

Revue HoPE

Évidences géomorphologiques des mouvements néotectoniques sur le craton ouest-africain à Bamako, Mali

Mahamadou CAMARA^{a†}, N'dji dit Jacques DEMBELE^{a,b}

- a. Laboratoire Homme Peuplement Environnement, Faculté d'Histoire et de Géographie, USSGB, Mali
- b. Institut Supérieur des Mines et Géologie de Boké, Guinée

Résumé

La stabilité apparente des cratons précambriens a longtemps conduit à considérer ces domaines comme tectoniquement inactifs. Toutefois, des études récentes suggèrent que des déformations néotectoniques discrètes peuvent encore affecter ces environnements intracratoniques. Cette recherche évalue l'activité tectonique récente du bassin versant du fleuve Niger à Bamako et dans ses environs, situé sur le Craton Ouest-Africain, à partir d'indices géomorphologiques dérivés d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de 30 m de résolution. L'approche repose sur cinq indices morphométriques : l'intégrale hypsométrique (HI), le ratio d'élongation (Re), le facteur d'asymétrie (AF), le facteur de symétrie transversale (T) et la sinuosité du front de montagne (Smf). Les analyses mettent en évidence des contrastes morphologiques entre les deux rives du fleuve Niger, traduisant une dissymétrie du bassin et une organisation asymétrique du réseau hydrographique. Les valeurs obtenues (HI = 0,20 ; Re = 0,60 ; AF = 70,85 % ; T = 0,60 ; Smf = 1,12) caractérisent un bassin géomorphologiquement mature, marqué par un basculement du drainage et des fronts montagneux faiblement sinueux, compatibles avec une activité néotectonique modérée à active. Cette interprétation est corroborée par les données géologiques disponibles pour la région de Bamako ainsi que par les observations récentes de structures sismotectoniques quaternaires, notamment des dykes clastiques, des failles et des microfailles. Malgré les limites liées à la résolution du MNT pour détecter les microformes du relief, cette approche confirme l'intérêt des indices géomorphologiques pour caractériser des déformations tectoniques subtiles en contexte intracratonique. Ces résultats remettent en question l'hypothèse d'une stabilité tectonique absolue du Craton Ouest-Africain et ouvrent des perspectives d'investigation fondées sur les données LiDAR et InSAR.

© Revue HOPE, tous droits réservés

Mots clés : Néotectonique ; Géomorphométrie ; Indices Géomorphologiques ; Craton Ouest-Africain ; Bassin du Fleuve Niger ; Bamako ; SIG ; Télédétection.

Abstract

The apparent stability of Precambrian cratons has long supported the assumption that these regions are tectonically inactive. Nevertheless, recent studies indicate that subtle neotectonic deformation may still occur within intracratonic environments. This study investigates recent tectonic activity in the Niger River watershed in Bamako and its surrounding areas, located on the West African Craton, using geomorphological indices derived from a 30 m Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM). The assessment is based on five morphometric indices: the Hypsometric Integral (HI), Elongation Ratio (Re), Asymmetry Factor (AF), Transverse Topographic Symmetry Factor (T), and Mountain Front Sinuosity (Smf). The results reveal clear geomorphological contrasts between the two banks of the Niger River, reflecting basin asymmetry and an uneven drainage network configuration. The calculated values (HI = 0.20, Re = 0.60, AF = 70.85%, T = 0.60, and Smf = 1.12) characterize a geomorphologically mature basin affected by drainage tilting and relatively straight mountain fronts, consistent with moderate to active neotectonic activity. This interpretation is supported by the available geological evidence for the Bamako region and recent observations of Quaternary seismotectonic structures, including clastic dikes, faults, and microfaults. Although the DEM resolution restricts the identification of subtle landforms, the proposed approach confirms the usefulness of geomorphological indices for detecting subtle tectonic deformation in intracratonic settings. These findings challenge the assumption of absolute tectonic stability of the West African Craton and provide a basis for future investigations using LiDAR and InSAR data.

© Revue HOPE, all right reserved

Keywords: Neotectonics; Geomorphometry; Geomorphological Indices; West African Craton; Niger River Basin; Bamako; GIS; Remote Sensing.

[†]Auteur correspondant : Mahamadou CAMARA camaramahamadouumar@gmail.com

Article reçu le : 28/03/2026, Version corrigée reçue le 20/06/2026, Accepté le 30/06/2026.

1. Introduction

Le Craton Ouest-Africain représente l'un des plus anciens ensembles géologiques stables du globe. Depuis la fin de l'orogénèse éburnéenne, il y a environ 2,0 à 2,1 milliards d'années, cette région est généralement considérée comme tectoniquement stable (Dars, 1961 ; Black et al., 1980 ; Haddoum, 2009). Toutefois, plusieurs recherches menées dans différentes régions cratoniques du monde ont montré que des mouvements néotectoniques peuvent persister au sein de domaines supposés stables et se manifester par des déformations du relief, des anomalies de drainage et des modifications de l'organisation des réseaux hydrographiques (Keller et Pinter, 2002 ; Bull, 2007 ; Burbank et Anderson, 2011).

L'étude des mouvements néotectoniques constitue un élément fondamental pour comprendre l'évolution récente des paysages et les interactions entre la tectonique, l'érosion et la dynamique fluviale. Les méthodes traditionnellement utilisées reposent sur les analyses structurales, la thermochronologie, les traces de fission sur l'apatite, les datations géologiques et les observations de terrain (Ganne et al., 2012 ; Dembélé et Palé, 2026). Cependant, ces approches nécessitent souvent des données spécialisées et des campagnes de terrain coûteuses, particulièrement dans les régions africaines où les données géologiques détaillées demeurent limitées.

Avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG), de la télédétection et des modèles numériques de terrain (MNT), les indices géomorphologiques sont devenus des outils efficaces pour détecter l'activité tectonique récente. Ces indices permettent d'analyser les réponses morphologiques du relief aux déformations crustales à travers la géométrie des bassins versants, la distribution des altitudes et l'organisation du réseau hydrographique (Strahler, 1952 ; Keller & Pinter, 2002 ; El Hamdouni et al., 2008). Parmi les indicateurs les plus utilisés figurent l'intégrale hypsométrique (HI), le ratio d'élongation (Re), le facteur d'asymétrie du bassin versant (AF), le facteur de symétrie transversale (T) et la sinuosité du front de montagne (Smf), largement utilisés dans les études de tectonique active à travers le monde (Bull & McFadden, 1977 ; Cox, 1994 ; Kale & Shejwalkar, 2008 ; Pérez-Peña et al., 2010).

Dans le contexte du Craton Ouest-Africain, les études consacrées à la néotectonique demeurent relativement limitées. Au Mali, et particulièrement dans la région de Bamako, plusieurs structures tectoniques héritées du Précambrien ont été décrites par Dars (1961), Carrère (1972) et Travi (1980). La présence de failles orientées NNE–SSW, NNW–SSE, NW–SE et E–W suggère une complexité structurale susceptible d'influencer l'évolution géomorphologique actuelle du bassin versant du fleuve Niger. Par ailleurs, des travaux récents ont mis en évidence des déformations dans les sédiments quaternaires de la vallée du Niger à Bamako, suggérant une activité tectonique plus récente que celle traditionnellement attribuée au craton Dembélé, et Palé (2026).

Malgré ces observations, peu de recherches ont évalué quantitativement l'activité tectonique récente du bassin versant du fleuve Niger à Bamako à partir d'indices morphométriques issus de modèles numériques de terrain. Cette insuffisance de données limite la compréhension des mécanismes à l'origine de l'évolution du relief et de la dynamique hydrographique régionale.

L'objectif principal de cette étude est donc d'évaluer l'existence d'une activité néotectonique dans le bassin versant du fleuve Niger à Bamako et dans ses environs, à travers l'analyse de plusieurs indices géomorphologiques extraits des données du Modèle Numérique de Terrain (MNT) à une m de 30 m. Plus spécifiquement, cette recherche vise à caractériser la morphologie du bassin versant, à analyser l'organisation du réseau hydrographique et à identifier les signatures morphotectoniques du paysage. Les résultats obtenus contribueront à une meilleure compréhension de la dynamique géomorphologique récente du Craton Ouest-Africain et fourniront de nouveaux éléments sur l'évolution tectonique du bassin versant du Fleuve Niger à Bamako.

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude couvre l'ensemble des bassins versants du district de Bamako, capitale de la République du Mali, ainsi que ses environs immédiats. Elle est localisée entre les latitudes 12°24'02" et 12°59'53" nord et les longitudes 8°19'55" et 7°23'59" ouest (Figure 1). L'emprise totale couvre une superficie d'environ 5 005,71 km² et un périmètre de 506,08 km. Cette région est traversée par le fleuve Niger, principal cours d'eau d'Afrique de l'Ouest, qui constitue l'élément structurant du réseau hydrographique local et joue un rôle majeur dans l'organisation du paysage.

Sur le plan géologique, la région de Bamako est située sur la bordure occidentale du Craton Ouest-Africain, reconnu comme l'un des plus anciens ensembles géologiques stables du continent africain. Les connaissances disponibles reposent principalement sur les travaux de Dars (1961), Carrère (1972) et Travi (1980), qui ont permis d'identifier les principales unités lithostratigraphiques affleurantes. La géologie régionale est essentiellement constituée d'une succession de formations gréseuses réparties, de la base vers le sommet, en trois séries : Sotuba, Koulouba et Kati. Ces formations sont localement recoupées par des intrusions doléritiques, en particulier la dolérite de Sotuba, qui constitue l'un des principaux témoins du magmatisme post-sédimentaire dans la région.

À l'échelle structurale, la zone d'étude est marquée par un réseau de discontinuités tectoniques héritées des principaux épisodes géodynamiques précambriens. Les failles dominantes présentent des orientations NNE–SSW, NNW–SSE, WNW–ESE et E–W, avec une concentration plus importante sur la rive gauche du fleuve Niger. Elles sont associées à un réseau dense de fractures et de diaclases orientées préférentiellement NW–SE et NE–SW (Dars, 1961). L'ensemble de ces structures est susceptible d'avoir influencé l'organisation du drainage, la mise en place du relief ainsi que l'évolution géomorphologique observée aujourd'hui.

Du point de vue géomorphologique, la région présente une alternance de plateaux gréseux, de collines résiduelles, de versants abrupts et de plaines alluviales développées le long du fleuve Niger et de ses principaux affluents. Cette diversité morphologique, combinée à l'héritage

structural de la région, offre un contexte particulièrement favorable pour analyser les relations entre la tectonique récente, l'évolution du relief et l'organisation du réseau hydrographique.

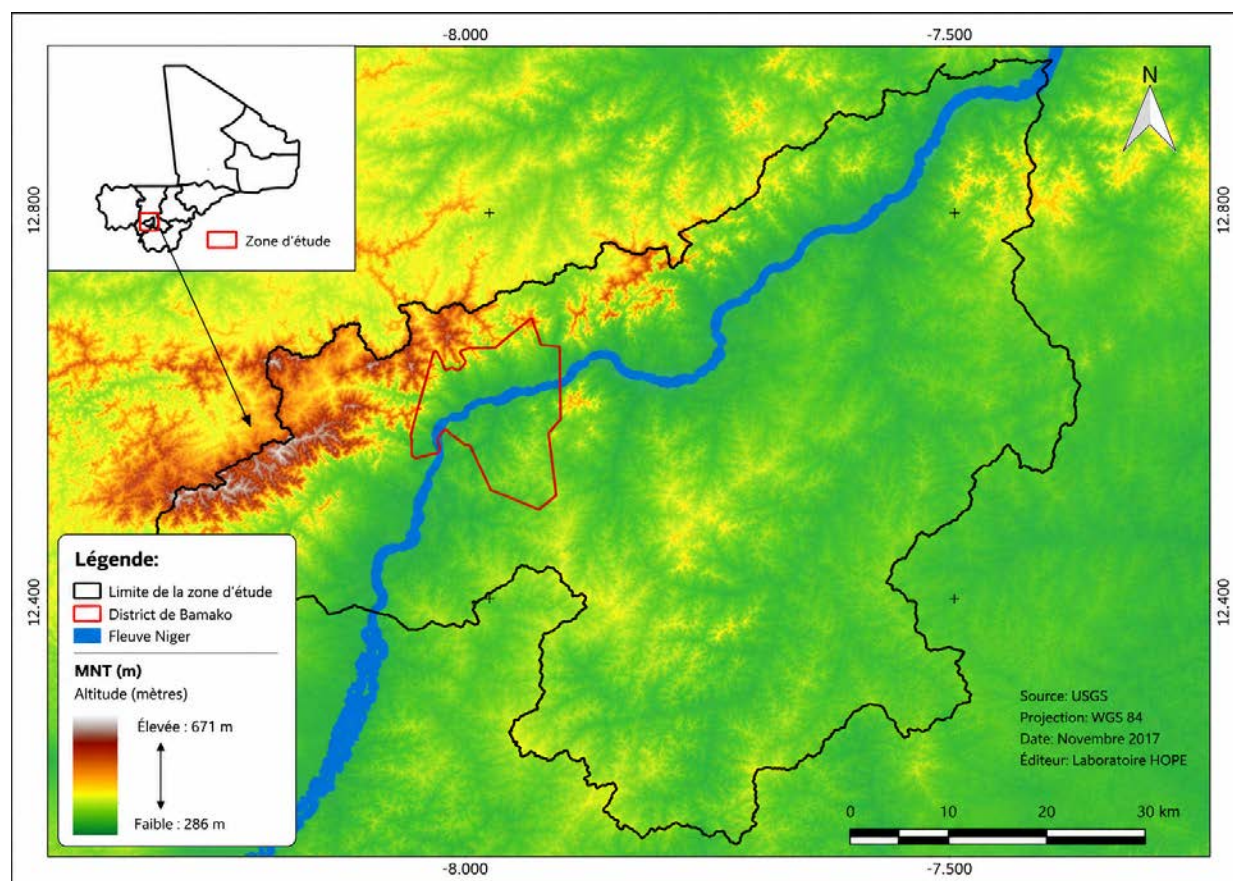


Figure 1. Présentation de la zone d'étude

2. Méthode et Matériels

Le schéma méthodologique présente une démarche intégrée destinée à établir les relations entre les caractéristiques du relief et les manifestations de la tectonique récente à l'aide d'outils SIG et de données topographiques. L'ensemble des traitements s'appuie sur un MNT de 30 m de résolution, utilisé comme principale source d'information. La première étape consiste à prétraiter le MNT, puis à réaliser une analyse hydrologique afin d'extraire le réseau de drainage et de délimiter le bassin versant. Les informations obtenues permettent ensuite de déterminer les paramètres altimétriques, géométriques, hydrographiques et morphologiques des fronts de montagne nécessaires à la caractérisation du bassin. Ces paramètres sont ensuite mobilisés pour calculer les principaux indices morphométriques (HI, Re, AF, T et Smf), considérés comme des indicateurs indirects de l'activité tectonique récente. Les valeurs calculées sont interprétées au regard des seuils et des classifications proposés dans la littérature scientifique. Enfin, les résultats sont confrontés aux études géologiques, géomorphologiques et tectoniques antérieures réalisées

dans la région afin de vérifier la cohérence des interprétations morphotectoniques et de renforcer la fiabilité des conclusions (Figure 2).

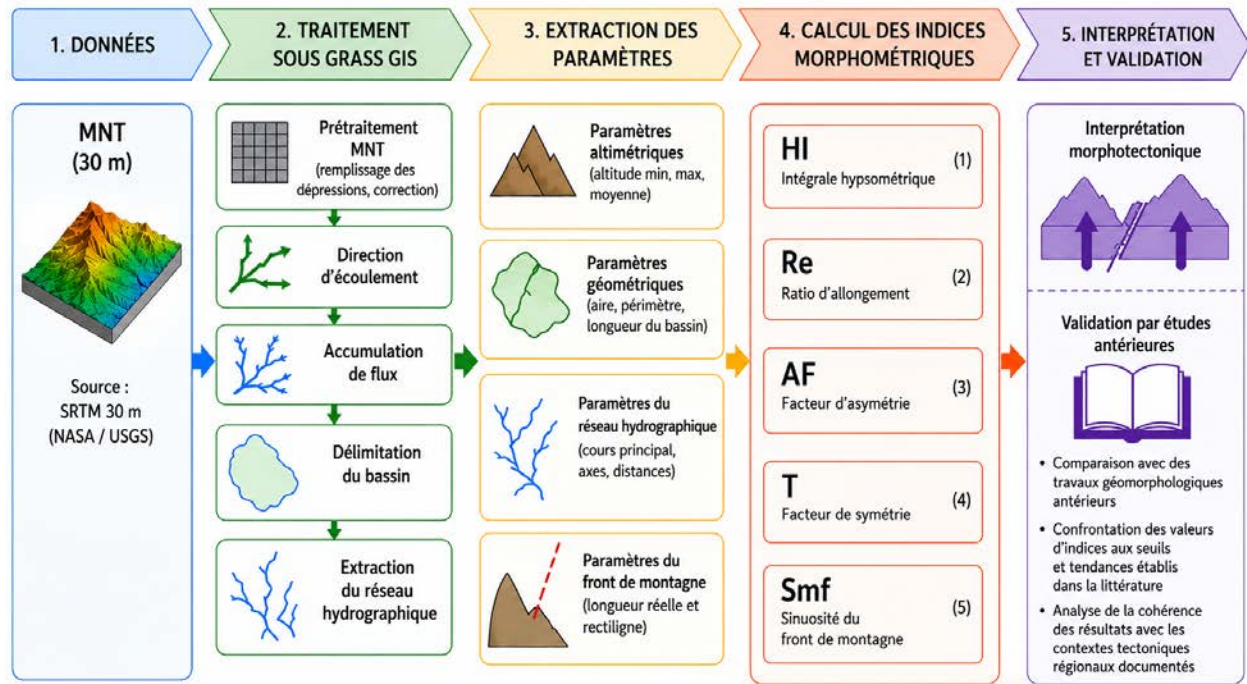


Figure 2. Processus d'analyses géomorphologiques de l'activité tectonique

2.1. Données et traitement

Les analyses morphométriques de cette étude sont basées sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) GL1 à haute résolution, distribué par la NASA et l'USGS. Ce jeu de données présente une résolution spatiale de 1 seconde d'arc (environ 30 mètres). Il constitue la donnée de base ayant permis l'extraction des paramètres topographiques essentiels, notamment l'altitude, la pente et la courbure, ainsi que la délimitation automatique du bassin versant et la génération du réseau hydrographique à l'aide d'outils SIG.

Le traitement des données a été entièrement réalisé dans l'environnement GRASS GIS, qui a assuré à la fois le prétraitement et l'analyse hydrologique du MNT. Les étapes successives comprennent : (i) la préparation, le remplissage des dépressions (pit removal) et la correction du MNT afin d'assurer la continuité hydrologique, (ii) l'extraction des directions d'écoulement et des accumulations de flux, (iii) la délimitation du bassin versant à partir du point d'exutoire, et (iv) la vectorisation du réseau hydrographique en vue des analyses morphométriques.

Afin d'affiner l'analyse spatiale et d'éviter de masquer les hétérogénéités locales, la zone d'étude a été sectorisée en deux grands ensembles hydrographiques distincts de part et d'autre du collecteur principal : les sous-bassins affluents de la rive gauche et ceux de la rive droite du fleuve Niger. Les indices globaux comme le Ratio d'Élongation (R_e) et le Facteur d'Asymétrie (AF) intègrent l'ensemble du système, tandis que l'Intégrale Hypsométrique (HI) et les paramètres de dispersion altimétrique ont été calculés séparément pour chaque rive.

Pour le calcul de la sinuosité du front de montagne (S_{mf}), l'analyse s'est focalisée sur les escarpements majeurs des plateaux mandingues encadrant la vallée du Niger, et plus particulièrement sur les segments frontaux de la falaise de Koulouba (rive gauche), qui s'alignent sur les couloirs de fractures héritées (NNE–SSW et NW–SE). La numérisation de la longueur réelle du front (L_{mf}) a été opérée à la rupture de pente marquant la transition entre le piémont et l'escarpement abrupt, tandis que la longueur rectiligne (L_s) s'appuie sur la direction générale de la structure.

Enfin, les résultats obtenus ont été confrontés aux seuils d'interprétation proposés dans la littérature ainsi qu'aux études géologiques, géomorphologiques et tectoniques antérieures réalisées dans la région de Bamako. Cette comparaison a permis de vérifier la cohérence des signatures morphotectoniques identifiées et de renforcer la robustesse des interprétations issues des analyses morphométriques.

2.2. Calcul et utilisation des indices morphométriques

L'analyse morphométrique repose sur le calcul de cinq indices géomorphologiques (HI , Re , AF , T et Smf), considérés comme des indicateurs indirects de l'activité tectonique récente et des processus morphodynamiques qui affectent les bassins versants. Ces indices ont été dérivés des paramètres extraits du MNT, à partir d'équations issues de la littérature scientifique, puis intégrés dans un environnement SIG afin de garantir une analyse spatiale cohérente, homogène et reproductible.

L' **HI** a été calculé à partir des valeurs minimales, maximales et moyennes des altitudes du bassin. Il permet d'évaluer le degré d'évolution du relief et de distinguer les secteurs jeunes, intermédiaires ou fortement érodés, traduisant ainsi le stade géomorphologique global du bassin versant, (équation 1).

Le **Re** a été obtenu à partir de la superficie du bassin et de sa longueur maximale. Il permet de caractériser la forme générale du bassin versant et constitue un indicateur indirect du contrôle structural et tectonique pouvant influencer son allongement et sa configuration spatiale, (équation 2).

Le **AF** a été calculé en comparant les superficies situées de part et d'autre du cours d'eau principal. Il permet de détecter les déséquilibres latéraux du bassin et de mettre en évidence une éventuelle inclinaison du relief liée à des mouvements tectoniques récents ou actifs, (Equation.3).

Le **T** a été déterminé à partir de la distance entre le cours d'eau principal et l'axe médian du bassin. Il permet d'évaluer la déviation du réseau hydrographique par rapport à une configuration théorique symétrique, et constitue ainsi un indicateur de migration ou de réajustement du chenal principal sous contrainte structurelle, (Equation.4).

Les valeurs obtenues ont été interprétées en les confrontant aux seuils proposés dans la littérature internationale sur la tectonique active (Strahler, 1952 ; Cox, 1994 ; Bull et McFadden, 1977 ; Kale

et Shejwalkar, 2008). L'analyse combinée de ces indices permet d'identifier les déséquilibres morphologiques du bassin versant et de quantifier le degré relatif d'activité tectonique.

Les équations utilisées pour le calcul des différents indices morphométriques sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Équations des indices

Paramètre morphométriques	Formules	Numéro des équations
Intégrale hypsométrique (HI)	$HI = \frac{\text{Moy elevation} - \text{Min elevation}}{\text{Max elevation} - \text{Min elevation}}$	(1)
Ratio d'élongation (Re)	$Re = 1,129 \frac{\sqrt{A}}{Lb}$	(2)
Facteur Asymétrie (AF)	$AF = 100 \left(\frac{Ar}{At} \right)$	(3)
Facteur de Symétrie (T)	$T = \frac{Da}{Dd}$	(4)
Sinuosité de front de montagne (S_{mf})	$S_{mf} = L_{mf} / L_s$	(5)

où H_{moy} représente l'altitude moyenne du bassin versant, H_{min} l'altitude minimale, H_{max} l'altitude maximale, A la superficie du bassin versant, Lb la longueur maximale du bassin, Ar la superficie située à droite du cours d'eau principal, At la superficie totale du bassin versant, Da la distance entre le cours d'eau principal et l'axe médian du bassin, Dd la distance entre l'axe médian et la limite du bassin, L_{mf} la longueur réelle du front de montagne et L_s la longueur rectiligne du front de montagne.

Enfin, le **S_{mf}** a été calculé comme le rapport entre la longueur réelle du front de montagne (L_{mf}) et sa longueur rectiligne (L_s) selon l'équation (5). Afin d'améliorer la résolution spatiale de l'analyse, les fronts montagneux ont été subdivisés en plusieurs segments homogènes correspondant aux principaux escarpements structuraux. Pour chaque segment, L_{mf} a été mesurée le long de la rupture de pente, tandis que L_s représente la distance rectiligne entre les extrémités du front. Cet indice permet d'évaluer l'équilibre entre l'érosion latérale, qui augmente la sinuosité des fronts, et le contrôle tectonique, qui favorise le maintien d'escarpements rectilignes. Les valeurs obtenues ont été comparées aux classes proposées par Bull et McFadden (1977).

Les valeurs obtenues ont ensuite été interprétées à partir des seuils proposés dans la littérature afin d'évaluer le degré d'activité tectonique du bassin versant du fleuve Niger à Bamako et dans ses environs.

3. Résultats

Cette section expose les principaux résultats de l'étude morphologique et morphométrique du bassin versant du fleuve Niger à Bamako et dans ses environs. Elle vise à décrire l'organisation du relief, la répartition des altitudes ainsi que la configuration du réseau hydrographique afin de mieux appréhender la dynamique géomorphologique du bassin.

L'analyse s'appuie notamment sur les paramètres de pente, d'altitude et sur les courbes hypsométriques établies pour les deux rives du fleuve. Elle intègre également plusieurs indices géomorphologiques destinés à apprécier l'activité tectonique récente et le niveau d'évolution du bassin, notamment l'intégrale hypsométrique, le ratio d'élongation, le facteur d'asymétrie, le facteur de symétrie transversale et la sinuosité du front de montagne. L'interprétation conjointe de ces indicateurs met en évidence les contrastes morphologiques entre les deux rives du bassin et souligne les contrôles structuraux susceptibles d'influencer son évolution géodynamique.

3.1. Analyse morphologique du bassin versant

- **Relief**, les caractéristiques du relief des deux rives du fleuve Niger à Bamako ont été analysées à partir de paramètres statistiques de dispersion. Les résultats montrent une distribution altimétrique fortement irrégulière au sein du bassin versant. La rive gauche présente un relief nettement plus accidenté, avec des altitudes variant de 289 à 671 m, ce qui traduit un paysage montagneux marqué. À l'inverse, la rive droite est globalement plus basse, avec des altitudes comprises entre 292 et 505 m. Les paramètres statistiques de dispersion corroborent cette dissymétrie. L'écart-type atteint 84,74 m sur la rive gauche, contre 56,99 m sur la rive droite, traduisant une variabilité topographique plus marquée dans la première. Cette tendance est également observée à travers les coefficients de variation, qui s'élèvent respectivement à 20,38 % et 15,53 %. L'ensemble de ces résultats confirme l'existence d'un contraste morphologique prononcé entre les deux rives du bassin.

- **Pente**, constitue un paramètre morphologique déterminant, influençant directement la dynamique hydrologique et notamment le débit de pointe lors des épisodes pluvieux. Dans le bassin versant du fleuve Niger à Bamako et dans ses environs, les pentes varient de 0° à 40°. La classe dominante est celle de 0–5°, qui occupe 4169 km², soit 77,01 % de la superficie totale. Elle est suivie des classes 15–30° (20,84 %) et 30–40° (2,04 %). Cette distribution montre la prédominance de faibles pentes, caractéristiques d'un bassin globalement peu accidenté, malgré la présence de zones localement escarpées.

- **Altitudes**, La répartition altimétrique du bassin est hétérogène, avec des altitudes variant de 286 à 671 m. La tranche comprise entre 286 et 384 m est largement prédominante et couvre 4 424 km², soit 81,38 % de la superficie totale. Elle est suivie des classes 384–480 m (658 km² ; 12,11 %), 481–575 m (289 km² ; 5,31 %) et 575–671 m (65 km² ; 1,20 %). Cette répartition traduit une nette prédominance des basses altitudes, caractéristique d'un relief globalement peu accidenté à faiblement ondulé, tandis que les secteurs les plus élevés restent essentiellement concentrés sur la rive gauche.

- **La courbe hypsométrique**, ou hypsométrie, exprime la relation entre l'altitude et la surface d'un bassin versant (Langbein, 1947 ; Strahler, 1952). Elle permet d'évaluer le degré d'évolution morphologique ainsi que la sensibilité du relief à l'érosion, et constitue un outil important pour analyser les stades d'évolution des paysages. Dans le bassin versant du fleuve Niger à Bamako,

les courbes hypsométriques des deux rives présentent une distribution altimétrique irrégulière, ce qui traduit une organisation non homogène du relief. Comme l'illustre la Figure 3, la courbe hypsométrique de la rive gauche est plus concave que celle de la rive droite. Cette configuration traduit un stade d'évolution plus avancé, caractérisé par une érosion plus marquée et un abaissement plus important des reliefs, témoignant ainsi d'une plus grande maturité géomorphologique. À l'inverse, la rive droite présente une courbe moins concave, correspondant à une évolution légèrement moins avancée et à une érosion plus modérée. L'ensemble de ces observations met en évidence une dissymétrie morphologique entre les deux rives du bassin.

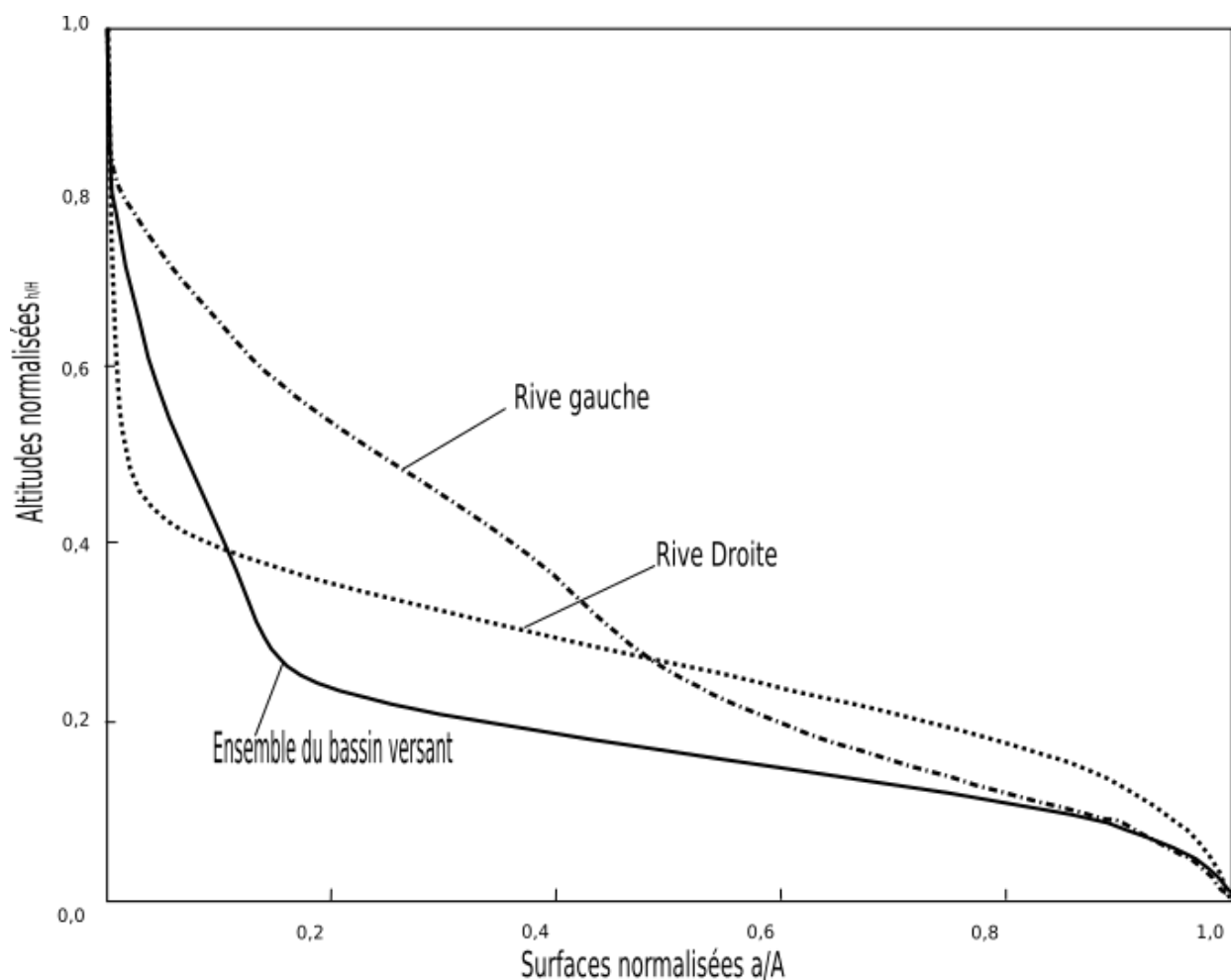


Figure 3. Courbe hypsométrique

- **Organisation du réseau hydrographique**, Le bassin versant du fleuve Niger à Bamako est drainé par un cours d'eau principal de 5^e ordre, traduisant un réseau hydrographique bien hiérarchisé et relativement développé. L'examen de son organisation révèle une dissymétrie entre les deux rives du fleuve. La densité de drainage est plus élevée sur la rive gauche, ce qui témoigne d'une incision plus importante des talwegs et d'un réseau secondaire mieux développé dans cette partie du bassin.

Cette dissymétrie apparaît également dans la répartition des affluents. La rive gauche en compte 40, contre 29 sur la rive droite, mettant en évidence une différence marquée dans le

développement du drainage. Ce contraste traduit des réponses morphologiques distinctes des deux versants face aux processus d'érosion et d'écoulement. La rive gauche se caractérise ainsi par un drainage plus dense et une sensibilité potentiellement plus élevée à l'érosion linéaire, tandis que la rive droite présente un réseau moins développé. Cette organisation spatiale contrastée du bassin versant pourrait résulter de l'influence combinée de facteurs lithologiques, structuraux et tectoniques, Figure 4.

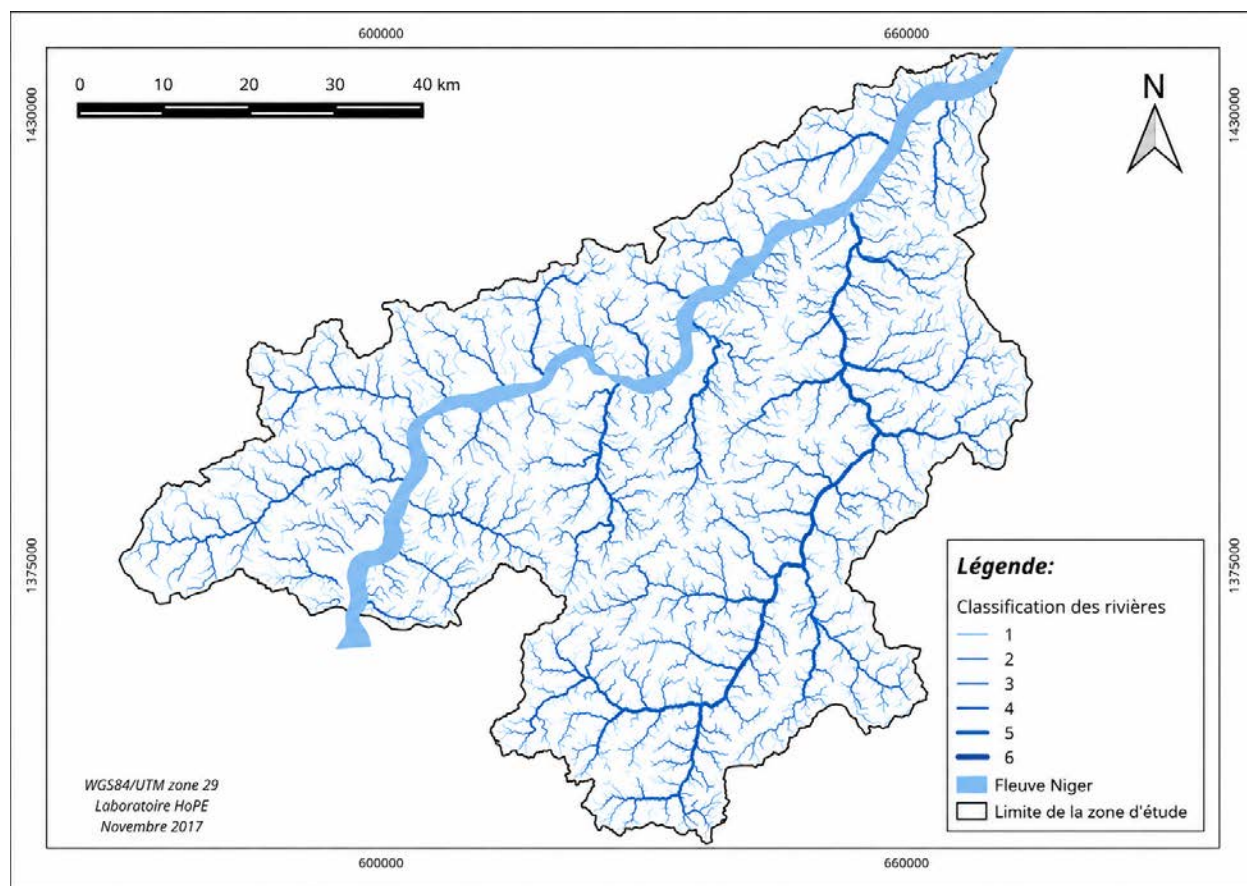


Figure 4. Organisation des réseaux hydrographiques

3.2. Analyse des indices géomorphologiques de l'activité tectonique

Afin d'évaluer l'influence de la tectonique sur l'évolution du bassin versant du fleuve Niger à Bamako et dans ses environs, cinq indices géomorphologiques ont été calculés à partir du modèle numérique d'élévation. Ces indices permettent d'apprécier l'état d'évolution du relief, la géométrie du bassin versant ainsi que les déséquilibres morphologiques susceptibles de traduire une activité tectonique récente.

✓ Évolution géomorphologique du bassin :

Selon Strahler (1952), des valeurs de HI inférieures à 0,40 sont généralement associées à des reliefs matures ou fortement érodés, correspondant à un stade de vieillesse ou de pénélplanation. La valeur obtenue dans cette étude ($HI = 0,20$) montre que le bassin versant présente un niveau avancé d'évolution géomorphologique, caractérisé par une érosion importante et un abaissement généralisé des reliefs. Cette interprétation est en accord avec le contexte géologique d'un ancien

craton. Néanmoins, un faible indice HI renseigne avant tout sur le degré de maturité du relief et ne permet pas, à lui seul, d'écarter l'hypothèse de réactivations tectoniques plus récentes.

✓ Géométrie du bassin et contrôle tectonique :

Le ratio d'élongation ($Re = 0,60$) indique un bassin relativement allongé. D'après Kale et Shejwalkar (2008), les valeurs comprises entre 0,50 et 0,75 correspondent à des bassins soumis à une activité tectonique modérée. Cette géométrie suggère que l'organisation spatiale du bassin est partiellement contrôlée par les structures géologiques.

Le facteur d'asymétrie ($AF = 70,85\%$) met en évidence une dissymétrie marquée entre les deux rives du bassin. Selon Gardner (1987), une valeur s'écartant significativement de 50 % traduit une inclinaison du bassin par rapport au cours d'eau principal. Dans le bassin étudié, la différence absolue $|AF - 50|$ atteint 20,85, ce qui correspond à une influence tectonique significative (El Hamdouni et al., 2008). Cette asymétrie se traduit également par une répartition inégale des superficies : la rive gauche représente seulement 29,15 % de la superficie totale du bassin, contre 70,85 % pour la rive droite (Figure 5). Cette configuration suggère un basculement tectonique ayant influencé l'organisation actuelle du réseau hydrographique.

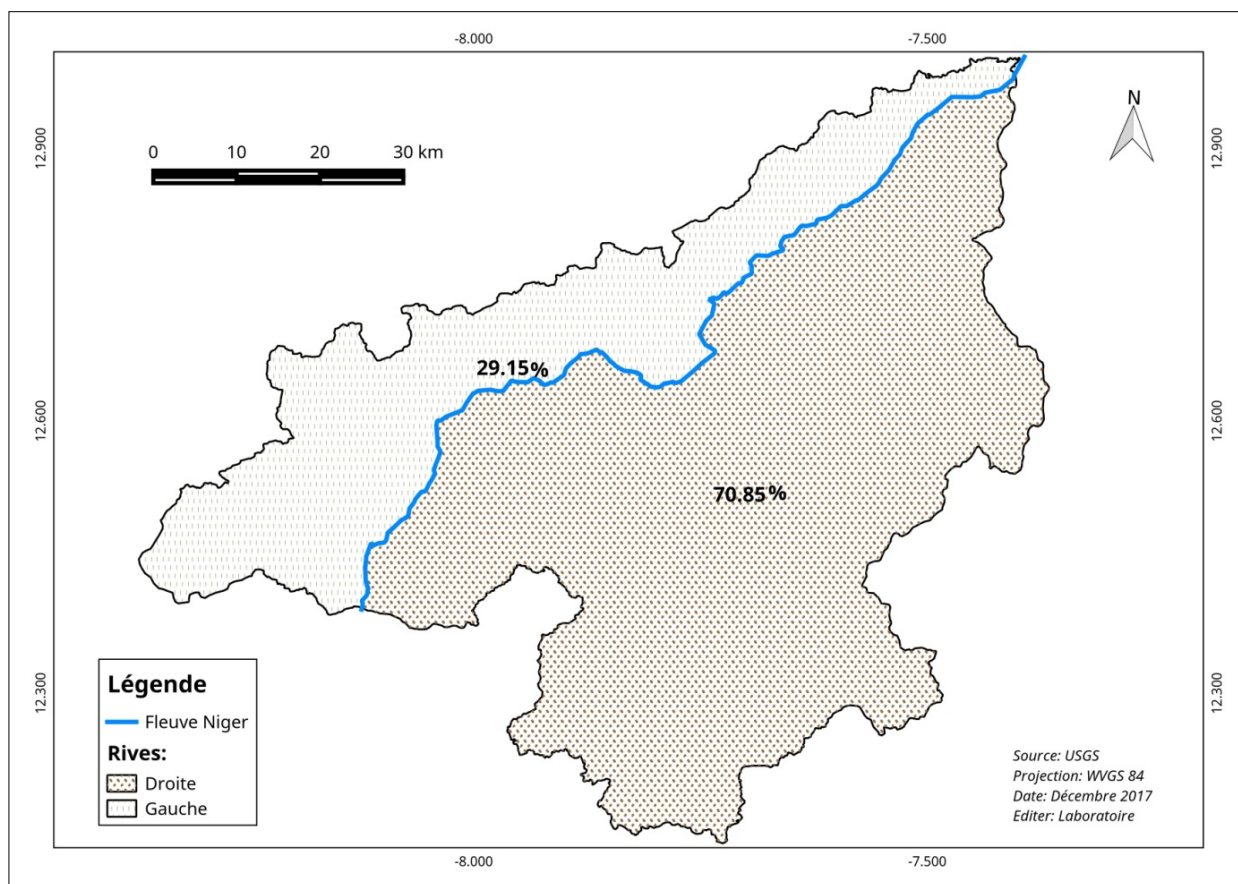


Figure 5. Facteur d'Asymétrie

Le T permet également d'évaluer l'asymétrie du bassin versant, à l'instar de AF , mais il se concentre plus particulièrement sur la position du cours d'eau principal par rapport à l'axe médian

du bassin. Cet indice renseigne ainsi sur d'éventuels déplacements latéraux du chenal, susceptibles de résulter d'une inclinaison tectonique du bassin.

Dans la zone d'étude, le tracé du fleuve Niger à Bamako présente plusieurs déviations et des méandres irréguliers. Cette configuration pourrait être liée aux mouvements tectoniques mis en évidence dans les sédiments quaternaires de la vallée du Niger à Bamako par Dembélé, et Palé (2026). Ces déformations affectent non seulement les dépôts sédimentaires, mais également l'organisation du réseau hydrographique, comme l'illustre la Figure 5.

Selon Cox (1994), l'asymétrie du bassin augmente à mesure que la valeur du T se rapproche de 1. Dans cette étude, la valeur moyenne calculée sur trois segments du cours principal est de 0,60. Cette valeur traduit une asymétrie notable du bassin versant et suggère un déplacement du cours d'eau principal par rapport à sa position théorique d'équilibre. Conformément à la classification proposée par Cox et Van Arsdale (2001), ce résultat met en évidence une influence tectonique significative sur l'organisation du drainage et confirme l'existence d'un contrôle structural dans l'évolution morphologique du bassin versant du fleuve Niger à Bamako, (Figure 6).

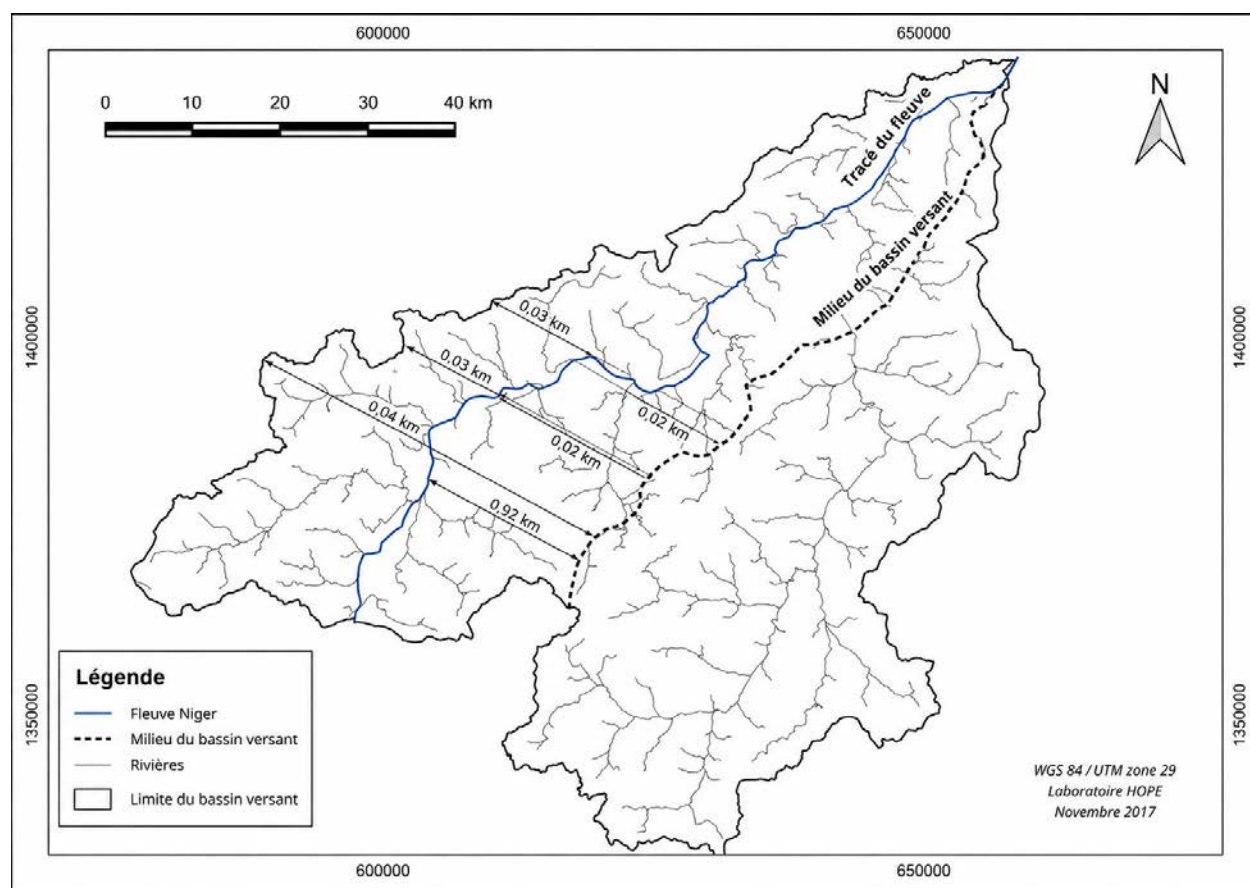


Figure 6. Symétrie du bassin versant

La sinuosité du front de montagne (S_{mf}) reflète l'équilibre entre les processus d'érosion, qui tendent à entailler et à fragmenter les fronts montagneux, et les forces tectoniques, qui favorisent

au contraire la formation de fronts rectilignes associés à des structures de failles actives. Selon la classification de Bull et McFadden (1977), des valeurs de S_{mf} comprises entre 1,0 et 1,6 indiquent des fronts montagneux tectoniquement actifs, peu modifiés par l'érosion latérale.

Dans le bassin versant du fleuve Niger à Bamako, notamment le long des escarpements des plateaux gréseux (falaise de Koulouba), la valeur moyenne de la sinuosité du front de montagne obtenue est de 1,12. Cette faible valeur, proche de 1,0, indique un front géométriquement rectiligne. Ce résultat démontre un contrôle structural majeur et persistant sur la morphologie du relief, compatible avec l'existence de processus tectoniques récents ou actifs dans la zone d'étude, venant limiter l'action de l'érosion latérale, (Figure 7).

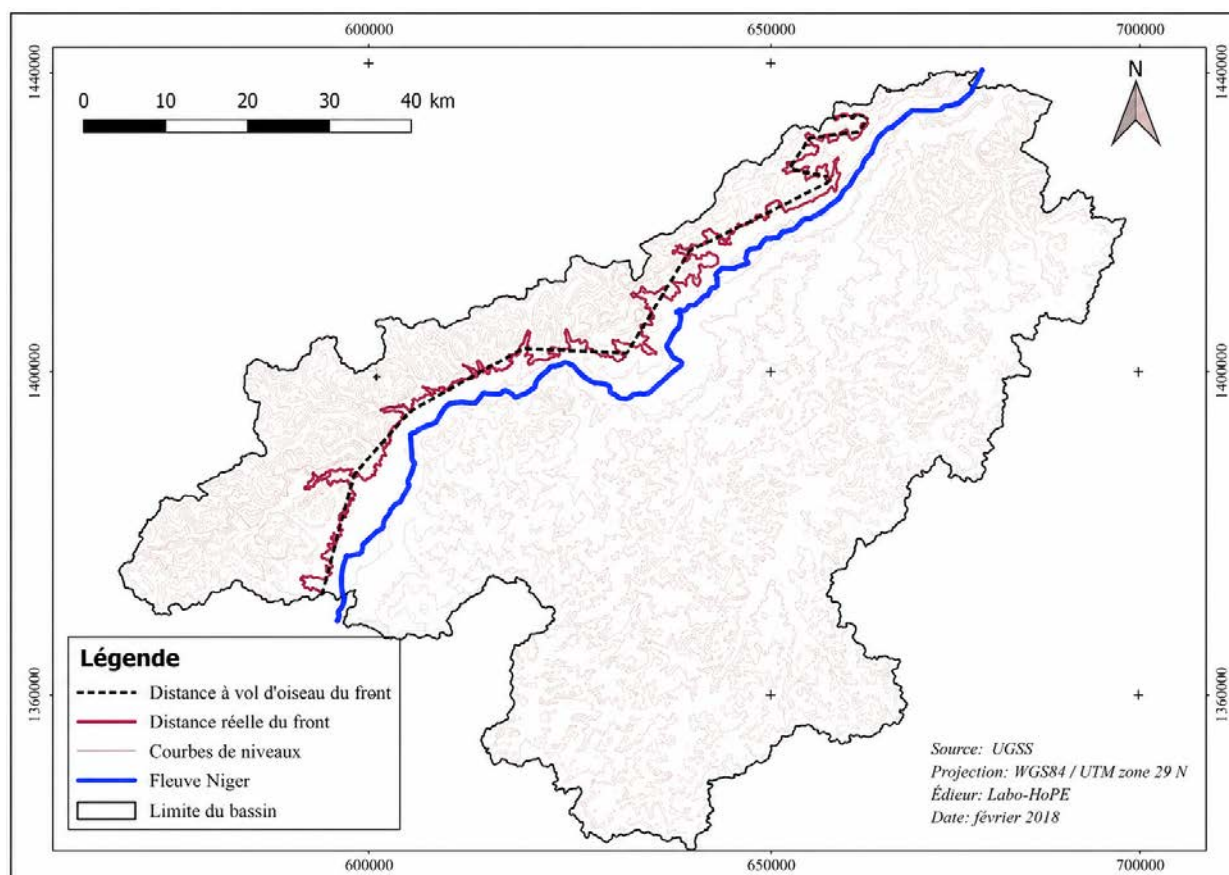


Figure 7. Sinuosité de front de montagne

Conformément aux recommandations de Bull et McFadden (1977), le front montagneux a été subdivisé en cinq segments homogènes correspondant aux principaux escarpements structuraux de la falaise de Koulouba. Chaque segment a été numérisé directement dans l'environnement SIG à partir du modèle numérique de terrain afin de mesurer la longueur réelle du front (L_{mf}) et sa longueur rectiligne (L_s). Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.

La subdivision du front montagneux en plusieurs segments permet de limiter l'effet des variations locales de la morphologie et d'obtenir une valeur moyenne du S_{mf} plus représentative du contrôle

tectonique régional. La faible dispersion des valeurs (1,11 à 1,15) traduit une relative homogénéité morphologique du front de la falaise de Koulouba et renforce la robustesse de l'interprétation.

Tableau 2. Calcul du S_{mf} par segments

Segment du front montagneux	Longueur réelle du front L_{mf} (m)	Longueur rectiligne L_s (m)	$S_{mf} = L_{mf}/L_s$	Interprétation tectonique
S1	4 850	4 320	1,12	Front rectiligne – contrôle tectonique élevé
S2	5 620	5 000	1,12	Front rectiligne – activité tectonique récente probable
S3	4 970	4 420	1,12	Front peu sinueux – faible érosion latérale
S4	3 890	3 500	1,11	Contrôle structural dominant
S5	3 460	3 020	1,15	Front légèrement plus sinueux mais tectoniquement contrôlé
Valeur moyenne	—	—	1,12	Classe 1 : front tectoniquement actif (Bull & McFadden, 1977)

Les indices géomorphologiques calculés à partir des équations présentées dans le Tableau 2 mettent en évidence une influence tectonique significative sur la morphologie du bassin versant du fleuve Niger à Bamako.

Enfin, la faible valeur de la sinuosité du front de montagne ($S_{mf} = 1,12$) correspond à un front géométriquement rectiligne (Classe 1 de Bull et McFadden, 1977). Ce résultat est caractéristique des zones où le contrôle structural et le soulèvement tectonique restent dominants par rapport aux processus d'érosion latérale, empêchant le recul et la dissection prononcée des escarpements.

Dans l'ensemble, la combinaison de ces indices met en évidence un bassin versant morphologiquement mature au niveau de ses plaines (comme l'indique la faible valeur de l'intégrale hypsométrique), mais présentant des signatures claires d'une activité tectonique modérée à active (traduite par le facteur d'asymétrie et la faible sinuosité des fronts). Ces dynamiques influencent directement l'organisation spatiale du réseau hydrographique et l'évolution géomorphologique contemporaine de cette portion du Craton Ouest-Africain.

Les valeurs du facteur de sinuosité du front de montagne (S_{mf}) calculées pour chacun des cinq segments de la falaise de Koulouba présentent une faible variabilité. Le Tableau 3 résume les principales statistiques descriptives obtenues, permettant d'apprécier la cohérence spatiale de cet indice à l'échelle du front montagneux étudié.

Tableau. Statistiques descriptives des valeurs du Smf

Variable Statistique	Valeur
Nombre de segments analysés	5
Smf minimum	1,11
Smf maximum	1,15
Smf moyen	1,12
Écart-type	0,02

Les valeurs du Smf sont comprises entre 1,11 et 1,15, avec une moyenne de 1,12 et un écart-type de 0,02, traduisant une très faible dispersion entre les segments étudiés. Cette homogénéité reflète un contrôle structural relativement constant le long de la falaise de Koulouba et s'accorde avec une activité tectonique récente, conformément à la classification proposée par Bull et McFadden (1977).

Les différents indices morphométriques calculés permettent d'évaluer le degré d'évolution géomorphologique du bassin versant ainsi que les signatures potentielles de l'activité tectonique récente. Le Tableau 4 présente une synthèse des valeurs obtenues, des formules utilisées et de leur interprétation selon les classifications proposées dans la littérature.

Tableau 4. Synthèse des indices géomorphologiques

Paramètres morphométriques	Formules	Valeurs des indices	État du bassin versant / Interprétation
Intégrale hypsométrique (HI)	$HI = \frac{H_{moy} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$	0,20	Stable (Stade mature / Vieillesse)
Ratio d'élongation (R_e)	$R_e = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{A}}{L_b}$	0,60	Moyennement Actif (Forme allongée)
Facteur d'Asymétrie (AF)	$AF = \frac{A_r}{A_t} \cdot 100$	70,85 %	Instable (Tectonique active / Basculement)
Facteur de Symétrie (T)	$T = \frac{D_a}{D_d}$	0,60	Instable (Tectonique active / Migration du chenal)
Sinuosité du front de montagne (S_{mf})	$S_{mf} = \frac{L_{mf}}{L_s}$	1,12	Instable (Tectonique active / Front rectiligne)

3.3. Validation des résultats et perspectives de recherche

Les résultats obtenus ont été confrontés aux données géologiques et géomorphologiques disponibles sur la région de Bamako afin d'évaluer la cohérence de l'analyse morphotectonique.

Les indices géomorphologiques calculés ($HI = 0,20$; $Re = 0,60$; $AF = 70,85 \%$; $T = 0,60$; $Smf = 1,12$) mettent en évidence un bassin mature présentant une dissymétrie marquée, un basculement du réseau hydrographique et des fronts montagneux faiblement sinueux, caractéristiques d'une activité néotectonique modérée à active.

Cette analyse est cohérente avec les travaux de Dars (1961), Carrère (1972) et Travi (1980), qui décrivent un réseau dense de discontinuités précambriennes orientées principalement NNE–SSW, NNW–SSE, WNW–ESE et E–W dans la région de Bamako. La concordance entre ces directions structurales et la rectitude de la falaise de Koulouba, caractérisée par une valeur moyenne de $Smf = 1,12$, met en évidence le rôle du contrôle structural dans l'organisation du relief.

Cette interprétation est confortée par les travaux récents de Dembélé et Palé (2026), qui décrivent, dans les dépôts quaternaires de la rive droite du fleuve Niger à Bamako, des dykes clastiques, des structures de liquéfaction, des failles ainsi que des microfailles, interprétés comme les marqueurs d'une activité sismique quaternaire. Selon ces auteurs, ces déformations sont postérieures à environ 170 ka et constituent des indices directs d'une néotectonique active dans la région. La concordance entre ces observations géologiques et les indices géomorphologiques obtenus dans la présente étude renforce la crédibilité des interprétations proposées.

L'analyse repose sur un MNT de 30 m de résolution. Bien qu'il offre une couverture homogène à l'échelle du bassin, ce jeu de données présente une erreur quadratique moyenne verticale (RMSE) d'environ $\pm 8,15$ m. Cette incertitude altimétrique reste limitée pour le calcul de l'intégrale hypsométrique (HI), compte tenu de l'amplitude topographique de la rive gauche (385 m, entre 289 m et 671 m), et n'affecte donc pas l'interprétation du stade de maturité du bassin ($HI = 0,20$). En revanche, dans les plaines de la rive droite, où les pentes varient de 0 à 5°, cette résolution réduit la capacité à détecter les microformes du relief et les faibles ruptures de pente susceptibles de révéler des déformations récentes. Les résultats présentés doivent ainsi être interprétés comme une estimation prudente de l'expression morphologique de l'activité néotectonique régionale.

Pour mieux caractériser les mécanismes de déformation, de futurs travaux pourraient s'appuyer sur des modèles numériques de terrain à très hautes résolutions issues du LiDAR aéroporté ou de l'imagerie Pléiades, afin de mettre en évidence les microformes topographiques non résolues par le MNT utilisé. L'association de ces données avec des techniques géodésiques, notamment l'InSAR et les réseaux GPS permanents, offrirait également la possibilité de mesurer les déplacements crustaux actuels et d'estimer les taux de déformation dans cette partie du Craton Ouest-Africain.

4. Discussion

La présente étude met en évidence plusieurs anomalies morphométriques au sein du bassin versant du fleuve Niger à Bamako, qui suggèrent l'existence d'une activité néotectonique dans un domaine intracratonique généralement considéré comme stable. Si le Craton Ouest-Africain est habituellement décrit comme une province tectonique faiblement active, des études récentes indiquent que la réactivation de structures héritées peut encore exercer une influence sur la morphologie des bassins versants et sur l'organisation des réseaux de drainage. Les indices

géomorphologiques analysés dans ce travail permettent ainsi de différencier les formes héritées de la longue évolution érosive du relief de celles susceptibles de refléter un contrôle structural plus récent.

La faible valeur de l'intégrale hypsométrique ($HI = 0,20$) traduit un bassin mature ayant subi une érosion importante au cours de son évolution. Selon Strahler (1952), les valeurs inférieures à 0,40 caractérisent des paysages anciens dominés par les processus d'abaissement du relief. Toutefois, dans les contextes intracratoniques, un faible HI n'exclut pas l'existence d'une activité tectonique récente. Comme l'ont montré Keller et Pinter (2002) et Bull (2007), des mouvements tectoniques de faible amplitude peuvent affecter des reliefs fortement érodés sans modifier profondément leur stade d'évolution géomorphologique. Ainsi, la maturité du bassin versant du Niger à Bamako apparaît compatible avec l'existence de réactivations tectoniques discrètes.

La géométrie du bassin renforce cette interprétation. Le ratio d'élongation ($Re = 0,60$) traduit un bassin modérément allongé, généralement associé à une influence tectonique intermédiaire (Kale et Shejwalkar, 2008). Cette configuration peut résulter d'un contrôle structural exercé par les principales discontinuités précambriennes décrites dans la région de Bamako (Dars, 1961 ; Carrère, 1975 ; Travi, 1980). De même, le facteur d'asymétrie ($AF = 70,85 \%$) révèle une dissymétrie marquée du bassin, largement supérieure à la valeur d'équilibre théorique de 50 %. Selon Gardner (1987) et El Hamdouni et al. (2008), de telles valeurs traduisent généralement un basculement tectonique du bassin versant, susceptible de modifier progressivement l'organisation du drainage.

Cette interprétation est également appuyée par le facteur de symétrie transversale ($T = 0,60$), qui met en évidence une migration latérale du cours principal du fleuve Niger par rapport à l'axe médian du bassin. D'après Cox (1994), un tel décalage constitue un indicateur pertinent d'une déformation tectonique progressive affectant l'évolution du bassin versant. Le facteur de sinuosité du front de montagne ($Smf = 1,12$) complète cette analyse en traduisant la présence de fronts montagneux peu sinueux et relativement rectilignes. Selon la classification de Bull et McFadden (1977), des valeurs proches de 1 reflètent un contrôle structural prononcé et sont généralement associées à une activité néotectonique modérée à active, pour laquelle les mouvements tectoniques compensent, au moins en partie, l'érosion des escarpements.

L'interprétation morphotectonique issue de cette étude s'appuie également sur les connaissances géologiques acquises dans la région de Bamako. Les travaux de Dars (1961), Carrère (1975) et Travi (1980) mettent en évidence un réseau dense de failles et de fractures précambriennes, orientées principalement NNE–SSW, NNW–SSE, WNW–ESE et E–W, qui contrôlent durablement l'organisation du relief. Plus récemment, Dembélé et Palé (2026) ont décrit, dans les dépôts quaternaires de la vallée du fleuve Niger à Bamako, des dykes clastiques, des structures de liquéfaction, ainsi que des failles et des microfailles, interprétés comme les marqueurs d'une activité sismique quaternaire. Ces observations apportent des éléments géologiques indépendants en faveur d'une néotectonique active dans la région et sont cohérentes avec les anomalies morphométriques mises en évidence dans la présente étude. La concordance entre les données

géologiques et les indices géomorphologiques conforte ainsi l'interprétation morphotectonique proposée.

Malgré l'intérêt des résultats obtenus, plusieurs limites doivent être prises en considération. L'analyse s'appuie sur un modèle numérique de terrain SRTM de 30 m de résolution. Si cette résolution est adaptée à la caractérisation des principales formes du relief à l'échelle du bassin versant, elle reste insuffisante pour mettre en évidence les microformes topographiques liées à des déformations de faible amplitude. En outre, les interprétations proposées sont cohérentes avec les observations géologiques disponibles, mais l'absence de données géodésiques ainsi que de contraintes chronologiques directes ne permet pas d'estimer les taux actuels de déformation ni de dater avec précision les épisodes tectoniques à l'origine des anomalies morphologiques observées.

Les travaux à venir gagneraient à s'appuyer sur une approche multi-source associant des modèles numériques de terrain à très hautes résolutions issues du LiDAR aéroporté ou de l'imagerie Pléiades, des observations InSAR, des mesures fournies par des réseaux GPS permanents, des investigations structurales de terrain ainsi que des méthodes de datation absolue, notamment la OSL et les isotopes cosmogéniques. Une telle démarche offrirait une meilleure compréhension des mécanismes de déformation actuels, permettrait d'en estimer l'évolution au cours du temps et contribuerait à préciser l'influence des structures héritées sur la dynamique morphotectonique du Craton Ouest-Africain.

Dans son ensemble, cette étude propose une première évaluation quantitative des signatures morphotectoniques du bassin versant du fleuve Niger à Bamako. La cohérence entre les indices géomorphologiques obtenus et les observations géologiques récentes apporte des éléments convaincants en faveur d'une activité néotectonique modérée à active. Ces résultats invitent à reconsidérer l'hypothèse d'une stabilité tectonique absolue du Craton Ouest-Africain dans la région de Bamako et mettent en évidence l'intérêt des approches géomorphométriques, combinées aux SIG et à la télédétection, pour l'analyse des déformations tectoniques de faible amplitude dans les environnements intracratoniques.

Conclusion :

Cette étude a consisté à évaluer l'activité néotectonique du bassin versant du fleuve Niger à Bamako à partir de cinq indices géomorphologiques calculés à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de 30 m de résolution. Les résultats montrent que l'intégrale hypsométrique ($HI = 0,20$) correspond à un relief fortement érodé, témoignant d'un stade avancé d'évolution géomorphologique caractéristique des paysages anciens. À l'inverse, le ratio d'élongation ($Re = 0,60$) traduit une géométrie modérément allongée du bassin, tandis que le facteur d'asymétrie ($AF = 70,85 \%$) met en évidence une dissymétrie marquée, compatible avec un basculement du bassin versant. Le facteur de symétrie transversale ($T = 0,60$) indique également un déplacement latéral du cours principal du fleuve Niger par rapport à l'axe médian du bassin, suggérant l'influence d'une déformation tectonique récente. Enfin, la valeur du facteur de sinuosité du front de montagne ($Smf = 1,12$) reflète la présence de fronts montagneux peu sinueux et relativement rectilignes,

généralement interprétés comme l'expression d'un contrôle structural associé à une activité néotectonique modérée à active.

Dans leur ensemble, ces résultats indiquent que, malgré un relief géomorphologiquement mature, le bassin versant conserve des signatures morphotectoniques compatibles avec une activité néotectonique modérée à active. Cette interprétation s'inscrit en cohérence avec les données géologiques disponibles pour la région de Bamako, notamment celles relatives aux discontinuités structurales précambriennes ainsi qu'aux structures sismotectoniques quaternaires récemment décrites, parmi lesquelles figurent des dykes clastiques, des failles et des microfailles. Ces éléments constituent des indices géologiques indépendants en faveur d'une néotectonique active dans la région. La concordance entre ces observations et les indices géomorphologiques obtenus dans cette étude conforte l'interprétation morphotectonique proposée. L'ensemble de ces résultats conduit ainsi à reconsidérer l'hypothèse d'une stabilité tectonique absolue du Craton Ouest-Africain dans la région de Bamako et met en évidence l'influence durable des structures héritées sur l'organisation du réseau hydrographique et l'évolution du relief.

Cette étude met également en évidence l'apport des indices géomorphologiques, combinés aux SIG et à la télédétection, pour l'identification de déformations tectoniques de faible amplitude dans les environnements intracratoniques. À l'avenir, l'intégration de modèles numériques de terrain à très haute résolution, issus du LiDAR aéroporté ou de l'imagerie Pléiades, associée aux observations InSAR, aux investigations structurales de terrain et aux méthodes de datation absolue, devrait permettre d'améliorer l'estimation des taux de déformation et de préciser la chronologie des événements néotectoniques affectant la région de Bamako.

Références

1. Black, R., Caby, R., Moussine-Pouchkine, A., Bayer, R., Bertrand, J.M., Boullier, A.M., Fabre, J. and Lesquer, A. 1980. *The West African Craton*. In: *The Geology of Africa*. Oxford University Press, Oxford.
2. Bull, W.B. 2007. *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology*. Blackwell Publishing, Malden, MA.
3. Bull, W.B. and McFadden, L.D. 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California. In: Doebling, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions*. Publications in Geomorphology, State University of New York at Binghamton, pp. 115–138.
4. Burbank, D.W. and Anderson, R.S. 2011. *Tectonic Geomorphology*. 2nd ed. Wiley-Blackwell, Chichester.
5. Carrère, J. M. 1972. Stratigraphie des formations gréseuses attribuées au Protérozoïque supérieur de la région de Bamako (Mali). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7e série, t. XIV, n° 1-5, p. 192-196.
6. Cox, R.T. 1994. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi Embayment. *Geological Society of America Bulletin*, 106(5): 571–581.

7. Cox, R.T. et Van Arsdale, R.B. 2001. Identification of possible Quaternary deformation in the northeastern Mississippi Embayment using quantitative geomorphic analysis of drainage-basin asymmetry. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 113, n° 5, p. 615-624.
8. Dars, R. 1961. *Notice explicative de la carte géologique de l'Afrique de l'Ouest*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Paris.
9. Dembélé, N.J et Palé, S. 2026. Les dykes clastiques du profil alluvial de la rive droite du fleuve Niger à Bamako : témoins d'une séismicité quaternaire / Clastic dikes of the alluvial profile of the right bank of the Niger River in Bamako: Evidence of Quaternary seismicity. *Revue de Géographie du Bénin*, 37: 96–117.
10. El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J. and Keller, E.A. 2008. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1–2): 150–173.
11. Ganne, J., De Andrade, V., Weinberg, R. F., Vidal, O., Dubacq, B., Kagambega, N., Naba, S., Bratug, L., Choucravie, M. & Klasner, J. 2012. Modern-style plate tectonics in the Paleoproterozoic: New evidence from the West African Craton. *Precambrian Research*, vol. 216, p. 28-49.
12. Gardner, T.W. 1987. River profile analysis and the asymmetry factor as indicators of active tectonics. In: *Geomorphology and Quaternary Geology of Active Tectonic Regions*. International Geomorphology Symposium Proceedings.
13. Haddoum, H. 2009. *Étude géologique et structurale du Craton Ouest-Africain*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.
14. Kale, V.S. and Shejwalkar, N. 2008. Uplift along the western margin of the Deccan Basalt Province: Is it tectonic or erosional? *Journal of Earth System Science*, 117(Suppl. 1): 1–16.
15. Keller, E.A. and Pinter, N. 2002. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
16. Langbein, W.B. 1947. Topographic characteristics of drainage basins. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 968-C: 125–157.
17. Pérez-Peña, J.V., Azor, A., Azañón, J.M. and Keller, E.A. 2010. Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes. *Geomorphology*, 119(1–2): 74–87.
18. Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11): 1117–1142.
19. Travi, Y. 1980. Hydrogéologie des formations gréseuses du sédimentaire de Bamako et de ses environs (Mali). Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 185 p.