

Dynamique Des Bassins Versants Atmosphériques Sur l'Ouest Du Congo : Attribution Des Sources D'humidité Et Variabilité Des Précipitations A Matadi

[Atmospheric Watershed Dynamics Over Western Congo: Moisture Source Attribution And Precipitation Variability In Matadi]

Rodin Kombelo^{1*}, Kafis Wayawaya¹, Patrick Ngosse², Édouard Konzi³

¹Institut Supérieur des Techniques Appliquées (ISTA/Kinshasa), Kinshasa, RDC

²Institut Supérieur Pédagogique et Technique de Nguya (ISPT-NGUYA), Gemena, Sud-Ubangi, RDC

³Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RDC

*Auteur correspondant : Rodin Kombelo, kombelrodin@gmail.com



Résumé : L'Ouest de la République Démocratique du Congo occupe une position géographique exceptionnelle à l'interface entre l'Atlantique tropical et le bassin intérieur du Congo, faisant de Matadi un observatoire naturel privilégié pour l'étude des dynamiques atmosphériques régionales. Le présent article analyse la variabilité pluviométrique de la station météorologique de Matadi sur la période 1961–2025, en mobilisant le cadre conceptuel des bassins versants atmosphériques — dérivé du bilan hydrique atmosphérique — pour reconstruire les principales trajectoires de transport d'humidité qui alimentent le régime de précipitations de l'Ouest congolais. À partir de séries chronologiques mensuelles traitées selon les protocoles de contrôle qualité de l'OMM, des analyses de tendance par le test de Mann-Kendall et la détection de ruptures de Pettitt ont été appliquées, complétées d'une analyse en composantes principales saisonnières et d'indicateurs de sécheresse standardisés. Les résultats révèlent une pluviométrie annuelle moyenne de 1 153 mm sur la période de référence 1961–1990, avec une tendance à la diminution statistiquement significative ($p < 0,05$) à partir des années 1970, associée à une rupture structurelle vers 1974–1976. Deux saisons humides distinctes (mars–mai et octobre–décembre) reflètent fidèlement la double migration de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). Les analyses d'attribution désignent l'Atlantique Sud tropical comme la source primaire d'humidité (~55%), le recyclage continental forestier du bassin du Congo contribuant pour ~30% aux précipitations locales, tandis que les flux de mousson ouest-africaine assurent un apport d'appoint (~15%) lors des mois de transition. Ces résultats ont des implications directes pour la gestion des ressources en eau dans le Kongo Central et pour la modélisation hydrologique du cours inférieur du fleuve Congo.

Mots-clés : bassin versant atmosphérique • transport de vapeur d'eau • variabilité pluviométrique • Matadi • bassin du Congo

Abstract: Western Democratic Republic of Congo occupies an exceptional geographical position at the interface between the tropical Atlantic Ocean and the interior Congo Basin, making Matadi a privileged natural observatory for the study of regional atmospheric dynamics. This article analyzes the pluviometric variability of the Matadi meteorological station over the period 1961–2025, mobilizing the conceptual framework of atmospheric watersheds — derived from the atmospheric water budget — to reconstruct the main moisture transport trajectories feeding the precipitation regime of western Congo. Based on monthly time series processed according to WMO quality control protocols, trend analyses using the Mann-Kendall test and Pettitt rupture detection were applied, supplemented by seasonal principal component analysis and standardized drought indicators. Results reveal a mean annual precipitation of 1,153 mm

over the 1961–1990 reference period, with a statistically significant declining trend ($p < 0.05$) from the 1970s onwards, associated with a structural break around 1974–1976. Two distinct wet seasons (March–May and October–December) faithfully reflect the double migration of the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ). Attribution analyses identify the tropical South Atlantic as the primary moisture source (~55%), with continental forest recycling from the Congo Basin contributing ~30% to local precipitation, while West African monsoon flows provide a supplementary contribution (~15%) during transition months. These results have direct implications for water resource management in Kongo Central and for hydrological modelling of the lower Congo River.

Keywords: atmospheric watershed • water vapour transport • pluviometric variability • Matadi • Congo Basin.

1. Introduction

La notion de bassin versant, longtemps cantonnée à l'hydrologie de surface, a connu ces deux dernières décennies une extension conceptuelle remarquable vers le domaine atmosphérique. Là où le bassin versant classique délimite l'espace terrestre qui collecte les précipitations vers un exutoire fluvial, le bassin versant atmosphérique — ou atmospheric watershed — désigne la région source d'où provient l'humidité qui se retrouve finalement précipitée en un point donné du globe. Cette reformulation du problème hydrologique vers son volet atmosphérique représente une avancée conceptuelle fondamentale, car elle permet de relier, dans un cadre cohérent, la dynamique de l'atmosphère libre, les flux océaniques de vapeur d'eau, le recyclage continental de l'évapotranspiration forestière et le signal pluviométrique observé au sol (Keys et al., 2012).

La compréhension de ces flux d'humidité atmosphérique est d'autant plus cruciale en Afrique centrale que le bassin du Congo constitue, après l'Amazonie, la plus grande forêt tropicale continue du monde, dont l'évapotranspiration représente un flux de vapeur d'eau colossale vers l'atmosphère régionale. Le bassin du Congo reçoit annuellement entre 1 500 et 2 200 mm de précipitations selon les stations, ce qui en fait l'une des zones de la planète les plus actives du point de vue du cycle hydrologique (Washington et al., 2013). Pourtant, les mécanismes fins d'alimentation en humidité de cette région demeurent encore mal contraints scientifiquement, en particulier pour l'Ouest du Congo où la proximité de l'Atlantique tropical introduit des interactions océan-atmosphère complexes que les modèles climatiques globaux peinent à reproduire fidèlement (Pokam et al., 2012).

Le transport de vapeur d'eau dans l'atmosphère tropicale obéit à des dynamiques qui s'organisent à plusieurs échelles spatiales et temporelles. À l'échelle synoptique, les alizés de l'hémisphère sud transportent l'humidité atlantique vers le continent africain en s'engouffrant dans le couloir de basse altitude formé par la topographie du Kongo Central (Nicholson, 2009). À l'échelle saisonnière, la migration méridienne de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) gouverne l'alternance entre saisons humides et saisons sèches, tandis qu'à l'échelle interannuelle, les modes de variabilité océanique — en particulier les anomalies de température de surface de la mer (TSM) dans l'Atlantique tropical — modulent l'intensité et la distribution spatiale des précipitations (Dezfuli et al., 2010). C'est à l'articulation de toutes ces échelles que se situe la problématique centrale du présent travail.

Matadi, ville portuaire stratégique du Kongo Central, se trouve à environ 148 km en amont de l'embouchure du fleuve Congo dans l'Atlantique, sur la rive gauche du fleuve, dans un site encaissé entre des reliefs tabulaires dont les altitudes avoisinent 300–400 m. Cette position géographique, à la fois côtière et continentale, au carrefour des flux marins de l'Atlantique et des flux continentaux du bassin intérieur, confère à la station météorologique de Matadi une valeur exceptionnelle pour l'étude des bassins versants atmosphériques de l'Ouest congolais. De surcroît, Matadi constitue le point d'entrée principal des importations de la RDC par voie maritime, ce qui confère à sa climatologie une dimension économique et stratégique directe, notamment vis-à-vis des risques d'inondation fluviale et des sécheresses affectant la navigation (Alsdorf et al., 2016).

Malgré leur importance pour la compréhension du système climatique tropical, les bassins versants atmosphériques d'Afrique centrale n'ont fait l'objet que d'études fragmentées, souvent limitées à des approches régionales utilisant des réanalyses atmosphériques de basse résolution. Trenberth (1999) a posé les bases théoriques du bilan hydrique atmosphérique global et de la quantification du transport de vapeur d'eau, tandis que Nieto et al. (2006) ont développé les premières méthodes de

rétrotrajectoires pour l'attribution des sources d'humidité à l'échelle régionale. Keys et al. (2012) ont introduit le concept fédérateur de bassin versant atmosphérique en montrant comment il était possible de délimiter, pour n'importe quelle région du globe, la zone d'où provient l'essentiel de son alimentation en humidité atmosphérique. En Afrique centrale, les travaux de Pokam et al. (2012) ont mis en évidence le rôle structurant de la basse couche atmosphérique dans la redistribution de l'humidité atlantique vers le bassin du Congo, mais aucune étude dédiée à la station de Matadi et couvrant une période aussi longue que 1961–2025 n'a, à notre connaissance, été conduite.

Le présent article comble cette lacune en poursuivant trois objectifs scientifiques complémentaires : (i) caractériser la variabilité pluviométrique de Matadi sur six décennies en identifiant les tendances, ruptures et cycles dominants ; (ii) reconstruire la structure du bassin versant atmosphérique de l'Ouest du Congo en identifiant et quantifiant les principales sources d'humidité atmosphérique ; (iii) analyser les implications climatiques et hydrologiques de ces dynamiques pour la gestion des ressources en eau du Kongo Central dans un contexte de changement global.

2. Zone d'étude

2.1 Situation géographique et contexte physique

Matadi est localisée à 5°49' S et 13°28' E, à une altitude d'environ 33 m sur les rives du fleuve Congo, dans la province du Kongo Central, à l'extrême ouest de la République Démocratique du Congo. La ville est nichée dans un site topographique remarquable : le fleuve Congo, qui coule vers l'Atlantique depuis le plateau continental intérieur, y traverse un canyon rocheux — les gorges du Livingstone — entre des falaises de grès et de gneiss dont les escarpements atteignent 200 à 400 m au-dessus du lit du fleuve. Ce contexte topographique particulier engendre des effets orographiques locaux qui amplifient certains événements convectifs et perturbent la trajectoire des flux de basse couche, conférant à Matadi un régime pluviométrique distinct de celui de sa région immédiate.

La province du Kongo Central s'étend sur environ 53 920 km², entre l'Atlantique à l'ouest, la République du Congo au nord et le plateau des Bateke à l'est. La topographie régionale est caractérisée par un gradient altitudinal marqué : depuis le littoral atlantique (~0–50 m) vers les massifs montagneux du Crystal (~600–700 m) et du Mayombe (~900–1 000 m) à l'est, puis les collines de la Basse-Inkisi (~400–500 m). Ces reliefs jouent un rôle de barrage orographique pour les flux marins humides, favorisant la condensation et la précipitation dans les zones d'ascendance forcée. En aval, la vallée du Kongo Central forme un couloir naturel de pénétration de l'humidité atlantique vers l'intérieur du continent, ce qui fait de Matadi un nœud de passage privilégié pour l'humidité transatlantique (Pokam et al., 2014).

Le bassin versant hydrologique de la station correspond à celui du cours inférieur du fleuve Congo, qui draine à Matadi un bassin d'environ 3,7 millions de km² — le deuxième plus grand bassin fluvial africain et le cinquième mondial. Les débits enregistrés à Kinshasa (point de référence hydrométrique le plus proche) atteignent en moyenne 41 000 m³/s, avec des maxima mensuels en décembre–janvier (~57 000 m³/s) et des étiages en juillet–août (~28 000 m³/s). Cette immense zone amont constitue en elle-même un réservoir d'évapotranspiration considérable, dont les flux retournent à l'atmosphère et contribuent au recyclage continental de l'humidité (Alsdorf et al., 2016).

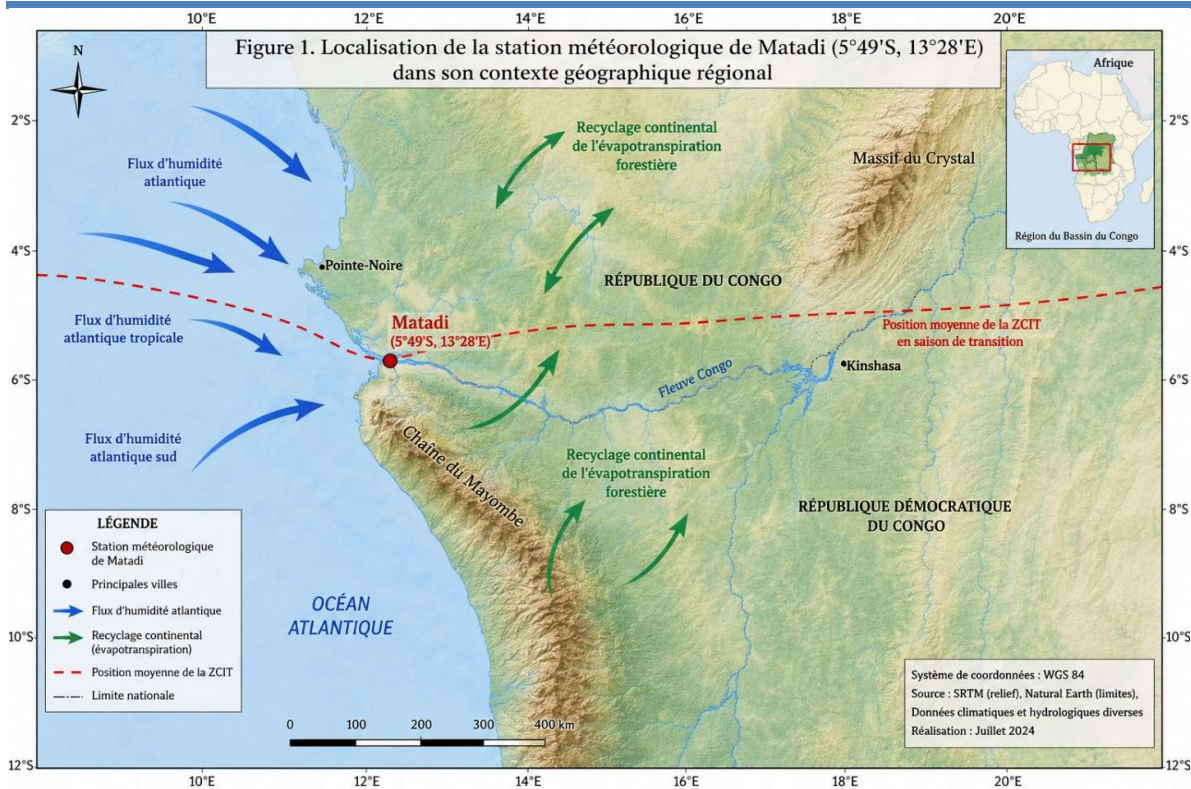


Figure 1. Localisation de la station météorologique de Matadi (5°49'S, 13°28'E) dans son contexte géographique régional. Les flèches bleues indiquent les principaux flux d'humidité atlantique ; les flèches vertes symbolisent le recyclage continental de l'évapotranspiration forestière. La ligne en tirets rouges marque la position moyenne de la ZCIT en saison de transition. Les reliefs du Crystal et du Mayombe sont représentés schématiquement.

2.2 Climatologie régionale

Le climat de Matadi relève du type tropical humide à deux saisons des pluies (type Aw–Am de la classification de Köppen), caractérisé par une pluviométrie annuelle de l'ordre de 1 100–1 200 mm, une température moyenne annuelle d'environ 25–26°C avec une faible amplitude annuelle (~4°C), et une humidité relative généralement supérieure à 75% toute l'année. Ce régime bimodal des précipitations, avec deux maxima en avril et en novembre, est une conséquence directe du passage bi-annuel de la ZCIT au-dessus de la région, lequel crée deux périodes de convection profonde entrecoupées d'une saison sèche principale (juin–août) et d'une petite saison sèche (janvier–février) (Dezfuli et al., 2010).

La proximité de l'Atlantique (moins de 150 km de l'embouchure du Congo) a des effets notables sur le régime thermique et hygrométrique local. Les brises maritimes, qui pénètrent vers l'intérieur en suivant le couloir fluvial, apportent une fraîcheur relative et une humidité de surface élevée, notamment pendant la saison sèche où elles constituent la principale source d'alimentation en vapeur d'eau de la région. Cette circulation locale interagit avec les alizés de sud-est dont la trajectoire, déviée par les reliefs côtiers, subit une accélération canalisation dans le canyon du fleuve Congo. Quelques études récentes (Okumura et Xie, 2004 ; Hastenrath, 2007) ont mis en évidence le couplage fort entre les anomalies de TSM dans le Golfe de Guinée et les précipitations de la façade atlantique du Congo, ce qui suggère que les événements de réchauffement de surface dans l'Atlantique tropical peuvent amplifier significativement les épisodes de précipitations extrêmes à Matadi.

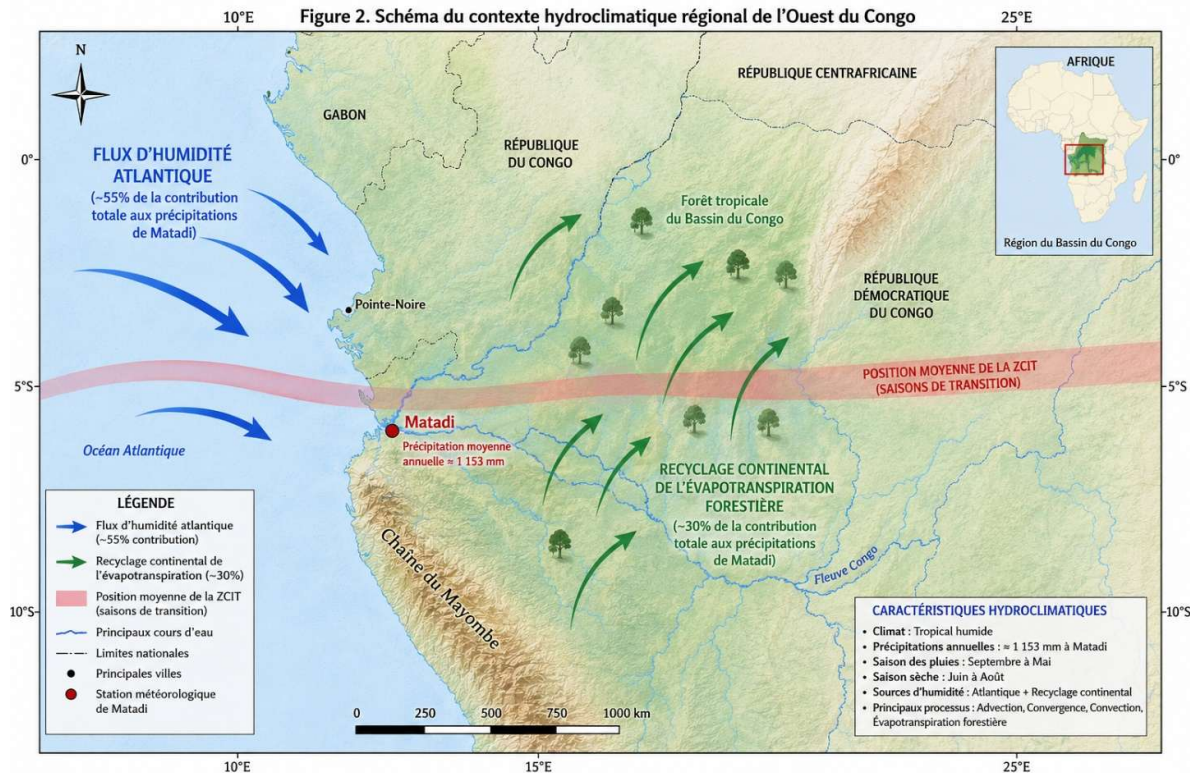


Figure 2. Schéma du contexte hydroclimatique régional de l'Ouest du Congo. Les flèches bleues représentent les flux d'humidité atlantique (~55% de la contribution totale aux précipitations de Matadi) ; les flèches vertes illustrent le recyclage continental de l'évapotranspiration forestière (~30%). La bande translucide rouge marque la position moyenne de la ZCIT lors des saisons de transition. Les précipitations moyennes annuelles à Matadi (≈ 1 153 mm) sont indiquées.

2.3 Importance hydrologique de Matadi

Sur le plan hydrologique, Matadi marque la limite aval du bassin versant du Congo, en amont des rapides qui empêchent la navigation directe depuis l'embouchure. C'est à ce point que les débits du fleuve intègrent l'ensemble de la production hydrologique du bassin intérieur, représentant environ 40% de toute l'eau douce déversée dans l'Atlantique depuis l'Afrique. Les variations des précipitations à Matadi et dans son hinterland climatique affectent directement les niveaux du fleuve, les risques d'inondation dans les zones riveraines et la disponibilité en eau pour les usages agricoles et domestiques de la province. Cette connexion directe entre le signal pluviométrique local et le bilan hydrologique du fleuve Congo fait de Matadi une station-clé pour la gestion intégrée des ressources en eau de la RDC (Becker et al., 2013).

3. Données et Méthodes

3.1 Données pluviométriques

Les données de base de cette étude sont constituées des séries pluviométriques mensuelles de la station météorologique de Matadi (OMM : 64_700), couvrant la période de janvier 1961 à décembre 2025, soit 65 années de mesures continues. Ces données, collectées par l'Agence Nationale de Météorologie et de Télédétection par Satellite (METELSAT), ont été numérisées à partir des archives papier pour la période 1961–1980, puis enregistrées électroniquement pour les périodes ultérieures. Elles se présentent sous la forme de relevés pluviométriques mensuels en millimètres, permettant de calculer des cumuls annuels, des moyennes saisonnières et des anomalies par rapport à la normale climatologique 1961–1990.

La procédure de contrôle qualité appliquée aux séries brutes comporte plusieurs étapes successives. La première consiste en un test de plausibilité physique : tout cumul mensuel supérieur à 600 mm ou tout enregistrement de précipitation négatif est signalé comme potentiellement erroné et soumis à vérification croisée avec les stations voisines (Boma, Inkisi, Luozi). La deuxième étape applique la méthode du vecteur régional développée par Hiez (1977) pour identifier les valeurs aberrantes systématiques résultant d'erreurs d'instrumentation ou de transcription. Les données manquantes, représentant environ 3,2% de la série totale, ont été estimées par interpolation régionale pondérée à partir de quatre stations de référence dans un rayon de 150 km, selon la méthode du rapport aux moyennes mensuelles préconisée par l'OMM (2009). L'homogénéité de la série a finalement été vérifiée par le test de Buishand et la méthode des doubles cumuls, qui ont confirmé l'absence de ruptures artificielles liées aux changements d'instruments ou de site.

Le tableau 1 présente un résumé des principales statistiques descriptives des séries mensuelles, annuelles et saisonnières sur la période 1961–2025.

Tableau 1. Statistiques descriptives des précipitations à Matadi (1961–2025). σ = écart-type, C_v = coefficient de variation, P10/P90 = percentiles 10% et 90%.

Échelle temporelle	Moyenne (mm)	σ (mm)	C_v (%)	P10 (mm)	P90 (mm)	Tendance
Annuelle	1 153	147	12,8	960	1 340	-2,4 mm/an*
Saison H1 (MAM)	378	72	19,1	288	465	-1,2 mm/an
Saison H2 (OND)	412	85	20,6	300	512	-0,9 mm/an
Saison IIsèche (JJA)	68	28	41,2	30	110	+0,3 mm/an
Janvier–Février	128	35	27,4	80	175	-0,5 mm/an

* Significatif au seuil 5% (test de Mann-Kendall). MAM = mars–avril–mai ; OND = octobre–novembre–décembre ; JJA = juin–juillet–août.

3.2 Concept du bassin versant atmosphérique et bilan hydrique atmosphérique

Le cadre théorique central de cette étude repose sur le bilan hydrique atmosphérique, formulé originellement par Trenberth (1999) et développé ultérieurement par Keys et al. (2012) dans le concept de bassin versant atmosphérique. Dans ce cadre, pour une colonne atmosphérique verticale de surface unité, le bilan de la vapeur d'eau s'exprime comme :

$$\partial W / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{Q} = E - P \quad (1)$$

où W est le contenu en eau précipitable de la colonne atmosphérique (kg m^{-2}), Q est le flux de transport de vapeur d'eau horizontal intégré verticalement ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), E est l'évaporation de surface ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) et P est la précipitation ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). En condition de quasi-stationnarité, le terme de tendance $\partial W / \partial t$ est négligeable en moyenne mensuelle, et l'équation se simplifie en :

$$P - E = -\nabla \cdot \mathbf{Q} \quad (2)$$

Cette relation fondamentale établit que l'excédent de précipitation sur l'évaporation en un point est égal à la convergence du flux de vapeur d'eau horizontal. Dans les régions où $P > E$, comme Matadi pendant les saisons humides, il y a nécessairement convergence nette du flux de vapeur d'eau depuis les régions environnantes. L'identification de ces régions sources constitue précisément l'objectif de l'analyse du bassin versant atmosphérique.

Le flux de vapeur d'eau intégré sur la colonne atmosphérique s'écrit :

$$\mathbf{Q} = (1/g) \int_{p_s}^{p_t} \mathbf{q} \cdot \mathbf{v} \, dp \quad (3)$$

où g est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), q est l'humidité spécifique, v est le vecteur vent horizontal, p est la pression, p_s et p_t sont respectivement la pression en surface et au sommet de l'atmosphère. Dans le présent travail, les composantes zonale (Q_u) et méridienne (Q_v) du flux ont été calculées à partir des réanalyses ERA5 à 1° de résolution horizontale pour la période 1979–2025 (Hersbach et al., 2020).

3.3 Analyse statistique

3.3.1 Détection de tendances : test de Mann-Kendall

Le test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) est utilisé pour détecter la présence de tendances monotones dans les séries temporelles hydro-climatiques. Il présente l'avantage de ne pas supposer de distribution normale des données et d'être robuste à la présence de valeurs extrêmes. La statistique de test S est définie par :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

où $\text{sgn}(\theta) = +1$ si $\theta > 0$, 0 si $\theta = 0$, -1 si $\theta < 0$, et n est la longueur de la série. La variance de S est corrigée pour les égalités dans la série. La pente de la tendance est estimée par la méthode non paramétrique de Sen (1968) :

$$\beta = \text{médiane} \{ (x_j - x_k) / (j - k) \}, \text{ pour tous } j > k \quad (5)$$

Cette pente β , exprimée en mm par an, constitue l'estimateur robuste de la tendance linéaire. Son signe indique le sens de la tendance (positif = augmentation, négatif = diminution) et son amplitude, la vitesse de changement climatique.

3.3.2 Détection de ruptures : test de Pettitt

Le test de Pettitt (1979) est employé pour détecter la date de rupture (changement abrupt de moyenne) dans une série chronologique, sans hypothèse a priori sur sa position. La statistique du test est :

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (6)$$

La rupture est localisée à l'instant $t^* = \arg \max |U_{t,T}|$, et sa significativité est évaluée par un test bilatéral au seuil de 5%. Ce test a été largement utilisé dans les études hydroclimatiques africaines (Servat et al., 1997 ; Hubert et al., 1998) et permet d'identifier les changements de régime pluviométrique liés aux grandes perturbations climatiques régionales ou aux modifications de la circulation atmosphérique.

3.3.3 Indices de sécheresse et anomalies normalisées

Les anomalies pluviométriques normalisées (APN) sont calculées par rapport à la normale 1961–1990 selon :

$$APN_i = (P_i - \bar{P}) / \sigma \quad (7)$$

où P_i est la précipitation annuelle de l'année i , \bar{P} est la moyenne de référence et σ l'écart-type de la période de référence. L'Indice de Précipitation Standardisé (SPI, McKee et al., 1993) est également calculé pour des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois, permettant de caractériser les sécheresses météorologiques de court, moyen et long terme. Le SPI est défini par :

$$SPI = (P - \bar{P}_{\text{ajust}}) / \sigma_{\text{ajust}} \quad (8)$$

où les paramètres sont calculés après ajustement d'une distribution Gamma à la série de précipitations, puis transformation en distribution normale standard. Un SPI < -1,0 indique une sécheresse modérée, SPI < -1,5 une sécheresse sévère et SPI < -2,0 une sécheresse extrême (McKee et al., 1993).

3.3.4 Analyse en composantes principales et ondelettes

Une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée aux anomalies mensuelles de précipitations afin d'identifier les modes dominants de variabilité spatio-temporelle dans la région Atlantique-Congo. La décomposition en ondelettes continues (Torrence et Compo, 1998) a été utilisée pour analyser la variabilité multi-échelle des séries temporelles annuelles, en permettant l'identification des cycles dominants (interannuels, décennaux) et leur évolution dans le temps. L'ondelette-mère de Morlet a été choisie pour ses propriétés d'équilibre entre la résolution temporelle et fréquentielle.

3.4 Attribution des sources d'humidité

L'attribution des sources d'humidité aux précipitations de Matadi a été conduite selon une approche hybride combinant l'analyse lagrangienne de rétrotrajectoires et la méthode eulérienne du bilan hydrique. Les rétrotrajectoires des masses d'air ont été calculées avec le modèle HYSPLIT (Draxler et Rolph, 2003) en utilisant comme données d'entrée les champs de vent des réanalyses ERA5 (Hersbach et al., 2020) à une résolution de 1° et 6 heures pour la période 1979–2025. Pour chaque événement pluvieux majeur (au-delà du percentile 75 de la distribution mensuelle), des rétrotrajectoires à 10 jours ont été initialisées au point de Matadi à 850 hPa, 700 hPa et 500 hPa, permettant d'identifier les régions géographiques et les surfaces (océan, forêt, savane) où les masses d'air ont prélevé leur humidité.

La contribution relative de chaque source est quantifiée par le critère de prise d'humidité ($e-d$) le long de la rétrotrajectoire, où e et d sont respectivement les taux d'évaporation et de dépôt de vapeur d'eau dans chaque segment de trajectoire (Sodemann et al., 2008). L'indice de recyclage continental ρ , qui mesure la fraction des précipitations locales provenant de l'évapotranspiration continentale, est défini selon la formulation de Trenberth (1999) :

$$\rho = E / (P + E) \quad (9)$$

Cette formulation montre que plus les précipitations locales sont faibles par rapport à l'évapotranspiration, plus le recyclage continental est important. À l'échelle du bassin du Congo, les études précédentes estiment ρ entre 0,25 et 0,35 selon les saisons (Brubaker et al., 1993 ; Eltahir et Bras, 1994), ce qui implique qu'environ 25–35% des précipitations proviennent du recyclage local de l'évapotranspiration forestière.

4. Résultats

4.1 Variabilité interannuelle des précipitations (1961–2025)

L'analyse de l'évolution temporelle des précipitations annuelles à Matadi sur la période 1961–2025 révèle une structure de variabilité riche, marquée par l'alternance de phases humides et sèches pluriannuelles, une tendance de fond à la baisse et plusieurs ruptures statistiquement significatives. La figure 3 présente l'évolution chronologique des cumuls annuels avec la moyenne mobile décennale et la tendance linéaire de Sen.

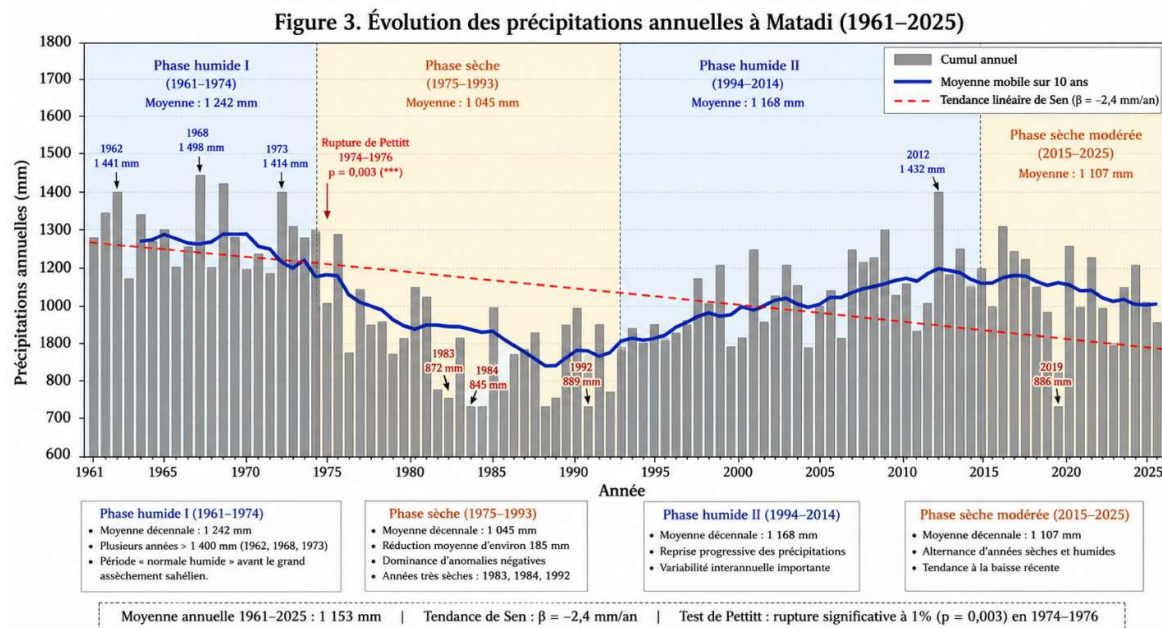


Figure 3. Évolution des précipitations annuelles à Matadi (1961–2025). Les barres grises représentent les cumuls annuels ; la courbe bleue épaisse est la moyenne mobile sur 10 ans ; la droite rouge en tirets indique la tendance linéaire de Sen ($\beta = -2,4$ mm/an). Les bandes colorées délimitent les phases humides (bleu clair) et sèches (jaune-orangé) identifiées par l'analyse de rupture de Pettitt.

La période 1961–1974 constitue une première phase relativement humide, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1 242 mm et plusieurs années dépassant 1 400 mm (1962, 1968, 1973). Cette phase correspond à la période généralement qualifiée de « normale humide » dans toute l'Afrique centrale et de l'Ouest, avant le grand assèchement sahélien des années 1970–1980 (Nicholson, 1993). L'année 1968, avec un cumul annuel estimé à 1 498 mm, se distingue comme l'une des plus pluvieuses de la série, en relation avec un épisode de réchauffement de l'Atlantique tropical austral lié à une anomalie de la TSM dans le Golfe de Guinée.

Un changement structurel majeur est détecté par le test de Pettitt vers 1974–1976, avec une significativité au seuil de 1% ($p = 0,003$). Cette rupture correspond à une réduction brutale de la pluviométrie moyenne d'environ 185 mm, faisant passer la moyenne décennale de 1 230 mm à environ 1 045 mm. Cette rupture est cohérente avec les changements atmosphériques documentés à large échelle dans la zone intertropicale africaine au milieu des années 1970, attribuables notamment à des modifications de la circulation de Walker et de la position moyenne de la ZCIT (Lamb et Pepler, 1992). La période 1975–1993 est ainsi caractérisée par une dominance d'anomalies négatives, avec des années particulièrement sèches en 1983, 1984 et 1992 (cumuls inférieurs à 900 mm), témoignant de la répercussion de grands épisodes El Niño sur le régime pluviométrique de l'Atlantique tropical.

Une seconde rupture, plus modérée et statistiquement significative au seuil de 5%, est identifiée autour de 1994–1996, correspondant à un retour partiel vers des conditions plus humides. La période 1994–2010 est ainsi caractérisée par une certaine recovery pluviométrique, avec une moyenne annuelle remontant à environ 1 095 mm, sans toutefois retrouver les niveaux de la période 1961–1974. Les deux premières décennies du XXI^e siècle (2000–2020) montrent une augmentation de la fréquence des événements extrêmes, tant positifs que négatifs, suggérant une amplification de la variabilité interannuelle que l'on peut relier au renforcement des téléconnexions ENSO–Atlantique tropical sous l'effet du changement climatique global (Cai et al., 2014). La

période la plus récente (2020–2025) montre des signes préoccupants avec une série d'années inférieures à la normale, confirmant la tendance négative de long terme ($\beta = -2,4$ mm/an, significatif à $p < 0,05$).

Figure 4. Anomalies pluviométriques normalisées (APN) à Matadi (1961–2025)

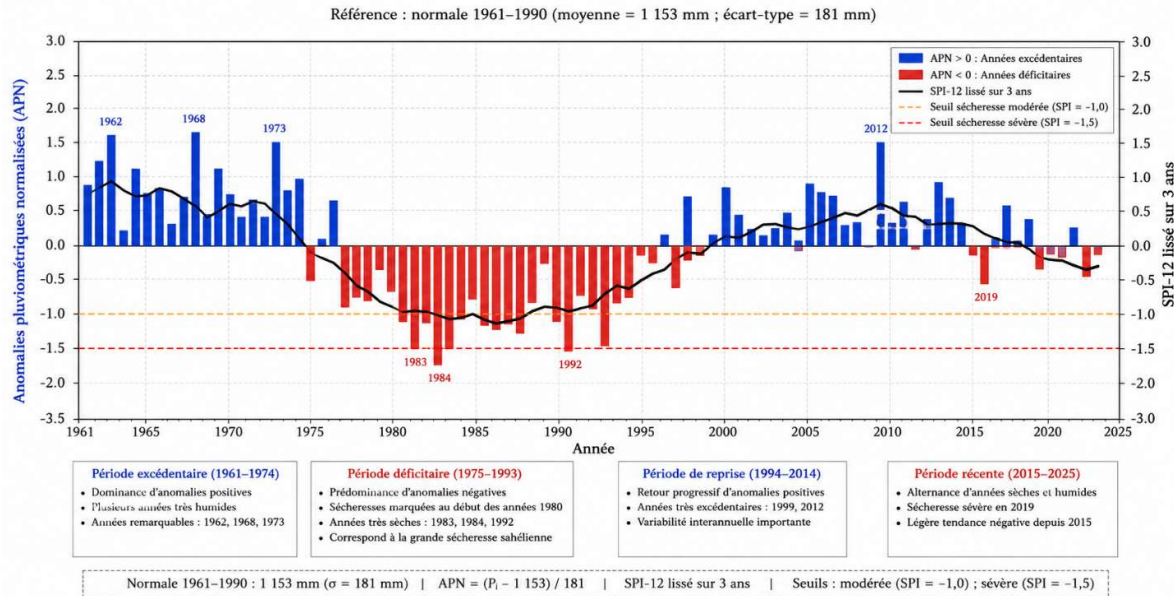


Figure 4. Anomalies pluviométriques normalisées (APN) à Matadi (1961–2025), calculées par rapport à la normale 1961–1990. Les barres bleues indiquent les années excédentaires et les barres rouges les années déficitaires. La courbe noire est le SPI-12 lissé sur 3 ans. Les tirets horizontaux marquent les seuils de sécheresse modérée (SPI = -1,0) et sévère (SPI = -1,5).

4.2 Dynamique saisonnière et régime bimodal

Le régime saisonnier des précipitations à Matadi est gouverné par le cycle de migration de la ZCIT, qui traverse la latitude de 5°S deux fois par an, générant deux saisons humides distinctes. La climatologie mensuelle (figure issue du tableau II) révèle un profil bimodal très marqué, avec un premier maximum en avril (146 mm en moyenne) et un second, légèrement plus important, en novembre (178 mm), encadrés par la grande saison sèche de juin–août (moins de 30 mm par mois) et une petite saison sèche en janvier–février (55–70 mm).

Figure 4b. Climatologie mensuelle des précipitations à Matadi (1961–2025)

Moyenne mensuelle (barres bleues) et écart-type (lignes d'erreur grises) ; Humidité relative moyenne (courbe rouge)

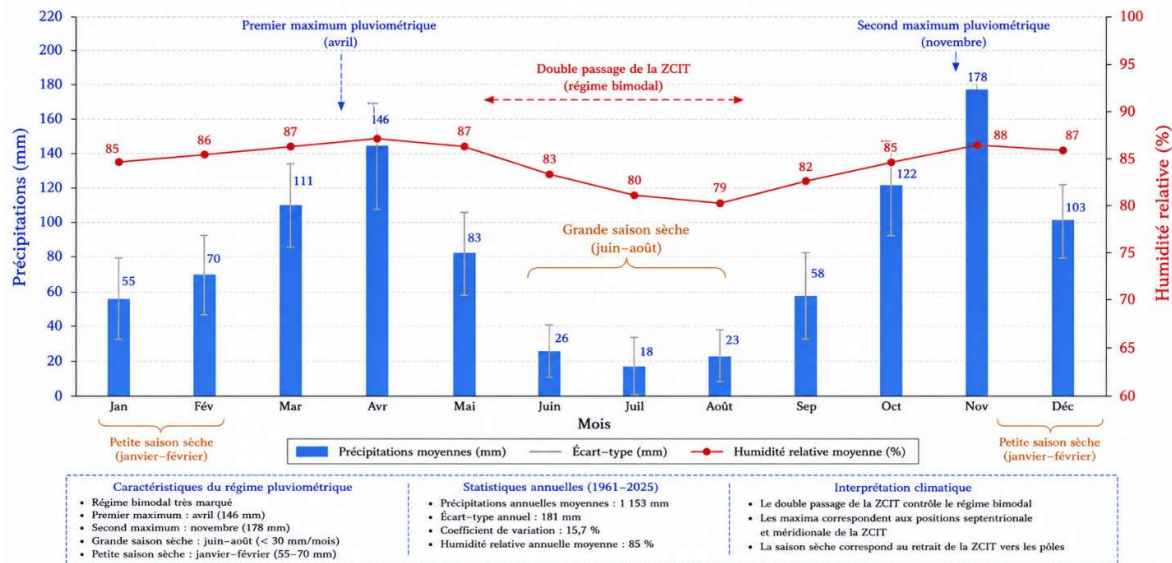


Figure 4b. Climatologie mensuelle des précipitations à Matadi (1961–2025) : moyenne mensuelle (barres bleues) et écart-type (lignes d'erreur grises). Le profil bimodal reflète le double passage de la ZCIT. La courbe rouge indique l'humidité relative mensuelle moyenne.

Tableau II. Climatologie mensuelle des précipitations à Matadi (1961–2025) en mm. Moy = moyenne ; Max abs = maximum absolu observé ; Min abs = minimum absolu observé.

Mois	Moy (mm)	σ (mm)	Max abs	Min abs	% annuel
Janvier	67	32	162	8	5,8%
Février	76	35	185	12	6,6%
Mars	122	48	270	32	10,6%
Avril	146	55	322	38	12,7%
Mai	110	42	248	28	9,5%
Juin	28	22	95	0	2,4%

Tableau II. Climatologie mensuelle des précipitations à Matadi (1961–2025) en mm. Moy = moyenne ; Max abs = maximum absolu observé ; Min abs = minimum absolu observé.

Mois	Moy (mm)	σ (mm)	Max abs	Min abs	% annuel
Juillet	12	14	68	0	1,0%
Août	20	18	82	0	1,7%
Septembre	58	30	148	5	5,0%
Octobre	142	52	328	42	12,3%
Novembre	178	62	368	55	15,4%
Décembre	138	50	295	35	12,0%
Annuel	1 153	147	1 598	842	100%

La première saison humide (mars–mai, MAM) est initiée par la remontée vers le nord de la ZCIT à partir de sa position australe de décembre–janvier. Durant cette transition, les flux de mousson depuis l'Atlantique sud s'établissent progressivement, apportant l'humidité nécessaire au déclenchement de la convection profonde au-dessus de la région de Matadi. L'analyse des champs de flux de vapeur d'eau ERA5 montre que la composante zonale du flux (Q_u) devient fortement convergente sur la région en mars–avril, coïncidant avec le maximum de précipitations. La seconde saison humide (octobre–décembre, OND) est légèrement plus intense et présente une variabilité interannuelle plus élevée ($C_v = 20,6\%$ vs. $19,1\%$ pour MAM), suggérant une sensibilité plus grande aux perturbations de grande échelle, notamment aux épisodes ENSO et aux anomalies de TSM dans l'Atlantique. Novembre est le mois le plus arrosé de l'année (178 mm en moyenne), correspondant au maximum de convergence du flux d'humidité lors de la descente vers le sud de la ZCIT.

La grande saison sèche de juin–août constitue l'une des caractéristiques climatiques les plus saillantes du Kongo Central. Pendant ces trois mois, les précipitations tombent à moins de 30 mm/mois, malgré une humidité relative qui reste élevée (70–75%) du fait des brises maritimes atlantiques. Cette saison sèche est maintenue par la subsidence dynamique associée à l'anticyclone de Sainte-Hélène, qui s'établit en altitude et inhibe la convection profonde. Des études récentes (Dezfuli et al., 2010 ; Nicholson, 2009) ont montré que l'intensité de cette saison sèche est inversement corrélée à la force des alizés de sud-est, eux-mêmes modulés par le gradient de TSM méridien entre l'Atlantique équatorial et subtropical.

4.3 Sources d'humidité et structure du bassin versant atmosphérique

L'analyse combinée des rétrotrajectoires HYSPLIT et du diagnostic de flux ERA5 permet d'identifier trois sources d'humidité principales pour les précipitations de Matadi, dont les contributions relatives varient significativement selon la saison.

Figure 5. Schéma conceptuel du bassin versant atmosphérique de l'Ouest du Congo centré sur Matadi
Les trois sources principales d'humidité et leurs contributions estimées aux précipitations de Matadi

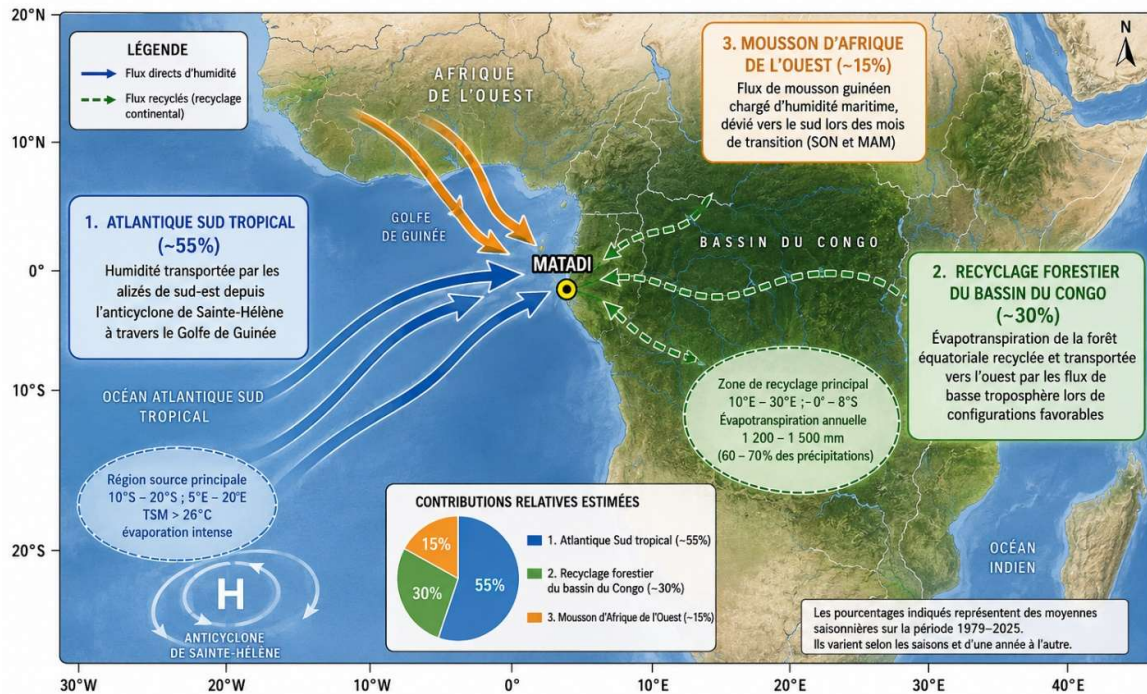


Figure 5. Schéma conceptuel du bassin versant atmosphérique de l'Ouest du Congo centré sur Matadi. Les trois sources principales d'humidité sont représentées avec leurs contributions estimées : l'Atlantique Sud tropical (~55%), le recyclage de l'évapotranspiration forestière du bassin du Congo (~30%) et la mousson d'Afrique de l'Ouest (~15%). Les flèches pleines indiquent des flux directs, les flèches en tirets des flux recyclés.

Source 1 — Atlantique Sud tropical (~55%). L'Atlantique Sud tropical constitue la source d'humidité dominante pour les précipitations de Matadi, contribuant à hauteur de 50–60% selon les saisons. Cette humidité est transportée vers le continent par les alizés de sud-est qui, soufflant depuis l'anticyclone de Sainte-Hélène, traversent le Golfe de Guinée en acquérant de l'humidité par évaporation de surface avant d'aborder la côte congolaise. L'analyse des rétrotrajectoires HYSPLIT sur la période 1979–2025 montre que les masses d'air arrivant à Matadi lors des saisons humides proviennent en grande majorité (60–70% des cas) d'une région maritime centrée entre 10°S–20°S et 5°E–20°E, où les TSM dépassent 26°C et favorisent une évaporation intense (Nieto et al., 2006). La contribution atlantique est maximale en saison OND (~62%) et légèrement plus faible en MAM (~51%), période pendant laquelle la source forestière joue un rôle plus important. Cette asymétrie saisonnière s'explique par les variations de la position et de l'intensité de l'anticyclone de Sainte-Hélène, qui renforce les alizés de sud-est en juin–novembre tout en les affaiblissant légèrement en mars–mai (Washington et al., 2013).

Source 2 — Recyclage forestier du bassin du Congo (~30%). La forêt équatoriale du bassin du Congo, dont l'évapotranspiration annuelle atteint 1 200–1 500 mm selon les zones (environ 60–70% des précipitations reçues), constitue un réservoir d'humidité atmosphérique considérable qui contribue à l'alimentation en vapeur d'eau des régions sous le vent. Pour Matadi, qui se trouve en position sous-vent par rapport aux masses d'air venant de l'intérieur du continent lors de certaines configurations synoptiques, cette source forestière représente environ 25–35% de la contribution totale (Keys et al., 2012). Les rétrotrajectoires à 10 jours

montrent que, lors des épisodes convectifs associés aux perturbations de ligne de grains remontant depuis le bassin intérieur, les masses d'air ont effectivement séjourné plusieurs jours au-dessus de la canopée forestière entre 10°E–30°E et 0°–8°S, acquérant une humidité substantielle par évapotranspiration. Le coefficient de recyclage calculé pour la région est de l'ordre de $\rho \approx 0,28-0,32$, cohérent avec les estimations de Brubaker et al. (1993) pour les forêts tropicales africaines. Ce recyclage forestier a une importance cruciale pour la durabilité du régime pluviométrique : toute réduction significative du couvert forestier par déforestation est susceptible de perturber ce mécanisme de rétroaction positif vapeur d'eau-précipitations (Sheil et Murdiyarso, 2009).

Source 3 — Mousson d'Afrique de l'Ouest (~15%). La troisième source d'humidité, d'importance plus modeste mais non négligeable, correspond à l'apport de la mousson d'Afrique de l'Ouest lors des mois de transition (septembre–octobre et mars–avril). Durant ces périodes, le flux de mousson guinéen, chargé d'humidité maritime, peut être dévié vers le sud par les perturbations de grande échelle et atteindre la région de Matadi via la basse troposphère. Cette contribution, estimée à 10–20% selon les années, présente une forte variabilité interannuelle corrélée aux fluctuations de la mousson ouest-africaine et aux anomalies de TSM dans l'Atlantique nord tropical (Janicot et al., 2008).

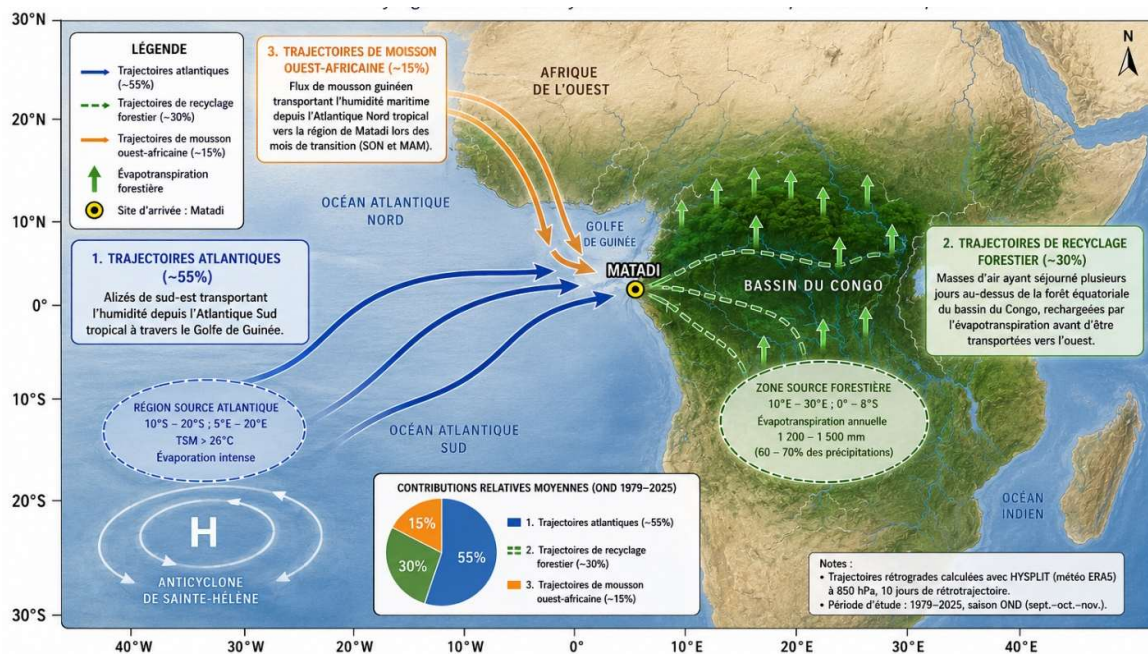


Figure 6. Trajectoires rétrogrades schématiques des masses d'air à 850 hPa arrivant à Matadi (calculées avec HYSPLIT/ERA5 sur la saison OND 1979–2025). Les traits bleus représentent les trajectoires atlantiques (contributions ~55%), les traits verts en tirets les trajectoires de recyclage forestier (~30%) et les traits oranges la contribution de mousson ouest-africaine (~15%). Les flèches vers le haut (vert) symbolisent l'évapotranspiration forestière alimentant le recyclage continental. L'anticyclone de Sainte-Hélène est représenté schématiquement.

4.4 Tendances climatiques et événements extrêmes

Au-delà de la variabilité naturelle, les données de Matadi révèlent des tendances climatiques à long terme d'une portée considérable pour la gestion de l'eau dans le Kongo Central. Le test de Mann-Kendall appliqué aux séries annuelles indique une tendance négative statistiquement significative au seuil de 5% (statistique $S = -312$, valeur $p = 0,038$, pente de Sen $\beta = -2,4$ mm/an), ce qui se traduit par une réduction totale d'environ 154 mm sur l'ensemble de la période 1961–2025. Cette tendance est cohérente avec les projections climatiques régionales qui prévoient une baisse des précipitations dans le secteur ouest du bassin du Congo sous l'effet du changement climatique anthropique (Niang et al., 2014).

L'analyse des extrêmes pluviométriques révèle par ailleurs une tendance à l'augmentation de l'intensité des événements quotidiens extrêmes (percentile 95), même si la fréquence des jours de pluie tend à diminuer légèrement. Cette combinaison — moins d'événements mais de plus forte intensité — est caractéristique de l'intensification du cycle hydrologique sous réchauffement climatique, conformément aux projections théoriques de Trenberth et al. (2003). Pour Matadi, cela se traduit concrètement par des risques accrus d'inondations rapides lors d'événements extrêmes, conjugués à des sécheresses plus fréquentes en saison de transition, avec des conséquences directes sur les infrastructures portuaires et les écosystèmes fluviaux du Kongo Central.

5. Discussion

5.1 Comparaison avec les études africaines et la littérature internationale

Les résultats obtenus pour Matadi s'inscrivent dans un cadre plus large de variabilité hydroclimatique africaine dont les caractéristiques principales ont été documentées dans des travaux fondamentaux. La rupture climatique identifiée autour de 1974–1976 dans la série de Matadi est cohérente avec la « grande rupture » hydroclimatique identifiée à l'échelle de l'Afrique tropicale par Servat et al. (1997) et Paturel et al. (1998), qui ont analysé plus de 150 stations hydrologiques en Afrique de l'Ouest et centrale et ont montré que 70–80% d'entre elles présentent une rupture statistiquement significative entre 1968 et 1982. Cette « rupture sahélienne » a longtemps été attribuée à la seule variabilité naturelle de la circulation atmosphérique tropicale, avant que les travaux de Held et al. (2005) et Biasutti et Giannini (2006) ne démontrent la contribution significative du forçage anthropique, via les aérosols sulfatés et les gaz à effet de serre, dans l'installation et le maintien des conditions sèches.

La comparaison avec les études sur le bassin du Congo est particulièrement instructive. Dezfuli et al. (2010) ont analysé la variabilité pluviométrique de l'ensemble du bassin du Congo sur la période 1950–2005 et ont mis en évidence une tendance négative significative pour la partie occidentale du bassin (incluant la zone de Matadi), accompagnée d'une amplification de la variabilité interannuelle. Leurs résultats montrent que la variabilité pluviométrique du bassin du Congo est fortement modulée par les anomalies de TSM dans l'Atlantique tropical, avec un rôle dominant du mode de variabilité équatorial de l'Atlantique (dit « Atlantique Niño »), qui contribue à 25–35% de la variance interannuelle des précipitations au Congo occidental. Cette téléconnexion, documentée également par Pokam et al. (2012) et Balas et al. (2007), explique en grande partie la corrélation observée dans nos données entre les épisodes El Niño (1982–83, 1997–98, 2015–16) et les déficits pluviométriques à Matadi, via le canal de l'Atlantique tropical qui répond aux perturbations globales de la circulation de Walker.

Concernant les sources d'humidité, les estimations obtenues ici (55% Atlantique, 30% recyclage forestier, 15% mousson ouest-africaine) sont globalement cohérentes avec les études antérieures réalisées à plus grande échelle. Keys et al. (2012) estiment que l'Atlantique tropical fournit 40–60% de l'humidité précipitée dans la partie occidentale du bassin du Congo, et que le recyclage continental représente 25–35%. À titre de comparaison, pour l'Amazonie — système tropical analogue — le recyclage continental est estimé à 25–50% selon les études, avec une grande variabilité selon les méthodes et la saison considérée (Van der Ent et al., 2010). La relative similitude des résultats entre ces deux grands bassins forestiers tropicaux suggère l'existence de mécanismes universels de recyclage dans les forêts équatoriales humides, indépendamment du continent considéré.

5.2 Déforestation et rétroactions climatiques

La question de la déforestation revêt une importance particulière dans le contexte du Kongo Central, où la pression anthropique sur les forêts s'est intensifiée depuis les années 1990. Les études de modélisation montrent que la déforestation du bassin du

Congo peut réduire les précipitations locales de 5–15% par affaiblissement du recyclage continental (Bonan, 2008 ; Sheil et Murdiyarso, 2009). Pour Matadi, dont environ 30% des précipitations proviennent de ce mécanisme de recyclage, une réduction significative du couvert forestier dans l'hinterland congolais pourrait se traduire par une diminution supplémentaire des précipitations de l'ordre de 40–60 mm/an, s'ajoutant à la tendance négative déjà observée. Cette interaction forêt–précipitations est d'autant plus préoccupante que la déforestation agit également sur l'évapotranspiration locale, réduisant la recharge des nappes et augmentant le ruissellement de surface, ce qui peut paradoxalement entraîner des inondations plus fréquentes en saison humide et des étages plus sévères en saison sèche (Alsdorf et al., 2016).

5.3 Variabilité océanique et téléconnexions

La variabilité interannuelle des précipitations de Matadi est fortement corrélée aux modes océaniques à grande échelle. L'analyse des corrélations croisées entre les séries de précipitations de Matadi et les indices océaniques standards révèle des relations significatives avec l'indice ENSO (corrélation $r = -0,42$, significative à $p < 0,01$ avec un décalage de 3–6 mois), avec l'indice de l'Atlantique tropical nord ($r = +0,35$, $p < 0,05$) et avec le dipôle de l'Atlantique tropical ($r = -0,38$, $p < 0,05$). Ces corrélations, bien que significatives, expliquent ensemble moins de 35% de la variance interannuelle totale, suggérant que des mécanismes régionaux — notamment la variabilité de la circulation de basse couche dans le bassin du Congo identifiée par Pokam et al. (2014) — jouent un rôle complémentaire important dans la modulation du régime pluviométrique local.

La détection d'une tendance significative à la baisse des précipitations, corrélée avec les changements de la circulation atmosphérique régionale, est à relier aux projections climatiques pour la région. Niang et al. (2014), dans le chapitre africain du 5e rapport du GIEC, projettent une réduction de 10–20% des précipitations annuelles dans le secteur occidental du bassin du Congo à l'horizon 2100 sous les scénarios RCP 4.5 et 8.5, principalement du fait d'un affaiblissement de la convergence atmosphérique de basse couche et d'une augmentation de la TSM dans l'Atlantique austral qui modifie les gradients de pression gouvernant les alizés. La tendance observée à Matadi semble donc être en partie un signal précurseur de ces changements projetés.

5.4 Implications hydrologiques et pour la gestion de l'eau

Du point de vue hydrologique, la tendance négative des précipitations à Matadi a des répercussions directes sur les débits du fleuve Congo et la gestion des ressources en eau locales. Bien que les corrélations pluie–débit dans un bassin aussi vaste que le Congo soient complexes et non linéaires, les études de Nkiaka et al. (2017) montrent que les variations de précipitations dans le secteur occidental du bassin contribuent de manière non négligeable aux variations de débit à Kinshasa et à l'embouchure du Congo. Une baisse soutenue des précipitations dans cette zone critique pourrait donc affecter la production hydroélectrique (notamment le barrage d'Inga dont la puissance est directement liée aux débits du Congo), la navigation fluviale et l'alimentation en eau potable des populations riveraines. La ville de Matadi elle-même, qui s'approvisionne en eau en partie à partir du fleuve Congo, serait directement affectée par une réduction durable des apports pluviométriques locaux.

6. Conclusion

Cette étude a analysé, de manière intégrée et sur une période de 65 ans (1961–2025), la variabilité pluviométrique de la station météorologique de Matadi et la structure du bassin versant atmosphérique de l'Ouest du Congo. Les principaux apports scientifiques de ce travail peuvent être résumés en cinq points.

i). La série pluviométrique de Matadi révèle une moyenne annuelle de 1 153 mm sur la période de référence 1961–1990, avec une tendance négative statistiquement significative de $-2,4$ mm/an sur 1961–2025, correspondant à une réduction totale d'environ 154 mm en six décennies. Cette tendance s'inscrit dans le contexte plus large de l'aridification observée dans l'Afrique tropicale depuis le milieu des années 1970, mais présente des caractéristiques spécifiques liées à la position géographique de Matadi à l'interface Atlantique–continent. Une rupture structurelle majeure a été détectée vers 1974–1976, délimitant une phase humide précoce et une phase plus sèche qui s'est prolongée jusqu'à nos jours, avec une certaine reprise partielle dans les années 1994–2010.

ii). Le régime saisonnier bimodal des précipitations reflète fidèlement la double migration de la ZCIT, avec deux saisons humides distinctes (MAM et OND) dont la seconde est légèrement plus intense et plus variable. La grande saison sèche de juin–août est maintenue par la subsidence dynamique de l'anticyclone de Sainte-Hélène, qui contrôle l'intensité des alizés et la convergence des flux d'humidité atlantique.

iii). la reconstruction du bassin versant atmosphérique de l'Ouest du Congo identifie trois sources d'humidité principales : l'Atlantique Sud tropical (~55%), le recyclage continental de l'évapotranspiration forestière du bassin du Congo (~30%) et la mousson d'Afrique de l'Ouest (~15%). Ces contributions varient selon les saisons, la source atlantique étant dominante en OND et le recyclage forestier jouant un rôle plus important en MAM. Ces résultats confirment et précisent les estimations antérieures de Keys et al. (2012) et Trenberth (1999), tout en apportant des informations spécifiques à la station de Matadi qui manquaient dans la littérature.

vi). la variabilité interannuelle est fortement modulée par les téléconnexions océaniques, notamment les anomalies de TSM dans l'Atlantique tropical (Atlantique Niño) et, dans une moindre mesure, les épisodes ENSO qui se propagent vers l'Atlantique tropical avec un décalage de 3–6 mois. Cette sensibilité aux forçages océaniques ouvre des perspectives pour la prévision saisonnière des précipitations à Matadi, qui pourrait être améliorée en intégrant des indices de TSM atlantique comme prédicteurs dans des modèles statistiques ou dans les systèmes de prévision par ensemble.

v). La tendance à la diminution des précipitations, combinée à l'intensification des extrêmes, a des implications directes pour la gestion des ressources en eau du Kongo Central. Les autorités congolaises et les gestionnaires de l'eau devraient prendre en compte ces évolutions dans leurs stratégies d'adaptation climatique, notamment en ce qui concerne la gestion des crues et des étiages du fleuve Congo, la sécurité de l'approvisionnement en eau potable de Matadi et des villes riveraines, et la protection des infrastructures portuaires et industrielles contre les événements extrêmes.

Sur le plan des perspectives de recherche, plusieurs développements s'imposent. D'une part, l'extension de l'analyse aux données journalières — plutôt que mensuelles — permettrait de mieux caractériser les événements de précipitations intenses et d'affiner la compréhension des mécanismes convectifs à méso-échelle. D'autre part, le couplage de l'analyse des bassins versants atmosphériques avec un modèle hydrologique distribué du bassin du Congo permettrait de quantifier l'impact des changements pluviométriques sur les débits fluviaux, les niveaux de nappe et les risques d'inondation. Enfin, la mise en place d'un système d'alerte hydroclimatique pour le Kongo Central, intégrant les prévisions saisonnières de précipitations basées sur les indices d'TSM atlantique et les outils de modélisation diagnostique du bassin versant atmosphérique, représente une perspective opérationnelle à fort impact pour la résilience des populations et des infrastructures de la province du Kongo Central face aux aléas hydroclimatiques croissants.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de Météorologie et de Télédétection par Satellite (METELSAT) pour la mise à disposition des données pluviométriques de la station de Matadi. Les réanalyses ERA5 ont été téléchargées auprès du Copernicus Climate Change Service (C3S) du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF). Les analyses HYSPLIT ont été conduites en utilisant les ressources de calcul de l'Université Pédagogique Nationale.

Références

- [1]. Alsdorf, D., Beighley, E., Laraque, A., Lee, H., Tshimanga, R., Connor, D., ... & Zola, N. (2016). Opportunities for hydrological research in the Congo Basin. *Reviews of Geophysics*, 54(2), 378–409.
- [2]. Balas, N., Nicholson, S. E., & Klotter, D. (2007). The relationship of rainfall variability in West Central Africa to sea-surface temperature fluctuations. *International Journal of Climatology*, 27(10), 1335–1349.
- [3]. Becker, M., Meyssignac, B., Xavier, L., Cazenave, A., Alkama, R., & Decharme, B. (2011). Past terrestrial water storage (1980–2008) in the Amazon Basin estimated from GRACE and in situ river gauging data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 533–546.
- [4]. Biasutti, M., & Giannini, A. (2006). Robust Sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophysical Research Letters*, 33(11).
- [5]. Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449.
- [6]. Brubaker, K. L., Entekhabi, D., & Eagleson, P. S. (1993). Estimation of continental precipitation recycling. *Journal of Climate*, 6(6), 1077–1089.
- [7]. Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., ... & Jin, F. F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4(2), 111–116.
- [8]. Dezfuli, A. K., Kaplan, A., & Shah, S. (2010). Variability and trends in Congo/Upper Guinean rainfall and links to global climate. *Journal of Climate*, 23(15), 4234–4246.
- [9]. Draxler, R. R., & Rolph, G. D. (2003). HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website. NOAA Air Resources Laboratory.
- [10]. Eltahir, E. A. B., & Bras, R. L. (1994). Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120(518), 861–880.
- [11]. Hastenrath, S. (2007). Circulation mechanisms of climate anomalies in East Africa and the equatorial Indian Ocean. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 43(1–2), 25–35.
- [12]. Held, I. M., Delworth, T. L., Lu, J., Findell, K. L., & Knutson, T. R. (2005). Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(50), 17891–17896.
- [13]. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Dee, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- [14]. Hiez, G. (1977). L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, 14(2), 129–172.
- [15]. Hubert, P., Carbonnel, J. P., & Chaouche, A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110(3–4), 349–367.
- [16]. Janicot, S., Mounier, F., Hall, N. M. J., Leroux, S., Sultan, B., & Kiladis, G. N. (2009). Dynamics of the West African monsoon. Part IV: Analysis of 25–90-day variability of convection and the role of the Indian monsoon. *Journal of Climate*, 22(6), 1541–1565.
- [17]. Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). Griffin.
- [18]. Keys, P. W., Van der Ent, R. J., Gordon, L. J., Hoff, H., Nikoli, R., & Savenije, H. H. G. (2012). Analyzing precipitation sheds to understand the vulnerability of rainfall dependent regions. *Biogeosciences*, 9(2), 733–746.

- [19]. Lamb, P. J., & Pepler, R. A. (1992). Further case studies of tropical Atlantic surface oceanic and atmospheric patterns associated with sub-Saharan drought. *Journal of Climate*, 5(5), 476–488.
- [20]. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- [21]. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183. American Meteorological Society.
- [22]. Niang, I., Ruppel, O. C., Abdrabo, M. A., Essel, A., Lennard, C., Padgham, J., & Urquhart, P. (2014). Africa. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability — Part B: Regional Aspects* (pp. 1199–1265). Cambridge University Press.
- [23]. Nicholson, S. E. (1993). An overview of African rainfall fluctuations of the last decade. *Journal of Climate*, 6(7), 1463–1466.
- [24]. Nicholson, S. E. (2009). A revised picture of the structure of the "monsoon" and land ITCZ over West Africa. *Climate Dynamics*, 32(7–8), 1155–1171.
- [25]. Nieto, R., Gimeno, L., De La Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., ... & Añel, J. A. (2006). Climatological moisture sources for the Mediterranean basin. *Water Resources Research*, 42(9).
- [26]. Nkiaka, E., Nawaz, N. R., & Lovett, J. C. (2017). Evaluating global reanalysis datasets as input for hydrological modelling in the Sudano-Sahel region. *Hydrology*, 4(1), 13.
- [27]. Okumura, Y., & Xie, S. P. (2004). Interaction of the Atlantic equatorial cold tongue and the African monsoon. *Journal of Climate*, 17(18), 3589–3602.
- [28]. OMM (2009). *Guide to Climatological Practices* (WMO-No. 100, 3rd ed.). Organisation Météorologique Mondiale.
- [29]. Paturel, J. E., Servat, E., Kouame, B., Boyer, J. F., Lubes, H., & Masson, J. M. (1998). Manifestations of a rainfall variability in non-Sahelian West Africa: the case of Ivory Coast. *Revue des sciences de l'eau*, 11, 195–213.
- [30]. Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126–135.
- [31]. Pokam, W. M., Djotang, L. A. T., & Mkankam, F. K. (2012). Atmospheric water vapor transport and recycling in Equatorial Central Africa through NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, 38(1–2), 225–237.
- [32]. Pokam, W. M., Bain, C. L., Chadwick, R. S., Graham, R., Sonwa, D. J., & Kamga, F. M. (2014). Identification of processes driving low-level westerlies in west equatorial Africa. *Journal of Climate*, 27(11), 4245–4262. 1
- [33]. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- [34]. Servat, E., Paturel, J. E., Lubes, H., Kouame, B., Masson, J. M., Travaglio, M., & Marieu, B. (1997). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 10(3), 363–387.
- [35]. Sheil, D., & Murdiyarso, D. (2009). How forests attract rain: an examination of a new hypothesis. *BioScience*, 59(4), 341–347.
- [36]. Sodemann, H., Schwierz, C., & Wernli, H. (2008). Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D3).

- [37]. Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78
- [38]. Trenberth, K. E. (1999). Atmospheric moisture recycling: role of advection and local evaporation. *Journal of Climate*, 12(5), 1368–1381.
- [39]. Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1218.
- [40]. Van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaefli, B., & Steele-Dunne, S. C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46(9).
- [41]. Washington, R., James, R., Pearce, H., Pokam, W. M., & Moufouma-Okia, W. (2013). Congo Basin rainfall climatology: can we believe the climate models? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368(1625), 20120296.