



**Section** : *Environmental and Water Sciences*  
**Publication type** : *Full paper*

## **Climatic Variability and Hydrological Impacts in West Africa: Case of the Gambia Watershed (Senegal)**

### **Variabilité climatique et impacts hydrologiques en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Gambie (Sénégal)**

*Received 27 Jan. 2018*

*Accepted 26 Feb. 2018*

*On line 31 Mar. 2018*

**CHEIKH FAYE<sup>1</sup> & ANASTASIE MENDY<sup>2</sup>**

**(1) Département de Géographie**

**Université Assane Seck de Ziguinchor**

**Ziguinchor, Sénégal**

**Email : [cheikh.faye@univ-zig.sn](mailto:cheikh.faye@univ-zig.sn)**

**(2) Département de Géographie**

**Université Cheikh Anta Diop de Dakar**

**Dakar, Sénégal**

**Email : [anastasia.mendy@ucad.edu.sn](mailto:anastasia.mendy@ucad.edu.sn)**

#### **KEY WORDS**

Effective rainfall, Runoff potential, Infiltration potential, Trend, Rupture, Gambia river basin.

**Abstract :** Since the 1970s, West African rivers have undergone profound changes related to the rainfall deficit and have led to a sharp decline in water resources. In the framework of mitigation and adaptation to the consequences of these changes among which, there is sometimes the scarcity of water resources (desertification and drought), sometimes the event of the important precipitations at the origin of the recurring floods, it is necessary to have a detailed knowledge of the impact of these upheavals on the flows of a basin. This study aims to analyze changes induced by rainfall variability on hydrological behavior of Gambia river basin from to Senegal. Climatological data (rainfall, temperature) of six selected stations in the Senegalese part of Gambia river basin for period 1960-2016 are used. To carry out study, methodology consisted on the one hand in determination of hydrological parameters (such as rainfall effective, runoff potential and infiltration potential) and on the other hand in the calculation of standard standardization index and the application of two tests (Pettitt rupture test and Mann Kendall trend test) to the series of hydrological parameters determined. The main results obtained made it possible to identify the manifestations of hydrological variability observed in Gambia river basin in Senegal. The different hydrological parameters analyzed vary over the years and describe a downward trend marked by a very significant rupture in 1970. The hydrological deficits evaluated are of order of -14.2% for average rainfall, -27 % for rainfall effective, -49.8% for runoff potential and -11.4% for infiltration potential. The decline in rainfall has, of course, consequences for the availability of water resources in river basin that is also vital.

#### **MOTS CLES**

*Pluie efficace, Potentiel de ruissellement, Potentiel d'infiltration, Tendence, rupture, Bassin versant de*

**Résumé :** Depuis les années 1970, les cours d'eau ouest africains ont subi de profondes modifications liées au déficit pluviométrique qui ont entraîné une forte diminution des ressources en eau. Dans le cadre de l'atténuation et de l'adaptation aux conséquences de ces changements parmi lesquelles, il y a tantôt la raréfaction des ressources en eau (désertification et sécheresse), tantôt



la Gambie.

l'événement des précipitations importantes à l'origine des crues récurrentes, il est nécessaire d'avoir une connaissance fine des incidences de ces bouleversements sur les écoulements d'un bassin. Cette étude vise à analyser les modifications induites par la variabilité pluviométrique sur le comportement hydrologique du bassin versant du fleuve Gambie au Sénégal. Les données climatologiques (pluie, température) de six stations sélectionnées dans la partie sénégalaise du bassin versant de la Gambie sur la période 1960-2016 sont utilisées. La méthodologie a consisté d'une part, à la détermination de paramètres hydrologiques tels que la pluie efficace, le potentiel de ruissellement et le potentiel d'infiltration, d'autre part, au calcul de l'indice standard de normalisation et à l'application de deux tests (le test de rupture de Pettitt et le test de tendance de Mann-Kendall) aux paramètres hydrologiques indiqués précédemment. Les principaux résultats issus du traitement montrent que les différents paramètres hydrologiques analysés varient au cours des années et décrivent une tendance à la baisse marquée par une rupture hydro-climatique très significative intervenue en 1970. Les déficits hydrologiques évalués sont de l'ordre de -14,2% pour la pluie moyenne, -27% pour la pluie efficace, -49,8% pour le potentiel de ruissellement et -11,4% pour le potentiel d'infiltration. La baisse de la pluviométrie a des conséquences significatives sur la disponibilité des ressources en eau de ce bassin versant aussi vital.

## 1. Introduction

Au cours du siècle dernier, le climat de la terre a connu de grands changements qui ont eu des répercussions négatives sur les écosystèmes. Les longues périodes de sécheresse qui découlent de cette variabilité climatique ont des effets négatifs sur le cycle hydrologique, l'environnement et les activités socio-économiques. Une baisse de la pluviométrie a été observée en Afrique de l'Ouest à partir de la fin des années 1960 jusqu'au début de la décennie 1990. Ces auteurs ([1] ; [2] ; [3] ; [4] ; [5] et [6] ont montré qu'une tendance à la sécheresse s'est manifestée à partir de la fin de la décennie 1960. En outre, l'apparition de quelques années humides à partir de l'année 2000 amène à s'interroger sur la fin de la période sèche qui dure depuis le début des années 1970. Des auteurs ont tenté d'apporter des réponses à ces incertitudes en rattachant la décennie 2000 aux décennies sèches antérieures ([7] ; [8] ; [9] ; [10]. Un des enjeux majeurs des recherches sur un phénomène complexe comme la variabilité climatique est de quantifier son impact sur les écoulements et les disponibilités en eau, qui peut différer d'une région à une autre.

Le Sénégal possède un potentiel hydrique assez riche et diversifié dont trois fleuves qui prennent leur source en Guinée (fleuves Sénégal, Gambie et Kayanga) et qui arrosent une bonne partie du pays ([11]). La Gambie est un fleuve qui coule dans un bassin versant transfrontalier.

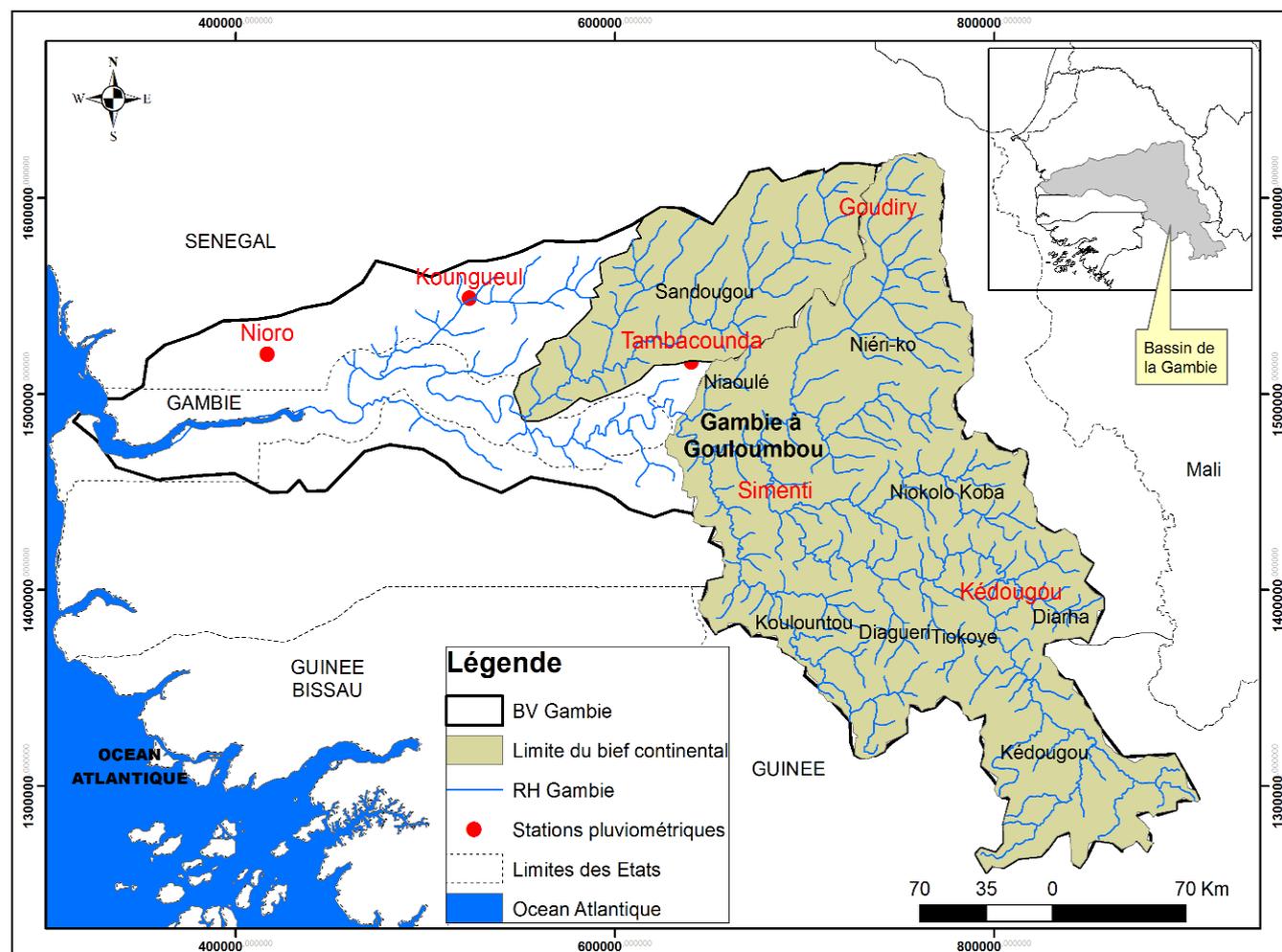
Il est d'une importance économique, énergétique, environnementale majeure et d'intérêt régional. Son apport hydrique est utilisé par une large gamme de secteurs tels que l'agriculture, l'industrie, l'alimentation en eau potable, la production d'électricité (achèvement de la construction du barrage hydroélectrique de Samba Ngalou prévu en 2018), etc.

La Gambie dans son bief continental, est un fleuve alimenté essentiellement par les précipitations. Si les principaux résultats issus des travaux de [1] et [4], ont montré que le bassin versant de la Gambie a connu une variabilité pluviométrique marquée par une longue période sèche amorcée à partir des années 1970, ils n'ont pas pu montrer la reprise de la tendance pluviométrique humide caractérisée par la rupture des années 2000. Dans ce contexte de retour de la pluviométrie à son niveau moyen, mais aussi sa forte variabilité interannuelle, et en vue de gérer de façon raisonnée les ressources en eau du bassin de la Gambie, il convient d'avoir une idée aussi claire que possible de la manière dont répondra le bassin versant aux modifications du climat [12]. C'est dans un tel contexte que cette étude a été initiée dans le bassin de la Gambie sur les récentes variations spatio-temporelles des paramètres hydro-pluviométriques et agronomiques. Ce travail se fixe comme objectif d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans la partie sénégalaise du bassin versant de la Gambie dans un contexte de reprise des précipitations depuis les années 2000.

### Présentation de la Zone d'étude

Le fleuve Gambie prend sa source à environ 1 150 m d'altitude dans le Fouta Djallon, près de Labé en République de Guinée. Le bassin de la Gambie couvre une superficie de près de 77 100 km<sup>2</sup>, partagés entre trois Etats [13]: la Guinée (15,4% de la superficie du bassin), le Sénégal (70,9% de la superficie) dont il draine presque toute la région Tambacounda, une partie de la Haute-Casamance et du Saloum méridional et la Gambie (13,7% de la superficie) dont il est l'épine dorsale et où il rejoint l'océan Atlantique. Il s'étend, en latitude, du 11°22 Nord (dans le Fouta-Djallon) au 14°40 Nord (dans le Ferlo sud-oriental) et, en longitude, du 11°13 Ouest (Fouta-Djallon) au 16°42 Ouest (Banjul, embouchure). La longueur du cours d'eau principal est de 1180 km, un cours d'eau

constitué de deux biefs : un bief continental et un bief maritime [1] ; [4]. Le bief continental reçoit de nombreux affluents sur sa rive gauche (Diaguéri, Niokolo-Koba, Niéri-Ko, Sandougou...) et sur sa rive droite (Thiokoye, Diarha, Koulountou...) (Cf. Fig. 1). Le bassin de la Gambie est situé dans une région où il y a contact entre les formations anciennes, complexes et diverses du socle et de sa couverture paléozoïque et les formations sédimentaires plus récentes du continental. Sa végétation naturelle est représentée par des essences arborées, arbustives et herbacées. D'une manière générale, la forêt sèche et la savane boisée recouvrent les collines tandis que les bourrelets de berge sont envahis par la forêt galerie [1] - [4].



**Fig. 1 : Situation des stations d'étude dans le bassin versant de la Gambie**

Source : Direction de la gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE) et Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie (OMVG)

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

Si au nord, une partie du bassin appartient à la zone sahélienne, au sud, dans le Fouta Djallon, on a une variante climatique d'altitude guinéo-foutanienne [13]. Le bassin de la Gambie est situé entre les isohyètes 1700mm et 700mm.

La partie maritime est sous l'isohyète 1000mm. Au nord de cette isohyète, les apports au fleuve sont faibles et pratiquement négligeables dans le bilan hydrologique général du bassin : il s'agit des apports qui rejoignent la partie maritime ou qui proviennent de la Sandougou, du Baobolong, du Niériko ou du Niaoulé (Gambie en amont de Gouloumbou).

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Données

Les données utilisées dans cette étude comprennent des données de précipitations mensuelles et de température mensuelle obtenues auprès de l'Agence Nationale de la Météorologie et de l'Aviation Civile (ANACIM). Pour la pluviométrie, six stations suivies sur une longue durée sont sélectionnées dans la partie sénégalaise du bassin de la Gambie (Kédougou, Tambacounda, Simenti, Goudiry, Koungheul et Nioro) (Cf. Tab. 1).

Les données de température de Tambacounda ont été utilisées. Les stations météorologiques retenues, de par la qualité et la durée des observations ont été sélectionnées afin de constituer un échantillon le plus représentatif possible de la variabilité des conditions hydro-climatiques à l'échelle du bassin versant de la Gambie afin de garantir une couverture relativement homogène. Les données météorologiques collectées s'étendent de 1960 à 2016.

Cette période est considérée comme assez longue pour une étude statistique valide [14], d'autant plus que [15] stipule qu'une longueur minimale de 25 ans assure la validité statistique des résultats de recherche sur les tendances. Les valeurs moyennes de la pluie et de la température ont été calculées à partir de la méthode de la moyenne arithmétique.

Tab. 1: Caractéristiques des stations retenues pour l'étude

Stations	latitude	Longitude	Période d'étude
Tambacounda	13,71	-13,71	1960-2016
Simenti	13,06	-13,31	1960-2016
Kédougou	12,56	-12,17	1960-2016
Goudiry	14,32	-12,79	1960-2016
Koungheul	14,04	-14,80	1960-2016
Nioro	13,75	-15,77	1960-2016

Source : ANACIM

### 2.2. Détermination des paramètres hydrologiques

Les paramètres hydrologiques évalués dans cet article sont la pluie efficace, le potentiel de ruissellement et le potentiel d'infiltration.

#### 2.2.1. Détermination de la pluie efficace

La pluie efficace correspond à la « partie de la pluie qui contribue au ruissellement » [16]. Dans le sens large, on appelle « pluie efficace (Pe) », la pluie donnant lieu à un écoulement, superficiel ou souterrain, immédiat ou différé. Ce terme du bilan hydrologique conditionne la disponibilité en eau, que ce soit vis-à-vis de son transfert rapide en surface (ruissellement) ou de son écoulement différé au travers des aquifères [12].

La pluie efficace peut être exprimée par la relation suivante (Equation 1) :

$$P_e = P - ETR \quad (1)$$

Avec Pe : la pluie efficace (mm) ; P : la pluviométrie (mm) ; ETR : l'évapotranspiration réelle (mm).

#### 2.2.2. Détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR)

La détermination de l'ETR a été faite à l'aide de la méthode de Coutagne. Cette méthode donne de bons résultats dans l'étude du bilan hydrologique [17].

L'évapotranspiration réelle (ETR) est donnée par l'expression suivante (Equation 2) :

$$ETR = P - \gamma P^2 \quad (2)$$

$$\text{Où : } \gamma = 1 / (0,8 + 0,145t) \quad (3)$$

Avec :

t qui est la température moyenne annuelle en °C ;

P la précipitation moyenne annuelle en m.

Cette méthode n'est applicable que si  $1/8 < P < 1/2$  avec P en m.

#### 2.2.3. Détermination du potentiel de ruissellement (R)

L'estimation du ruissellement (R) est faite par la formule de Tixeront-Berkaloff qui utilise la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée par la méthode de Thornthwaite [18] ; [17] ; [19]. La formule de détermination de l'ETP selon Thornthwaite se présente comme suit :

$$ETP \text{ (mm mois)} = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^a \times F(\gamma) \quad (4)$$

Où :

t est la température moyenne mensuelle en °C ;

I est l'indice thermique annuel. Il est la somme des douze indices thermiques mensuels  $i$  (m) et est donné par la formule suivante :



$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \quad (5)$$

Avec :

$i(m)$ , l'indice thermique mensuel qui se présente de la façon suivante :

$$i(m) = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (6)$$

La variable  $a$  est une fonction complexe de l'indice thermique  $I$  avec :

$$a = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 \quad (7)$$

$F(\gamma)$ , le facteur correctif, est fonction de la latitude du lieu considéré et du mois donné. Ses valeurs sont tabulées.

La formule de Tixeront-Berkaloff pour l'évaluation du ruissellement ( $R$ ) se présente comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2} \quad (8)$$

Où :

$R$  est le ruissellement en mm ;

$P$  la précipitation moyenne annuelle en mm ;

$ETP$  l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée par la méthode de Thornthwaite en mm.

#### 2.2.4. Détermination du potentiel d'infiltration (I)

La méthode du bilan hydrologique est la plus utilisée pour la détermination de la lame d'eau infiltrée [17] - [19].

L'infiltration est évaluée à partir de l'équation suivante :

$$I = P - (ETR + R) + \Delta S \quad (9)$$

Avec:

$I$ : la lame d'eau infiltrée (mm) ;

$P$ : la pluviométrie (mm) ;

$ETR$  : l'évapotranspiration réelle (mm) ;

$R$ : la lame d'eau ruisselée (mm) ;

$\Delta S$ : la variation du stock d'eau.

Le travail a été réalisé à partir de l'hypothèse selon laquelle, à l'échelle du cycle hydrologique annuel, les variations de stock s'annulent sur un grand bassin [20].

### 2.3. Méthodologie d'analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique

#### 2.3.1. Test de Pettitt (1979)

Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées [21].

Le test de Pettitt a été retenu pour sa puissance et sa robustesse [22].

Le test de Pettitt [23] est un test non paramétrique de détection d'une rupture unique à date inconnue.

La variable de Pettitt ( $U_{t,N}$ ) est définie par l'équation 10.

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (10)$$

Avec :

$$S = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{signe}(x_j - x_i) \quad (11)$$

Au cas où l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant  $t$  définissant le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$  [24].

On peut noter que le test fournit également une estimation de la position de la rupture en utilisant l'indice  $k$  correspondant au maximum  $U(k)$ .

Le déficit hydrologique par rapport aux ruptures identifiées par le test de Pettitt a été évalué à partir de l'équation 12 [25] :

$$D = \frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_i} - 1 \quad (12)$$

Où :

$\bar{X}_j$  est la moyenne de la série après la rupture ;

$\bar{X}_i$  celle avant la rupture.

#### 2.3.1. Test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall a permis de détecter d'éventuels changements graduels dans les séries de variables extrêmes. Selon [26] et [27], ce test non paramétrique, basé sur le rang, permet de déterminer si la corrélation entre le temps et la variable d'étude est significative ou pas. Soit  $(x_1, \dots, x_n)$  un échantillon de valeurs indépendantes relatives à une variable aléatoire  $X$  dont on cherche à évaluer la stationnarité.

La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(x_i - x_j) \quad (13)$$

Pour déterminer l'ampleur du changement, la méthode de la pente de la Sen [28] a été appliquée et s'obtient par la formule suivante (Equation 14) :

$$b = \text{Mediane} \left[ \frac{(X_j - X_i)}{(j - i)} \right], \text{ pour } i < j \quad (14)$$

Où b est la pente entre les points de données X<sub>j</sub> et X<sub>i</sub> mesuré au temps j et i respectivement.

### 3. Résultat et discussions

#### 3.1. Résultat

##### 3.1.1. Caractéristiques des paramètres hydrologiques calculés

Les principaux paramètres hydro-climatiques calculés sur la période 1961-2016 sont la pluie moyenne annuelle (P), la pluie efficace (Pe), le potentiel de ruissellement (R) et le potentiel d'infiltration (I).

Les caractéristiques statistiques de ces paramètres sont données dans le Tableau 2.

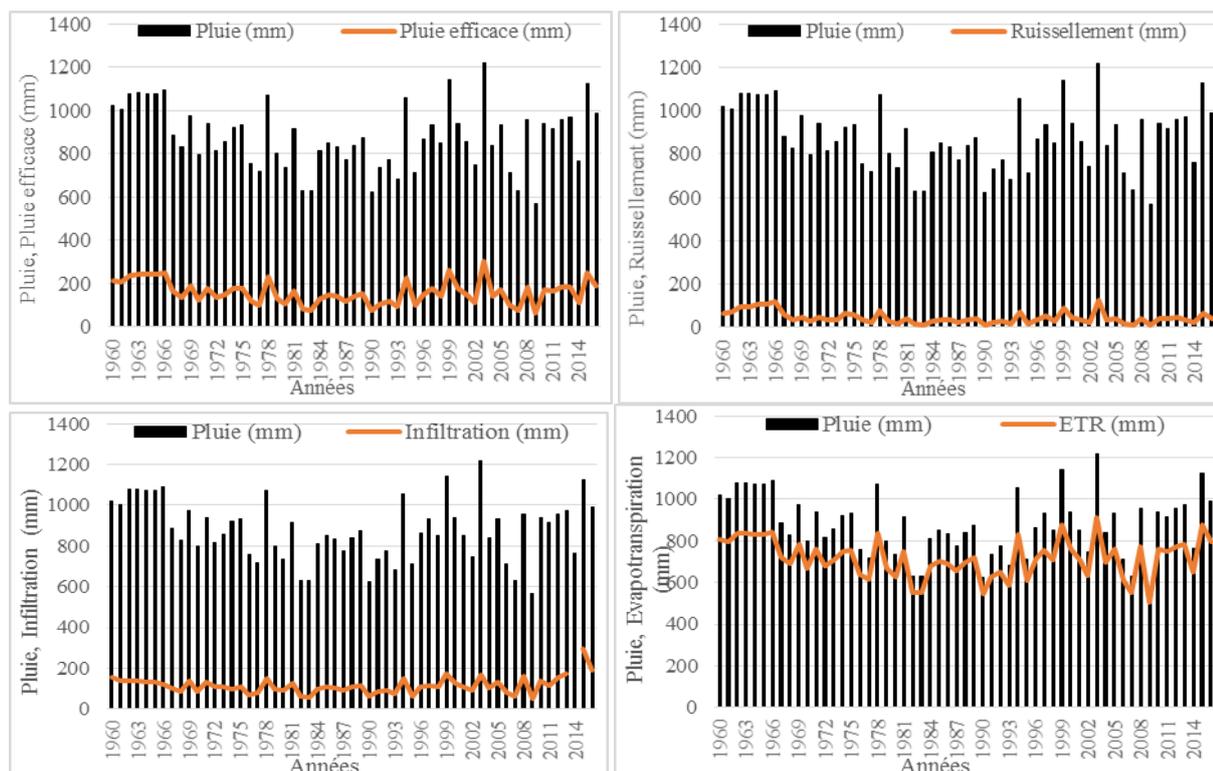
**Tab. 2 : Caractéristiques statistiques des paramètres hydrologiques calculés (1960-2016)**

Paramètres	Min (mm)	Max (mm)	Moy (mm)	Ecart type (mm)	CV (%)	Proportions (%)
Pluie moyenne annuelle (P)	568,8	1218	878,1	148,1	16,9	
Pluie efficace (Pe)	64,9	302,7	160,0	54,1	33,8	18,2
Potentiel de ruissellement (R)	10,4	124,3	45,6	28,2	61,8	5,20
Potentiel d'infiltration (I)	54,2	297,4	116,0	40,6	35,0	13,2
Evapotranspiration réelle (ETR)	503,9	915,1	718,0	94,6	13,2	81,8

Source : ANACIM

La pluie moyenne annuelle du bassin, obtenue par la moyenne arithmétique, varie de 568,8mm (enregistrée en 2009) à 1218 mm (2003) avec une moyenne de 878,1 mm et un écart-type de 148,1 mm. La pluie efficace oscille

entre 64,9 mm (2009) et 302,7 mm (2003) avec une moyenne de 160 mm et représente 18,2% des précipitations (Cf. Fig. 2).



**Fig. 2 : Précipitations et paramètres hydrologiques étudiés (1961-2010)**

Source : ANACIM



Contrairement à la sécheresse des années 1970 et 1980 où la moyenne de la pluie efficace est de 137 mm, les années 2000 ont enregistré une hausse des valeurs de la pluie efficace, en relation avec la reprise pluviométrique, avec une moyenne de 166,8 mm.

Ces résultats montrent que les lames d'eau précipitées (P) dans le bassin permettent effectivement d'avoir des lames d'eau qui ruissellent (R) et qui s'infiltrent (I) [12].

Ainsi, le potentiel de ruissellement varie entre 10,4 mm (2007) et 124,3 mm (2003) pour une moyenne de 45,6 mm et un écart-type de 28,2 mm. Toutefois, la valeur moyenne du potentiel de ruissellement ne représente seulement que 5,2 % de la pluie moyenne annuelle du bassin (Cf. Fig. 2).

Néanmoins, au milieu des années 1990, les valeurs ont connu une légère hausse. La quantité moyenne observée de 2000 à 2016 est de 42,4 mm.

Pour le potentiel d'infiltration, les valeurs fluctuent entre 54,2 mm (2009) et 297,4 (2015) mm pour une moyenne de 116 mm qui représente un pourcentage de 13,2% de la pluie moyenne annuelle du bassin (Figure 2). De 2000 à 2010, la valeur moyenne du potentiel d'infiltration est de 128,5 mm contre 98,9 mm sur la période 1970-1990.

Enfin, les valeurs de l'évapotranspiration réelle fluctuent de 503,9 (2009) à 915,1 mm (2003) avec une moyenne de 718 mm et un écart-type de 94,6 mm. Les valeurs du coefficient de variation montrent que les séries de la pluie (16,9%) et de la pluie efficace (33,8%) sont plus homogènes que celles du potentiel d'infiltration (35,0%) et du potentiel de ruissellement (61,8%) qui sont très hétérogènes.

### **3.1.2. Variabilité temporelle des indices hydrologiques**

La Figure 3 présente la variabilité interannuelle des indices standardisés des paramètres hydrologiques étudiés dans le bassin de la Gambie. Il en ressort que cette variabilité est quasi synchrone avec la présence de deux périodes hydro-climatiques : une période humide et une période sèche.

Les indices de pluies moyennes annuelles montrent que le bassin versant de la Gambie connaît une période pluviométrique excédentaire de 1960 à 1967 avec une moyenne interannuelle de 1038 mm (Cf. Fig. 3).

A partir de 1968, s'installe une longue période déficitaire, marquée souvent par une alternance d'années excédentaires surtout sur la décennie 2000. La période pluviométrique déficitaire notée surtout sur les décennies 1970 ; 1980 et une partie de la décennie 1990 coïncide

avec la grande sécheresse au Sahel. Cette période (1968-1993) a une moyenne pluviométrique interannuelle estimée à 812,4 mm.

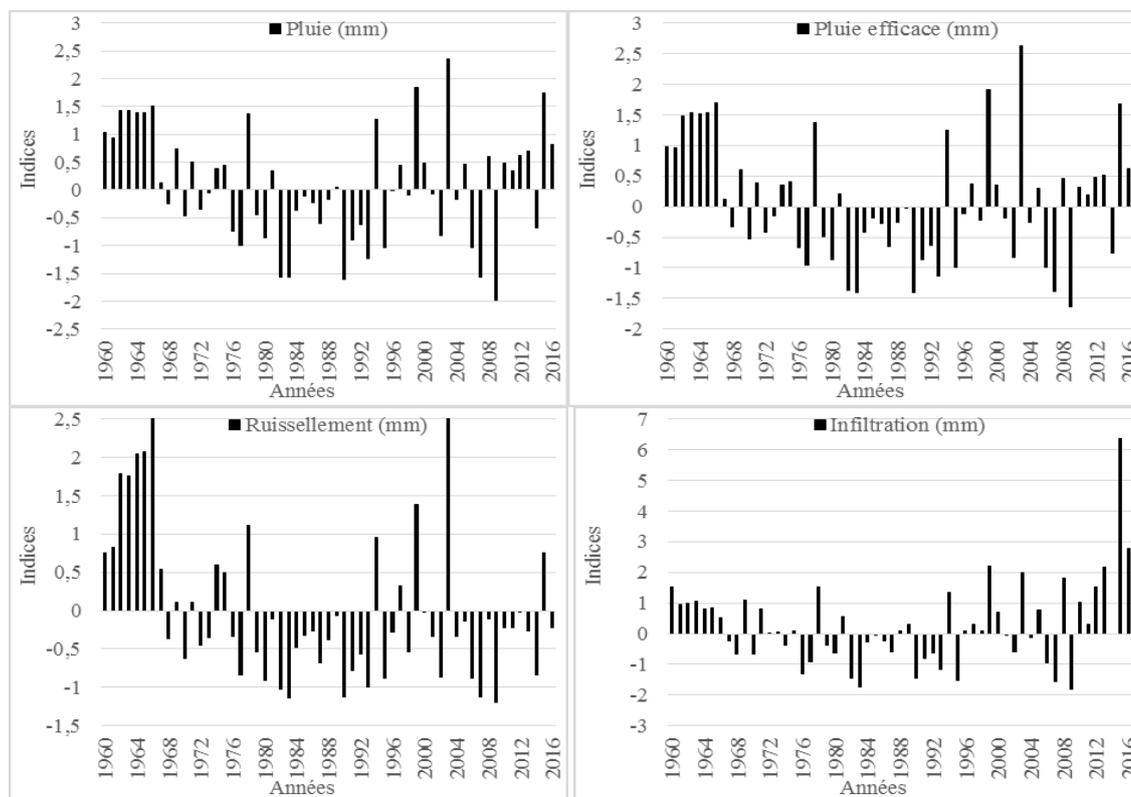
A l'image des pluies moyennes annuelles, les indices de pluies efficaces ont permis d'observer deux tendances (Cf. Fig. 3). Une période excédentaire, notée entre 1960 et 1967, est caractérisée par une moyenne interannuelle de 224,5 mm et un écart-type de 42,1 mm. Elle est suivie d'une période déficitaire qui a débuté en 1968.

La séquence 1968-1993 qui coïncide ainsi avec la période la plus sèche a une moyenne de 135,5 mm et un écart-type de 37,1 mm. Toutefois, cette période déficitaire comporte quelques années excédentaires, enregistrées surtout à partir des années 2000.

Au niveau du potentiel de ruissellement (Cf. Fig. 3), il est constaté une période excédentaire allant de 1960 à 1968. Cette période est caractérisée par une moyenne interannuelle de 91,1 mm. Le reste de la série (de 1969 à 2016) est presque totalement déficitaire, seules 10 années sont excédentaires. La période 1969-1993 enregistre une moyenne interannuelle de 34,3 mm.

Concernant le potentiel d'infiltration (Figure 3), seule une courte période (de 1960 à 1967) est excédentaire, le reste de la série étant caractérisé par une alternance d'années déficitaires et excédentaires. Sur la période excédentaire, la moyenne interannuelle du potentiel d'infiltration est de 132,2 mm avec un écart-type de 18,8 mm.

Quant au reste de la série où une alternance d'années déficitaires et excédentaires est notée, la moyenne interannuelle de 1968 à 1993 est de 98,2 mm et l'écart-type de 23,5 mm.



**Fig. 3 : Indices standardisés des paramètres hydrologiques étudiés (1960-2016)**

Source : ANACIM

De façon générale, les différents résultats montrent une période 1961-1970 dominée par des années excédentaires au niveau de l'ensemble des paramètres hydrologiques étudiés. Cette période est suivie d'une phase caractérisée par des années pendant lesquelles les paramètres hydrologiques sont en général déficitaires. Cette phase connaît son paroxysme entre 1970 et 1993. L'analyse permet en outre de mettre en évidence la grande humidité des années 1960 pendant lesquelles les paramètres hydrologiques sont globalement excédentaires, suivi de la grande sécheresse amorcée depuis les années 1970 et qui persiste jusqu'à nos jours malgré un semblant de retour de la pluie à la moyenne de la série depuis les années 2000.

### 3.1.3. Identification des tendances et ruptures au sein des paramètres hydrologiques

Les résultats des tests de détection de tendance (test de Mann-Kendall) et de rupture (test de Pettitt) appliqués aux séries annuelles de pluie, pluie efficace, potentiel de ruissellement et potentiel d'infiltration au cours de la période 1960-2016 sont consignés dans le Tableau 3. Ces indices soumis aux tests de Mann-Kendall et de Pettitt ont révélé d'importantes fluctuations dont les conséquences sur les ressources en eau sont multiples.

Le test de Mann Kendall indique une tendance significativement à la baisse sur toutes les séries. Quant au test de Pettitt, il révèle généralement des années de rupture différentes pour les paramètres hydrologiques étudiés (Cf. Fig. 4). Elle est notée en 1970 pour la pluie, 1975 pour la pluie efficace, 1978 pour le potentiel de ruissellement et 1995 pour l'infiltration.

Une analyse croisée des résultats des différents tests de tous les paramètres montre que les tendances à la baisse et les ruptures souvent significatives (seuil de 5%) ont été identifiées au cours de la décennie 1970. Cette tendance à la baisse des séries annuelles de pluie, de pluie efficace, de potentiel de ruissellement et de potentiel d'infiltration notée sur la décennie 1970 s'est amplifiée au cours de la décennie 1980.

Cette baisse significative est estimée à -0,10 mm/an sur la pluie moyenne annuelle du bassin et sur la pluie efficace, -0,19 mm/an sur le potentiel de ruissellement et -0,13 mm/an sur le potentiel d'infiltration. De part et d'autre de la date de rupture de 1970 (rupture qui marque le début de la sécheresse), les déficits hydrologiques évalués (Tableau 3) sont de -14,2% pour la pluie moyenne, -27% pour la pluie efficace, -49,8% pour le potentiel de ruissellement et -11,4% pour le potentiel d'infiltration.



Ces ruptures climatiques observées dans le bassin pourrait être expliquées par l'action de la North Atlantic

Oscillation (NAO) dont le saut a appuyé les effets du réchauffement global.

**Tab. 3 : Identification de tendance et ruptures au sein des séries hydrologiques (1960-2016)**

Paramètres	Test de Mann-Kendall		Test de Pettitt	
Pluie moyenne annuelle (P)	p-value	0,01	p-value	0,04
	$\tau$ de Kendall	-0,10	Date de rupture	1970
	Pente de Sen	-1,60	Exc. ou Défi. en %	-14,2
Pluie efficace (Pe)	p-value	0,23	p-value	0,04
	$\tau$ de Kendall	-0,10	Date de rupture	1975
	Pente de Sen	-0,63	Exc. ou Défi. en %	-27
Potentiel de ruissellement (R)	p-value	0,03	p-value	0,008
	$\tau$ de Kendall	-0,19*	Date de rupture	1978
	Pente de Sen	-0,51	Exc. ou Défi. en %	-49,8
Potentiel d'infiltration (I)	p-value	0,76	p-value	0,27
	$\tau$ de Kendall	-0,13	Date de rupture	1995
	Pente de Sen	0,08	Exc. ou Défi. en %	-11,4
Evapotranspiration réelle (ETR)	p-value	0,32	p-value	0,05
	$\tau$ de Kendall	-0,09	Date de rupture	1970
	Pente de Sen	-0,86	Exc. ou Défi. en %	-10,9

Source : ANACIM

(-) : tendance négative ; (+) : tendance positive ; (\*) : tendance significative ; (Exc.) : Excédent ; (Défi.) : Déficit

#### 4.4. Les termes du bilan et l'évolution du module du bassin

Pour mieux apprécier l'impact de la variabilité climatique sur les écoulements de surface dans le bassin de la Gambie, les bilans hydrologiques moyens, avant et après

les ruptures observées dans les séries pluviométriques sont calculés (Cf. Tab. 4) et l'évolution des modules annuels du bassin de la Gambie à Gouloumbou indiquée pour illustrer les impacts (Cf. Fig. 4).

**Tab. 4 : Caractéristiques statistiques des paramètres hydrologiques observées (1960-2016)**

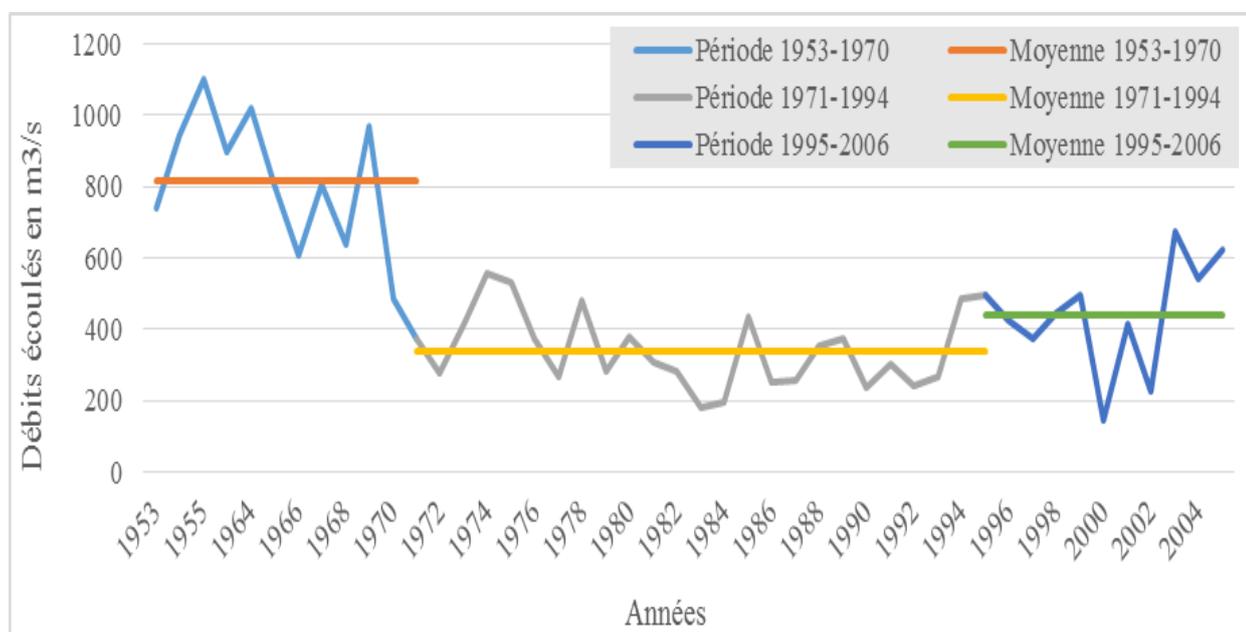
Paramètres	1960-1970		1971-1994		1995-2016	
	Moy (mm)	Proportion (%)	Moy (mm)	Proportion (%)	Moy (mm)	Proportion (%)
Pluie moyenne annuelle (P)	992,6	-	817,5	-	864,1	-
Potentiel d'infiltration (I)	110,1	11,1	97,8	12,0	103,8	12,0
Evapotranspiration réelle (ETR)	789,7	79,6	680,6	83,3	711,3	82,3
Qmm ou Potentiel de ruissellement (R)	92,8	9,4	39,1	4,8	58,4	6,8

Source : ANACIM

Les données des trois périodes (1960-1970, 1971-1994 et 1995-2016) ont révélé d'importantes fluctuations dont les conséquences sur l'environnement sont multiples, d'où l'intérêt de les étudier.

L'analyse des bilans montre la présence d'une tendance à la baisse de tous termes du bilan hydrologiques entre 1960-1970 et 1971-1994, et une autre à la hausse entre 1971-1994 et 1995-2016 (Cf. Tab. 4).

Ainsi, la lame d'eau ruisselée dans le bassin qui était de 92,8 mm sur la période 1960-1970 soit 9,4% de la lame d'eau précipitée (992,6 mm), va connaître d'abord une forte baisse sur la période 1971-1994 (39,1 mm soit 4,8% de la lame d'eau précipitée qui y est de 817,5 mm) suivie par une légère hausse sur la période 1995-2016 (58,4 mm soit 6,8% de la lame d'eau précipitée qui y est de 864,1 mm).



**Fig. 4 : Evolution des débits écoulés dans le bassin de la Gambie à Gouloumbou (1953-2006)**

Source : DGPRE et OMVG

A l'image de la pluviométrie, l'évolution des paramètres hydrologiques qui se reflète sur des débits écoulés du bassin de 1953 à 2006 a montré d'abord une baisse durant les années 1970 avant de reconnaître une hausse à partir de 1994 (Figure 4). Ainsi, le débit moyen écoulé qui était de 819 m<sup>3</sup>/s sur la période 1953-1970, s'est d'abord très fortement baissé avec seulement 337 m<sup>3</sup>/s sur la période 1971-1994 et après a recommencé à augmenter avec 442 m<sup>3</sup>/s sur la période 1995-2016.

### 3.2. Discussion

La caractérisation de la variabilité pluviométrique et l'évaluation de ses impacts sur les principaux paramètres hydrologiques calculés dans le bassin versant de la Gambie sur la période 1960-2016, ont permis de mettre en exergue la variation des conditions hydrologiques. Ces différents résultats montrent qu'en dépit de la sécheresse observée dans le bassin versant de la Gambie, il subsiste à la fois une pluie efficace, un potentiel de ruissellement et un potentiel d'infiltration [12].

Les impacts du changement climatique sur les eaux de surface dans le bassin de la Gambie ont été analysés par l'utilisation des indices standardisés de paramètres hydrologiques (pluie moyenne, pluie efficace, potentiel de ruissellement, potentiel d'infiltration) sur la période 1960-2016. Ces indices analysés connaissent une grande variabilité et décrivent une tendance significative à la baisse, en attestent les  $\tau$  de Kendall négatifs. Ces résultats ont mis en évidence une période excédentaire (décennie 1960) et une autre déficitaire (à partir de 1970) marquée

par une rupture très significative en 1970 comme identifiée à partir du test de Pettitt.

L'impact de la baisse des précipitations dans le bassin versant de la Gambie s'est manifesté par une hausse des déficits qui sont attestés par plusieurs paramètres hydrologiques. Ces déficits hydrologiques évalués varient entre -11,4% (pour le potentiel d'infiltration) et -49,8% (pour le potentiel de ruissellement) en passant par -14,2% pour la pluie moyenne et -27,0% pour la pluie efficace.

Ces résultats montrent une faiblesse des écoulements, et un amenuisement des ressources hydriques dans le bassin versant de la Gambie. Ce déficit qui a débuté durant les années 1970 et s'est amplifié au cours des années 1980, met ainsi en évidence une forte variabilité des conditions hydrologiques à l'image des variations climatiques.

Les déficits hydrologiques sont dans les mêmes grandeurs que ceux obtenus par plusieurs auteurs qui ont mené des études hydrologiques, soit dans le même bassin versant, soit dans d'autres bassins au Sénégal, ou en Afrique. En exemple, les travaux de [12] dans le bassin versant du Bandama indiquent des déficits hydrologiques de -16,32% pour la pluie moyenne, -31,49% pour la pluie efficace, -59,94% pour le potentiel de ruissellement et -15,17% pour le potentiel d'infiltration. Des études réalisées en Afrique par [1], [2] et [3] ont mis en évidence les déficits hydrologiques suite de la baisse de la pluviométrie.

L'amélioration des conditions pluviométriques depuis les années 2000 avec son corolaire la hausse des principaux paramètres hydrologiques notée dans cette étude est en



accord avec les travaux de [8] sur la zone sahélienne, de [10] sur le Burkina Faso, de [9] sur le Niger, de [7] sur la Mauritanie et de [29] sur le Sénégal qui ont indiqué le nouveau changement. Ainsi, au-delà de la sécheresse des années 1970, ce nouveau changement hydrologique s'est encore produit au milieu des années 1990 et est marqué par une hausse des débits des cours d'eau. Cette similitude entre les variations des conditions climatiques et la réponse hydrologique des bassins serait donc d'échelle régionale [30].

Cette nouvelle tendance à la hausse dans le bassin de la Gambie, quoique non significative, correspond à l'amélioration des conditions pluviométriques amorcée à partir des années 1990 et confirme les travaux de [7], de [8], de [9] de [10] et de [29]. Cette variabilité notée est quasi synchrone avec la présence des deux périodes hydroclimatiques (une période sèche entre 1970 et 1994 et une période sèche entre 1995 et 2008). Ainsi, au-delà de la sécheresse hydrologique des années 1970, un nouveau changement hydrologique s'est encore produit au tournant du siècle (années 1990), les débits des cours d'eau connaissant une hausse. Toutefois, les excédents sont moins importants à Gouloumbou avec une valeur de 23,6%.

Les causes des tendances et des ruptures notées sur les écoulements du fleuve Gambie sont recherchées sur les différents bouleversements que ce bassin ait connus, le changement climatique notamment. L'un de ses impacts s'est traduit par la grande sécheresse des années 1970 ([3]; [4]; [9]; [6]) qui a entraîné la baisse de l'écoulement notée durant les années 1970. Dès la décennie 2000, les conditions pluviométriques plus ou moins favorables sont à l'origine de la hausse de l'écoulement noté sur les différentes stations de l'étude.

#### **4. Conclusion**

A la différence du fleuve Sénégal et d'autres bassins d'Afrique sub-saharienne, très peu d'études récentes ont été faites sur la variabilité spatio-temporelle des précipitations et ses incidences sur les écoulements dans le bassin de la Gambie alors que son potentiel en eau est très important. Cette caractérisation a été faite au travers des paramètres hydrologiques en utilisant des tests statistiques non paramétriques (pluie moyenne, pluie efficace, potentiel de ruissellement, potentiel d'infiltration) appliqués aux données de six stations assez bien réparties dans le bassin. Les principaux résultats obtenus ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité hydrologique observée dans le bassin versant de la Gambie au Sénégal. Ces paramètres ont montré les manifestations de la variabilité hydrologique observée dans le bassin versant de la Gambie. Par rapport à la pluie moyenne annuelle, les proportions de ces paramètres hydrologiques sont de 18,2% pour la pluie efficace, 5,20%

pour le potentiel de ruissellement et 13,2% pour le potentiel d'infiltration.

Les différents paramètres hydrologiques analysés varient au cours des années et décrivent une tendance régressive (test de Mann Kendall) marquée par une rupture très significative en 1970 (test de Pettitt). Les disponibilités en eau des bassins sont rythmées par la variabilité hydro-pluviométrique [31]. La très longue période de déficit pluviométrique (1968-1998), suivie du retour des pluies à des niveaux moyens dès 2000, a eu de forts impacts sur les disponibilités en eau de surface dans un bassin aussi vital, la recharge des nappes souterraines et l'assèchement des cours.

Par ailleurs, on note sur la seconde séquence, une nette occurrence des pluies extrêmes et de forte intensité qui augmentent l'occurrence des risques hydrologiques, en attestent les récentes inondations dans plusieurs communes du bassin du fleuve Gambie (Koumpentoum, Kayène, Tambacounda, Koungueul, Nioro du Rip, etc.) et le débordement du *Mamacounda* (affluent du fleuve *Gambie*)...

En perspectives, des recherches devraient s'orienter sur les impacts des changements climatiques sur les écoulements des eaux, la salinisation des sous bassins côtiers du fleuve Gambie surtout dans ce contexte de l'élévation inéluctable du niveau océanique. Il faudra aussi voir les effets des changements climatiques et des d'autres facteurs tels l'imperméabilisation des sols, la dégradation du couvert végétal, les aménagements hydro-agricoles, les prélèvements d'eau sur les écoulements des bassins. Des recherches sur les causes des déficits hydriques observés dans ce bassin au cours du siècle dernier en relation avec la cyclicité des variations climatiques et/ou de l'impact anthropique doivent aussi se faire.

#### **Remerciement**

Les auteurs remercient vivement la Direction de la gestion et de la Planification des Ressources en Eau, l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie et l'Agence Nationale de la Météorologie et de l'Aviation Civile.

#### **Références bibliographiques**

- [1] 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.
- [2] Sighomnou D., 2004 : Analyse et redéfinition des régimes climatiques et Hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé 1, Département des Sciences de la Terre, 291 p.



- [3] Goula B. T. A., Savane I., Konan B., Fadika V., Kouadio G.B. 2005 : Comparative study of climatic variability impact on water resources of N'zo and N'zi watersheds in Côte d'Ivoire – *Sciences & Nature*, 2 (1),10-19.
- [4] Sow A. A., 2007. L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé. Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1232 p.
- [5] 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 (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 p.
- [6] Faye C., Sow A. A. et Ndong J.B., 2015 : Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sècheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 9, 17-35.
- [7] Niang A.J., 2008 : Les processus morphodynamiques, indicateurs de l'état de la désertification dans le Sud-Ouest de la Mauritanie. Approche par analyse multisource. Thèse de Doctorat, Université de Liège (Belgique), 286 p.
- [8] Ali A., Lebel T. et Amami A., 2008 : Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse*, 19 (4), 227-235.
- [9] Ozer P., Hountondji Y.C. et Laminou Manzo O., 2009 : Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'Est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop, Revue de Géographie et d'Écologie Tropicale*, 33, 11 - 30.
- [10] Ouoba A.P., 2013 : Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè. Thèse de Doctorat Unique, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 305 p.
- [11] Sané M., 2015 : Note sur les ressources en eaux du Sénégal : zones potentielles pour le transfert d'eau. Directeur de l'hydraulique, République du Sénégal, 8 p.
- [12] Kouassi A.M., Assoko A.V.S., Kouakou K.E., Dje K.B., Kouame K.F., Biemi J., 2017 : Analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire, *Larhyss Journal*, 31, 19-40.
- [13] Lamagat J.P., 1989. Monographie hydrologique du fleuve Gambie Collection M&m. ORSTOM-OMVG, 250 p.
- [14] Kahya E. and Kalayci S., 2004. Trend Analysis of Stream Flow in Turkey. *Journal of Hydrology*, 289, 128-144.
- [15] Burn D.H. and Elnur M., 2002. Detection of Hydrological Trends and Variability. *Journal of Hydrology*, 255, 107-122.
- [16] Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S. et Marechal J.C., 2010 : Évaluation des ressources en eau de la Martinique : calcul spatialisé de la pluie efficace et validation à l'échelle du bassin versant. *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 23, N°4, 361-373.
- [17] Kouassi A.M., N'Guessan B.T.M., Kouame K.F., Kouame K.A., Okaingni J.C., BIEMI J., 2012 : Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Géoscience*, Tome 344, 288-296.
- [18] Alassane A., 2004 : Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin): identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 145 p.
- [19] N'guessan K., Kouassi A. M., Gnaboa R., Traoré K.S., Houenou P.V., 2014 : Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé : cas de la ville de Yamoussoukro (Centre de la Cote d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 17. 135-154.
- [20] Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Conway D., Dezetter A., 2005 : The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina Faso. *Journal of Hydrology*, Vol. 300, 33-43.
- [21] Servat E., Paturel J. E., Kouame B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J. F., Lubes-Niel H., Fritsch J. M., Masson J.M., Marieu B., 1998 : Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. IAHS Publication, N°252, 323-337.
- [22] Lubes-Niel H., Masson J.M., Paturel J.E., Servat E., 1998 : Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, N° 3, 383-408.
- [23] Pettitt A. N., 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28 (2), 126-135.
- [24] Soro T. D., Soro N., Oga Y. M-S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K. E. et Biémi J., 2011 : « La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) », *Physio-Géo*, Volume 5 | -1, 55-73.



- [25] Ardoin-Bardin, S., 2004 : Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano sahélienne. Thèse de doct. Univ. Montpellier II. 440 p.
- [26] Mann, H.B., 1945: Nonparametric Tests against Trend, *Econometrica*. 13 (3): 245-259.
- [27] Kendall, M., 1975: *Multivariate Analysis*. Charles Griffin & Company, London, 202 p.
- [28] Sen, P.K., 1968 : Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- [29] Bodian A., 2014 : Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, vol. VIII, 297-312.
- [30] GIEC., 2007 : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, 103 p. Ali A. et Lebel T., 2009 : The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29 (12), 1705-1714.
- [31] Mendy A., Morin S., Dacosta H., Kane A., 2017 : Vulnérabilité des ressources en eau et risques de dégradation des milieux des bassins versants de Néma et de Médina Djikoye. *Espaces et Sociétés en Mutation*, 101-120.