

Sous thème III : Sciences de la terre, sciences de l'eau et paleontologie

CARACTÉRISATION PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DE NOSIVOLO ET ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES SOUS BASSINS

RAMIANDRIVELO K. J. P., ANDRIAMALALA A. M., RANDIMBIARIVELO R. H., RANDRIAMIALLY J. D., ZAFILAZA. et RANARIJAONA H. L. T.

École Doctorale des Écosystèmes Naturels (EDEN). Université de Mahajanga
Tél. : +261 32 46 960 36 / +261 34 46 468 48
Courriel : dadafily@gmail.com

Résumé

L'écoulement des eaux dans un bassin versant est influencé par sa morphologie et celles des sous bassins versants qui le constituent. Les paramètres physiques de ceux-ci sont-ils tous liés à la morphologie du bassin ? Cet article a pour objectif de caractériser les aspects morphologiques du bassin versant de Nosivolo afin de mieux comprendre les paramètres qui interagissent entre eux. La méthodologie a été de délimiter les sous bassins, déterminer et interpréter ses paramètres morphologiques et hydrographiques puis effectuer une analyse statistique des données obtenues. Les résultats ont montré que le bassin est constitué de onze sous bassins dont la superficie du varie de 101 km² à 1341 km². Ils ont toutes une morphologie allongée ($K_G > 1,4$ et $K_H < 0,6$). L'analyse multivarié entre les 14 variables obtenues montre une corrélation forte entre la superficie, le périmètre et les dimensions du rectangle équivalent, la densité de drainage et les altitudes caractéristiques, R_C avec K_H et D_S . Des corrélations fortes et négatives s'observent également entre D_d et H_{moy} . Enfin, les paramètres physiques et physiographiques du bassin versant ont pu permettre de caractériser chaque sous bassins.

Mots-clés : Bassin versant, Morphologie, Nosivolo, Sous bassins.

Abstract

The flow of water in a watershed is influenced by its morphology and those of the sub-watersheds that constitute it. Are the physical parameters of these all

related to the morphology of the basin? This article is aimed to characterize the morphological aspects of the Nosivolo watershed in order to better understand the parameters that interact with each other. The methodology was to delimit the sub-basins, determine and interpret their morphological and hydrographic parameters and to perform a statistical analysis of the data obtained. The results showed that the basin is made up of eleven sub-basins with surface area ranging from 101 km² to 1341 km². They are all characterized by an elongated morphology with K_G and K_H elongated morphology ($K_G > 1.4$ and $K_H < 0.6$). The multivariate analysis between the 14 variables obtained shows a strong correlation between these areas, the perimeter and the sizes of the equivalent rectangle, the drainage density and the characteristic altitudes, R_C with K_H and D_S . Strong and negative correlations are also observed between D_d and H_{moy} . Finally, the physical and physiographic parameters of the watershed were allow us to characterize each sub-basin.

Keywords: Watershed, Morphology, Nosivolo, Sub-basins.

Famintinana

Ny fikorianan'ny rano ao anaty riandrano dia misy fiatraikany amin'ny endriny sy ny an'ny renirano ambany mandrafitra azy. Ireo karazan-drefy nalaina ve misy ifandraisany amin'ny éndrika sy ny lohasaha? Ity lahatsoratra ity dia maneho ny hampivavaka ny lafiny morfologika amin'ny rano Nosivolo mba hahafantarana tsara kokoa ireo masontsivana mifandraika. Ny fomba fiasa dia ny famerana ny sakan-tsininy, mamaritra sy manazava ny karazan-drefy sy ny fiseho ivelany sy ny endriky ny renirano ary avy eo manao fanadihadiana ny antontan'isa voaangona azo. Ny vokatra azo dia naneho fa ny manodidina dia mitsinjara ho lohasaha iraka ambin'ny folo izay miovaova ny velarantaniny 101 km² ka hatramin'ny 1341 km². Izy rehetra dia manana morphology lava ($K_G > 1.4$ sy $K_H < 0.6$). Ny fampiharana marofiovana eo amin'ny sokajy 14 noraisina dia mampiseho fifandraisana akaiky izay mampifamatotra ny manodidina, ny velarana mahitsizoro mitovy ary ny hakitroky ny rano sy ny toetry ny haavo, R_C miaraka amin'i K_H sy D_S . Ny fifamatorana miiba dia hita eo ihany koa eo amin'ny D_d sy H_{moy} . Farany, ny karazan-drefy nalaina tamin'ny rano sy ny endriky ny riandrano dia afaka nampivavaka ny lohasaha tsirairay.

Teny fototra : Basika, Endrika, Nosivolo, lohasaha.

Introduction

L'écoulement des eaux en milieu naturel dépend de beaucoup de facteurs tels que les précipitations (Faye, 2014), mais aussi des paramètres physiques et physiographiques des bassins versants. La géomorphologie de ceux-ci constitue un des paramètres clés de l'étude des hydrosystèmes (Veltri, 1996). Leur caractérisation physique a toujours été un des premières étapes indispensables à l'étude de ses comportements hydrologiques (Strahler, 1964 ; Faye, 2014). Des études plus récentes ont mis en évidence les relations entre les caractéristiques physiques des bassins avec l'érosion des sols (Nautiyal, 1994, Chaudhary & Sharma, 1998). Cette présente étude mettra en évidence les corrélations entre les différents paramètres physiques de chaque sous bassin constituant d'un bassin versant de Nosivolo.

La rivière Nosivolo est une zone humide Ramsar abritant plusieurs espèces de poissons endémiques de Madagascar dont quatre ne se trouvent nulle part ailleurs (Raminosoa et al., 2004 ; Ramahefasoa et al., 2010). Ce travail a pour but de caractériser les aspects morphologiques du bassin versant de Nosivolo afin de mieux comprendre les paramètres qui interagissent entre eux. Biswas (1999) affirme que l'analyse morphométrique est une démarche importante pour la hiérarchisation et la caractérisation des bassins versants même sans tenir compte de la carte des sols.

Le présent article servira comme base de données pour toutes études du bassin versant de Nosivolo, principalement l'analyse statistique ultérieure des paramètres physiques et

physiographiques que nous allons pouvoir dégager.

Méthodologie

Milieu d'étude et délimitation des sous bassins versants

Le bassin versant de Nosivolo se localise dans la région Centre-Est de Madagascar, plus précisément dans le district de Mahanoro et Marolambo. La délimitation des sous bassins a été effectuée à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain d'une résolution de 90m. Nous avons utilisé les outils "Hydrology" et "Conditional" existants dans le kit "spatial analyst" du logiciel ArcGIS 10.1, ce qui a donné la figure ci-dessous.

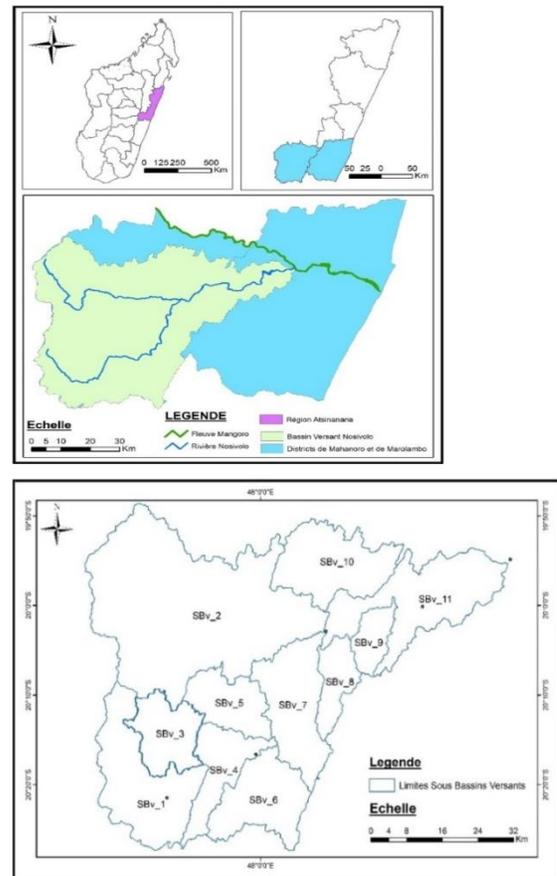


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et limites des sous bassins versants

Détermination des indices de formes et dimensions du rectangle équivalent

L'indice de Gravelius, notée K_G , représente le rapport du périmètre P du bassin par rapport à celui d'un cercle ayant la même surface A . Mais, l'indice de Horton, notée K_H , exprime le rapport de la superficie du bassin à la longueur L du cours d'eau principal (Horton, 1932). Le bassin a une forme allongée si K_G et K_H sont supérieures à 1. Sa morphologie est ramassée si $K_H < 1$ et plus ou moins arrondie si $K_G < 1$.

$$2- K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad \text{et} \quad K_H = \frac{A}{L^2}$$

Tout bassin versant peut-être comparé à une forme géométrique plus simple, un rectangle de mêmes périmètre et surface que le bassin, appelée rectangle équivalent. La longueur L et la largeur l du rectangle ont été obtenus en utilisant les expressions ci-dessous qui fait intervenir sa superficie A et l'indice K_G de Gravelius pour ce bassin.

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right]$$

$$\text{et} \quad l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right]$$

Détermination des pentes et altitudes du bassin versant

La détermination de ces paramètres nécessite le traçage de la courbe hypsométrique, qui est la représentation schématique des altitudes d'un bassin versant selon la surface occupée. Elle a été tracée à l'aide de Microsoft Office 2016.

L'indice de pente de Roche, notée I_r , a été déterminée à l'aide de la formule ci-dessous, une expression qui dépend de la longueur L du rectangle équivalent, du pourcentage a_i des surfaces et de la dénivellation d_i des altitudes.

Mais l'indice de pente globale, notée I_g , a été calculée en faisant le rapport de la dénivelée entre 5% et 95% des altitudes sur la courbe hypsométrique et la longueur L du rectangle équivalent.

$$I_g = \frac{Z_{5\%} - Z_{95\%}}{L} \quad \text{et} \quad I_r = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{a_i d_i}$$

L'altitude moyenne, notée H_{moy} , a été calculée à l'aide de la formule ci-après qui fait intervenir les aires A_i et les altitudes H_i entre deux courbes de niveau ainsi que la surface A du bassin. La dénivelée spécifique, notée D_s , du bassin versant a été déterminée en multipliant l'indice de pente I_g par la superficie A du bassin.

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum A_i H_i}{A} \quad \text{et} \quad D_s = I_g * A$$

Détermination de la densité de drainage et du rapport de confluence

La détermination de ces paramètres nécessite l'ordination du réseau hydrographique. La méthode de Strahler (1952) que nous avons adoptée pour cela attribue la valeur "1" à tous les tronçons de tête de bassin. La confluence entre deux cours d'eau du même ordre donne un ordre supérieur mais celle entre deux thalwegs de différents ordres donne un tronçon qui garde l'ordre du plus grand.

La densité de drainage D_d est une méthode qui exprime la longueur totale du réseau hydrographique L_i par la surface A du bassin versant. Mais, le rapport confluence R_C , des cours d'eau est le rapport entre la longueur des thalwegs d'ordre i par ceux d'ordre $i+1$.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad \text{et} \quad R_C = \frac{L_i}{L_{i+1}}$$

Résultats

Caractéristiques physiques du bassin versant de Nosivolo

Les caractéristiques physiques du bassin versant montrent qu'il est immense (4.122 Km² sur un pourtour de 433 Km), de forme allongée et fortement dénivelé avec un indice de pente considérable, comme indiquées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Géométries et morphométries des sous-bassins versants

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
S (en km ²)	4122,50	K _G	1,88	H_min (en m)	50
P (en km)	433,07	K _H	0,20	H_max (en m)	1700
L (en km)	194,66	I _g	1,75	H_moy (en m)	805
I (en km)	21,18	I _p (en %)	0,6	Ds (en m)	395,81

S : Superficie, **P** : Périmètre, **L** et **I** : Longueur et largeur du rectangle équivalent, **K_G** et **K_H** : Indice de Gravelius et de Horton, **H_min**, **H_max** et **H_moy** : Altitudes minimale, maximale et moyenne, **Ds** : Dénivelée spécifique, **I_g** et **I_p** : Indices de pente globale et celle de Roche

Paramètres géométriques et morphométriques des sous bassins

Le tableau 2 ci-dessous montre que tous les sous bassins sont relativement grands. Le plus petit d'entre eux, SBv_9, a une superficie de 101 km² et le plus grand est SBv_2, soit 1341 km². Les indices de formes montrent ainsi que les dimensions du rectangle équivalent qu'ils sont tous une morphologie plus ou moins allongées.

Tableau 2. Géométries et morphométries des sous-bassins versants

Sous bassins	S (km ²)	P (km)	L (km)	I (km)	K _G	K _H
SBv_1	445,05	139,41	63,20	7,04	1,86	0,65
SBv_2	1341,15	240,49	108,85	12,32	1,85	0,20
SBv_3	210,85	86,04	37,77	5,58	1,67	0,18
SBv_4	207,10	102,86	47,46	4,36	2,02	0,07
SBv_5	201,98	83,69	36,66	5,51	1,66	0,14
SBv_6	301,65	99,77	43,30	6,97	1,62	0,39
SBv_7	348,55	115,89	51,65	6,75	1,75	0,12
SBv_8	135,08	67,27	29,28	4,61	1,63	0,23
SBv_9	101,14	52,31	21,70	4,66	1,47	0,28
SBv_10	354,21	112,08	49,28	7,19	1,68	0,25
SBv_11	472,16	184,07	87,34	5,41	2,39	0,12

Les données du tableau 2 ci-dessus laissent supposer que la forme d'un bassin versant est liée à toutes ces variables. Mais pour pouvoir caractériser cette morphologie, nous avons introduit un autre paramètre : le rapport de la longueur du rectangle équivalent par sa largeur. La figure 2.a ci-après montre que le sous bassin SBv_11 est le plus allongé, suivi de SBv_4. Le moins allongée est le sous bassin SBv_9. Le rapport L/I du rectangle équivalent semble être corrélé avec l'indice K_G, comme indiquée sur la figure 2 en bas.

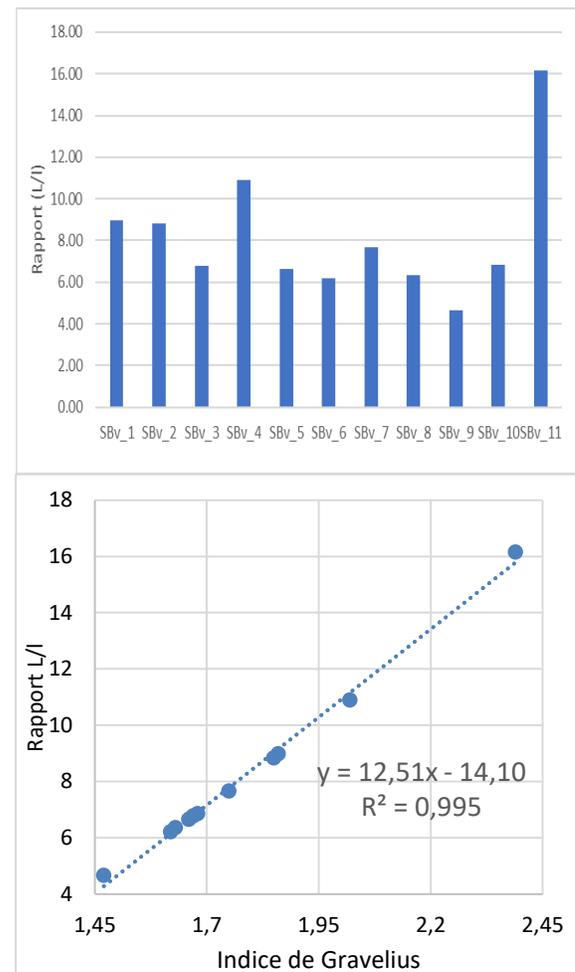


Figure 2. Rapport Longueur/largeur du rectangle équivalent

Hypsométrie et altitudes caractéristiques des sous bassins

L'hypsométrie des bassins nous donne une vue globale des altitudes en fonction des surfaces occupées. La figure ci-dessous donne la courbe hypsométrique du bassin versant de Nosivolo. Elle montre que les altitudes correspondant à 5%, 95% de la surface du bassin versant et son altitude médiane sont respectivement 1525 m, 350 m et 725 m. En plus, celles minimale, maximale et moyenne sont respectivement 50 m, 1900 m et 805 m.

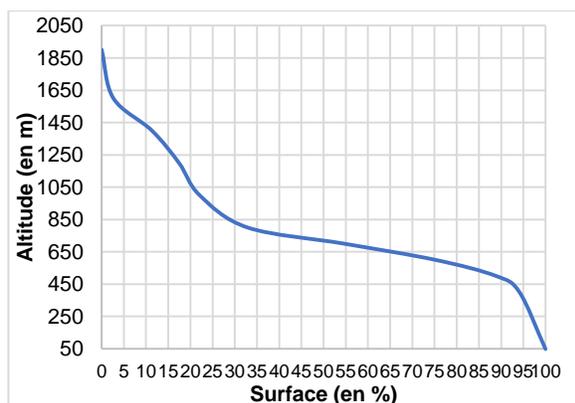


Figure 3 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Nosivolo

Par ailleurs, les altitudes caractéristiques des onze sous bassins versants sont données par la figure ci-dessous. Elle montre que les altitudes maximales varient de 1901m (SBv_2) à 880m (SBv_9), les altitudes minimales de 659m (SBv_2) à 48m (SBv_11) et celles moyennes de 1093.44m (SBv_1) à 607.98 (SBv_7). Mais l'altitude médiane la plus élevée est celle de SBv_3 (1025m) et la plus basse est celle de SBv_11 (425m).

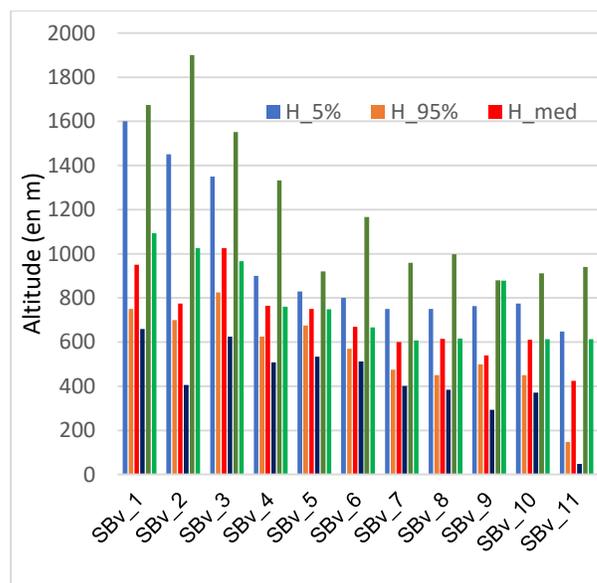


Figure 4. Altitudes caractéristiques des sous bassins versants

Pentes et hydrographie des sous bassins versants.

Le tableau 3 montre que le dénivelé spécifique a une valeur minimale (60,09m) pour SBv_5 et une valeur maximale (283,73m) pour SBv_1. Les indices de pentes montrent que les reliefs varient de faibles à assez forts : I_g varie de 0,04 pour SBv_5 à 0,014 pour SBv_3 et I_p varie de 1,75 pour SBv_11 à 3,16 pour SBv_9.

Tableau 3. Paramètres des pentes et des réseaux hydrographiques des sous bassins

Sous bassins	Ds (en m)	I_g	I_p (en %)	Dd	Rc
SBv_1	283,73	0,013	2,20	0.31	6.76
SBv_2	252,33	0,007	1,84	0.34	1.82
SBv_3	201,84	0,014	2,71	0.36	3.33
SBv_4	83,39	0,006	2,15	0.40	1.46
SBv_5	60,09	0,004	2,09	0.34	1.02
SBv_6	92,26	0,005	2,06	0.37	1.93
SBv_7	99,40	0,005	1,99	0.37	2.46
SBv_8	119,08	0,010	2,67	0.40	1.21
SBv_9	121,66	0,012	3,16	0.34	1.55
SBv_10	124,12	0,007	2,08	0.37	2.58
SBv_11	124,39	0,006	1,75	0.37	1.70

Le relief semble ainsi associé à des réseaux hydrographiques relativement denses. Quatre sous bassins (SBv_6, SBv_7, SBv_10 et SBv_11) ont les mêmes valeurs de la densité de drainage alors que leurs superficies sont respectivement 43,30km², 51,65km², 49,28km² et 87,34km². Les indices de pente ont également des valeurs similaires pour SBv_2 et SBv_10 ainsi que pour SBv_6 et SBv_7 ainsi que pour SBv_4 et SBv_11.

Analyse statistiques des caractéristiques physiques des sous bassins.

Le tableau 4 nous montre que peu de corrélation forte existe entre les variables. La surface (A), le périmètre (P), la longueur (L) du rectangle équivalent sont positivement corrélés entre eux. Il en est de même pour Rc avec K_H et D_s. Par ailleurs, H_{moy} est corrélé d'une part positivement avec D_s et d'autre part négativement avec D_d. Pourtant, les corrélations moyennes sont plus nombreuses. Plus la densité de drainage augmente, plus S, P, L, I, K_H, D_S, I_g et Rc diminuent.

Tableau 4. Matrice de corrélation entre les paramètres physiques et hydrographiques

	S	P	L	I	K _G	K _H	H _{moy}	D _s	I _g	I _p	D _d	Rc
S	1											
P	0,92	1										
L	0,90	0,96	1									
I	0,94	0,75	0,75	1								
K _G	0,31	0,64	0,68	0,04	1							
K _H	0,03	-0,01	-0,02	0,17	-0,24	1						
H _{moy}	0,40	0,27	0,25	0,40	-0,10	0,48	1					
D _s	0,59	0,52	0,52	0,58	0,10	0,57	0,82	1				
I _g	-0,17	-0,24	-0,25	-0,15	-0,27	0,48	0,63	0,63	1			
I _p	-0,55	-0,73	-0,73	-0,49	-0,64	0,14	0,23	-0,01	0,72	1		
D _d	-0,35	-0,28	-0,27	-0,42	0,12	-0,64	-0,72	-0,64	-0,35	-0,01	1	
Rc	0,09	0,15	0,15	0,17	0,05	0,78	0,58	0,74	0,56	-0,02	-0,61	1

en bleu : corrélation forte ; en vert : corrélation moyenne ; non coloré : corrélation faible

Discussion

Parmi les paramètres physiques du bassin versant, la superficie et le périmètre informent sur la taille du bassin versant. Les indices de formes et les dimensions du rectangle équivalent renseignent sur leur morphologie. Le développement du réseau hydrographique est interprété par la densité de drainage et le rapport de confluence.

L'indice de Gravelius permet d'avoir une idée sur la forme géométrique du bassin (Saidi et al., 2006). Ils varient de 1,47 à 2,39 pour les sous bassins versants de Nosivolo. Ils sont conformes aux valeurs trouvées par Mimouni et al. (2010) pour le bassin versant du Ksob, au Maroc qui est de l'ordre de 1,5. La comparaison des valeurs entre elles montre que le sous bassin SBv_11 (2,39) a l'air d'être le plus allongé et SBv_9 (1,47) en est le moins. Par ailleurs, le rapport longueur par la largeur du rectangle équivalent les confirme, il vaut 16,14 pour SBv_11 et 4,66 pour SBv_1. Pourtant, l'indice de Horton informe sur la morphologie allongée (si K_H>1) ou ramassée d'un bassin versant si inversement (Horton, 1932). Les valeurs sur le tableau 1 montrent que les sous bassins ont tous des formes allongées. Mais l'éloignement de ces valeurs par rapport à 1 entre deux sous bassins indique-t-elle que l'un est plus allongé que l'autre ? Par ailleurs, le tableau 3 montre que K_G et K_H sont négativement corrélés entre eux, avec une corrélation faible (r=-0,24). La morphologie indiquée par l'interprétation de l'indice K_G confirme celle trouvée par le rapport longueur et largeur du rectangle équivalent, mais pas toujours avec celle de l'indice K_H de Horton.

La comparaison morphologique de deux bassins allongés peut donc être faite avec ce paramètre.

Les valeurs de densité de drainage (tabl. 2) obtenues sont comprises entre 0.46 et 0.54 km/km². Elles montrent que les sous bassins versants de Nosivolo sont assez bien drainés. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par Hamed et Bouanani (2016) pour les neuf sous bassins versants de Tafna, en Algérie. L'indice de pente de globale (I_g) et celui de Roche (I_p) sont positivement corrélés entre eux, avec une valeur de corrélation forte de 0,72. Cette valeur reste inférieure à celle trouvée par Faye (2014) pour les vingt et quatre sous bassins versants du Fleuve Senegal. Pourtant, elle largement supérieure à celle trouvée par Hamed & Bouanani (2016), qui est une corrélation très faible de 0,087.

Les rapports de confluence varient de 1,02 à 6,76, valeurs qui encadrent celles trouvées par Hamed & Bouanani (2016). Pourtant, les densités de drainage varient de 0,31 km/km² à 0,40km/km². Ces valeurs sont largement inférieures à celles trouvées par Biswas (1999). En outre, ils sont négativement corrélés entre eux, avec une corrélation forte de l'ordre de -0,61, valeur largement plus forte que celle trouvée par Hamed & Bouanani (2016). Donc, au fur et à mesure que le réseau est dense, le rapport de confluence est faible.

Conclusion

Le bassin versant de Nosivolo est un grand bassin versant constitué par onze sous bassins versants. Quatorze paramètres physiques et hydrographiques des sous bassins ont pu être déterminés. Les superficies ont montré une valeur

minimale de 101km². Le plus grand sous bassins versant, SBv_2, atteint 1341 km². Les indices de forme montrent que les bassins ont tous des morphologies allongées. L'indice de Horton ne suffit pas pour comparer la morphologie entre deux bassins versant de forme allongée, l'introduction du rapport longueur /largeur du bassin donne une idée plus précise. Ce paramètre permet aussi donc de caractériser la morphologie d'un bassin.

Enfin, l'étude a permis d'une part de dégager ce paramètre indicateur de la morphologie d'un bassin versant et servira d'autre part comme base de données hydromorphologiques du bassin versant de Nosivolo pour analyses ultérieures.

Références bibliographiques

- Biswas, S., S. Sudhakar, V.R. Desai, (1999). Prioritization of sub watersheds based on morphometric analysis of drainage basin. A remote sensing and GIS approach. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, **27**(3): 155-166.
- Chaudhary, R.S., P.D. Sharma (1998). Erosion hazard assessment and treatment prioritisation of Giri river catchment, North Western Himalayas. *Indian J. Soil Conservation*, **26**(1) : 6-11.
- Faye, C., (2014). Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal. *Cinq Continents* **4** (10) : 80-108
- Hamed, K.B., A. Bouanani (2016). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna. (Nord-Ouest Algérien). *Géo-Eco-Trop.*, **40**(4) : 277-286.
- Horton, R.E. (1932). Drainage-basin characteristics, *Eos Trans. AGU*, **13** : 350-361.
- Mimouni, E.A., L. Daoudi, M.E.Saidi & A. Baidah (2010). Comportement hydrologique et dynamique d'un bassin versant en milieu semi-aride : exemple du bassin versant du Ksob (haut atlas occidental, Maroc). *Rev. C. & G.*, **24** (1-2) : 107-120.

- Nautiyal, M.D., (1994). Morphometric analysis of drainage basin using aerial photographs, a case study of Khairkuli basin, District Dehradun. II.P. *J. Indian Soc. Remote Sensing*, **22(4)**: 251-261.
- Ramahefasoa, B., H. Andrianandrasana, L.J. Rakotoniaina, (2010). *Fiche technique du site Ramsar Rivière Nosivolo et affluents' Madagascar*. 27 p.
- Raminosoa, N., L. Randrianantenaina, T. Ravelomanana, J. Ratsimbazafy, J. Durbin, H. Andrianandrasana, J. Velosoa, J.L. Rakotoniaina, (2004). *Résultats de recherche relative au développement d'un programme de conservation des poissons d'eau douce endémiques de la rivière Nosivolo-Marolambo*. Deuxième Phase. 90p.
- Saidi, M.El M., M'B. Agoussine & L. Daoudi (2006). Effet de la morphologie et de l'exposition sur les ressources en eau superficielle de part et d'autre du Haut Atlas (Maroc) ; exemple des bassins versants de l'Ourika et du Marghène. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, **28**: 41-49.
- Strahler, A.N., (1964) Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, section 4-II. In V.T Chow. Mc Graw-Hill (eds). *Handbook of applied Hydrology*, 4-39.
- Strahler, A.N., (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **63**: 1117-1142,