

Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie. (bassin continental Guineo-Sénégalais).

FAYE Cheikh

Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, UASZ, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor (Sénégal). cheikh.faye@univ-zig.sn

Résumé

L'abondance ou la pénurie des ressources en eau superficielle, à certains moments, dans un bassin versant, sont étroitement liées à des caractéristiques comme sa superficie, sa morphologie, les conditions climatiques dont il bénéficie (ETP, pluie), l'importance des aquifères. Le bassin versant du fleuve Gambie est un hydrosystème du domaine tropical humide dans sa partie sud et sec dans sa partie nord dont les altitudes varient de 44 m (au niveau de l'exutoire de la Sandougou) à 1150 m (Nord du Fouta Djallon). Cet article a pour objectif l'analyse de la corrélation entre des paramètres morphométriques et leur influence sur l'hydrologie du bassin versant de la Gambie. La méthodologie a consisté à un traitement des paramètres morphométriques pour les différents sous-bassins de la Gambie par une analyse en composantes principales, afin de déterminer les affinités entre ces sous bassins et déduire les paramètres les plus caractéristiques. Cette analyse a permis de mettre en évidence l'interrelation entre les différents paramètres physiographiques et l'individualisation de trois groupes de sous-bassins. Le premier composé de la Gambie (à Dimma, à Sandougou, à Kédougou et à Gouloumbou) et de la Koulountouont une superficie largement supérieure à celle des autres bassins. Le second groupe est formé par les sous bassins de Thiokoye, Diaguéry, Diarha et Sili : bassins de rive gauche. Le dernier regroupe les sous bassins de Niokolo-Koba, Niaoulé Niéri-Ko et Sandougou qui font partie de la moyenne Gambie et de rive droite. Les résultats de l'ACP désignent la superficie, le périmètre, le coefficient de compacité de Gravelius et la largeur comme paramètres principaux de cette subdivision.

Mots-clés : physiographie, morphométrie, analyse en composante principale, corrélation, bassin versant de la Gambie

Abstract

Abundance or scarcity of surface water resources at times in a watershed is closely related to features such as area, morphology, climatic conditions (FTE, rain), aquifers. The Gambia River basin is a hydrosystem of humid tropical area in its southern part and dry in its northern part whose altitudes vary from 44 m (at the outlet of Sandougou) to 1150 m (North of Fouta Djallon). This article aims to analyze correlation between morphometric parameters and their influence on the Gambia River basin hydrology. Methodology consisted of a morphometric parameter treatment for the different sub-basins of Gambia River basin by a principal components analysis, in order to determine affinities between these sub-basins and to deduce most characteristic parameters. This analysis made it possible to highlight interrelation between different physiographic parameters and individualization of three groups of sub-basins. The first compound of the Gambia (in Dimma, Sandougou, Kedougou and

Gouloumbou) and Koulountou have a much larger area than other basins. The second group is formed by the sub-basins of Thiokoye, Diaguéry, Diarha and Sili: basins on the left bank. The last one groups the sub-basins of Niokolo-Koba, Niaoulé Niéri-Ko and Sandougou which are part of the average Gambia and right bank. The PCA results refer to Gravelius area, perimeter, compactness coefficient and width as the main parameters of this subdivision.

Keywords: physiography, morphometry, principal component analysis, correlation, Gambia River basin

ملخص

ترتبط وفرة أو ندرة موارد المياه السطحية في الحوض النهري، في بعض الأحيان، ارتباطا وثيقا بخصائصه كالمساحة ، والشكل ، والظروف المناخية التي تميز المنطقة وأهمية الفرشة المائية به. يعبر الحوض النهري لنهر غامبيا على نظام هيدرولوجي استوائي رطب في الجزء الجنوبي منه وجاف في الجزء الشمالي، حيث تتراوح الارتفاعات بين 44 مترا (عند مصب ساندوغو Sandougou) و 1150 متر (شمال فوتا دجالون Foulta Djallon). يهدف هذا المقال لتحليل الترابطات بين الخصائص المورفومترية وتأثيرها على هيدرولوجيا الحوض النهري لنهر غامبيا. وقد تم تبني منهجية تعتمد على معالجة المعطيات المورفومترية للأحواض النهرية الصغرى عن طريق تحليل المكون الرئيسي لتحديد الصلات بين هذه الأحواض الفرعية واستنتاج مميزات الحوض النهري.

مكننا هذا التحليل من الوقوف على العاقات البيئية بين مختلف الخصائص الطبيعية وتحديد ثلاث مجموعات من الأحواض الصغرى : المجموعة الأولى في غامبيا (في ديمما Dimma وفي ساندوغو Sandougou وفي كيدوغو Kédougou وفي غولومبو Gouloumbou) وكولونتون Koulountou حيث المساحة أكبر بكثير من مساحة باقي الأحواض. وتتشكل المجموعة الثانية من الأحواض الصغرى (لتيوكوي Thiokoye دياغيري Diaguéry وديارها Diarha وسيلي Sili) التي تمثل أحواض الضفة اليسرى. في حين تشمل المجموعة الثالثة الأحواض الفرعية لكل من نيوكولو-كوبا Niokolo-Koba ونياولي نييريكو Niaoulé Nieri-Ko- وساندوغو Sandougou التي هي جزء من نهر غامبيا الأوسط والضفة اليمنى.

مكننا دراسة وتحليل خصائص الحوض النهري من تحديد كل من المساحة والمحيط ومعامل التراص Gravelius والعرض، وهي المؤشرات الرئيسية التي اعتمدنا عليها في التقسيم الذي قمنا به.

الكلمات الفاتيح : المعطيات الطبيعية، الشكل، تحليل المركبات الرئيسية، الترابطات، الحوض النهري غامبيا.

Introduction

L'écoulement des eaux en milieu tropical dépend très largement des précipitations et de l'action de filtres qui modulent le signal d'entrée de tout hydrosystème. Parmi ces filtres, des hydrologues (Dione, 1996 ; Sow, 2007 ; Faye, 2013) ont identifié depuis bien longtemps les aquifères souterrains (et accessoirement les formations superficielles), mais aussi les formes, les configurations morphologiques tant des surfaces drainées que du réseau drainant, lui-même. A cela s'ajoutent évidemment l'évapotranspiration potentielle ou réelle, les prélèvements anthropiques (irrigation, AEP), mais aussi les changements de zones climatiques des fleuves (d'une aire relativement humide à une zone relativement sèche).

Pour évaluer la façon dont un sous bassin réagit par rapport à l'écoulement et sa contribution à l'hydrologie du bassin, les paramètres morphologiques sont privilégiés du fait que le relief est sans doute le facteur qui traduit le mieux la partition du bassin entre le cours supérieur aux hautes terres, le cours moyen au relief moyen (altitudes moyennes) et le cours inférieur aux régions de plaines (faibles altitudes) (Faye, 2014). L'analyse morphométrique est une démarche importante pour la hiérarchisation des bassins versants même sans tenir compte de la carte des sols (Biswas et al., 1999). Pour ce faire, on peut recourir à un ensemble de paramètres quantitatifs importants dans la compréhension du dynamisme d'une rivière: superficie, périmètre, longueur, largeur, indice de compacité de Gravelius, indice de pente, pente moyenne du cours d'eau, altitude maximale, altitude minimale (Veltriet al., 1996).

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

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

Le présent article basé sur une ACP est une analyse statistique des caractéristiques morphométriques générales du bassin, un des facteurs stables de l'écoulement et donc de l'état actuel de l'environnement physique du bassin et leurs impacts sur l'écoulement. Il s'agit ici d'analyser les corrélations entre les variables et d'identifier des sous bassins qui se différencient fortement des autres. L'objectif est d'arriver à regrouper des sous bassins semblables physiquement, utile pour toute éventuelle extrapolation de données hydrométéorologiques. Pour ce faire, trois points sont soulevés : les ressemblances entre sous bassins, les liaisons entre paramètres et les relations entre ces paramètres et l'écoulement.

1. Zone d'étude

Le fleuve Gambie prend sa source à environ 1 150 m d'altitude dans le Fouta Djallon, près de Labé (Guinée). Le bassin de la Gambie couvre une superficie de près de 77 100 km, partagés entre 3 Etats (Lamagat, 1989) : la Guinée (où il prend sa source) ; le Sénégal (dont il draine presque toute la région Tambacounda et une partie de Kédougou, de la Haute-Casamance et du Sine-Saloum méridional) ; la Gambie (dont il est l'épine dorsale). 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). Née sous le nom de Dimma à 1150 km de la mer, au Nord-est de Labé, la Gambie reçoit d'abord le Silamé à gauche, puis l'Oundou à droite et ensuite le Litti à gauche. Après la traversée de la frontière entre le Sénégal et la Guinée Conakry, la Gambie constituée, reçoit successivement sept principaux affluents de la source à Gouloumbou : d'abord le Diaguéri à droite, suivi de deux affluents à gauche : le Thiokoye et ensuite le Diarha. La Gambie reçoit, après sur sa droite le Niokolo-Koba et le Niéri-Ko et sur la gauche la Koulountou, et enfin sur la droite, deux autres affluents avant la station de Gouloumbou : le Nioulé et le Sandougou (Figure 1). Le cours d'eau est constitué de deux biefs : un bief continental et un bief maritime (Dione, 1996 ; Sow, 2007).

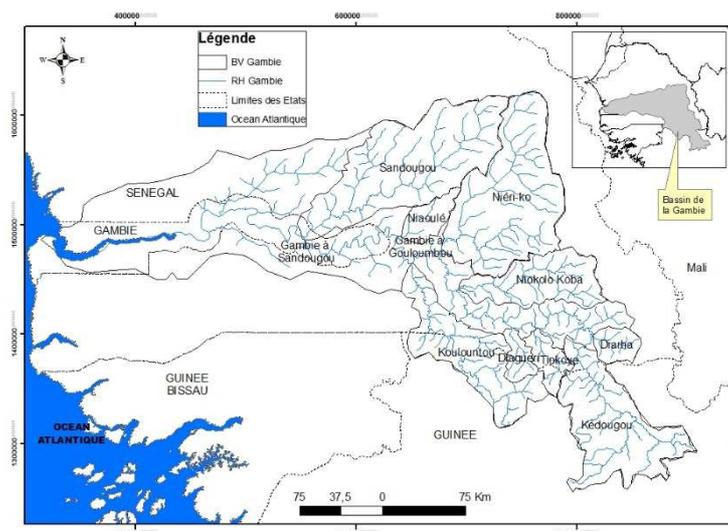


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Gambie

Le bassin de la Gambie est soumis au climat tropical avec une longue saison sèche (de novembre à mai) et une courte saison des pluies (de juin à octobre). Les totaux pluviométriques permettent de classer l'essentiel du bassin de la Gambie dans la zone soudano-guinéenne.

2. Données et méthodes

2.1. Données morphométriques du bassin

La détermination des caractéristiques physiographiques, est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant (lame d'eau précipitée, débit d'un cours d'eau, bilan. etc. (Bauling, 1959). Son utilisation a pour but la quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique des sous bassins versants de la Gambie. L'organisation du paysage, esquissée ci-dessous, détermine dans une large mesure, la

configuration des différents bassins versants. Le Tableau 1 regroupe l'ensemble des caractéristiques de forme des unités hydrologiques des différents sous bassins du fleuve Gambie.

Gambie et sous-bassins	Surface en km ²	Périmètre en km	K _G	Rectangle équivalent	
				Longueur en km	Largeur en km
Gambie à Sandougou	46110	782,5	1,124	233,66	197,33
Gambie à Gouloumbou	42000	1285	1,756	568,8	73,84
Gambie à Kédougou	7525	490	1,58	208	36
Gambie à Dimma	6940	430	1,636	175,4	39,57
Diaguéry confluent	1010	129	1,137	37,82	26,7
Thiokoye confluent	1264	160	1,433	65	15
Diarha confluent	846	129	1,242	46,19	18,31
Niokolo-Koba confluent	4732	347	1,412	139,5	33,92
Niéri-Ko confluent	11757	500	1,291	187,1	62,81
Koulountou confluent	6421	523	1,828	234,2	27,43
Niaoulé confluent	1356	165	1,254	59,78	22,69
Sili au pont routier	90	41	1,21	10	6,46
Siliconfluent	214	65	1,24	15	7,06
Sandougou confluent	11668	500	1,296	187,9	62,1

Tableau 1 : Caractéristiques de forme des unités hydrologiques du bassin de la Gambie (Source : Sow, 2007). K_G : le coefficient de compacité de Gavelius ; km : kilomètre ; km² : kilomètre carré

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les caractéristiques morphométriques suivants (Biswas et al., 1999; Sow, 2007) :

- La surface du bassin versant (en km²) : c'est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Elle est donc définie comme la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section.
- Le périmètre (km) : il représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas directement l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant.
- L'indice de compacité de Gravelius (K_G) : l'indice de compacité renseigne sur la forme du bassin versant qui a une influence sur le débit de crue et donc sur l'allure de l'hydrogramme, résultant d'une pluie donnée.
- Le rectangle équivalent : encore appelé rectangle de Gravelius, il correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique.

Les sous bassins de la Gambie présentent, dans l'ensemble une forme moyennement allongée, favorisant une érosion régressive et un plus long temps de concentration des eaux de ruissellement. Mais l'influence du relief est encore plus déterminante. Les valeurs de l'indice de compacité (Tableau 1) montrent que les bassins de la Gambie à Sandougou, du Diaguéry du Sili, de la Sandougou, du Niéri-Ko, du Niaoulé et du Diarha sont les plus compacts et ramassés (K_G< 1.3), alors que le bassin relativement le plus allongé correspond à celui de la Gambie à Gouloumbou, de la Koulountou, et de la Gambie à Dimma (K_G> 1,6) (Sow, 2007).

Outre ces données extrêmes, toutes les autres valeurs ne sont pas très éloignées, les formes des bassins correspondants étant donc plus ou moins semblables (bassins du Thiokoye, du Niokolo-Koba et de la Gambie à Kédougou).

L'écoulement peut être apprécié par la densité de drainage dont les valeurs restent faibles dans le bassin de la Gambie. A la station de Gouloumbou, la Gambie a une densité de drainage de 0,016 km/km² et les densités les plus fortes sont notées du côté du Diarha (0,078 km/km²). Pour les caractéristiques de l'altitude des sous bassins, les altitudes élevées d'un bassin versant, en accélérant la vitesse de l'eau dans les drains et en modifiant les profils en long du cours d'eau, confèrent au bassin un écoulement torrentiel. Dans le bassin de la Gambie, plus de la moitié de la superficie (53.2 %) est située entre 0 et 100 m ; 25.4% entre 100 et 200 m ; seuls 21.4% se trouvent au-dessus de 200 m (Figure 2), (Chaperon et Guiguen, 1974).

Gambie et sous-bassins	Longueur du cours d'eau en km	Densité de Drainage en km/km ²	Altitude maximale à la source en m	Altitude minimale à la confluence en m	Dénivelée en m
Gambie à Sandougou	-	-	-	-	-
Gambie à Gouloumbou	658	0,016	1125	0	1125
Gambie à Kédougou	243	0,032	1125	105	1020
Gambie à Dimma	205	0,04	1400	200	1200
Diaguéry confluent	50	0,050	449	120	329
Thiokoye confluent	95	0,032	600	55	545
Diarha confluent	66	0,078	300	44	256
Niokolo-Koba confluent	203	0,043	300	11	289
Niéri-Ko confluent	237	0,020	110	7	103
Koulountou confluent	245	0,054	800	1	799
Niaoulé confluent	-	0,41	65	10	55
Sili au pont routier	-	-	-	-	-
Siliconfluent	-	-	-	-	-
Sandougou confluent	200	0,017	75	0	75

Tableau 2 : Longueur eu cours d'eau, densité de drainage et altitudes caractéristiques du bassin de la Gambie (Source : Sow, 2007)

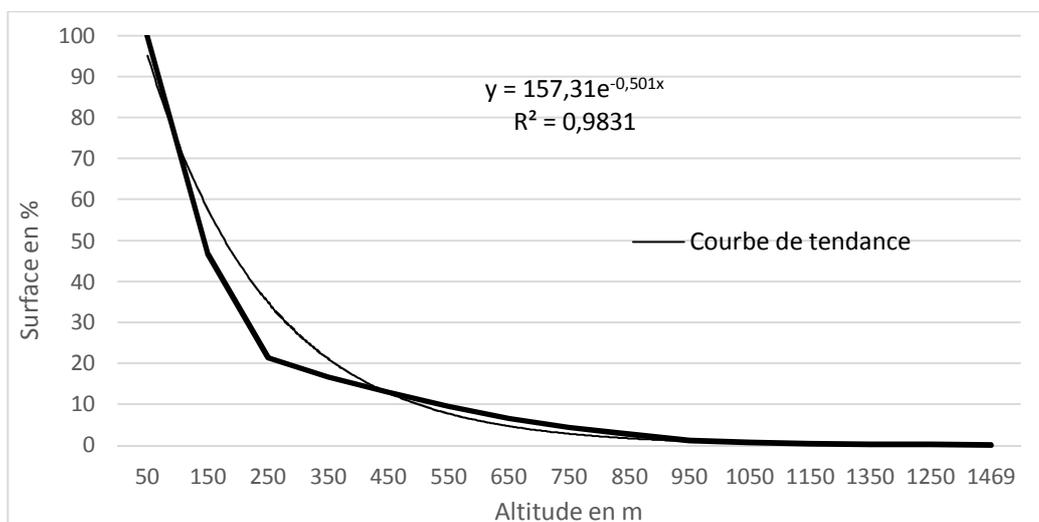


Figure 2: Hypsométrie du bassin de la Gambie à Gouloumbou (Source : Chaperon et Guiguen, 1974)

Ainsi les principales caractéristiques morphométriques et géomorphologiques ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physio-géographiques d'un bassin versant joueront sur la réponse hydrologique, et surtout en périodes de crue.

La pente moyenne (en m/km ou en 0/00) : elle renseigne sur la topographie du bassin et reste une caractéristique importante des bassins versants. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle, dans la partie amont du bassin, qui sont à l'origine des crues dévastatrices sur la partie aval quand la partie amont est fortement boisée).

L'indice de Pente de Roche (0/00) : il traduit la forme générale de la déclivité de son bassin. L'indice global de pente est calculé après construction de la courbe hypsométrique du bassin qui donne le pourcentage de la superficie du bassin versant situé au-dessus d'une altitude donnée en fonction de cette même altitude. Puisque dans un bassin, la pente diminue de l'amont vers l'aval, l'indice I_g diminue lorsque la surface augmente.

Le relief, par le système de pentes, influe sur l'écoulement et sur la forme des bassins dont l'aptitude, à rassembler plus moins rapidement les eaux, est traduite par la compacité. Les valeurs du Tableau 3 traduisent un adoucissement des pentes d'amont en aval. Cet adoucissement est consécutif au changement de la topographie du bassin (Sow, 2007). L'importance du temps de concentration traduit l'allongement du bassin de la Gambie.

Gambie et sous-bassins	Indice de pente en m/km		Dénivelée spécifique en m	Classification du relief	Temps de concentration (Ventura) en h
	I_p	I_g			
Gambie à Sandougou	0,025	-	-	-	58
Gambie à Gouloumbou	0,035	1,71	350	Relief fort	44
Gambie à Kédougou		4,21	365	Relief fort	30
Gambie à Dimma	0,057	-	-	-	31
Diaguéry confluent	0,047	6,58	209	Relief assez fort	21
Thiokoye confluent	0,124	5,74	204	Relief assez fort	20
Diarha confluent	0,081	3,88	113	Relief assez fort	20
Niokolo-Koba confluent	0,044	1,52	105	Relief assez fort	28
Niéri-Ko confluent	0,023	0,47	51	Relief modéré	37
Koulountou confluent	0,047	2,4	192	Relief assez fort	27
Niaoulé confluent	0,004	0,5	18	Relief faible	22
Sili au pont routier	0,076	-	-	-	11
Siliconfluent	-	-	-	-	14
Sandougou confluent	0,02	0,29	31	Relief assez faible	37

Tableau 3 : Indices de pente, dénivelée spécifique et temps de concentration des eaux du bassin de la Gambie (Source : Sow, 2007)

2.2. Méthodes

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique statistique largement utilisée (Pulido-bosch et al., 1999 ; Helena et al., 1999 ; Tidjani et al., 2006 ; Eslamianet al., 2010 ; Faye, 2014 ; Baba-Hamed et Bouanan, 2016). Elle réduit le nombre de variables à celles qui sont les plus significatives parmi un ensemble de variables et est utilisée afin de trouver un

lien entre les variables et les individus afin de les regrouper en régions homogènes. L'un des objectifs de l'ACP est d'obtenir des informations utiles à partir d'une matrice de données, et de fournir une représentation graphique des données pour faciliter l'analyse. La procédure mathématique de l'analyse en composantes principales est en fait une méthode statistique multivariable qui sert de traitement des données.

Nous avons soumis tous les paramètres morphométriques pour les différents sous-bassins de la Gambie à une analyse en composantes principales, afin de déterminer les affinités entre ces sous bassins et déduire les paramètres les plus caractéristiques. Pour ce faire, une matrice de corrélation a été utilisée et les composantes ont été déterminées selon le type de rotation des axes orthogonaux. Le premier axe factoriel (F1) de cette représentation est tel qu'il détermine le maximum d'inertie du nuage et donc de la variance. Le deuxième axe (F2) perpendiculaire au premier exprime le maximum de variance restante. Le troisième axe, toujours perpendiculaire aux deux autres, est défini par le maximum d'inertie restante ; etc.

L'analyse en composante principale ou ACP, est une méthode de réduction du nombre de variables permettant la représentation géométrique des observations et des variables. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls (Bouroche et Saporta, 1980). La méthode a été appliquée à 14 individus (sous-bassins versants) et 15 variables (paramètres physiographiques) qui sont : la superficie (S), le périmètre (P), l'indice de compacité de Gravelius (KG), la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent, la densité de drainage (Dd), l'indice de pente de Roche, (Ip), : l'indice de pente global (Ig), l'altitude maximale à la source (ALTX), l'altitude minimale à la confluence (ALTN), la longueur du cours d'eau (Lc), la dénivelée (D), la dénivelée spécifique (Ds), le temps de concentration (Tc) et le débit écoulé (Q).

3. Résultats

La reconstitution finale de la distribution des sous bassins versants, nous a permis de définir les axes factoriels ou facteurs responsables de cette distribution et par conséquent, faire ressortir les affinités entre les différents sous bassins versants et déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux.

3.1. Matrice des coefficients de corrélation

L'analyse des Tableaux 4 et 5 et la courbe des valeurs propres (Figure.3), montre que les trois premiers facteurs représentent le maximum d'informations. Ainsi les trois premiers axes factoriels expriment 81,45% de la variance totale, avec 44,48% pour le premier facteur, 25,68% pour le second et 11,30% pour le troisième facteur (Tableau 4 et Figure 3).

	Valeur propre	% total variance	Cumul valeur propre	% cumulé
Axe 1	6,67	44,48	6,67	44,48
Axe 2	3,85	25,68	10,52	70,16
Axe 3	1,69	11,30	12,22	81,45

Tableau 4 : Valeurs propres de la matrice de corrélation des paramètres morphométriques des sous bassins de la Gambie

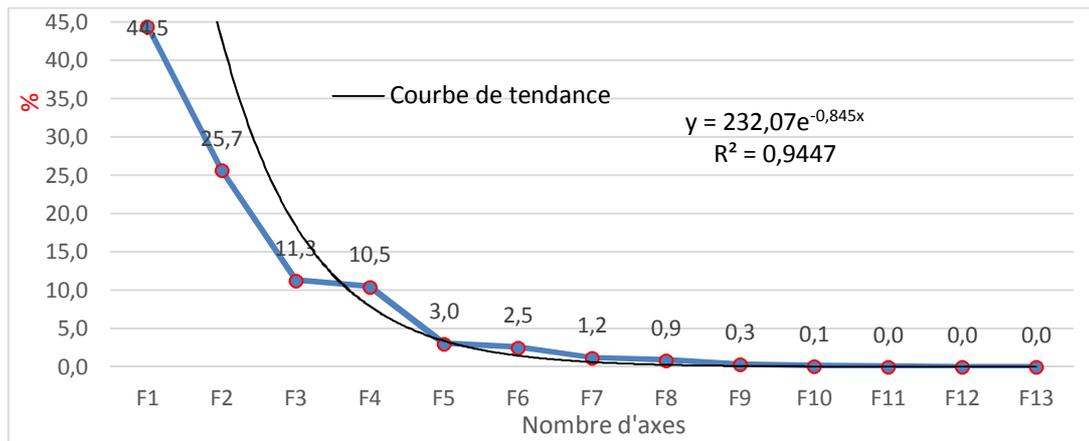


Figure 3 : Diagramme en cône des paramètres morphométriques des sous bassins de la Gambie

L'analyse de la matrice de corrélations entre les variables montre que la surface du bassin (A), le périmètre (P), la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent et l'indice de compacité de Gravelius (KG) sont fortement liés entre eux (Tableau 5). Ces derniers sont aussi corrélés mais négativement à l'altitude minimale (ALTN), à l'indice de pente (Ip) et la pente moyenne (Ig), ce qui indique leur indépendance avec ces facteurs. Quant à l'ALTX, elle est fortement corrélée avec la dénivelée (D) et moyennement corrélée toujours positivement à l'altitude minimale (ALTN), la dénivelée spécifique (Ds) et le débit écoulé (Q). Ce dernier est normalement corrélé aux variables de dimensions du bassin.

Var	A	P	KG	L	l	Ip	ALTX	ALTN	Ig	Lc	Dd	D	DS	Tc	Q
A	1														
P	0,88	1													
KG	0,17	0,55	1												
L	0,79	0,98	0,67	1											
l	0,88	0,64	-0,13	0,48	1										
Ip	-0,38	-0,39	-0,01	-0,33	-0,42	1									
ALTX	0,26	0,40	0,68	0,46	0,03	0,26	1								
ALTN	-0,20	-0,23	0,02	-0,23	-0,09	0,29	0,60	1							
Ig	-0,24	-0,34	-0,15	-0,32	-0,21	0,69	0,32	0,56	1						
Lc	0,63	0,81	0,66	0,86	0,24	-0,36	0,42	-0,37	-0,46	1					
Dd	-0,19	-0,24	0,00	-0,24	-0,10	-0,15	0,16	0,45	-0,16	-0,12	1				
D	0,31	0,47	0,73	0,53	0,05	0,24	0,99	0,50	0,26	0,51	0,11	1			
DS	0,31	0,42	0,51	0,48	0,03	0,30	0,79	0,31	0,52	0,44	-0,31	0,81	1		
Tc	0,90	0,84	0,17	0,73	0,92	-0,50	0,14	-0,14	-0,34	0,43	-0,15	0,17	0,11	1	
Q	0,61	0,78	0,63	0,83	0,20	-0,10	0,66	-0,02	0,00	0,83	-0,21	0,72	0,80	0,39	1

	Bonne Corrélation		Corrélation Moyenne		Mauvaise Corrélation
--	-------------------	--	---------------------	--	----------------------

Tableau 5: Matrice de corrélation entre les paramètres morphométriques des sous bassins de la Gambie

A : Surface, **P** : Périmètre, **KG** : Coefficient de Gravelius, **L** : Longueur du rectangle équivalent, **l** : largeur du rectangle équivalent, **Ip** : Indice de pente de Roche, **ALTX** : Altitude maximale à la source, **ALTN** : Altitude minimale à la confluence, **Ig** : Indice de pente global, **Lc** : Longueur du cours d'eau, **Dd** : Densité de drainage, **D** : Dénivelée, **DS** : Dénivelée spécifique, **Tc** : Temps de concentration, **Q** : débit écoulé.

Les dimensions du rectangle équivalent sont bien corrélées avec le temps de concentration (Tc). La longueur (L) et la largeur (l) du rectangle sont faiblement corrélées négativement avec les indices de pente (Ip et Ig), par contre, elles sont bien corrélées avec le temps de concentration (Tc). Les indices de pente (Ip et Ig) sont assez bien corrélés négativement avec le temps de concentration des eaux (Tc). La dénivelée spécifique (Ds) est faiblement corrélée négativement avec la densité de drainage (Dd) et à l'indice de compacité de Gravelius (KG).

Les axes 1, 2 et 3 ainsi retenus mettent en évidence leurs relations avec les paramètres étudiés (Tableau 6).

La matrice de corrélation des variables et des facteurs du poids de variance (Tableau 6) et la Figure.4 montrent que l'axe 1 (principal axe d'inertie) qui représente plus de 44,48% de variance est très bien corrélé positivement à la surface (A), au périmètre (P), aux dimensions du rectangle équivalent du bassin. Il est aussi assez bien corrélé positivement au temps de concentration (Tc), à la dénivelée spécifique (Ds). Il est aussi faiblement corrélé mais négativement aux indices de pente (Ip et Ig), à l'altitude minimale (ALTN) et à la densité de drainage (Dd),

L'axe 2 avec 25,68% de variance, est lié moyennement, de façon positive avec les indices de pente (Ip et Ig), l'altitude (ALTX et ALTN) et la dénivelée spécifique (Ds), de façon négative avec la surface du bassin (A), le périmètre (P), la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent et du temps de concentration des eaux (Tc).

Quant à l'Axe III qui représente presque 11,30% de la variance, il n'enregistre qu'une corrélation positive moyenne avec la largeur (l) du rectangle équivalent. La corrélation des variables étudiées avec cet axe, qu'elle soit positive (surface, périmètre, indices de pente) ou négative (la longueur du rectangle équivalent, longueur du cours d'eau, indice de compacité de Gravelius) est faible.

Variables	F1	F2	F3
A	0,8253	-0,3626	0,3743
P	0,9589	-0,2353	0,0356
KG	0,6610	0,3598	-0,4916
L	0,9623	-0,1353	-0,1178
l	0,5350	-0,5043	0,6531
Ip	-0,2872	0,6951	0,0806
ALTX	0,6155	0,7322	0,0793
ALTN	-0,0828	0,6863	0,4915
Ig	-0,2116	0,7265	0,4516
Lc	0,8563	-0,1097	-0,4302
Dd	-0,1841	0,1128	0,0385
D	0,6786	0,6895	0,0121
DS	0,6182	0,6666	0,0745
Tc	0,7194	-0,4829	0,4422
Q	0,8842	0,2587	-0,1587

Tableau 6: Vecteurs de la matrice de corrélation des paramètres morphométriques des sous bassins de la Gambie

Ces différentes caractéristiques des paramètres morphométriques et des sous bassins versants sont représentées respectivement dans des cercles et des plans (Figures 4, 5, 6 et 7) qui illustrent la projection des variables et des variables sur les plans factoriels 1 et 2.

3.2. Caractéristiques des paramètres (variables) en fonction des trois axes

A chaque paramètre (variable), on associe un point dont la coordonnée sur un axe factoriel est une mesure de la corrélation entre ce paramètre et le facteur (axe 1 ou axe 2 ou axe 3). Par projection sur un plan factoriel, les paramètres morphométriques s'inscrivent dans un plan de côté 2 (Figure 4 et 6). Elles sont d'autant plus proches du côté du plan que la variable est bien représentée par le plan factoriel, c'est-à-dire que la variable est bien corrélée avec les deux facteurs constituant ce plan.

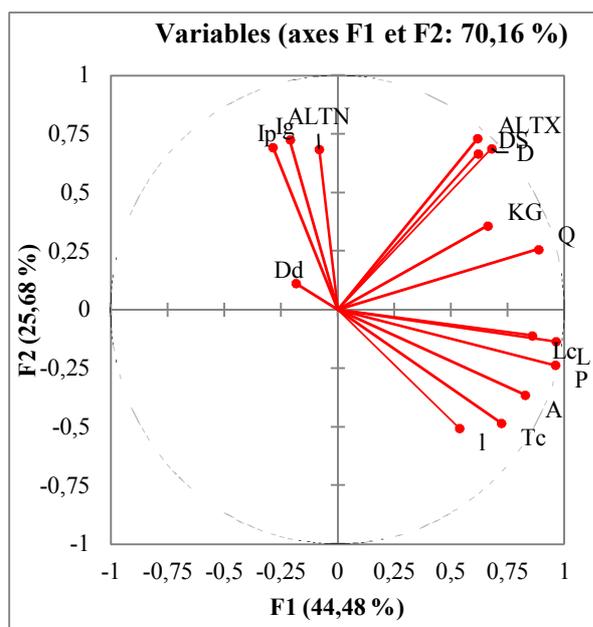


Figure 4 : Diagramme des contributions des paramètres morphométriques au niveau du bassin de la Gambie sur les plans factoriels 1 et 2

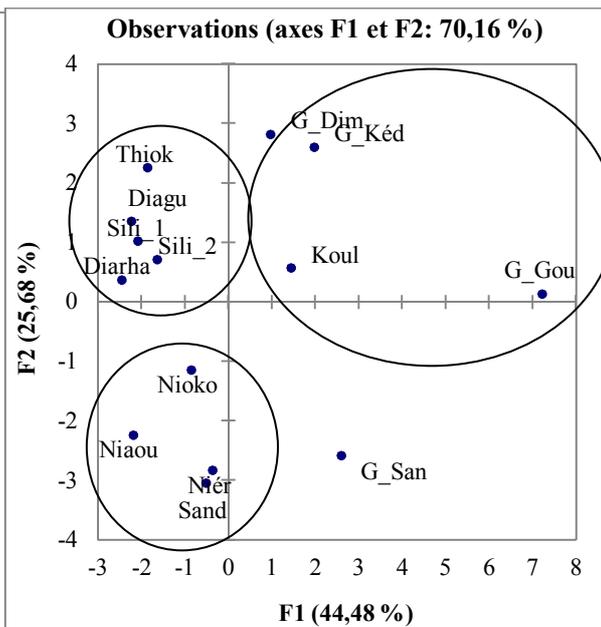


Figure 5 : Projections des individus du bassin de la Gambie sur les plans factoriels 1 et 2

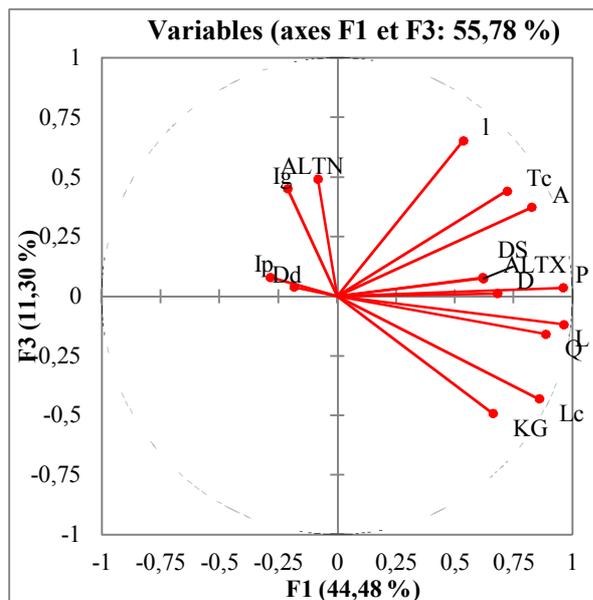


Figure 6 : Diagramme des contributions des paramètres morphométriques au niveau du bassin de la Gambie sur les plans factoriels 1 et 3

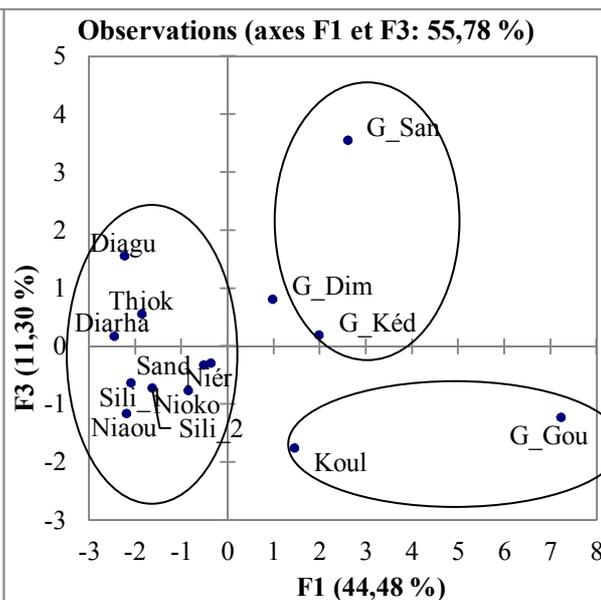


Figure 7 : Projections des individus du bassin de la Gambie sur les plans factoriels 1 et 3

Le plan I-II (70,16 % de l'inertie cumulée) : l'axe I est déterminé par les paramètres de dimension tels que la surface du bassin (A), le périmètre (P), l'altitude maximale (ALTX), la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent, le temps de concentration (Tc) et la longueur du cours d'eau (Lc), qui sont opposés à l'hypsométrie surtout l'indice de pente de Roche (Ip), la pente moyenne (Ig), l'altitude minimale (ALTN) et surtout la densité de drainage (Dd). L'axe II porte positivement l'altitude maximale (ALTX), la dénivelée (D), l'indice de compacité de Gravelius (K_G) et le débit écoulé (Q) qui sont légèrement opposés à la densité de drainage (Dd),

Le plan I-III des individus (55,78% de l'inertie cumulée) : L'axe I a la même signification que précédemment (fortement corrélé avec la surface du bassin (A), le périmètre (P), l'altitude maximale (ALTX), la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent, le temps de concentration (Tc) et la longueur du cours d'eau (Lc). Ils sont opposés surtout à l'indice de pente de Roche (Ip), la pente moyenne (Ig) et l'altitude minimale (ALTN). Quant à l'axe III, il n'est corrélé positivement et de façon moyenne, qu'à deux variables : l'altitude minimale (ALTX) et la pente moyenne (Ig).

En définitive, les figures des corrélations ont permis de voir, parmi les différents variables, les groupes de variables qui sont très corrélés entre elles. Donc son étude est plus simple et plus informative que l'analyse directe de la matrice de corrélation. La nouvelle variable synthétique représente une opposition nette entre les paramètres de dimension (sur l'axe positif) et l'hypsométrie (sur l'axe négatif) (Faye, 2014).

3.3. Caractéristiques des sous bassins (individus) en fonction des trois axes

Cette représentation a pour but de fournir des images planes approchées du nuage des sous bassins (individus) situés dans le plan. Ainsi, l'axe des abscisses représente la forme (taille) générale des sous bassins alors que celui des ordonnées représente leur profil. En effet, un sous bassin représenté sur la partie positive de l'axe 1 possède en général des paramètres de dimension importants ; c'est le cas par exemple du sous bassin de la Gambie à Gouloumbou.

Dans le plan des u.s, le plan I-II met en évidence trois groupes. Le premier composé de la Gambie (à Dimma, à Kédougou et à Gouloumbou) et de la Koulountou ont une superficie largement supérieure à celle des autres bassins (il s'agit des bassins qui ont plus fortes valeurs de forme (A, P, K_G, L et l). Dans ce groupe, le sous bassin versant de Gouloumbou (exutoire du bassin continental) se détache nettement des autres en raison de sa plus grande superficie (42 000 km²). Le deuxième groupe est formé par les sous bassins de Tiokoye, Diaguéry, Diarha et Sili qui sont des bassins de rive gauche. Ces bassins ont une longueur (L) importante, une grande altitude maximale (ALTX) et une bonne pluviométrie. Le dernier regroupe les sous bassins de Niokolo-Koba, Niaoulé Niéri-Ko et Sandougou qui font partie de la moyenne Gambie et de rive droite. Ces bassins correspondent aux plus faibles valeurs de forme avec des valeurs relativement importantes d'Ig et Ip. Il faut aussi noter la situation du bassin de la Gambie à Sandougou qui s'isole des trois principaux groupes. Les résultats de l'ACP désignent la superficie, le périmètre, le coefficient de compacité de Gravelius et la largeur comme paramètres principaux de cette subdivision.

Dans le plan I-III, l'axe I permet de distinguer deux groupes d'u.s : le premier composé par les sous bassins versants situés sur le côté positif de l'axe 1 (Gambie à Gouloumbou et Koulountou) et le second composé des autres sous bassins (Niokolo-Koba, Niaoulé Niéri-Ko, Sandougou et Sili) qui sont localisés sur le côté négatif de l'axe 1 et plus ou moins dispersés tout autour du centre. Il s'agit généralement des affluents de rive droite. Le premier groupe est caractérisé par de fortes valeurs de forme (A, P, K_G, L, l), alors que pour le second, l'indice de

penne de Roche (Ip), la penne moyenne (Ig) et l'altitude minimale (ALTN) prédominant. L'axe III permet aussi de distinguer deux groupes d'u.s : le premier constitué de la Gambie à Dimma, à Sandougou et à Kédougou, alors que le second est composé des sous bassins du Tiokoye, du Diaguéryet du Diarha.

En définitive, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a synthétisé l'information contenue dans les Tableaux 1, 2 et 3 croisant des sous bassins versants (individus) et des paramètres morphométriques (variables quantitatives). Elle a produit un résumé d'information (Figures 4, 5, 6 et 7) par l'établissement d'une similarité entre les sous bassins versants, la recherche de groupes de sous bassins versants homogène, la mise en évidence d'une typologie de sous bassins versants et de paramètres morphométriques, mais aussi la mise en évidence de bilans de liaisons entre paramètres morphométriques, moyennant des paramètres ou variables synthétiques. L'ACP a établi d'une façon générale les liaisons entre ces deux typologies (Kouani *et al.*, 2007).

En conclusion, nous remarquons que l'ACP a l'avantage d'une part de résumer l'ensemble des paramètres initiaux corrélés en un nombre réduit de facteurs non corrélés. D'autre part, elle nous a permis de mettre en évidence des similarités ou oppositions entre paramètres et sous bassins (Faye, 2014 ; Baba-Hamed et Bouanan, 2016).

3.4. Relation entre les paramètres morphométriques et l'écoulement dans le bassin

La corrélation entre variables morphométriques et hydrologiques d'un bassin a été mise en place depuis longtemps. La réponse hydrologique d'un bassin versant dépend de l'influence des facteurs de l'écoulement (Sow, 2007 ; Faye, 2014) : du climat et surtout des régimes pluviométriques (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée) ; des facteurs stables liés à la forme du bassin et de ses divers paysages (géologie, sols, végétation, relief). Ces différents facteurs combinés confirment la subdivision du bassin en régions. Le relief est sans doute le facteur qui traduit le mieux la partition du bassin entre le cours supérieur aux hautes terres et le cours moyen au relief moyen (le cours inférieur aux régions de plaines n'étant pas étudié ici). Il va de soi que les influences du relief sur l'écoulement varient d'une région à l'autre (Tableau 7).

Caractères	Cours supérieur	Cours moyen
Sous bassins	Silamé, Oundou, Sili, Diarha, Thiokoye, Diaguéri, Koulountou	Niokolo-Koba, Niéri-ko, Koulountou, Niaoulé, Sandougou
Superficie en km ²	10450	31550
Relief	Très importante	Importante

Tableau 7: Influence du relief sur l'écoulement dans le bassin de la Gambie (Source: Sow, 2007)

Dans le haut bassin, le relief est caractérisé par des altitudes élevées (1425 m au Massif du Mali ; entre 1100 et 1200 m au niveau des contreforts septentrionaux du Fouta Djallon). Ces hauts reliefs du Fouta Djallon et ses contreforts sont les sources des rivières. De même, les différences d'altitudes et les fortes pentes qui en résultent et les différentes formes topographiques contribuent à accélérer la vitesse de l'eau dans les drains et modifier les profils en long du cours d'eau. Ces caractères confèrent au cours supérieur un écoulement intense. Les pentes et la pluviométrie conditionnent très fortement l'écoulement dans le bassin.

En revanche sur le cours moyen, la baisse des altitudes notées et la tendance à la platitude générale ne favorisent pas une influence majeure de l'écoulement. Contrairement au haut bassin, dans le bassin moyen, l'influence du relief sur l'écoulement connaît une baisse

progressive. Les altitudes et pentes sont variables et plus modestes. L'intensité de l'écoulement du cours d'eau diminue et seules de petits massifs (de 400 à 500 m) au Sud de la Gambie perturbent son cours. L'influence du relief à l'écoulement y est importante.

Pour indiquer la relation entre les variables morphométriques et l'écoulement du bassin, la méthode a été appliquée sur les sous bassins et les débits écoulés utilisés sont les valeurs moyennes entre 1970 et 2000. Les résultats de l'ACP montrent que les caractéristiques de dimension (qui sont les principales responsables de la subdivision en groupes distincts), l'altitude maximale (ALTX) et la dénivelée spécifique (DS) sont de loin les variables morphométriques les plus corrélées à l'écoulement dans le bassin du fleuve Gambie. La longueur du rectangle équivalent est le paramètre le plus lié à l'écoulement (0,83%) dans le bassin suivie de la dénivelée spécifique (0,80%) et du périmètre du bassin (0,78%). En revanche, les autres variables qui sont corrélés négativement à l'écoulement sont l'indice de pente (-0,10%), l'altitude minimale (-0,02%) et la densité de drainage (-0,21%).

En définitive, l'Analyse en Composantes Principales nous a permis de mettre en évidence les affinités entre les différents sous bassins versants et de déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux.

Discussion

L'ACP) est une technique statistique largement utilisé pour des questions d'analyse d'un grand nombre de variables (Kouani *et al.*, 2007 ; Pulido-bosch *et al.*, 1999 ; Helena *et al.*, 1999 ; Tidjani *et al.*, 2006 ; Eslamian *et al.*, 2010), les paramètres morphométriques y compris (Faye, 2014 ; Baba-Hamed et Bouanan, 2016).

Sur la base des regroupements que nous a donnés l'analyse, l'ACP a montré que les distinctions et les regroupements entre eux sont liés à leur appartenance à des contextes différents et à des caractéristiques morphométriques assez distinctes. Les bassins versants ayant les plus grandes valeurs de forme pour le bassin de la Gambie se mettent, suivant les trois axes, toujours ensemble (la Gambie à Dimma, à Kédougou et à Gouloumbou et la Koulountou). Malgré la taille des données (14 unités de bassins et 15 variables de paramètres) l'ACP nous a offert un résumé et une vue complète des relations existant entre les paramètres morphométriques des bassins versants étudiés, résultats qui n'auraient pas pu être obtenus autrement, ou bien uniquement au prix de manipulations fastidieuses (Faye, 2014).

Comme toute méthode exploratoire, l'ACP renferme des limites qui viennent du fait que c'est une méthode de projection, et que la perte d'information induite par la projection peut entraîner des interprétations erronées. De plus, si la visualisation globale des données est souvent suffisante; par contre, elle permet seulement de situer, dans l'ensemble des données. Ainsi, il peut exister une distinction entre sous bassins regroupés dans un même groupe.

Malgré les résultats probants obtenus, certaines données utilisées doivent être remises en cause. Même si les groupes de bassins sont bien distincts, il n'y a pas une forte correspondance apparente entre les méthodes de groupement suivant les différents axes : les groupes ont différentes consistances numériques et des sous bassins particuliers appartiennent à différentes régions pour différentes méthodes. La méthode indique, par ailleurs, que la consistance numérique de certains sous bassin ne suffit pas pour confirmer sa capacité à faire une excellente typologie par bassin.

En dépit de l'absence de lien direct entre le débit écoulé et la surface d'un bassin (Hirsch, 1962) et les critiques violentes contre la morphométrie considérée comme une géométrie

plane (Lambert, 1996), la technique de l'ACP a, pourtant, pu indiquer l'ampleur de la dépendance de l'écoulement des sous bassins sur les variables de dimension. Ainsi, ce fort degré de dépendance noté entre certains paramètres morphométriques de dimension (A , P , L , I , K_G) et le débit moyen écoulé du bassin n'est pas une caractéristique inattendue dans le bassin du fleuve Gambie, ce qui est conforme avec le bassin du fleuve Sénégal (Faye, 2014). Cela est dû à la relation qui existe entre les conditions de l'écoulement, particulièrement la crue, et ces variables (Mehaiguene, 2013). La superficie du bassin a aussi influencé sa capacité de ruissellement (suivant une corrélation de 0,61%) puisque plus un bassin est large (comme la Gambie à Kédougou et à Gouloumbou et la Koulountou), moins sa capacité de ruissellement de surface est élevée (Reddy *et al.*, 2004). Le facteur de forme qui possède donc une relation directe avec le débit de pointe à l'exutoire du bassin, l'indice de Gravelius (Gregory et Walling, 1973), influence l'écoulement (corrélation = 0,63 %). 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 (0,83 %).

Bien que la variabilité du relief ait un impact important sur l'écoulement, l'utilisation seule du débit moyen écoulé pour déterminer cette corrélation reste insuffisante comme méthode et ne permet d'assurer la robustesse d'un tel modèle (Faye, 2014). En plus, le caractère statique et cloisonné des paramètres calculés ne permet pas notamment de prédire la réponse hydrologique des bassins (Hirsch, 1962) et limite considérablement l'intérêt des résultats en cas de mesure de l'influence de la morphologie dans sa globalité (Delahaye *et al.*, 2007). De plus, en décrivant de manière séparée les composantes morphologiques, ces paramètres ne sont pas aptes à donner une image synthétique de l'influence de la morphologie sur la réponse hydrologique théorique de surface (Douvinet *et al.*, 2008). Toutefois, ces limites n'entravent en rien les bonnes performances obtenues.

Conclusion

Pour les 14 sous bassins étudiés de la Gambie, la force des liaisons qui existent entre les variables explicatives a été définie par une matrice de corrélations simples entre les variables morphométriques. Au terme de ces corrélations, sont retenues comme variables explicatives du regroupement : la taille du bassin, l'indice de pente (I_p) et la densité de drainage (D_d). La construction du regroupement des sous bassins a permis la définition des axes factoriels (responsables liés à la distribution spatiale) et donc la mise en évidence des affinités et des différences entre les groupes. On a montré sur l'exemple du bassin de la Gambie, comment l'utilisation de données physiographiques pouvait permettre (dans une certaine mesure) une régionalisation par l'utilisation de l'analyse en composantes principales.

En ce qui concerne la répartition spatiale de ces zones, la corrélation a montré que ces zones ne forment pas toujours des régions contiguës. Par conséquent, la proximité géographique n'influence pas de manière significative la zonalité (différence entre le bassin du Tiokoye et celui du Koulountou). Toutefois, on peut observer certaines cohérences spatiales, telles que, la Gambie à Kédougou et la Gambie à Gouloumbou qui se rapprochent géographiquement et qui généralement apparaissent dans la même zone (répartition ACP).

Quant aux facteurs qui influencent la variabilité spatiale des régimes hydrologiques, il est apparu que les caractéristiques physiques des bassins sont de loin le principal facteur qui influence plus ou moins fortement la variabilité spatiale. 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.

Les paramètres morphométriques utilisés pour voir si la forme d'un bassin versant (allongement, compacité, circularité) influençait le régime des cours d'eau, déterminent en partie les modalités de l'écoulement dans le bassin du fleuve Gambie. Cependant, la liaison entre le relief et l'écoulement souffre d'anomalies comme le caractère « séparés », « statiques » et « non synthétiques » des paramètres, leur forte dépendance de l'échelle de mesure, la perte de leur objectivité et de leur exhaustivité.

L'avantage incontestable de notre classification est le fait qu'elle repose sur des critères précis et faciles à utiliser pour classer et caractériser n'importe quel bassin versant. Il faut ajouter aussi que l'analyse des paramètres morphométriques est intéressante, mais reste insuffisante pour connaître les réponses hydrauliques d'un grand bassin versant comme la Gambie. Dans des études futures, seront analysés des facteurs qui manquent sur cette étude tels que la lithologie, les sols et les formations superficielles, es formes d'occupation humaine de l'espace.

Références

- Baba-Hamed K. et Bouanan. A., 2016 : Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna. (Nord-ouest algérien). *Geo-Eco-Trop.*, 40, 4 : 277-286.
- Bauling H., 1959 : La morphométrie. *Ann. Géogr. Paris.* 365 : 385 – 408.
- Biswas S, Sudhakar S and Desai, V R., 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.
- Bouroche J.M.& Saporta G., 1980 : L'analyse des données. 4^{ième} Ed. collect. Que Sais-je ? Presse Universitaire de France, 127 p.
- Chaperon P. et Guiguen N., 1974 : *Etude hydrologique du bassin continental du fleuve Gambie*. Rapport terminal PNUD projet REG 60. ORSTOM avril 74-2 tomes, 257 p.
- 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.
- 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.
- Douvinet J, Delahaye D et Langlois P., 2008 : Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], <http://cybergeo.revues.org/16103> ; DOI : 10.4000/cybergeo.16103.
- Eslamian S, Ghasemizadeh M, Biabanaki M, Talebizadeh M., 2010: A principal component regression method for estimating low flow index. *Water Resources Management*, 24 (11): 2553-2566.
- Faye C., 2013 : *Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé*. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 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.
- Gregory K.J, Walling D. E., 1973: *Drainage basin form and process: a geomorphological approach*: John Wiley, New York.
- Helena B., Pardo R., Vega M. and Barrado E., 1999: Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (PISUERGA RIVER, SPAIN) by principal component analysis. *Wat. Res.*, 34 (3): 807-816.
- Hirsch M. 1962 : Méthode de prévision des débits des cours d'eau par l'analyse morphométrique des réseaux fluviaux. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 13 : 97-108.

Kouani A., Jamali S. El et Talbi M., 2007 : Analyse en composantes principales Une méthode factorielle pour traiter les données didactiques. *Radisma*, 2, 1-18.

Lamagat J.P., 1989. Monographie hydrologique du fleuve Gambie Collection M&m. ORSTOM-OMVG, 250 p.

Lambert R. 1996 : *Géographie du cycle de l'eau*, Editions Presses Universitaires du Mirail (PUM), Toulouse, 439 p.

Mehaiguene M., 2013 : *Etude des étiages et des débits de base au nord-ouest de l'Algérie*. École nationale supérieure d'Hydraulique Blida – Algérie, 14 p.

Pulido-bosch A, Ceron J. C. and Bakalowincz M., 1999: Application of Principal Components analyse to the study of CO₂ – rich thermaineral waters in the aquifère system of alto Guadaleñin (spain). *J. Hydrol.* 46: 929-942.

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.

Sow A. A., 2007. *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confinis guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé*. Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1232 p.

Tidjani A. E. B., Yebdri D., Roth J.C. et Derriche Z., 2006 : Exploration des séries chronologiques d'analyse de la qualité des eaux de surface dans le bassin de la Tafna en Algérie. *Revue des sciences de l'eau. Journal of Water Science.* 19 (4) : 315-324.

Veltri M, Veltri P et Maiolo M., 1996: On the fractal dimension of natural channel network. *Journal of Hydrology*, 187: 137-144.