



ARTICLE

## Utilisation du système d'information géographique et modèle numérique de terrain dans l'analyse des caractéristiques hydro-morphométriques des sous-bassins versants de la rivière Tshopo, République démocratique du Congo

### 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

Faidance Mashauri<sup>1,2,\*</sup>, Mokili Mbuluyo<sup>1,3</sup> et Nsalambi Nkongolo<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de l'Uélé, Isiro, BP 670, République démocratique du Congo

<sup>2</sup>Département de Sciences du Sol et de l'Eau, Institut Facultaire des Sciences Agronomiques (IFA) de Yangambi, Kisangani, BP 1232, République démocratique du Congo

<sup>3</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kisangani, Kisangani, BP 2012, République démocratique du Congo

<sup>4</sup>Geographic Information Technology Program, School of Science, Navajo Technical University, Crownpoint, New Mexico, USA

\*Corresponding Author: Faidance Mashauri. Email: mashaurifaidance@gmail.com

Received: 11 August 2023 Accepted: 07 November 2023 Published: 27 December 2023

#### RÉSUMÉ

L'analyse et la quantification des caractéristiques hydro-morphométriques sont essentielles pour une meilleure gestion des ressources en eau et une planification plus efficace des projets hydroélectriques dans le bassin de la Tshopo. Malheureusement, peu d'études ont été réalisées pour évaluer ces caractéristiques à l'échelle de ce bassin. Notre approche méthodologique consiste à utiliser les outils d'analyse des logiciels Système d'Information Géographique (SIG) appliqués au Modèle Numérique de Terrain (MNT) dérivé de l'image Advanced Land Observing Satellite (ALOS) World 3D-30m. Cela nous a permis d'extraire automatiquement le réseau hydrographique et de générer les sous-bassins versants de la Tshopo. Les résultats de cette analyse révèlent que le bassin versant de la Tshopo est d'ordre de grandeur 7. Au total, 8 sous-bassins versants ont été délimités, couvrant une superficie d'environ 19.335 km<sup>2</sup>. Ils sont de forme allongée, avec un coefficient de compacité (KG) compris entre 1,84 et 2,52. Les pentes moyennes sont faibles, variant de 0,84% à 3,58%. La vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement est généralement faible, avec une plage de vitesse (Ve) allant de 2,3 à 4,79 km/h. La durée de concentration des eaux de ruissellement (Tc) varie entre 30,2 et 70,2 heures dans les affluents de la Tshopo. Le réseau hydrographique est dense, avec des densités de drainage (Dd) allant de 0,91 à 1,72 km/km<sup>2</sup>. Les cours d'eau s'organisent en un réseau de type dendritique homogène, mais avec des variations locales. Dans certains endroits, le réseau peut prendre une forme parallèle ou rectangulaire.

#### MOTS CLÉS

Morphométrie ; MNT ; SIG ; hypsométrie ; réseau hydrographique ; sous-bassins versants ; rivière Tshopo



**ABSTRACT**

The analysis and quantification of hydro-morphometric characteristics are essential for better management of water resources and more effective planning of hydroelectric projects in the Tshopo basin. Unfortunately, few studies have been carried out to assess these characteristics at the scale of this basin. Our methodological approach consists of using Geographic Information System (GIS) software analysis tools applied to the Digital Elevation Model (DEM) derived from the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) World 3D-30m image. This enabled us to automatically extract the hydrographic network and generate the Tshopo sub-watersheds. The results of this analysis show that the Tshopo catchment area is of the order of magnitude 7. A total of 8 sub-watersheds were identified, covering an area of around 19,335 km<sup>2</sup>. They are elongated in shape, with a coefficient of compactness (KG) of between 1.84 and 2.52. Average slopes are low, ranging from 0.84% to 3.58%. Run-off velocity is generally low, with a velocity range (Ve) of 2.3 to 4.79 km/h. The duration of run-off concentration (Tc) varies between 30.2 and 70.2 h in the tributaries of the Tshopo. The hydrographic network is dense, with drainage densities (Dd) ranging from 0.91 to 1.72 km/km<sup>2</sup>. The watercourses form a homogeneous dendritic network, but with local variations. In some places, the network can take on a parallel or rectangular shape.

**KEYWORDS**

Morphometry; DEM; GIS; hypsometry; hydrographic network; sub-catchments; Tshopo river

**1 Introduction**

Le bassin versant désigne la zone géographique où convergent les eaux de ruissellement et d'infiltration qui alimentent un cours d'eau, qu'il s'agisse d'un fleuve, d'une rivière ou d'une ravine, etc. Le sous-bassin versant est la partie spécifique d'un bassin versant qui correspond à un affluent donné (Morell et al. [1]).

Pour évaluer l'environnement physique d'un bassin versant, il est nécessaire d'analyser ses caractéristiques hydro-morphométriques qui jouent un rôle important dans sa réponse hydrologique, notamment en ce qui concerne le régime des écoulements lors des périodes de crue ou d'étiage (Biswas et al. [2]).

La réaction du bassin versant aux précipitations, qui dépend en partie de la vitesse à laquelle les eaux de surface s'écoulent, est influencée par diverses caractéristiques morphologiques, telles que la taille du bassin, le relief, la pente longitudinale et l'orientation (Laabidi et al. [3], Waikar et al. [4]).

Les systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles numériques de terrain (MNT) sont aujourd'hui largement utilisés pour analyser les caractéristiques hydro-morphométriques des bassins versants (Vogt et al. [5], Bloch et al. [6], Kuldeep et al. [7], Tamll et al. [8], Akawwi [9], Mazahir et al. [10], Qadem et al. [11,12], Barbot et al. [13], Manojkumar et al. [14], Faye et al. [15]). L'utilisation des outils d'analyse offerts par les logiciels SIG appliqués sur le MNT permet d'extraire le réseau hydrographique et de générer ou délimité les sous-bassins versants. En effet, le réseau de drainage d'un bassin versant étant souvent représenté par un réseau d'éléments linéaires connectés, il peut être numérisé à l'aide de technique SIG ou dérivés automatiquement d'un MNT (Lipng et al. [16], Vimal et al. [17], Magesh et al. [18], Abubaker et al. [19]).

Dans la ville de Kisangani, l'approvisionnement en eau de la population est assuré à partir des ressources en eau de surface telles que le fleuve Congo et les rivières, ainsi que des ressources en eau souterraine provenant des sources et des puits d'eau. Un volume important est toutefois dédié aux eaux de la rivière Tshopo. En plus de fournir de l'électricité par la SNEL et de l'eau potable par la REGIDESO, la rivière Tshopo joue un rôle économique crucial dans la ville de Kisangani. Quelques grandes industries, telles que la BRALIMA dans le secteur brassicole et la SOTEXKI dans le secteur textile, sont situées sur sa rive gauche en aval de la centrale hydroélectrique actuelle de la Tshopo. On y retrouve aussi quelques espaces de loisirs, tels que les plages Zoo sur la rive droite et Jennifer sur la rive gauche. Actuellement, la ville de Kisangani ne bénéficie pas d'un approvisionnement régulier en électricité, ce qui a conduit le gouvernement congolais à envisager la construction d'une nouvelle centrale hydroélectrique (Tshopo 2). Cependant, il est regrettable qu'aucune étude n'ait encore été réalisée sur l'analyse des caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant de la Tshopo.

L'objectif de cet article est d'utiliser le SIG et le MNT pour analyser les caractéristiques hydro-morphométriques des sous-bassins versants de la Tshopo afin de mettre à la disposition des décideurs des informations précises sur les caractéristiques géométriques, topographiques et hydrographiques des sous-bassins versants étudiés. Ces données constituent un préalable pour une meilleure gestion et une planification plus efficace des projets hydroélectriques dans le bassin de la Tshopo. Les résultats de cette étude pourraient également contribuer à améliorer la gestion des ressources en eau dans la région sous étude, à soutenir les efforts de développement économique dans la ville de Kisangani et ses environs, et à réduire l'impact environnemental des projets d'exploitation de l'eau de la rivière Tshopo.

## **2 Milieu d'étude, Matériels et Méthodes**

### **2.1 Présentation du Milieu d'étude**

Le bassin versant étudié est drainé par la rivière Tshopo dans la partie centre nord-est de la République démocratique du Congo. Il est situé entre les latitudes  $-0,23^{\circ}\text{S}$  et  $1,24^{\circ}\text{N}$  et les longitudes  $25,12^{\circ}$  et  $27,45^{\circ}\text{E}$ . Il est entouré par le bassin versant de la Maïko au sud, celui de la Lindi au nord et par la vallée du Fleuve Congo au sud-ouest (Fig. 1).

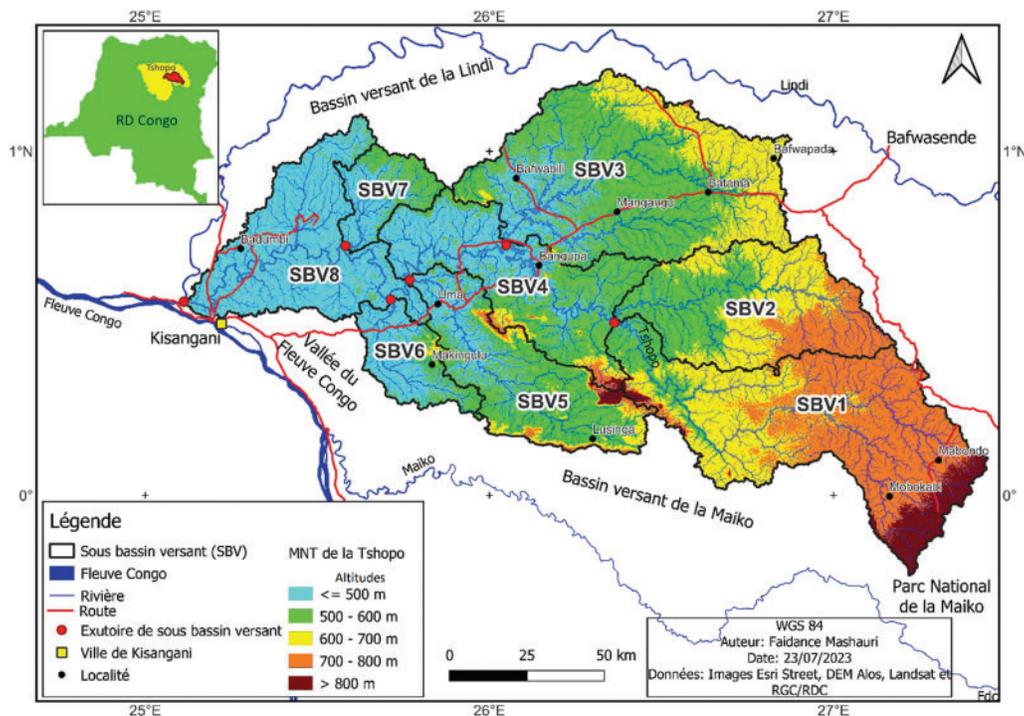
La Tshopo est une rivière qui a donné son nom à une des 26 provinces de la République démocratique du Congo. Sa source se trouve dans la province elle-même, dans le territoire de Bafwasende, et elle se jette dans la Lindi au niveau de Kisangani sans jamais quitter cet espace provincial (Otemikongo et al. [20]). Elle est alimentée par un bassin hydrographique d'une superficie d'environ  $19.335\text{ km}^2$ . D'après Léonard [21], ce bassin de forme allongée est couvert principalement de forêts ombrophiles guinéo-congolaises.

La situation de la Tshopo sous l'équateur dans une région continentale où les deux saisons de pluies et les deux saisons sèches sont très peu marquées ainsi que la nature de la végétation recouvrant son bassin fait que le débit de cette rivière soit relativement assez constant. Les basses eaux, plus ou moins marquées selon les années, se situent dans les mois de février, mars, et juin, juillet, août. Les hautes eaux sont atteintes fin avril-mai et surtout en octobre, novembre et décembre. L'amplitude maximum de la variation du niveau des eaux est de l'ordre de 4 à 5 m. Le débit annuel moyen de la rivière se situe aux environs de  $300$  à  $450\text{ m}^3/\text{seconde}$  avec un minimum de  $30\text{ m}^3/\text{seconde}$  et un maximum de  $1.100\text{ m}^3/\text{seconde}$ .

La géologie du bassin versant de la Tshopo correspond pour l'essentiel à une zone des terrains anciens du Précambrien recouverts par les formations géologiques récentes du Phanérozoïque. Selon

la légende de la carte géologique de la République démocratique du Congo au 1/2.500.000 (Fernandez-Alonso et al. [22]), la lithostratigraphie du bassin de la Tshopo se présente de la manière suivante, de bas en haut :

- Les formations anciennes du Précambriens, représentées par le Supergroupe de la Kibali, le Complexe granitoïde de l'Uélé et le Supergroupe de la Lindi (Groupe de la Lokoma et de l'Aruwimi). Ces formations géologiques couvrent la majeure partie du bassin versant de la Tshopo, elles sont constituées par les roches magmatiques (intrusions granitiques, etc.), métamorphiques (schistes, etc.) et sédimentaires (grès, argilite, calcaire, etc.).
- Les formations récentes du Phanérozoïque, représentées par le Groupe de la Lukuga, le Groupe de la Lueki, le Groupe de Kisangani et le Supergroupe de la Cuvette centrale. Ces formations sont localisées dans la partie sud-ouest du bassin versant de la Tshopo. Elles sont essentiellement sédimentaires, constituées des roches consolidées (grès, argilite, shale, conglomérat, marne, etc.) et meubles (graviers, sables, etc.).



**Figure 1 :** Localisation des sous-bassins versants de la rivière Tshopo

## 2.2 Sources des Données

Cette étude est menée grâce à l'utilisation de plusieurs sources de données primaires et secondaires, notamment : la carte administrative et routière de la province de la Tshopo à l'échelle de 1/750.000 (Laghmouch [23]), les données OSM (Open Street Map) et les images Google Earth. Ces données ont été utilisées pour obtenir des informations pertinentes sur les villages, le réseau de drainage, les principales routes, etc. L'image ALOS World 3D-30m, support principal de cette étude pour élaborer le MNT (Modèle Numérique de Terrain) du bassin versant de la Tshopo, a été utilisée pour extraire automatiquement le réseau hydrographique et générer les sous-bassins versants de la Tshopo. Cette

image a été téléchargée sur internet via le lien <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/>. Elle est produite par l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA) à l'aide du satellite d'observation de la Terre ALOS (Advanced Land Observing Satellite). Le modèle ALOS World 3D-30m fournit des données topographiques détaillées avec une résolution horizontale de 30 mètres, ce qui signifie que chaque pixel représente une zone de 30 mètres sur 30 de la surface terrestre. Il est basé sur des données provenant de deux sources principales : le Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) et le satellite ALOS lui-même.

### 2.3 Matériels et Méthodes

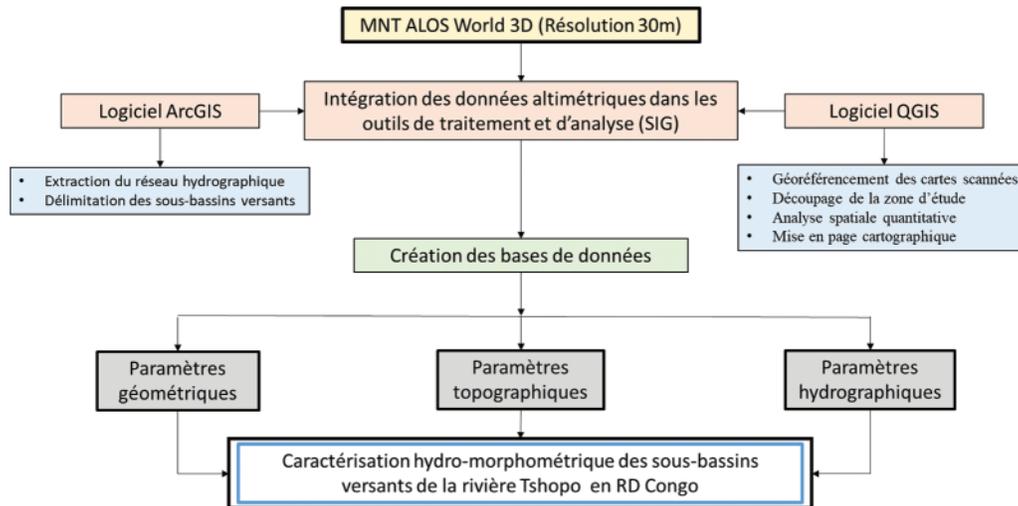
Notre approche méthodologique combine l'utilisation des outils SIG et du MNT pour l'analyse des caractéristiques hydro-morphométriques des sous-bassins versants de la Tshopo. Dans cette étude, nous avons exploité et interprété les données altimétriques (DEM ALOS World 3D-30m) dans le but de cartographier le réseau hydrographique et de délimiter les sous-bassins versants étudiés, et par la suite déterminer les différents paramètres géométriques, topographiques et hydrographiques. Dans le processus de délimitation des sous-bassins versants de la Tshopo à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), nous avons considéré conformément à la hiérarchisation de (Strahler [24]), les sous-bassins versants d'ordres (5,6 et 7) comme étant les plus représentatifs pour les analyses hydro-morphométriques quantitatives, car les petits bassins versants d'ordres (1,2,3 et 4) se trouvent généralement en état de déséquilibre pour le bassin de la Tshopo.

Les logiciels SIG (ArcGIS et QGIS) ont été utilisés pour assurer le stockage, le traitement, la visualisation et l'analyse spatiale des différents éléments dérivés du MNT du bassin de la Tshopo. La construction d'un réseau d'écoulement à partir d'un MNT est basée sur l'extraction automatique des cellules (pixels) correspondant aux thalwegs du MNT utilisé. Ces pixels ont été isolés et transformés en un réseau d'arcs au format vectoriel. La qualité de l'extraction du réseau de drainage dépend donc de la résolution horizontale du MNT (taille des pixels), de la topographie de la zone d'étude (cette extraction est plus délicate dans les zones planes) et des algorithmes utilisés (Payraudeau [25]).

Avec le logiciel ArcGIS (ArcMap 10.3), la délimitation des sous-bassins versants de la Tshopo et l'extraction automatique du réseau hydrographique d'après la classification de Strahler [24] a été réalisée suivant ce chemin (ou extension) : « ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Hydrology ». La précision d'un réseau théorique dépend de la résolution planimétrique du MNT utilisé (Charleux [26]). Dans le cadre de cette étude, l'analyse qualitative du réseau hydrographique dans le bassin versant de la Tshopo a été faite par comparaison des résultats obtenus sur le MNT avec un tracé existant sur les images Google Earth, OSM et la carte administrative et routière de la province de la Tshopo au 1/750.000.

Le logiciel QGIS 3.22.13 quant à lui, a été utilisé pour faire le géoréférencement des différentes cartes scannées, le découpage de la zone d'étude, la mise en page cartographique et effectuer l'analyse spatiale quantitative des certains paramètres hydro-morphométriques des sous-bassins versants de la Tshopo, notamment : la superficie, le périmètre, les altitudes minimale et maximale, le nombre et la longueur des cours d'eau. Les valeurs obtenues pour ces paramètres ont été utilisées afin de calculer les autres variables ou indices à partir des formules standards.

Pour caractériser l'environnement physique des sous-bassins versants de la Tshopo, nous avons donc calculé les différents paramètres hydro-morphométriques. Dans le cadre de cette étude, trois groupes de paramètres ont été pris en compte, à savoir : les paramètres géométriques, topographiques et hydrographiques. L'organigramme de la méthodologie du travail est représenté à la Fig. 2.



**Figure 2 :** Schéma synthétique de l'approche méthodologique adoptée pour les analyses

### 3 Résultats

Pour analyser les caractéristiques hydro-morphométriques des sous-bassins versants de la Tshopo, nous avons subdivisé ces caractéristiques en trois groupes de paramètres : les paramètres géométriques, les paramètres topographiques et les paramètres hydrographiques.

#### 3.1 Analyse des Paramètres Géométriques

Les résultats de l'analyse des paramètres géométriques des sous-bassins versants de la Tshopo faite à partir des données du MNT ALOS et analysées à l'aide des outils SIG sont consignés dans le [Tableau 1](#). Chacun des résultats contenus dans ce tableau fera par la suite l'objet d'une analyse minutieuse.

**Tableau 1 :** Valeurs des paramètres géométriques des sous-bassins versants de la Tshopo

N° Paramètres	Sous-bassins versants étudiés							
	SBV1	SBV2	SBV3	SBV4	SBV5	SBV6	SBV7	SBV8
1 S ( en km <sup>2</sup> )	4289,33	2499,35	4453,66	2290,27	2024,62	781,59	655,42	2340,34
2 P (en km)	532,84	352,27	478,18	402,85	335,9	206,46	167,97	434,71
3 K <sub>G</sub>	2,28	1,97	2,01	2,36	2,09	2,07	1,84	2,52
4 L <sub>r</sub> (en km)	249,21	160,57	218,73	189,33	154,88	95	75,28	205,99
5 l <sub>r</sub> (en km)	17,21	15,57	20,36	12,1	13,07	8,23	8,71	11,36

Avec : S = surface, P = périmètre, KG = coefficient ou indice de Gravelius, L<sub>r</sub> = longueur du rectangle équivalent et l<sub>r</sub> = largeur du rectangle équivalent.

##### 3.1.1 Surface (S) et Périmètre (P)

Les débits d'écoulement des cours d'eau sont en partie influencés par la surface du bassin versant, qui constitue la zone où les précipitations sont collectées et alimentent les cours d'eau. Ameer et al. [27].

Le périmètre du bassin versant est considéré comme une projection horizontale de la ligne de partage des eaux du bassin, reliant les points de plus grande hauteur entre deux sous-bassins versants et séparant leurs écoulements de surface. La ligne de partage des eaux délimite l'ensemble d'un réseau hydrographique (Mazahir et al. [10]).

La surface et le périmètre des sous-bassins versants de la Tshopo ont été déterminés à l'aide du logiciel QGIS. Les valeurs de surface varient entre 655,42 km<sup>2</sup> (SBV7) et 4.453,66 km<sup>2</sup> (SBV3). Les sous-bassins versants délimités dans notre secteur d'étude présentent des valeurs de périmètre comprises entre 167,97 km (SBV7) et 532,84 km (SBV1). Ces deux paramètres vont nous aider à calculer les autres indices.

### 3.1.2 Coefficient ou Indice de Compacité de Gravelius (KG)

L'indice de compacité de Gravelius (KG) (Roche [28]), également connu sous le nom de coefficient de forme du bassin versant (Strahler [29]), est utilisé pour évaluer la compacité ou la circularité d'un bassin versant. Cet indice est défini comme le rapport entre le périmètre du bassin versant et le périmètre d'un cercle ayant la même superficie (Qadem [30]). Il est calculé par la formule (1) :

$$K_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot S}} = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1)$$

Avec : KG = Coefficient ou indice de compacité de Gravelius ; P = Périmètre du bassin versant en km ; S = Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup> et  $\pi$  = constant 3,14.

Si le coefficient est proche de 1, cela indique que le bassin versant a une forme parfaitement circulaire, ce qui le rend mieux drainé (Benzougagh et al. [31]). Lorsque KG est égal à 1,2, cela signifie que le bassin versant a une forme carrée, tandis que lorsqu'il est supérieur à 1,2, le bassin versant a une forme allongée, ce qui indique un mauvais drainage (Musy [32]).

La forme d'un bassin a une influence sur l'écoulement global du cours d'eau et sur l'allure de la courbe d'évolution du débit « Q » en fonction du temps « t » (hydrogramme) à l'exutoire du bassin (Saida et al. [33]). En effet, pour une même quantité de pluie, la forme allongée du bassin versant favorise des débits de pointe de crue plus faibles, en raison du temps plus long nécessaire à l'écoulement de l'eau jusqu'à l'exutoire (Daoud [34]). Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration. En revanche, les bassins en forme d'éventail, avec un temps de concentration plus court, auront les débits de pointe les plus élevés (Laabidi et al. [3]).

Pour le cas des sous-bassins versants de la Tshopo, les valeurs de l'indice de compacité de Gravelius (KG) varient entre 1,84 (SBV7) et 2,52 (SBV8). Ces valeurs étant supérieures à 1,2, les sous-bassins versants étudiés présentent des formes allongées, et par conséquent ils sont mal drainés.

### 3.1.3 Longueur (Lr) et Largeur (lr) du Rectangle équivalent

Pour évaluer l'impact des caractéristiques géométriques des bassins versants sur l'écoulement des eaux de surface, la notion de rectangle équivalent a été introduite (Benzougagh et al. [31]). Ce rectangle est obtenu en réalisant une transformation géométrique du bassin réel, tout en préservant la même superficie, le même périmètre ou le même coefficient de compacité, ce qui correspond à la même répartition hypsométrique selon (Lakraa [35]). 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. Elles

sont calculées par les formules (2) et (3) (Mellahi et al. [36]):

$$Lr = \frac{KG\sqrt{S}}{1,12} X \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2} \right] \quad (2)$$

$$lr = \frac{KG\sqrt{S}}{1,12} X \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2} \right] \quad (3)$$

Avec :  $Lr$  = longueur du rectangle (km) ;  $lr$  = largeur du rectangle (km) ;  $KG$  = coefficient de Gravelius et  $S$  = surface du bassin versant ( $km^2$ ).

Les longueurs des rectangles équivalents des sous-bassins versants de la Tshopo varient entre 75,28 km (SBV7) et 249,21 km (SBV1), les largeurs sont comprises entre 8,23 km (SBV6) et 20,36 km (SBV3).

### 3.2 Analyse des Paramètres Topographiques

Le Tableau 2 présente les valeurs des paramètres topographiques des sous-bassins versants de la Tshopo. Une analyse minutieuse sera faite par la suite pour l'ensemble de ces paramètres.

**Tableau 2 :** Valeurs des paramètres topographiques des sous-bassins versants de la Tshopo

N°	Paramètres	Sous-bassins versants étudiés							
		SBV1	SBV2	SBV3	SBV4	SBV5	SBV6	SBV7	SBV8
1	Dg (en m)	280	230	180	210	260	100	85	77
2	Ipg (en m/km)	1,12	1,43	0,82	1,11	1,68	1,05	1,13	0,37
3	Ds (en m)	73,59	71,61	54,92	53,08	75,54	29,43	28,91	18,08
4	Ipr (en %)	4,47	5,58	4,73	5,14	5,66	7,23	5,76	3,48
5	Ipm (en m/km ou %)	1,98	2,04	1,53	2,83	3,38	3,58	2,14	0,84
6	Hmax (en m)	965	788	783	933	950	769	579	556
7	Hmin (en m)	471	460	449	397	427	429	418	382
8	Hmoy (en m)	706,1	631,9	557,3	514,5	548,0	494,2	492,8	482,3
9	H <sub>50</sub> (en m)	711	650	539	502	517	484	493	482

Avec :  $Dg$  = dénivelée globale,  $Ipg$  = indice de pente globale,  $Ds$  = dénivelée spécifique,  $Ipr$  = indice de pente de roche,  $Ipm$  = indice de pente moyenne,  $Hmax$  = altitude maximale,  $Hmin$  = altitude minimale,  $Hmoy$  = altitude moyenne et  $H50$  = altitude médiane.

L'impact du relief sur l'écoulement des eaux de surface est significatif, car de nombreux paramètres tels que les précipitations, la température, etc., varient en fonction de l'altitude et de la morphologie du bassin (Benzougagh et al. [31]). La caractérisation du relief d'un bassin versant est réalisée à l'aide d'une carte et d'une courbe hypsométrique basée sur un modèle numérique de terrain (MNT).

#### 3.2.1 Cartes et Courbes Hypsométriques

La carte hypsométrique représente les surfaces comprises entre les différentes courbes de niveau. Elle donne une idée sur la pente et l'allure du relief. Les cartes hypsométriques des sous-bassins versants de la Tshopo (Fig. 3) montrent que la répartition des altitudes est liée à la topographie des sous-bassins versants composée d'unités plus ou moins étagées, correspondant, sur le plan

géomorphologique, à des plateaux disposés en marches d’escaliers et passant vers l’aval à des plaines. Les surfaces les plus dominantes sont comprises entre les altitudes 706 et 756 m pour le SBV1, 660 et 710 m pour le SBV2, 486 et 536 m pour le SBV3, 488 et 538 m pour le SBV4, 472 et 522 m pour le SBV5, 442 et 492 m pour le SBV6, 483 et 508 m pour le SBV7, 479 et 504 m pour le SBV8.

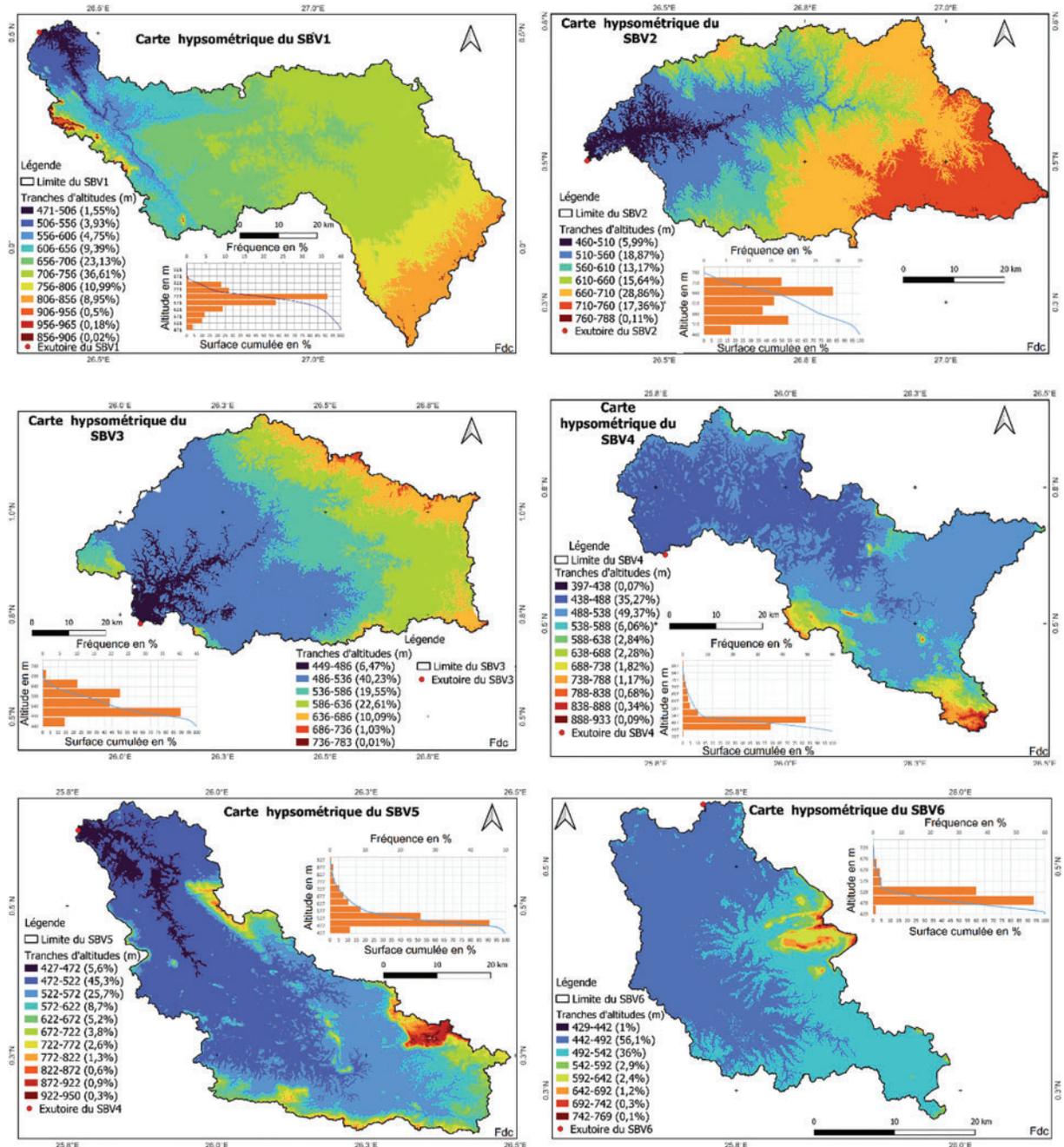
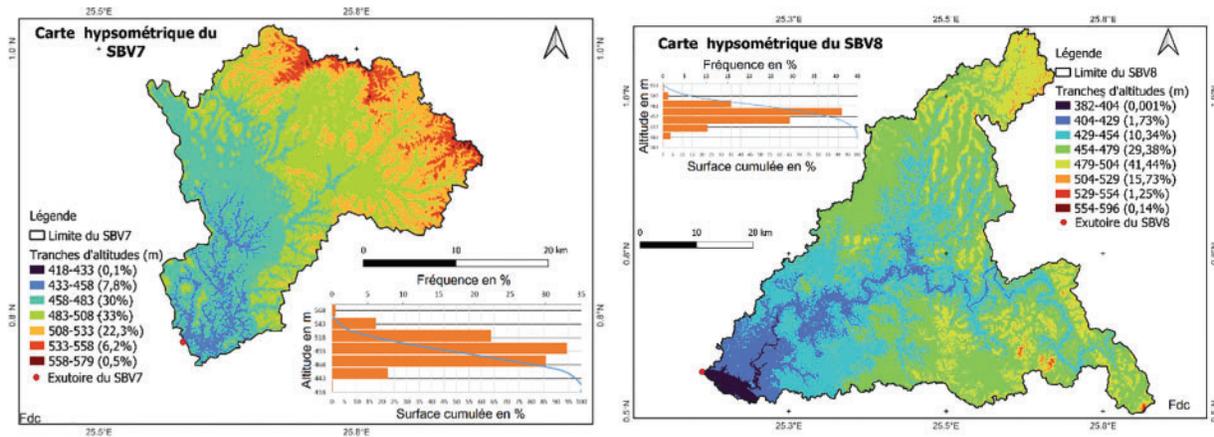


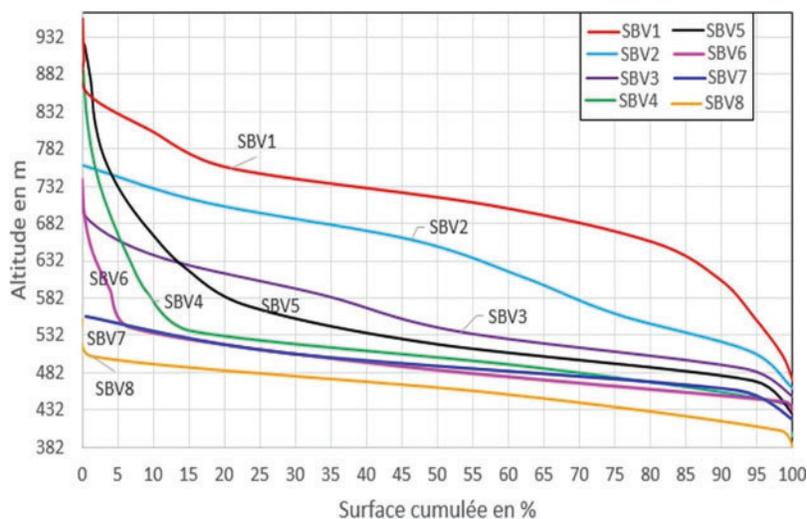
Figure 3 : (Continued)



**Figure 3 :** Cartes hypsométriques des sous-bassins versants de la Tshopo

La courbe hypsométrique est un outil pratique pour comparer plusieurs sous-bassins versants entre eux, comme le souligne Nihad et al. [37]. Elle offre une vue d'ensemble de la pente d'un bassin versant et, par conséquent, du relief, selon Boudhik et al. [38]. Cette courbe illustre la répartition de la surface du bassin versant en fonction de l'altitude et évaluer son âge et son degré d'érosion (Musy [32]). D'après Bannister [39], une courbe hypsométrique convexe est indicative d'un relief récent et dynamique, où l'érosion est encore intense. En revanche, une forme concave reflète un relief plus ancien qui n'a pas été affecté par des mouvements tectoniques où l'érosion est devenue faible et stable. Les courbes hypsométriques de ces 8 sous-bassins versants étudiés sont représentées à la Fig. 4 ci-dessous.

L'analyse des courbes hypsométriques montre globalement, selon la classification basée sur le degré d'érosion et de l'âge du bassin, qu'on est en présence des vieux sous-bassins versants qui ont atteint un stade relativement développé d'érosion, sauf pour les SBV1 et SBV2. La courbe hypsométrique du SBV1 est proche à celle du bassin versant jeune, alors que le SBV2 présente une courbe qui se rapproche à celle du bassin mature.



**Figure 4 :** Courbes hypsométriques comparées des sous-bassins versants de la Tshopo

Nous remarquons que c'est au niveau des SBV3, SBV4, SBV5, SBV6, SBV7 et SBV8 que le pouvoir érosif lié à l'eau est plus développé sur le bassin versant de la Tshopo. Cependant, pour passer du stade actuel des SBV1 et SBV2 au stade vieux, il est nécessaire d'avoir une érosion des roches meubles au niveau des parties supérieures et moyennes du profil longitudinal de ces deux sous-bassins versants, ainsi qu'un dépôt alluvial dans les parties inférieures. Cette évolution géomorphologique entraînerait en absence d'aménagement adéquat, un envasement du barrage de la Tshopo situé en aval, au niveau de la ville de Kisangani.

### 3.2.2 Altitudes Caractéristiques

Elles sont extraites à partir du modèle numérique de terrain (MNT), des cartes topographiques et des courbes hypsométriques. Il s'agit de l'altitude minimale, maximale, moyenne et médiane des sous bassins versants étudiés.

#### *Altitudes Minimales ( $H_{min}$ ) et Maximales ( $H_{max}$ )*

Elles ont été obtenues directement à partir des MNT de différents sous-bassins versants de la Tshopo à l'aide du logiciel QGIS. Les altitudes maximales représentent les points les plus élevés des sous-bassins versants. Dans le cas de cette étude, elles varient entre 556 m (SBV8) et 965 m (SBV1). Les altitudes minimales sont considérées comme les points les plus bas, généralement ce sont les exutoires des sous-bassins versants, elles varient entre 382 m (SBV8) et 471 m (SBV1). Ces deux informations deviennent particulièrement pertinentes lorsqu'on établit des relations impliquant des variables climatiques telles que la température, les précipitations et la couverture neigeuse. Elles déterminent l'étendue altimétrique et jouent également un rôle dans le calcul de la pente du bassin versant, ce qui permet de caractériser son relief (Habchi [40]).

#### *Altitudes Moyennes ( $H_{moy}$ )*

Elles se déduisent à partir des courbes hypsométriques. Cette mesure permet de caractériser la hauteur moyenne du bassin versant. Les altitudes moyennes des sous-bassins versants de la Tshopo calculées à partir de la [formule \(4\)](#), varient entre 482,3 m (SBV8) et 706,1 m (SBV1).

$$H_{moy} = \frac{\sum S_i \cdot H_i}{S} \quad (4)$$

Avec :  $S_i$  = surface de chaque tranche d'altitude ( $km^2$ ) ;  $H_i$  = altitude moyenne de chaque tranche (m) et  $S$  : surface totale du bassin ( $km^2$ ).

#### *Altitudes Médiannes ( $H_{50}$ )*

L'altitude médiane est définie comme la hauteur correspondant à l'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique (Dubreuil et al. [41]). Cette mesure se rapproche de l'altitude moyenne lorsque la courbe hypsométrique du bassin présente une pente régulière, comme l'indique (Ameur et al. [27]). Les altitudes médianes des sous-bassins versants de la Tshopo varient entre 482 m (SBV8) et 711 m (SBV1). Ces valeurs sont voisines de celles des altitudes moyennes.

### 3.2.3 Pentes des Sous-Bassins Versants

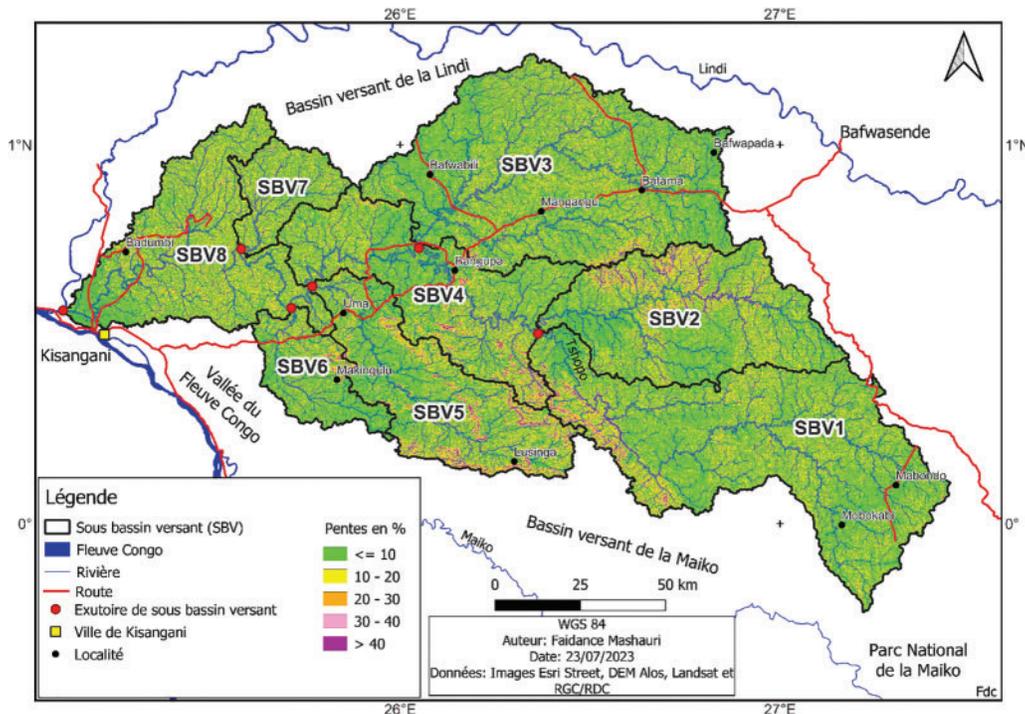
Les pentes jouent un rôle crucial dans le processus de ruissellement au sein d'un bassin versant. L'évaluation de ce paramètre topographique est essentielle pour aborder les problèmes liés à l'érosion,

au transport et au dépôt des sédiments. Par conséquent, il est primordial de commencer par une classification des pentes d'un bassin versant ([Tableau 3](#)).

**Tableau 3 :** Classification des pentes d'un bassin versant d'après Benzougagh et al. [31], Copyright © 2019, Atlantic Center Research Sciences

Classes	Degré des pentes (%)	Type de pente
01	0 à 10	Nulle à faible
02	10 à 20	Moyennement modérée
03	20 à 30	Modéré
04	30 à 40	Forte
05	>40	Abrupt

Globalement, pour les sous-bassins versants de la Tshopo, les abrupts (pente supérieure à 40%) sont concentrés dans les parties à hautes altitudes, particulièrement aux frontières des SBV1, SBV4 et SBV5 d'une part et des SBV2 et SBV3 de l'autre part ([Fig. 5](#)). La pente décroît progressivement en allant vers les zones à basses altitudes où elle devient modérée à faible ou nulle (inférieur à 30%). Les faibles pentes (de 0 à 10%) enregistrées près des exutoires des sous-bassins versants représentent des zones où les inondations sont fréquentes (zones planes et réceptacle des affluents).



**Figure 5 :** Carte des pentes des sous-bassins versants de la Tshopo

L'analyse de la carte des pentes des sous-bassins versants de la Tshopo révèle qu'environ 61,2% de la superficie ont une pente inférieure ou égale à 10% ; 31,2% de la superficie totale du bassin de la Tshopo ont une pente comprise entre 10 et 20% ; 6,3% de la superficie totale ont une pente qui

varie entre 20 et 30% ; 1,2% de la superficie totale ont une pente comprise en 30% et 40% et la zone dont la pente de terrain est supérieure à 40% représente une petite surface soit 0,2% de la superficie cartographiée.

Pour une bonne analyse du facteur pente des sous-bassins versants de la Tshopo, nous avons déterminé dans le cadre de cette étude 3 types d'indices de pente, à savoir : indice de pente moyenne, globale et de roche.

#### *Indice de Pente Moyenne (Ipm)*

Cet indice présente une relation significative et complexe avec l'infiltration, le ruissellement en surface et la saturation du sol en eau dans un bassin versant (Laabidi et al. [3]). Il est calculé à l'aide de la [formule \(5\)](#). Il s'agit du quotient de la différence entre les altitudes extrêmes par la longueur du rectangle équivalent (Benzougagh et al. [31]).

$$I_{pm} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r} \quad (5)$$

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

La pente moyenne d'un bassin versant contrôle le temps de ruissellement et de concentration des eaux pluviales dans les artères de drainage (Laabidi et al. [3]). Les résultats obtenus montrent que les valeurs de pente moyenne des sous-bassins versants de la Tshopo sont faibles, elles varient entre 0,84% (SBV8) et 3,58% (SBV6).

#### *Indice de Pente Globale (Ipg)*

Cet indice permet de caractériser et de classer le relief du bassin versant. Dans une région où la géomorphologie est homogène, la pente diminue de l'amont vers l'aval Laabidi et al. [3]. L'indice de pente globale est calculé en divisant la dénivellation par la longueur du rectangle équivalent. La [formule \(6\)](#) a été utilisée pour effectuer cette opération.

$$I_{pg} = \frac{D_g}{L_r} \quad (6)$$

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

Pour les sous-bassins versants de la Tshopo, les valeurs d'indice de pente globale varient entre 0,37 m/km (SBV8) et 1,68 m/km (SBV5).

#### *Indice de Pente de Roche (Ipr)*

Cet indice peut être calculé à partir de la répartition hypsométrique (pourcentage de la superficie entre les courbes de niveau). Le calcul consiste à additionner les racines carrées des pentes moyennes de chaque élément partiel situé entre deux courbes de niveau, en prenant en compte la surface partielle associée à chaque élément. Ces mesures sont effectuées sur le rectangle équivalent (Khadri [42]). Il s'exprime par la [formule \(7\)](#).

$$I_{pr} = \frac{1}{\sqrt{L_r}} \sum \sqrt{a_i \cdot d_i} \quad (7)$$

Avec :  $I_{pr}$  = indice de pente de roche (en %) ;  $L_r$  = longueur du rectangle équivalent (en km) ;  $ai$  = pourcentage de la superficie entre les courbes de niveau et  $di$  = distance entre les courbes de niveau appelée aussi dénivelée (m).

L'indice de pente de Roche caractérise la pente globale du bassin versant en pourcentage (Morell et al. [1]). Une valeur élevée de l'indice de pente de Roche indique une pente plus raide, tandis qu'une valeur faible indique une pente plus douce. Pour les sous-bassins versant de la Tshopo les valeurs d'indice de pente de Roche sont faibles, elles varient entre 3,48% (SBV8) et 7,23% (SBV6).

### 3.2.4 Dénivelée Globale et Spécifique

#### Dénivelée Globale ( $D_g$ )

Elle donne une idée sur la différence d'altitudes entre le point le plus élevé (l'amont) et le point le plus bas (l'aval) d'un bassin versant. Ces altitudes ont été extraites sur les courbes hypsométriques des sous-bassins étudiés afin de calculer la dénivelée globale à partir de la [formule \(8\)](#).

$$D_g = H_{5\%} - H_{95\%} \quad (8)$$

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).

Pour les sous-bassins versants de la Tshopo, les valeurs de dénivelée globale varient entre 77 m (SBV8) et 280 m (SBV1).

#### Dénivelée Spécifique ( $D_s$ )

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 \(9\)](#) a été utilisée pour calculer ce paramètre.

$$D_s = I_{pg} \sqrt{S} \quad (9)$$

Avec :  $D_s$  = dénivelée spécifique (en m) ;  $I_{pg}$  = indice de pente globale (m/km) et  $S$  = surface du bassin versant ( $km^2$ ).

Les reliefs des sous-bassins versants de la Tshopo ont été classés selon les valeurs de dénivelée spécifique suivant la classification de l'ORSTOM : Office Régional Scientifique et Technique d'Outre-Mer ([Tableau 4](#)).

D'après la classification du relief proposé par l'ORSTOM, les sous-bassins versants de la Tshopo présentent un relief faible à modéré (soit le relief de type R2, R3 et R4), car leurs valeurs de dénivelée spécifique ( $D_s$ ) varient entre 18,08 m (SBV8) et 75,54 m (SBV5).

### 3.3 Analyse des Paramètres Hydrographiques

Les résultats de l'analyse des paramètres hydrographiques des sous-bassins versants de la Tshopo sont consignés dans le [Tableau 5](#). Une analyse minutieuse sera faite par la suite pour ces paramètres.

**Tableau 4 :** Classification du relief selon la méthode de l'ORSTOM (Ameur [27]), Copyright © 2020, Thèses-Algérie

Classes	Types de relief	Dénivelée spécifique (Ds)
R1	Relief très faible	Ds < 10 m
R2	<b>Relief faible</b>	<b>10 m &lt; Ds &lt; 25 m</b>
R3	<b>Relief assez faible</b>	<b>25 m &lt; Ds &lt; 50 m</b>
R4	<b>Relief modéré</b>	<b>50 m &lt; Ds &lt; 100 m</b>
R5	Relief assez fort	100 m < Ds < 250 m
R6	Relief fort	250 m < Ds < 500 m
R7	Relief très fort	Ds > 500 m

**Tableau 5 :** Valeurs des paramètres hydrographiques des sous-bassins versants de la Tshopo

N°	Paramètres	Sous-bassins versants étudiés							
		SBV1	SBV2	SBV3	SBV4	SBV5	SBV6	SBV7	SBV8
1	Dd (en km/km <sup>2</sup> )	0,91	0,97	0,97	1,72	1,01	1,06	1,13	0,99
2	Rl	2,55	2,11	2,17	0,91	1,54	1,97	1,58	3,90
3	Rc	3,77	3,76	3,75	2,86	3,45	2,87	2,80	3,59
4	Fc	0,56	0,53	0,54	0,57	0,55	0,52	0,54	0,50
5	Ct	0,51	0,52	0,52	0,97	0,55	0,55	0,60	0,50
6	Tc (en heure)	51,6	42,7	70,2	53,5	48,7	37,1	30,2	55,9
7	Ve (en km/h)	4,79	3,87	3,01	3,40	3,40	2,30	2,35	3,03

Avec : Dd = densité de drainage, Rl = rapport de longueur, Rc = rapport de confluence ou de bifurcation, Fc = fréquence des cours d'eau, Ct = coefficient de torrentialité, Tc = temps de concentration et Ve = vitesse d'écoulement.

### 3.3.1 Densité de Drainage (Dd)

La densité de drainage est un indicateur utilisé pour évaluer l'organisation du réseau hydrographique d'un bassin versant et fournir des informations sur l'efficacité de drainage d'une zone spécifique. Elle est influencée par la géologie, les caractéristiques topographiques du bassin et même certaines mesures des conditions climatiques (Anctil et al. [43]). Les influences géologiques sur la densité de drainage sont principalement liées à la structure géologique et à la nature lithologique des roches de la région. En effet, les faibles valeurs de cette densité indiquent que le sol et le sous-sol sont très perméables (Benzougagh et al. [44]), permettant une plus grande infiltration des eaux de ruissellement, tandis que les hautes valeurs montrent que les terrains sont imperméables ce qui favorise l'écoulement de surface. De plus, la structure géologique (comme la présence de failles ou de fissures dans les couches de roche) peut également affecter la densité de drainage en permettant une plus grande infiltration des eaux ruissellement dans certains endroits et favorisant l'écoulement de l'eau le long de ces cassures.

La densité de drainage correspond au rapport de la longueur totale des thalwegs par la surface du bassin. Elle a été calculée à partir de la [formule \(10\)](#) (Menasria [45]).

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n Li}{S} \quad (10)$$

Avec :  $Dd$  = densité de drainage en (km/km<sup>2</sup>) ;  $Li$  = somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal (km) et  $S$  = superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>).

La densité de drainage, la topographie et la géologie de la région sont tous des facteurs interdépendants qui peuvent influencer la manière dont un bassin versant répond aux précipitations et aux inondations. En effet, un sous-bassin versant avec une densité de drainage élevée peut mieux gérer les eaux de pluie et réduire le risque d'inondation, alors qu'une région avec une densité de drainage faible, une topographie défavorable (un type de relief faible) et un sol imperméable serait plus sujette aux inondations.

Dans le cas des sous-bassins versants de la Tshopo, les valeurs de densité de drainage obtenues sont comprises entre 0,91 km/km<sup>2</sup> (SBV1) et 1,72 km/km<sup>2</sup> (SBV4).

### 3.3.2 Rapport de Longueur (Rl)

Il 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 la [formule \(11\)](#).

$$Rl = \frac{L(n+1)}{L(n)} \quad (11)$$

Avec :  $Rl$  = 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).

Le rapport de longueur peut donner une indication sur l'organisation spatiale de l'ensemble des tributaires du réseau hydrographique, permettant ainsi une meilleure compréhension de l'écoulement des eaux de surface dans le bassin versant. Généralement, plus le rapport de longueur est élevé plus les drains d'ordre supérieurs seront importants (Benzougagh et al. [31]). Les valeurs obtenues pour le rapport de longueur des cours d'eau des sous-bassins versants de la Tshopo varient entre 0,91 (SBV4) et 3,9 (SBV8).

### 3.3.3 Rapport de Confluence (Rc)

Le rapport de confluence ou de bifurcation exprime le degré de ramification du réseau de drainage (Magesh et al. [46]) et d'évolution des bassins versants (Strahler [29]). Ce rapport est fonction de la pente de terrain et du climat Kouedjou et al. [47]. Il 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 », [formule \(12\)](#).

$$Rc = \frac{N(n)}{N(n+1)} \quad (12)$$

Avec :  $Rc$  = 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 ».

Le rapport de bifurcation est directement lié au temps nécessaire pour que les sédiments se déplacent à travers le réseau de drainage. Plus ce rapport est faible, moins il y aura de bifurcations dans le réseau de drainage, et plus rapidement les sédiments seront évacués vers l'aval (Benzougagh et al. [31]).

Les valeurs du rapport de confluence des sous-bassins versants de la Tshopo varient entre 2,8 (SBV7) et 3,77 (SBV1).

### 3.3.4 Fréquence des Cours d'eau ( $F_c$ )

La fréquence des cours d'eau est comme le nombre total de thalwegs de tous les ordres par unité de surface (Horton [48]). Elle a été calculer à partir de la [formule \(13\)](#).

$$F_c = \frac{N_t}{S} \quad (13)$$

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

Une faible valeur de ce paramètre indique que les cours d'eau sont contrôlés par les fractures alors qu'une fréquence élevée, indique une pente élevée (Melton [49]). Les valeurs de ce paramètre pour les sous-bassins versants de la Tshopo varient entre 0,5 (SBV8) et 0,57 (SBV4).

### 3.3.5 Coefficient de Torrentialité ( $C_t$ )

Il est le produit de la densité de drainage par la fréquence de cours d'eau élémentaire (d'ordre 1). Il s'exprime par la [formule \(14\)](#).

$$C_t = D_d \times F_{c1} = D_d \times \frac{N_1}{S} \quad (14)$$

Avec :  $C_t$  = coefficient de torrentialité ;  $D_d$  = densité de drainage ( $km/km^2$ ) ;  $F_{c1}$  = Fréquence de cours d'eau d'ordre « 1 » ;  $N_1$  = nombre de cours d'eau d'ordre « 1 » et  $S$  = surface du bassin versant ( $km^2$ ).

Ce paramètre est plus indicatif que la densité de drainage (Benzougagh et al. [31]). En effet, plus le coefficient de torrentialité est élevé plus la torrentialité augmente engendrant une agressivité importante des pluies (Kouedjou et al. [47]). Pour les sous-bassins versants de la Tshopo, les valeurs du coefficient de torrentialité varient entre 0,5 (SBV8) et 0,97 (SBV4). Ces valeurs sont faibles et moins variables.

### 3.3.6 Temps de Concentration ( $T_c$ )

Il s'agit du temps que met la particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée du bassin pour arriver à l'exutoire (Ameur et al. [27], Belazreg [50]). Nous l'avons calculé à partir de la formule de Giandotti adaptée par (Grimaldi et al. [51], Pale et al. [52]), [formule \(15\)](#).

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L_t}{0,8\sqrt{H}} \quad (15)$$

Avec :  $T_c$  = temps de concentration (en heure) ;  $S$  = surface du bassin versant ( $km^2$ ) ;  $L_t$  = longueur du thalweg principal (km) et  $H$  = différence entre l'altitude moyenne du bassin et l'altitude de l'exutoire (m).

Le temps de concentration des eaux est influencé par plusieurs facteurs, notamment la configuration du bassin versant, la nature lithologique des roches, la pluviométrie et le relief. En général, un bassin avec un relief peu marqué et des formations géologiques perméables enregistre l'infiltration au

détriment du ruissellement, ce qui entraîne un retard dans la concentration des eaux à l'exutoire (Baba-Hamed et al. [53]). Les valeurs de temps de concentration des eaux dans les sous bassins versants de la Tshopo sont comprises entre 30,2 h (SBV7) et 70,2 h (SBV3).

### 3.3.7 Vitesse d'écoulement ( $V_e$ )

La vitesse d'écoulement de l'eau représente la distance qu'une masse d'eau parcourt par unité de temps. Elle est donnée par la formule (16), utilisée par Guerbouz et al. [54], Bensaad et al. [55].

$$V_e = \frac{L_t}{T_c} \quad (16)$$

Avec :  $V_e$  = vitesse d'écoulement de l'eau (km/h);  $L_t$  = longueur du thalweg principal (km) et  $T_c$  = temps de concentration (en heure).

En général, la topographie d'un bassin influence la vitesse d'écoulement des eaux. En effet, lorsque la pente est faible, la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les cours d'eau est plus longue, ce qui signifie que le bassin réagit lentement aux averses (Faty [56]). Pour les sous-bassins versants de la Tshopo, les valeurs de la vitesse d'écoulement de l'eau varient entre 2,3 km/h soit 0,64 m/s (SBV6) et 4,79 km/h soit 1,33 m/s (SBV1).

## 4 Discussion

L'étude des caractéristiques hydro-morphométriques des sous-bassins versants de la Tshopo peut être réalisée de manière manuelle, mais cela demande beaucoup de travail et n'est pas très fiable. Pour contourner ces contraintes, nous avons utilisé un modèle numérique de terrain (MNT) dérivé de l'image ALOS World 3D-30m et les systèmes d'information géographique (SIG) ainsi que Google Earth. Cela nous a permis d'extraire automatiquement le réseau hydrographique sur une surface d'environ 19.335 km<sup>2</sup> et de délimiter les 8 sous-bassins versants de la Tshopo. Trois groupes de paramètres ont été analysés, à savoir : les paramètres géométriques, topographiques et hydrographiques. Ils ont été calculés automatiquement à l'aide du logiciel libre (QGIS) ou à partir des formules standards.

### 4.1 Paramètres Géométriques

L'influence des paramètres géométriques se manifeste dans la nature de la relation entre le débit et le temps. Généralement, les sous-bassins versants larges présentent des valeurs élevées de débits d'écoulement des eaux de surface. Nous pensons que les sous-bassins versants (SBV1, SBV2, SBV3, SBV4, SBV5 et SBV8) dont la superficie est supérieure à 2.000 km<sup>2</sup>, présenteraient des valeurs élevées de débits par rapport aux petits sous-bassins versants (SBV6 et SBV7) avec une superficie inférieure à 800 km<sup>2</sup> (Tableau 1). Tous les sous-bassins versants de la Tshopo sont étirés, généralement en direction est-ouest avec des valeurs d'indice de compacité de Gravelius (KG) supérieures à 1,12 (Musy [32]). Cette forme allongée ralentit la réponse hydrologique des sous-bassins étudiés aux précipitations (Benzougagh et al. [31]). En effet, pour une même intensité de pluie, la forme allongée du bassin versant favorise des débits de pointe de crue plus faibles en raison du temps plus long nécessaire pour acheminer l'eau jusqu'à l'exutoire.

### 4.2 Paramètres Topographiques

Les différences d'altitude du relief ont un impact sur les variations de température et de précipitations d'une région. C'est pourquoi il est essentiel d'effectuer une analyse hypsométrique lors de

l'étude d'un bassin versant (Benzougagh et al. [31]). Les altitudes extrêmes du bassin de la Tshopo sont comprises entre 382 m dans le SBV8 et 965 m dans le SBV1 pour des altitudes médianes de l'ordre de 482 m (SBV8) à 711 m (SBV1). Globalement les altitudes décroissent de l'est vers l'ouest (Figs 1 et 3). Donc ce sont les sous-bassins versants de la partie orientale de la Tshopo qui sont plus arrosés et favorables aux précipitations pluvieuses.

Même si la répartition des altitudes n'est pas uniforme pour tous les sous-bassins versants de la Tshopo, les courbes hypsométriques obtenues révèlent une forte pente vers les altitudes les plus élevées (Fig. 4). Cette zone représente entre 3% et 10% de la superficie totale des sous-bassins versants. La pente décroît progressivement en descendant vers les basses altitudes du bassin, où elle devient faible à nulle. Ceci suggère l'existence d'une pénéplanation. Ce secteur représente entre 97% et 90% de la superficie des sous-bassins versants étudiés.

Les valeurs de dénivelée spécifique obtenues (Tableaux 2 et 4) indiquent que les sous-bassins versants de la Tshopo ont un relief faible à modéré.

L'analyse des pentes des sous-bassins versants de la Tshopo révèle des valeurs très faibles, avec des pentes moyennes allant de 0,84% à 3,58%. En conséquence, la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement est généralement faible (comprise entre 2,3 et 4,79 km/h), ce qui entraîne une durée de concentration des eaux relativement longue dans les affluents de la Tshopo (entre 30,2 h et 70,2 h). Ceci pourra causer un grand risque d'inondation dans zones des basses altitudes des différents sous-bassins versants de la Tshopo.

#### **4.3 Paramètres Hydrographiques**

La configuration du réseau hydrographique est principalement influencée par les processus géologiques qui ont façonné la région au fil du temps (Baba-Hamed et al. [53]). Les sous-bassins de la Tshopo présentent un réseau hydrographique dense et bien développé. Les affluents s'organisent généralement selon un schéma dendritique homogène, mais avec des variations locales et deviennent par endroits, de type parallèle ou rectangulaire. Ces variations observées dans le réseau hydrographique des certains sous-bassins versants sont en relation avec le changement topographique et géologique. En effet, les sous-bassins versants avec une topographie relativement plane ont tendance à avoir un réseau hydrographique de type dendritique avec des cours d'eau qui s'écoulent en suivant une structure arborescente. En revanche, les bassins versants contenant des roches plus résistantes ou consolidées avec une topographie plus vallonnée ou des pentes abruptes ont souvent un réseau hydrographique de type parallèle ou rectangulaire.

Les valeurs de densité de drainage de l'ordre de 0,91 à 1,72 km/km<sup>2</sup> pour les sous-bassins versants de la Tshopo (Tableau 5) sont supérieures à 0,47 km/km<sup>2</sup>, considérée comme faible pour le bassin versant de l'Oued Inaouène (Benzougagh et al. [31]). L'importance de la densité de drainage dans les sous-bassins étudiés s'expliquerait par la présence d'un substratum moins perméable, dans notre cas d'étude le bassin versant de la Tshopo est caractérisé, en grande partie, par des roches consolidées (grès, argilites, shales, quartzite, granites, schistes, etc.). Cette interprétation est confirmée par les valeurs du coefficient de torrentialité qui sont elles aussi élevées, comprises entre 0,5 et 0,97 contre 0,087 pour le bassin versant de l'Oued Inaouène, à cause de la faible perméabilité des formations géologiques et de la pente forte observée dans les zones à hautes altitudes pour les sous-bassins versant de la Tshopo, ce qui favorise l'écoulement des eaux de ruissellement dans ces zones.

## 5 Conclusion

Le bassin versant de la rivière Tshopo a été étudié à partir de son modèle numérique de terrain (MNT) pour l'extraction automatique de son réseau hydrographique et la délimitation de ses sous-bassins versants, à l'aide des logiciels SIG. Cette étude a permis de faire une analyse quantitative des caractéristiques hydro-morphométriques des sous-bassins versants de la Tshopo.

Les résultats obtenus montrent que, que le bassin versant de la Tshopo est d'ordre de grandeur 7. Au total 8 sous-bassins versants ont été délimités sur une superficie d'environ 19.335 km<sup>2</sup>. Ils sont de forme allongée (KG compris entre 1,84 et 2,52). La répartition des altitudes est liée à la topographie des sous-bassins versants composée d'unités plus ou moins étagées, correspondant, du point de vue géomorphologique, à des plateaux disposés en marches d'escaliers et passant vers l'aval à des plaines. Les courbes hypsométriques rappellent celles des vieux sous-bassins versants qui ont atteint un stade relativement développé d'érosion, sauf pour les SBV1 et SBV2 qui sont respectivement jeune et mature.

Les pentes moyennes sont faibles comprises entre 0,84% et 3,58%, et de ce fait l'érosion du relief par les eaux de surface est moins importante, la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement est globalement faible (Ve de l'ordre de 2,3 à 4,79 km/h), ce qui impliquera une durée longue de concentration des eaux de ruissellement (Tc compris entre 30,2 h et 70,2) dans les affluents de la Tshopo. Ceci pourra causer un grand risque d'inondation dans zones des basses altitudes des différents sous bassins versants de la Tshopo.

L'analyse des paramètres hydrographiques montre que, les sous-bassins versant de la Tshopo présentent un réseau hydrographique dense et ramifié (Dd comprises entre 0,91 et 1,72 km/km<sup>2</sup>). Les cours d'eau s'organisent en un réseau de type dendritique homogène, mais avec des variations locales. Il devient par endroits de type parallèle ou rectangulaire. Cette variabilité de type de réseau, nous permet de conclure que la topographie et la géologie ont une grande influence sur la configuration du réseau hydrographique et l'écoulement des eaux de surface dans les sous-bassins versants de la Tshopo.

Il est important de noter que, même si les modèles numériques de terrain ont de nombreux avantages et apportent des contributions remarquables, ils ne peuvent pas résoudre tous les problèmes hydrologiques et d'aménagement par eux-mêmes. Des approches complémentaires basées sur la réalité du terrain sont nécessaires pour compléter l'analyse informatique.

**Remerciements/Acknowledgment:** nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à la société SNEL (Société Nationale d'Électricité) à Kisangani pour avoir mis à notre disposition leur base de données sur le débit de la rivière Tshopo dans le cadre de notre article.

**Financements/Funding Statement:** les auteurs n'ont pas reçu de financement spécifique pour cette étude.

**Contributions des auteurs/Author Contributions:** la conception et design de l'étude, collecte des données, analyse et interprétation des résultats ainsi que la préparation du projet de manuscrit ont été réalisées par Faidance Mashauri. Les auteurs Mokili Mbuluyo et Nsalambi Nkongolo ont examiné les résultats et approuvé la version finale du manuscrit.

**Disponibilité des données et du matériel/Availability of Data and Materials:** les données et le matériel utilisés dans cette étude sont disponibles sur demande auprès des auteurs. Les détails spécifiques concernant l'accès aux données et au matériel peuvent être obtenus en contactant cette adresse E-mail: mashaurifaidance@gmail.com.

**Conflits d'intérêt/Conflicts of Interest:** les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts en relation avec cette recherche.

## Références

1. Morell, M., Thébé, B., L'Hote, Y. (1999). *Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base*. Bucarest : Editions H.G.A.
2. Biswas, S., Sudhakar, S., Desai, V. R. (1999). Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and gis approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 27(3), 155–166.
3. Laabidi, A., El Hmaidi, A., Gourari, L., El Abassi, M. (2016). Apports du modèle numérique de terrain (MNT) à la modélisation du relief et des caractéristiques physiques du bassin versant du Moyen Beht en amont du barrage El Kansera (Sillon sud Rifain, Maroc). *European Scientific Journal*, 12(29), 258–288.
4. Waikar, M. L., Nilawar, A. P. (2014). Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: A case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 2, 179–184.
5. Vogt, J. V., Colombo, R., Bertolo, F. (2003). Deriving drainage networks and catchment boundaries: A new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology*, 53(3–4), 281–298.
6. Bloch, T., Kamp, U., Olsenholler, J. (2004). Using ASTER and SRTM DEMs for studying geomorphology and glaciation in high mountain areas. In: *New strategies for European remote sensing*, pp. 119–127. Rotterdam: Oluic Millpress.
7. Kuldeep, P., Upasana, P. (2011). Quantitative morphometric analysis of a watershed of Yamuna Basin, India using ASTER (DEM) data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(1), 248–269.
8. Tamll, S. M., Sarfaraz, A. D., Rashid, S. M. (2011). Analysis of the geomorphometric parameters in high altitude glacierised terrain using SRTM DEM data in Central Himalaya, India ARP. *Journal of Science and Technologie*, 1(1), 22–27.
9. Akawwi, E. (2013). Geomorphology using geographic information system and globel mapper. *American Journal of Environmental Science*, 9(5), 398–409.
10. Mazahir, S., Javed, A., Khanday, M. Y. (2022). Drainage basin characteristics of Dhund River Basin, Eastern Rajasthan India, using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Geographic Information System*, 14(4), 347–363.
11. Qadem, Z., Obda, K. H., Qadem, A., Lasri, M. (2018). Quantification of surface water resources: From hydrometric measurement to spatialization by GIS. The catchments of Oueds Fez and Mikkès as cases of study. Morocco. *EWASH & TI Journal*, 2(4), 52–60.
12. Qadem, Z., Obda, K. H., Qadem, A., Lasri, M. (2019). Contribution of the GIS in terms of knowledge of the situation of the water resources of the plain of Saïs Fez and its Middle Atlasic Borders—Morocco: Aspects, methods and quantification of water resources». *Advances in Science, Technology & Innovation*, 83–94. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24974-8>
13. Barbot, A., Hilali, M., Mahboub, A., Boudad, L., Rachid, L. et al. (2019). Caractérisation morphologique et hydrodynamique du bassin de Tazarine (Anti Atlas Oriental du Maroc). *EWASH & TI Journal*, 3(3), 198–208.
14. Manojkumar, P. D., Nitin, N. M., Akshada, H. K., Ganesh, M. D. (2019). Morphometric analysis of Kolavadi sub-watershed in Bhor Tahsil using GIS techniques. *Journal of Geographical Studies*, 3(1), 1–10, 87–96.
15. Faye, C., Dièye, S., Faye, G. (2021). Analyse morphométrique et hydrologique du sous-bassin versant du Niaoule (bassin de la Gambie) à l'aide de techniques SIG. *Algerian Journal of Arid Environment*, 11(1), 54–75.

16. Yang, L. P., Meng, X. M., Zhang, X. Q. (2011). SRTM DEM and its application advances. *International Journal of Remote Sensing*, 32(14), 3875–3896.
17. Vimal, S., Nagesh Kumar, D., Jaya, I. (2012). Extraction of drainage pattern from ASTER and SRTM data for a river basin using GIS tools. *International Conference on Environment, Energy and Biotechnology*, vol. 33, pp. 120–129.
18. Magesh, N. S., Chandrasekar, N. (2012). GIS model-based morphometric evaluation of Tamiraparani sub-basin, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0742-z>
19. Abubaker, T., Azra, E. A., Mohammed, C. (2012). Selecting suitable drainage pattern to minimize flooding in Sangere village using GIS and remote Sensing. *Global Journal of Geological Sciences*, 10(2). <https://doi.org/10.4314/gjgs.v10i2.1>
20. Otemikongo, J., Omasombo, J., Stroobant, E., Obotela, N., Bolakonga B. et al. (2020). *Tshopo : Laborieuse construction politico-administrative coloniale muée en bastion du nationalisme congolais*, vol. 14, 663. Belgique : Musée royal de l’Afrique centrale.
21. Léonard, J. (1993). Etude phytosociologique des chutes de la Tshopo (Kisangani-Zaire). *Bulletin du Jardin botanique National de Belgique*, 62(114), 283–347.
22. Fernandez-Alonso, M., Kampata, D., Mupande, J. F., Dewaeles, S., Laghmouch, M. et al. (2015). *Carte géologique de la République Démocratique du Congo au 1/2.500.000*. République Démocratique du Congo: Ministère des mines.
23. Laghmouch, M. (2020). Carte administrative et routière, Province de la Tshopo, au 1/750.000, Musée Royal de l’Afrique Centrale, Tervuren. [https://www.africamuseum.be/sites/default/files/media/docs/research/publications/rmca/online/monographies-provinces/tshopo\\_carte\\_administrative.pdf](https://www.africamuseum.be/sites/default/files/media/docs/research/publications/rmca/online/monographies-provinces/tshopo_carte_administrative.pdf) (consulté le 16/06/2023)
24. Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–1920.
25. Payraudeau, S. (2002). *Modélisation distribuée des flux d’azote sur des petits bassins versants méditerranéens (Thèse de doctorat)*. Sciences de la Terre. ENGREF (AgroParisTech), Montpellier, France.
26. Charleux, J. (2001). *Qualité des MNT pour l’hydrologie, application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants (Thèse de doctorat)*. Université Marne-la-Vallée, France.
27. Ameur, N., Saidi, S. (2020). *Utilisation d’un SIG pour l’évaluation des caractéristiques morphométriques d’un sous-bassin versant et leurs influences sur l’écoulement des eaux. Sous-bassin versant d’Oued Bou saâda-Algérie (Mémoire de Master)*. Université Mohamed Boudiaf-M’sila, Algérie.
28. Roche, M. (1963). *Hydrologie de surface*. Paris : Edition Gauthier-Villars et ORSTOM.
29. Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow, V. T. (Ed.), *Handbook of applied hydrology*, pp. 4–76. New York: McGraw Hill Book Company.
30. Qadem, Z. (2020). *Hydrologie des oueds Fès et Mikkès drainant le plateau de Saïss et ses bordures moyennes atlasiques (Thèse de doctorat)*. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc.
31. Benzougagh, B., Dridri, A., Boudad, L., Sdkaoui, D., Baamar, B. (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. *American Journal of Innovative Research & Applied Sciences*, 8(4), 120–130.
32. Musy, A. (2005). Cours d’hydrologie générale. <https://echo2.epfl.ch/e-drologie> (consulté le 23/06/2023)
33. Saida, C., Imene, B. (2019). *Estimation des débits de crues de différents temps de retour à l’aide de plusieurs méthodes d’un bassin versant Medjez Elbgar-Guelma (Mémoire de Mastère)*. Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie.

34. Daoud, B. (2008). *Organisation de l'espace agropastoral d'un terroir saturé pour une gestion durable des ressources naturelles : cas de Laïndé Karéwa au Nord Cameroun (Mémoire de Master)*. Université de Dschang, Cameroun.
35. Lakraa, S. (2022). *Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant d'Ain Smen, Fès (Mémoire de Master)*. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fes, Maroc.
36. Mellahi, H., Mokhtari, W., Raselma, I. (2021). *Impact de l'évolution temporelle de l'occupation du sol sur les ressources en eaux souterraines : Cas de bassin versant de l'Oued Fekan. Wilaya de Mascara (Mémoire de Master)*. Université Ibn Khaldoun-Tiaret, Algérie.
37. Nihad, M., Hicham, M. (2022). *Etude du fonctionnement hydrologique du bassin versant d'oued El-Agrem/Jijel, NE Algérien (Mémoire de Master)*. Université de Jijel, Algérie.
38. Boudhik, A., Boufous, K., Majdouli, K. (2021). *Apports du SIG dans la cartographie des zones inondables : Cas du bassin d'Amizmiz. Région de Marrakech-Tensift- Al Haouz, province d'Al Haouz, Maroc (Mémoire de Master)*. Faculté des Sciences et techniques-Marrakech, Université Cadi Ayyad, Maroc.
39. Bannister, E. N. (1980). Hypsometries of Michigan's Southeastern Lake Plain. *Journal of Great Lakes Research*, 6(2), 154–163.
40. Habchi, I. (2019). *Prévision des débits solides et Modélisation pluies débits dans un milieu semi-aride par réseau de neurone artificiel et neuro-flou : cas d'un bassin versant (Mémoire de Master)*. Université Larbi Ben M'hidi- Oum El Bouaghi, Algérie.
41. Dubreuil, P., Guiscafre, J. (1971). La planification du réseau hydrométrique minimal. *Cahier ORSTOM, VIII, n°2*. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_4/hydrologie/14876.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/hydrologie/14876.pdf) (consulté le 30/06/2023)
42. Khadri, S. (2018). *La qualité des rejets urbains par temps de pluie dans un bassin versant urbanisé : Bassin versant de la Seybouse (Thèse de doctorat)*. Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie.
43. Anctil, F., Rousselle, J., Lauzon, N. (2012). *Hydrologie : cheminement de l'eau*. France: Presses Internationales Polytechniques.
44. Benzougagh, B., Boudad, L., Dridri, A., Sdkaoui, D. (2016). Utilisation du SIG dans l'analyse morphométrique et la priorisation des sous-bassins versants d'Oued Inaouene (Nord-Est du Maroc). *European Scientific Journal*, 12(6), 283–306.
45. Menasria, A. (2022). *Application de la Télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans les bassins versants frontaliers de la Medjerda et le Mellegue (Thèse de doctorat)*. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Blida, Algérie.
46. Magesh, N. S., Chandrasekar, N., Kaliraj, S. (2012). A GIS based automated extraction tool for the analysis of basin morphometry. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2, 32–35.
47. 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.
48. Horton, R. E. (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361.
49. Melton, M. A. (1958). Geometric properties of mature drainage systems and their representation in E4 phase space. *The Journal of Geology*, 66(1), 35–54.
50. Belazreg, N. (2019). *Fonctionnement hydrologique des bassins versants à réseaux hydrographiques différents (Mémoire de Master)*. Université Mohamed Khider-Biskar, Algérie.
51. Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., Profiri, M. (2012). Time of concentration: A paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228.
52. Pale, S., Kekele, A., Da, D. E. C. (2020). Caractérisation géomorphométrique des formes de relief dans le bassin versant du Poni, au Burkina Faso. *Afrique Science*, 17(3), 62–77.

53. Baba-Hamed, K., Bouanani, A. (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*, 40(4), 277–286.
54. Guerbouz, Y., Mohammed, H. B. (2020). *Apport du SIG et de l'MNT-Aster à l'étude morphométrique d'un bassin versant en zone aride : cas de l'Oued Zegrir Guerrara (Mémoire de Master)*. Université de Ghardaïa, Algérie.
55. Bensaad, S., Boudrouaya, A. (2022). *Caractéristiques hydrologiques du bassin versant du Bas Sébaoul/W.Boumerdès (Mémoire de Master)*. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
56. Faty, A. (2010). *Bassin versant de Soungrougrou en amont de Diaroumé : Hydrologie et Aménagement (Mémoire de Master)*. Département de géographie, Université Cheikh-Anta-Diop (UCAD), Sénégal.