



UR UNIVERSITÉ
DE LA RÉUNION



**JOURNEES DE RECHERCHE DES IST ANTANANARIVO, ANTSIRANANA ET AMBOSITRA,
ET LEURS PARTENAIRES INTERNATIONAUX**

6ème Edition

**« Interdisciplinarité des recherches scientifiques au service du développement durable et d'une
société résiliente »**

**Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des
paramètres morphométriques : cas de la rivière Nosivolo,
Madagascar.**

**Kotoarinosy Joel Philemon Ramiandrivel^{1, 3}, Alain Mikael Andriamalala^{1, 3},
Ronald Harisson RANDIMBIARIVELO^{2, 3}, Jean Dominique Randriamialy^{2, 3} & Hery
Lisy Tiana Ranarijaona^{1, 3}**

¹Ecole Doctorale des Écosystèmes Naturels, Université de Mahajanga.

¹Ecole Doctorale Génie du Vivant et Modélisation, Université de Mahajanga.

³Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement. Université de Mahajanga.

Correspondant : dadafily@gmail.com

RESUME

L'écoulement des eaux dans un bassin versant est influencé par plusieurs paramètres dont la morphologie des sous bassins versants qui le constituent. Le bassin de Nosivolo englobe une zone humide Ramsar, exposé à la destruction des paramètres qui altère sa morphologie et ses comportement hydrologiques. Cet article a pour objectif l'analyse des relations entre les paramètres morphométriques et leur influence sur l'hydrologie du bassin versant de Nosivolo. Pour cela, nous avons déterminé les paramètres morphologiques et hydrographiques de chaque sous bassin, puis nous les avons soumis à une analyse statistique multivariée. Les résultats ont montré que plusieurs variables sont fortement corrélées entre eux dont les dimensions et le Tc des eaux. Les paramètres d'altitudes, de pentes et de confluence sont également corrélés. Des corrélations existent également entre Dd et Rc avec les autres paramètres de forme, ce qui prouve que le comportement hydrologique d'un bassin est lié à sa morphologie. En outre, cette analyse a permis l'individualisation de trois groupes de sous-bassins. La superficie, le périmètre, l'indice de Gravelius et la largeur sont les paramètres principaux de cette subdivision.

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

ABSTRACT

The flow of water in a watershed is influenced by several parameters including the morphology of the sub-watersheds that constitute it. The Nosivolo basin encompasses a Ramsar wetland, exposed to the destruction of parameters that alter its morphology and hydrological behavior. This article aims to analyze the relationships between morphometric parameters and their influence on the hydrology of the Nosivolo watershed. For this, we determined the morphological and hydrographic parameters of each sub-basin, then we submitted them to a multivariate statistical analysis. The results showed that several variables are strongly correlated with each other, including the dimensions and the Tc of the water. The elevation, slope and confluence parameters are also correlated. Correlations also exist between Dd and Rc with the other shape parameters, which proves that the hydrological behavior of a basin is linked to its morphology. In addition, this analysis allowed the individualization of three groups of sub-basins. Area, perimeter, Gravelius index and width are the main parameters of this subdivision.

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

I. INTRODUCTION

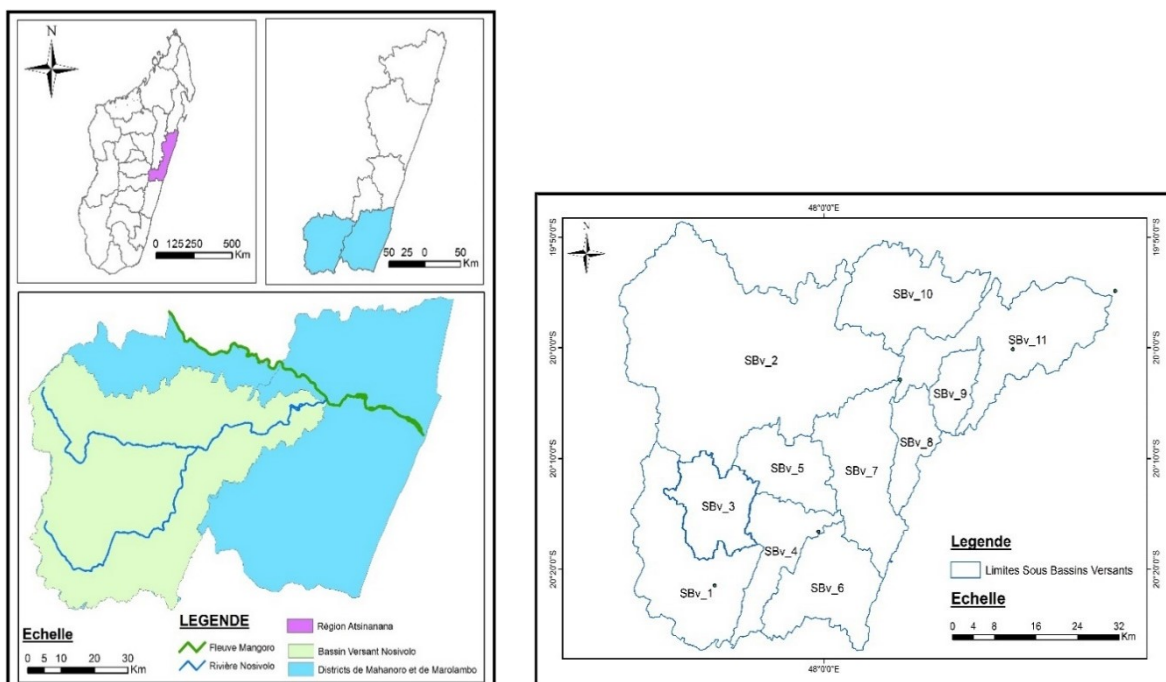
L'écoulement des eaux en milieu naturel dépend de beaucoup de facteur, principalement les précipitations (Faye, 2014) et les bassins versants. Le diagnostic physique, première étape de la connaissance des bassins versants, permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans son processus d'écoulement superficiel : facteurs lithologiques, climatiques, orographiques et morphologiques (Hamed, 2016). L'analyse de ces derniers constitue un des étapes clés de l'étude des hydrosystèmes (Veltri, 1996) dont l'intérêt hydrogéologique interagit avec celles liés à l'agriculture riveraine, principalement la conservation des espèces de poissons qui profitent de la rivière comme habitat.

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). Pourtant, elle se trouve actuellement très exploités, ce qui menace non seulement cette biodiversité unique au monde mais aussi l'agriculture riveraine associée. Cet article a pour objectif l'analyse de la corrélation entre des paramètres morphométriques et leur influence sur l'hydrologie du bassin versant de Nosivolo.

II. METHODOLOGIE

II.1- Milieu d'étude et délimitation des sous bassins versants

Le bassin de Nosivolo se localise au 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 sous le logiciel ArcGis 10.1.



II.2- Détermination des paramètres physiques des sous bassins

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 . 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). 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.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad ; \quad K_H = \frac{A}{L^2} \quad ; \quad L = \frac{K_G\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2} \right] \quad ; \quad l = \frac{K_G\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2} \right]$$

L'indice de pente de Roche, notée I_r , a été déterminée à l'aide de la formule ci-dessous : l'expression qui dépend de la longueur L du rectangle équivalent, du pourcentage a_i des portions de 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 : rapport de la somme des produits des aires A_i et les altitudes H_i entre deux courbes de niveau par 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.

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

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 $i+1$. La détermination de ces paramètres nécessite d'abord l'ordination du réseau hydrographique selon la méthode de Strahler (1952).

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

II.3- Méthode d'analyse statistique des données

L'analyse en composantes principales (ACP), une technique statistique largement utilisée (Eslamian et al., 2010) qui réduit le nombre de variables à celles qui sont les plus significatives parmi un ensemble de variables (Hamed, 2016), a été appliquée à 11 individus (sous-bassins versants) et 14 variables (paramètres physiographiques). Elle permet non seulement de trouver un lien entre les variables et les individus, mais aussi de les regrouper en régions homogènes.

III. RESULTATS

III.1- Paramètres physiographiques des sous bassins versants

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

Tableau 1. Paramètres géométriques 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

S et **P** : Surface et Périmètre des sous bassins ; **L** et **I** : longueur et largeur du rectangle équivalent de chaque sous bassin ; **K_G** et **K_H** : l'indice de Gravelius et celle de Horton pour chacun des sous bassins.

Le tableau montre que les sous bassins sont tous grands, avec une superficie toutes supérieures à 100 Km². Le périmètre du plus grand sous bassin est de 240,49 Km et les dimensions du rectangle équivalent montrent qu'ils sont tous significativement plus longs que larges. La morphologie plus ou moins allongée des sous bassins est confirmée par l'indice de Gravelius ; la valeur minimale observée est de 1,47 pour le sous bassin versant SBV_9. L'indice de Horton, dont les valeurs sont toutes inférieures à 1, montrent encore une fois qu'ils sont tous de forme allongée. La valeur minimale, qui est de 0,07, s'observe pour le sous bassin versant SBv_4.

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

Tableau 2. Paramètres orographiques et hydrographiques des sous bassins versants

Sous bassins	H_moy	Ds	Dd	Rc	Ig	Ip	Tc
SBv_1	1093,44	283,73	0,31	6,76	0,013	2,20	51.89
SBv_2	1025,99	252,33	0,34	1,82	0,007	1,84	89.74
SBv_3	966,38	201,84	0,36	3,33	0,014	2,71	34.03
SBv_4	759,73	83,39	0,40	1,46	0,006	2,15	38.61
SBv_5	748,43	60,09	0,34	1,02	0,004	2,09	39.34
SBv_6	666,94	92,26	0,37	1,93	0,005	2,06	42.66
SBv_7	607,98	99,40	0,37	2,46	0,005	1,99	50.63
SBv_8	615,36	119,08	0,40	1,21	0,010	2,67	29.14
SBv_9	877,84	121,66	0,34	1,55	0,012	3,16	23.21
SBv_10	612,89	124,12	0,37	2,58	0,007	2,08	49.06
SBv_11	612,89	124,39	0,37	1,70	0,006	1,75	63.20

H_moy et **DS** : altitude moyenne et dénivelée spécifique ; **Dd** : densité de drainage des cours d'eau ; **Rc** : rapport de confluence des cours d'eau ; **Ig** : Indice de pente global ; **Ip** : Indice de pente de Roche **Tc** : Temps de concentration des eaux dans le sous bassin.

La dénivelée spécifique montre une valeur minimale de 60,09m pour SBv_5 où l'indice de pente Ig est aussi minimale. Pourtant, l'indice de pente de Roche est minimal pour SBv_11 où Ds reste très grand et maximale pour SBv_9. Les densités de drainage sont comprises seulement entre 0,31 et 0,40. Le maximale de l'indice de pente Ig est observé pour SBv_3.

III.2- Analyses statistiques des données physiographiques des sous bassins versants.

L'analyse de la courbe des valeurs propres (Fig. 2), montre que les trois premiers facteurs représentent le maximum d'informations. Ils expriment déjà 96,44% de la variance totale, avec 45,96% pour le premier facteur, 18,4% pour le second et 16,7% pour le troisième.

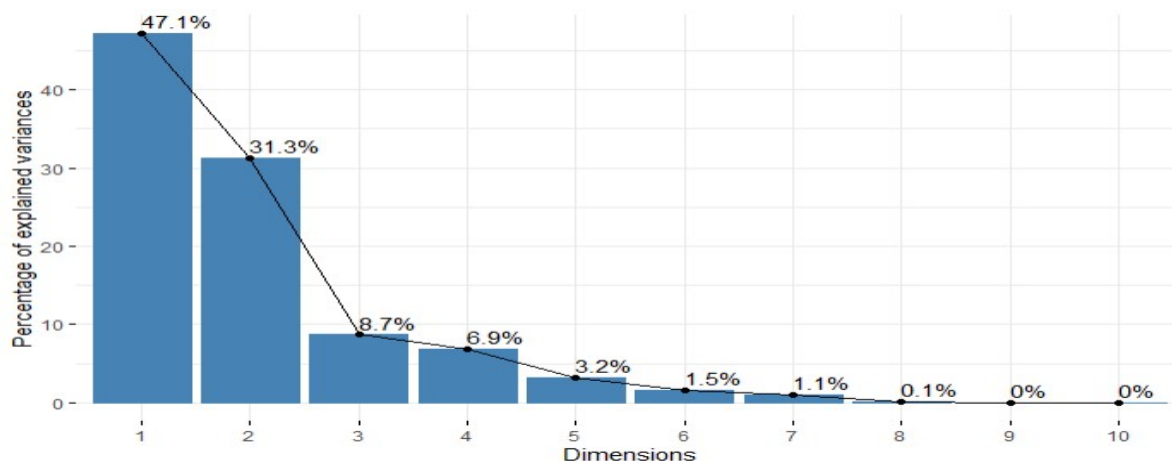


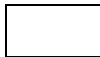


Figure 2. Diagramme des valeurs propres de la matrice de corrélation

L'analyse de la matrice de corrélations entre les variables (Tableau 3) montre que la surface (S) du bassin, le périmètre (P), la longueur (L) et la largeur (I) du rectangle équivalent ainsi que le temps de concentration de l'eau (Tc) sont fortement liés entre eux. Mais l'indice de compacité de Gravelius (K_G) présente une corrélation moyenne positive avec P, L, Tc et négative avec l'indice de pente I_p . Ce dernier présente des corrélations moyennes négatives avec S, P, L et K_G et positive avec I_g . Plus I_p augmente, plus le temps de concentration des eaux diminue fortement. Pourtant, l'indice de pente globale I_g ne présente aucune corrélation forte avec les autres paramètres, mais seulement une corrélation moyenne négative avec S, P, L, et K_G et positive avec le rapport de confluence R_c .

Tableau 3. Matrice de corrélation entre les paramètres physiques et hydrographiques

	S	P	L	I	K_G	K_H	H_moy	Ds	I_g	I_p	Dd	R_c	Tc
S	1												
P	0.92	1											
L	0.90	1.00	1										
I	0.94	0.79	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						
Ds	0.59	0.53	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			
Dd	-0.35	-0.28	-0.27	-0.42	0.12	-0.64	-0.72	-0.64	-0.35	-0.01	1		
R_c	0.09	0.15	0.15	0.17	0.05	0.78	0.58	0.74	0.56	-0.02	-0.61	1	
Tc	0.95	0.98	0.97	0.86	0.53	-0.02	0.23	0.49	-0.33	-0.77	-0.30	0.12	1

 Corrélation forte
  Corrélation moyenne
  Corrélation faible

Les axes 1,2 et 3 ainsi retenus mettent en évidence leurs relations avec les paramètres étudiés. Le tableau 4 montre que l'axe 1 est très bien corrélé positivement à la superficie SUP (0,93), au périmètre (0,96), à la longueur (0,95) et la largeur (0,86) du rectangle équivalent, avec le temps de concentration Tc (0,95). La corrélation de cet axe est moyenne et négative avec l'indice de pente (-0,64) et positive avec la dénivelée spécifique (0,70).

Tableau 4. Vecteurs de la matrice de corrélation des paramètres des sous bassins

	S	P	L	I	K_G	K_H	H	Ds	I_g	I_p	Dd	R_c	Tc
Facteur1	0.93	0.96	0.95	0.86	0.48	0.22	0.48	0.70	-0.08	-0.64	-0.50	0.37	0.95
Facteur 2	-0.12	-0.25	-0.27	0.00	-0.46	0.76	0.74	0.65	0.87	0.60	-0.64	0.73	-0.28
Facteur 3	-0.31	0.04	0.09	-0.46	0.68	0.20	-0.14	0.04	0.08	-0.26	0.07	0.46	-0.07

L'axe II présente une très bonne corrélation positive l'indice de Horton (0,76) et l'indice de pente globale (0,87). Sa corrélation positive avec l'altitude moyenne et le rapport de confluence, ainsi que négative avec la densité de drainage reste moyenne. Il en est de même pour l'axe III qui n'a de corrélation acceptable positive qu'avec l'indice de compacité de Gravelius (0,68), sa corrélation positive comme négative avec les autres variables étant faible.

III.3- Caractéristiques des paramètres et des sous bassins en fonction des axes

Le plan factoriel F_1 et F_2 , qui explique 78,4% de l'inertie des variables, est le mieux représentatif des résultats. L'axe 1 est déterminé par les paramètres de dimension tels que la superficie, le périmètre et les longueurs et largeurs du rectangle équivalent ainsi que le paramètre hydrologique qui est le temps de concentration des eaux, qui sont opposé aux indices de pente et à la densité de drainage du bassin. L'axe 2 est déterminée positivement par les paramètres orographiques, le rapport de confluence ainsi que l'indice de pente du bassin versant. Les paramètres morphométriques sont tous affiliés à cet axe : l'indice de Horton positivement et celle de Gravelius négativement.

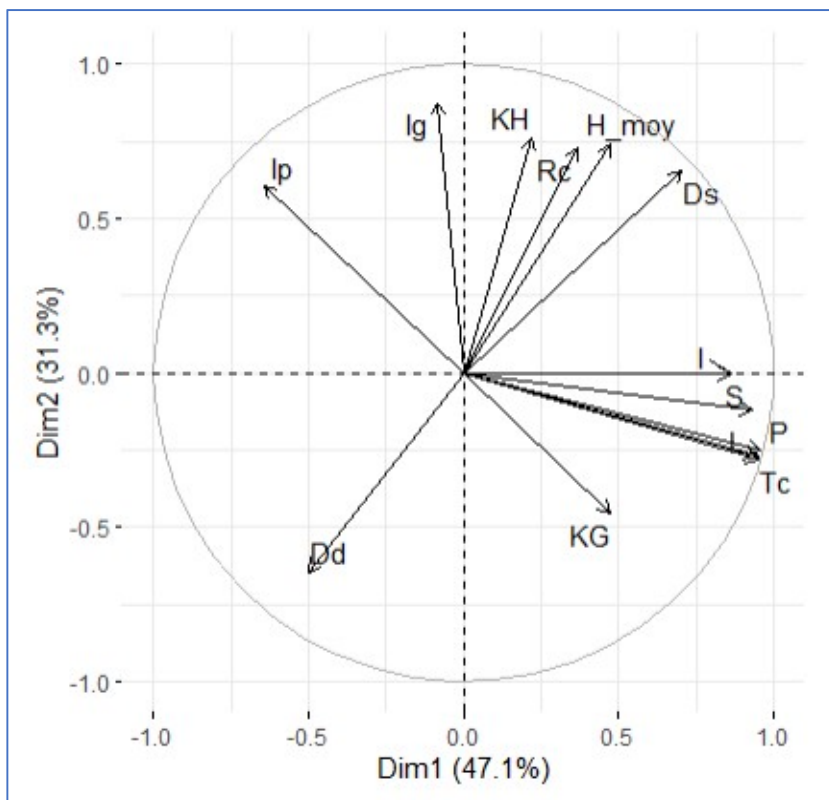


Figure 3. Projection des variables sur les deux axes factoriels F_1 et F_2

La figure confirme que les paramètres de dimensions des sous bassins sont corrélés positivement entre eux en plus du temps de concentration des eaux. L'indice de pente global est corrélé à la fois avec l'indice de pente de Roche mais aussi plusieurs variables telles que le rapport de confluence et la dénivelée spécifique

Le plan factoriel I et II met en évidence un groupe de deux groupes de sous bassins versants. Le premier groupe composé de 8 sous bassins versants (SBv_3 à SBv_10). Il s'agit des sous bassins ayant une faible dimension et donc un court temps de concentration des eaux mais une densité de drainage et indice de pente plus élevée. Le deuxième groupe inclut les deux sous bassins versants SBv_1 et SBv_2. Il s'agit d'un groupe de grand sous bassin versant ayant un fort rapport de confluence et donc une faible densité de drainage. La figure ci-dessous nous donne un aperçu comparatif des projections des sous bassins versants sur F₁ et F₂.

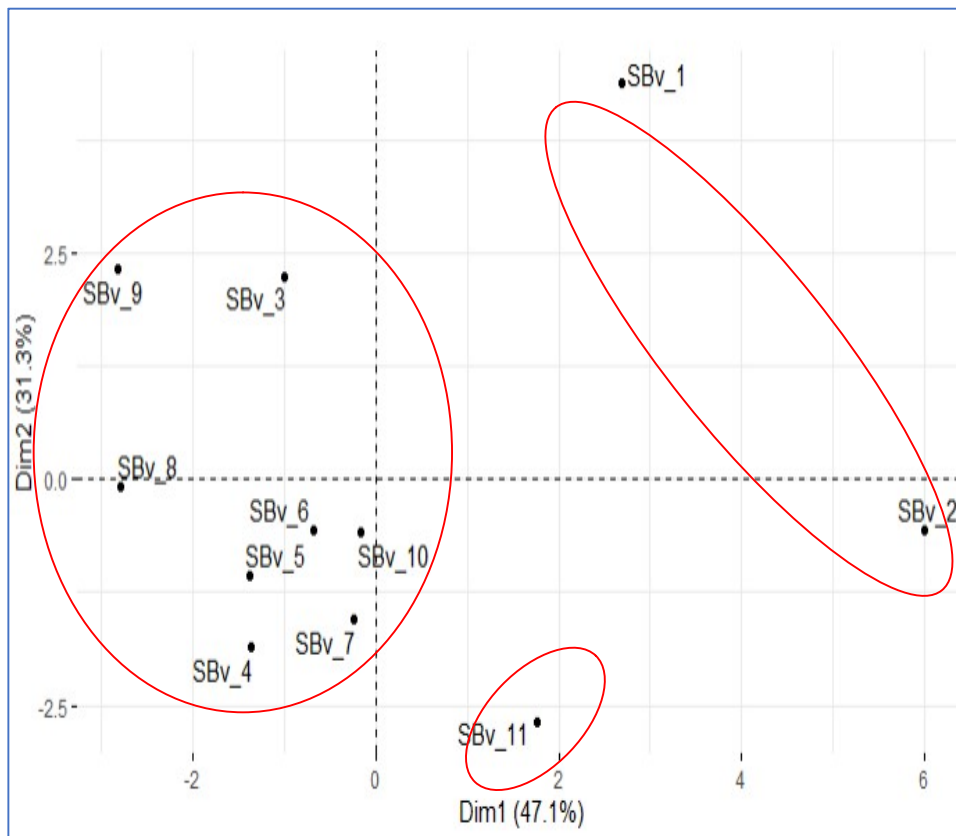


Figure 4. Projection des individus sur les trois axes F1 et F2

La figure montre également que le groupe I se subdivise en deux sous-groupes : le premier sous-groupe constitue les sous bassin de ce groupe ayant une forte densité de drainage et le second ceux ayant un fort indice de pente.

IV. DISCUSSION

Treize paramètres physiques et hydrographiques du bassin versant de Nosivolo ont été pu être déterminés. L'indice de Gravelius varie de 1,47 à 2,39 pour les sous bassins versants de Nosivolo. Il permet d'avoir une idée sur la forme géométrique du bassin (Saidi, 1995). Ces valeurs permettent d'affirmer que les sous bassins ont une forme plus ou moins allongée. Elles sont conformes à celles trouvées par Mimouni et al. (2010) pour le bassin versant du Ksob, au Maroc qui est de l'ordre de 1,5. L'indice de pente de globale (I_g) et celui de Roche (I_p) sont positivement corrélés, 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 Sénégal, qui est une corrélation très forte de l'ordre de 0,964. Pourtant, elle largement supérieure à celle trouvée par Hamed et Bouanani (2016), qui est une corrélation très faible de 0,087 pour les neuf sous bassins versants de Tafna, en Algérie.

L'analyse multivariés des paramètres physiques des sous bassins montre que beaucoup des paramètres sont corrélés entre eux : les paramètres de dimensions en sont les plus marqués, c'est conforme aux valeurs obtenues par Faye (2014) ainsi que Hamed et Bouanani (2016). La densité de drainage est un élément essentiel pour apprécier l'écoulement dans le bassin Faye (2014). D'ailleurs, Pratte (2008) indique une forte corrélation qui existe entre la densité de drainage relative et le ruissellement de surface. Pour Nosivolo, ce paramètre est moyennement corrélé avec KH, H_moy et Ds. Plus l'altitude et le dénivelé augmente, plus la densité de drainage est faible.

La superficie du bassin a aussi influencé sa capacité de ruissellement, puisque plus un bassin est large, moins sa capacité de ruissellement de surface est élevée (Reddy et al., 2004). La combinaison du facteur de forme (K_G) et de la fréquence des affluents ont permis l'estimation du ruissellement dans le bassin. Quant à la longueur du bassin dont la relation avec l'infiltration est en fonction de la pente du bassin (Delahaye et al., 2007), elle participe à la détermination du débit écoulé dans le bassin, d'où sa bonne corrélation.

V. CONCLUSION

Le bassin versant de Nosivolo est un grand bassin versant constitué par onze sous bassins versants. Treize paramètres physiques et hydrographiques des sous bassins ont pu être déterminés. Les superficies ont montré une valeur minimale de 101,14km². Le plus grand sous bassins versant, SBv_2, atteint 1341,15 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. Les indices de formes de Horton et de Gravelius montrent la morphologie du bassin mais la comparaison de deux bassins allongés peut être faite avec le paramètre L/l du rectangle équivalent.

Pour les 13 sous bassins étudiés, la force des liaisons qui existent entre les variables explicatives a été définie par une matrice de corrélations simples entre les variables morphométriques. Sont retenues comme variables explicatives du regroupement : la taille du bassin, l'indice de pente (Ip) et la densité de drainage (Dd). La construction du regroupement des sous bassins a permis la définition des affinités et des différences entre les groupes. En effet, l'examen des caractéristiques physiques de ces bassins versants a montré que ce sont surtout les caractéristiques de forme (Superficie, Périmètre, Indice de compacité de Gravelius, Longueur, Largeur) qui ont régi le classement statistique des différents sous bassins versants en groupes distincts. Ainsi, les bassins versants qui ont des dimensions plus grandes se démarquent toujours des autres.

Enfin, la connaissance de ces corrélations et groupement permet de mieux gérer ce bassin pour que la population riveraine puisse en bénéficier pour l'agriculture, l'élevage riverain. Elle diminuera aussi le risque de disparition des espèces, une fois qu'un programme de restauration écologique ultérieur serait mis en place.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Delahaye D, Douvinet J, Langlois P. (2007). De la morphométrie à un champ de mesure de l'efficacité structurelle d'un bassin versant. Actes du colloque international de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO'2007, Clermont-Ferrand, CD-ROM, 16 p.
- 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., 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). *Géo-Eco-Trop.*, 40, 4 : 277-286.
- Horton R. E. (1932). Drainage-basin characteristics, *Eos Trans. AGU*, 13, 350-361.
- Mimouni E. A., Daoudi L., Saidi M. E. & Baiddah A. (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.
- Pratte A. (2008). Analyse des variables hydrologiques et morphométriques. <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/25162/ch02.html>.
- Ramahefasoa B., Andrianandrasana H., Rakotoniaina L. J. (2010). Fiche technique du site Ramsar 'Rivière Nosivolo et affluents' Madagascar. 27 p.
- Raminosoa N., Randrianantenaina L., Ravelomanana T., Ratsimbazafy J., Durbin J., Andrianandrasana H., Velosoa J., Rakotoniaina J. L. (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.
- Reddy G. P. O., Maji A. K., Gajbhiye K.S. (2004). Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India - a remote sensing and GIS approach: *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6: 1-16.
- Saidi, ME., Daoudi, L, Aresmouk, H. & Blali, A. (2003). Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard : exemple de la crue du 17 Aout 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). *Rev. Sécheresse*, Paris, 14 (2), 1-8.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 63: 1117-1142,
- Veltri M., Veltri P., Maiolo M. (1996). On the fractal dimension of natural channel network. *Journal of Hydrology*, 187: 137-144.