

ANALYSE STATISTIQUE DES PARAMETRES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN ET SOUS- BASSINS VERSANTS DE LA LOEME AU SUD-OUEST DE LA REPUBLIQUE DU CONGO

STATISTICAL ANALYSIS OF THE MORPHOMETRIC PARAMETERS OF THE LOEME BASIN AND SUB-BASINS IN THE SOUTHWEST OF THE REPUBLIC OF CONGO

NGOUALA MABONZO Médard

Institution : Université Marien Ngouabi, adresse électronique : medardngouala2020@gmail.com, Tél : +242 06 475 00 70

Résumé

Le bassin versant de la Loémé est un hydrosystème du domaine tropical humide dans sa partie sud de la République du Congo dont les altitudes varient de 43 m (au niveau de l'exutoire dans le même rayon de la confluence avec l'océan atlantique) à 830 m au niveau du mont Mvounougouti. Cet article a pour objectif l'analyse de la corrélation entre des paramètres morphométriques du bassin versant de la Loémé. La méthodologie a consisté à un traitement des paramètres morphométriques pour les différents sous-bassins de la Loémé par une analyse en composantes principales, afin de déterminer les affinités entre ces sous bassins et déduire les paramètres les plus caractéristiques. Cette analyse a permis de mettre en évidence l'interrelation entre les différents paramètres physiographiques et l'individualisation de trois groupes de sous-bassins. Les résultats de l'ACP désignent la superficie, le périmètre, le coefficient de compacité de Gravelius, la longueur équivalente et la largeur équivalente comme paramètres principaux de cette subdivision. L'analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a permis d'identifier quatre classes des paramètres morphométriques dans l'ensemble du bassin versant de la Loémé.

Mots clés : Congo, Loémé, Bassin versant, Analyse en Composantes Principales, Classification Hiérarchique Ascendante.

Abstract

The Loémé River basin is a humid tropical hydrosystem located in the southern part of the Republic of Congo, with elevations ranging from 43 m (at the outlet, within the same radius as the confluence with the Atlantic Ocean) to 830 m at Mount Mvounougouti. This article aims to analyze the correlation between morphometric parameters and those of the Loémé River basin. The methodology involved processing the morphometric parameters for the different sub-basins of the Loémé using principal component analysis (PCA) to determine the affinities between these sub-basins and deduce the most characteristic parameters. This analysis highlighted the interrelationship between the different physiographic parameters and the identification of three groups of sub-basins. The PCA results identify area, perimeter, Gravelius compactness coefficient, equivalent length, and equivalent width as the main parameters of this subdivision. The analysis using Hierarchical Ascending Classification (HAC) identified four classes of morphometric parameters across the entire Loémé watershed.

Key words : Congo, Loémé, Watershed, Principal Component Analysis, Ascending Hierarchical Classification.

1. Introduction

Un bassin versant est une unité géographique de collecte des eaux pluviales, des eaux de sources, ainsi que des sédiments produits par l'érosion avant d'être transférés au chenal principal afin de continuer son chemin pour enfin atteindre l'exutoire (IDRISSI S. et TAOUS A., 2022, p.84 ; ENDALEW L. et MULU A., 2023, p.1). Il représente l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique pour une gestion optimale des terres, des ressources en eau et la réduction des impacts liés aux catastrophes naturelles sur le développement durable (ABDUL R. et al., 2015, p. 1323). Il est entièrement caractérisé par son

exutoire à partir duquel est tracé la ligne de crête correspondant (mais pas toujours) à la ligne de partage des eaux qui le délimite.

L'analyse morphométrique d'un bassin versant est une démarche importante pour la hiérarchisation des bassins versants même sans tenir compte de la carte des sols. Pour ce faire, on peut recourir à un ensemble de paramètres quantitatifs importants dans la compréhension du dynamisme d'une rivière : superficie, périmètre, longueur, largeur, indice de compacité de Gravelius, indice de pente, pente moyenne du cours d'eau, altitude maximale, altitude minimale (VELTRIET M. *et al.*, 1996, p.138).

Le diagnostic physico-géographique, première étape de la connaissance des bassins versants, permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans les processus de l'écoulement superficiel : facteurs orographiques, morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques. Leur interaction est déterminante dans le comportement hydrologique des bassins (BABA-HAMED K. et BOUANAN A., 2016, p.277).

Les paramètres morphologiques ont été obtenus à partir des travaux de Sow (2007). Pour faire une étude statistique prenant en compte 15 variables sur 14 sous bassins, deux questions sont alors soulevées. La première est de choisir des variables complémentaires pour synthétiser au mieux l'information portée par l'ensemble des variables devant une série de données. La deuxième est de trouver une représentation plane de l'ensemble des variables dans un espace réduit permettant une visualisation des liens numériques et de déceler des facteurs latents (FAYE C., 2014, p.112).

Dans ces conditions, il est important d'analyser la morphologie du paysage du bassin versant de la Loémé afin de développer une meilleure gestion et une exploitation rationnelle de ses ressources naturelles. La méconnaissance des caractéristiques physiographiques des bassins et sous-bassins versants de cet espace géographique, qui est en perpétuelle évolution suscite l'intérêt de notre étude. Ce travail a donc pour objectif général d'analyser les caractéristiques de la morphologie du paysage du bassin versant de la Loémé à l'aide des images MNT de 30 m de résolution spatiale. De manière spécifique, il est question de mettre en évidence, les types de reliefs et leurs caractéristiques, notamment, les altitudes, pentes, formes élémentaires et formes des bassins versants du département du Kouilou.

2. Méthodologie

2.1. Cadre général d'étude

Le bassin versant de la Loémé est situé au sud-ouest de la République du Congo, entre les latitudes 4°18'41" et 4°59'39" Sud et les longitudes 12° 8'00" et 12° 30'00" Est (Fig. 1). Il fait partie de deux unités orographiques que constitue la façade maritime du Congo à savoir la chaîne du Mayombe et la plaine côtière.

Du point de vue géologique, le Mayombe est entièrement constitué de formations de soubassement ayant plusieurs orogénèses d'âge précambrien. Ses sols sont rangés dans la catégorie des sols ferrallitiques moyennement désaturés, très dénaturés et extrêmement désaturés, appauvris sur matériaux sableux à sablo- argileux de la série de cirques, rajeunis sur pente, peu évolués d'érosion locale, et aptes à l'agriculture traditionnelle sur une surface importante (DADET P., 1969, p.30). Ce bassin versant est dominé par la forêt qui couvre son ensemble.

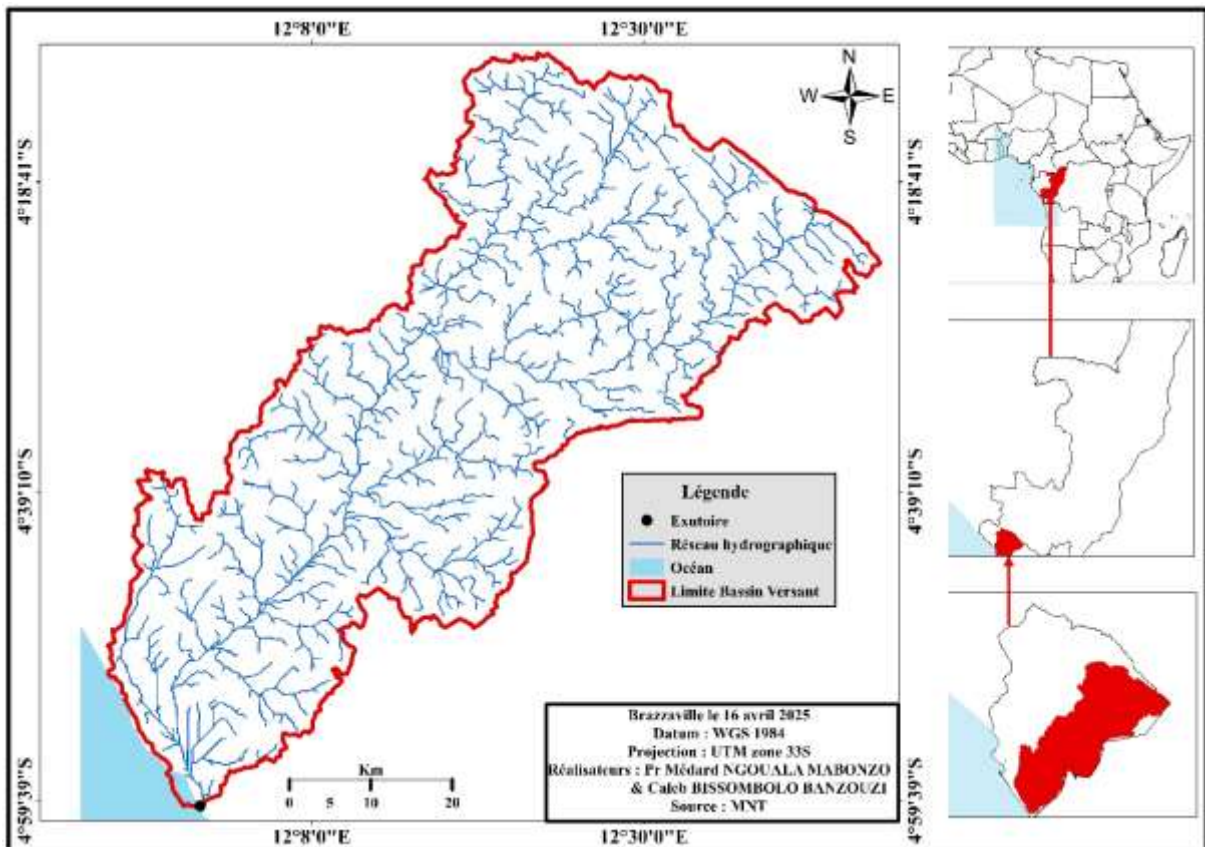


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Son climat est du type tropical humide caractérisé par une alternance de deux saisons : une saison chaude et pluvieuse qui s'étend de novembre à avril et une saison sèche et fraîche de juin à septembre (SAMBA-KIMBATA M.J., 2002, p.83).

2.2. Détermination des paramètres physiques du bassin et sous - bassins versants de la Loémé

La surface et le périmètre des sous-bassins versants de la Loémé ont été déterminés automatiquement à l'aide du logiciel Arcgis 10.8. L'indice de compacité de Gravelius K_G est appelé également coefficient de forme du bassin versant. Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre d'un cercle de même superficie. Cet indice a été calculé par la l'équation (1) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{Equation 1}$$

Avec : K_G = Coefficient ou indice de compacité de Gravelius ; P = Périmètre du bassin versant en km; S = Superficie du bassin versant en km^2 et π = constant 3,14.

La longueur et largeur du rectangle équivalent sont utilisées comme indicateur de la compacité ou de l'allongement de la forme d'un bassin versant (BENZOUAGH B. et al., 2019, p.122). Elles ont été calculées par les équations (2) et (3) :

$$Lr = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] ; lr = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \quad \text{Equations 2 et 3}$$

Avec : L_r = longueur du rectangle (km) ; l_r = largeur du rectangle (km) ; KG = coefficient de Gravelius et S = surface du bassin versant (km²).

Les altitudes minimales et maximales ont été obtenues directement à partir des MNT de différents sous-bassins versants de la Loémé à l'aide du logiciel QGIS 3.22.13. L'altitude médiane d'un bassin versant correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. L'altitude moyenne a été calculée par l'équation (4), à partir des courbes hypsométriques.

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum S_i \cdot H_i}{A} \quad \text{Equation 4}$$

Avec : H_{moy} = altitude moyenne (m), S_i = surface de chaque tranche d'altitude (km²); H_i = altitude moyenne de chaque tranche (m) et S : surface totale du bassin (km²).

L'indice de pente moyenne a été calculé à partir de l'équation (5). C'est le quotient de la différence entre les hauteurs extrêmes par la longueur du rectangle équivalent (BENZOUGAGH B. et al., 2019, p.122).

$$I_{\text{pm}} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}}{L_r} \quad \text{Equation 5}$$

Avec : I_{pm} = indice de pente moyenne (en m/km ou %); H_{max} = altitude maximale (en m); H_{min} = altitude minimale (en m) et L_r = longueur de rectangle équivalent (en km).

L'indice de pente globale est défini comme étant le rapport entre la dénivellation et la longueur de rectangle équivalent. Il a été calculé à partir de l'équation (6).

$$I_{\text{pg}} = \frac{D_g}{L_r} \quad \text{Equation 6}$$

Avec : I_{pg} = indice de pente globale (en m/km); D_g = dénivelée globale (en m) et L_r = longueur de rectangle équivalent (en km).

La dénivelée globale a été calculée à partir de l'équation (7). Elle donne une idée sur la différence d'altitudes entre l'amont et l'aval d'un bassin versant. Ces altitudes ont été extraites sur les courbes hypsométriques. La dénivelée globale a été calculée à partir de la formule (7). Elle donne une idée sur la différence d'altitudes entre l'amont et l'aval d'un bassin versant. Ces altitudes ont été extraites sur les courbes hypsométriques.

$$D_g = H_{5\%} - H_{95\%} \quad \text{Equation 7}$$

Avec : D_g = dénivelée globale (en m) ; $H_{95\%}$ = altitude correspondante à 95% de la superficie totale du bassin versant (en m) et $H_{5\%}$ = altitude correspondante à 5% de la superficie totale du bassin versant (en m).

La dénivelée spécifique permet de comparer le relief des bassins versants de taille différente. Elle est définie comme étant le produit de l'indice de pente globale par la racine carrée de la surface du bassin versant. La formule (8) a été utilisée pour calculer ce paramètre.

$$D_s = I_{\text{pg}} \sqrt{S} \quad \text{Equation 8}$$

Avec : D_s = dénivelée spécifique (en m); I_{pg} = indice de pente globale (m/km) et S = surface du bassin versant (km²).

La densité de drainage correspond au rapport de la longueur totale des thalwegs par la surface du bassin (BENZOUGAGH B. et al., 2019, p.122). Elle a été calculée à partir de l'équation (9).

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad \text{Equation 9}$$

Avec : D_d = densité de drainage en (km/km²) ; L_i = somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal (km) et S = superficie du bassin versant (km²).

Rapport de longueur correspond au rapport de longueur moyenne des thalwegs d'ordre « n + 1 » sur la longueur moyenne des thalwegs d'ordre « n ». Ce rapport est calculé par l'équation (10).

$$R_l = \frac{L(n+1)}{L(n)} \quad \text{Equation 10}$$

Avec : R_l = rapport de longueur ; $L(n+1)$ = longueur moyenne des cours d'eau d'ordre « n + 1 » en (km) et $L(n)$ = longueur moyenne des cours d'eau d'ordre « n » en (km).

Rapport de confluence est défini comme un rapport du nombre de cours d'eau d'ordre « n » sur le nombre de cours d'eau d'ordre « n + 1 », équation (11).

$$R_c = \frac{N(n)}{N(n+1)} \quad \text{Equation 11}$$

Avec : R_c = rapport de confluence des cours d'eau ("bifurcation ratio") ; $N(n)$ = nombre des cours d'eau d'ordre « n » ; $N(n+1)$ = nombre des cours d'eau d'ordre suivant « n + 1 ».

La fréquence des cours d'eau est définie comme le nombre total de thalwegs de tous les ordres par unité de surface. Elle a été calculer à partir de la formule (13).

$$F_c = \frac{N_t}{S} \quad \text{Equation 12}$$

Avec : F_c = fréquence des cours d'eau ; N_t = nombre total des thalwegs de tous les ordres et S = surface du bassin versant.

Le coefficient de torrentialité est le produit de la densité de drainage par la fréquence des cours d'eau élémentaire (d'ordre 1) (BENZOUGAGH B. et al., 2019, p.122). Il s'exprime par la formule (14).

$$C_t = D_d \times F_{c1} = D_d \times \frac{N_1}{S}$$

Avec : C_t = coefficient de torrentialité ; D_d = densité de drainage (km/km²) ; F_{c1} = Fréquence des cours d'eau d'ordre « 1 » ; N_1 = nombre des cours d'eau d'ordre « 1 » et S = surface du bassin versant (km²).

2.3. Méthode d'analyse statistique des données

L'analyse en composantes principales (ACP), une technique statistique largement utilisée (FAYE C., 2014, p.92) qui réduit le nombre de variables à celles qui sont les plus significatives

parmi un ensemble de variables (BABA H.K. et BOUANANI A. ,2016, p.279), a été appliquée à 11 individus (sous-bassins versants) et 14 variables (paramètres physiographiques). Elle permet non seulement de trouver un lien entre les variables et les individus, mais aussi de les regrouper en régions homogènes.

3. Résultats

Les résultats des paramètres géométriques, morphométriques et topographiques des bassins et sous-bassins versants de la Loémé sont consignés dans les tableaux 1 et 2. La distribution spatiale des variables est présentée par les Figure 2 et 3. Elle permet d'apprécier la grandeur de chaque paramètre dans la carte factorielle. Les cercles et carrés correspondent aux valeurs normées des différents paramètres dans le plan factoriel.

3.1. Paramètres physiographiques des sous bassins versants

Les caractéristiques physiographiques des bassins et sous-bassins versants sont nécessaires dans la détermination et l'analyse de son comportement hydrologique. Le tableau 1 regroupe l'ensemble des paramètres géométriques et morphométriques du bassin et sous bassins versants de la Loémé.

Tableau 1 : Paramètres géométriques et morphométries des sous-bassins versants

| Bassin versant | S (km ²) | P (km) | Lr (km) | lr (km) | K _G |
|----------------|----------------------|--------|---------|---------|----------------|
| SBVL-0 | 3400,41 | 409,07 | 129,42 | 45,73 | 1,96 |
| SBVB-1 | 66,52 | 41,76 | 12,20 | 6,77 | 1,43 |
| SBVD-2 | 62,42 | 39,51 | 11,45 | 6,61 | 1,40 |
| SBVD-3 | 133,97 | 81,90 | 25,95 | 9,07 | 1,98 |
| SBVK1-4 | 123,03 | 57,84 | 16,99 | 9,16 | 1,46 |
| SBVK2-5 | 67,69 | 54,33 | 16,97 | 6,50 | 1,85 |
| SBVK3-6 | 201,22 | 101,89 | 32,38 | 11,10 | 2,01 |
| SBVL1-7 | 96,03 | 66,08 | 20,74 | 7,72 | 1,89 |
| SBVL2-8 | 758,55 | 166,10 | 50,81 | 22,04 | 1,69 |
| SBVL3-9 | 221,38 | 90,05 | 27,57 | 11,90 | 1,69 |
| SBVM-10 | 245,75 | 93,91 | 28,68 | 12,56 | 1,68 |
| SBVS-11 | 98,90 | 59,43 | 18,14 | 7,97 | 1,67 |
| SBVT-12 | 72,59 | 40,60 | 11,57 | 7,26 | 1,33 |
| SBVV-13 | 83,72 | 47,21 | 13,82 | 7,58 | 1,44 |
| SBVW-14 | 41,09 | 36,33 | 10,94 | 5,19 | 1,59 |
| SBVY-15 | 43,35 | 36,12 | 10,78 | 5,37 | 1,54 |

Avec : S=surface, P=périmètre, K_G=coefficient ou indice de Gravelius, Lr=longueur du rectangle équivalent et lr=largeur du rectangle équivalent.

L'écoulement de l'eau dans les bassins versants peut être influencé par la dénivelée spécifique, les pentes ainsi que les drainages et les confluences des cours d'eau. Le tableau 2 ci-après regroupe l'ensemble des paramètres orographiques et hydrographiques des sous bassins versants de la Loémé.

Tableau 2 : Paramètres topographiques des sous-bassins versants de la Loémé

| Sous- bassin versant | Ds (Km/Km ²) | Ipg (m/km) | Dsp (m) | Ipm (m/km) | Hmoy (m) |
|----------------------|-----------------------------|---------------|------------|---------------|-------------|
| SBVL-0 | 0,56 | 3,31 | 193,3 | 6,08 | 203,75 |
| SBVB-1 | 2,15 | 7,21 | 193,3 | 12,87 | 59,73 |
| SBVD-2 | 2,50 | 17,5 | 137,1 | 31,78 | 169,05 |
| SBVD-3 | 1,13 | 16,95 | 196,23 | 22,96 | 495,81 |
| SBVK1-4 | 2,14 | 5,53 | 61,36 | 9,53 | 56,1 |
| SBVK2-5 | 2,04 | 4,77 | 39,26 | 8,24 | 59,73 |
| SBVK3-6 | 2,37 | 4,48 | 63,51 | 5,9 | 67,83 |
| SBVL1-7 | 1,57 | 11,57 | 113,41 | 22,23 | 115,45 |
| SBVL2-8 | 1,71 | 8,15 | 224,4 | 15,94 | 238,19 |
| SBVL3-9 | 1,11 | 4,2 | 62,6 | 10,51 | 80,57 |
| SBVM-10 | 1,09 | 8,37 | 131,19 | 13,56 | 115,45 |
| SBVS-11 | 1,13 | 5,67 | 56,47 | 8,16 | 64,3 |
| SBVT-12 | 1,83 | 5,47 | 46,62 | 7,86 | 19,72 |
| SBVV-13 | 1,01 | 8,6 | 78,75 | 11,86 | 66,17 |
| SVBW-14 | 2,30 | 18,38 | 117,82 | 33,28 | 254,61 |
| SBVY-15 | 2,22 | 8,44 | 55,6 | 15,77 | 65,03 |

Avec : Ds = densité de drainage, Ipg = indice de pente globale, Dsp= dénivelée spécifique, Ipm = indice de pente moyenne, Hmoy = altitude moyenne

Les paramètres physiographiques déterminés dans l'ensemble des bassins et sous-bassins versants de la Loémé permettent de montrer que le relief influence directement l'hydrologie, l'érosion, la répartition de l'humidité du sol et la formation du réseau hydrographique. De nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques.

3.2. Analyses statistiques des données physiographiques des sous bassins versants

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les variables suivantes : S, P, L, l, K_G, H_{moy}, D_s, I_g et P_{moy} sont les paramètres dominants dans l'ensemble du bassin versant de la Loémé. Les deux axes factoriels 1 et 2 expliquent environ 76,05 % de la variance des données. En particulier, le premier axe explique 50,18 %, soit la majorité de la variance des données (Tableau 3).

Tableau 3 : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée

| | F1 | F2 | F3 |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Valeur propre | 5,519 | 2,846 | 1,428 |
| Variabilité (%) | 50,177 | 25,877 | 12,983 |
| % cumulé | 50,177 | 76,053 | 89,036 |

Les deux premiers facteurs (F1-F2) représentent 76,05 % de la variance exprimée. Ils regroupent le maximum de la variance pour traduire exactement la corrélation qui existe entre l'ensemble des paramètres physiographiques des bassins et sous-bassins versant de la Loémé.

Tableau 4 : Matrice de corrélation entre les variables

| Var | S | P | K _G | L | l | K _G | H _{moy} | D _d | D _s | I _g | P _{moy} |
|------------------|---------|---------|----------------|-------|-------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| S | 1 | | | | | | | | | | |
| P | 0,981 | 1 | | | | | | | | | |
| K _G | 0,390 | 0,501 | 1 | | | | | | | | |
| L | 0,981 | 1,000 | 0,514 | 1 | | | | | | | |
| l | 0,977 | 0,994 | 0,422 | 0,992 | 1 | | | | | | |
| K _G | 0,390 | 0,501 | 1,000 | 0,514 | 0,422 | 1 | | | | | |
| H _{moy} | 0,202 | 0,253 | 0,430 | 0,257 | 0,226 | 0,430 | 1 | | | | |
| D _d | - | - | - | - | - | - | - | 1 | | | |
| D _s | 0,445 | 0,481 | 0,205 | 0,478 | 0,498 | 0,205 | 0,677 | - 0,219 | 1 | | |
| I _g | - 0,318 | - 0,344 | 0,097 | 0,341 | 0,359 | 0,097 | - 0,653 | 0,268 | 0,354 | 1 | |
| P _{moy} | -0,287 | -0,320 | 0,148 | 0,319 | 0,326 | 0,148 | 0,547 | 0,343 | 0,341 | 0,962 | 1 |

S : Surface, *P* : Périmètre, *K_G* : Coefficient de Gravelius, *L* : Longueur du rectangle équivalent, *l* : largeur du rectangle équivalent, *H_{moy}* : Altitude moyenne ; *I_g* : Indice global de pente de Roche, *D_d* : Densité de drainage, *D* : Dénivelée, *D_s* : Dénivelée spécifique, *P_{moy}* : Pente moyenne du bassin versant.

Cette matrice met en évidence une corrélation assez importante entre les paramètres morphométriques. Elle existe également à un degré moindre une corrélation entre les variables telles que **P-L** (1,000) ; **S- P** et **L** (0,981) ; **S- l** (0,977) ; **P- l** (0,994) ; **L- l** (0,992) ; **I_g - P_{moy}** (0,962) ; **H_{moy} - D_s** (0,677) ; **P-K_G** (0,501) et **K_G-L** (0,514) (tableau 4). Ces différentes corrélations traduisent l'influence de chaque paramètre dans le fonctionnement et caractérisation de ce bassin versant. L'analyse des variables de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) dans le plan factoriel F1-F2 est présentée par les Figures (2 et 3).

3.3. Caractéristiques des paramètres morphométriques (variables) en fonction de trois axes

A chaque paramètre (variable), on associe un point dont la coordonnée sur un axe factoriel est une mesure de la corrélation entre ce paramètre et le facteur (facteur 1 ou facteur 2 ou facteur 3). Par projection sur un plan factoriel, les paramètres morphométriques s'inscrivent dans un plan de côté 2 (Fig. 2 et 3). Elles sont d'autant plus proches du côté du plan que la variable est bien représentée par le plan factoriel, c'est-à-dire que la variable est bien corrélée avec les deux facteurs constituant ce plan.

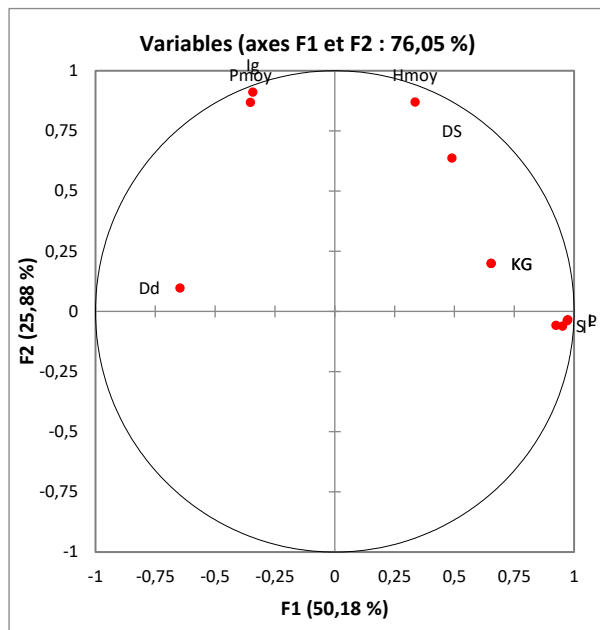


Figure 2 : Diagramme des contributions des paramètres morphométriques au niveau du bassin et sous-bassins versants de la Loémé sur les plans factoriels 1 et 2

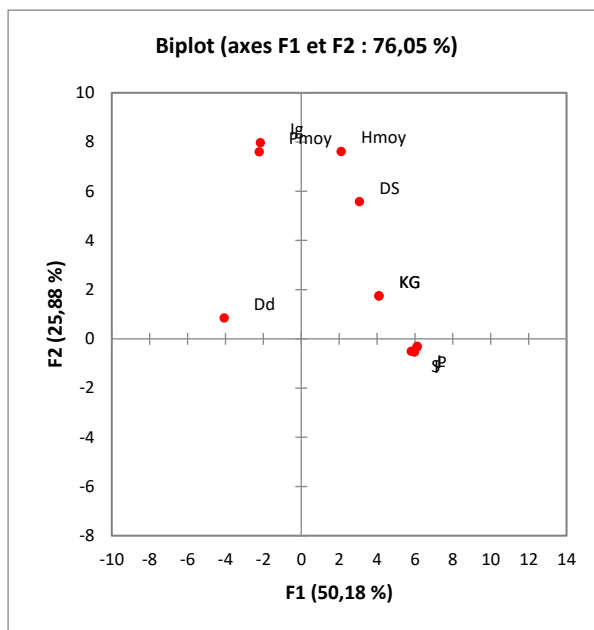


Figure 3 : Projection des individus du bassin et sous-bassins versants de la Loémé sur les plans factoriels 1 et 2

Le plan I-II (76,05 % de l'inertie cumulée) : l'axe I est déterminé par les paramètres de dimension tels que l'indice de compacité (K_G), dénivelée spécifique (D_S), Altitude moyenne (H_{moy}), L , P , S et I qui sont opposés à l'hypsométrie surtout à la densité de drainage, la pente moyenne et l'indice global. L'axe II porte positivement K_G , D_S , H_{moy} qui sont opposés à la densité de drainage (Dd).

En définitive, les figures des corrélations ont permis de voir, parmi les différentes variables, les groupes de variables qui sont très corrélés entre elles. Donc son étude est plus simple et plus informative que l'analyse directe de la matrice de corrélation. La nouvelle variable synthétique représente une opposition nette entre les paramètres de dimension (sur l'axe positif) et l'hypsométrie (sur l'axe négatif).

3.4. Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Cette représentation a pour but de fournir des images planes approchées du nuage de classification hiérarchique ascendante (CHA) des différentes classes dans l'ensemble de ce bassin et sous bassins versants situés dans le plan. La figure 4 présente les résultats de la classification des paramètres hypsométriques dans l'ensemble de cet espace géographique des zones hétérogènes. Quatre classes se distinguent dans cette classification : **C1**, **C2**, **C3** et **C4**. Dans celles-ci des associations entre variables et paramètres hypsométriques sont évidentes. Tel est le cas de K_G , L , I , Dd , Ig , et P_{moy} , dans la classe **C3** ; P et Ds dans la classe **C2** ; S dans la classe **C1** ; H_{moy} dans la classe **C4**. Ces classes ne sont autre que les quatre regroupements obtenus à partir des paramètres hypsométriques dans l'ensemble du bassin versant de la Loémé (Fig. 4). Dans de cet espace géographique l'ensemble de ces paramètres présente une très bonne corrélation.

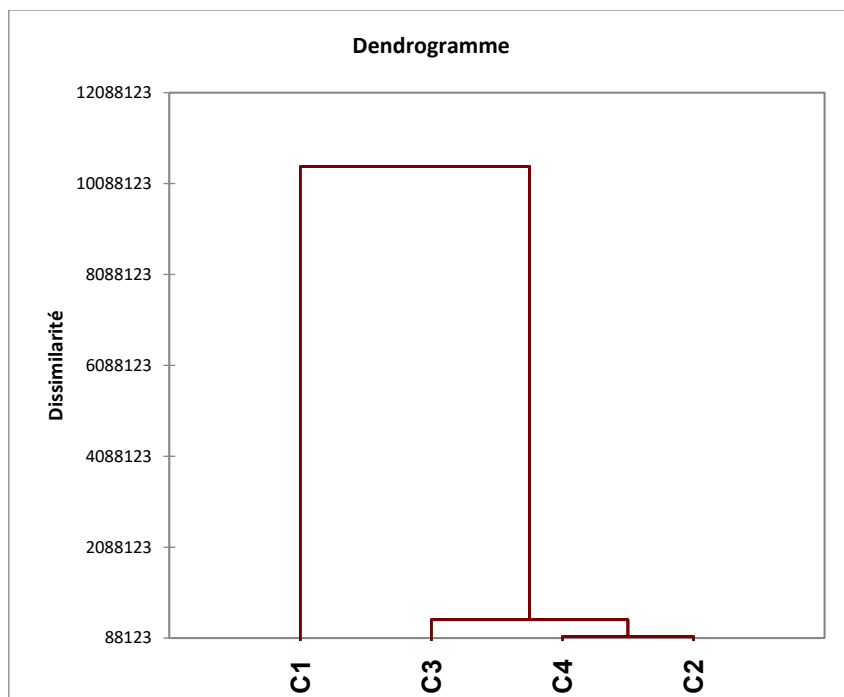


Figure 4 : Dendrogramme de la classification des variables morphométriques des bassins et sous-bassins versants de la Loémé

4. Discussion

Les résultats obtenus et présentés le long de ce travail permettent de mettre en lumière les différents mécanismes de caractérisation morphométrique de ce bassin versant. La discussion qui suit est structurée de manière à présenter les différents mécanismes hydrologiques qui peuvent se manifester dans la zone d'étude et définir l'importance qu'ils ont pour chacun des paramètres physiographiques. Le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Loémé dans le système hydrologique du bassin versant du Kouilou a été réalisé à partir de l'ensemble des résultats déduits des observations et de son interprétation de la détermination des paramètres physiographiques.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique statistique largement utilisée pour des questions d'analyse d'un grand nombre de variables (KOUANI A. *et al.*, 2007, p.9 ; PULIDO-BOSCH A. *et al.*, 1999, p.931 ; HELENA B. *et al.*, 1999, p.813 ; TIDJANI A. *et al.*, 2006, p.318 ; ESLAMIAN *et al.*, 2010, p.89), les paramètres morphométriques y compris (FAYE C., 2014, p.97; BABA H.K. et BOUANANI A., 2016, p.282).

Sur la base des regroupements que nous a donnés l'analyse, l'ACP a montré que les distinctions et les regroupements entre eux sont liés à leur appartenance à des contextes différents et à des caractéristiques morphométriques assez distinctes. Dix paramètres physiques et hydrographiques du bassin versant de la Loémé ont pu être déterminés. L'indice de Gravelius varie de 1,33 à 2,01 pour l'ensemble des sous bassins versants de la Loémé. Il permet d'avoir une idée sur la forme géométrique du bassin versant. Ces valeurs permettent d'affirmer que les sous bassins ont une forme plus allongée.

Malgré les résultats probants obtenus, certaines données utilisées doivent être remises en cause. Même si les groupes de bassins sont bien distincts, il n'y a pas une forte correspondance apparente entre les méthodes de groupement suivant les différents axes : les groupes ont

différentes consistances numériques et des sous bassins particuliers appartiennent à différentes régions pour différentes méthodes. La méthode indique, par ailleurs, que la consistance numérique de certains sous bassins ne suffit pas pour confirmer sa capacité à faire une excellente typologie par bassin.

En dépit de l'absence de lien direct entre les variables d'un bassin et les critiques violentes contre la morphométrie considérée comme une géométrie plane, la technique de l'ACP a, pourtant, pu indiquer l'ampleur de la dépendance de la dynamique des sous bassins sur les variables de dimension. Ainsi, ce fort degré de dépendance noté entre certains paramètres morphométriques de dimension (A, P, L, l, KG) et les autres paramètres du bassin n'est pas une caractéristique inattendue du bassin du fleuve Kouilou, ce qui est conforme avec le bassin versant de la Loémé.

Cela est dû à la relation qui existe entre les conditions de l'écoulement, particulièrement la crue, et ces variables (MEHAIGUENE M., 2013, p.6). La superficie du bassin a aussi influencé sa capacité de ruissellement puisque plus un bassin est large, moins sa capacité de ruissellement de surface est élevée. Le facteur de forme qui possède donc une relation directe avec le débit de pointe à l'exutoire du bassin, l'indice de Gravelius, influence l'écoulement. La combinaison sur la base de la caractérisation des paramètres morphométriques a révélé une corrélation significative a été observée entre la superficie et le périmètre (S-P = 0,981) ; la superficie et la longueur équivalente (S-L=0,981), la superficie et la largeur équivalente (S-l = 0,977) et d'autres paramètres (P-L = 1,000, P-l = 0,994, L-l =0,992, Ig - Pmoy = 0,962).

Bien que la variabilité du relief ait un impact important sur l'écoulement, l'utilisation seule de la dynamique pour déterminer cette corrélation reste insuffisante comme méthode et ne permet d'assurer la robustesse d'un tel modèle (FAYE C., 2014, p.98). En plus, le caractère statique et cloisonné des paramètres calculés ne permet pas notamment de prédire la réponse hydrologique des bassins et limite considérablement l'intérêt des résultats en cas de mesure de l'influence de la morphologie dans sa globalité. De plus, en décrivant de manière séparée les composantes morphologiques, ces paramètres ne sont pas aptes à donner une image synthétique de l'influence de la morphologie sur la réponse hydrologique théorique de surface. Toutefois, ces limites n'entravent en rien les bonnes performances obtenues.

Conclusion

Le bassin versant de la Loémé est un grand bassin versant est constitué par quatorze sous bassins versants. Dix paramètres physiques et hydrographiques des sous bassins ont pu être déterminés. Les superficies ont montré une valeur minimale de 41,09 km². Le plus grand sous bassins versant, SBVL2-8, atteint 758,55 km². Cette étude s'est basée sur une série de paramètres morphométriques (descripteurs) obtenus sur un ensemble de sous bassins d'une même rivière pour indiquer des paramètres résumant le mieux l'information portée par ces descripteurs, un bilan de liaison entre les paramètres, une représentation plane optimale des sous bassins, une classification des sous bassins selon les variables.

L'analyse multidimensionnelle de l'analyse en composantes principales (ACP) des sous bassins versants de la Loémé étudiés a montré que les distinctions et les regroupements entre eux sont liés à leur appartenance à des contextes différents et à des caractéristiques physiques assez distinctes. L'ACP a mis en évidence les affinités entre les différents sous bassins versants, elle a donc permis de déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux et de les rattacher à des groupes distincts. Les résultats de l'ACP nous ont permis le tracé des limites entre les

différents ensembles physiques en regroupant les sous bassins versants appartenant à la même unité géomorphologique.

L'examen des caractéristiques physiques de ces bassins versants a montré que ce sont surtout les caractéristiques de dimension ou de forme (superficie, périmètre, Coefficient de compacité de Gravelius, Longueur, Largeur) qui ont régi le classement statistique des différents sous bassins versants en groupes distincts. L'ACP a permis de diviser les individus (sous bassins versants) en des groupes sur la base des valeurs des variables qui les caractérisent. Ainsi en fonction des axes considérés, les individus ou bassins versants qui composent les groupes ont différencié souvent en fonction de l'analyse qui les a affectés aux groupes auxquels ils se rapprochent statistiquement le plus : trois groupes dégagés pour les axes I-II, seulement deux groupes pour les axes I-III et quatre groupes constatés pour les axes II-III.

Pour l'ensemble du bassin et sous-bassins versants étudiés, la force des liaisons qui existent entre les variables explicatives a été définie par une matrice de corrélations simples entre les variables morphométriques. Sont retenues comme variables explicatives du regroupement : la taille du bassin, l'indice de pente (Ip) et la densité de drainage (Dd). La construction du regroupement des sous bassins a permis la définition des affinités et des différences entre les groupes. En effet, l'examen des caractéristiques physiques de ces bassins versants a montré que ce sont surtout les caractéristiques de forme (Superficie, Périmètre, Indice de compacité de Gravelius, Longueur, Largeur) qui ont régi le classement statistique des différents sous bassins versants en groupes distincts. Ainsi, les bassins versants qui ont des dimensions plus grandes se démarquent toujours des autres.

Références bibliographiques

1. ABDUL Rahaman, ARUCHAMY Solavagounder, ABDUL Ajeez, JEGANKUMAR RAJAGOPAL, 2015 : « *Prioritization of Sub Watershed Based on Morphometric Characteristics Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System - A Study of Kallar Watershed, Tamil Nadu* ». Aquatic Procedia. Volume 4, 2015, pp.1322-1330.
2. BABA-HAMED Kamila et BOUANAN Abderrazak, 2016 : « *Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna, (Nord-ouest algérien)* ». Geo-Eco-Trop, 2016, pp. 277- 286.
3. BENZOUAGH Brahim, DRIDRI Abdallah, Boudad LARBI, SDKAOUI Driss, BAAMAR Brahim, 2019 : « *Apport des SIG et télédétection pour l'évaluation des caractéristiques physiques du bassin versant d'oued Inaouene (Nord-Est Maroc) et leurs utilités dans le domaine de la gestion des risques naturels* ». Am. J. innov. res. appl. sci. 2019 ; 8(4), pp. 120-130.
4. DADET Pierre, 1969 : « *Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo Brazzaville au 1/500.000* ». Mémoire du BRGM no70, Congo Brazzaville, ORSTOM, 103 p.
5. ENDALEW Lake et MULU Arega, 2023 : « *Estimation of the amount of sediment entering into Shumburit reservoir from the Shumburit watershed, East Gojjam zone, Amhara Region, Ethiopia* ». Environmental Challenges 11 :100696. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100696>

6. ESLAMIAN Saeid, GHASEMIZADEH Mehdi, Biabanaki Monireh, Talebizadeh Mansour, 2010 : « *A principal component regression method for estimating low flow index* ». *Water Resources Management*, 24 (11) : 2553-2566.
7. FAYE Cheikh, 2014 : « *Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal* ». *Cinq Continents*, 4 (10) : 80 - 108.
8. FAYE Cheikh, 2018 : « *Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie. (Bassin continental Guineo-Sénégalais)* ». *Revue Marocaine de Géomorphologie*. N°2. 2018, 110-127.
9. HELENA Beatriz, PARDO Rafael, VEGA Marisol and BARRADO Enrique, 1999 : « *Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis* ». *Wat. Res*, 34 (3) : 807-816.
10. IDRISSE Soumia & TAOUS Ali, 2022 : « *Analyse morpho métrique et hydrographique du bassin versant du Beht et de ses principaux affluents en utilisant le système d'information géographique* ». *Revue Marocaine géomorphologie*, (2022), pp. 83-103.
11. KENNETH Moore and HATFIELD Road ,1994 : « *Carbohydrates and forage quality. In: Fahey, G.C., Ed., forage quality, evaluation, and utilization* ». *American Society Agronomy, Madison*, 229-280.
12. KOUANI Ali, JAMALI Saïd El et TALBI Mohammed., 2007 : « *Analyse en composantes principales, une méthode factorielle pour traiter les données didactiques* ». *Radisma*, 2, 1-18.
13. PULIDO-BOSCH Antonio, CERON Juan Carlos and BAKALOWINCZ Michel, 1999 : « *Application of principal components analyse to the study of CO₂ – rich thermomineral waters in the aquifere system of alto Guadalentin (spain)* ». *J. Hydrol.* 46 : 929-942.
14. SAMBA-KIMBATA Marie Joseph, 2002 : « *Rythme bioclimatique et comportement phénologique de la végétation en République du Congo* ». *Annales Université Marien Ngouabi*, pp.81-92.
15. TIDJANI Abdellatif, El- Bari, YEBDRI Djilali, Roth Jean Claude et DERRICHE Zohra, 2006 : « *Exploration des séries chronologiques d'analyse de la qualité des eaux de surface dans le bassin de la Tafna en Algérie* ». *Revue des sciences de l'eau. Journal of Water Science.* 19 (4) : 315-324.
16. VELTRI Massimo, VELTRI Pierangelo et MAIOLO Massimo, 1996 : « *On the fractal dimension of natural channel network* ». *Journal of Hydrology*, 187 : 137-144.