

# Etude de l'Erosion Hydrique dans le Contexte Sahélien par l'Analyse Statistique des Paramètres Géo-Morphométriques et des Données Pluviométriques : Cas du Bassin Versant du Ferlo

*Niang Gallo*

Laboratoire de climatologie et de l'environnement,  
Université Cheikh Anta Diop, Senegal

*Faty Abdoulaye*

Laboratoire d'hydrologie et de morphologie,  
Université Cheikh Anta Diop, Senegal

*Faye Guilgane*

Laboratoire de géomorphologie,  
Université Cheikh Anta Diop, Senegal

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n32p34](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n32p34)

Submitted: 01 August 2023

Accepted: 02 November 2023

Published: 30 November 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

*Cite As:*

Gallo N., Abdoulaye F. & Guilgane F. (2023). *Etude de l'Erosion Hydrique dans le Contexte Sahélien par l'Analyse Statistique des Paramètres Géo-Morphométriques et des Données Pluviométriques : Cas du Bassin Versant du Ferlo*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (32), 34. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n32p34>

## Résumé

Cette étude met en évidence l'érosion hydrique dans une région aride du Sahel au cours de la période suivant les sévères séries de sécheresses des années 1970 et 1980. Elle se consacre au cas du bassin du Ferlo et s'effectue à travers l'analyse des influences géo-morphométriques et des effets de la fréquence des grandes hauteurs de pluie. Les aspects linéaires, de relief et de surface du bassin versant ont été examinés à partir d'une image SRTM de 30 m de résolution à l'aide d'outils spatiaux dans ArcGIS. La fréquence des jours pluvieux et l'occurrence des grandes hauteurs sont traitées par des méthodes d'analyse statistique. Les résultats obtenus montrent une forme allongée, un relief assez faible et contrasté, une texture de drainage grossier, un réseau hydrographique hiérarchisé en 5 ordres dont le ratio de bifurcation (5,025) révèle une influence de la structure géologique sur le tracé méandrique du réseau hydrographique. Ces caractéristiques font état d'un potentiel de

ruissellement assez lent mais sur une surface très sensible à l'érosion. La répartition aléatoire du nombre de jours pluvieux (de plus de 10 mm) et la fréquence élevée des hauteurs de pluie dont la récurrence est de 20 ans, 50 ans ou 100 ans au cours de la période consécutive à l'année 1990 indique une dynamique érosive plus ou moins active dans le bassin.

---

**Mots-clés:** Géo-morphométrie, hauteur de pluie, érosion hydrique, bassin versant, Ferlo

---

## **Water Erosion in the Sahelian Context: The Case of the Ferlo Watershed**

*Niang Gallo*

Laboratoire de climatologie et de l'environnement,  
Université Cheikh Anta Diop, Senegal

*Faty Abdoulaye*

Laboratoire d'hydrologie et de morphologie,  
Université Cheikh Anta Diop, Senegal

*Faye Guilgane*

Laboratoire de géomorphologie,  
Université Cheikh Anta Diop, Senegal

---

### **Abstract**

This study highlights water erosion in an arid region of the Sahel during the period following the severe series of droughts of the 1970s and 1980s. It focuses on the case of the Ferlo basin and is carried out through the analysis of geo-morphometric influences and the effects of the frequency of large rainfall heights. Linear, relief, and surface aspects of the watershed were examined using a 30 m resolution SRTM image using spatial tools in ArcGIS. The frequency of rainy days and the occurrence of high heights are treated by statistical analysis methods. The results obtained show an elongated shape, a rather low and contrasting relief, a coarse drainage texture, a hydrographic network hierarchical in 5 orders whose bifurcation ratio (5.025) reveals an influence of the geological structure on the meandric layout of the hydrographic network. These characteristics indicate a potential for runoff rather slowly but on a surface very sensitive to erosion. The random distribution of the number of rainy days (more than 10 mm) and the high frequency of rainfall heights with a recurrence of 20 years, 50 years or 100 years during the period after 1990 indicate a more or less active erosive

dynamic in the basin.

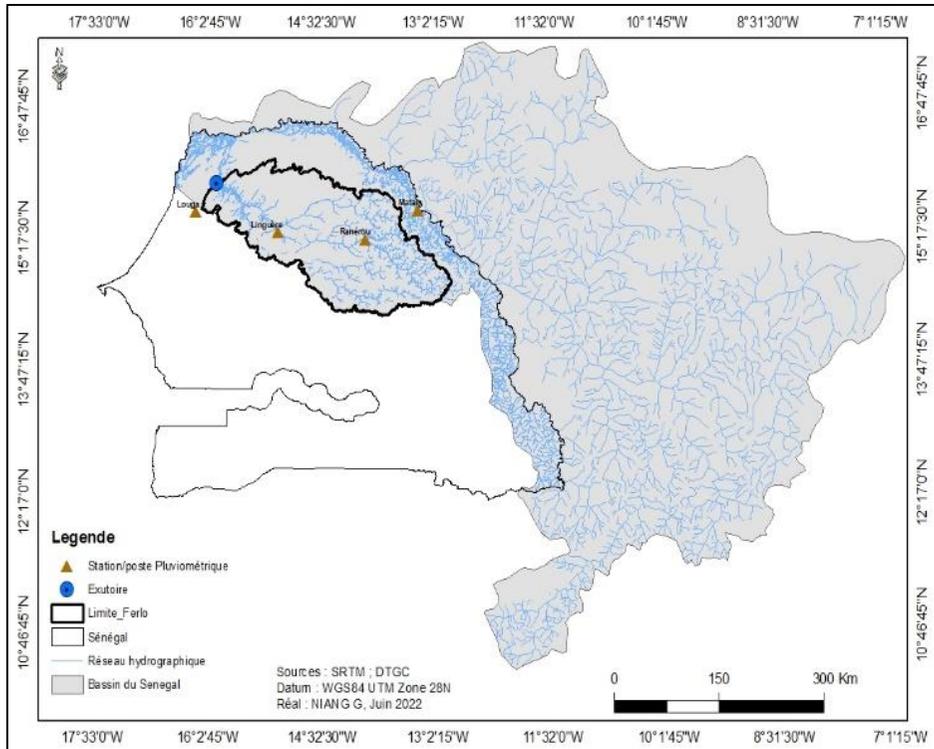
---

**Keywords:** Geo-morphometry, rainfall height, water erosion, watershed, Ferlo

### **Introduction**

L'étude des phénomènes hydro-sédimentaires exige l'observation et la compréhension des interactions entre divers facteurs biophysiques et anthropiques. Cette interaction se présente comme un processus du cycle hydrologique à l'échelle globale ou du bassin versant. Ainsi, les bassins versants et les sous-bassins versants constituent les unités fondamentales de la gestion des ressources en terre et en eau. Depuis les années 1940, le bassin versant demeure l'unité de référence pour les travaux de cartographie et de modélisation de phénomènes hydrologiques (Horton, 1945 ; Smith, 1950 ; Schumm, 1956 ; Strahler, 1964 ; Bodian, 2011 ; Faty, 2017), de quantification des précipitations et des écoulements (Dacosta, 1989) ou d'étude hydrologique (Sow A. A., 2007). Pour les géomorphologues, la théorie davisienne et le modèle USLE de Wischmeier et Smith (1978) constituent les sources d'inspiration ayant conduit à l'adoption du bassin versant comme cadre idéal pour l'étude de l'érosion (Michel, 1973; Sogon, 1999; Cheggour, 2008; Cissokho, 2011; Sow S. A., 2017; Niang G. , 2021). Le bassin versant constitue ainsi l'unité géomorphologique par excellence pour mieux apprécier les différents facteurs et modalités qui déterminent le cycle de l'eau et le transport des sédiments (Fort, François, & Arnaud-Fassetta, 2015).

Dans les milieux arides et semi-arides du Sahel, les bassins versants connaissent une situation hydro-morphogénique particulière. En effet, contrairement aux milieux estuariens ou deltaïques où le fonctionnement sédimentaire, animé par des courants marins, fluviaux et éoliens, est complexe, ces milieux présentent un hydrodynamisme régi par la pluie. C'est le cas du bassin du Ferlo. Dans cet espace, si la pluviométrie a connu un déficit chronique, l'évolution de la fréquence des pluies maximales ne semble pas suivre la même dynamique (Niang G. , 2021).



**Figure 1.** Localisation du bassin versant du Ferlo

L'objectif de cette contribution est d'étudier le processus d'érosion dans le bassin versant du Ferlo par les méthodes spatiales. Localisé en latitude entre 14° 30 Nord à 16° 18 Nord, et en longitude entre 12° 36 Ouest à 16°02 Ouest (figure 1), le Ferlo est une région endoréique qui s'étend sur une superficie 37748 Km<sup>2</sup>, soit 21 % du territoire nationale. Son exutoire se situe dans le lac de Guiers qui est relié au fleuve, dans son delta, par un canal de 17 km, la *Taoué*.

L'hydrosystème du Ferlo prend sa source au sud de Bakel, près du village de Lougué-Mody sur le plateau dunaire à 99 m d'altitude qui surplombe les levées et bourrelets de berges de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. C'est un sous-affluent inférieur du fleuve Sénégal. Situé au cœur du domaine aride sahélien où la variabilité pluviométrique et les amplitudes thermiques entraînent différentes formes d'altération superficielle (hydroclastie, thermoclastie, etc.), l'horizon superficiel du bassin demeure sensible au travail morphogénétique du ruissellement.

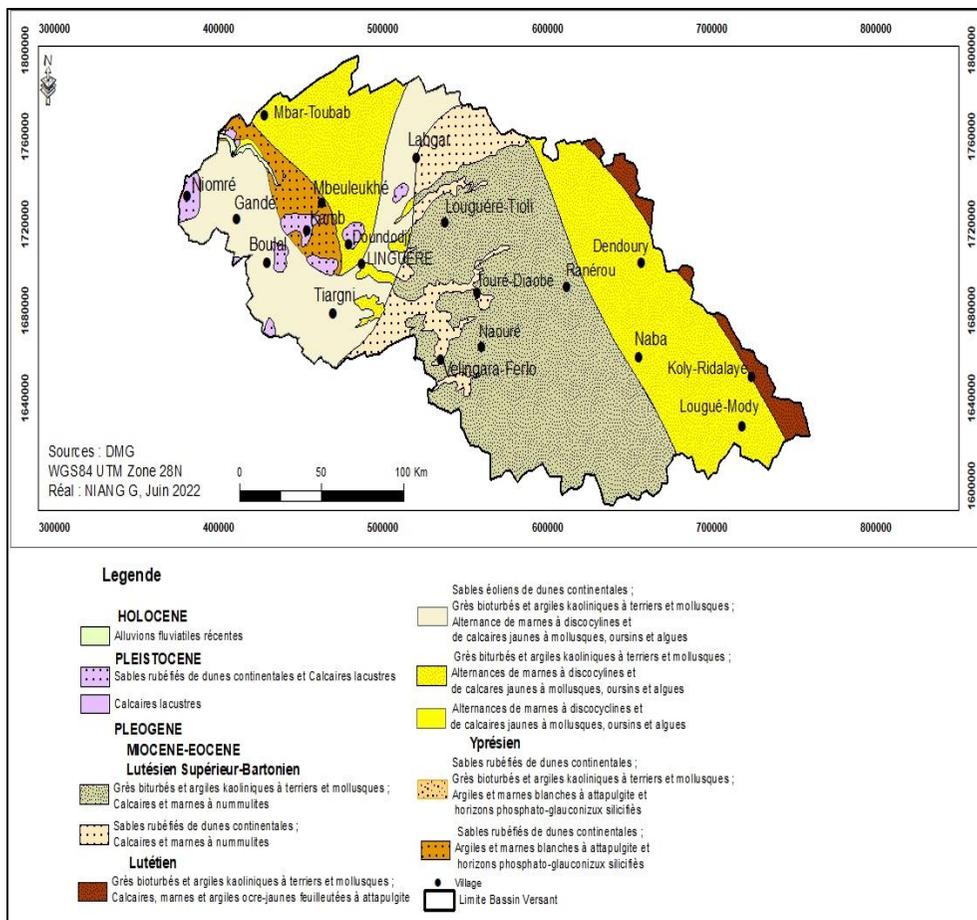


Figure 2. Structure géologique du bassin versant du Ferlo

Les dunes de sables rubéfiés (Michel, 1973) dominant le paysage morphologique du bassin reposent sur un substratum Secondaire-Tertiaire (figure 2) et sont couvertes par des sols hérités du Quaternaire. Principalement constitués par des dépôts de sables ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés et bruns rouges subarides, ces sols sont meubles et mal protégés par des formations végétales disparates et sénescentes (steppes arbustives à arborées) faisant place suite aux mutations consécutives aux sécheresses des années 1970 et 1980 et à la pression agropastorale.

## 1. Matériel et méthodes

### 1.1. Données et matériels

Les données collectées et les outils de traitement sont présentés dans le tableau 1. Le bassin versant du Ferlo a été extrait sous ArcGIS à partir de l'image SRTM. Afin d'illustrer une bonne répartition des hauteurs de pluies journalières, quatre stations ont été choisies dont la série acquise à l'ANACIM

est de 58 ans (1941 à 2008) pour les stations de Linguère et de Matam et de 46 ans (1963-2008) pour la station de Louga et le poste de Ranérou. Enfin, une carte topographique de la zone d'étude a été nécessaire pour valider le réseau hydrographique extrait de l'image SRTM.

**Tableau 1.** Données et outils de traitement

Types de données	Echelles	Sources	Outils de traitement
SRTM*	30 m	NASA** ( <a href="http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/">http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/</a> )	ArcGIS
Carte topographique	1/50 000	DTGC***	ArcGIS
Pluviométries	Journalières	ANACIM****	Excel

\*Shuttle Radar Topography Mission \*\*National Aeronautics and Space Administration  
\*\*\*Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques \*\*\*\*Agence Nationale de l'Aviation Civile et Météorologique

## 1.2. Méthode

### 1.2.1. Paramètres morphométriques

L'analyse géo-morphométrique est basée sur une approche synthétique des paramètres linéaires, de forme et de relief. Auparavant, ces paramètres ont été calculés à l'aide des formules proposées par différents spécialités (tableau 2).

D'abord, la carte topographique a été géoréférencée et le réseau hydrographique numérisé dans un environnement SIG a permis de valider le réseau hydrographique extraite de l'image SRTM. Les cours d'eau sont ensuite hiérarchisés selon la loi Strahler (1964). Ainsi, le nombre (Nu) et la longueur des cours d'eau (Lu) ont permis de calculer les paramètres linéaires comme la longueur moyenne (Lum) et le Ratio de bifurcation (Rb) de chaque ordre.

Ensuite, la géométrie et la morphologie du bassin sont déterminées par les aspects de forme ou de surface. La surface désigne l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau (Laborde, 2000). Elle est délimitée par un contour appelé périmètre (P). Ces deux paramètres ont été automatiquement calculés sur ArcGIS via la fenêtre Arctoolbox. La longueur du bassin (L), distante de l'exutoire au point le plus éloigné de la ligne de partage des eaux, correspond à celle du rectangle équivalent. Ces indicateurs de taille et de forme ont permis de calculer le ratio d'élongation (Re), le ratio de circularité (Rc), le facteur forme (Ff) et le coefficient de compacité (Kc) en vue de déterminer la forme approximative du bassin, mais aussi la densité de drainage (Dd), la fréquence de flux (Fs) et la texture de drainage (T) afin de déterminer les caractéristiques spatiales du bassin.

**Tableau 2.** Les paramètres morphométriques utilisés

Aspects	Paramètres	Formules	Références
<b>Linéaires</b>	N° d'ordre des cours d'eau (U)	Hiérarchisation du réseau hydrographique	Strahler, 1964
	Nombre de cours d'eau (Nu)	$Nu = N1+N2+...Nn$ ; où, N1 = Cours d'eau de premier ordre, N2 = Cours d'eau de second ordre et Nn = Cours d'eau d'ordre 'n'	Strahler, 1964
	Longueur des cours d'eau (Lu)	$Lu = L1+L2...Ln$ ; où, L1 = Longueur des cours d'eau de premier ordre, L2 = Longueur des cours d'eau de second ordre et Ln = Longueur des cours d'eau d'ordre 'n'	Horton, 1945
	Longueur moyenne des cours d'eau (Lum)	$Lum = Lu / Nu$	Strahler, 1964
	Rapport de longueur des cours d'eau (Lur)	$Lur = Lu / (Lu + 1)$	Horton, 1945
	Ratio de bifurcation (Rb)	$(Rb) = Nu / (Nu + 1)$ ; où Nu = Nombre de segments des cours d'eau présents dans l'ordre donné, Nu+1 = Nombre de segments de l'ordre supérieur suivant	Schumm, 1956
<b>De forme</b>	Surface du bassin (A)	<b>A</b> (km <sup>2</sup> )	
	Périmètre du bassin (P)	<b>P</b> (km)	
	Longueur du bassin (L)	L = Longueur en km du rectangle correspondant	
	Densité de drainage (Dd)	$Dd = Lu / A$	Horton, 1945
	Fréquence de flux (Fs)	$Fs = Nu / A$	Horton, 1945
	Texture de drainage (T)	$T = Dd \times Fs$	Smith, 1950
	Ratio d'élongation (Re)	$Re = \sqrt{(A/\pi)} / L$ ; où, A = Superficie du bassin, $\pi = 3,14$ , L = Longueur du bassin	Schumm, 1956
	Ratio de circularité (Rc)	$Rc = 4 \pi A / P^2$	Miller, 1953
	Facteur de forme (Ff)	$Ff = A / L^2$	Horton, 1945
Coefficient de compacité (Kc)	$K_G = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$ ; où K <sub>G</sub> = Coefficient de compacité de Gravelius, P = Périmètre du bassin, A = Superficie du bassin	Gravelius, 1914	
<b>De relief</b>	Relief du bassin (Rb)	$Rb = H - h$ ; Ecart entre le relief plus élevé et le relief plus faible	Hadley et Schumm, 1961
	Rapport du relief (Rr)	$Rr = Rb / L$	Schumm, 1963
	Relief relative (Rre)	$Rre = Rb \times 100/P$	Schumm, 1963
	Nombre de Robustesse (Rn)	$Rn = Rre \times Dd$	Schumm, 1963
	Pente (m)	$m = \Delta y / \Delta x$ ; où $\Delta y$ est un changement vertical, $\Delta x$ est un changement horizontal	Todhunter, 1888

Enfin, à l'aide des valeurs altitudinales du Modèle Numérique de Terrain (MNT), les aspects de relief sont générés. Il s'agit du relief du bassin (Rb), du rapport de relief (Rr), du nombre de robustesse (Rn), mais aussi de la pente en mètre.

### 1.2. 2 Analyse fréquentielle des hauteurs de pluie

Afin d'étudier le potentiel érosif des pluies, une analyse fréquentielle est appliquée aux hauteurs de pluies journalières de la série 1941-2008 des stations de Linguère et de Matam, de la série 1963-2008 des stations de Louga et du poste pluviométrique de Ranérou. Elle consiste d'une part à examiner la répartition des hauteurs de pluies supérieures ou égales à 10 mm qui, selon Thiam (1985), sont susceptibles de favoriser le ruissellement et l'érosion. Ces pluies sont réparties en quatre classes : [10 - 20 mm], [21- 30 mm], [31 - 40 mm] et ] > 40 mm [ ; et pour chacune la fréquence du nombre de jours est analysée. Par ailleurs, la loi de Gumbel a été ajustée aux maxima de pluies journalières des séries en vue d'estimer leur temps de retour. Le maximum journalier correspondant à la pluie maximale enregistrée entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 31 décembre de chaque année. La fonction de répartition de la loi de Gumbel (ou loi double exponentielle) est la suivante :

$f(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right)$ , avec la variable réduite suivante :  $u = \frac{x-a}{b}$ , où a et b sont des paramètres du modèle de Gumbel.

La distribution s'écrit ainsi  $f(x) = \exp(-\exp(u))$  et  $u = -\ln(-\ln(f(x)))$

L'estimation de  $f(x)$  repose sur un tri de la série par valeurs croissantes permettant d'associer chaque valeur à son rang r. Ainsi, après un classement par ordre croissant de chaque échantillon de pluies maximales de taille n, l'expression de la fréquence empirique ou expérimentale de non-dépassement de Hazen pour une valeur x de rang r se note :

$$f(xr) = \frac{r - 0,5}{n}$$

Où n est la taille de l'échantillon considéré.

Le temps de retour T d'un évènement est défini comme étant l'inverse de la fréquence de l'apparition de cet évènement, soit :

$$T = \frac{1}{1 - f(xi)}$$

Où T : temps de retour (nombre d'années) ; f (xi) : fréquence de non dépassement.

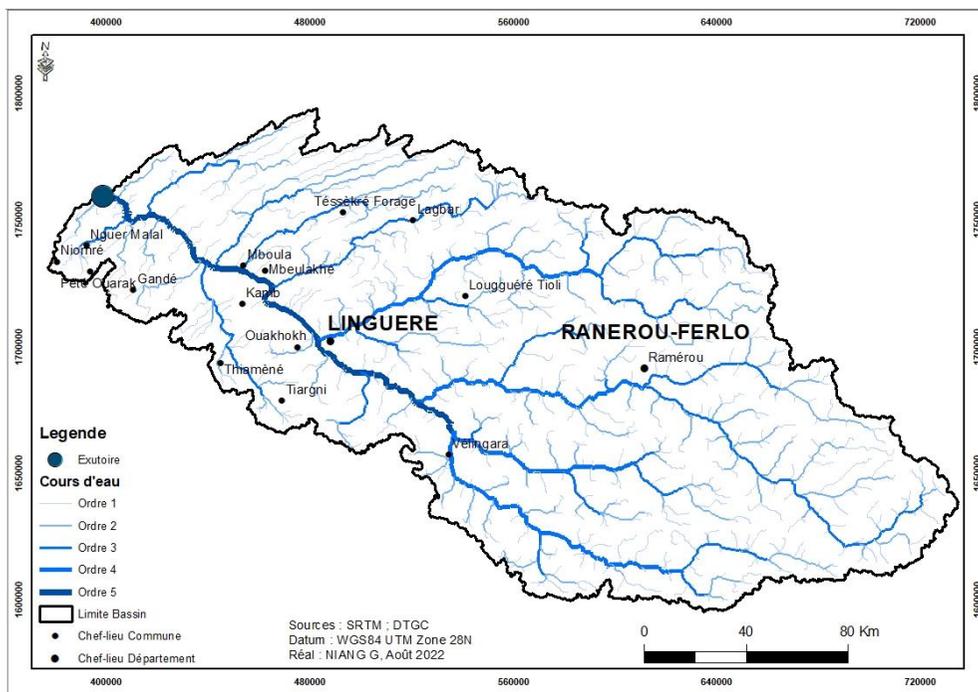
## **1. Résultats**

### **1.1 Caractérisation géo-morphométrique du bassin versant**

Les paramètres géo-morphométriques d'un bassin versant peuvent être regroupés en trois ensembles : les aspects linéaires, les aspects de forme et les aspects de relief (Zakaria, Majumder, & Rahman, 2016). Les aspects linéaires caractérisent le réseau hydrographique. Les aspects de formes et ceux de relief déterminent la géométrie et la morphologie du bassin versant qui, constituant des propriétés intrinsèques, influencent le régime de fonctionnement du réseau hydrographique du bassin. Subséquemment, afin d'établir la relation entre la morphologie du bassin et l'écoulement à la surface, la nature et la topologie du réseau hydrographique sont examinées avant de dégager les caractéristiques morphologiques et spatiales du bassin.

#### **2.1.1 Un réseau hydrographique peu dense et plus ou moins bien organisé**

Le bassin versant du Ferlo présente un réseau dendritique de cinquième ordre (figure 3). Le nombre (Nu) et la longueur de cours d'eau (Lu) décroissent dans le sens inverse du numéro d'ordre (U) ; tandis que la longueur moyenne (Lum) augmente à mesure que l'ordre augmente à l'exception du quatrième ordre (Tableau 3). Cette rupture de la Lum et les variations du Lur peuvent être reliés aux changements de la pente, de la topographie (Rama, 2014) et de l'état des roches (Singh, Arya, & Singh, 2020), traduisant un développement de l'activité érosive dans le bassin. Le ratio de bifurcation (Rb) supérieur à 5 (variant de 4 à 6,25) indique que la structure géologique exerce un contrôle plus ou moins important sur le réseau de drainage du bassin.



**Figure 3.** Réseau hydrographique du bassin versant du Ferlo selon l'ordre de Strahler

Ainsi, les trois paramètres calculés (Lum, Lur et Rb) révèlent certes un risque élevé d'inondation mais aussi une capacité non négligeable de transport des charges et solides.

**Tableau 3.** Aspects linéaires du bassin versant du Ferlo

N° d'ordre des cours d'eau (U)	Nombre de cours d'eau (Nu)	Longueur des cours d'eau (Lu) en km	Longueur moyenne des cours d'eau (Lum) en km	Rapport de longueur des cours d'eau (Lur)	Ratio de bifurcation (Rb)
1	607	3818,67	6,29	1,89	4,93
2	123	2018,71	16,41	1,86	4,92
3	25	1080,95	43,23	2,29	6,25
4	4	471,79	10,29	2,17	4
5	1	216,67	216,7	-	-
Total/Moyenne	2320	6210,17	47,52	2,11	5,025

Source : SRTM-30m.

### 2.1.2 Un bassin allongé à texture très grossière

Les résultats des paramètres géométriques et morphométriques du bassin sont consignés dans le tableau 4. Il s'agit d'un vaste bassin dont la longueur du rectangle équivalent est de 387,71 km. Les valeurs proches de 0 du ratio d'élongation ( $Re < 0,7$ ), du ratio de circularité ( $Rc < 0,7$ ) et du facteur forme ( $Ff = 0,25$ ), ainsi que le coefficient de compacité supérieur à 1,5 ( $Kc =$

2,23) indiquent une forme allongée selon les classifications respectives de Schumm (1956), de Miller (1953), de Horton (1945) et de Gravelius (1914).

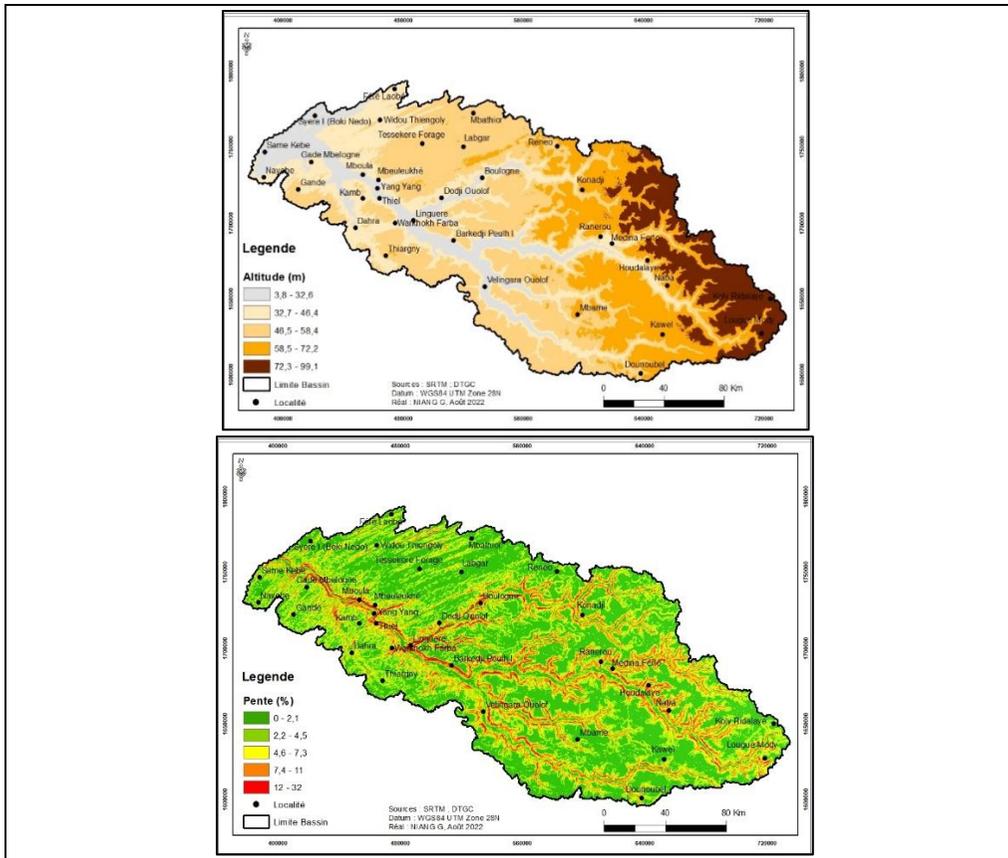
**Tableau 4.** Aspects de forme et de surface du bassin versant du Ferlo

<b>Aspects de formes</b>	
Surface (A en km <sup>2</sup> )	37749,35
Périmètre (P en km)	1548,35
Longueur du bassin (L en km)	387,71
Ratio d'élongation (Re)	0,28
Ratio de circularité (Rc)	0,19
Facteur de forme (Ff)	0,25
Coefficient de compacité (Kc)	2,23
Densité de drainage (Dd en Km/km <sup>2</sup> )	0,16
Fréquence de flux (Fs)	0,06
Texture de drainage (T)	0,0096

Dès lors, le fonctionnement morpho-hydrologique du bassin est enjoint à un temps de concentration long. Cette situation est illustrée aussi par les faibles valeurs de la densité de drainage (Dd : 0,16 km/km<sup>2</sup>), de la fréquence de flux (Fs : 0,6) et la texture de drainage (T : 0,0016) qui indiquent, selon Smith (1939) et Horton (1945), une texture très grossière et, par ricochet, un sol perméable, une végétation clairsemée, un relief peu accidenté et un ruissellement superficiel lent. Dans le bassin, la texture granulaire et perméable des sables éoliens disposés en strates sur les grès du Continental Terminal favorise l'infiltration et constitue une contrainte à la densité hydrographique.

### **2.1.3 Un relief de dunes assez contrasté**

Le modelé global est un ensemble de vastes lambeaux de plateaux tabulaires, joins par de larges dépressions aux pentes variables de 2 % à 32 % (figure 4), souvent creusées par des vallées peu profondes.



**Figure 4.** MNT et pentes du bassin versant du Ferlo

Les dunes dominent le paysage morphologique, atteignent 99,1 m au Sud-est et s'abaissent progressivement vers l'Ouest (3,8 m à l'exutoire). Elles s'étalent sous des formes et à des niveaux d'évolution différents.

Les paramètres du relief (tableau 5) mettent en exergue une dénivelée (ou relief du bassin – Rb) assez significative (95,3 m) résultant des variations altitudinales entre dunes et dépressions et d'une pente globale assez forte en témoigne le rapport du relief (Rr : 0,25). De ce fait, la valeur assez importante du relief relatif (Rre : 6,15 %) et celle modérée du nombre de robustesse (Nr : 0,98) font état d'un bassin au potentiel de ruissellement moyen mais avec un degré de sensibilité assez important de la surface des sols à l'érosion.

**Tableau 5.** Les aspects de relief du bassin du Ferlo

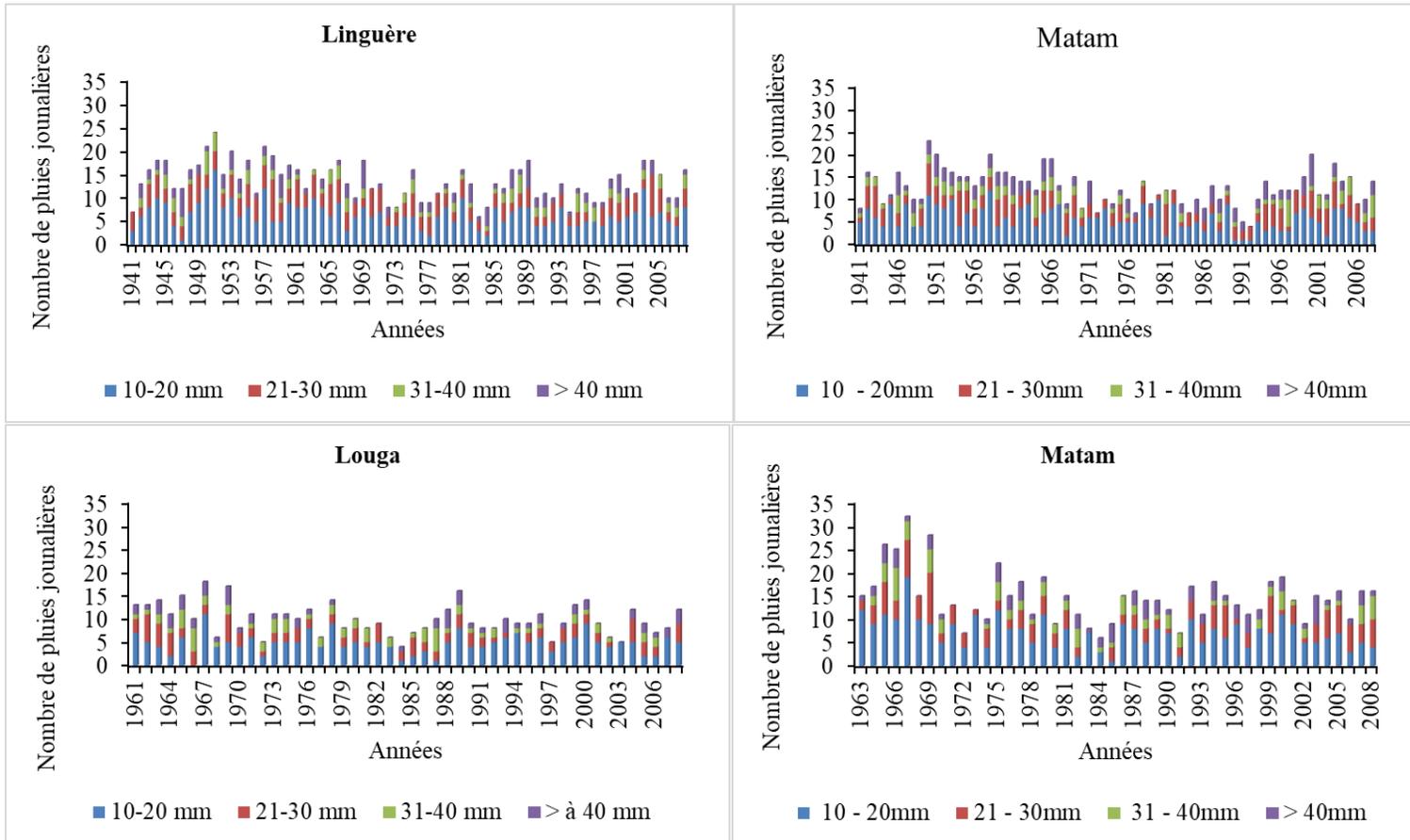
<b>Aspects de relief</b>	
Relief du bassin (Rb en m)	95,3
Rapport du relief (Rr)	0,25
Relief relatif (Rre)	6,15
Nombre de robustesse (Nr)	0,98

## 2.2 Analyse fréquentielle des hauteurs de pluie

Sur les périodes de référence (figure 5), le nombre moyen annuel de pluies journalières évolue selon le rythme de la variabilité interannuelle et spatiale de la pluviométrie (14 à Linguère, 15 à Ranérou, 10 à Louga et 13 à Matam). Plus élevé durant la phase antérieure aux années 1970, il reste faible lors des décennies de sécheresse 1970-1980 puis croît progressivement depuis les années 1990. Les pluies de 10 à 20 mm, plus représentatives avec une fréquence de 43% à Linguère, 47 % à Ranérou et à Matam, 48 % à Louga, ne semblent pas être affectées par la variabilité pluviométrique. Les pluies de 21 à 30 mm ont une fréquence de 29 % à Linguère, 27 % à Ranérou, 23 % à Matam et 20 % à Louga. Les pluies de 31 à 40 mm et celles de plus de 40 mm ont la même fréquence dans toutes les stations : 14 % à Linguère, 13 % à Ranérou, 16 % à Louga et 15 % à Matam.

De fortes fréquences des hauteurs de pluie de 30 à 40 mm et > 40 mm peuvent être enregistrées dans les zones à plus faible pluviométrie (Louga) et même au cours des années de déficit ou des périodes de sécheresse. Ces situations indiquent que la distribution et la fréquence des hauteurs de pluie sont aléatoires ne suivent pas le rythme de la variabilité pluviométrique. Les pluies peuvent alors conserver partout leur potentiel érosif et même lors des décennies de sécheresse.

Les figures 6 et 7 révèlent que la moyenne des pluies maximales journalières a dépassé 50 mm pour toutes les stations (59,05 mm à Linguère, 58,28 mm à Matam, 51,79 mm à Louga et 60,63 mm à Ranérou). Le maximum a par ailleurs dépassé 100 mm à Matam (162,3 mm reçu le 09/08/1942), à Linguère (122 mm enregistré le 09/09/1998) et à Ranérou (128 mm reçu le 21/08/1983), mais s'estompe à 90,3 mm à Louga à la date du 11/08/1989. D'autres épisodes pluvieux supérieurs à 100 mm ont été observés à Linguère (107,2 mm le 03/08/1945), à Matam (100,3 mm le 17/08/1958 et 121,5 mm le 24/07/2004) et à Ranérou (104,7 mm le 15/09/2000, 127,5 mm le 27/06/2003 et 105,7 mm le 19/07/2005). L'application de la loi de Gumbel sur ces données a permis d'estimer la récurrence des maxima de la période post-1990 (tableaux 5 et 6).

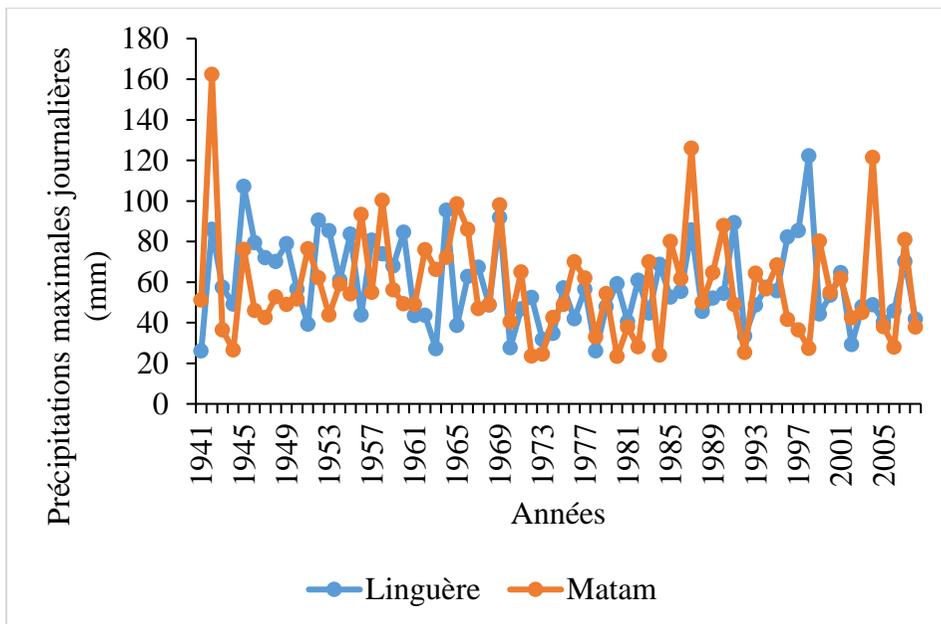


**Figure 5.** Evolution du nombre de pluies journalières à 10 mm de 1941 à 2008

L'évolution des pluies maximales journalières (figure 6) montre qu'à partir de 1990, les pluies dont le temps de retour dépasse 5 ans sont devenues très fréquentes. En plus, lors de cette période, au moins un maximum d'une récurrence de 10 ans et un autre d'une récurrence de 100 ans ont été enregistrés à Linguère et une pluie dont le temps de retour dépassant 20 ans a été recueillies à Matam.

**Tableau 6.** Récurrence des pluies maximales journalières (en mm) selon la loi de Gumbel de 1941 à 1990 à Linguère et à Matam

Récurrence		5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Stations	Linguère	73,6	85,3	96,6	111,1	122
	Matam	79,6	95,4	110,6	130,2	144,8

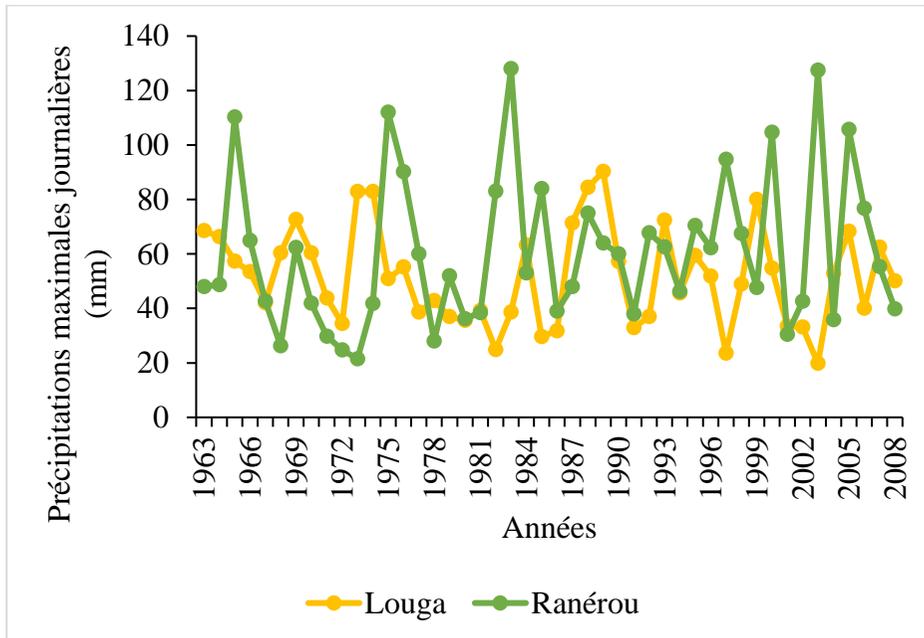


**Figure 6.** Evolution des précipitations maximales journalières de 1941 à 2008 à Linguère et à Matam

L'évolution des maxima journaliers au niveau des stations de Louga et de Ranérou (figure 7) montre que les hauteurs ayant un temps de retour dépassant 5 ans (68,3 mm, le 15 juillet 2005) et 10 ans (80 mm, le 28 Août 1999) à Louga et des maxima ayant un temps de retour dépassant 10 ans (104,7 mm, le 17 septembre 2000 et 105,7 mm, le 15 juillet 2005) et 20 ans à Ranérou ont été observés. Lors de cette période actuelle, un maximum de 100 mm dont la récurrence est égale environ 50 ans à Louga, entre 20 et 30 ans à Linguère et inférieure à 20 ans à Ranérou et à Matam, a été relevé au moins une fois dans chaque station. La pluviométrie dans le bassin du Ferlo reste donc marquée, aujourd'hui, par la hausse des hauteurs de pluies et de leur fréquence. Cette situation se traduit par une dynamique de l'érosion hydrique plus vive.

**Tableau 7.** Récurrence des pluies maximales journalières (en mm) selon la loi de Gumbel de 1963 à 1990 à Louga et à Ranérou

Récurrence		5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Stations	Louga	67,5 mm	78,3 mm	88,6 mm	101,9 mm	111,9 mm
	Ranérou	78,1	94,5	110,3	130,7	146,1



**Figure 7.** Evolution des précipitations maximales journalières de 1963 à 2008 à Louga et à Ranérou

## 2. Discussion

Les aspects linéaires, de formes et de relief ont permis de mettre en exergue l'influence de la géo-morphométrie sur la dynamique hydro-sédimentaire dans le bassin versant du Ferlo. L'impertinence de l'indice de compacité relative à l'utilisation du périmètre qui n'est pas fiable pour la détermination de la forme géométrique du bassin (Bendjoudi & Hubert, 2002) fait que les indices de forme qui ne font pas intervenir le périmètre du bassin versant sont aussi utilisés (le ratio d'élongation, le ratio de circularité et le facteur forme). Tous ces indices ont indiqué une forme allongée du bassin. Cette forme corrobore les résultats obtenus par Faye (2014) et ceux de Sow (2017) dans la zone couvrant le cours moyen du bassin du fleuve Sénégal. Quant à la densité de drainage (0,16 km/km<sup>2</sup>), la fréquence de flux (0,06) et la texture de drainage (0,0096), ils ont conféré au bassin une texture très grossière. La combinaison de facteurs de forme et de fréquence des affluents permet d'estimer le ruissellement du bassin (Faye C., 2014). Par ailleurs, les indices de forme, étant aussi des indicateurs de l'âge qualitatif du bassin versant (Pale, Kelele, & Da, 2020), font état d'un bassin en stade de jeunesse

au regard de sa forme allongée. Ainsi, le relief assez faible du bassin (95,3 m) et assez contrasté avec des pentes variant de 2,1% à 32% se caractérise par un potentiel de ruissellement assez faible. Cet état de fait s'explique par le rapport de relief (6,15%), mais aussi et surtout par une surface sensible à l'érosion comme l'atteste le nombre de robustesse (0,98) qui indique, par ricochet, que le réseau de drainage est sous un fort contrôle de la structure. Un système de ravinement est, ainsi, établi par le biais d'un réseau hydrographique, hiérarchisé en 5 ordres, drainant sur plusieurs kilomètres (47,52 km en moyenne) et très bifurquées (ratio de bifurcation de 5,025). Ces résultats s'opposent à ceux des travaux de Faye, 2018 ; Faye, et *al.*, 2021 sur la partie continentale du bassin de la Gambie située dans le domaine climatique soudanien. Dans ces travaux, il a été démontré que les variables morphométriques du bassin du sixième ordre de la zone sont influencées par la lithologie et non par la structure.

La fréquence des hauteurs de pluie de 10-20 mm équivalent à la triple fréquence des hauteurs 30-40 mm ou de celle de plus de 40 mm montre que le caractère pluvieux du bassin est relié plus par l'importance du nombre de jours pluvieux que par la fréquence des grandes hauteurs de pluie. Toutefois, la baisse des fréquences de jours pluvieux est synchrone avec celle des hauteurs de pluies annuelles (Faty A., 2018). Depuis l'année 1969, la tendance est à la baisse jusqu'au début des années 1990 (Niang G. , 2021). C'est dans cette logique que Niang (2008) a indiqué un retour progressif des précipitations plus importantes depuis le début des années 90. Ainsi, la situation actuelle est marquée par une inégale distribution du nombre de jours de pluies (supérieures à 10 mm) et des maxima journaliers (supérieures à 40 mm), ainsi que la récurrence des pluies de plus de 100 mm qui dépasse légèrement 20 ans à Linguère et n'atteignant pas 20 ans sur les méridiens de Ranérou et de Matam. Les résultats issus de la caractérisation géo-morphométrique du bassin et ceux de l'analyse fréquentielle des hauteurs de pluie attestent que la morphodynamique hydrique a repris depuis le début des années 1990, mais de façon disparate dans le bassin.

## Conclusion

L'érosion hydrique dans un milieu aride ou semi-aride du Sahel est régie par le ruissellement. Pour la compréhension de son processus et son contrôle, il devient nécessaire de calculer et d'interpréter les paramètres géo-morphométriques à l'aide de techniques SIG, mais aussi et surtout d'examiner le nombre et la fréquence des hauteurs de pluie.

Il ressort de cette étude que les processus hydro-sédimentaires du bassin du cinquième ordre du Ferlo sont influencés par la structure géologique et des conditions climatiques passées et actuelles. Les aspects morphométriques linéaires, de relief et de surface ont fait état d'un bassin jeune à potentiel de

ruissellement plus ou moins lent, au relief assez faible mais au substrat fortement sensible à l'érosion. De ce fait, la hausse amorcée depuis le début des années 1990 du nombre de jours pluvieux et de la fréquence des grandes hauteurs de pluie dont la récurrence dépasse 20 ans, 50 ans voire 100 ans indique une reprise de la dynamique érosive.

En définitive, la caractérisation géo-morphométrique et l'analyse fréquentielle des hauteurs de pluie sont des méthodes efficaces pour la maîtrise des problèmes environnementaux tels que la sécheresse, les inondations et l'érosion des sols à l'échelle d'un bassin versant.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

**Déclaration relative aux participants humains :** Cette étude n'avait pas besoin d'être approuvée puisqu'aucune donnée vivante n'a été manipulée. Elle n'est donc pas concernée par les principes de la Déclaration d'Helsinki.

#### **References:**

1. Bendjoudi, H., & Hubert, P. (2002, décembre). Le coefficient de compacité de Gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Journal des sciences hydrologiques*, 47(6), pp. 921-930.
2. Bodian, A. (2011). *Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal*. Thèse de doctorat, UCAD.
3. Cheggour, A. (2008). *Mesure de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des SIG : Application au bassin versant de la Rhéraya, haut-atlas, Maroc*. Thèse de doctorat, Université Caddi-Ayyat, Semlalia-Marrakech.
4. Cissokho, R. (2011). *Développement d'un indice de vulnérabilité des sols à l'érosion éolienne à partir d'images satellitales dans le bassin arachidier du Sénégal : cas de la région de Thiès*. Thèse de doctorat, Université Montréal.
5. Dacosta, H. (1989). *Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance*. Thèse de doctorat de 3e Cycle, UCAD, Département de Géographie.

6. Faty, A. (2018). *Modélisation hydrologique du haut bassin versant du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité hydro-climatique : Apport de la télédétection et du modèle Mike SHE*. Thèse de doctorat, UCAD, Département de Géographie.
7. Faty, A., Kane, A., & Ndiaye, A. L. (2017). Influence de la manifestation climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers dans le haut bassin versant du Sénégal. *Revue des sciences de l'eau*, 30(2), pp. 79-87.
8. Faye, C. (2014). Méthodes d'analyse statistiques de données morphométriques : Corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins versants du fleuve Sénégal. *Cinq Continents*, 4(10), pp. 80-108.
9. Faye, C. (2018). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie. (bassin continental Guineo-Sénégalais). *Revue Marocaine de Géomorphologie*(2), pp. 110-127.
10. Faye, C., Dieye, S., & Faye, G. (2021, Juin). Analyse morphométrique et hydrologique du sous-bassin versant du Niaoulé (bassin de la Gambie) à l'aide de techniques SIG. *Algerian journal of arid environment*, 11(1), pp. 54-75.
11. Fort, M., François, B., & Arnaud-Fassetta, G. (2015). *Géomorphologie dynamique et environnement*. Paris: Armand Colin.
12. Gravelius, H. (1914). Grundrifi der gesamten Gewässerkunde. Band I : Flufkunde. *Compendium of Hydrology, I : Rivers, in German*, pp. 138-141.
13. Horton, R. E. (1945). Erosional Development of Streams and their Drainage Basins : Hydro-physical Approach to Quantitative Morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*(56), pp. 275-370.
14. Laborde, J. P. (2000). *Eléments d'hydrologie de surface*.
15. Michel, P. (1973). *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie: Etude Géomorphologique*. Mémoire n°63, ORSTOM.
16. Miller, V. C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. *Tech. Report. N° 3, Dept OF Geology, University Columbia*.
17. Niang, A. J. (2008). *Les processus morphodynamiques, indicateurs de l'état de la désertification dans le sud-ouest de la Mauritanie. Approche par analyse multisource*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Département de Géographie/Faculté des sciences.
18. Niang, G. (2021). *Etude comparative des bassins versants de la basse vallée du Ferlo et du lac de Guiers : Dynamique actuelle de l'érosion*,

- impacts et stratégies de lutte*. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop.
19. Pale, S., Kelele, A., & Da, D. E. (2020). Caractérisation géomorphométrique des formes de relief dans le bassin versant du Poni, au Burkina Faso. *Afrique SCIENCE*, 3(17), pp. 62-77.
  20. Rama, A. V. (2014, Octobre). Drainage basin analysis for characterization of 3rd order watersheds using Geographic Information System (GIS) and ASTER data. *Journal of Geomatics*, 8(2), pp. 200-210.
  21. Schumm. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. *Bull.Geo.Soc.Am*(67), pp. 597-646.
  22. Singh, A. P., Arya, A. K., & Singh, D. H. (2020). Morphometric Analysis of Ghaghara River Basin, India, Using SRTM Data and SIG. *JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA*, 95, pp. 169-178.
  23. Smith, G. H. (1939). The morphometry of Ohio: The average slope of the land (Abstract). *Annals of the Association of American Geographers*, 29(94).
  24. Sogon, S. (1999). *Erosion des sols cultivés et transports des matières en suspension dans un bassin versant de Brie, Application des traceurs radioactifs naturels et magnétiques*. Thèse de doctorat, Université Paris I\_Panthéon-Sorbone.
  25. Sow, A. A. (2007). *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses confins Guinéo-Maliens. Les bassins de la Gambie et de la Falémé*. Thèse de doctorat d'Etat es Lettres et Sciences humaines, UCAD, Département de Géographie.
  26. Sow, S. A. (2017). *Morphodynamique hydrique par ravinement et ses conséquences dans le bassin versant de Ourassogui, Nord du Sénégal*. Université Gaston Berger, Saint-Louis.
  27. Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geometry. *Transactions of American Geophysical Union*(38), pp. 913-920.
  28. Zakaria, M., Majumder, A.-K., & Rahman, M. M. (2016, Juin). Morphometric Analysis of Reju Khal Drainage Basin using Geographic Information System (GIS) and SRTM data. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(6), pp. 661-470.