

ANALYSE MORPHOMETRIQUE ET HYDROLOGIQUE DU SOUS-BASSIN VERSANT DU NIAOULE (BASSIN DE LA GAMBIE) A L'AIDE DE TECHNIQUES SIG

FAYE Cheikh^{1*}, DIÈYE Sidy², FAYE Guilgane³

⁽¹⁾Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies
Université Assane Seck de Ziguinchor, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement
Ziguinchor, Sénégal

⁽²⁾Département de Géographie, Faculté des lettres et Sciences Humaines
Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005 Dakar-Fann, Sénégal

⁽³⁾Département de Géographie, Faculté des lettres et Sciences Humaines
Université Cheikh Anta Diop de Dakar,

Laboratoire de Géomorphologie, Dakar-Fann, Sénégal

E-mail: cheikh.faye@univ-zig.sn / dieyesidy@gmail.com / fayguilgane@yahoo.fr

(Received 16 March 2021 - Accepted 30 June 2021)

Résumé.- La demande croissante et la concurrence des secteurs domestique, industriel et agricole pour l'eau ont atteint leur limite. Sur terre, les bassins de drainage, les bassins versants et les sous-bassins sont des unités hydrologiques idéales pour la planification de la conservation des ressources en eau. L'aménagement des bassins versants reste fondamentalement pour la conservation des sols et des eaux afin de répondre à des préoccupations différentes. Dans cette perspective, le recours aux techniques SIG et à la télédétection sont utiles pour l'analyse des propriétés morphométriques des bassins de réception des eaux de surface. Les aspects morphométriques tels que les aspects linéaires, de relief et de surface du sous-bassin versant du Niaoulé localisé dans le bief continental de la Gambie ont été analysés à l'aide d'outils spatiaux et de l'outil arc-hydro dans Arcgis 10.5. Le rapport de bifurcation (3 à 5) indique un bassin avec une géologie raisonnablement homogène et sans perturbations structurales, et une topographie jeune avec un degré d'intégration du drainage moins élevé. Ce bassin versant présente une forme moins allongée avec un faible relief, une pente douce, un drainage de type grossier, une faible propension à l'érosion des sols, une texture de drainage très modérée, un sous-sol perméable et une couverture végétale moins dense. Les techniques utilisées dans l'étude et les résultats sont utiles pour la planification et la surveillance des sous-bassins versants pour un développement durable.

Mots clés: MNT, SIG, hydrologie, morphométrie, bassin versant

MORPHOMETRIC AND HYDROLOGICAL ANALYSIS OF THE NIAOULE SUB-WATERSHED (GAMBIA BASIN) USING GIS TECHNIQUES

Abstract.- The growing demand and competition from the domestic, industrial and agricultural sectors for water have reached their limit. On land, drainage basins, watersheds and sub-basins are ideal hydrologic units for water resource conservation planning. The development of watersheds remains fundamentally for soil and water conservation in order to respond to different concerns. From this perspective, recourse to GIS techniques and remote sensing are useful for analyzing the morphometric properties of surface water reception basins. Morphometric aspects such as linear, relief and surface aspects of the Niaoulé sub-watershed located in the continental reach of The Gambia were analyzed using spatial tools and the arc-hydro tool in Arcgis. 10.5. The bifurcation ratio (3 to 5) indicates a basin with a reasonably homogeneous geology and without structural disturbances, and a young topography with a lower degree of drainage integration. This watershed has a less elongated shape with low relief, a gentle slope, coarse-type drainage, low propensity for soil erosion, a very moderate drainage texture, a permeable subsoil and a less dense vegetable cover. The techniques used in the study and the results are useful for planning and monitoring sub-watersheds for sustainable development.

Key words: DEM, GIS, hydrology, morphometry, watershed

Introduction

Depuis le premier quart du XX^e siècle, le bassin versant est considéré comme une unité aréolaire de l'investigation géomorphologique, mais comme une unité géomorphologique de base, ces analyses étant utiles pour l'application de diverses techniques morphométriques. L'étude des risques naturels dans un bassin versant exige une bonne compréhension hydrologique, géologique, géomorphologique, écologique et climatique pour déterminer les facteurs qui agissent sur la naissance des risques naturels (le couvert végétal, la pente, l'occupation du sol et le réseau hydrographique). Ces indices sont nécessaires pour déterminer la priorisation des bassins versants et ainsi planifier un programme pour la lutte contre les risques naturels. La bonne gestion d'un bassin versant nécessite l'utilisation des techniques des systèmes d'informations géographiques (SIG) et les modèles numériques du terrain (MNT), pour une meilleure évaluation de la zone d'étude en termes de pente, de système de drainage, de topographie, de géomorphologie et de lithologie à partir des cartes géologiques [1].

Comme ressource essentielle au développement durable, la question de l'eau a été incluse dans de nombreux documents et stratégies pour le développement aux niveaux régional, national et mondial. Les différents aspects des questions liées à l'eau ont donc été incorporés dans les objectifs de développement durable (ODD), une tâche réalisée grâce au dur labeur et aux efforts inlassables des différentes parties prenantes. De nos jours, en raison de la croissance démographique rapide, du développement économique et des multiples impacts qui affectent les ressources naturelles, l'eau ne cesse d'être une préoccupation fondamentale et un bien précieux à gérer en raison notamment de la pression démographique sur les ressources en eau augmente de jour en jour au Sénégal. En outre, le bassin versant est une unité fondamentale pour la conservation et la préservation des ressources naturelles, car la conservation des sols et de l'eau est une question cruciale dans sa gestion qui demeure essentielle dans le développement économique et social de tout pays [2-5].

L'analyse morphométrique est la dimension et l'investigation mathématique de la surface de la terre, de sa forme, et la mesure des formes de terrain [6]. Il est facile de comprendre le comportement du système hydrologique [7], de reconnaître les particularités hydrologiques, et les résultats constitueront un apport précieux pour la gestion globale des ressources en eau [8;9]. HORTON (1945) [10] et STRAHLER (1957) [11] ont entrepris des études morphométriques dans le domaine de l'hydrologie avec des résultats impliquant l'analyse de divers paramètres linéaires, aréolaires et de relief des bassins versants. Ces paramètres sont très importants pour la gestion des bassins versants et l'étude hydro-géomorphologique [12]. L'analyse quantitative des paramètres morphométriques est donc d'une immense utilité dans les études consacrées à l'évolution des bassins hydrographiques, et elle est très importante pour comprendre les processus de la topographie, les propriétés physiques du sol et les caractéristiques de l'érosion. Elle reflète également la quantité d'érosion, d'engorgement, d'inondation, de sécheresse, etc., ce qui aide considérablement à comprendre les roches, le climat, le drainage, le relief et la couverture végétale dans le bassin hydrographique [5].

Les paramètres physiographiques, morphométriques [13] et sociaux sont étroitement associés à la planification et au développement des bassins versants. De nombreux auteurs ont utilisé les aspects linéaires, aériens et de relief pour la priorisation des bassins versants dans les projets de développement [14-16]. De plus, GEBRE *et al.* (2015) [17] ont utilisé des informations sur la relation entre les types de sol et la texture du

sol avec les paramètres morphométriques. Certains chercheurs ont signalé une relation entre les caractéristiques d'utilisation / couverture des terres et la morphologie, la pente, le sol, les processus de surface des terres, le climat, l'hydrologie, etc. ainsi que les activités humaines [18-20]. Des paramètres comme la géologie et la pluviométrie montrent moins de variations et d'influences sur le développement des micro-bassins versants [12]. De même, la géologie et les précipitations montrent une influence considérable sur la formation et la variation des caractéristiques des sous-bassins versants dans les bassins fluviaux moyens et majeurs [21;22], alors que la pression démographique est l'une des causes de la surexploitation des ressources naturelles. Cependant, les paramètres morphométriques sont utilisés avec succès avec la géologie, la pluviométrie et la répartition de la population pour la hiérarchisation des sous-bassins versants dans un bassin hydrographique moyen. Ainsi, l'étude des différentes propriétés des bassins hydrographiques devient significative en raison de leur conséquence dans le développement du relief. Elle fournit des connaissances d'un apport essentiel aux stratégies d'aménagement des bassins fluviaux et à la compréhension de leurs propriétés hydrologiques.

La présente étude a été réalisée pour comprendre les divers aspects morphométriques: linéaire, aréolaire et relief du sous-bassin versant du Niaoulé en utilisant des techniques géospatiales. L'analyse morphométrique utilisant des techniques de télédétection et de SIG a été largement utilisée pour la priorisation des bassins hydrographiques, l'analyse et la gestion des sous-bassins [23-26]. Les techniques SIG offrent un potentiel d'informations spatiales précises et opportunes pour la planification et la gestion des bassins versants [5].

1.- Zone d'étude

Le fleuve Gambie prend sa source à environ 1150 m d'altitude dans le Fouta Djallon, près de Labé en République de Guinée. Le bassin de la Gambie couvre une superficie de près de 77100 km², partagés entre trois Etats [27]: la Guinée (13%), le Sénégal (71%) dont il draine presque toute la région Tambacounda, une partie de la Haute-Casamance et du Saloum méridional et la Gambie (16% de la superficie) dont il est l'épine dorsale et où il rejoint l'océan Atlantique. Il s'étend, en latitude, du 11°22 Nord (dans le Fouta-Djallon) au 14°40 Nord (dans le Ferlo sud-oriental) et, en longitude, du 11°13 Ouest (Fouta-Djallon) au 16°42 Ouest (Banjul, embouchure). La longueur du cours d'eau principal est de 1180 km, un cours d'eau constitué de deux biefs: un bief continental et un bief maritime [28-30]. Le bief continental reçoit de nombreux affluents sur sa rive droite (DiarhaNiokolo-Koba, Niéri-Ko, Niaoulé, Sandougou...) et sur sa rive gauche (Thiokoye, Diaguéri, Koulountou...) (fig. 1). Le Niaoulé, un des affluents de rive droite du fleuve Gambie1 couvre une superficie de 1230 km², soit 1.6 % du bassin de Gambie². Le bassin du Niaoulé s'étend entre les latitudes 13°24' et 13°54' N et entre les longitudes 13°12' et 13°44' Ouest (carte 1). Il est équipé avec la station hydrométrique de Niaoulé-Tanou située à environ dix kilomètres de la confluence avec la Gambie [29]. Petit affluent du fleuve Gambie, le cours d'eau du Niaoulé ne participe que très peu au débit terminal de la Gambie. Durant la période 1971-1993, le fleuve n'a écoulé que 4.609.000 m³/an, d'où la faible disponibilité en eau de surface. L'écoulement est caractérisé par sa brièveté, allant jusqu'à l'arrêt total pendant de nombreux jours durant l'année. L'écoulement dure huit mois à Niaoulé Tanou (de mai à décembre), période qui couvre la saison pluvieuse qui s'étend de mai à octobre.

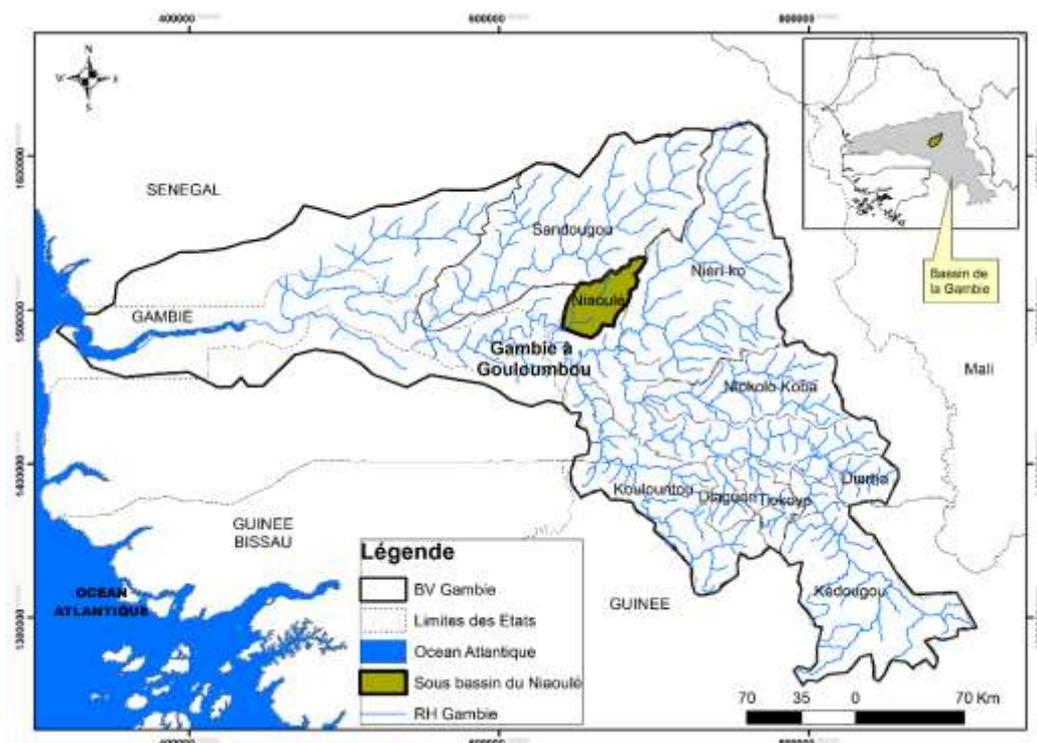


Figure 1.- Localisation du sous-bassin du Niaoulé dans le bassin versant de la Gambie

Les principales unités géomorphologique dans le sous-bassin versant du Niaoulé sont des plateaux et buttes résiduels, les versants à pentes et glacis d'épandages et les terrasses colluvio-alluviales (fig. 2). La seule structure géologique qui apparaît dans le bassin du Niaoulé est le bassin sédimentaire du Continental Terminal. Selon MICHEL (1973) [31], il s'agit d'éléments remaniés sous un climat semi-aride qui ont formé les faciès grès-argileux du Continental Terminal de l'Oligocène au Pliocène (fig. 3). Localement, il se rencontre une cuirasse ferrugineuse et des sables limoneux dans les talwegs. Quand la cuirasse est démantelée, elle abrite une nappe phréatique généralisée, laquelle nappe peut soutenir les débits d'étiage. Le relief du bassin du Niaoulé est assez uniforme avec des altitudes très faibles dans l'ensemble. Le point culminant, avec 71 m, se trouve à l'extrême Nord-est du bassin. L'altitude minimale qui correspond à 0 m est notée vers l'exutoire. Par ailleurs, il se rencontre trois grands types de sols dans le sous-bassin versant du Niaoulé (fig. 4). Les sols sur matériau gravillonnaire sont les plus représentés avec 39.61% des sols du bassin et sont développés sur éboulis de cuirasse accumulés au pied des escarpements de la cuirasse. Les sols minéraux bruts sont surtout de sols minces et résultent d'une importante érosion. Il se distingue deux sous-groupes. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés (26% des sols du bassin) sont subdivisés en deux familles. Dans l'ensemble, les sols du bassin sont minces et peu profonds en raison de leur évolution peu importante et de leur origine (sols d'apport ou d'érosion) d'où leur faible capacité à contenir des nappes superficielles importantes. Quant aux formations d'occupation du sol, elles sont dominées par la savane malgré la présence d'une forte activité agricole La carte de l'occupation des sols a été préparée à partir des images satellitaires Landsat acquises le 23 décembre 2019 de l'USGS et classée à l'aide de l'outil de télédétection Idrisi Terr Set (fig. 5). Comme l'a déjà souligné SOW (2014) [32], les différentes unités d'occupation du sol rencontrées vont de la savane boisée à la savane arborée à arbustive, avec quelques portions de forêt claire. La savane boisée est la formation la plus étendue et couvre plus de la moitié de la superficie du bassin, avec des espèces très variées. Elle est plus dense dans

les larges vallées et sur les sols sableux colluviaux [29].

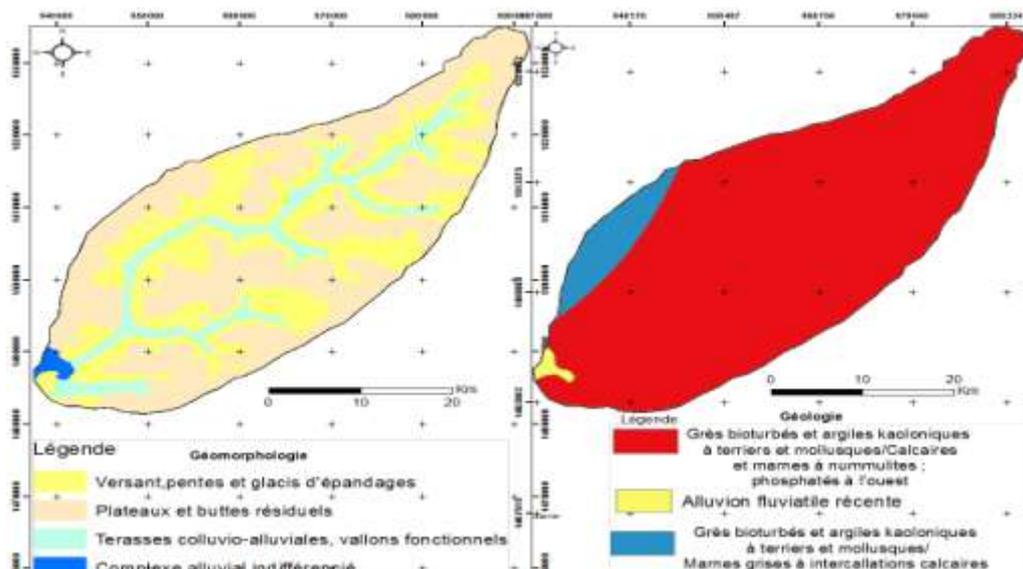


Figure 2.- Unités géomorphologiques du sous-bassin du Niaoulé

Figure 3.- Unités géologiques du sous-bassin du Niaoulé

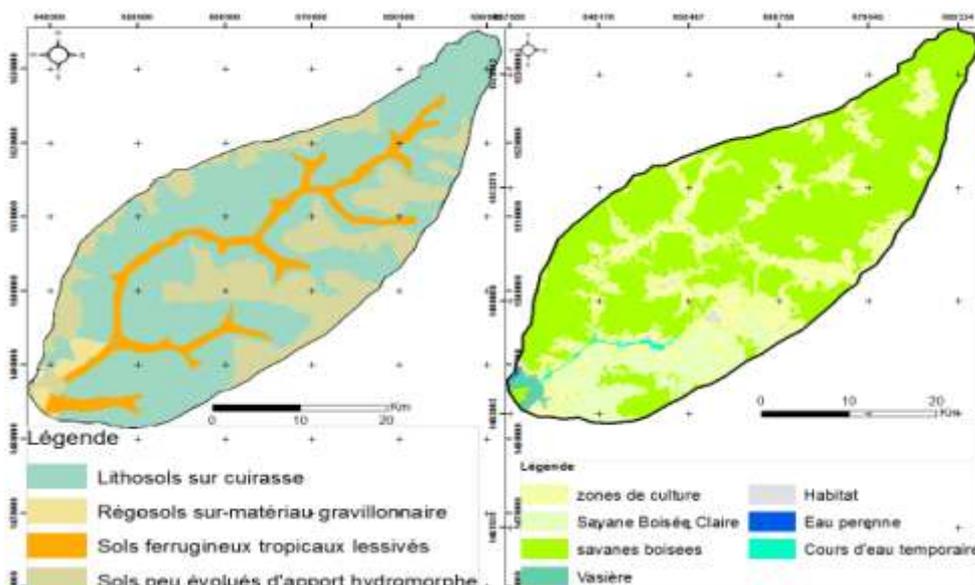


Figure 4.- Unités pédologiques du sous-bassin du Niaoulé

Figure 5.- Classes d'occupation des sols du sous-bassin du Niaoulé

3.- Données et méthodes

Les aspects morphométriques: aspects linéaires, de forme et de relief du bassin versant ont été analysés [5;10;11;33-37]. La méthodologie adoptée dans ce travail est l'utilisation des cartes topographiques de la zone d'étude à l'échelle de 1/50000, pour valider le réseau hydrographique extrait à partir d'un modèle numérique du terrain (MNT), de type SRTM avec une résolution de 90 m (des fichiers matriciels et vectoriels topographiques fournis par deux agences américaines: la NASA et la NGA). Les paramètres du bassin de drainage sont dérivés de la longueur des cours d'eau, du nombre de cours d'eau, de la superficie du bassin, du périmètre et de la longueur du bassin. Les

paramètres morphométriques ont été calculés, dans le cadre de cette étude, en utilisant la formule proposée par HORTON (1945) [10], MILLER (1953) [33], SCHUMM (1956) [34] et STRAHLER (1957) [11].

Les cartes thématiques ont été vérifiées et modifiées sur la base d'informations recueillies sur le terrain à l'aide du GPS et de techniques de travail sur le terrain. Au départ, les cartes topographiques ont été géoréférencées et le réseau de cours d'eau numérisé dans un environnement SIG. La classification des cours d'eau a été effectuée selon la loi de Horton. Les aspects linéaires comprennent l'ordre des cours d'eau (U), le nombre de cours d'eau (Nu), la longueur du cours d'eau (Lu), le rapport de bifurcation (Rb), la longueur moyenne des cours d'eau des ordres correspondants (Lum), le rapport de longueur des cours d'eau (Lur) et le rapport de longueur moyenne des cours d'eau (Lurm). Les aspects spatiaux comprennent la surface du bassin (A), le périmètre du bassin (P), la fréquence des courants (Fs), le rapport de circularité (Rc), le rapport d'allongement (Re), le facteur de forme (Ff), la longueur de l'écoulement terrestre (Lg), le ratio de texture (Rt), le maintien constant du canal (C), la texture de drainage (Tj), le coefficient de compacité de Gravelius (K_G) et la densité de drainage (Dd). Les aspects liés au relief comprennent le relief du bassin (Rh), le rapport de relief (Rhl), le relief relatif (Rr), le nombre de robustesse (Rn) et l'analyse de la pente (m). Tous ces paramètres ont été calculés et analysés pour le sous-bassin hydrographique du Niaoulé (tab. 1).

Tableau I.- Paramètres morphométriques

Paramètres morphométriques	Descriptions	Références
Aspects linéaires		
Numéro des cours d'eau (Nu)	$Nu = N_1 + N_2 + \dots + N_n$; où, Lu = Longueur du cours d'eau, L1 = Longueur du cours d'eau du premier ordre et L2 = Longueur du cours d'eau du second ordre et Ln = Nombre 'n' de la longueur du cours d'eau	[11]
Longueur des cours d'eau (Lu)	$Lu = L_1 + L_2 + \dots$; où, N1 = Cours d'eau de premier ordre, N2 = Cours d'eau de second ordre et Nn = Nombre de cours d'eau	[11]
Longueur moyenne des cours d'eau (Lum)	$Lum = Lu / Nu$; où, Lu = Longueur moyenne des cours d'eau d'un ordre donné (km), Nu = Nombre de segments des cours d'eau	[11]
Rapport de longueur des cours d'eau (Lur)	$Lur = Lu / Lu-1$; où, Lu = Longueur totale des cours d'eau de l'ordre (u), Lu-1 = Longueur totale des cours d'eau de l'ordre inférieur suivant.	[11]
Rapport de bifurcation (Rb)	$Rb = Nu / Nu+1$; où, Nu = Nombre de segments des cours d'eau présents dans l'ordre donné, Nu+1 = Nombre de segments de l'ordre supérieur suivant.	[34]
Aspects de forme		
Densité de drainage (Dd)	$Dd = L / A$; où, L = Longueur totale du cours d'eau, A = Superficie du bassin	[11]
Fréquence de flux (Fs)	$Fs = N / A$; où, L = Nombre total de cours d'eau, A = Superficie du bassin	[11]
Coefficient de compacité de Gravelius (K_G)	$(K_G) = 0,25P / \sqrt{A}$; où K_G = Coefficient de compacité de Gravelius, P = Périmètre du bassin, A = Superficie du bassin	[38]
Ratio de texture (Rt)	$Rt = N1 / P$; où, N1 = Nombre total de cours d'eau de premier ordre, P = Périmètre du bassin	[11]

Facteur de forme (Ff)	$Ff=A/(Lb)^2$; où, A = Superficie du bassin, Lb = Longueur du bassin	[11]
Facteur de forme (k)	$k=Lb^2\pi/4A$; où A = Superficie du bassin, $\pi = 3,14$, Lb = longueur du bassin	[39]
Rapport de circularité (Rc)	$Rc=4\pi A/P^2$; où A = Superficie du bassin, $\pi = 3,14$, P = Périmètre du bassin.	[33]
Ratio d'allongement (Re)	$Re=\sqrt{(A/\pi)/Lb}$; où, A = Superficie du bassin, $\pi = 3,14$, Lb = Longueur du bassin	[34]
Longueur de l'écoulement terrestre (Lg)	$Lg=1/2Dd$, où, Dd = Densité de drainage	[11]
Maintien constant du canal (C)	$C=1/Dd$, où, Dd = Densité de drainage	[11]
Texture de drainage (Tj)	$Tj = Dd*Nj/A$, où Tj = Coefficient de torrentialité du flux d'ordre; Nj = Nombre de cours d'eau d'ordre j, A = Surface du bassin, Dd = Densité de drainage (km/km ²)	[11]
Aspects liés au relief		
Relief du bassin (Rh)	Distance verticale entre le point le plus bas et le point le plus haut du bassin	[34]
Rapport du relief (Rhl)	$Rhl = Bh / Lb$; où, Bh = Relief du bassin, Lb = Longueur du bassin	[34]
Relief relatif (Rr)	$Rr = Rh*100/P$, où Rh = Relief du bassin, P = Périmètre du bassin.	[40]
Nombre de robustesse (Rn)	$Rn=Bh\times Dd$; où, Bh = Relief du bassin, Dd = Densité de drainage	[34]
Pente (m)	$m = \Delta y/\Delta x$ ou Rise/Run où, m = Pente, Δy est un changement vertical, Δx est un changement horizontal	[41]

3.- Résultats et discussion

3.1.- Analyse morphométrique

3.1.1.- Aspects linéaires

Les aspects linéaires des sous-bassins hydrographiques sont déclinés en termes d'ordre des cours d'eau, associés aux attributs du nombre et de la longueur moyenne des cours d'eau avec leur ordre correspondant. Dans la présente étude, divers aspects linéaires, dont l'ordre des cours d'eau (U), le nombre de cours d'eau (Nu), la longueur des cours d'eau (Lu), le rapport de bifurcation (Rb), le rapport de longueur des cours d'eau (Lur) et le rapport de longueur moyenne des cours d'eau (Lurm) ont été pris en compte dans l'analyse de détaillée (tab. II).

Tableau II.- Aspects linéaires du sous-bassin du Niaoulé

Ordonnances de cours d'eau	Nombre de cours d'eau	Longueur de cours d'eau	Longueur moyenne	Rapport de longueur	Rapport de bifurcation
1	842	756,23	0,90	-	4,55
2	185	301,8	1,63	1,82	5,00
3	37	144,3	3,90	2,39	3,08
4	12	68,9	5,74	1,47	4,00
5	3	41,2	13,7	2,39	3,00
6	1	44,5	44,5	3,24	-
Total/moyenne	1080	1356,93	1,26	2,26	3,93

3.1.1.1.- Ordre de cours d'eau (U)

L'ordonnancement des cours d'eau est la première étape de l'analyse quantitative des bassins versants. Elle exprime la relation hiérarchique entre les segments de cours d'eau, leur connectivité et le débit provenant des bassins versants qui y contribuent. Par la suite, ce concept a été adapté par STRAHLER (1957) [11]. Selon STRAHLER (1957) [11], les cours d'eau de premier ordre sont ceux qui n'ont pas d'affluents. Les cours d'eau de second ordre sont les affluents des canaux de premier ordre uniquement. Les canaux de second ordre se joignent aux segments des cours d'eau de troisième ordre. De même, deux canaux de troisième ordre déversent de l'eau dans des canaux de quatrième ordre, etc. Le cours d'eau principal, par lequel passe la totalité de l'eau et des sédiments, est le segment de cours d'eau de premier ordre. Ainsi, dans la présente étude, le classement des cours d'eau est basé sur la méthode proposée par STRAHLER (1957) [11] et constitue un réseau de cours d'eau de 6^e ordre. La fréquence maximale est dans le cas de cours d'eau de premier ordre et diminue à mesure que l'ordre des cours d'eau augmente. Environ 1080 cours d'eau observés dans le sous-bassin versant du Niaoulé, dont 842 sont de premier ordre, 145 de deuxième ordre, 37 de troisième ordre, 12 de quatrième ordre, 3 de cinquième ordre et un seul de sixième ordre (fig. 6). Le schéma de drainage du sous-bassin versant du Niaoulé est de type dendritique (en forme d'arbre), ce qui indique une homogénéité de la texture sans contrôle structural.

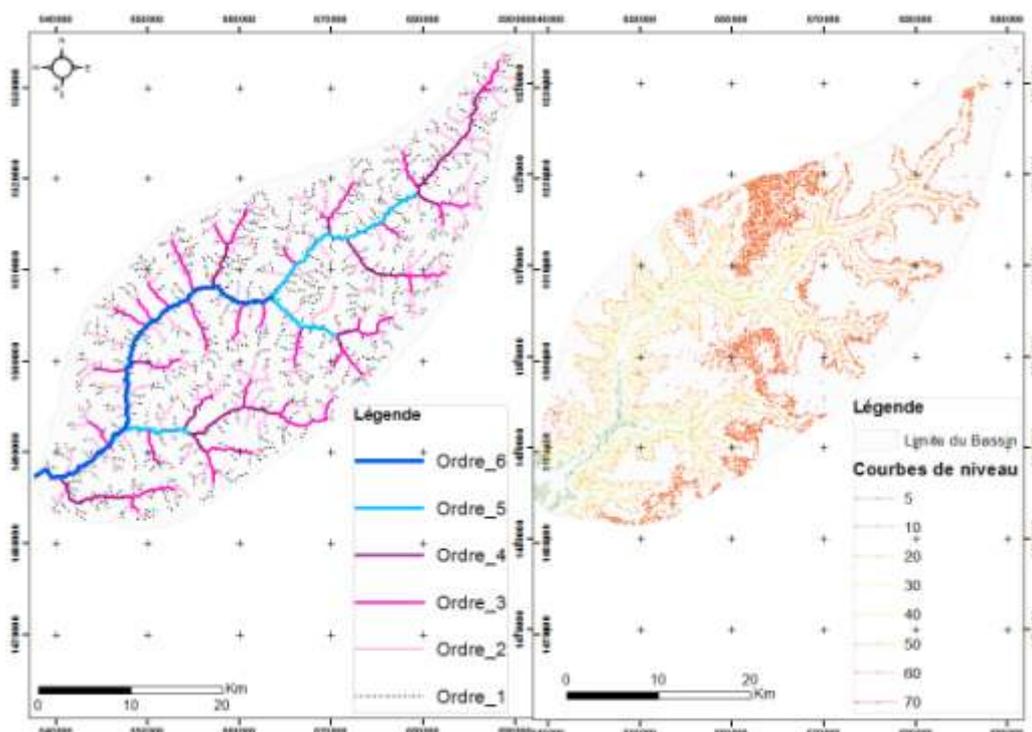


Figure 6.- Ordres des cours d'eau du sous-bassin du Niaoulé

Figure 7.- Courbes de niveau du sous-bassin du Niaoulé

3.1.1.2.- Nombre de cours d'eau (Nu)

Les "nombres de segments de cours d'eau de chaque ordre forment une séquence géométrique inverse avec un numéro d'ordre" [10]. Environ 1080 cours d'eau observés dans le sous-bassin versant du Niaoulé. La fréquence maximale était dans le cas des cours d'eau de premier ordre et diminue à mesure que l'ordre des cours d'eau augmente.

3.1.1.3.- Longueur du cours d'eau (Lu)

La longueur du cours d'eau révèle les caractéristiques de l'écoulement de surface du bassin. Elle a été mesurée à l'aide d'un rotamètre. Le cours d'eau d'une longueur relativement plus faible est caractéristique des zones ayant des pentes plus importantes et une surface exquise. En général, "la longueur totale des segments de cours d'eau est maximale dans les cours d'eau de premier ordre" et diminue avec l'augmentation de l'ordre des cours d'eau. La loi de Horton sur la longueur des cours d'eau suggère une relation géométrique entre le nombre de segments de cours d'eau dans les ordres successifs des cours d'eau et les formes de terrain [10]. Dans le sous-bassin versant du Niaoulé, la longueur des cours d'eau a été calculée en utilisant les cartes topographiques qui découlent du MNT.

La longueur totale maximale des cours d'eau est observée pour les cours d'eau de premier ordre (tab. II) et diminue à mesure que l'ordre augmente, à l'exception du cours d'eau de cinquième et sixième ordre. Les cours d'eau de premier ordre ont une longueur de 756,23 km, les cours d'eau de deuxième ordre de 301,8 km, les cours d'eau de troisième ordre de 144,3 km, les cours d'eau de quatrième ordre de 68,9 km, les cours d'eau de cinquième ordre de 41,2 km et les cours d'eau de sixième ordre de 44,5 km. Cette incohérence entre les cours d'eau de cinquième et de sixième ordre est probablement due à la variation du relief, à la variation lithologique et à l'état des roches dans la région [42].

3.1.1.4.- Longueur moyenne du cours d'eau (Lum)

La longueur moyenne des cours d'eau est une propriété sans dimension qui montre la taille du réseau de drainage et les surfaces des bassins [11]. La longueur moyenne d'un cours d'eau (Lum) est le rapport entre la longueur totale du cours d'eau et le nombre de cours d'eau (par ordre). La longueur moyenne des cours d'eau du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,90 pour le premier ordre, 1,63 pour le deuxième ordre, 3,90 pour le troisième ordre, 5,74 pour le quatrième ordre, 13,7 pour le cinquième ordre et 44,5 pour le sixième ordre. La longueur moyenne des cours d'eau augmente avec l'augmentation du nombre de cours d'eau. La valeur moyenne de la longueur moyenne des cours d'eau du sous-bassin versant du Niaoulé est de 1,26.

3.1.1.5.- Ratio de longueur du cours d'eau (Lur)

Le rapport de longueur du cours d'eau est le rapport entre la longueur moyenne du cours d'eau de l'ordre sélectionné et la longueur moyenne du cours d'eau de l'ordre précédent dans le bassin versant [10]. Les variations du rapport de longueur entre les cours d'eau d'ordre différent indiquent un stade de développement géomorphologique tardif [42]. Le rapport de longueur des cours d'eau dans le sous-bassin versant du Niaoulé varie de 1,47 (entre la longueur moyenne du cours d'eau d'ordre 4 et celle d'ordre 3) à 3,24 (entre la longueur moyenne du cours d'eau d'ordre 6 et celle d'ordre 5) pour une moyenne de 2,26 et un total de 11,31.

3.1.1.6.- Ratio de bifurcation (Rb)

Le ratio de bifurcation est le rapport entre le nombre total de cours d'eau de l'ordre sélectionné et le nombre total de cours d'eau de l'ordre immédiatement supérieur dans le bassin versant. C'est un indice de relief et de dissection [10;34]. Le ratio de bifurcation indique le degré d'intégration entre les cours d'eau d'ordres différents dans un bassin de

drainage. Les valeurs les plus faibles indiquent la planéité ou la physiographie de roulement du bassin, tandis que les valeurs les plus élevées indiquent un contrôle structurel robuste sur le schéma de drainage avec des bassins de drainage bien disséqués [11].

Dans la plupart des études, le rapport de bifurcation varie typiquement entre 3 et 5 pour le bassin versant dans lequel la géologie est raisonnablement homogène sans perturbations structurelles du bassin de drainage, ce qui est le cas du sous-bassin versant du Niaoulé. Les rapports de bifurcation sont classés en 3 classes différentes: bassin circulaire (≤ 2.25), bassin de type chêne (2.25 et 5) et bassin allongé (>5). Le ratio de bifurcation moyen du sous-bassin versant du Niaoulé est de 3,93 pour un total de 19,63. Les ratios de bifurcation qui varient de 3,00 (entre le nombre total de cours d'eau d'ordre 5 et celle d'ordre 6) à 4,55 (entre le nombre total de cours d'eau d'ordre 1 et celle d'ordre 2), classent le sous-bassin versant du Niaoulé dans la catégorie des bassins de type chêne.

3.1.2.- Aspects spatiaux ou de forme

Parmi les aspects régionaux, citons la densité de drainage, la fréquence des courants, le rapport de texture, les facteurs de forme, le rapport circulatoire, le rapport d'allongement, la longueur de l'écoulement terrestre et la constante de l'entretien du canal. Cette analyse peut être utile pour établir une relation entre le débit du cours d'eau et la superficie totale du bassin.

Tableau III.- Aspects spatiaux ou de forme du sous-bassin du Niaoulé

Aspects spatiaux ou de forme	Résultats
Superficie (km ²) (A)	1343
Périmètre (km) (P)	166
Longueur du bassin (km) (Lu)	72,3
Longueur du cours d'eau (km)	90
Relation longueur du cours d'eau / Superficie (Lar)	0,067
Lemniscate (k)	3,05
Densité de drainage km/km ² (Dd)	1,01
Fréquence de flux (Fs)	0,80
Ratio de texture (Dt)	5,07
Coefficient de compacité de Gravelius (K _G)	1,27
Facteur de forme (Ff)	0,26
Ratio d'allongement (Re)	0,29
Rapport de circularité (Rc)	0,61
Longueur de l'écoulement terrestre (Lg)	0,51
Maintien constant du canal (C)	0,99
Texture de drainage (Tj)	0,135
Fréquence des cours d'eau	0,627
Coefficient de torrentialité	0,633

3.1.2.1.- Superficie totale du bassin (A)

La superficie totale du bassin est un paramètre important dans l'analyse morphométrique. La forme d'un bassin a pour origine une poire et tend à s'allonger au fil du temps. La superficie du sous-bassin versant du Niaoulé est de 1343 km².

3.1.2.2.- Périmètre du bassin (P)

La limite extérieure du bassin versant englobe la totalité de la zone. La longueur de cette limite externe, qui est également mesurée le long de la ligne de partage des eaux, est le périmètre du bassin. Le périmètre est un indicateur de la taille et de la forme du bassin versant [34]. Le périmètre du sous-bassin versant du Niaoulé est de 166 km.

3.1.2.3.- Longueur du bassin (Lb)

La longueur du bassin est la distance linéaire droite entre l'embouchure du bassin et le point le plus éloigné de la ligne de partage des eaux. Cette ligne coupe la projection de la direction de la ligne à partir de la source du courant principal [10]. La longueur du sous-bassin versant du Niaoulé est de 72,3 km.

3.1.2.4.- Relation longueur/surface (Lar)

La longueur du cours d'eau et la superficie du bassin sont liées par de simples fonctions d'alimentation dans un grand nombre de bassins. Le rapport entre la longueur du cours d'eau et la superficie du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,067.

3.1.2.5.- Valeur de Lemniscate (k)

La pente du bassin peut être exprimée à l'aide de la valeur de Lemniscate [39]. La valeur de Lemniscate (k) pour le sous-bassin versant du Niaoulé qui est de 3,05, indique que le bassin est occupé par un petit nombre de cours d'eau d'ordre supérieur.

3.1.2.6.- Densité de drainage (Dd)

Le rapport entre la "longueur totale des cours d'eau de tous ordres" et la "superficie" du bassin est défini comme la densité de drainage et est exprimé en km/km². La proximité dans l'espacement des canaux peut être identifiée par l'utilisation de la densité de drainage. Cela est utile pour les mesures quantitatives de la longueur moyenne d'un cours d'eau par rapport à l'ensemble du bassin. Elle est classée en 5 classes différentes: très grossière (<1,2), faible (1,2 à 2,4), modérée (2,4 à 3,6), élevée (3,6 à 4,8) et très élevée (4,6 à 6). Des valeurs plus élevées indiquent une perméabilité plus faible, une végétation clairsemée et un relief accidenté, et des valeurs plus faibles indiquent une perméabilité plus élevée [11]. La densité de drainage dans le sous-bassin versant du Niaoulé est d'environ 1,01 km/km², ce qui est très grossière (c'est à dire de type limité) et indique un sous-sol perméable, une couverture végétale moins dense et un relief moins accidenté [2].

3.1.2.7.- Fréquence de flux (Fs)

L'expression du nombre total de segments de cours d'eau appartenant à tous les ordres par unité de surface est identifiée comme la fréquence de flux ou densité hydrographique [10]. La fréquence de flux tend à être en corrélation positive avec la densité de drainage. La fréquence de flux du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,80. Cette faible valeur de la fréquence de flux indique un ruissellement et une inondation plus lents dans le bassin versant [43]. Généralement une faible fréquence de flux est liée à un matériau perméable. La faible variation de la fréquence du flux s'expliquerait par la dominance des alluvions, des sables graveleux et des grès du bassin sédimentaire du Continental Terminal dans le sous-bassin versant du Niaoulé [32].

3.1.2.8.- Ratio de texture (Rt)

Le rapport entre le nombre de cours d'eau de premier ordre et le périmètre du bassin peut être défini comme le rapport de texture [39]. Il est indicatif de l'espacement des cours d'eau. SMITH (1939) [44] a établi une classification quintuple des classes de texture très grossière (<2), de texture grossière (2 à 4), de texture modérée (4 à 6), de texture fine (6 à 8) et de texture très fine (>8). La texture de drainage du sous-bassin versant du Niaoulé est de 5,07 et indique une texture de drainage très modérée.

3.1.2.9.- Coefficient de compacité de Gravelius (K_G)

L'indice de compacité de GRAVELIUS (1914) [38] K_G est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Le Coefficient de compacité est défini comme le périmètre du bassin divisé par la circonférence d'un cercle à la même zone du bassin. Il est proportionnel à l'évaluation du risque d'érosion, ce qui nécessite la mise en œuvre des mesures de protection et de conservation. Le coefficient de compacité est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Il est classé en 3 classes de formes différentes: ramassée (1 à 1,15), intermédiaire (1,15 à 1,5) et allongée (1,5 et plus). Le coefficient de compacité du sous-bassin versant du Niaoulé est de 1,27 et indique un bassin dont la forme est intermédiaire (ni tout à fait ramassée, ni tout à fait allongée).

3.1.2.10.- Facteur de forme (Ff)

Le facteur de forme (Ff) est le rapport entre la surface du bassin et la source de la longueur du bassin. L'intensité du cours d'eau d'une unité de surface peut être identifiée grâce à ce facteur [10]. Pour un bassin parfaitement circulaire, la valeur du facteur de forme sera supérieure à 0,78 (une valeur de 1 indiquerait une forme parfaitement circulaire). Plus le bassin est allongé, plus la valeur du facteur de forme serait faible (proche de 0). Le facteur de forme du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,26, et symbolise une forme intermédiaire, légèrement allongée et donc peu vulnérable à l'érosion.

3.1.2.11.- Ratio d'allongement (Re)

La forme d'un bassin peut être identifiée par le rapport d'allongement. Il est calculé comme le rapport entre le diamètre d'un cercle ayant une surface similaire à celle du bassin et la longueur maximale du bassin [34]. Des environnements climatiques et géophysiques variés sont évalués entre les valeurs du rapport de 0,60 à 1,00. Les valeurs proches de 1,00 indiquent un relief plus faible, tandis que celles comprises entre 0,60 et 0,80 peuvent être associées à des pentes de terrain abruptes et à un relief élevé [11]. Les différentes formes d'un bassin versant, à savoir la forme circulaire (0,9-0,10), ovale (0,8-0,9) et moins allongée (<0,7). Le rapport d'allongement du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,29, ce qui indique une forme moins allongée.

3.1.2.12.- Rapport de circularité (Rc)

Le rapport de circularité défini par Miller [33] est le rapport de la surface d'un bassin à l'aire d'un cercle ayant la même circonférence que le périmètre du bassin. Ce rapport est un indice sans dimension utilisé pour identifier la forme du contour du bassin.

La valeur varie de zéro (une ligne) à un (un cercle). La valeur tend à être influencée par la longueur et la fréquence de flux dans leur ordre respectif, leur gradient, leur lithologie et leur mode de drainage [45]. Le rapport de circularité du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,61, ce qui indique une forme modérée du bassin. Cela implique un stade de jeunesse tardif du développement géomorphologique du bassin de drainage.

3.1.2.13.- Longueur de l'écoulement terrestre (Lg)

HORTON (1945) [10] identifie la longueur du cours d'eau sur la surface du sol avant de se concentrer dans un canal de ruisseau. Il s'agit d'une variable indépendante qui affecte le développement du bassin de drainage. Elle peut être assimilée à la moitié de la valeur réciproque de la densité de drainage. La longueur de l'écoulement terrestre dans le sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,5.

3.1.2.14.- Maintien constant du canal (C)

SCHUMM (1956) a utilisé l'inverse de la densité de drainage comme une propriété appelée Maintien constant du canal [34]. Le Maintien constant du canal ou Coefficient de stabilité du flux est le rapport entre la superficie d'un bassin de drainage et la longueur totale de tous les canaux exprimée en km^2 . Le Maintien constant du canal dépend du type de roche, de la durée de l'érosion, du relief, de la perméabilité, de la couverture végétale et des conditions climatiques. SCHUMM (1956) [34] a classé le Maintien constant du canal (km^2/km) en cinq catégories différentes, à savoir plus érodables ($<0,2$), modérément érodables (0,2 à 0,3), modérément peu érodables (0,3 à 0,4), peu érodables (0,4 à 0,5) et moins érodables ($>0,5$) [34]. Le Maintien constant du canal du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,99 km^2/km , ce qui indique que ce sous-bassin versant est moins érodable.

3.1.2.15.- Texture de drainage (km^2/km) (Tj)

La texture du drainage (ou coefficient de torrentialité) détermine l'espacement relatif entre les biefs dans un terrain disséqué par l'érosion. Cela dépend de plusieurs facteurs naturels, tels que le climat, les précipitations, la couverture végétale, le type de sol, la capacité d'infiltration et le terrain. La texture de drainage du cours d'eau évalue l'adaptabilité d'un bassin de drainage à l'écoulement de surface ou à l'infiltration. Il est donné selon l'ordre I de flux et se subdivise en cinq catégories de drainage différentes, à savoir drainage grossier (<4), intermédiaire (4 à 10), fin (10 à 15) et ultra fin (> 15). La texture du drainage du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,633 pour le premier ordre, 0,139 pour le deuxième ordre, 0,028 pour le troisième ordre, 0,009 pour le quatrième ordre, 0,002 pour le cinquième ordre et 0,001 pour le sixième ordre pour une moyenne de 0,135, ce qui indique que ce sous-bassin versant a un drainage de type grossier. La fréquence des cours d'eau qui représente le rapport des cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant étudié est de 0,627 pour le sous-bassin versant du Niaoulé. Le coefficient de torrentialité qui est donné par la multiplication entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage est de 0,633 pour le sous-bassin versant du Niaoulé. Les paramètres de formes comme le taux d'allongement, le facteur de forme et le coefficient de compacité sont inversement proportionnels à la vigueur de l'érosion des sols. L'étude permet de conclure que le paramètre de forme est le plus déterminant, la faiblesse de sa valeur est un indicateur de risque d'érodabilité.

3.1.3.- Aspects liés au relief

Les aspects de relief ou de gradient sont des paramètres tout à fait essentiels de l'analyse des bassins de drainage car ils décrivent la nature de la rugosité et de la configuration de la surface. Le rapport du relief, le relief relatif et l'indice de rugosité sont quelques paramètres importants de la morphométrie du relief qui est examinée dans la suite (tab. 4).

Tableau IV.- Aspects liés au relief du sous-bassin du Niaoulé

Aspects liés au relief	Résultats
Relief du bassin (Rh)	71 m
Rapport du relief (Rhl)	0,001
Relief relatif (Rr)	0,04
Nombre de robustesse (Rn)	0,072

3.1.3.1.- Relief du bassin (H)

Il est défini comme étant la différence d'altitude entre le point le plus bas (exutoire) et le point le plus élevé (ligne de partage des eaux) d'un bassin versant [46]. Il joue un rôle important dans le développement des formes de relief, le développement de drainage de surface et l'écoulement de l'eau souterraine [47]. Le relief moyen du sous-bassin versant du Niaoulé est de 52 m. L'altitude la plus élevée du bassin versant est de 71 m, et l'altitude la plus basse du bassin versant est de 0 m (fig. 7) pour une dénivellation de 71 m. La courbe de niveau la plus élevée est de 70 m dans la direction nord-est des zones du sous-bassin versant du Niaoulé (fig. 7). La courbe de niveau la plus basse est de 5m dans la partie sud-ouest de la zone du bassin. L'altitude la plus basse du sous-bassin versant du Niaoulé qui est de 0 m est donc notée dans la partie sud.

3.1.3.2.- Rapport du relief (Rhl)

Le relief ratio mesure la pente globale d'un bassin de drainage. C'est un indicateur de l'intensité du processus d'érosion se produisant dans un bassin versant [34]. L'un représente l'horizontale et l'autre passe par le point le plus élevé du bassin. Le relief ratio mesure la pente globale d'un bassin de drainage. C'est un indicateur de l'intensité du processus d'érosion se produisant dans un bassin versant. Il indique l'intensité du processus d'érosion qui s'opère sur la pente de ce bassin particulier [34]. Le relief ratio est classé en 6 classes de pente: pente nulle (0 à 0,01), faible (0,01 à 0,09), moyenne (0,09 à 0,25), assez forte (0,25 à 0,49), forte (0,49 à 1), très forte (plus de 1). La valeur du rapport de relief dans le sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,001, ce qui indique un faible relief et une pente douce ou nulle. La faible valeur du rapport de relief est principalement due au faible degré de pente.

3.1.3.3.- Relief relatif (Rr)

L'indice Relief relatif (Rr) est une variable morphométrique importante utilisée pour l'estimation des caractéristiques morphologiques générales du terrain [40]. Les sous-bassins versants ayant un relief relatif plus élevé ont un potentiel de ruissellement plus élevé que les autres sous bassins [40]. Le relief relatif pour le sous-bassin versant du Niaoulé de 0,04% Correspond à un potentiel de ruissellement faible.

3.1.3.4.- Nombre de robustesse (Rn)

Le nombre de robustesse (Rn) est le produit de la densité de drainage (Dd) et celui du relief du bassin (Rh) [11;48] dans la même unité. Dans certains cas, les deux variables sont significatives, et la pente est aussi bien raide que longue, cet indice de robustesse temporelle se produit dans des valeurs énormément élevées. Dans le sous-bassin versant du Niaoulé, la valeur de l'indice de robustesse de 0,072 est faible, ce qui indique qu'il s'agit d'une zone peu sensible à l'érosion des sols.

3.1.3.5.- Modèle numérique d'altitude (MNA)

Le terme "soulagement relatif" a été introduit par MELTON (1957) [48]. Une analyse visuelle de la zone d'étude a été réalisée à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Le MNA a été produit sur la base de données de contour (fig. 8). Le relief du sous-bassin du Niaoulé est assez uniforme avec des altitudes très faibles dans l'ensemble. Le point culminant, avec 71 m, se trouve à l'extrême Nord-est du bassin. L'altitude minimale qui correspond à 0 m est notée vers l'exutoire. Le relief est constitué d'un plateau tabulaire de 40 m d'altitude en moyenne. La répartition des altitudes présente deux tranches d'altitude exprimée par la courbe hypsométrique [49]: 88% du bassin se trouvent en dessous de 40 m, correspondant aux versants, pentes et glacis d'épandage qui cernent la zone de confluence du Niaoulé avec la Gambie; 12% du bassin se situent entre 40 et 75 m, il s'agit de plateaux et buttes résiduels recouverts de lithosols sur cuirasse. La classe d'altitude la plus fréquente du bassin est la classe 55-60 m dont la surface correspondante est de 688 km (soit plus de la moitié du bassin). L'indice de pente globale du bassin du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,6 pour une dénivelée spécifique de 22,8 m, ce qui indique un relief de type faible. C'est pour cela que le bassin est donc exposé à un faible drainage et à une forte infiltration.

3.1.3.6.- Pentas (m)

L'analyse des pentes est un facteur essentiel dans les études géomorphologiques [10]. La pente est définie comme le taux de changement de hauteur de la valeur de chaque cellule par rapport à ses voisines [41]. La lithologie et les processus climatiques morphogènes contrôlent les éléments de la pente dans la région avec une résistance variable. La compréhension de la pente joue un rôle essentiel dans la planification de l'agriculture, de la déforestation et de la gestion des catastrophes. Les valeurs de pente les plus faibles indiquent un terrain plat et les valeurs de pente les plus élevées indiquent un terrain plus raide. L'ensemble de données de sortie sur les pentes peut être calculé en pourcentage ou en degré de pente [50]. Dans le sous-bassin versant du Niaoulé, la carte de la pente est réalisée à partir de la plateforme Arcgis. Il existe six classes de pente identifiées et calculées en degrés. Dans la zone du sous-bassin versant du Niaoulé, les pentes varient de 0° à 90°. La partie sud du sous-bassin versant du Niaoulé est observée en terrain plat et la partie nord de la zone du bassin est couverte par une zone de plateaux et buttes résiduels (fig. 9).

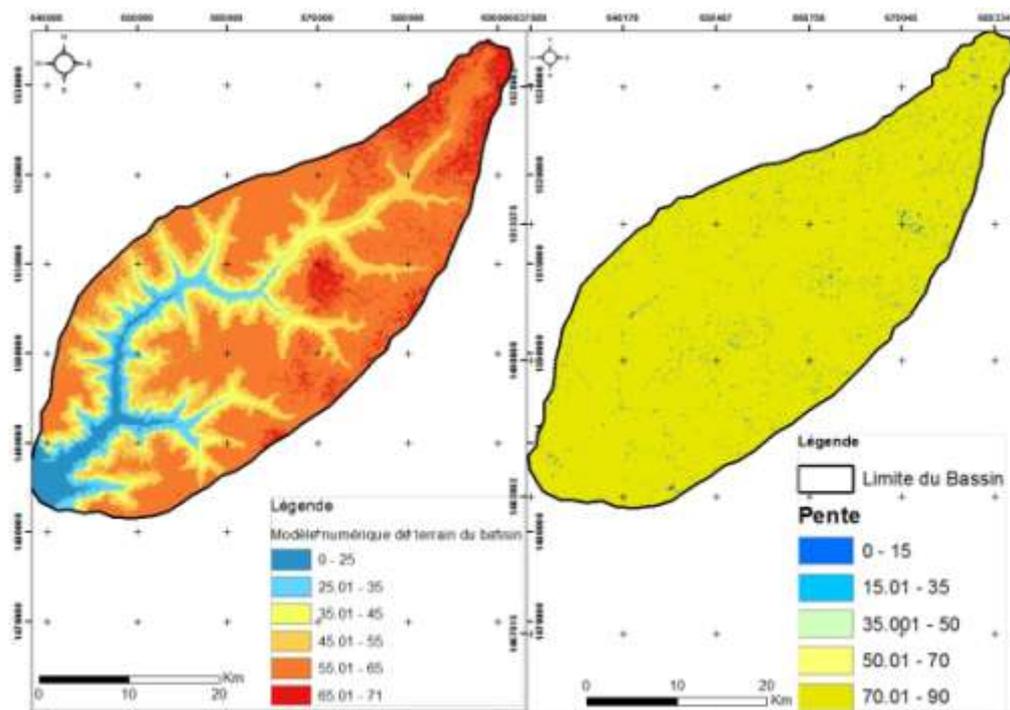


Figure 8.- MNA du sous-bassin du Niaoulé

Figure 9.- Penthes du sous-bassin du Niaoulé

La géologie, le relief et le système de pentes qui l'accompagne, les sols qui porte la végétation constituent les facteurs stables de l'écoulement du bassin. La pluviométrie (donnée aléatoire) qui dépend du climat, de même que les températures et les effets induits comme l'évaporation ont une large influence sur les modalités de l'écoulement. L'indice de pente, très faible dans le bassin du Niaoulé traduisant ainsi une très grande faiblesse des pentes du bassin. L'indice de pente a une grande influence sur l'écoulement. C'est elle qui, en définitive, constitue le facteur principal de ruissellement, qui sera d'autant plus important et rapide que le relief sera vigoureux. Cette faiblesse des pentes, due aux variations des altitudes qui sont peu importantes, a pour conséquence une diminution de la vitesse de l'écoulement, donc une atténuation des débits de crue et des pertes par évaporation plus importantes. La forme du bassin exprimée par le coefficient de compacité Gravelius et qui est égal à 1.27 traduit aussi une forme assez allongée, qui est plus apte à écouler l'eau. Les sols et la végétation ont aussi un rôle important dans l'écoulement d'un cours d'eau. Deux phénomènes ont laissé leur empreinte sur les sols du bassin versant du Niaoulé. Le cuirassement et la latérisation qui sont déterminants non seulement sur la capacité d'infiltration des sols mais aussi sur leur aptitude à porter une végétation importante [29;32].

3.2.- Analyse hydrologique

Le tableau V présente les données d'analyse du régime moyen annuel du sous-bassin versant du Niaoulé. L'évolution des valeurs moyennes mensuelles de débits traduit deux périodes. La période de montée des eaux dure 4 mois et va d'avril à juillet où le débit passe de $0\text{ m}^3/\text{s}$ à $0,85\text{ m}^3/\text{s}$ soit un accroissement total de $0,85\text{ m}^3/\text{s}$. Entre avril et mai le module augmente de $0,04\text{ m}^3/\text{s}$, soit 4,71% en valeur relative. Entre mai et juin, le module passe de $0,04\text{ m}^3/\text{s}$ à $0,36\text{ m}^3/\text{s}$ soit une augmentation brute de $0,32\text{ m}^3/\text{s}$ (37,65%) par rapport au module de mai, ce qui est important. Entre juin et juillet le module passe de $0,36\text{ m}^3/\text{s}$ à $0,85\text{ m}^3/\text{s}$ soit une augmentation de $0,49\text{ m}^3/\text{s}$, la plus forte augmentation qui fait

59,65% en valeur relative. La période de descente des eaux s'amorce dès le maximum de juillet. En août, le débit diminue faiblement passant de 0,85 m³/s (juillet) à 0,70 m³/s, soit une diminution de 0,15 m³/s (-17,75%). La plus forte diminution du débit intervient entre septembre et octobre avec le module qui passe de 0,69 m³/s à 0,16 m³/s soit une baisse de 0,53 m³/s (-62,35%), ce qui est très élevé. De juillet à septembre, le débit du sous-bassin du Niaoulé diminue, en trois mois, de 0,69 m³/s, soit 82,2 %. Si on y ajoute la baisse de 1,18 % entre août et septembre et de 17,65 % entre octobre et novembre, la rivière, en quatre mois, perd 99,2% du débit, un débit qui s'annule dès le mois de janvier avec une rivière qui est à sec le reste de l'année (tab. V). La décroissance des modules qui s'effectue en cinq mois (juillet-novembre) est plus lente que la montée.

Tableau V.- Débits moyens de 1970 à 1993 (24 ans) à la station hydrologique de Niaoulé Tanou

Descripteurs	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	An
Moyenne	0,04	0,36	0,85	0,70	0,69	0,16	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24
CMD	0,18	1,50	3,55	2,92	2,88	0,66	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	
Ecart-type	0,12	0,43	0,80	0,93	1,04	0,39	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36
Coef. de Variation	0,36	0,83	1,07	0,75	0,67	0,41	0,36	0,37	0,66
Evolution brute	0,04	0,32	0,49	0,15	0,01	0,53	0,15	0	0,01	0	0	0	
Evolution (%)	4,71	37,65	57,65	17,65	1,18	62,35	17,65	0,00	1,18	0,00	0,00	0,00	
Coef. de croissance et de décroissance	0	0,95	0,37	-0,08	-0,01	-0,63	-1,20	0	0	0	0	0	

L'écoulement dure huit mois à Niaoulé Tanou de mai à décembre, période qui couvre la saison pluvieuse qui s'étend de mai à octobre. Le débit maximum mensuel intervient au mois de juillet avant le maximum pluviométrique qui est noté en août, ce qui est précoce. Le régime du Niaoulé est de type pluvial tropical pur. Il traduit d'une manière assez nette le régime des pluies du bassin, seule source d'alimentation [32]. Le tableau V révèle la faiblesse et la modicité des débits du sous-bassin versant du Niaoulé à la station de Niaoulé Tanou durant la période 1970-1993, les débits mensuels faibles n'atteignant jamais 1m³/s. Le coefficient mensuel de débit (CMD), montre que quatre mois ont un $CMD \geq 1$ correspondant à la période de hautes eaux (juin, juillet, août et septembre) et le reste de l'année hydrologique (8 mois) correspond à la période des basses eaux.

L'accroissement brutal des modules entre juin et juillet est lié à l'installation effective de la saison pluvieuse, les pluies du mois de mai (17 mm à Tambacounda) étant faibles n'occasionnent pas un écoulement important. En revanche celles du mois de juin (108 mm) expliquent l'augmentation du débit de 0.49 m³/s soit 58% entre juin et juillet. Cette forte augmentation de la pluie situe le maximum hydrologique en juillet, il est précoce par rapport au maximum pluviométrique. Cela montre l'absence ou la faiblesse de la rétention des sols qui aurait pu entraîner un décalage entre le maximum de l'écoulement intervenant après le maximum de la pluie. Entre septembre et octobre, la chute brutale des modules est liée à la décroissance rapide des pluies qui passent de 202 mm en septembre à 65 mm en octobre, et cela au moment où le mois d'octobre enregistre le second maximum thermique avec 29°C (les températures élevées accélèrent le ressuyage des sols). Le mois de novembre marque la fin de l'écoulement liée à l'arrêt des pluies, ce qui explique, par ailleurs, les débits nuls enregistrés dès le mois de janvier et l'absence totale d'écoulement durant quatre mois. Ces débits nuls sont aussi révélateurs de l'absence de soutien par les réserves souterraines des débits d'étiage, quoique le bassin soit dans l'ensemble perméable. Mais, comme les autres paramètres de l'écoulement, le régime saisonnier est caractérisé

par une grande variabilité.

Conclusions

L'étude de l'analyse morphométrique à l'aide de la technique SIG peut résoudre efficacement divers problèmes liés aux bassins versants, comme les sécheresses, l'érosion des sols, l'évaluation des bassins versants, les inondations, l'analyse du potentiel des eaux souterraines, etc. De nombreux chercheurs ont constaté que l'approche basée sur les SIG dans l'analyse morphométrique des bassins hydrographiques est plus fiable que les méthodes conventionnelles. La technique SIG est un outil simple, convivial, durable qui permet de gagner du temps dans l'étudier des sous-bassins versants grâce à la bonne qualité des résultats et au degré élevé de précision issu du processus de traitement des données.

A la suite des résultats obtenus, on peut conclure que les variables morphométriques du bassin du sixième ordre de la zone sont influencées par la lithologie. Par ailleurs l'étude a également fait ressortir les caractéristiques variées du réseau de drainage du sous-bassin versant du Niaoulé avec des résultats utilisables dans le cadre des stratégies de gestion des bassins versants. Cependant les valeurs du rapport de bifurcation (3 à 5) indiquent que le bassin de drainage n'est pas affecté par des perturbations structurelles, alors que la faible valeur du ratio de bifurcation montre que la topographie jeune avec un degré moins élevé d'intégration du drainage. En outre, le sous-bassin versant a une forme moins allongée et un climat et une géologie homogènes. Les valeurs calculées de la densité de drainage et de la fréquence des cours d'eau soulignent que le bassin est de drainage grossier. Le rapport de relief du sous-bassin versant du Niaoulé est de 0,001, ce qui indique un faible relief et une pente douce. La valeur de l'indice de robustesse, de 0,072, est élevée et montre que le bassin est peu sujet à l'érosion du sol. Ces résultats corroborent un faible potentiel de drainage au niveau du sous-bassin versant du Niaoulé qui lui permettrait de remplir sa fonction de drainage efficacement. En effet, le cours d'eau ne participe que très peu au débit terminal de la Gambie. Durant la période 1971-1993, le fleuve n'a écoulé que 4.609.000 m³/an, d'où de faibles disponibilités en eau de surface. L'écoulement est caractérisé par sa brièveté, allant jusqu'à l'arrêt total pendant de nombreux jours durant l'année (plus de la moitié). Cette situation révèle une absence de pondération des débits du cours d'eau, alors que le facteur lithologique semble assez favorable à la constitution de réserves souterraines en raison de la perméabilité des terrains. Cette perméabilité devrait toutefois être relativisée par le fait que les sols du bassin, notamment les sols ferrugineux, se caractérisent par l'individualisation d'un niveau fortement induré à moyenne profondeur qui favorise le ruissellement hypodermique au détriment de l'alimentation des réserves souterraines. En réalité, le seul soutien des débits d'étiage dans le bassin est dû à la restitution des quantités d'eau accumulées dans les alluvions ou aquifères superficiels du cours d'eau, alluvions constituées de graviers et sables caractérisés par une forte perméabilité. Et ce soutien est faible, d'où la faiblesse de l'écoulement, le cours d'eau s'assèche dès l'absence des pluies et ceci pendant un nombre important de jours dans l'année.

Toutefois, l'amélioration de la capacité de stockage des masses d'eau, la réhabilitation et la restauration des canaux selon des normes standard amélioreront la capacité de rétention d'eau des sous-bassins, ce qui sera d'une immense utilité pour répondre aux demandes en eau des zones environnantes pour l'agriculture et à des fins domestiques.

Références

- [1].- Benzougagh B., Dr. Boudad L., Dridri A., Sdkaoui D., 2016.- Utilisation Du Sig Dans L'analyse Morphométrique Et La Prioritisation Des Sous-Bassins Versants De Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc). *European Scientific Journal*, 12 (6): 266-289.
- [2].- Nag S. K., 1998.- Morphometric Analysis Using Remote Sensing Techniques in the Chaka Sub-basin, Purulia district, West Bengal. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26 (1 and 2): 69-76.
- [3].- Reddy G. P. O., Maji A. K. and Gajbhiye, K. S., 2004.- Drainage Morphometry and its Influence on Landform Characteristics in a Basaltic Terrain, Central India – A Remote Sensing and GIS Approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Pp 1-16.
- [4].- Das A. K. and Mukherjee S., 2005.- Drainage Morphometry using Satellite Data and GIS in Raigad District, Maharashtra. *Journal of the Geological Society of India*, 65: 577- 586.
- [5].- Manojkumar P. D., Nitin N. M., Akshada H. K., Ganesh M. D., 2019.- Morphometric Analysis of Kolavadi Sub-Watershed in Bhore Taluk Using GIS Techniques. *J. Geographical Studies*, 3(1): 1-10, 87-96.
- [6].- Clarke J. J., 1966.- *Morphometry from Maps, Essays in Geomorphology*. Elsevier Publishing Company, New York, Pp 235-274.
- [7].- Agarwal C. S., 1998.- Study of Drainage Pattern through Aerial Data in Nahargarh Area of Varanasi District, U.P. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26 (4): 169-175.
- [8].- Jawaharraj N., Kumaraswami K. and Ponnaiyan K., 1998.- Morphometric Analysis of the Upper Noyil basin (Tamil Nadu). *Journal of the Deccan Geographical Society*, 36: 15-29.
- [9].- Sree devi P. D., Srinivasalu S. and Kesavaraju K., 2001.- Hydrogeomorphological and Groundwater Prospects of the Pageru River Basin by using Remote Sensing Data. *Environmental Geology*, 40(8): 1088-1094.

- [10].- Horton R. E., 1945.- Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydro-physical Approach to Quantitative Morphology. Bulletin of the Geological Society of America, 56: 275-370.
- [11].- Strahler A. N., 1957.- Quantitative Analysis of Watershed Geometry. Transactions of American Geophysical Union, 38: 913-920,
- [12].- Gaikwad R. and Bhagat V., 2018.- Multi-criteria Prioritization for Sub-watersheds in Medium River Basin using AHP and Influence Approaches. Hydrospatial Analysis, 2(1): 61-82.
- [13].- Zolekar R. B. and Bhagat V. S., 2015.- Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote Sensing and GIS approach. Computers and Electronics in Agriculture, 118: 300-321.
- [14].- Aouragh M. H. and Ali E., 2014.- Morphometric analysis of a Guigou Sub-Watershed, Sebou Basin, Middle Atlas , Morocco Using GIS Based ASTER (DEM). International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 3(4): 11503-11512.
- [15].- Gharde K. D. and Kothari M., 2016.- Hydromorphometric analysis and prioritization of Savitri Basin of Maharashtra, India using GIS. International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD), 6(2): 1-10.
- [16].- Gabale S. M. and Pawar N. R., 2015.- Quantitative morphometric analysis of Ambil Odha (Rivulet) in Pune, Maharashtra, India. IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 9(7): 41-48.
- [17].- Gebre T., Kibru T., Tesfaye S. and Taye G., 2015.- Analysis of watershed attributes for water resources management using GIS: The case of Chelekot micro-watershed, Tigray, Ethiopia. Journal of Geographic Information System, 7(2): 177-190.
- [18].- Romshoo S. A., Bhat S. A. and Rashid I., 2012.- Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus Basin. Journal of Earth System Science, 121(3): 311-335.

- [19].- Gumma M. K., Birhanu B. Z., Mohammed I. A., Tabo R. and Whitbread A. M., 2016.- Prioritization of watersheds across Mali using Remote Sensing data and GIS techniques for agricultural development planning, *Water*, Pp 1-17.
- [20].- Gashaw T., Tulu T. and Argaw M., 2017.- Erosion risk assessment for prioritization of conservation measures in Geleda watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 6(1): 1-16.
- [21].- Rai P. K., Mohan K., Mishra S., Ahmad A. and Mishra V. N., 2014.- A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Appl. Water Sci.*, 7(1): 217-232.
- [22].- Gajbhiye S, Sharma S. K. and Meshram C., 2014.- Prioritization of watershed through sediment yield index using RS and GIS approach. *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*, 7(6): 47-60.
- [23].- Khan M. A., Gupta V. P. and Moharana P.C., 200.- Watershed Prioritization Using Remote Sensing and Geographical Information System: A Case Study from Guhiya, India. *Journal of Arid Environments*, 49: 465-475.
- [24].- Vittal S. S., Govindaonah S. and Gowda H. H., 2004.- Morphometric Analysis of Subwatersheds in the Pawagada Area of Tumkur District South India Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 32(4): 351-362.
- [25].- Chopra R., Dhiman R. and Sharma P. K., 2005.- Morphometric Analysis of Subwatersheds in Gurdaspur District, Punjab Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of Indian society of remote sensing*, 33(4): 531-539.
- [26].- Ratnam N. K., Srivastava Y. K., Venkateswarao V., Amminedu E. and Murthy K. S. R., 2005.- Check Dam Positioning by Prioritization of Micro-watersheds using SYI Model and Morphometric Analysis – Remote Sensing and GIS Perspective. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33(1): 25-28.
- [27].- Lamagat J.P., 1989.- Monographie hydrologique du fleuve Gambie. Collection M & m. ORSTOM-OMVG, 250 p.

- [28].- Dione O., 1996.- Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin, 477 p.
- [29].- Sow A. A., 2007.- L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens: les bassins de la Gambie et de la Falémé. Thèse d'Etat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1232 p.
- [30].- Sow N. D., 2008.- Ecoulement dans le bassin versant du Niaoule. Mémoire de Maitrise, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 86 p.
- [31].- Michel P., 1973.- Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie: Etude géomorphologique Tome 1, Tome 2, Tome 3, 752p, 91 photos, 9 planches, 6 cartes. ORSTOM, Dakar, 1170 p.
- [32].- Sow A.A., 2014.- Le Niaoule et son bassin : étude hydrologique. Publication.lecames.org, Pp 201-226.
- [33].- Miller, V. C., 1953.- A quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristic in the Clinch, Mountain Area, Verdinia and Tennessee. Tech Report 3 Office of Novel Research, Department of Geology, Columbia University, New York, Pp 1-30.
- [34].- Schumm, S. A., 1956.- Evolution of Drainage System and Slope in Badlands of Perth Amboy, New Jersey. Bulletin of Geological Society of America, 67: 597-646.
- [35].- Langbein, W. B., 1947.- Topographic characteristics of drainage basins. Water Supply Paper, 968- C, Pp 125-157.
- [36].- Smart, J.S. and Surkan, A.J., 1967.- The relation between mainstream length and area in drainage basins. Water Resources Research, 3(4): 963-974.
- [37].- Mueller, J. E., 1968.- An Introduction to the Hydraulic and Topographic Sinuosity Indexes. Annals of the Association of American Geographers, 58(2): 372-385.

- [38].- Gravelius, 1914.- Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German). Goschen, Berlin, 10 p.
- [39].- Chorley, R. J., 1957.- Illustrating the Laws of Morphometry. Geological Magazine. 94, 140-150.
- [40].- Umair A., Syed A A., 2014.- Analysis of Drainage Morphometry and Watershed Prioritization of Romushi - Sasar Catchment, Kashmir Valley, India using Remote Sensing and GIS Technology. International Journal of Advanced Research (2014), 2 (12): 5-23.
- [41].- Todhunter I., 1888.- A Treatise on Plane Co-ordinate Geometry as Applied to the Straight Line and the Conic Sections. London, Macmillan and Co. and New York, 114 p.
- [42].- Singh, S. and Singh, M. C., 1997.- Morphometric Analysis of Kanhar River Basin. National Geographical Journal of India, 43(1): 31-43.
- [43].- Kale V. S. and Gupta, A., 2001.- Introduction to Geomorphology. India: Orient Longman Ltd., Pp 82-101.
- [44].- Smith, G. H., 1939. The morphometry of Ohio: The average slope of the land (abstract). Annals of the Association of American Geographers, 29, 94.
- [45].- Umrikar, B. N., 2016.- Morphometric analysis of Andhale watershed, Taluka Mulshi, District Pune, India. Applied Water Science, 7, 2231-2243.
- [46].- Kartic B., Jatisankar B., 2013.- Prioritization of Watershed using Morphometric Analysis through Geoinformatics technology: A case study of Dungra subwatershed, West Bengal, India. Int. Journal of Advances in Remote Sensing and GIS, 2 (1): 2013.
- [47].- Magesh N. S., Chandrasekar N., 2012.- GIS model-based morphometric evaluation of Tamiraparani subbasin, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India. Arab J Geosci DOI 10.1007/s12517-012-0742-z., Pp 131-144.

- [48].- Melton, M, A, 1957.- An analysis of the Relations among Elements of Climate, Surface Properties and Geomorphology. Columbia University, 389042 (11), 11 p.
- [49].- Konaté L., 1998.- Les Bas-fonds dans le réseau hydrographique du fleuve Gambie: (Cartographie, Régime hydrologique, Valorisation Agricole et Typologie). Thèse doctorat 3ième cycle, Département de géographie, UCAD, 183 p.
- [50].- Jensen, J. R., 2004.- Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. University of South California, 618 p