

Analyse fréquentielle des précipitations journalières maximales dans le département d'Oussouye, en Basse Casamance, Sénégal

El hadji Mamadou MANSALY*, Cheikh FAYE et Demba GAYE

Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ), Département de Géographie, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE), BP 523, Ziguinchor, Sénégal

(Reçu le 20 Mai 2026 ; Accepté le 16 Juillet 2026)

* Correspondance, courriel : e.mansaly20160255@zig.univ.sn

Résumé

Cette étude a pour objectif d'analyser la fréquence des précipitations extrêmes dans le département d'Oussouye (Basse Casamance, Sénégal), en identifiant la loi statistique la mieux adaptée à chaque station et en estimant les périodes de retour des précipitations maximales journalières (Rx1day). L'analyse porte sur les séries de Rx1day enregistrées entre 1980 et 2021 dans trois stations pluviométriques (Oussouye, Kabrousse, Loudia Ouolof), à l'aide du logiciel HyfranPlus. Trois lois statistiques ont été testées (Gumbel, GEV, Pearson type 3), le meilleur modèle étant sélectionné sur la base des critères d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC), puis validé par le test du khi-deux. Les résultats montrent que les précipitations maximales journalières moyennes oscillent entre 110 et 120 mm selon les stations, avec des valeurs records de 251 mm à Loudia Ouolof (1997) et 247 mm à Kabrousse (2018). La loi de Gumbel offre le meilleur ajustement à Oussouye et Loudia Ouolof, tandis que la loi GEV est plus adaptée à Kabrousse. Les périodes de retour estimées indiquent que des pluies de 150 à 180 mm reviennent tous les 2 à 10 ans, et que les événements extrêmes (> 200 mm) ont une récurrence de 50 à 100 ans. Ces résultats constituent une base de données utile pour la gestion des risques climatiques, le dimensionnement des infrastructures hydrauliques et hydroagricoles, et la mise en place de systèmes d'alerte précoce dans le département d'Oussouye.

Mots-clés : *précipitations maximales journalières, analyse fréquentielle, loi de Gumbel, GEV, Pearson III, période de retour, Sénégal.*

Abstract

Frequency analysis of maximum daily rainfall in the department of Oussouye, in Lower Casamance, Senegal

The aim of this study is to analyse the frequency of extreme rainfall in the department of Oussouye (Lower Casamance, Senegal), by identifying the most appropriate statistical distribution for each station and estimating the return periods of maximum daily rainfall (Rx1day). The analysis focuses on the Rx1day time series recorded between 1980 and 2021 at three rainfall stations (Oussouye, Kabrousse, Loudia Ouolof), using the HyfranPlus software. Three statistical distributions were tested (Gumbel, GEV, Pearson type 3), with the best model selected on the basis of the Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) criteria, and subsequently validated

using the chi-squared test. The results show that the average maximum daily rainfall ranges between 110 and 120 mm depending on the station, with record values of 251 mm at Loudia Ouolof (1997) and 247 mm at Kabrousse (2018). The Gumbel distribution provides the best fit for Oussouye and Loudia Ouolof, whilst the GEV distribution is more suitable for Kabrousse. The estimated return periods indicate that rainfall of 150 to 180 mm occurs every 2 to 10 years, and that extreme events (> 200 mm) have a return period of 50 to 100 years. These results provide a useful database for climate risk management, the design of water and hydro-agricultural infrastructure, and the implementation of early warning systems in the department of Oussouye.

Keywords : *maximum daily rainfall, frequency analysis, Gumbel law, GEV, Pearson III, return period, Senegal.*

1. Introduction

La connaissance des précipitations maximales journalières est essentielle dans le domaine de l'hydro climatologie en générale et notamment les aménagements hydroagricoles. L'estimation des précipitations associées aux événements extrêmes est un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêt dans le domaine des sciences de l'eau. L'Afrique de l'Ouest connaît depuis les années 1970 des phénomènes de changement climatique et se place comme l'une des régions du monde les plus vulnérables à la variabilité climatique [1, 2]. En revanche, elle a enregistré ces dernières décennies une recrudescence des événements pluviométriques extrêmes. En effet, les changements climatiques ont entraîné une augmentation de la fréquence de ces événements, avec les inondations qui constituent durant ces dernières années un risque majeur pour la plupart des villes de l'Afrique de l'Ouest [1 - 4]. Les événements pluviométriques extrêmes représentent l'une des principales sources de risques naturels en Afrique subsaharienne, où ils sont à l'origine de catastrophes récurrentes telles que les inondations, les glissements de terrain et la destruction des infrastructures agricoles et urbaines. En zone intertropicale, la variabilité interannuelle et saisonnière des précipitations accentue la vulnérabilité des populations rurales et côtières, rendant indispensable une meilleure caractérisation statistique de ces phénomènes [5, 6]. Le département d'Oussouye, situé dans la région de Ziguinchor au sud du Sénégal, est l'une des zones les plus arrosées du pays. Soumis à un climat de type sud-soudanien, il enregistre des précipitations annuelles parmi les plus élevées du territoire national [7, 8]. Malgré cette forte pluviométrie, peu d'études se sont focalisées sur la caractérisation statistique des événements de précipitations extrêmes dans cette région. Or, l'estimation des hauteurs de pluies rares et leur fréquence d'occurrence constitue un préalable indispensable à la conception d'ouvrages hydrauliques et hydroagricoles, à la planification urbaine et à la mise en place de systèmes d'alerte précoce. L'analyse fréquentielle constitue l'approche statistique de référence pour quantifier les risques liés aux précipitations extrêmes [9] et est couramment utilisée en hydro-météorologie pour estimer les précipitations en des sites peu ou pas instrumentés. Elle consiste à ajuster une distribution de probabilité aux séries de valeurs extrêmes observées, puis à en déduire, sur la base de l'information régionale, les quantiles de période de retour T des précipitations maximales journalières. Ces quantiles interviennent fréquemment dans la conception et le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques tels que les structures de retenue d'eau, les ouvrages antiérosifs et les réseaux d'assainissement [1, 10]. Parmi les lois de probabilité proposées dans la littérature pour modéliser les précipitations maximales journalières en Afrique de l'Ouest, les distributions de Gumbel, GEV (Generalized Extreme Values) et de Pearson de type 3 se distinguent par leur robustesse et leur usage fréquent [11 - 13]. Toutefois, plusieurs auteurs ayant travaillé sur des séries de précipitations journalières maximales annuelles de différentes durées sont parvenus à des conclusions divergentes quant à la loi la mieux adaptée [1, 9, 12, 14, 15]. L'objectif de cette étude est d'analyser la fréquence des événements de précipitations extrêmes dans le département d'Oussouye sur la période 1980-2021, en identifiant la loi statistique la mieux adaptée à chaque station, et en estimant les périodes de retour des hauteurs de pluies maximales journalières.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

Le département d'Oussouye, situé au sud-ouest du Sénégal, avec une superficie de 891 km² est l'une des plus petites circonscriptions administratives du Sénégal. Le département d'Oussouye est limité à l'est par le département de Ziguinchor, au sud par la Guinée-Bissau, au nord par le fleuve Casamance et à l'ouest par l'Océan Atlantique (**Figure 1**). Il compte deux arrondissements et une population de 54 567 habitants en 2023 [16]. Les communes rurales de Djémbering, Oukout, Mlomp et Santhiaba Manjacque et la commune urbaine d'Oussouye sont les différentes collectivités territoriales du département. Avec 517 km², Loudia Ouolof reste l'arrondissement le plus peuplé du département. La densité se chiffre à 50 habitants au km² sur le territoire départemental, qui concentre plus de 70 villages. Le département d'Oussouye est l'une des régions les plus riches du Sénégal en termes de potentialités agricoles, forestières et hydrologiques. Il dispose de nombreuses potentialités naturelles : pluviosité relativement abondante, richesse faunique et floristique, relief plat, réserves en eaux de surface, etc. Mais les ressources naturelles de la zone sont de plus en plus menacées du fait des actions anthropiques. L'agriculture vivrière, en particulier la riziculture, est l'activité la plus pratiquée par les ménages du département. Celle-ci est tributaire de la pluviométrie et s'effectue encore de façon traditionnelle. Destinées principalement à l'autoconsommation, les productions agricoles reposent sur la riziculture et d'autres céréales comme le mil, le sorgho et le maïs, ainsi que sur la culture de l'arachide. Elles sont complétées par diverses activités telles que l'élevage extensif, l'agroforesterie, la pêche artisanale et commerciale, l'artisanat, le maraîchage et l'aviculture [17, 18].

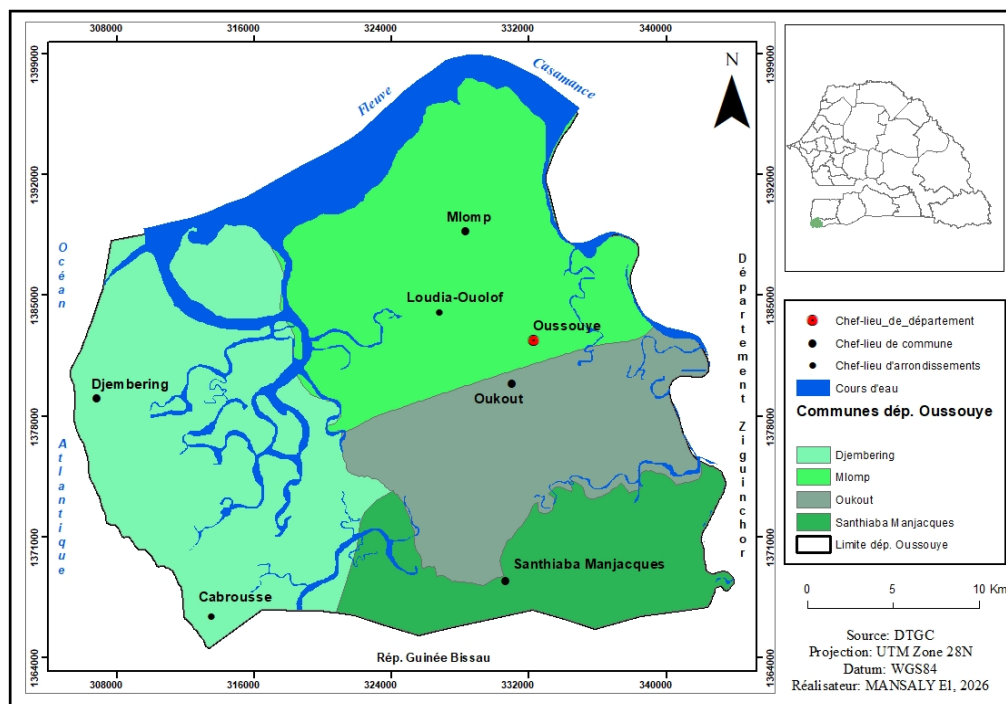


Figure 1 : Carte de localisation du département d'Oussouye

2-2. Données d'étude

L'étude porte sur trois stations pluviométriques du département d'Oussouye (région de Ziguinchor, Sénégal) : Oussouye, Kabrousse et Loudia Ouolof. Les données utilisées correspondent aux séries de précipitations maximales journalières (Rx1day) collectées sur la période 1980-2021, soit 42 ans d'observations.

Ces données, issues de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) du Sénégal, ont fait l'objet d'un contrôle préalable de qualité avant utilisation. Les stations pluviométriques retenues dans cette étude sont présentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Caractéristiques des stations pluviométriques retenues dans le département d'Oussouye

Localités	Date de création	Latitudes (Nord)	Longitudes (Ouest)	Altitudes (m)	Type de stations
Oussouye	1931	12°29	16°32	15 m	Pluviométrique
Kabrousse	1963	12°21	16°43	5 m	Pluviométrique
Loudia Ouolof	1975	12°31	16°32	14 m	Pluviométrique

2-3. Méthodologie de l'analyse fréquentielle

La démarche méthodologique adoptée s'appuie sur la procédure d'analyse fréquentielle proposée par [19], qui s'organise en cinq étapes successives : (1) la constitution d'une série de valeurs, (2) le contrôle statistique de la série, (3) le choix et l'ajustement d'un modèle fréquentiel, (4) l'estimation des paramètres de distribution et (5) la validation du modèle et l'estimation des quantiles. L'ensemble de ces étapes a été implémenté à l'aide du logiciel HyfranPlus, développé par l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE) de l'Université du Québec. L'analyse fréquentielle est l'ensemble des méthodes utilisées pour l'interprétation de séries d'événements pluviométriques ou hydrologiques passés en termes de probabilités de future apparition. Son objectif est d'estimer les quantiles de pluies journalières maximales annuelles utilisés comme normes hydrologiques. Elle repose sur une étape préalable de vérification de la qualité des séries, qui doivent satisfaire les conditions de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité, évaluées respectivement par les tests de Kendall, de Wald-Wolfowitz et de Wilcoxon [1, 15, 20].

2-3-1. Constitution et contrôle de la série de valeurs

L'échantillonnage repose sur la méthode des maxima annuels (block maxima), qui consiste à extraire la valeur de précipitation journalière la plus élevée de chaque année civile. Cette approche permet de constituer des séries indépendantes et statistiquement cohérentes avec les lois de valeurs extrêmes. Plusieurs auteurs utilisent la même variable de pluies journalières maximales annuelles pour modéliser les pluies extrêmes [1, 9, 10, 12, 13, 15, 20 - 23]. Avant tout ajustement, les séries constituées ont été soumises à trois tests statistiques non paramétriques permettant de vérifier les hypothèses de base de l'analyse fréquentielle : (i) le test de Wald-Wolfowitz, utilisé pour vérifier l'indépendance des observations (H_0 : les observations sont indépendantes ; H_1 : elles sont dépendantes) ; (ii) le test de Wilcoxon, permettant de vérifier l'homogénéité de la série, en comparant les moyennes de deux sous-échantillons (H_0 : les moyennes sont égales ; H_1 : elles sont différentes) ; (iii) le test de Mann-Kendall, sensible à la détection de tendances monotones dans les séries chronologiques (H_0 : absence de tendance ; H_1 : présence d'une tendance).

2-3-2. Lois statistiques retenues

Trois lois de probabilité, couramment utilisées pour la modélisation des précipitations extrêmes en Afrique de l'Ouest, ont été sélectionnées et comparées dans cette étude.

2-3-2-1. Loi de Gumbel

La loi de Gumbel (ou loi double exponentielle) est l'une des distributions les plus utilisées pour l'analyse des valeurs extrêmes hydrologiques. Sa fonction de répartition s'exprime sous la forme

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 - c \frac{x-a}{b}\right)^{1/c}\right) \quad (1)$$

où, a est le paramètre de position et b le paramètre d'échelle. La fréquence empirique est calculée à partir de la **Formule** de Hazen :

$$F(x_{(r)}) = \frac{r-0,5}{n} \quad (2)$$

où, r est le rang de la valeur classée par ordre croissant et n la taille de l'échantillon. La période de retour T est définie comme l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement :

$$T = \frac{1}{1-F(x)} \quad (3)$$

2-3-2-2. Loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV)

La loi GEV est une généralisation à trois paramètres de la loi de Gumbel. Elle englobe les distributions de Gumbel, Fréchet et Weibull selon la valeur du paramètre de forme k . Sa fonction de répartition est donnée par

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \text{ pour } k \neq 0 \quad (4)$$

où, a , b et k sont respectivement les paramètres de position, d'échelle et de forme.

2-3-2-3. Loi de Pearson de type 3

La loi de Pearson de type 3, également appelée loi gamma incomplète, est caractérisée par trois paramètres : position ($x_0 = 0$), échelle ($b = 1/a$) et forme (λ). Sa fonction de répartition s'écrit :

$$F(Q) = a\lambda/T(\lambda) \int e^{-aQ} \cdot Q^{\lambda-1} \cdot dQ \quad (5)$$

Le paramètre λ est estimé à partir des moments empiriques de l'échantillon, notamment via la relation :

$$g(\lambda) = \log Q_m - \sum \log Q_i / N \quad (6)$$

2-3-3. Estimation des paramètres et sélection du modèle optimal

Les paramètres des distributions ont été estimés par la méthode des moments, qui présente l'avantage d'être simple et robuste pour des séries de taille modérée. La sélection du modèle optimal a été effectuée à partir de deux critères pénalisés : (i) le Critère d'Information d'Akaike (AIC), qui pénalise la complexité du modèle en fonction du nombre de paramètres ; (ii) le Critère d'Information Bayésien (BIC), plus contraignant sur la parcimonie du modèle. La loi présentant les valeurs les plus faibles d'AIC et de BIC est retenue comme la plus adaptée aux données. La validation finale de l'ajustement a été réalisée par le test du khi-deux (χ^2) au seuil de significativité de 5 %.

2-3-4. Estimation des quantiles et des périodes de retour

Une fois le modèle fréquentiel retenu et validé, les quantiles associés aux périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans ont été estimés pour chaque station. Conformément aux pratiques en vigueur dans la littérature [12, 24 - 26], les 95ème et 99ème percentiles sont utilisés pour caractériser respectivement les événements de précipitations intenses et extrêmes. Des intervalles de confiance à 95 % ont également été calculés afin de quantifier l'incertitude associée aux estimations.

3. Résultats

3-1. Statistiques descriptives des précipitations maximales journalières

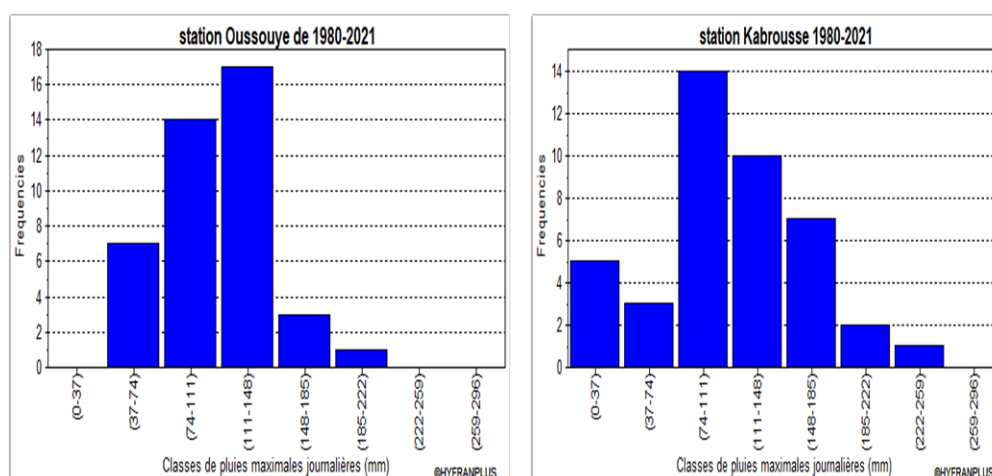
Le **Tableau 2** indique les principales statistiques descriptives des séries de précipitations maximales journalières (Rx1day) pour les trois stations du département d'Oussouye sur la période 1980-2021. L'analyse du **Tableau 2** révèle que les précipitations maximales journalières moyennes varient entre 110 mm (Kabrousse) et 120 mm (Loudia Ouolof). Des événements exceptionnels ont été enregistrés à Loudia Ouolof en 1997 (251 mm) et à Kabrousse en 2018 (247 mm), témoignant du potentiel pluviométrique extrême de cette région. La station d'Oussouye présente le coefficient de variation le plus faible ($CV = 0,292$), indiquant une plus grande régularité interannuelle des maximas, contrairement à Kabrousse dont le Cv de 0,513 reflète une variabilité plus marquée. En moyenne, le CV de 0,40 pour l'ensemble du département traduit une variabilité modérée des précipitations maximales journalières.

Tableau 2 : Statistiques descriptives des précipitations maximales journalières (1980-2021)

Stations	Min. (mm)	Max. (mm)	Moy. (mm)	Écart-type	Médiane (mm)	CV
Oussouye	65,1	210	112	32,8	113	0,292
Kabrousse	0	247	110	56,6	104	0,513
Loudia Ouolof	57	251	120	48,3	111	0,402

3-2. Fréquence d'occurrence des précipitations maximales journalières annuelles

L'analyse des histogrammes de fréquence (**Figure 2**) révèle une distribution variable selon les stations. À la station d'Oussouye, l'intervalle 111-148 mm constitue la classe modale, avec une fréquence d'apparition de 40,5 % (17 occurrences sur la série). Les événements les plus intenses (classe 185-222 mm) n'ont été observés qu'une seule fois, soit 2,4 % des cas. Quatorze (14) événements se situent dans la classe 74-111 mm. Aux stations de Kabrousse et Loudia Ouolof, la classe modale est la classe 74-111 mm, avec respectivement 14 occurrences (33 %) et 16 occurrences (38 %). La classe la plus élevée, 222-259 mm, n'apparaît qu'une seule fois à Kabrousse (2,4 %) et trois fois à Loudia Ouolof (7,1 %), confirmant le caractère rare des événements extrêmes dans le département.



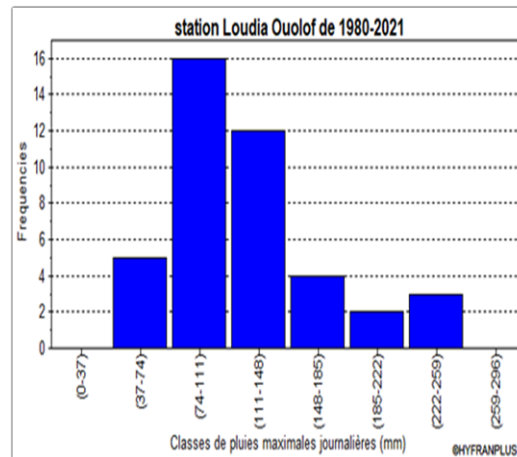


Figure 2 : *Fréquence d'occurrence des précipitations maximales journalières dans le département d'Oussouye de 1980 à 2021*

3-3. Évaluation comparative des lois ajustées aux précipitations maximales journalières annuelles

L'ajustement des précipitations maximales journalières annuelles aux lois de Gumbel, GEV et Pearson de type 3, effectué par la méthode des moments, est présenté pour les trois stations du département d'Oussouye dans les **Figures 3, 4 et 5**, en fonction de la probabilité de non-dépassement. L'examen visuel de ces figures révèle, pour la plupart des stations, une bonne concordance entre les valeurs observées et les distributions théoriques. La **Figure 3** confronte les probabilités empiriques aux probabilités théoriques issues de la loi de Gumbel. Aux stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof, les observations se distribuent en étroite conformité avec le modèle théorique et demeurent entièrement comprises dans l'intervalle de confiance à 95 %, attestant d'un ajustement satisfaisant. En revanche, à la station de Kabrousse, plusieurs points observés s'écartent des bornes de cet intervalle, ce qui indique que la loi de Gumbel ne constitue pas un modèle approprié pour cette station. S'agissant de la loi GEV (**Figure 4**), les résultats confirment le schéma précédent. Aux stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof, les valeurs observées s'alignent étroitement sur la droite théorique et restent comprises dans l'intervalle de confiance à 95 %, traduisant un ajustement de qualité. À la station de Kabrousse, les observations s'en écartent significativement, remettant en cause l'adéquation de ce modèle pour cette localité. L'analyse de la loi de Pearson type 3 (**Figure 5**) conduit aux mêmes conclusions que pour les deux lois précédentes : un ajustement convenable aux stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof, et un écart systématique à la station de Kabrousse. En synthèse, l'ensemble des résultats issus des **Figures 3, 4 et 5** met en évidence une dichotomie nette entre les stations. Aux stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof, les trois lois présentent un ajustement satisfaisant : les observations s'inscrivent dans l'intervalle de confiance à 95 %, et les nuages de points épousent étroitement les droites théoriques. En revanche, à la station de Kabrousse, les observations s'écartent de l'intervalle de confiance pour les trois lois, signalant une distribution des Rx1day plus complexe et difficile à modéliser, probablement liée à la présence des lacunes dans le réseau d'observation (valeurs nulles minimum = 0 mm, dues aux interruptions de mesures).

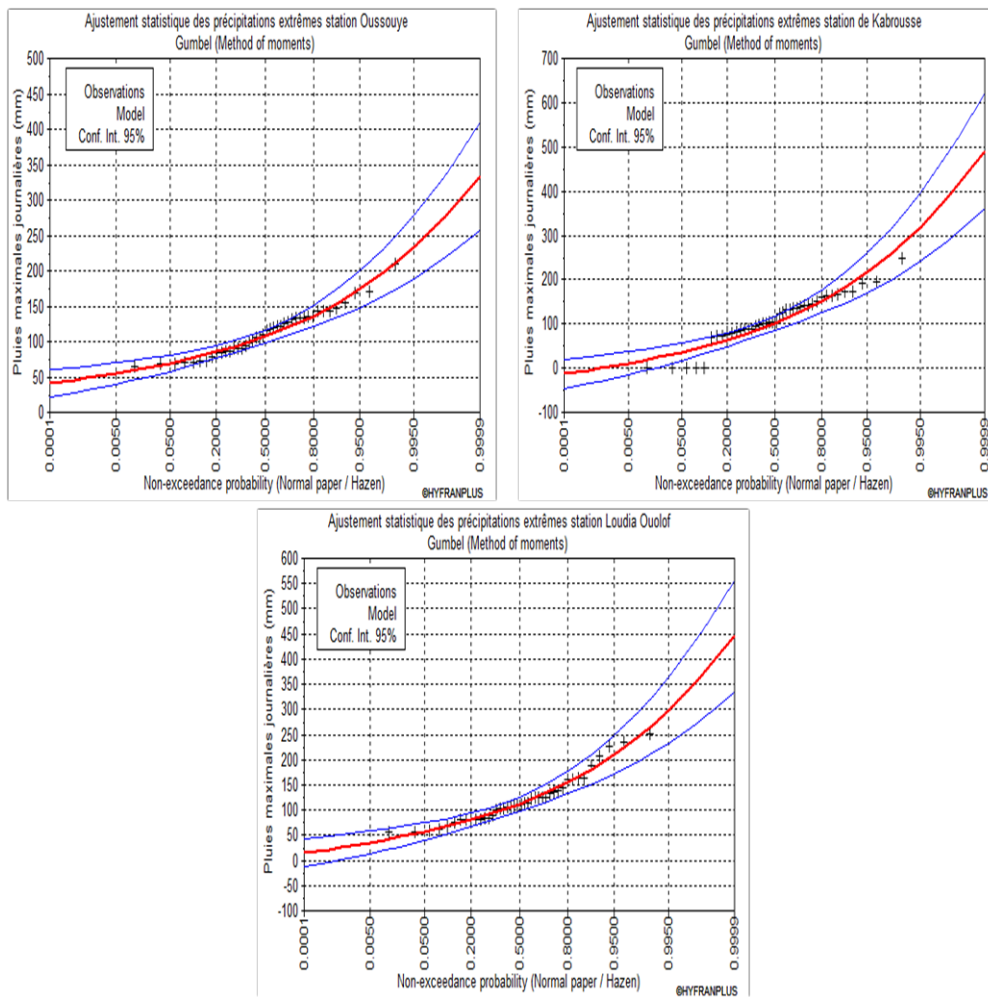
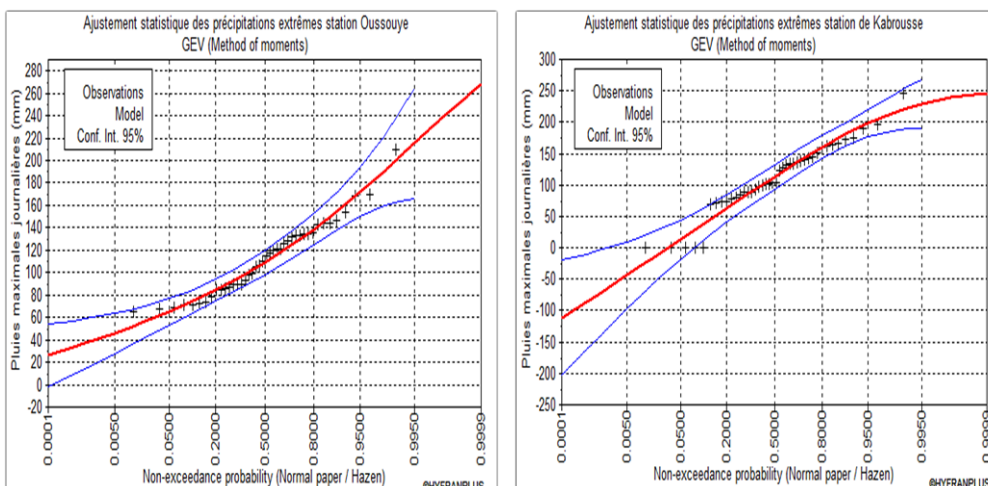


Figure 3 : Ajustement de la loi de Gumbel aux précipitations maximales journalières dans le département d'Oussouye



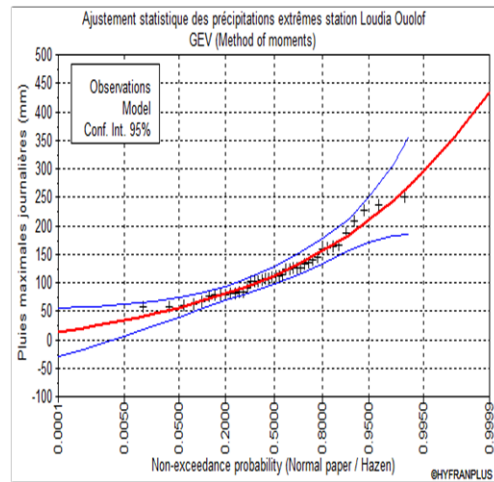


Figure 4 : Ajustement de la loi GEV aux précipitations maximales journalières dans le département d'Oussouye

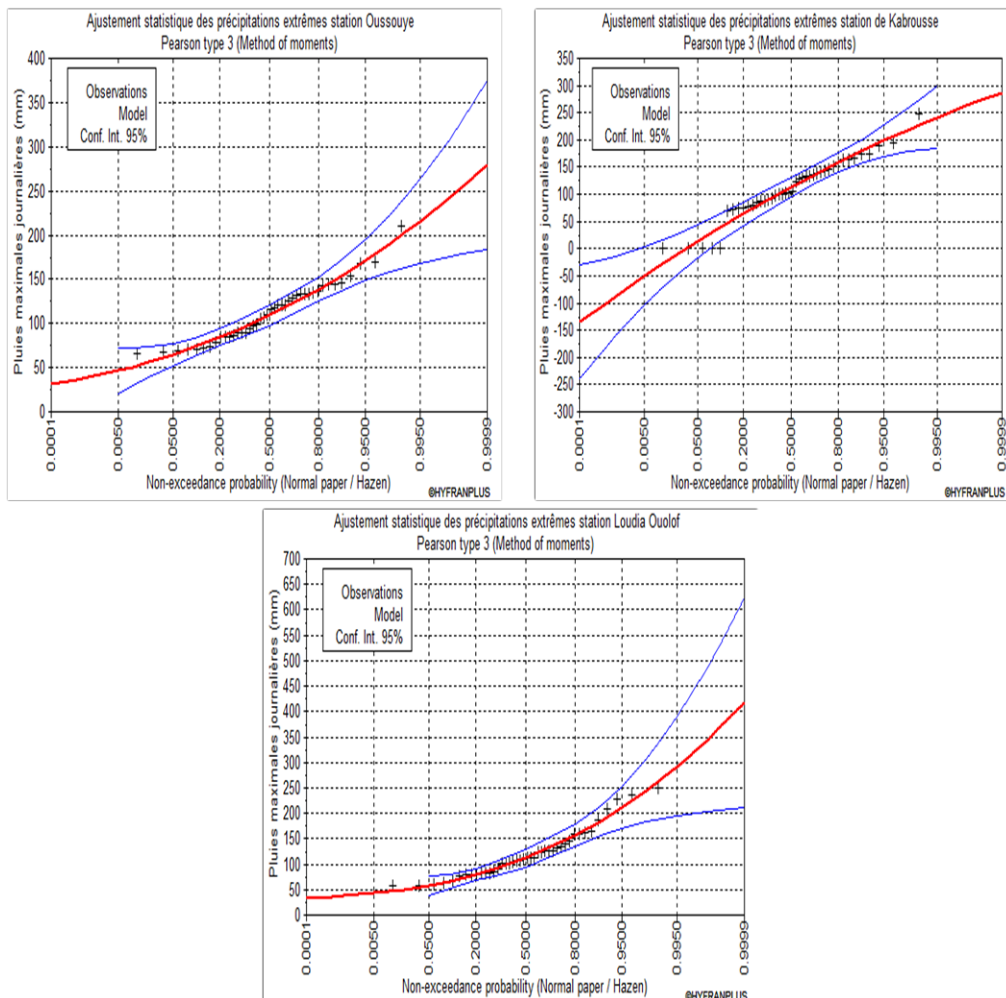


Figure 5 : Ajustement de la loi de Pearson type 3 aux précipitations maximales journalières dans le département d'Oussouye

3-4. Hiérarchisation des modèles d'ajustement selon les critères AIC et BIC

Le **Tableau 3** présente les résultats des critères AIC et BIC calculés pour les trois lois statistiques à chaque station. Les résultats montrent que la loi de Gumbel présente les valeurs les plus faibles d'AIC et de BIC aux stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof, ce qui en fait le modèle le plus parcimonieux et le mieux ajusté pour ces deux stations. À la station de Kabrousse, c'est la loi GEV qui obtient les valeurs les plus basses (AIC = 466,807 ; BIC = 472,020), indiquant une distribution asymétrique des Rx1day à cette station, mieux captée par un modèle à trois paramètres.

Tableau 3 : Critères d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) pour les trois lois statistiques

Loi	BIC - Oussouye	AIC - Oussouye	BIC - Kabrousse	AIC - Kabrousse	BIC - Loudia Ouolof	AIC - Loudia Ouolof
Gumbel	415,845*	412,370*	484,346	480,870	441,808*	438,333*
GEV	419,453	414,240	472,020*	466,807*	445,769	440,556
Pearson 3	419,267	414,054	—	—	444,584	439,371

* : valeurs minimales indiquant la loi la mieux ajustée. Source : Traitement avec HyfranPlus, 2024.

3-5. Adéquation des lois ajustées évaluée par le test du khi-deux

Le **Tableau 4** présente les résultats du test du khi-deux (χ^2) appliqué aux trois lois statistiques. Toutes les lois d'ajustement ont été acceptées au seuil de significativité $\alpha = 5 \%$ pour l'ensemble des stations, les p-valeurs étant systématiquement supérieures à 0,05. Ces résultats confirment que les distributions empiriques des Rx1day ne s'écartent pas significativement des modèles théoriques proposés. La loi de Gumbel est donc retenue comme la loi de référence pour les stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof, et la loi GEV pour la station de Kabrousse.

Tableau 4 : Résultats du test de khi-deux (χ^2) pour les trois stations

Loi	χ^2 Oussouye	p	χ^2 Kabrousse	p	χ^2 Loudia Ouolof	p
Gumbel	9,43	0,093	8,67	0,123	7,52	0,185
GEV	7,14	0,129	8,29	0,082	7,52	0,111
Pearson 3	4,86	0,302	7,90	0,095	7,52	0,111

Source : Traitement statistique avec HyfranPlus, 2024.

3-6. Quantiles des précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour

Le **Tableau 5** présente les quantiles estimés et leurs intervalles de confiance à 95 % pour des périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans. Les quantiles estimés augmentent régulièrement avec la période de retour, conformément aux prédictions des modèles de valeurs extrêmes. Pour une période de retour de 2 ans, les Rx1day estimées sont de 107 mm à Oussouye, 113 mm à Kabrousse et 112 mm à Loudia Ouolof, des valeurs proches des médianes empiriques observées. Pour une période de retour décennale (10 ans), les Rx1day atteignent 155 mm à Oussouye et 183 mm aux stations de Kabrousse et de Loudia Ouolof. Les précipitations extrêmes estimées pour des périodes de retour de 50 et 100 ans révèlent des valeurs

atteignant 198 mm (Oussouye), 214 mm (Kabrousse) et 246 mm (Loudia Ouolof) pour 50 ans, et 215, 222 et 272 mm respectivement pour 100 ans. La station de Loudia Ouolof se distingue par les estimations les plus élevées, suggérant une plus grande exposition aux événements extrêmes dans cette localité. En termes de classification, les précipitations fortes (150 à 180 mm) se manifestent avec une fréquence d'occurrence de 2 à 10 ans ; les précipitations intenses (correspondant au 95ème percentile, soit environ 174 à 210 mm selon la station) ont une période de retour de l'ordre de 20 ans ; et les précipitations extrêmes (99ème percentile, > 200 mm) ont une période de retour de 50 ans et au-delà dans le département d'Oussouye. Tableau 5 : Estimation des quantiles (mm) et intervalles de confiance à 95 % des Rx1day dans le département d'Oussouye.

Tableau 5 : Estimation des quantiles (mm) et intervalles de confiance à 95 % des Rx1day dans le département d'Oussouye

Station	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Oussouye	107 [97,9–116]	136 [121–151]	155 [134–176]	174 [147–200]	198 [164–231]	215 [176–254]
Kabrousse	113 [93,5–132]	161 [142–179]	183 [164–202]	199 [177–221]	214 [186–242]	222 [189–256]
Loudia Ouolof	112 [98,9–126]	155 [132–178]	183 [153–214]	210 [172–249]	246 [196–295]	272 [214–329]

Source : Traitement avec HyfranPlus, 2024.

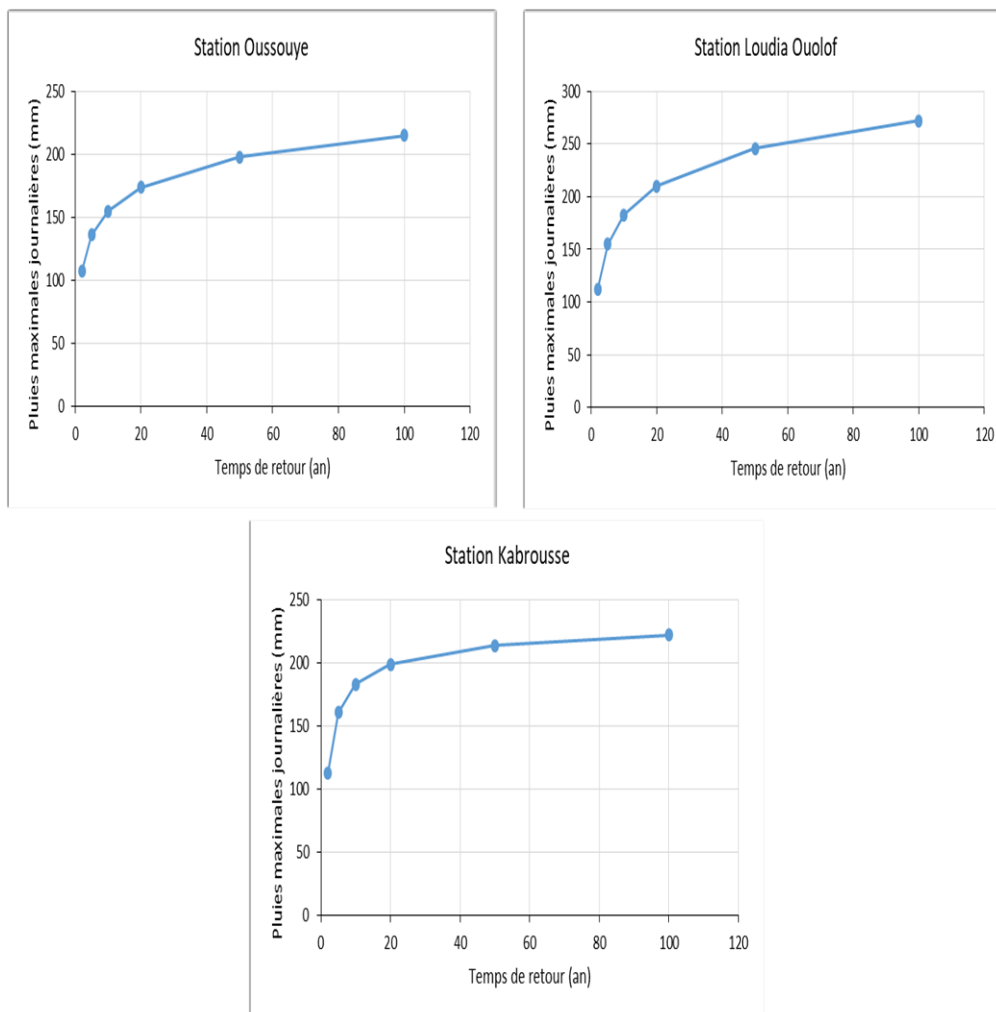


Figure 6 : Courbes de la période de retour des précipitations maximales journalières dans le département d'Oussouye

4. Discussion

4-1. Caractéristiques statistiques des précipitations maximales journalières

Les résultats de cette étude montrent une homogénéité spatiale modérée des précipitations maximales journalières dans le département d'Oussouye, avec un coefficient de variation moyen de 0,40. Ce degré de variabilité, qualifié de modéré, est cohérent avec les résultats obtenus par [7] dans la même zone d'étude, qui confirment que les précipitations maximales journalières peuvent dépasser 200 mm dans le département. Les valeurs records enregistrées à Loudia Ouolof (251 mm en 1997) et à Kabrousse (247 mm en 2018) témoignent du potentiel convectif intense caractéristique de cette région, particulièrement exposée aux systèmes convectifs de méso-échelle (SCM) actifs en fin de mousson. La forte variabilité de la station de Kabrousse ($CV = 0,513$) mérite une attention particulière. Elle peut s'expliquer par la position géographique de cette station, potentiellement soumise à des effets locaux amplificateurs (topographie côtière, proximité de la frontière avec la Guinée-Bissau), susceptibles de favoriser des épisodes pluvieux exceptionnels localisés. Cette singularité statistique explique en partie les difficultés d'ajustement des lois à deux paramètres (Gumbel) à cette station, et la nécessité de recourir à un modèle à trois paramètres (GEV). Ces résultats s'inscrivent dans une tendance plus large documentée à l'échelle du bassin du fleuve Sénégal. L'étude de [27], portant sur la période 1982-2021, met en évidence une augmentation significative ($p < 5\%$) des occurrences de précipitations extrêmes depuis 2008, avec des valeurs du Rx5day atteignant 70 mm dans la partie méridionale du pays. Cette recrudescence des événements intenses dans la partie méridionale du Sénégal est cohérente avec les valeurs records enregistrées dans notre étude et renforce l'hypothèse d'une intensification des phénomènes convectifs à l'échelle régionale. Par ailleurs, les travaux récents de [28] en Afrique de l'Ouest confirment que la variabilité interannuelle des précipitations extrêmes dans les zones côtières est significativement plus élevée que dans l'intérieur des terres, du fait des interactions complexes entre circulation de mousson et effets côtiers, ce qui corrobore la forte variabilité observée à Kabrousse ($CV = 0,513$) par rapport à Oussouye ($CV = 0,292$).

4-2. Distribution des classes de précipitations et comparaison régionale

La distribution des fréquences par classe de précipitations montre que les événements de forte intensité (> 150 mm) sont rares dans le département, avec des fréquences d'occurrence inférieures à 10 % pour toutes les stations. Ces résultats sont en accord avec les travaux de [7, 8] qui soulignent la prédominance des précipitations intenses et la rareté relative des précipitations extrêmes dans le département d'Oussouye. La classe modale, localisée entre 74 et 148 mm selon les stations, représente la gamme de précipitations dominante, susceptible de provoquer des ruissellements significatifs sans pour autant atteindre des seuils catastrophiques. Ces observations rejoignent celles de [9] en Côte d'Ivoire, qui montrent que la sensibilité des modèles statistiques d'extrêmes à la taille de l'échantillon est particulièrement prononcée lorsque les séries sont dominées par une classe de valeurs modales bien définie. Cette concentration des valeurs dans les classes intermédiaires (74-148 mm) peut induire une sous-estimation des quantiles extrêmes lorsque des lois à deux paramètres sont utilisées, en particulier pour les périodes de retour élevées (50-100 ans). D'autre part, les travaux de [29], repris et consolidés dans le cadre de l'analyse des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) au Sénégal par [30], indiquent que la queue lourde des distributions de précipitations journalières en Afrique subsaharienne traduite par un paramètre de forme de la loi GEV positif tend à s'accroître dans les zones soumises à des systèmes convectifs de grande échelle, comme c'est le cas pour le département d'Oussouye en fin de saison des pluies. La structure des distributions de fréquences par classe des Rx1day révèle des similitudes dans leur morphologie générale, mais des différences importantes dans les gammes de valeurs entre nos résultats et les travaux de [31] dans le bassin versant de l'Oti au Togo. Dans les deux zones, la distribution est unimodale et positivement asymétrique, avec une classe modale dominante et une queue droite étendue représentant les événements rares. Cependant, la classe modale se situe entre 75 et 100 mm dans le bassin de l'Oti (22,8 % des occurrences) et entre 74 et 148 mm selon les stations.

d'Oussouye (33 à 40,5 % des occurrences), reflétant les intensités pluviométriques sensiblement plus élevées caractéristiques de la Basse-Casamance. Les événements de classe supérieure à 150 mm, quasi-absents dans le bassin versant de l'Oti (1,75 % pour la classe 150-175 mm), représentent une proportion plus significative dans le département d'Oussouye : la classe 185-222 mm atteint 7,1 % à Loudia Ouolof, et les événements supérieurs à 200 mm ont été enregistrés plusieurs fois sur la période d'étude. Cette différence fondamentale justifie des seuils pluviométriques de risque d'inondation beaucoup plus élevés pour le département d'Oussouye que pour le bassin de l'Oti. Alors que les travaux de [31] définissent le seuil critique d'inondation à 104,45 mm/j dans l'Oti, les données de notre étude indiquent que ce seuil correspond grossièrement au seuil de risque modéré dans le contexte d'Oussouye, où le risque significatif s'amorce plutôt autour de 150 mm/j.

4-3. Performance des lois statistiques et comparaison avec la littérature

La prédominance de la loi de Gumbel pour les stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof est cohérente avec les résultats de nombreuses études menées en Afrique de l'Ouest. Des travaux réalisés au Bénin [15, 32] et au Niger [33] concluent également à la supériorité de la loi de Gumbel pour la modélisation des Rx1day dans des contextes climatiques similaires. Cette loi, bien que limitée à deux paramètres, offre un rapport qualité-ajustement favorable pour des séries de taille modérée ($n = 42$), comme le confirment les critères AIC et BIC et le test du χ^2 . En revanche, la supériorité de la loi GEV à la station de Kabrousse suggère que la distribution des Rx1day dans cette localité présente une asymétrie positive plus prononcée, incompatible avec l'hypothèse de la loi de Gumbel (paramètre de forme $k = 0$). Ce résultat est comparable à ceux de [11, 13] dans des contextes ouest-africains similaires, qui identifient la loi GEV comme étant la plus adaptée pour les stations présentant une forte variabilité interannuelle. De plus, au Togo, la loi GEV est jugée la plus performante de l'ensemble du bassin versant de l'Oti [31]. La non-convergence de la loi de Pearson type 3 à Kabrousse pourrait également être attribuée à la présence de valeurs nulles dans la série (minimum = 0 mm), qui peuvent perturber l'estimation des paramètres par la méthode des moments. Il convient également de noter que la préférence des critères AIC et BIC pour les lois à deux paramètres sur des séries de taille modérée ($n = 42$) est un phénomène bien documenté dans la littérature. En Afrique de l'Ouest, les résultats de [28] ont montré que la loi GEV ajustée par la méthode GMLE (Generalized Maximum Likelihood Estimation) obtient les valeurs d'AIC et de BIC les plus faibles dans 90 % des stations lorsque les séries sont suffisamment longues (> 50 ans). En revanche, pour des séries plus courtes, le principe de parcimonie inhérent aux critères BIC tend à favoriser la loi de Gumbel, dont l'adéquation est généralement acceptable même si elle n'est pas optimale. Cette nuance méthodologique confirme la pertinence de notre approche multicritères (AIC + BIC + test χ^2) et suggère que l'utilisation de la loi GEV mériterait d'être réexaminée si des séries plus longues venaient à être disponibles pour les stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof. Par ailleurs, les travaux de [32] ont démontré que l'application systématique de la loi de Gumbel à des stations dont les données s'ajustent mieux à d'autres distributions peut conduire à une sous-estimation des quantiles extrêmes pouvant atteindre -45,9 %, avec des conséquences directes sur le dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations.

4-4. Quantiles et périodes de retour : implications pour la gestion des risques

L'augmentation régulière des quantiles avec la période de retour, observée dans les trois stations, est conforme aux attentes théoriques des distributions de valeurs extrêmes. Ce résultat est cohérent avec les conclusions de certains auteurs sur d'autres bassins versants en Afrique de l'Ouest [15, 34] qui soulignent la proportionnalité entre l'évolution des quantiles et les périodes de retour des Rx1day au Bénin et au Togo respectivement. Les quantiles estimés pour le département d'Oussouye sont systématiquement et significativement supérieurs à ceux des travaux de [31] dans le bassin versant de l'Oti. Pour une période de retour de 10 ans, les Rx1day atteignent 155 mm à Oussouye et 163 mm à Loudia Ouolof, contre 92,5-115 mm

(intervalle de confiance) pour le bassin versant de l'Oti. Pour une période de retour centennale, les valeurs d'Oussouye (215-272 mm selon la station) dépassent largement celles de l'Oti (113-172 mm). Cet écart, de l'ordre de 40 à 80 %, reflète la différence fondamentale de régime pluviométrique entre la zone sud-soudanienne du Sénégal et la zone soudanienne du nord du Togo. Il confirme que les normes hydrologiques de dimensionnement des infrastructures ne peuvent pas être directement extrapolées d'une région à l'autre en Afrique subsaharienne, et que des analyses fréquentielles locales sont indispensables, en accord avec les recommandations de [27, 28]. En revanche, dans les deux études, les événements de période de retour 20-50 ans correspondent à des précipitations qualifiées d'exceptionnelles, susceptibles de générer des inondations catastrophiques. Du point de vue de la gestion des risques hydrologiques, les estimations produites dans cette étude revêtent une importance pratique considérable. Les précipitations fortes (150 à 180 mm) qui reviennent tous les 2 à 10 ans constituent une menace récurrente pour les infrastructures routières, les cultures et les habitations du département [7]. Les événements intenses (95ème percentile, période de retour de 20 ans) requièrent une intégration systématique dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et hydroagricoles (réseaux d'assainissement, ouvrages de drainage, digues de protection). Enfin, les événements extrêmes (99ème percentile, période de retour de 50 à 100 ans) définissent les scénarios de risque maximaux à prendre en compte dans la planification de la résilience climatique et la conception d'infrastructures stratégiques [33]. Dans une perspective de gestion intégrée des risques climatiques, l'apport des périodes de retour estimées dans cette étude s'avère d'autant plus crucial que l'Afrique subsaharienne reste très insuffisamment couverte par des systèmes d'alerte précoce efficaces. Selon le rapport de [36], seuls 40 % du territoire africain bénéficient d'une couverture satisfaisante en matière d'alerte aux catastrophes hydrométéorologiques, et les événements de précipitations extrêmes ont augmenté de 34 % entre 2000 et 2023 sur l'ensemble du continent [35]. Dans ce contexte, les quantiles estimés pour des périodes de retour de 20 à 100 ans constituent des paramètres d'entrée indispensables pour la conception de systèmes d'alerte précoce basés sur des seuils pluviométriques déclencheurs. La définition de tels seuils opérationnels correspondant aux précipitations de période de retour de 20 ans (174-210 mm selon la station) ou 50 ans (198-246 mm), constitue une base quantitative référencée pour les autorités locales et les gestionnaires du territoire dans le département d'Oussouye. D'autre part, les travaux de [27] sur le bassin du fleuve Sénégal soulignent la nécessité d'intégrer la non-stationnarité potentielle des séries pluviométriques dans les analyses fréquentielles, eu égard aux ruptures de tendance détectées autour de 2006-2008. Dans notre étude, bien que les tests de stationnarité n'aient pas révélé de tendances significatives sur la période 1980-2021, cette dimension non stationnaire mérite d'être explorée dans de futures recherches intégrant des données post-2021.

4-5. Contribution à la littérature existante

Cette étude complète la littérature sur les extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest en documentant pour la première fois, de manière systématique, les précipitations maximales journalières dans le département d'Oussouye sur une période de plus de quarante ans (1980-2021), dans une zone pourtant parmi les plus arrosées du Sénégal mais encore peu étudiée sous l'angle de l'analyse fréquentielle. En mobilisant un protocole méthodologique rigoureux (tests de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité, ajustement de lois de valeurs extrêmes, sélection par AIC/BIC et validation par le khi-deux avec HyfranPlus), ce travail aligne le cas d'Oussouye sur les standards appliqués dans d'autres contextes ouest-africains (Bénin, Côte d'Ivoire, Niger) et permet des comparaisons régionales plus fines. Il met en évidence la prépondérance de la loi de Gumbel pour les stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof, ainsi que la meilleure performance de la loi GEV à Kabrousse, révélant une hétérogénéité intra-départementale du comportement des extrêmes pluviométriques rarement analysée à cette échelle locale. Les quantiles et périodes de retour estimés (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) fournissent enfin une base de données opérationnelle directement mobilisable pour le dimensionnement des infrastructures hydrauliques et hydroagricoles, la planification de l'aménagement du territoire et la mise en place de systèmes d'alerte précoce face aux inondations dans le département d'Oussouye.

4-6. Limites et perspectives

Malgré ces apports, plusieurs limites doivent être soulignées. La première concerne la couverture spatiale, restreinte à trois stations pluviométriques au sein d'un département présentant des contrastes locaux (influence côtière, proximité de la Guinée-Bissau, effets potentiels de l'occupation des sols) susceptibles de moduler la distribution des extrêmes. La seconde tient à la taille relativement modérée de la série (42 ans) et à la présence de lacunes et de valeurs nulles, en particulier à Kabrousse, qui complexifient l'ajustement des lois (non-convergence de Pearson III, recours à GEV) et augmentent l'incertitude associée aux quantiles estimés pour les très longues périodes de retour (50-100 ans). Enfin, l'analyse repose sur une hypothèse globale de stationnarité et se focalise sur la seule variable Rx1day, sans intégrer explicitement d'autres indices d'extrêmes (Rx5day, R95p, R99p, épisodes multi-jours) ni les effets attendus du changement climatique. Ces limites ouvrent plusieurs perspectives de recherche. Il serait d'abord pertinent d'étendre la base de données à d'autres stations régionales (Ziguinchor, Bignona et stations frontalières) et à des périodes plus récentes, afin d'améliorer la représentativité spatiale et temporelle des extrêmes et de consolider les estimations de quantiles rares. L'exploration d'indices complémentaires et d'échelles de temps variées (pluies multi-journalières, intensités infra-journalières lorsque les données le permettront) permettrait ensuite de mieux caractériser la diversité des régimes de précipitations extrêmes dans la zone. Parallèlement, l'intégration de modèles de valeurs extrêmes non stationnaires, conditionnés par des covariables climatiques ou environnementales, offrirait une meilleure prise en compte de l'influence du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des événements extrêmes. Enfin, le couplage des quantiles de pluie estimés à des modèles hydrologiques et à des analyses d'impacts (crues, inondations, dommages aux cultures et aux infrastructures) constitue une étape clé pour traduire les résultats de cette étude en outils d'aide à la décision pour l'adaptation et la résilience du département d'Oussouye.

5. Conclusion

Cette étude a permis de caractériser de façon systématique les événements de précipitations extrêmes dans le département d'Oussouye sur la période 1980-2021, à partir de l'analyse fréquentielle des précipitations maximales journalières enregistrées dans trois stations pluviométriques. Les principaux résultats peuvent être synthétisés comme suit. Les précipitations maximales journalières (Rx1day) moyennes oscillent entre 110 et 120 mm selon les stations, avec des valeurs extrêmes records de 251 mm à Loudia Ouolof (1997) et 247 mm à Kabrousse (2018). La loi de Gumbel, sélectionnée sur la base des critères AIC et BIC et validée par le test du χ^2 , offre le meilleur ajustement pour les stations d'Oussouye et de Loudia Ouolof. La loi GEV est, quant à elle, mieux adaptée à la station de Kabrousse, dont la série se distingue par une plus grande variabilité interannuelle. L'estimation des périodes de retour révèle que des précipitations maximales journalières comprises entre 150 et 180 mm se produisent tous les 2 à 10 ans dans le département, que les événements intenses (95ème percentile) ont une récurrence d'environ 20 ans, et que les précipitations extrêmes (99ème percentile, > 200 mm) se manifestent avec une période de retour de 50 à 100 ans selon la station considérée. Ces résultats constituent une base de données quantitative précieuse pour l'élaboration de politiques de prévention et de gestion des risques climatiques adaptées au département d'Oussouye. Ils pourront être utilisés pour le dimensionnement des infrastructures hydrauliques, la planification de l'aménagement du territoire et la mise en place de systèmes d'alerte précoce face aux inondations. Des études complémentaires intégrant des données plus récentes, notamment post-2021, et explorant les tendances futures dans le contexte du changement climatique, seraient nécessaires pour affiner ces estimations et anticiper l'évolution des risques hydrologiques dans le département d'Oussouye.

Références

- [1] - A. M. KOUASSI, R. A.-K. NASSA, K. E. KOUAKOU, K. F. KOUAME and J. BIEMI, Analyse des impacts des changements climatiques sur les normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest : Cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire), *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 32 (3) (2019) 207 - 220. <https://doi.org/10.7202/1067305ar>
- [2] - G. PANTHOU, Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leurs évolutions au cours des 60 dernières années, Thèse, Université de Grenoble, (2013). <https://theses.hal.science/tel-01062462>
- [3] - L. DESCROIX, A. D. NIANG, H. DACOSTA, G. PANTHOU, G. QUANTIN and A. DIEDHIOU, Évolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel), *Climatologie*, 10 (2013) 37 - 49. <https://doi.org/10.4267/climatologie.78>
- [4] - L. DESCROIX, A. DIONGUE NIANG, G. PANTHOU, A. BODIAN, Y. SANE, H. DACOSTA, M. MALAM ABDU, J.-P. VANDERVAERE and G. QUANTIN, Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : La Sénégalie et le bassin du Niger moyen, *Climatologie*, 12 (2015) 25 - 43. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1105>
- [5] - S. SANOGO, Observations et modélisation des extrêmes de précipitation aux échelles saisonnière à interannuelle au Sahel, Thèse, Université de Toulouse (Institut National Polytechnique de Toulouse), (2022). <https://hal.science/tel-04124637v2>
- [6] - S. SANOGO, A. H. FINK, J. A. OMOTOSHO, A. BA, R. REDL and V. ERMERT, Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa, *International Journal of Climatology*, 35 (15) (2015) 4589 - 4605. <https://doi.org/10.1002/joc.4309>
- [7] - D. GAYE and E. H. M. MANSALY, Évolution des précipitations extrêmes et analyse de l'hivernage 2020 dans le département d'Oussouye en Base-Casamance, *Revue Internationale du Chercheur*, 4 (2) (2023) 162 - 177
- [8] - E. H. M. MANSALY, Hivernage à pluviométrie extrême, quel impact sur le calendrier culturel dans le département d'Oussouye : Cas de l'année 2020, Mémoire, Université Assane Seck de Ziguinchor, (2022)
- [9] - R. A.-K. NASSA, A. M. KOUASSI and M. L. TOURE, Sensitivity of Statistical Models for Extremes Rainfall Adjustment Regarding Data Size : Case of Ivory Coast, *Journal of Water Resource and Protection*, 13 (8) (2021) 654 - 674. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.138035>
- [10] - H. ONIBON, T. B. M. J. OUARDA, M. BARBET, A. ST-HILAIRE, B. BOBÉE and P. BRUNEAU, Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec, Canada, *Hydrological Sciences Journal*, 49 (4) (2004) 717 - 735. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.4.717.54421>
- [11] - D. J. KODJA, Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest, Thèse, Université d'Abomey Calavi, (2018). <https://theses.hal.science/tel-01869842>
- [12] - H. KOUASSI, Risques hydro climatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi, Thèse, Université d'Abomey Calavi, (2014). <https://hal.science/tel-01572602>
- [13] - G. A. KOUTON, Répartition spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le département de l'Atacora au Bénin : Trajectoire et vulnérabilité des établissements humains, Thèse, Université d'Abomey-Calavi, (2022). <https://theses.hal.science/tel-03854304>
- [14] - B. T. A. GOULA, E. G. SORO, W. KOUASSI and B. SROHOUROU, Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest), *Hydrological Sciences Journal*, 57 (6) (2012) 1067 - 1080. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.692880>
- [15] - A. I. GUE and A. AFOUDA, Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9 (1) (2015) 121 - 133. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.12>
- [16] - ANSD, Rapport définitif du 5e recensement général de la population et de l'habitat (RGPH-5), Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Dakar, (2025) 666 p.

- [17] - A. BADIANE, T. SANÉ, M.-C. CORMIER-SALEM, M. H. T. FAYE and M. THIOR, Variabilité climatique et stratégies d'adaptation des riziculteurs de la Basse-Casamance (Sénégal), *VertigO*, (2025) <https://doi.org/10.4000/13k6r>
- [18] - T. M. N. NDIAYE and J. N. E. DIATTA, Disponibilité céréalière et contraintes à la production dans le Département d'Oussouye, Sénégal, *Afrique Science*, 18 (6) (2021) 107 - 116
- [19] - P. MEYLAN, A.-C. FAVRE and A. MUSY, Hydrologie fréquentielle : Une science prédictive, EPFL Press, Lausanne, (2008)
- [20] - H. B. H. BRAHIM, M. MOHAMED and B. A. B. ABDELKADER, Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales : Cas du Bassin Chott-Chergui, *Semantic scholar*, (2013)
- [21] - K. BENHATTAB, C. BOUVIER and M. MEDDI, Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles dans le bassin hydrographique—Chélif, Algérie, *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27 (3) (2014) 189 - 203. <https://doi.org/10.7202/1027805ar>
- [22] - G. É. SORO, A. DAO, V. FADIKA, T. A. GOULA BI and B. SROHOROU, Estimation des pluies journalières extrêmes supérieures à un seuil en climat tropical : Cas de la Côte d'Ivoire, *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 10 (2016) 211 - 227. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.5011>
- [23] - Y. ZAHAR and J.-P. LABORDE, Modélisation statistique et synthèse cartographique des précipitations journalières extrêmes de Tunisie, *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20 (4) (2007) 409 - 424. <https://doi.org/10.7202/016914ar>
- [24] - A. BEDOUM, C. BOUKA BIONA, B. JEAN PIERRE, I. ADOUM, R. MBIKE and L. BAOHOUTOU, Évolution des indices des extrêmes climatiques en République du Tchad de 1960 à 2008, *Atmosphere-Ocean*, 55 (1) (2017) 42 - 56. <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1268995>
- [25] - H. HANGNON, F. DE LONGUEVILLE and P. OZER, Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou : Quand le développement urbain est mal maîtrisé..., XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, (2015) 497 - 502
- [26] - B. SARR, Les fortes pluies enregistrées au Sahel au cours de l'hivernage 2007 : Variabilité et/ou changement climatique, (2008) 9 p.
- [27] - A. E. LAWIN, M. L. MBAYE, J. ARNAULT, M. CAMARA and A. NDIAYE, Characterization of Extreme Rainfall and River Discharge over the Senegal River Basin from 1982 to 2021, *Preprints*, (2023) <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0805.v1>
- [28] - S. B. DIOP, Y. TRAMBLAY, A. BODIAN, J. EKOLU, N. ROUCHÉ and B. DIEPPOIS, Flood Frequency Analysis in West Africa, *Journal of Flood Risk Management*, 18 (1) (2025). <https://doi.org/10.1111/jfr3.70001>
- [29] - G. PANTHOU, T. VISCHÉL and T. LEBEL, Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel, *International Journal of Climatology*, 34 (15) (2014) 3998 - 4006. <https://doi.org/10.1002/joc.3984>
- [30] - Y. SANE, G. PANTHOU, A. BODIAN, T. VISCHÉL, T. LEBEL, H. DACOSTA, G. QUANTIN, C. WILCOX, O. NDIAYE, A. DIONGUE-NIANG and M. DIOP KANE, Intensity—duration—frequency (IDF) rainfall curves in Senegal, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (7) (2018) 1849 - 1866. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1849-2018>
- [31] - D. KOUNGBANANE, E.-P. ZAHIRI, H. SOUROU, H. TOTIN VODOUNON, E. AMOUSSOU, L. LARE, H. DJAN and N. KOUODANA, Analyse fréquentielle et détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti au Togo, *Afrique Science*, 17 (1) (2020) 73 - 88
- [32] - D. F. BADOU, A. ADANGO, J. HOUNKPÈ, A. BOSSA, Y. YIRA, E. I. BIAO, J. ADOUNKPÈ, E. ALAMOU, L. O. C. SINTONDJI and A. A. AFOUDA, Heavy rainfall frequency analysis in the Benin section of the Niger and Volta Rivers basins : Is the Gumbel's distribution a one-size-fits-all model ? *Proceedings of IAHS*, 384 (2021) 187 - 194. <https://doi.org/10.5194/piahs-384-187-2021>

- [33] - M. A. A. ABDOU, I. S. ZAKARI and A. A. TOURE, Modélisation statistique des évènements extrêmes de pluies dans le district de la station de Niamey Aéroport, *Revue*, 22 (3) (2023) 70 - 86
- [34] - F. C. KOUAME, Frequential analysis of hydro-pluviometric maxima, flood factors and risk of river flooding in the managed basin of the Sassandra river, Soubré, Ivory Coast, *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 42 (2023) 142 - 161
- [35] - WMO, State of the Global Climate 2023, United Nations, N° 1347 (2024) 53 p.
- [36] - WMO, État du climat en Afrique 2023, United Nations, N° 1360 (2024) 33 p.