



De la cartographie à l'analyse morphométrique : caractéristiques multiparamétriques du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas (Sénégal) à l'aide des SIG

Philippe Malick DIONE¹, Cheikh FAYE¹, Cheikh Abdoul Aziz Sy SADIO¹

¹ Département de Géographie, UFR Sciences et Technologies, Université Assane Seck de Ziguinchor, Laboratoire de Géomatique et Environnement (LGE)

Résumé : Face aux conséquences climatiques désastreuses avec notamment la baisse des écoulements de surface, l'aménagement durable des bassins versants est obligatoire. Le bassin versant étant l'unité de base de la gestion des ressources en eau, pour son aménagement adéquat, la connaissance des paramètres morphométriques qui déterminent son fonctionnement hydrologique est nécessaire. Pour la connaissance de ces paramètres dont les aspects liés à la géométrie, à la forme, les aspects linéaires, les SIG offrent des outils précieux pour leur caractérisation. Cette étude portant sur le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas est faite à l'aide de données extraites d'un SRTM de 30 m de résolution de la NASA. L'analyse menée grâce aux logiciels ArcMap 10.8 et Sufer 15 a permis d'appréhender plusieurs paramètres morphométriques du bassin versant. Celui-ci est de type allongé, donc peu vulnérable à l'érosion. Sa densité de drainage saisonnier s'élève 0,84 km/km². Les pentes sont par ailleurs faibles et varient de 0 à 30,9%. Ces résultats peuvent servir de support essentiel pour un aménagement durable de l'Aga-Foua-Djilas.

Mots-clés : cartographie, morphométrique, bassin versant, Aga-Foua-Djilas, SIG

Abstract. In view of the disastrous climatic consequences, particularly the decline in surface runoff, sustainable watershed management is essential. As the watershed is the basic unit of water resource management, knowledge of the morphometric parameters that determine its hydrological functioning is necessary for its proper management. GIS provides invaluable tools for characterizing these parameters, including geometry, shape and linear aspects. This study of the Aga-Foua-Djilas watershed is based on data extracted from a 30 m resolution NASA SRTM. The analysis, carried out using ArcMap 10.8 and Sufer 15 software, revealed several morphometric parameters of the watershed. The watershed is elongated and therefore not very vulnerable to erosion. Its seasonal drainage density is 0.84 km/km². Slopes are low, ranging from 0 to 30.9%. These results can serve as essential support for sustainable development of the Aga-Foua-Djilas.

Keywords : mapping, morphometric, watershed, Aga-Foua-Djilas, GIS

CORRESPONDENCE:

 BP 523 Ziguinchor (Sénégal).

 pm.d11@zig.univ.sn

ARTICLE HISTORY:

Received: 15.04.2025

Received in final form: 19.05.2025

Accepted: 17.06.2025

Introduction

Face aux enjeux multiples liés au changement climatique, notamment la baisse des débits des cours d'eau, l'augmentation des phénomènes extrêmes (sécheresse, inondations), une gestion efficace et efficiente des ressources en eau s'impose (Dione, 2024). Dans cette perspective, les bassins versants, en tant qu'unités spatiales organisées autour de leurs réseaux hydrographiques, et où se déroulent les processus hydrologiques et géomorphologiques (Rai et al., 2017), sont des espaces appropriés pour une gestion intégrée des ressources en eau. Reposant sur l'évaluation des caractéristiques physiques des bassins versants (superficie, périmètre, forme, pentes...), l'analyse morphométrique permet en ce sens d'estimer le ruissellement de surface ainsi que l'intensité du débit du système de drainage des cours d'eau (Ozdemir & Bird, 2009). Elle est essentielle pour la compréhension des processus hydrologiques (Brahim et al., 2016 ; Mashauri et al., 2023). Elle contribue également à l'évaluation des risques naturels notamment les inondations et l'érosion, afin de planifier une gestion durable des ressources en eau (Faye et Ndiaye, 2021).

Pour un bassin versant, tel que l'Aga-Foua-Djilas faisant face à des défis à la fois climatiques et anthropiques (Dione, 2024 ; Dione et al., 2023, 2024, 2025 ; Dione et Faye, 2024, 2025), une bonne maîtrise des paramètres influençant l'écoulement est indispensable pour la réalisation de projets d'aménagement. Le bassin d'Aga-Foua-Djilas étant un bassin fortement agropastoral (Dione, 2024 ; Dione et Faye, 2025), une étude détaillée et rigoureuse de ses paramètres morphométriques, permettrait dans ce contexte de changement climatique et de forte croissance démographique d'anticiper sur les impacts environnementaux futurs (inondations, érosion). Cela va largement contribuer à la mise en place de stratégies d'aménagement plus durables.

Pour modéliser le comportement hydrologique d'un bassin versant en vue d'élaborer des stratégies d'aménagement adaptées, l'analyse des paramètres morphométriques est en effet cruciale. Ces paramètres dont les aspects géométriques, de formes, linéaires, les systèmes de drainage et de pentes, peuvent être étudiées de façon plus détaillée, grâce aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) qui offrent des outils puissants permettant de les extraire et de les interpréter (Faye et al., 2021 ; Tseta & Mukanu, 2021).

Au Sénégal, comme dans d'autres régions en Afrique, les SIG sont utilisés pour caractériser les propriétés morphométriques et hydrographiques des bassins versant (Brahim et al., 2016 ; Faye et al., 2021 ; Faye & Ndiaye, 2021 ; Mashauri et al., 2023 ; Sadio & Faye. C., 2025 ; Tseta & Mukanu, 2021).

Pour le bassin d'Aga-Foua-Djilas, l'analyse multiparamétrique de la morphométrie à l'aide des outils SIG, permettra une meilleure compréhension des dynamiques hydrologiques locales, en fournissant des informations spatialisées. Ces résultats, combinés à ceux relatifs à la dynamique climatique présente et future et celle

anthropologique du bassin versant (Dione, 2024 ; Dione et al., 2023, 2024, 2025 ; Dione et Faye, 2024, 2025) vont offrir aux décideurs politiques et aux aménageurs, des informations précieuses pour l'aménagement de l'hydrosystème du cours d'eau.

L'objectif général de cette étude est d'analyser à l'aide d'outils SIG, les paramètres morphométriques de l'Aga-Foua-Djilas et leurs implications sur la réponse hydrologique du bassin versant face aux impulsions pluviométriques. Comme objectifs spécifiques, l'étude vise (i) à caractériser à l'aide d'outils SIG, les principaux paramètres morphométriques du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas et (ii) à évaluer l'influence de ces paramètres sur la réponse hydrologique du bassin versant face aux impulsions pluviométriques.

2. Données et méthodes

2.1. Zone d'étude

Le bassin versant de l'Aga-Foua-Djilas est situé au centre-ouest du Sénégal, dans la partie nord et nord-ouest du delta du Sine-Saloum (Figure 1). Le bassin du Sine-Saloum est en effet l'un des plus grands bassins versants du pays. Il est drainé par un système de rias dont les deux principales sont le Sine et le Saloum.

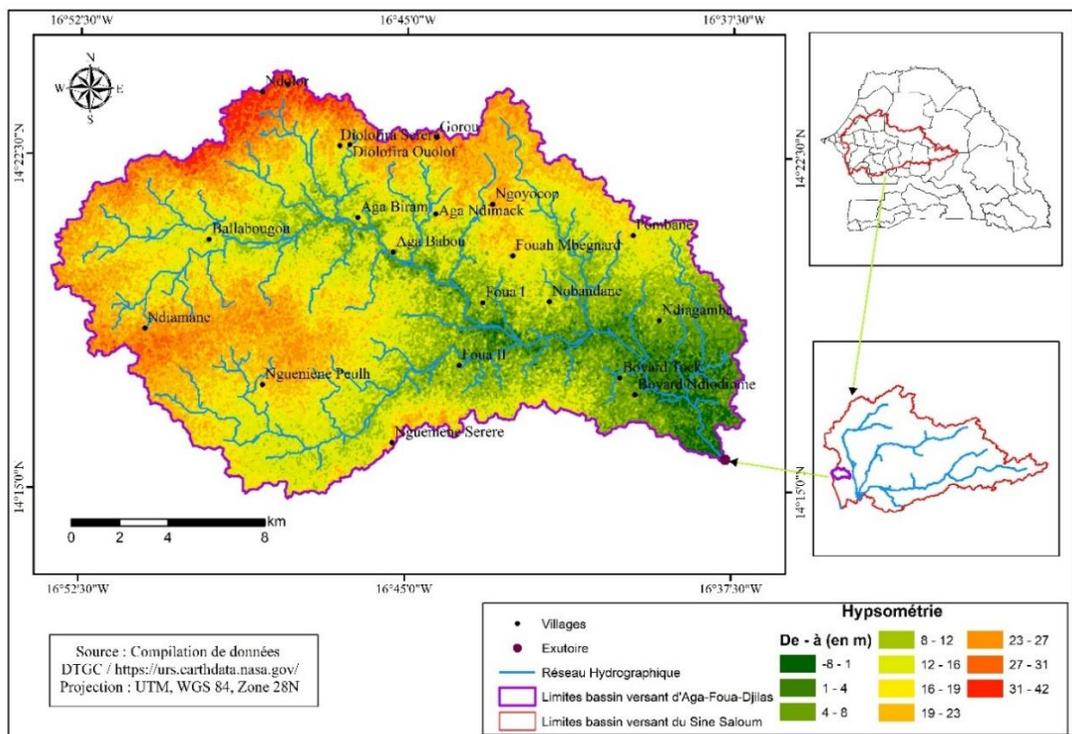


Figure 1. Localisation du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas

Source : Dione, 2024

L'Aga-Foua-Djilas s'étend en latitude de 14°15' nord à 14°25' nord et en longitude de 16°37' ouest à 16°53' ouest. Du point de vue administratif, il est à cheval sur les départements de Mbour et de Fatick. Sa température moyenne annuelle varie entre 27 et 28°C et es totaux pluviométriques de 550 à 700 mm/an (Dione, 2024).

2.2. Données

Les données utilisées sont issues du SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Le site <https://dwtkns.com/srtm30m/> (consulté le 27 août 2022), présente une interface de téléchargement permettant d'acquérir facilement les données hébergées sur le site <https://urs.earthdata.nasa.gov/> (consulté le 27 août 2022). Les données acquises sont un Modèle Numérique de Terrain (MNT), une représentation matricielle de la topographie dont la résolution spatiale est de 30 m.

2.3. Méthodes utilisées

L'extension arc-hydro d'ArcMap 10.8 est utilisée pour délimiter le bassin versant. Le Tableau 1 dresse les paramètres ayant fait l'objet de l'analyse géo-morphométrique. Celle-ci s'est basée sur une approche synthétique des différents aspects mentionnés dans le tableau et que sont :

- **Les aspects linéaires** à savoir le Numéro du flux (Nu), la Longueur du flux (Lu), la Longueur moyenne du flux (Lum), le Rapport de longueur des flux (Lur), le Rapport de bifurcation (Rb), la Densité de drainage (Dd), la Texture de drainage (Tj), la Fréquence de flux (Fs), la Longueur de l'écoulement de surface (Lo) et le Ratio de texture (Rt) ;
- **Les aspects de forme**, représentés par le Coefficient de compacité de Gravelius (K_G) le Facteur de forme (Ff), la Forme du bassin versant (Bs), le Facteur de forme (k), le Rapport de circularité (Rc), le Ratio d'allongement (Ra) et le Maintien constant du canal (C) ;
- **Les aspects liés aux reliefs** que sont le Relief du bassin versant (Rh), le Rapport du relief (Rhl), le Relief relatif (Rr), le Nombre de robustesse (Rn) et la Pente (m).

Grâce à Arcmap 10.8, la superficie, le périmètre, les ordres des cours d'eau, la longueur du cours d'eau principale et du bassin versant sont déterminés. Les résultats des autres paramètres, tels que décrits dans le Tableau 1 **Error! Reference source not found.**, sont obtenus à partir d'un fichier Excel. Les références de formules utilisées sont également mentionnées dans le tableau. Surfer 15 nous a permis de concevoir le modèle 3D du MNT et de tracer les profils en long et en travers. Il a également permis de ressortir les pics et dépressions du bassin versant.

Tableau 1. Paramètres morphométriques utilisés

| Paramètres morphométriques | Descriptions | Références |
|---|--|----------------------|
| Aspects linéaires | | |
| Numéro du flux (Nu) | $Nu = N1+N2+...Nn$; où, Lu = Longueur du cours d'eau, L1 = Longueur du cours d'eau du premier ordre et L2 = Longueur du cours d'eau du second ordre et Ln = Nombre 'n' de la longueur du cours d'eau. | (Strahler, 1964) |
| Longueur du flux (Lu) | $Lu = L1+L2+...L_n$; où, N1 = Cours d'eau de premier ordre, N2 = Cours d'eau de second ordre et Nn = Nombre de cours d'eau | (Strahler, 1964) |
| Longueur moyenne du flux (Lum) | $Lum = Lu/Nu$; où, Lu=Longueur des cours d'eau d'un ordre donné (km), Nu=Nombre de segments des cours d'eau. | (Strahler, 1964) |
| Rapport de longueur des flux (Lur) | $Lur = Lu / Lu-1$; où, Lu= Longueur totale des cours d'eau de l'ordre (u), Lu-1= Longueur totale des cours d'eau de l'ordre inférieur suivant. | (Strahler, 1964) |
| Rapport 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) |
| Densité de drainage (Dd) | $Dd=L/A$; où, L = Longueur totale du cours d'eau, A = Superficie du bassin. | (Strahler, 1964) |
| Texture de drainage (Tj) | $Tj = Dd*Nj/A$, où Tj = Coefficient de torrentialité du flux d'ordre j ; Nj = Nombre de cours d'eau d'ordre j, A = Surface du bassin, Dd = Densité de drainage (km / km ²). | (Strahler, 1964) |
| Fréquence de flux (Fs) | $Fs=N/A$; où, L = Nombre total de cours d'eau, A = Superficie du bassin | (Strahler, 1964) |
| Longueur de l'écoulement de surface (Lo) | $Lo=1/2Dd$, où, Densité de drainage | (Strahler, 1964) |
| Ratio de texture (Rt) | $Rt=N1/P$; Où, N1 = Nombre total de cours d'eau de premier ordre, P = Périmètre du bassin | (Strahler, 1964) |
| Aspects de forme | | |
| Coefficient de compacité de Gravelius (K _G) | $(K_G) = 0,25P/\sqrt{A}$; où K _G = Coefficient de compacité de Gravelius, P = Périmètre du bassin, A = Superficie du bassin | (Gravelius, 1914) |
| Facteur de forme (Ff) | $Ff=A/(Lb)^2$; où, A = Superficie du bassin, Lb = Longueur du bassin | (Strahler, 1964) |
| Forme du bassin (Bs) | $Bs=Lb^2/A$; où A = Superficie du bassin, Lb = longueur du bassin | (Chorley, 1957) |
| Facteur de forme (k) | $k=Lb^2\pi/4A$; où A = Superficie du bassin, $\pi = 3,14$, Lb = longueur du bassin | (Chorley, 1957) |
| Rapport de circularité (Rc) | $Rc=4\pi A/P^2$; où A = Superficie du bassin, $\pi = 3,14$, P = Périmètre du bassin. | (Miller, 1953) |
| Ratio d'allongement (Ra) | $Ra=\sqrt{A/\pi} / Lb$; où, A = Superficie du bassin, $\pi = 3,14$, Lb = Longueur du bassin | (Schumm, 1956) |
| Maintien constant du canal (C) | $C=1/Dd$, où, Dd = Densité de drainage | (Strahler, 1964) |
| Aspects liés au relief | | |
| Relief du bassin (Rh) | Distance verticale entre le point le plus bas et le point le plus haut du bassin | (Schumm, 1956) |
| Rapport du relief (Rhl) | $Rhl = Bh / Lb$; où, Bh = Relief du bassin, Lb = Longueur du bassin | (Schumm, 1956) |
| Relief relatif (Rr) | $Rr = Rh*100/P$, où Rh = Relief du bassin, P = Périmètre du bassin. | (Umair & Syed, 2014) |
| Nombre de robustesse (Rn) | $Rn=Bh\times Dd$; où, Bh = Relief du bassin, Dd = Densité de drainage | (Schumm, 1956) |
| Pente (m) | $m = \Delta y/\Delta x$ ou Rise/Run où, m = Pente, Δy est un changement vertical, Δx est un changement horizontal | (Todhunter, 1888) |

Le flux de travail de la méthodologie appliquée est illustré par la figure 2.

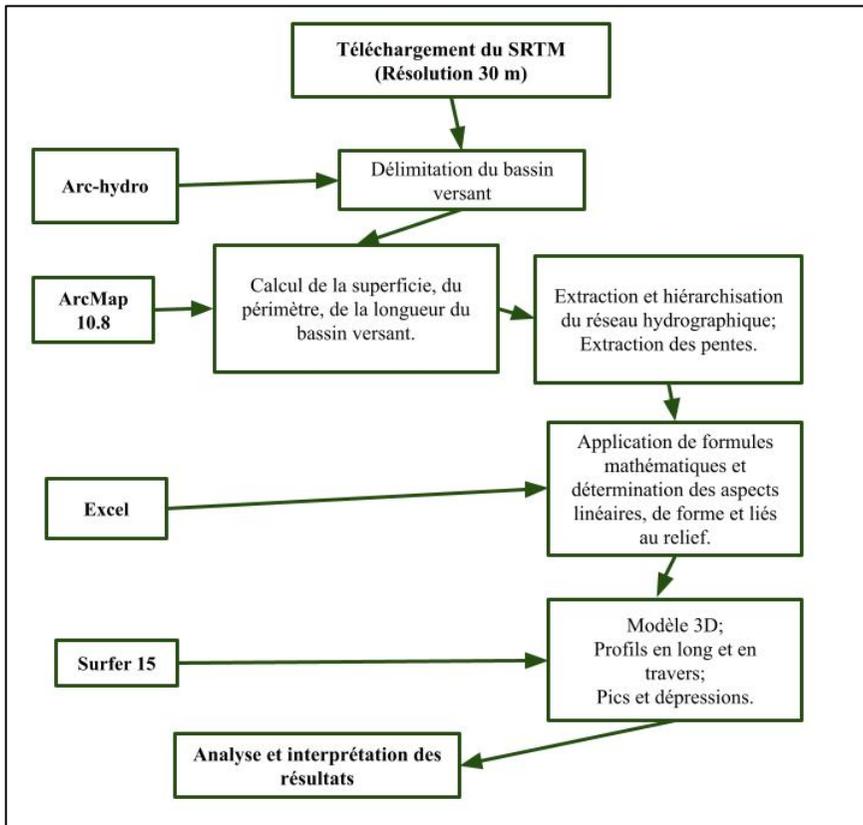


Figure 2. Méthodologie adoptée

Source : auteurs

3. Résultats

3.1. Rivières du bassin versant

Pour la hiérarchisation du réseau hydrographique, on s'est appuyé sur la classification de Strahler, (1964). Cette dernière est l'une des premières étapes de l'analyse quantitative des bassins versants et est une méthode simple et cohérente permettant de hiérarchiser les cours d'eau en fonction de leur position dans le réseau hydrographique. Selon les règles établies par Strahler, (1964), est considéré comme cours d'eau de premier ordre, tout ruisseau ou cours sans tributaire. À cet effet, le cours d'eau résultant de la confluence entre cours d'eau de même ordre, prend un ordre supérieur. La confluence entre deux cours d'eau d'ordre différents prend l'ordre du cours d'eau supérieur. La hiérarchisation des cours d'eau exprime leur connectivité et la manière dont leurs débits évoluent dans le réseau hydrographique. Au total, 5

ordres de cours d'eau sont identifiés dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas et leurs caractéristiques dressées dans le Tableau 2. La Figure 3 permet d'apprécier l'organisation spatiale du réseau de drainage du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas, qui est de forme dendritique (en forme d'arbre), ce qui indique une homogénéité de la texture sans contrôle structural (Faye et al., 2021).

Tableau 2. Courants du bassin d'Aga-Foua-Djilas

| Ordre du cours d'eau | Nombre de tronçons | Longueur totale en km | Rapport de confluence | Longueur moyenne | Rapport de longueurs | Coefficient de torrencialité |
|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------|------------------------------|
| 1 | 117 | 133,5 | 4,18 | 1,14 | - | 0,308 |
| 2 | 28 | 67,8 | 4,00 | 2,42 | 2,12 | 0,074 |
| 3 | 7 | 21,4 | 3,50 | 3,06 | 1,26 | 0,018 |
| 4 | 2 | 29,9 | 2,00 | 14,93 | 4,88 | 0,005 |
| 5 | 1 | 12,7 | - | 12,7 | 0,85 | 0,003 |
| Total / Moyenne | 155 | 265,3 | 3,42 | - | 2,28 | 0,408 |

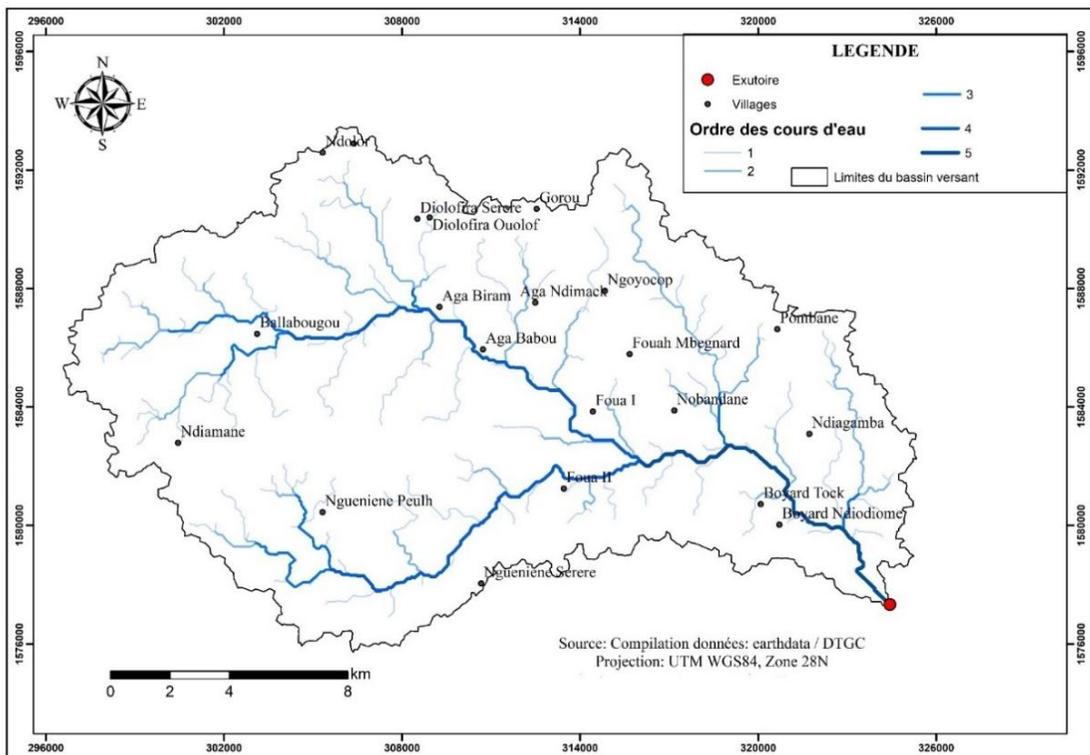


Figure 3. Ordre de cours d'eau selon la classification de Strahler
Source : auteurs

3.2. Aspects géométriques du bassin versant

Les différents paramètres consignés dans le Tableau 3 représentent les aspects morphométriques du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas.

Tableau 3. Aspects géométriques et de forme du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas

| Paramètres | Valeurs |
|---|---------|
| Longueur du bassin en km | 29,2 |
| Surface du BV en km ² | 317,4 |
| Périmètre du BV en km | 115,7 |
| Longueur du cours d'eau principal en km | 36,2 |
| Altitude maximum en m | 42 |
| Altitude minimum en m | -8 |
| Coefficient de compacité de Gravelius (K_G) | 1,82 |
| Facteur de forme (Ff) | 0,37 |
| Forme du bassin (B_s) | 2,68 |
| Rapport de circularité (R_c) | 0,30 |
| Ratio d'allongement (R_a) | 1,86 |
| Facteur de forme (k) | 2,11 |
| Maintien constant du canal (C) | 1,20 |

3.2.1. La superficie

Elle est de l'ordre de 317,4km². Elle représente l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau et les débits dépendent d'elle (Kouedjou et Anaba, 2021). Sa connaissance est primordiale pour la détermination de nombreux paramètres morphométriques.

3.2.2. Le périmètre

Indicateur de taille et de forme du bassin versant (Schumm, 1956), le périmètre de l'Aga-Foua-Djilas s'élève à 115,7 km. Pour tout bassin versant, le périmètre constitue la limite extérieure englobant l'intégralité de la zone de drainage et est mesuré le long de la ligne crête qui délimite la zone d'alimentation des cours d'eau.

3.2.3. La longueur du bassin versant

C'est la distance linéaire droite entre l'exutoire du bassin et le point le plus éloigné de la ligne de crête. Elle suit le cours d'eau principal et est de 29,2 km.

3.2.4. La longueur du cours d'eau principal

Elle est mesurée depuis la source jusqu'à l'exutoire, soit 36,2 km. Elle permet d'identifier les caractéristiques du lit du cours d'eau.

3.2.5. Altitudes, maximale et minimale

Le point culminant du bassin est à 42 m et celui le plus bas à -8 m. Ces deux paramètres permettent de déterminer l'amplitude altimétrique qui est de 50 m. Ils sont nécessaires pour le calcul de la pente moyenne.

3.2.6. Coefficient de Compacité de Gravelius (K_G)

L'indice de compacité de Gravelius, (1914) est calculé en comparant la superficie réelle d'un bassin versant à la superficie d'un cercle ayant le même périmètre que le bassin versant. Il donne la forme du bassin. Avec un indice de 1,82, le bassin d'Aga-Foua-Djilas est donc de forme allongée.

3.3. Aspects de forme du bassin versant

3.3.1. Facteur de forme (F_f)

Tel que défini par Horton, (1932), le facteur de forme est le ratio ou rapport de la superficie du bassin versant au carré de la longueur du bassin. Ce dernier étant de 0,37 ; on en déduit que le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas est de forme allongée ou irrégulière et par conséquent peu vulnérable à l'érosion (Faye et al., 2021).

3.3.2. Forme du bassin versant (B_s)

La forme du bassin versant est le rapport du carré de la longueur du bassin (L_b) à la superficie du bassin (A). La valeur de forme (B_s) du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas est de 2,68, ce qui correspond à un débit de crue plus faible.

3.3.3. Rapport de circularité (R_c)

Ce rapport exprime le lien entre la surface d'un bassin versant et celle d'un cercle dont la circonférence est équivalente au périmètre du bassin versant (Miller, 1953). Il permet de mesurer à quel point la forme du bassin versant se rapproche de celle d'un cercle parfait. Dans le cas du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas, le coefficient de compacité R_c est de 0,30, ce qui révèle une forme allongée du bassin.

3.3.4. Ratio d'allongement (R_a)

Le R_a est un indicateur qui permet de caractériser la forme étirée ou allongée d'un bassin versant. Il se calcule en divisant le diamètre d'un cercle ayant une surface équivalente à celle du bassin versant par la longueur maximale de celui-ci (Schumm, 1956). Pour le bassin versant étudié, le R_a est de 1,86, ce qui indique un relief très peu accentué.

3.3.5. Maintien constant du canal (C)

Selon Schumm (1956), l'inverse de la densité de drainage est appelé coefficient de stabilité ou de maintien du canal. Ce coefficient indique combien de kilomètres carrés

de surface de bassin sont nécessaires pour créer et maintenir un chenal de 1 km de long. Ce paramètre est influencé par divers facteurs, tels que la nature des roches, la durée de l'érosion, et les conditions climatiques (Faye et al., 2021). Avec un coefficient C de 1,20, le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas est donc considéré comme ayant une faible érodabilité.

3.4. Aspects linéaires

Le Tableau 4 présente les paramètres linéaires du bassin versant que sont le Numéro du flux (Nu), la Longueur du flux (Lu), la Longueur moyenne du flux (Lum), le Rapport de longueur des flux (Lur), le Rapport de bifurcation (Rb), la Densité de drainage (Dd), la Texture de drainage (Tj), la Fréquence de flux (Fs), la Longueur de l'écoulement de surface (Lo) et le Ratio de texture (Rt). Pour les ordres de cours d'eau, les paramètres sont consignés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Aspects linéaires du bassin d'Aga-Foua-Djilas

| Paramètres | Numéro du flux (Nu) | Longueur du flux (Lu) | Longueur moyenne du flux (Lum) | Rapport de longueur des flux (Lur) | Rapport de bifurcation (Rb) | Densité de drainage (Dd) | Texture de drainage (Tj) | Fréquence de flux (Fs) | Longueur de l'écoulement de surface (Lo) | Ratio de texture (Rt) |
|------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--|-----------------------|
| Valeurs | 155 | 265,3 | 1,71 | 2,28 | 3,42 | 0,84 | 0,41 | 0,49 | 0,42 | 1,01 |

3.4.1. Le Numéro du flux (Nu)

Selon Horton, (1945), le nombre de segments de cours d'eau pour chaque ordre suit une séquence géométrique inverse par rapport à leur numéro d'ordre. Dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas, un total de 155 segments de cours d'eau ont été recensés. Les cours d'eau de premier ordre sont les plus nombreux, tandis que leur nombre diminue progressivement à mesure que l'ordre des cours d'eau augmente (Tableau 4).

3.4.2. La Longueur du flux (Lu)

Elle est mesurée pour le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas à partir de la carte topographique tirée du MNT. Elle s'élève à 265,3 km. La Longueur du cours d'eau (Lu) est un paramètre qui montre les caractéristiques de l'écoulement de surface du bassin (Faye et al., 2021). Les longueurs ont une allure descendante, de l'ordre 1 à l'ordre 3, ascendante de l'ordre 3 à l'ordre 4, puis descendante de l'ordre 4 à l'ordre 5 (Tableau 4 **Error! Reference source not found.** et Figure 4).

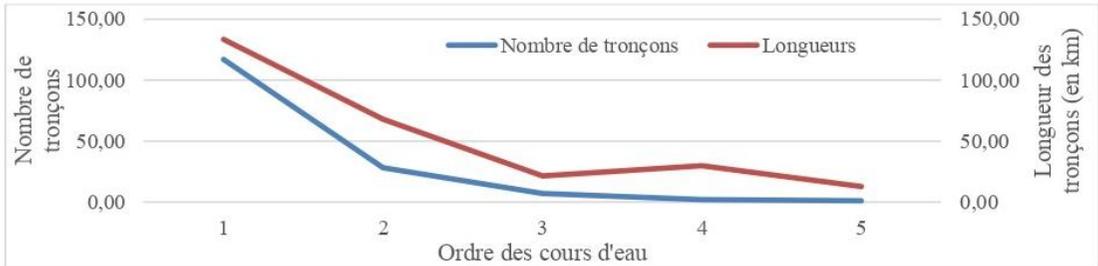


Figure 4. Évolution du nombre et de la longueur des drains en fonction de l'ordre des cours d'eau

Source : auteurs

3.4.3. La Longueur moyenne du flux (Lum)

La longueur moyenne du réseau hydrographique du bassin versant est de 1,71 et est obtenue en faisant le rapport entre la Longueur totale du flux (Lu) et le nombre total des ordres de cours d'eau. Elle est de 1,14, 2,42, 3,06, 14,93 et 12,7 respectivement pour les ordres 1, 2, 3, 4 et 5 (Tableau 4).

3.4.4. Le Rapport de longueur des flux (Lur)

Avec une moyenne de 2,28, le ratio de longueurs est 2,12 entre les longueurs moyennes des drains d'ordre 2 sur celles 1 ; de 1,26 entre les longueurs des drains 3 sur celles 2, de 4,88 entre celles 4 sur celles 3 et enfin de 0,85 entre celles 5 sur celles 4 (Tableau 4).

3.4.5. Le Rapport de bifurcation (Rb)

Également connu sous le nom de rapport de confluence, le rapport de bifurcation correspond au ratio entre le nombre de drains d'un certain ordre et le nombre total de drains de l'ordre immédiatement supérieur dans un bassin versant (Schumm, 1956). Dans le cas du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas, le Rb varie de 2 (rapport entre les drains d'ordre 4 et ceux d'ordre 5) à 4,18 (rapport entre les cours d'eau d'ordre 1 et ceux d'ordre 2) (Tableau 4), avec une moyenne de 3,42.

3.4.6. La Densité de drainage (Dd)

Introduite par Horton, (1932), la densité de drainage est définie par Bravard et Petit, (1997) comme le rapport entre la longueur totale des cours d'eau de tous les ordres dans un réseau hydrographique et la superficie du bassin versant. À l'échelle du bassin versant, cette densité est relativement faible, atteignant seulement 0,84 km/km². Cette faible densité de drainage révèle une forte perméabilité et une infiltration assez importante (Ibrahim et al., 2023). La réponse hydrologique du bassin face aux impulsions pluviométriques pourrait être lente, ce qui réduit les risques d'inondation et favorise la recharge des nappes souterraines.

La Figure 5 montre la répartition spatiale de la densité le long du bassin versant. La classification utilisée repose sur les travaux de Faye et al. (2021), qui ont identifié cinq classes : très grossière ($< 1,2$), faible ($1,2$ à $2,4$), modérée ($2,4$ à $3,6$), élevée ($3,6$ à $4,8$), et très élevée ($4,6$ à 6). Les drains de premier ordre affichent une densité de drainage faible, tandis que ceux de deuxième et troisième ordre présentent une densité modérée à élevée par endroits, notamment au niveau des zones de confluence. Les drains de quatrième et cinquième ordre, quant à eux, montrent une densité très élevée. Cela indique qu'en saison des pluies, particulièrement dans le cours d'eau principal, le lit est bien entretenu par la vitesse accrue de l'eau dans le réseau hydrographique.

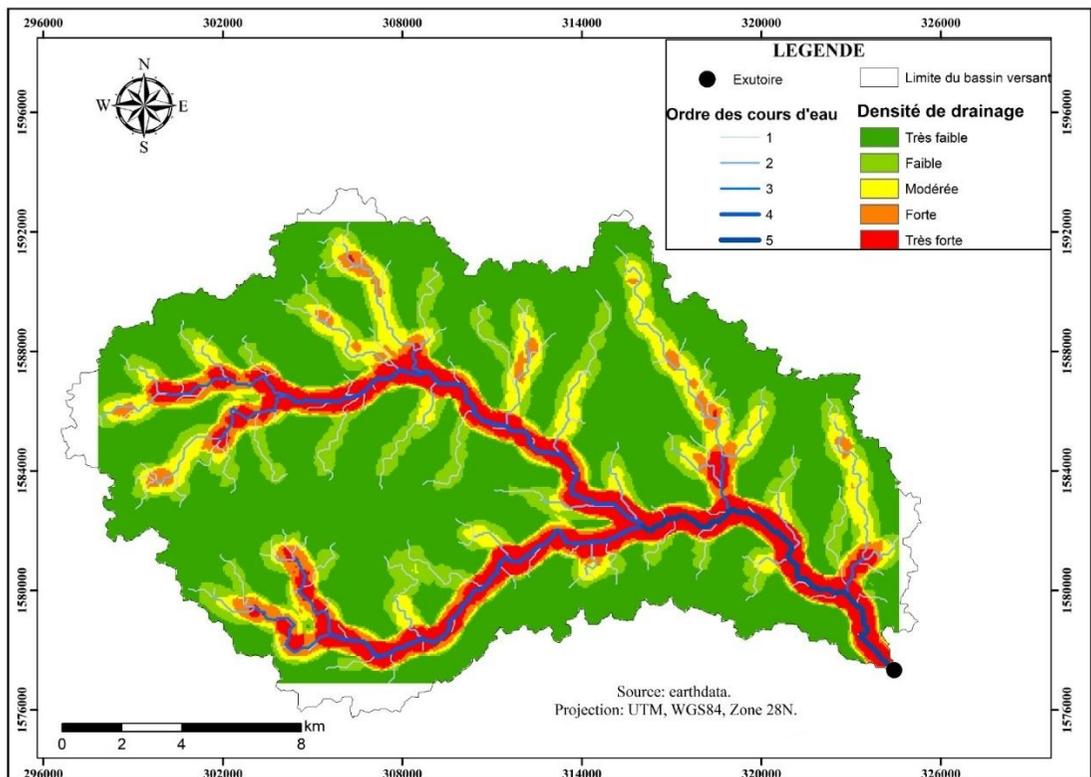


Figure 5. Densité de drainage dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas
Source : auteurs

3.4.7. La Texture de drainage (Tj)

Elle est définie par Horton, (1945) comme étant le nombre total des drains de tous les ordres par le périmètre de cette zone et dépend de plusieurs facteurs, notamment naturels comme le climat, la pluviométrie, la couverture végétale, le type de roche et de sol. Le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas a en effet une texture de drainage grossière ($0,41 \text{ km}^2/\text{km}$). Cette dernière est de $0,308$; $0,074$; $0,018$; $0,005$ et $0,003 \text{ km}^2/\text{km}$

respectivement pour les drains de premier, deuxième, troisième, quatrième et cinquième ordre (Tableau 4).

3.4.8. La Fréquence de flux (Fs)

La fréquence des flux ou densité hydrologique est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface (Horton, 1932). Elle est de 0,49 pour le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas. C'est une faible valeur qui indique un écoulement et une inondation plus lents dans le bassin versant (Kale et Gupta, 2001).

3.4.9. La Longueur de l'écoulement de surface (Lo)

La longueur du cours d'eau à la surface du sol est la distance parcourue par l'eau avant de rejoindre un chenal d'écoulement (Horton, 1945). Dans l'Aga-Foua-Djilas, la Lo est de 0,42 ; signe d'un ruissellement de surface modéré dans le bassin versant.

3.4.10. Le Ratio de texture (Rt)

Chorley, (1957) définit le rapport de texture comme étant le rapport entre le nombre de drains de premier ordre et le périmètre du bassin versant. Pour l'Aga-Foua-Djilas, la texture de 1,01 est très grossière.

3.5. Aspects liés au relief

Les différents paramètres topographiques analysés dans cette section et présentés dans le (Tableau 5) incluent le Relief du bassin (Rr), le Rapport du relief (Rhl), le Relief relatif (Rr) et le Nombre de robustesse (Rn). Ces paramètres sont cruciaux pour l'étude des bassins versants, car ils permettent de caractériser la rugosité et la configuration de la surface du bassin (Faye et al., 2021).

3.5.1. Relief du bassin versant (Rh)

Paramètre introduit par Schumm, (1956), il est défini par Kartic et Jatisankar, (2013) comme étant la différence d'altitude entre le point le plus élevé (la ligne de crête) et le point le plus bas (l'exutoire) d'un bassin versant. Le relief de l'Aga-Foua-Djilas culmine à 42 m et le point le plus bas se trouve à -8 m du niveau de la mer, soit une amplitude altitudinale de 50 m (Figure 7 **Error! Reference source not found.**). Il joue un rôle déterminant dans le développement des formes de relief, la formation du réseau hydrographique, le processus de formation et la vitesse des écoulements de surface et souterraines (Magesh et Chandrasekar, 2014). La Figure 6 présente les courbes de niveaux avec un équidistance de 5 m. Les courbes les plus basses ont une altitude de -5 m et on les retrouve au centre-est (Sud-est de Foua 1), à l'Est (Est des villages de Boyard Tock et Boyard Ndidiome) et au sud-est (vers l'exutoire). Les courbes les plus élevées se situent au Nord-ouest du bassin versant, à l'ouest du village de Ndolor.

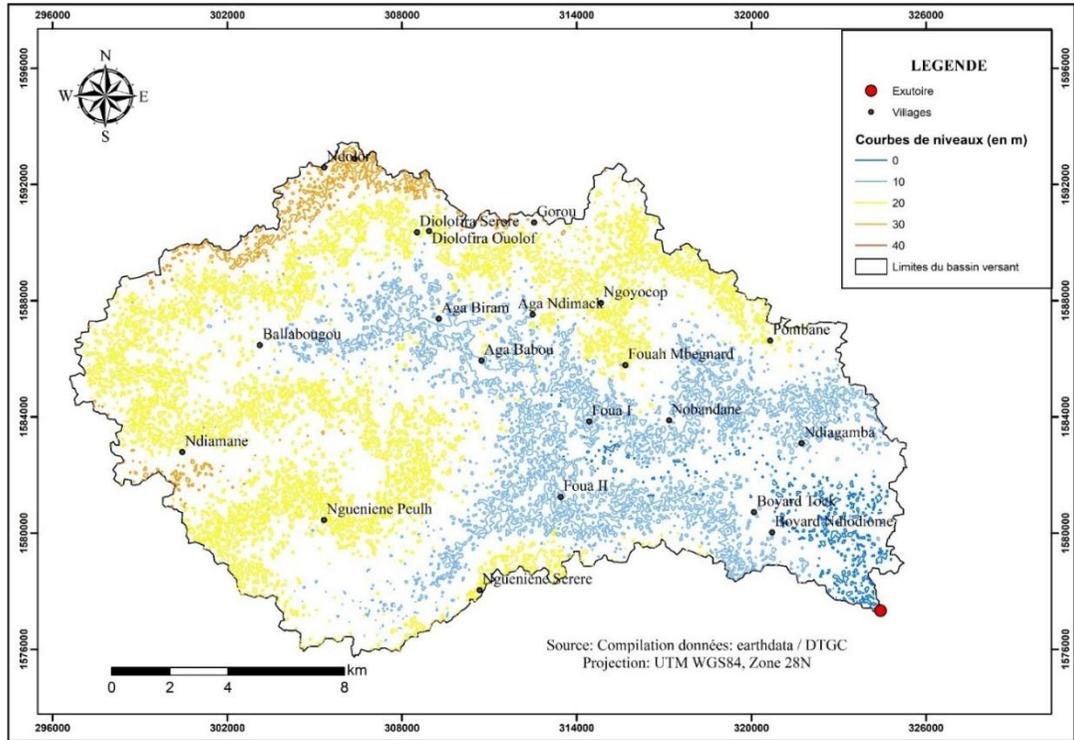


Figure 6. Courbe de niveau dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas
Source : auteurs

3.5.2. Rapport du relief (Rhl)

C'est un paramètre obtenu en faisant le rapport entre Relief du bassin (Rh) et la Longueur du bassin versant (Lb) (Schumm, 1956). Il détermine en effet la pente globale du bassin versant et la manière dont s'y produit l'intensité du processus d'érosion (Schumm, 1956). Tel qu'indiqué par Faye et al (2021), le Ratio du relief est catégorisé en 6 classes de pente : de 0 à 0,01 : pente nulle ; de 0,01 à 0,09 : pente est faible ; de 0,09 à 0,25 : pente moyenne ; de 0,25 à 0,49 : pente assez forte ; de 0,49 à 1 : la pente est forte ; > 1 : pente très forte.

Avec un Rhl de 0,002, le relief de l'Aga-Foua-Djilas se caractérise par une pente très faible, voire nulle.

3.5.3. Relief relatif (Rr)

Le relief relatif (Rr) est un paramètre morphométrique essentiel généralement utilisé pour évaluer les caractéristiques morphologiques du terrain. Il représente le rapport entre le relief et le périmètre du bassin de drainage (Umair et Syed, 2014). Dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas, le Rr est de 0,043 %, ce qui indique un très faible potentiel de ruissellement. En effet, d'après Umair et Syed, (2014), les bassins versants

avec un relief relatif plus élevé tendent à avoir un potentiel de ruissellement plus important.

3.5.4. Nombre de robustesse (Rn)

Le nombre de robustesse (Rn) est le produit de la densité de drainage (Dd) et du relief du bassin (H), exprimé dans la même unité (Strahler, 1957 ; Melton, 1958). Dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas, un indice de 0,042 a été calculé, ce qui est relativement faible (Tableau 5). Cela suggère que cette zone est peu vulnérable à l'érosion des sols.

Tableau 5. Aspects liés au relief du bassin d'Aga-Foua-Djilas

| Paramètres | Valeurs |
|---------------------------|---------|
| Relief du bassin (Rh) | 50 |
| Rapport du relief (Rhl) | 0,002 |
| Relief relatif (Rr) | 0,043 |
| Nombre de robustesse (Rn) | 0,042 |

3.5.5. Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Pour une étude précise et détaillée du relief du bassin versant, le MNT est d'une importance capitale car permettant une représentation numérique des unités de relief. Dans l'ensemble, le relief du bassin d'Aga-Foua-Djilas est de forme tabulaire et est relativement faible, comme on peut le constater avec les Figure 7 et Figure 8. Le modèle 3D (Figure 8) donne une vue d'ensemble de la position des différentes unités du relief et est utile pour la planification et l'analyse du terrain.

Les altitudes maximales se localisent au Nord, Nord-ouest et à l'Ouest. Elles varient de 23 à 42 m et couvrent une superficie de 11,94% du bassin versant. Elles correspondent aux zones de plateaux qui sont les parties les plus hautes de la topo-séquence. Les altitudes moyennes (12 à 23 m) représentent 56,76%, soit plus de la moitié de la surface totale du bassin versant. Elles constituent les talus de raccordement et sont les zones de transition entre les terres hautes et les zones dépressionnaires. Elles se localisent au centre du bassin versant. Les zones les plus basses de la topo-séquence ont quant à elles, des altitudes allant de -8 à 12 et couvrent 31,30% du bassin versant. Elles longent le réseau de drainage et sont élargies dans la partie Sud-est du bassin versant, notamment à l'exutoire.

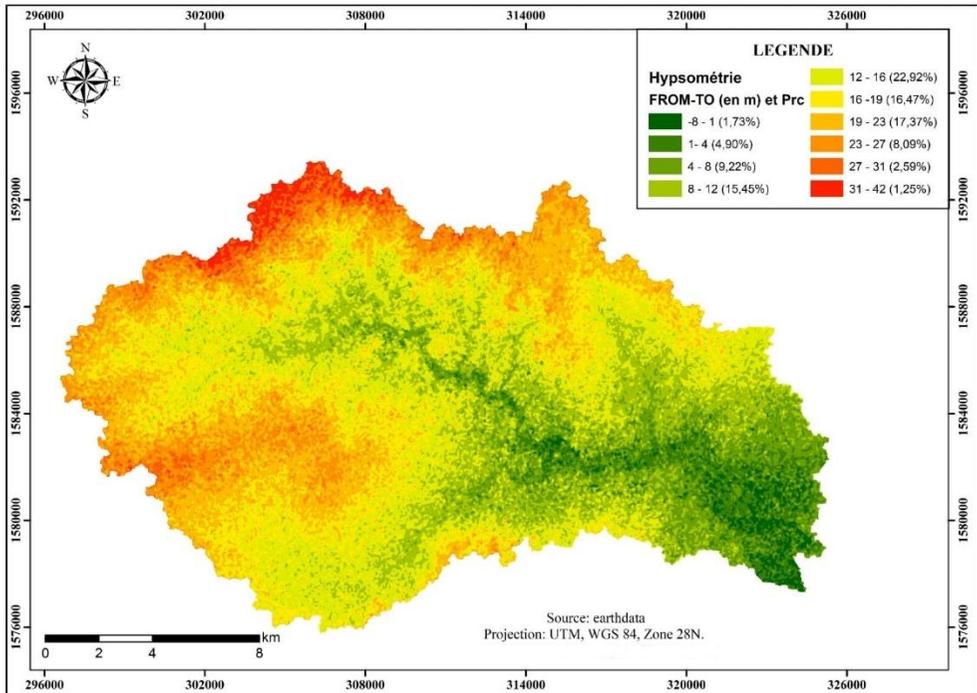


Figure 7. Modèle Numérique de terrain dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas
Source : auteurs

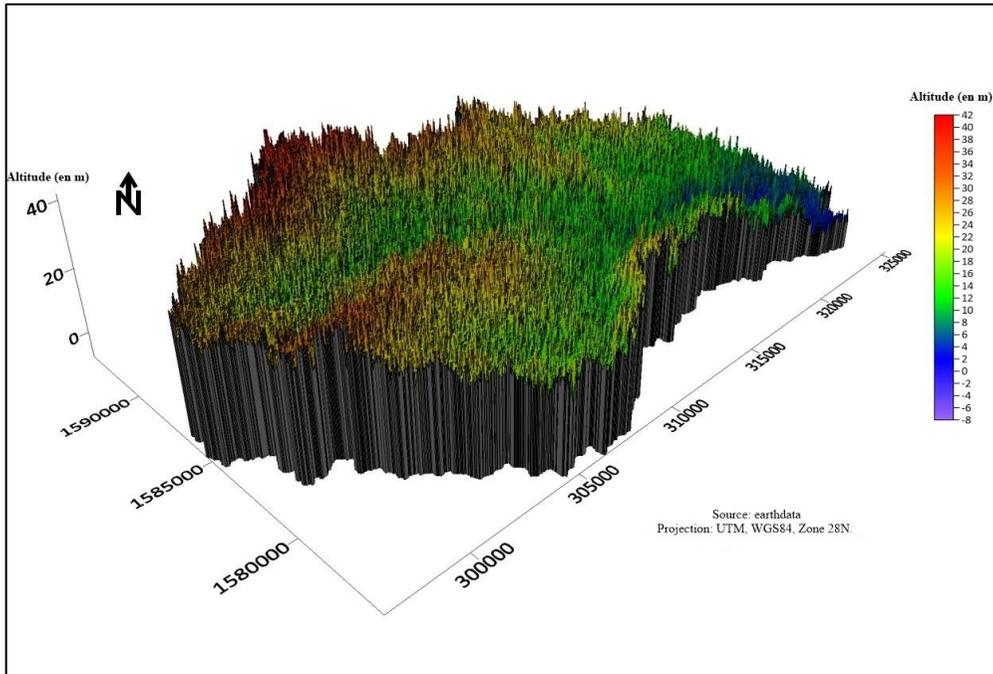


Figure 8. Modèle 3D du relief dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas
Source : auteurs

La Figure 9 fait ressortir les pics (sommets) et dépressions dans l'ensemble du bassin versant. Les polygones sont générés avec Surfer 15 et la carte réalisée à l'aide ArcMap 10.8. Une carte représentant les sommets et les dépressions génère des polygones englobant ces éléments dans un fichier grille. Ces polygones délimitent la première ou la dernière zone close entourant une élévation (pic) ou une dépression, là où le drainage s'en éloigne (pic) ou y pénètre (dépression) ([https://surferhelp.goldensoftware.com/peaks_depressions/Peaks_Depressions.htm#:~:text=A%20peaks%20and%20depressions%20map%20creates%20polygons%20around%20peaks%20and,or%20into%20it%20\(depression](https://surferhelp.goldensoftware.com/peaks_depressions/Peaks_Depressions.htm#:~:text=A%20peaks%20and%20depressions%20map%20creates%20polygons%20around%20peaks%20and,or%20into%20it%20(depression), consulté le 08 janvier 2024). Les dépressions couvrent une superficie totale de 9411,8ha soit 29,7% du bassin versant, alors que les pics représentent 26,7% qui correspondent à 8472,8 ha. La dépression la plus grande est localisée au Sud-est de Foua 1 et Nord-ouest de Foua 2. L'un des points les plus bas du bassin versant se localise dans cette dépression à -8 m. Sa profondeur maximale est de 14 m.

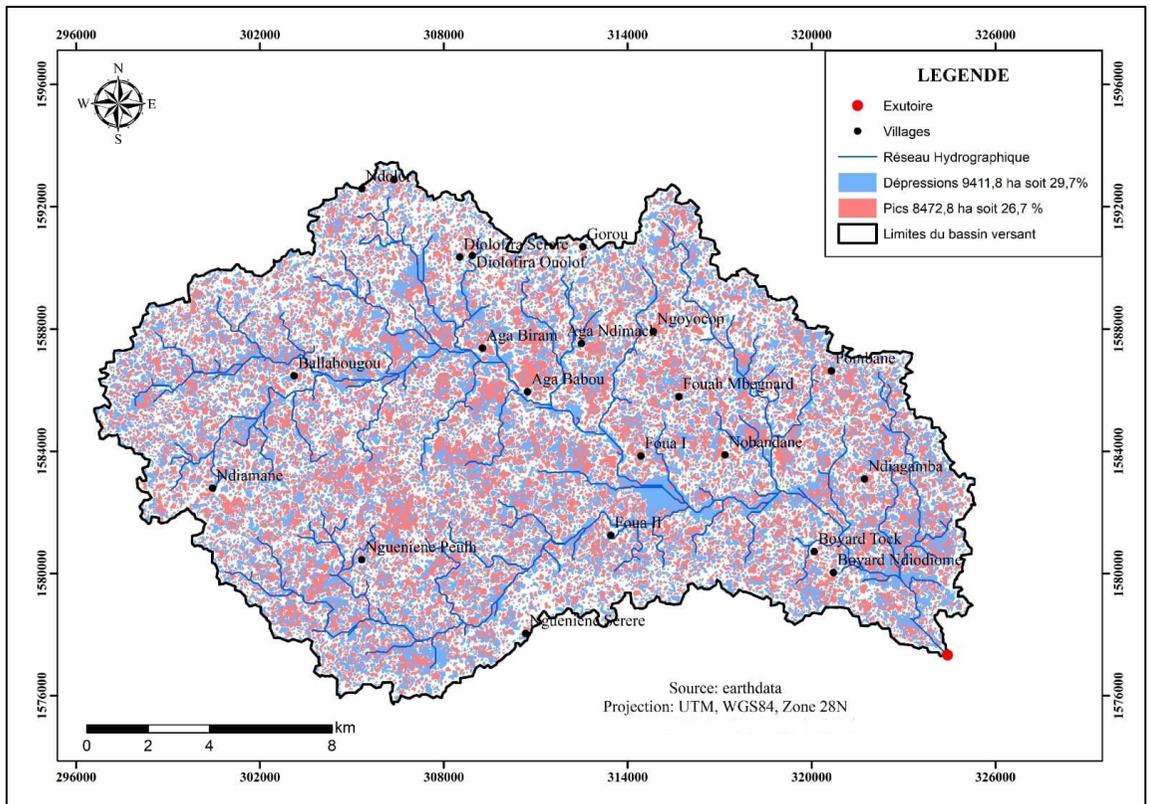


Figure 9. Pics et dépressions dans le bassin d'Aga-Foua-Djilas

Source : auteurs

La courbe hypsométrique (Figure 10) exprime en fonction de l'altitude la répartition de la surface du bassin versant. Son analyse montre que seulement 5% du bassin versant ont une altitude qui dépasse 30 m, 30% culminent à plus de 20 et 85% à

plus de 10 m. L'altitude médiane est de 19 m. L'allure de la courbe hypsométrique, moyennant le rapport entre la faiblesse de surface par rapport au changement de l'altitude initiale, indique un bassin de type jeune à mature.

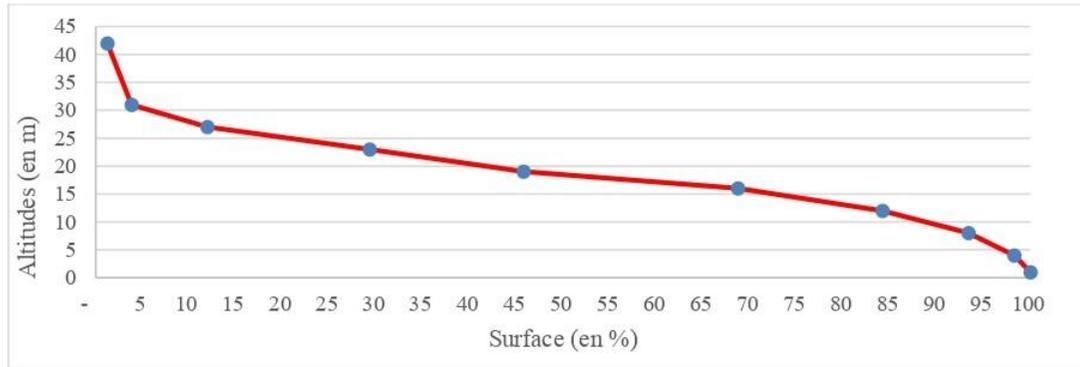


Figure 10. Courbe hypsométrique du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas

Source : auteurs

3.5.6. Pentas

Les pentes, dans un bassin versant, désignent la variation verticale de l'altitude par rapport à la distance horizontale. Selon Todhunter, (1888), elles correspondent au taux de variation de la hauteur de chaque cellule en comparaison avec ses cellules voisines. Elles sont utiles pour illustrer, de l'amont vers l'aval, la vitesse à laquelle l'eau s'écoule dans le bassin versant, ainsi que le temps de concentration. Comme l'indique Roche, (1963), « *une pente plus forte correspond à une durée plus faible de concentration des eaux de ruissellement dans les canaux de drainage et de là dans les affluents et le cours principal* ». Par conséquent, l'étude des pentes aide à mieux comprendre les écoulements au sein d'un bassin versant.

Les pentes du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas varient de 0 à 30,9%. Leur répartition spatiale est matérialisée par la Figure 11. Celles qui sont plus faibles (0 à 5%) se localisent sur les plateaux, zones les plus élevées de la topo-séquences. Les plus élevées se retrouvent par contre au niveau des talus de raccordement avec des dénivelés allant de 10 à presque 40%.

Les plateaux où les pentes sont faibles sont favorables à l'infiltration et pourraient accueillir des aménagements adéquats pour la recharge des nappes souterraines. Les talus de raccordement aux pentes plus fortes, présentent quant à eux un risque plus élevé d'érosion et de déclenchement rapide du ruissellement. Cela peut contribuer à l'ensablement des bas-fonds. Face à ces risques, il est nécessaire de développer dans ces zones, des techniques de conservation des eaux et des sols pour un aménagement durable du bassin versant. Le couvert végétal présent sur ces espaces doit donc être conservé et protégé.

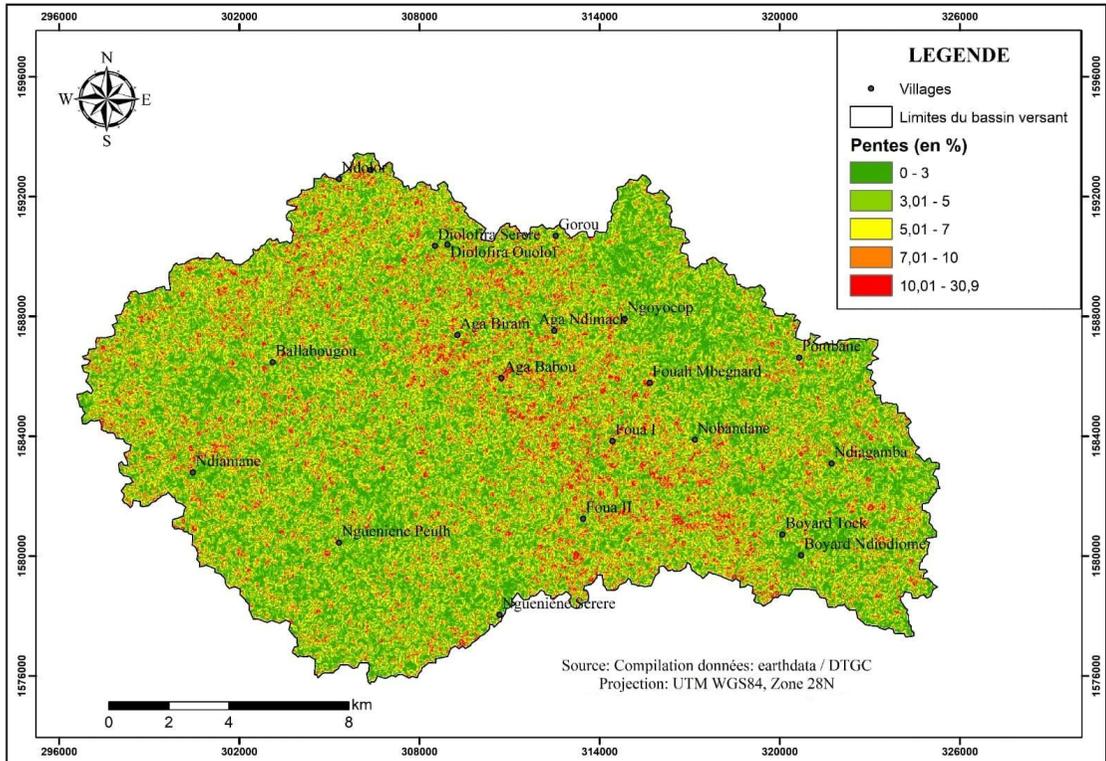


Figure 11. Pentés en % du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas

Source : auteurs

3.5.7. Profils en long et en travers

Les profils en long et en travers sont deux représentations graphiques qui caractérisent la topographie d'un cours d'eau. Selon Rolan-Meynard et al. (2019), « *le profil en long d'un cours d'eau est une représentation graphique qui met en rapport la cote du fond du lit et/ou de la ligne d'eau et/ou du niveau des berges (en ordonnées), et la distance (en abscisses)* ». Le profil en long, comme son nom l'indique, suit la longueur du cours d'eau d'amont en aval, alors que celui en travers coupe transversalement le cours d'eau et est perpendiculaire à son axe. Pour obtenir une vision tridimensionnelle et complète d'un cours d'eau, on peut utiliser conjointement le profil en long et celui en travers. La Figure 12 fait apparaître la configuration des deux profils. Son analyse permet de distinguer d'amont en aval et en travers, la variation des altitudes et des pentes, la forme du lit du cours d'eau. Il existe le long du tracé du cours d'eau comme en travers, des dépressions successives, séparées par des îlots d'élévation.

Ces profils en long et en travers présentent des configurations influençant directement la dynamique hydrologique du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas. Celui en long fait apparaître une pente douce orientée de l'ouest vers le sud-est. Il favorise donc l'infiltration et un temps de concentration des eaux beaucoup plus long. Le profil

en travers révèle quant à lui une asymétrie topographique. Les pentes sont en effet plus marquées vers le sud, ce qui favorise un ruissellement plus intense. Au regard de cette configuration des deux profils, on peut noter que les risques d'érosion et de crues sont beaucoup plus accentués dans la zone aval du bassin versant, d'où la nécessité d'une gestion différenciée selon les versants.

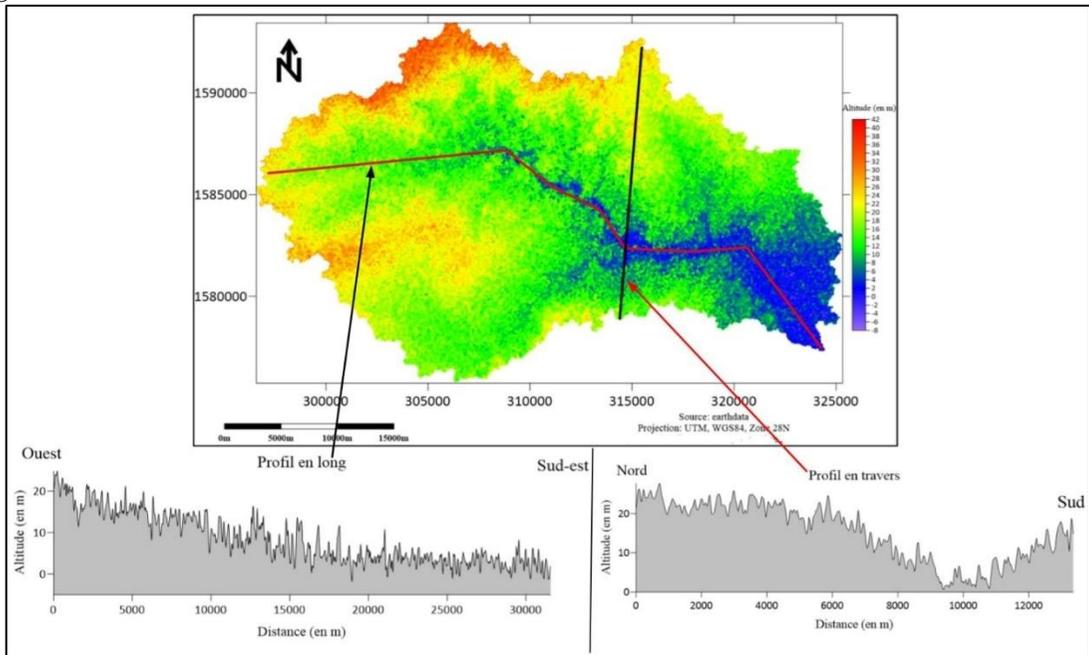


Figure 11. Profil en long et en travers du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas
Source : auteurs

4. Discussion

L'étude des caractéristiques morphométriques du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas est capitale pour la compréhension de son fonctionnement hydrologique, en vue d'améliorer la gestion de ses ressources en eau et de prévenir tous les risques naturels liés à l'eau. Le bassin dispose de 5 ordres de cours d'eau, selon la classification de Strahler, (1964). Les aspects géométriques de formes, notamment la superficie et le périmètre, présentent une légère différence comparée aux résultats des études précédentes sur le bassin (Dione, 2010, 2011 ; Faty, 2010). Cela est sans doute dû aux approches et techniques utilisées pour la délimitation du bassin. Dione, (2010) a utilisé une carte de 1/50000 numérisée de la DTGC (Direction des Travaux Géographique et Cartographique) et délimité le bassin à l'aide d'Arc-View 3.2a. Dione, (2011) a quant à lui délimité le bassin à l'aide du même logiciel, mais avec un SRTM de résolution 90m. Dans cette étude, c'est le logiciel ArcMap 10.8 qui est utilisé pour délimiter le bassin versant à partir d'un SRTM d'une résolution plus fine de 30 m. Les superficies respectives trouvées sont 332,7 km², 318,14 km² et 317,4 km². Cette différence a donc

impacté les autres paramètres morphométriques. Par ailleurs, la particularité de cette étude, c'est d'avoir fait une analyse plus approfondie et détaillée des aspects linéaires, de forme et liés au relief du bassin versant, en s'appuyant surtout sur les technologies géospatiales.

Par ailleurs, même si les technologies géospatiales permettent une analyse plus approfondie et détaillée des paramètres morphométriques des bassins versants, n'en demeure pas moins que des limites ou incertitudes peuvent être soulevées, notamment en ce qui concerne la résolution spatiale des données et les hypothèses de modélisation. Le SRTM ayant une résolution de 30 m, la taille de chaque pixel est alors de 900 m². Il peut exister une différence d'altitude énorme par rapport au niveau moyen de la mer, entre certains points du même pixel. Ce dernier, quel que soit la dénivellation, présente une homogénéité d'altitude. Une telle situation peut rendre aléatoire les mesures, surtout dans les petits bassins versant comme l'Aga-Foua-Djilas. Lesdites erreurs concernent les imprécisions dans la délimitation des bassins versants et par conséquent l'analyse des paramètres morphométriques (Kaliappan & Venkatraman, 2023). Il est donc nécessité d'utiliser des modèles numériques de terrain à plus haute résolution. En plus, les paramètres morphométriques étant considérés comme statiques et cloisonnés ; calculés séparément, ne permettent pas de prédire les réponses hydrologiques des bassins versants (Douvinet et al., 2008). Ce faible apport dans le processus de l'analyse hydrologique souligne l'importance d'une approche plus dynamique et intégrée, comme c'est le cas avec les automates cellulaires (Douvinet et al., 2008).

Conclusion

L'analyse morphométrique est importante pour la connaissance de l'environnement physique d'un bassin versant. Elle permet d'avoir une meilleure appréhension des paramètres hydrologiques influençant l'écoulement. La connaissance de ces paramètres est un outil précieux d'aide à la prise de décision, pour un aménagement durable des bassins versants dans ce contexte de changement climatique, qui nécessite une gestion optimale des ressources en eau.

Avec des données tirées d'un SRTM de résolution 30 m, cette étude sur les paramètres morphométriques du bassin de l'Aga-Foua-Djilas est menée. Le recours aux technologies géospatiales avec l'utilisation des SIG a permis de mieux comprendre les caractéristiques morphométriques du bassin versant. De forme dendritique, son réseau hydrographique comporte 5 ordres. De forme allongée, le bassin versant est par conséquent peu vulnérable à l'érosion. Avec un drainage saisonnier, sa densité de drainage s'élève à 0,84 km/km². Avec un Rhl de 0,002, le relief du bassin versant est en effet caractérisé par une pente très faible, voire nulle. Les pentes varient quant à elles de 0 à 30,9%.

Déclaration de divulgation

Aucun conflit d'intérêts potentiel n'a été signalé par les auteurs.

Références

- Brahim, B., Larbi, B., Abdallah, D., & Driss, S. (2016). Utilisation Du Sig Dans L'analyse Morphométrique Et La Prioritisation Des Sous-Bassins Versants De Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc). *European Scientific Journal* 12(6), 266. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266>
- Bravard, J.-P., & Petit, F. (1997). Les cours d'eau : dynamique du système fluvial. Paris : Armand Colin.
- Chorley, R. J. (1957). Illustrating the Laws of Morphometry. *Geological Magazine* 94(2), 140–150. <https://doi.org/10.1017/S0016756800068412>
- Dione, P. M. (2010). *Caractérisation et mise en valeur des bas-fonds du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas* [Mémoire de Maîtrise, Cheikh Anta Diop]. <http://196.1.97.20/viewer.php?c=mmoires&d=meml%5f5552>
- Dione, P. M. (2011). *Prédétermination des crues et estimation des écoulements de surface du bassin versant d'Aga-Foua-Djilas* [Mémoire de Master 2, Cheikh Anta Diop]. <http://196.1.97.20/viewer.php?c=mmoires&d=meml%5f7431>
- Dione, P. M. (2024). *Dynamique des ressources en eau et des terroirs dans le bassin versant d'Aga-Foua-Djilas face à la variabilité climatique et au changement climatique* [Thèse de Doctorat Unique]. Université Assane Seck.
- Dione, P. M., & Faye, C. (2024). GRACE characterization of spatiotemporal variation in terrestrial water storage in the AGA-FOUA-DJILAS WATERSHED (SENEGAL). *Revue Espace Géographique et Société Marocaine* 93, 25–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.34874/IMIST.PRSM/EGSM/53026>
- Dione, P. M., & Faye, C. (2025). Water resources and community dynamics in the Aga-Foua-Djilas watershed (Senegal): local perceptions and lowland management challenges. *Larhyss Journal*, 61, 53–79. <https://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/16731/998>
- Dione, P. M., Faye, C., Mohamed, A., Alarifi, S. S., & Mohammed, M. A. A. (2024). Assessment of the impact of climate change on current and future flows of the ungauged Aga-Foua-Djilas watershed: a comparative study of hydrological models CWatM under ISIMIP and HMF-WA. *Applied Water Science*, 14(7), 163. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02219-x>
- Dione, P. M., Faye, C., & Sadio, C. A. A. S. (2023). Hydrological Impacts of Climate Change (Rainfall and Temperature) and Characterization of Future Drought in the Aga Foua Djilas Watershed. *Indonesian Journal of Social and Environmental Issues (IJSEI)*, 4(3), 353–375. <https://doi.org/10.47540/ijsei.v4i3.1218>
- Dione, P. M., Faye, C., & Tolche, A. D. (2025). Projection of future temperature and precipitation in the Aga-Foua-Djilas basin in Senegal using the CMIP6 multi-model ensemble. *Journal of Materials and Environmental Science*, 16(2), 256–281. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol16/vol16_N2/JMES-2025-1602016-Dione.pdf
- Douvinet, J., Delahaye, D., & Langlois, P. (2008). Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.16103>

- Faty, B. (2010). *Pluie et écoulement dans le bassin du Marigot d'Aga-Foua-Djilass* [Mémoire de Maîtrise]. Université Cheikh Anta Diop.
- Faye, C., Dièye, S., & Faye, G. (2021). Analyse Morphométrique Et Hydrologique Du Sous-Bassin Versant Du Niaoule (Bassin De La Gambie) A L'aide De Techniques SIG. *Algerian journal of arid environment* 11(1), 54–77.
- Faye, C., & Ndiaye, M. (2021). Use of Geospatial Tools in Morphometric Analysis and Prioritisation of Sub-catchments of the Soungrougrou (Casamance Basin). *Quaestiones Geographicae*, 40(3), 65–84. <https://doi.org/10.2478/quageo-2021-0024>
- Gravelius. (1914). *Grundrifi der gesamten Gewisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, Vol. I. Rivers, in German)*. Goschen, Berlinman), 10.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3), 275. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Ibrahim, S., Moubarak, M., & Ibrahim, M. (2023). Caractérisation des paramètres morphométriques du sous bassin versant du goulbin Maradi au Niger. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 7(4), 1049–1055. <http://revues.imist.ma/?journal=ewash-ti/>
- Kale, V. S., & Gupta, A. (2001). *Introduction to Geomorphology*. Sangam Books Ltd
- Kaliappan, S., & Venkatraman, V. (2023). Determination of Parameters for Watershed delineation using various satellite derived Digital Elevation Models and its accuracy. *Global NEST Journal*, 25(4), 124-137. <https://doi.org/10.30955/gnj.004202>
- Kartic, B., & Jatisankar, B. (2013). Prioritization of Watershed using Morphometric Analysis through Geoinformatics technology: A case study of Dunga subwatershed, West Bengal, India. *Interantional Journal of Advances in Remote Sensing and GIS*, 2(1).
- Kouedjou, I. L., & Anaba, B. R. C. (2021). Analyse morphométrique du bassin versant de la Menoua pour une meilleure gestion des risques morphohydrologiques. *American Journal of innovative Research & Applied Sciences*, 12(5), 188–197. <https://american-jiras.com/Kouedjou%E2%80%9393Ref1-ajira030521.pdf>
- Magesh, N. S., & Chandrasekar, N. (2014). GIS model-based morphometric evaluation of Tamiraparani subbasin, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), 131–141. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0742-z>
- Mashauri, F., Mbuluyo, M., & Nkongolo, N. (2023). Use of Geographic Information System and Digital Elevation Model to Analyze the Hydro-Morphometric Characteristics of the Tshopo River Sub-Catchments, Democratic Republic of Congo. *Revue Internationale de Géomatique*, 32, 99–122. <https://doi.org/10.32604/rig.2023.044899>
- Melton, M. A. (1958). Correlation Structure of Morphometric Properties of Drainage Systems and Their Controlling Agents. *The Journal of Geology*, 66(4), 442–460. <https://doi.org/10.1086/626527>
- Miller, V. C. (1953). *A quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristic in the Clinch, Mountain Area, Verdinia and Tennessee*. Department of Geology Columbia University, New York, 389-402.
- Ozdemir, H., & Bird, D. (2009). Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. *Environmental Geology*, 56(7), 1405–1415. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1235-y>

- Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., & Mishra, V. N. (2017). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0238-y>
- Roche, M. (1963). *Hydrologie de surface (OROSTOM)*. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ird_hydrologie_de_surface_marcel_roche_1963.pdf
- Rolan-Meynard, M., Vivrier, A., Reyjol, Y., Boutet-Berry, L., Bouchard, J., Mangeot, P., Navarro, L., Melun, G., Moreira-Pellet, B., Bramard, M., Le Bihan, M., Magand, C., Leurent, T., Vigneron, T., Cagnant, M., Bourrain, M., Morel, A., & Kreutzenberger, K. (2019). *Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau*. Agence française pour la biodiversité & Collection Guides et protocoles
- Sadio, C. A. A. S., & Faye. C. (2025). Analyse des paramètres morphométriques à partir des techniques de télédétection et de SIG dans les bassins versant de la Casamance à Kolda et de la Kayanga-Géva à Wassadou. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, 95, 225–253.
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *GSA Bulletin* 67(5), 597. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6). <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In : Chow, V.T - *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, pp. 439–476.
- Todhunter, I. (1888). *A Treatise on Plane Co-ordinate Geometry as Applied to the Straight Line and the Conic Sections*. London, Macmillan and Co. and New York.