d'un continent.¹³ [(Tshimanga, R. M., et al. (2024) et Okwuokei, C. & Ojo, O. J. ; (2025)]

Pour avoir le profil de variation annuelle des anomalies des ruissellements, nous l'avons déterminé avec le logiciel SPSS 26.0 (voir figure 10)

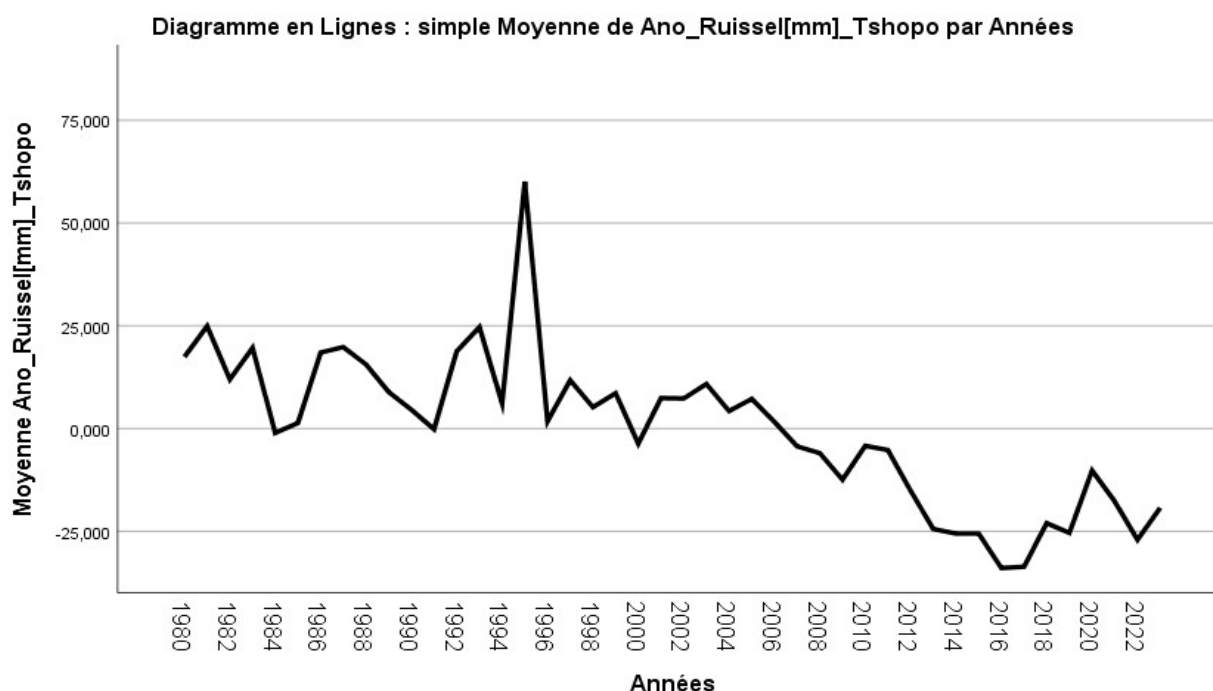


Figure 10 : Graphique du profil de variation annuelle des anomalies des ruissellements avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

La tendance générale est à la basse comme celle des précipitations

5.1.9. Variation annuelle des anomalies de l'indice de végétation

L'étude des **variations mensuelles des anomalies du NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*) consiste à analyser la santé et la productivité de la végétation en comparant la "verdeur" détectée par satellite un mois donné à sa moyenne historique pour ce même mois.

En Afrique équatoriale et tropicale, ces variations mensuelles sont des indicateurs extrêmement sensibles qui permettent de suivre la **phénologie** (cycles de croissance) et de détecter précocement les anomalies climatiques.¹⁴ cité dans un ouvrage par [(Baret, F. & Weiss, M. (2024) et Tshimanga, R. M., et al. (2024)] ainsi que [(Koffi, K. J., et (Mubenga, A. & Kabulo, J. (2025).al. ; 2023)]

Les composantes de l'étude du NDVI mensuel

- **Le calcul de l'indice** : Il repose sur la réflectance de la végétation dans le Rouge (**R**) et le Proche Infrarouge (**PIR**) :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

- **Analyse des anomalies mensuelles** : Une anomalie négative un mois donné indique un stress hydrique, une attaque parasitaire ou un retard de la saison des pluies. Une anomalie positive peut traduire une vigueur exceptionnelle liée à des pluies précoces.
- **Dynamique saisonnière** : L'étude permet de cartographier précisément le début, le pic et la fin de la saison de croissance, ce qui est crucial pour la sécurité alimentaire.

A l'aide de l'outil géomatique (logiciel SPSS 26.0) nous avons déterminé le profil de variation annuelle des anomalies de l'indice de végétation (voir figure ci-dessous)

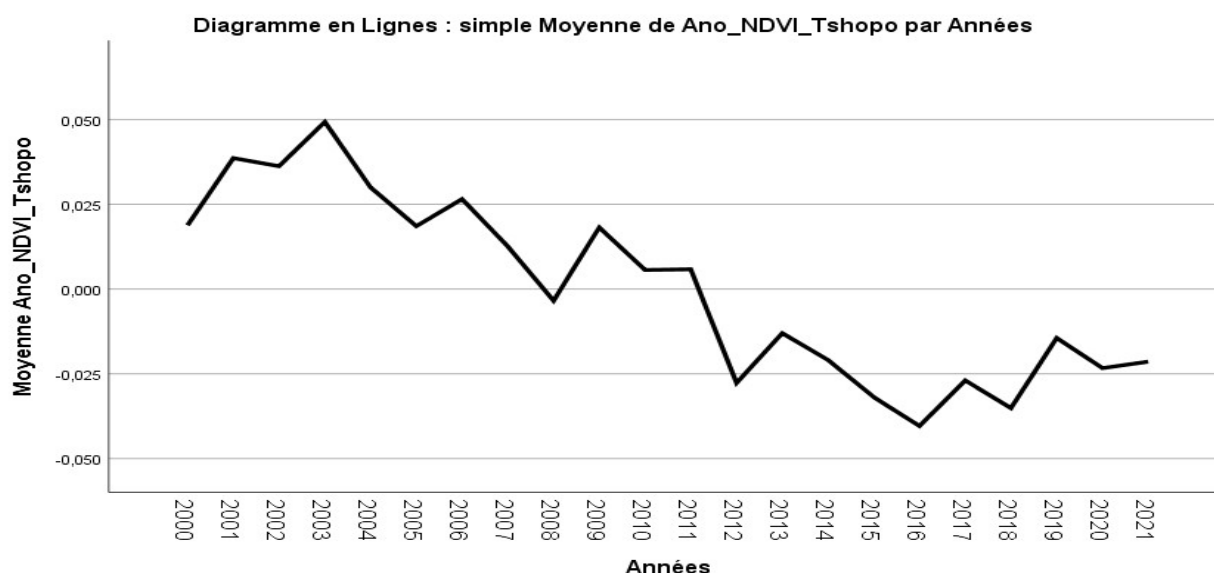


Figure 11 : Graphique du profil de variation annuelle des anomalies de l'indice de végétation avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

La tendance générale est à la baisse avec une chute observée à partir de 2012.

5.1.10. Courbe Ombrothermique mensuelle

L'étude de la **courbe ombrothermique mensuelle** (ou diagramme climatique de Gaussen et Bagnouls) consiste à représenter sur un même graphique, pour les douze mois de l'année, l'évolution des précipitations (**P**) et des températures (**T**) ¹⁵ [(Vigneau, J.-P. (2024) et Boulard, G. & Martin, P. (2023)] ainsi que [Moukandi, R. & Ngoma, A. (2025) et Traoré, S., et al. (2024).]

Le principe fondamental repose sur la condition de sécheresse définie par la relation :

$$P \leq 2T$$

(Où P est le cumul mensuel en mm et T la température moyenne en °C).

Les objectifs de l'étude

- **Identification des périodes de sécheresse** : Sur le graphique, lorsque la courbe des précipitations passe en dessous de celle des températures (en utilisant une échelle double où 10° C = 20 mm, la zone hachurée définit la période sèche.
- **Caractérisation du bioclimat** : Elle permet de distinguer les climats (équatorial, tropical à une ou deux saisons sèches, méditerranéen, etc.).
- **Analyse de la phénologie** : En écologie, cette courbe aide à prévoir les périodes de repos végétatif ou de stress hydrique pour les cultures.

Et nous avons trouvé le profil de la courbe de l'indice de végétation avec le logiciel SPSS 26.0 que voici :

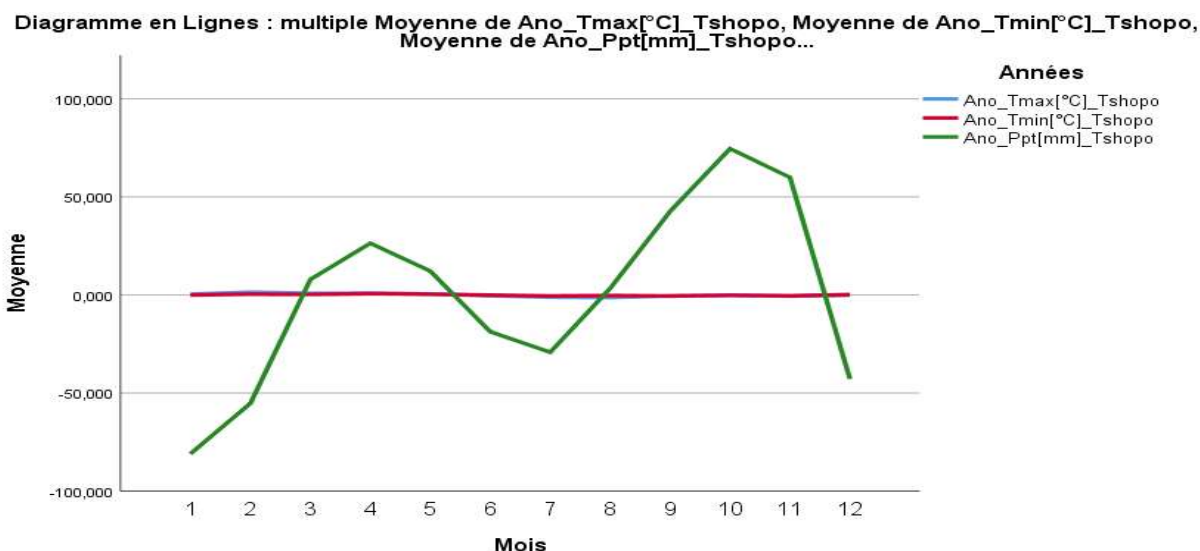


Figure 12 : graphique du profil de la courbe ombrothermique mensuelle avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

La courbe ombrothermique regroupe les saisons ; lorsque la courbe des précipitations est au-dessus de celle de températures c'est la période humide et lorsqu'elle est en dessous c'est la période sèche. Sur cette courbe, il s'observe deux saisons humides et deux saisons sèches : les deux premières vont de mars, avril, mai (petite saison humide) et septembre, octobre, novembre (grande saison humide). Et les deux dernières vont de décembre, janvier, février (petite saison sèche) et juin, juillet, août (grande saison sèche)

5.1.11. Courbe Ombrothermique annuelle

L'étude de la **courbe ombrothermique annuelle** (souvent appelée bilan ombrothermique annuel) consiste à synthétiser les données climatiques d'une année entière pour déterminer le caractère globalement humide, sec ou aride d'un climat.

Alors que le diagramme mensuel observe la saisonnalité, l'approche annuelle s'intéresse à la **durée cumulée de la période sèche** au sein de l'année et à l'intensité du déficit hydrique total. Elle permet de classer les régions selon des indices d'aridité et de suivre le glissement des zones bioclimatiques dû au changement climatique.¹⁶ [Vigneau, J.-P. (2024) et Boulard, G. & Martin, P. (2023).] Ainsi que [Moukandi, R. & Ngoma, A. (2025) et Garcia, L., et al. (2023)]

➤ Les composantes de l'analyse annuelle

- **L'indice d'aridité annuel** : On utilise souvent des formules dérivées de celle de Gaussen pour qualifier l'année (ex: Indice de Martonne $I = \frac{P}{T+10}$).
- **La surface de l'aire de sécheresse** : En analyse spatiale, on calcule l'aire géométrique située entre la courbe P et la courbe T sur l'année pour quantifier la sévérité de la sécheresse.
- **Le déphasage annuel** : L'étude consiste aussi à observer si le pic de chaleur coïncide avec le minimum pluviométrique (climat méditerranéen) ou avec le maximum (climat tropical), ce qui change radicalement le bilan hydrique annuel.

Pour ce qui est de la courbe ombrothermique annuelle de notre travail, nous l'avons eu à l'aide du logiciel SPSS 26.0 dont la figure ci-dessous :

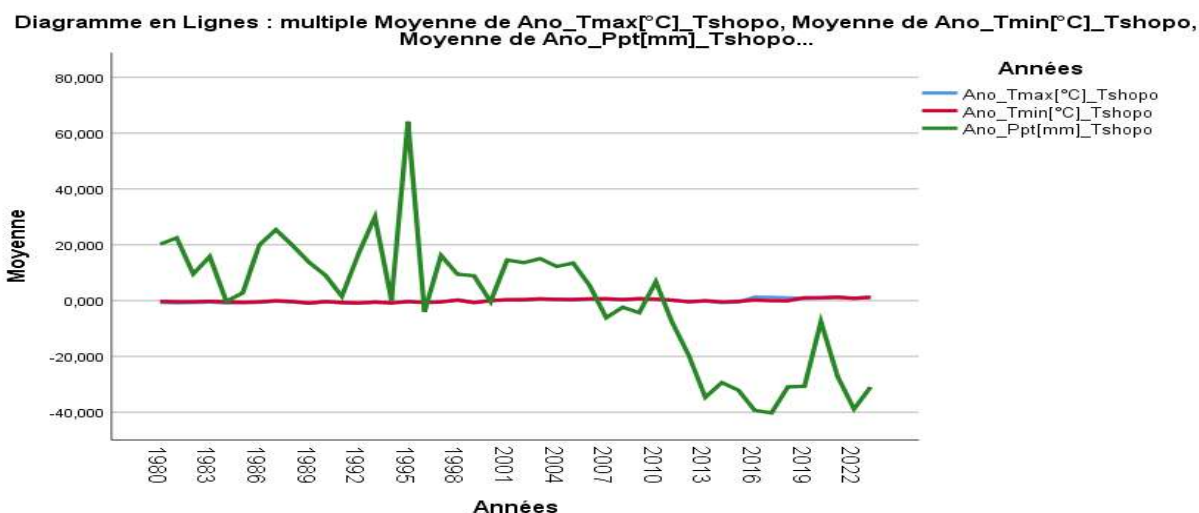


Figure 13 : graphique du profil de la courbe ombrothermique annuelle avec SPSS 26.0

Commentaires scientifiques

Pendant notre période d'études, il s'observe que les données se groupent en deux grandes périodes, à partir des années 1980 jusqu'aux années 2010 est dit période humide car la courbe des précipitations est au-dessus de la courbe des températures ; et de 2011 jusqu'en 2023 car la courbe des précipitations est en-dessous de celle des températures.

5.2. Discussions :

5.2.1. Variation mensuelle des anomalies des précipitations et ruissellement en fonction des évapotranspirations

Cette étude, souvent appelée **analyse du bilan hydrique de surface** consiste à examiner la relation de cause à effet entre l'offre en eau (précipitations), la demande atmosphérique (évapotranspiration potentielle (ETP) et la réponse hydrologique (ruissellement) à l'échelle du mois.

L'objectif est de comprendre comment les anomalies de température (qui pilotent l'ETP) amplifient ou atténuent l'impact des anomalies de pluie sur la disponibilité réelle de l'eau dans les rivières ¹⁷. [Musy, A., Higy, C. & Baud, C. A. (2021) et Amoussou, E., et al. (2023)]. Cité aussi par (N'Guessan, A. K., et al.; 2023).

Les mécanismes étudiés

- **Le déficit hydrique mensuel** : On calcule l'écart ($P - ETP$) . Une étude de variation consiste à voir comment les anomalies négatives de ce bilan se traduisent en chutes de ruissellement (R).
- **Le rôle tampon du sol** : On analyse le "délai de réponse". En début de saison humide, malgré une anomalie de pluie positive, le ruissellement peut rester faible si l'ETP est élevée et que les sols sont secs.
- **L'efficacité du ruissellement** : L'étude cherche à quantifier la part de la pluie qui échappe à l'évaporation pour devenir un écoulement. Une hausse de l'ETP réduit mécaniquement cette part.

Pour déterminer la Variation mensuelle des anomalies des précipitations et ruissellement en fonction des évapotranspirations, le logiciel SPSS 26.0 nous était très utile et a produit le profil que voici :

Diagramme en Lignes : multiple Moyenne de Ano_Ppt[mm]_Tshopo, Moyenne de Ano_ETPt[mm]_Tshopo, Moyenne de Ano_Ruissel[mm]_Tshopo...

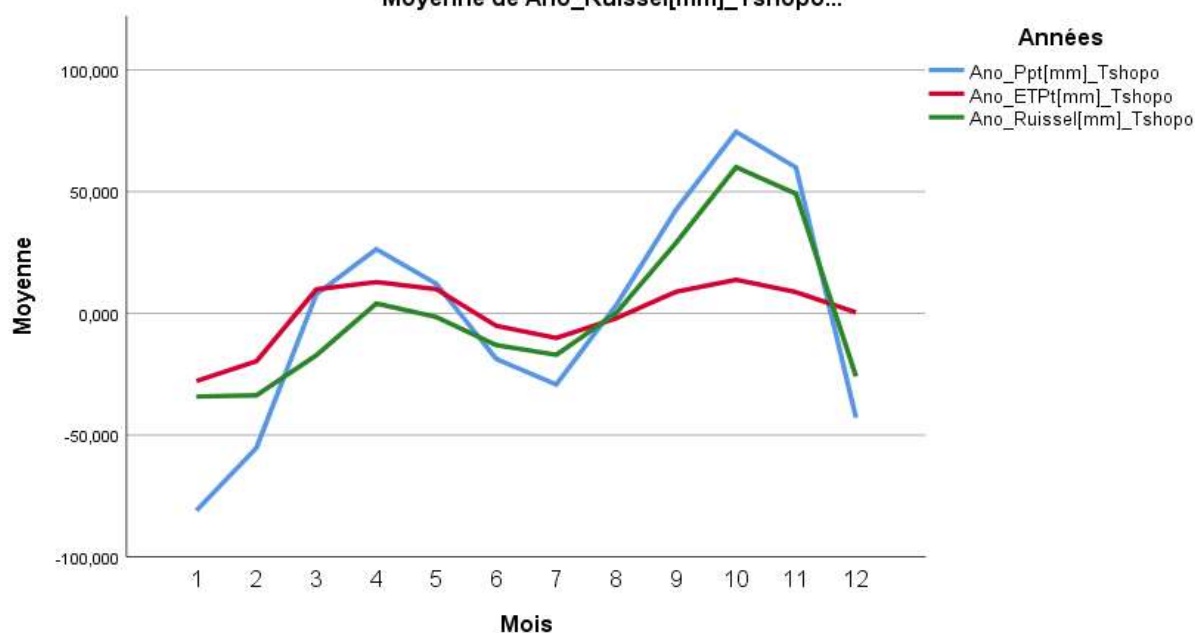


Figure 14 : graphique du profil Variation mensuelle des anomalies des précipitations et ruissellement en fonction des évapotranspirations avec SPSS 26.0

Commentaires Scientifiques

On observe que les trois variables ETP, Précipitations et ruissellement varient proportionnels en saisons sèche comme en saison de pluie

5.2.2. Variation annuelle des anomalies des précipitations et ruissellement en fonction des évapotranspirations

Cette étude spécifique, souvent qualifiée d'**analyse de la sensibilité hydrologique**, consiste à quantifier l'impact combiné des variations de l'offre en eau (précipitations) et de la demande atmosphérique (ETP) sur la disponibilité annuelle des ressources hydriques.

L'enjeu principal est de comprendre comment une hausse de la "soif" de l'atmosphère (anomalie positive d'ETP due au réchauffement) peut transformer une année de précipitations normales en une année de ruissellement déficitaire.¹⁸ **cité dans leurs ouvrages par [(Gérard, L. (2024). et Tshimanga, R. M., et al. (2024)]ainsi qu'un groupe des chercheurs [(Mba, S. A., et al. (2023). et Okwuokei, C. & Ojo, O. J. (2025)].**

Les piliers de l'analyse annuelle

- **L'élasticité hydrologique** : On mesure de combien de pourcents le ruissellement (**R**) varie pour chaque changement de 1 % de la Précipitation (**P**) ou de l'ETP. En Afrique tropicale, on observe souvent que le ruissellement est deux à trois fois plus sensible aux variations de la pluie qu'à celles de l'ETP.
- **Le cadre de Budyko** : C'est l'outil mathématique privilégié. Il permet de modéliser le bilan hydrique annuel en plaçant le bassin versant sur une courbe d'équilibre. Les anomalies annuelles déplacent ce point : un glissement vers la droite indique une aridification (l'ETP domine la pluie), tandis qu'un glissement vertical traduit un changement d'usage des sols (déforestation).
- **Déficit d'écoulement** : L'étude calcule l'anomalie du résidu ($P - R$), qui représente l'évapotranspiration réelle annuelle, pour voir si le bassin stocke de l'eau ou s'il s'assèche structurellement.

La Variation annuelle des anomalies des précipitations et ruissellement en fonction des évapotranspirations ont été trouvée grâce au logiciel SPSS 26.0 représentée dans la figure

Diagramme en Lignes : multiple Moyenne de Ano_Ppt[mm]_Tshopo, Moyenne de Ano_ETPt[mm]_Tshopo, Moyenne de Ano_Ruissel[mm]_Tshopo...

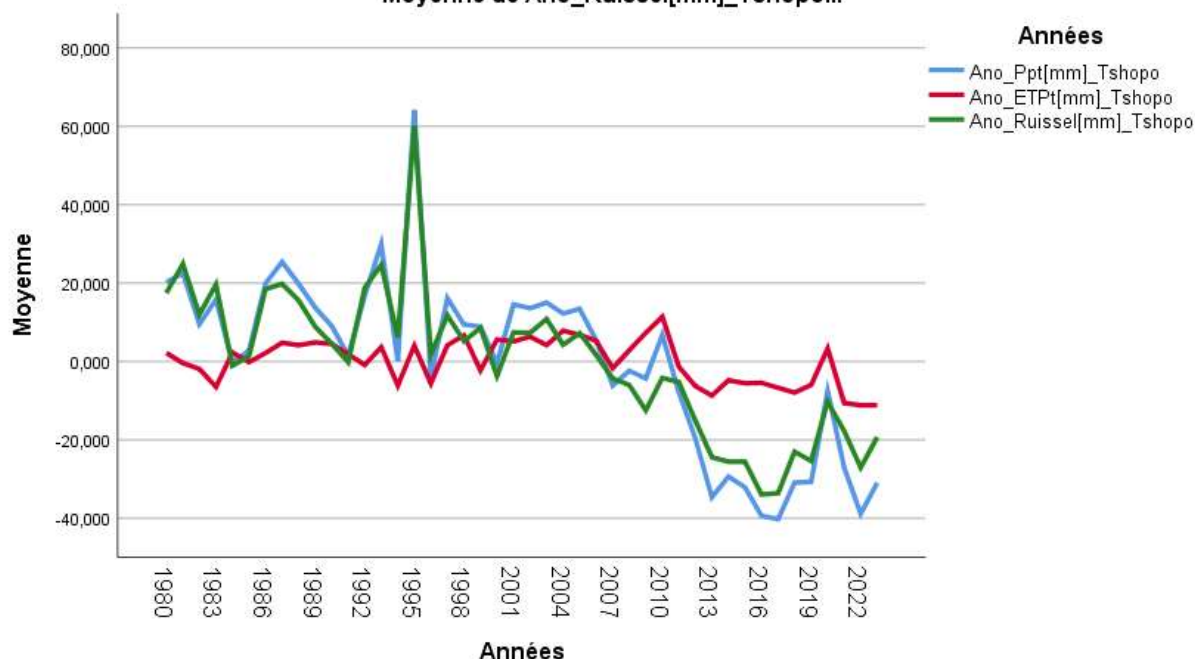


Figure 15 : Graphique du profil Variation annuelle des anomalies des précipitations et ruissellement en fonction des évapotranspirations

Commentaires Scientifiques

Les précipitations et les ruissellements sont proportionnels au cours de la période et une tendance générale à la baisse

Conclusion

Nous pouvons dire que les études des anomalies des variables climatiques les outils de télédétection ont des résultats très satisfaisants ; car nous constatons que suit :

- On observe que les trois variables ETP, Précipitations et ruissellement varient proportionnels en saisons sèche comme en saison de pluie ;
- Les précipitations et les ruissellements sont proportionnels au cours de la période et une tendance générale à la baisse

Remerciements/Acknowledgement: Nos sincères remerciements à la société SNEL (Société Nationale d'Électricité) à Kisangani pour avoir accepté de disposer leur base de données sur la rivière Tshopo dans le cadre de notre article.

Financements/Funding Statement: Aucun financement n'a été opéré aux auteurs de ce présent travail.

Contributions des auteurs/Author Contributions : L'ossature et collecte des données de l'étude, analyse et interprétation des résultats sont l'œuvre de Mokili Enasi Emmanuel ; la production des cartes du site a été réalisée par été produite par Mokili Enasi Josué et la production du tableau synthèse des variables climatiques a été l'œuvre de Kazadi Tshamala Evariste. Afin d'autres auteurs MINGA Stéphane et Kabasele Yenga Yenga ont vérifié la fiabilité des résultats et discussions pour afin approuvé la version finale.

Disponibilité des données et du matériel/Availability of Data and Materials: Les données et les outils utilisés dans ce modeste travail sont disponibles sur demande auprès des auteurs. Les détails concernant l'accès aux données et aux outils peuvent être obtenus en contactant cette adresse E-mail : emmanuelmokili754@gmail.com.

Conflits d'intérêts/Conflicts of Interest: Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts en relation avec cette recherche.

Références

I. Ouvrage

- [1]. Lisenga Bolila, Joël. ; *Leadership politique et sous-développement en RD Congo*, Éd. Harmattan, Collection « Études africaines », 2021, P 208.
- [2].
- [3]. **Huard, B. & Girot, P.** *Dynamiques climatiques mondiales : Analyse des extrêmes thermiques au XXI^e siècle*. Éditions Dunod, 2024.
- [4]. **Huard, D. & Desrochers, A.** *Analyse statistique des séries climatiques : de la théorie à l'application*. Éditions Sciences Climat, 2024.
- [5]. **Vigneau, J.-P. & Sanni, S.** ; *Hydro-climatologie statistique : Analyse des précipitations et des risques hydrologiques*. Éditions Armand Colin, 2e édition, 2024.
- [6]. **Gérard, L.** *Hydroclimatologie : Dynamique de l'eau et changement global*. Éditions Dunod, 2024
- [7]. **Muller, C. & Roche, D.** ; *Variabilité climatique et cycle de l'eau*. Presses Universitaires de France, 2023.
- [8]. **Leroux, S.** *Statistiques appliquées aux sciences de l'environnement*. Éditions Technip, (2025).
- [9]. **Tshimanga, R. M., et al.** ; *Hydrologie du bassin du Congo : Dynamiques, ressources et résilience face aux changements globaux*. Éditions de l'UNESCO / Elsevier, 2024.
- [10]. **Tshimanga, R. M., et al.** ; *Hydrology and Water Resources of the Congo Basin: Shared Opportunities and Common Challenges*. American Geophysical Union (AGU) / Wiley, 2024.
- [11]. **Musy, A., Higy, C. & Baud, C. A.** ; *Hydrologie 1 : Une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), 2021.
- [12]. **Tshimanga, R. M., et al.** ; *Hydrology and Water Resources of the Congo Basin: Shared Opportunities and Common Challenges*. American Geophysical Union (AGU) / Wiley, 2024.
- [13]. **Baret, F. & Weiss, M.** ; *Télédétection de la végétation : Principes, modèles et applications*. Éditions Lavoisier, 2024.
- [14]. **Tshimanga, R. M., et al.** ; *Hydrology and Water Resources of the Congo Basin*. Wiley/AGU, 2024.
- [15]. **Girard, M. C. & Girard, C. M.** ; *Traitement des données de télédétection*. Dunod, 3e édition, 2023.
- [16]. **Vigneau, J.-P.** ; *Climatologie : Fondements et modèles contemporains*. Éditions Armand Colin, 2024.
- [17]. **Boulard, G. & Martin, P.** ; *Agrométéorologie : Outils et méthodes pour l'agriculture de demain*. Éditions Lavoisier, 2023.
- [18]. **Vigneau, J.-P.** ; *Climatologie : Fondements et modèles contemporains*. Éditions Armand Colin, 2024.
- [19]. **Boulard, G. & Martin, P.** ; *Agrométéorologie : Outils et méthodes pour l'agriculture de demain*. Éditions Lavoisier, 2023.
- [20]. **Musy, A., Higy, C. & Baud, C. A.** ; *Hydrologie 1 : Une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), 2021.
- [21]. **Gérard, L.** ; *Hydroclimatologie : Dynamique de l'eau et changement global*. Éditions Dunod, 2024.
- [22]. **Tshimanga, R. M., et al.** ; *Hydrology and Water Resources of the Congo Basin: Shared Opportunities and Common Challenges*. American Geophysical Union (AGU) / Wiley, 2024.

II. Articles

- [23]. BAMBALE, A. J., et al.(2024) ; "Perceptions et stratégies d'adaptations des maraîchers aux perturbations climatiques dans la ville de Kisangani, RD Congo". *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, vol. 12, n° 2, pp. 155-162 (8 pages).
- [24]. Li, X., et al. (2025). "Global asymmetry in maximum and minimum temperature trends: A monthly analysis (1950–2024)". *Journal of Climate*, vol. 38, n°4.
- [25]. Martin-Gomez, J. & Lefebvre, A. (2023). "Variabilité mensuelle des anomalies de température en Europe de l'Ouest : Rôle des circulations atmosphériques". *Revue de Climatologie Appliquée*, vol. 12.
- [26]. Zhang, H., et al. (2024). "Impact of monthly $T_{\max}$ anomalies on wheat yield variability in semi-arid regions". *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 345.
- [27]. Vautard, R., et al. (2023). "Atmospheric circulation changes and their contribution to extreme annual temperature anomalies in Europe". *Nature Communications*, 14(1).
- [28]. Zhou, C. & Wang, K. (2025). "Global warming asymmetry: Decadal shifts in annual $T_{\max}$ and $T_{\min}$ anomalies across continents". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 130.
- [29]. Tan, X., et al. (2023). "Global disproportionate warming between maximum and minimum temperatures: A review of recent trends." *Journal of Climate Dynamics*, vol. 61, pp. 45-62.
- [30]. Moussa, R. & Al-Qudah, O. (2025). "Inter-annual variability of temperature anomalies in Mediterranean regions: 1990-2024." *International Journal of Climatology*, vol. 45(2).
- [31]. García-López, J. (2024). "Robustness of $T_{\max}$ and $T_{\min}$ trends in the context of urbanization biases." *Environmental Research Letters*, 19(5).
- [32]. N'Guessan, A. K., et al. (2023). "Variabilité mensuelle des précipitations et glissements saisonniers en Afrique de l'Ouest : Une analyse par anomalies normalisées." *Revue Internationale de Climatologie*, vol. 12, n°3.
- [33]. Dubreuil, V. & Arvor, D. (2025). "New patterns of monthly rainfall anomalies in the Amazon: Drought intensification and extreme events (2010-2024)." *Climate Dynamics Journal*, vol. 64, pp. 210-228.
- [34]. Zhou, Q. & Wang, L. (2024). "Global intensification of annual precipitation anomalies: A decade of extremes (2015–2024)." *Journal of Hydrometeorology*, vol. 25, n°4.
- [35]. Sow, M., et al. (2023). "Évolution des anomalies pluviométriques annuelles en zone sahélienne : persistance du retour à l'humide ?" *Revue de Géographie Climatique*, vol. 18.
- [36]. Bamba, A., et al. (2023). "Spatiotemporal analysis of evapotranspiration anomalies and their links to drought in West African savannas." *African Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17(4).
- [37]. Moussa, K. & Diallo, B. (2025). "Impact of monthly ET anomalies on cocoa yield in the Gulf of Guinea: A remote sensing approach." *International Journal of Agricultural Research in the Tropics*, vol. 31.
- [38]. Okonjo, E., et al. (2024). "Evaluating the Evaporative Demand Drought Index (EDDI) for early warning systems in East Africa." *Journal of Hydrometeorology - Africa Special Issue*, vol. 26.
- [39]. Mba, S. A., et al. (2023). "Trends in potential evapotranspiration and its driving forces over Central Africa: 1980–2022." *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 152, pp. 891-905.
- [40]. Nguimalet, C. R. & Foto, E. (2025). "Variabilité interannuelle de l'ETP et impact sur les ressources en eau en République Centrafricaine." *Revue de Géographie de l'Afrique Centrale*, vol. 9, n°1.
- [41]. Amoussou, E., et al. (2023). "Variabilité des écoulements et anomalies du ruissellement de surface dans le bassin du Mono (Afrique de l'Ouest) : impacts des changements climatiques et anthropiques." *Hydrological Sciences Journal*, vol. 68, n°5.
- [42]. Tshimanga, R. M., et al. (2022). "Continuous multi-decadal monthly runoff anomalies in the Congo Basin: Drivers and ecological implications." *Journal of African Earth Sciences*, vol. 189.
- [43]. Abdoulaye, A., et al. (2023). "Annual runoff anomalies and land cover change in the Sahel: A 40-year perspective update." *Journal of Arid Environments*, vol. 210.

- [44]. Okwuokei, C. & Ojo, O. J. (2025). "Inter-annual variability of runoff anomalies in the Niger River Basin: Climate versus anthropogenic drivers." *Journal of African Earth Sciences*, vol. 202.
- [45]. Koffi, K. J., et al. (2023). "Monitoring monthly NDVI anomalies in West African cocoa landscapes: A 20-year satellite perspective." *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 29.
- [46]. Mubenga, A. & Kabulo, J. (2025). "Variabilité mensuelle de la couverture végétale dans le bassin du Kasai : Analyse par télédétection multi-source (2015-2024)." *Revue de Géomatique Africaine*, vol. 7.
- [47]. Wang, Y., et al. (2024). "Global vegetation browning or greening? Decoupling monthly NDVI anomalies from climate drivers." *Nature Communications (Earth & Environment)*, vol. 5.
- [48]. Soro, G., et al. (2023). "Corrélation entre anomalies de précipitations et réponses mensuelles du NDVI en zone de savane soudanaise." *International Journal of Remote Sensing*, vol. 44(8).
- [49]. Traoré, S., et al. (2024). "Évolution des périodes de sécheresse en zone soudano-sahélienne : Analyse par les diagrammes ombrothermiques (1991-2023)." *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, vol. 42.
- [50]. Moukandi, R. & Ngoma, A. (2025). "Nouvelle zonation bioclimatique de l'Afrique Centrale basée sur l'analyse ombrothermique mensuelle." *Journal of African Earth Sciences*, vol. 208.
- [51]. Garcia, L., et al. (2023). "Revisiting the Gaussen Index in the context of extreme heatwaves: Is $P=2T$ still a valid threshold?" *International Journal of Biometeorology*, vol. 67(9).
- [52]. Soro, D. & Konan, B. (2024). "Impact du changement climatique sur les rythmes saisonniers en Côte d'Ivoire : Une approche par les courbes de Bagnouls et Gaussen." *African Journal of Climate Change*, vol. 12(2).
- [53]. Moukandi, R. & Ngoma, A. (2025). "Nouvelle zonation bioclimatique de l'Afrique Centrale basée sur l'analyse ombrothermique annuelle." *Journal of African Earth Sciences*, vol. 208.
- [54]. Garcia, L., et al. (2023). "Revisiting the Gaussen Index in the context of extreme heatwaves: Is $P=2T$ still a valid threshold?" *International Journal of Biometeorology*, vol. 67(9).
- [55]. Amoussou, E., et al. (2023). "Variabilité des écoulements et anomalies du ruissellement de surface dans le bassin du Mono : impacts des changements climatiques et anthropiques." *Hydrological Sciences Journal*, vol. 68, n°5.
- [56]. N'Guessan, A. K., et al. (2023). "Interactions entre demande évaporative et ruissellement en Afrique de l'Ouest : Une approche par modélisation des anomalies." *Journal of African Earth Sciences*, vol. 195.
- [57]. Mba, S. A., et al. (2023). "Annual runoff sensitivity to climate change in Central Africa: The role of increasing potential evapotranspiration." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 47.
- [58]. Okwuokei, C. & Ojo, O. J. (2025). "Inter-annual variability of runoff anomalies in the Niger River Basin: Climate versus anthropogenic drivers." *Journal of African Earth Sciences*, vol. 202.
- [59]. Météo-France (2026). Indicateurs climatiques globaux et nationaux : Suivi des anomalies mensuelles. Consulter le tableau de bord climatique (Section interactive permettant de visualiser les anomalies en temps réel).
- [60]. Huet, S. & Radanyi, S. (2024). *Le climat en chiffres : Comprendre les anomalies thermiques du XXI^e siècle*. Éditions du Seuil.

III. Webographies

- [61]. Copernicus Climate Change Service (2026). Global Temperature Reports 2025: Annual anomalies and trends. Site officiel C3S
- [62]. Organisation Météorologique Mondiale (OMM) (2025). État du climat mondial 2024 : Analyse des records de températures minimales et maximales. Ressources OMM
- [63]. Copernicus Climate Change Service (C3S) (2025). Global Temperature Trends 2024: Record-breaking anomalies,
- [64]. <https://climate.copernicus.eu/global-temperature-2024> (Rapport annuel sur les records d'anomalies de température moyenne).
- [65]. NOAA National Centers for Environmental Information (2024). Annual Global Climate Report - 2023.

- [66]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/> (Base de données mondiale permettant d'extraire les anomalies annuelles $T_{\max}/T_{\min}$).
- [67]. Météo-France (2025). Suivi climatique mensuel : Les bilans hydriques et anomalies de précipitations en France, rapport aux normales 1991-2020
- [68]. <https://meteofrance.com/climathd>
- [69]. WMO (World Meteorological Organization) (2024). State of the Global Climate 2023.
- [70]. <https://wmo.int/state-of-global-climate> (Rapport de référence sur les bilans hydriques mondiaux).
- [71]. IPCC (GIEC) (2025). Interactive Atlas: Regional Climate Changes.
- [72]. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/> (Outil permettant d'extraire les séries d'anomalies annuelles par région).
- [73]. FEWS NET (Famine Early Warning Systems Network) (2025). Evapotranspiration (ET) Monitoring for Food Security in Africa.
- [74]. <https://fews.net/science/evapotranspiration> (Fournit des cartes d'anomalies mensuelles d'ETR pour l'Afrique subsaharienne).
- [75]. CGIAR - Climate Security Observatory (2024). Climate Extremes and Water Balance in Tropical Regions.
- [76]. <https://climate-security.cgiar.org> (Analyses sur la corrélation entre anomalies d'ET et conflits liés aux ressources en eau).
- [77]. ERA5-Land / Copernicus Climate Change Service (2024). Total Potential Evapotranspiration - Regional Monitoring over Africa.
- [78]. <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- [79]. WMO (Organisation Météorologique Mondiale) (2024). State of Global Water Resources 2023: Monitoring Discharge and Runoff.
- [80]. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-water-resources>
- [81]. GRDC (Global Runoff Data Centre) (2024). Global Monthly and Annual Runoff Data – 2023 Update.