



HAL
open science

Changement climatique dans le bassin versant de l'Ogooué : évolution récente et impact sur les écoulements

Valentin Brice Ebode, Gil Mahe, Jean Guy Dzana, Joseph Armathé Amougou, Soleil Batha

► To cite this version:

Valentin Brice Ebode, Gil Mahe, Jean Guy Dzana, Joseph Armathé Amougou, Soleil Batha. Changement climatique dans le bassin versant de l'Ogooué : évolution récente et impact sur les écoulements. *Afrique Science : revue internationale des sciences et technologies*, 2023, 17 (3), pp.110-125. 10.5194/piahs-384-247-2021 . hal-04133923

HAL Id: hal-04133923

<https://hal.science/hal-04133923>

Submitted on 20 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Changement climatique dans le bassin versant de l'Ogooué : évolution récente et impact sur les écoulements

**Valentin Brice EBODE^{1*}, Gil MAHE², Jean Guy DZANA¹, Joseph Armathé AMOUGOU¹
et Romain Armand Soleil BATHA¹**

¹ *Université de Yaoundé 1, Faculté des Arts Lettres et Sciences Humaines, Département de Géographie,
BP 755, Yaoundé, Cameroun*

² *Université de Montpellier-CC 57, HydroSciences Montpellier, 163 rue Auguste Broussonnet,
34090 Montpellier, France*

* Correspondance, courriel : ebodebriso@gmail.com

Résumé

L'objectif de cet article est d'étudier le changement climatique dans le bassin versant de l'Ogooué : évolution récente et impact sur les écoulements. Pour cela, les données hydropluviométriques de ce bassin ont été analysées au moyen du test de Pettitt. Les résultats de cette étude révèlent une diminution statistiquement significative des modules annuels que le test de Pettitt situe en 1972-73, mais rien de tel pour les pluies à ce même pas de temps. Les écarts des moyennes décennales à la moyenne interannuelle montrent cependant des liens plus nets entre ces variables, se traduisant essentiellement par une diminution synchrone au cours des décennies 1970 et 1980. Cette diminution est suivie d'une reprise au cours des deux décennies d'après (1990 et 2000), laquelle s'estompe à nouveau au cours de la décennie 2010. Les écoulements des saisons pluvieuses (printemps et automne) ont enregistré les modifications les plus importantes, suite aux variations des régimes pluviométriques des saisons sèches (hiver et été) qui les précèdent. La saison sèche d'hiver a connu entre les décennies 1970-1990 une diminution importante des précipitations qui a provoqué une chute des écoulements du printemps. Le rehaussement et la flexion respectivement notés au cours des décennies 2000 et 2010 s'accompagnent des mêmes tendances dans les écoulements du printemps. A l'inverse, entre les décennies 1980-1990, il a été noté une hausse conjointe des pluies d'été et des écoulements d'automne. La flexion des pluies d'été observée depuis la décennie 2000 est également perceptible dans les écoulements d'automne. Ces résultats pourraient servir à renforcer les capacités de gestion des ressources en eau dans le bassin versant concerné et dans la région. Ils apportent également de nouveaux éléments pour étudier et comprendre la variation saisonnière et la disponibilité de l'eau douce en aval, dans les estuaires et les zones côtières des rivières régionales.

Mots-clés : *changement climatique, pluies, rupture, écoulements, Ogooué.*

Abstract

Climate change in the Ogooué watershed: recent trend and impact on flows

The objective of this article is to study climate change in the Ogooué watershed: recent evolution and impact on flows. For this, the hydropluviometric data of this basin were analyzed using the Pettitt test. The results of this study reveal a statistically significant decrease in runoff that the Pettitt test situates in 1972-73, but nothing like that for rainfall at this same time scale. The decadal deviations from the inter-annual average,

however, show clearer links between these variables, resulting mainly in a synchronous decrease during the 1970s and 1980s. This decrease is followed by an increase during the 1990s and 2000s, which diminished again during the 2010s. The flows of the rainy seasons (spring and autumn) recorded the most significant modifications, following variations in the rainfall patterns of the dry seasons (winter and summer) that precede them. The winter dry season recorded a significant decrease in rainfall between the decades 1970 and 1990, which caused a drop in spring flows. The increasing and decreasing respectively noted during the 2000s and 2010s are accompanied by the same trends in the spring flows. Conversely, between the decades 1980 and 1990, there was a joint increase in summer rainfall and autumn flows. The decrease in summer rainfall observed since the 2000s is also noticeable in the autumn flows. These results could be used to strengthen water resources management capacities in the watershed concerned and the region. They also provide new insights to study and understand seasonal variation and availability of freshwater downstream, in estuaries and coastal areas of regional rivers.

Keywords : *climate change, rainfall, discontinuity, runoff, Ogooué.*

1. Introduction

L'intérêt consacré à la compréhension de la variabilité climatique en Afrique centrale provient de son impact sur les écoulements, et ainsi sur les économies des pays en développement de cette région [1, 2]. L'Ogooué, l'un des plus grands fleuves d'Afrique centrale équatoriale par sa longueur (environ 1000 km), constitue un énorme espoir de vitalité pour les populations des pays qu'il traverse. Prenant sa source au Congo-Brazzaville, dans la partie occidentale des plateaux Batékés, sur les monts Massa, il parcourt essentiellement le territoire gabonais avant de se jeter dans l'océan Atlantique. Ce fleuve a fait l'objet d'un nombre relativement modeste de pertinentes études tant hydrologiques que climatologiques depuis le début de ce vingtième siècle ; et pour cause, le manque de données d'observation sur cette période [3-5]. Pourtant, dans le contexte du changement global actuel, il est très important de pouvoir caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations sur la base des données fiables, afin d'évaluer correctement son impact sur les ressources en eau [6, 7]. Le peu d'études existantes sur ce bassin a porté aussi bien sur l'évaluation de la ressource en eau que sur des projets d'aménagements potentiels dans les domaines hydro-agricole et hydro-électrique ou encore sur la propagation des crues [8 - 13]. La station de Lambaréné est parmi les plus anciennes et l'une des mieux étudiées sur ce cours d'eau. Les études sur cette station [11, 12] ont montré des modifications du régime hydrologique du fleuve à partir de la décennie 1970.

Bien qu'ayant déjà une certaine connaissance des modifications du régime de l'Ogooué à cette station grâce au peu d'investigations similaires qui ont porté sur ce bassin au paravent, il convient de l'actualiser en intégrant les données des deux récentes décennies, compte tenu de ce que la quasi-totalité de ces études utilisent des données qui n'excèdent pas la décennie 1990. La présente étude se propose de présenter les différentes variations temporelles des précipitations et des écoulements sur la période 1929-30 à 2017-18. Une telle étude semble fondamentale pour ce cours d'eau qui est la principale source d'approvisionnement en eau potable et en ressources halieutiques du Gabon, dont les diminutions récentes sont partiellement attribuées aux changements hydroclimatiques. Elle s'avère davantage utile dans la mesure où plusieurs barrages ont été construits sur ce bassin dans le but d'optimiser la production électrique dans la quasi-totalité du pays. Il n'est plus à espérer que les résultats de cette étude renforcent le débat sur la question, étant donné que le rationnement dans la distribution électrique de plusieurs régions au Gabon est attribué aux changements climatiques. Le principal objectif de cet article est d'évaluer l'évolution des débits de l'Ogooué, en réponse au changement climatique actuel. Nous proposons pour cela une étude sur ce bassin à partir des séries hydropluviométriques actualisées.

2. Matériel et méthodes

2-1. Cadre d'étude

L'étude porte sur le bassin versant de l'Ogooué à Lambaréné (215 000 km²). Ce bassin est situé en Afrique centrale, approximativement entre les latitudes 2°42' N et 3°10' S et les longitudes 10°9' E et 14°30' E (*Figure 1*). Il appartient au domaine équatorial avec des précipitations abondantes (*Tableau 1*). Il s'agit d'un bassin équatorial, avec des précipitations annuelles oscillant autour de 1800 mm, réparties sur quatre saisons d'inégale importance, dont deux sèches et deux pluvieuses. Les saisons de pluies (printemps et automne boréal) sont généralement très humides avec des totaux records avoisinant 900 mm et marquées par de nombreux orages qui occasionnent parfois des crues importantes. La saison sèche d'été (juin-août) ayant tendance à devenir de plus en plus humide dans la région depuis les années 80 [14], est la seule véritable saison sèche de l'année, avec des précipitations moyennes oscillant autour de 200 mm. Le bassin de l'Ogooué est disséqué, profondément raviné et découpés en collines aux versants convexes et en larges vallées marécageuses. Il est observé sur ce dernier de part et d'autre du cours d'eau principal, un paysage topographique en gradins qui semblent être la résultante d'une tectonique cassante. Le substratum géologique de ce bassin est constitué d'un socle granito-gneissique sur lequel se développent des sols ferrallitiques (sur les sommets et les versants) et hydromorphes (dans les bas-fonds). La végétation rencontrée sur ce bassin est une forêt dense semi-décidue à Sterculiacées et Ulmacées fortement soumise aux actions anthropiques [15].

Tableau 1 : Répartition saisonnière des précipitations annuelles en mm sur le bassin étudié

Bassin versant	Cumul annuel	Printemps (mars-mai)	Été (Juin-Août)	Automne (septembre-novembre)	Hiver (décembre-février)
Ogooué	1810	570	210	650	390

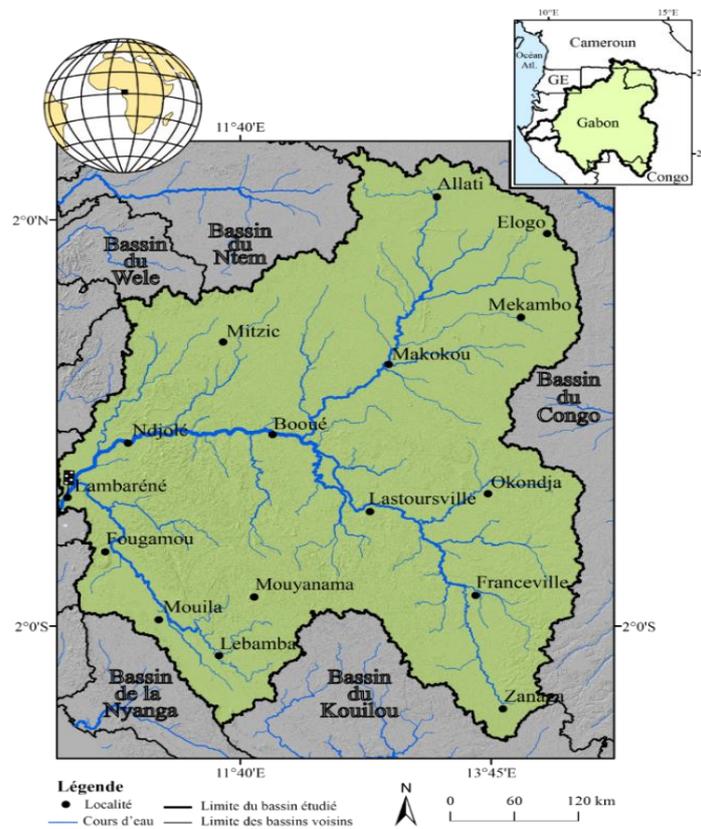


Figure 1 : Localisation du bassin versant de l'Ogooué à Lambaréné

2-2. Sources des données

Les données hydroclimatiques ont été utilisées dans ce travail. Les débits de l'Ogooué proviennent du SIEREM (Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eaux et leur Modélisation). Elles contiennent des lacunes sur les intervalles 1950-1953 et 1989-2000. Pour pouvoir apprécier sur la période d'étude l'effet de la variabilité des pluies sur les réserves souterraines et par conséquent sur l'écoulement, les débits de base ont été extraits à partir du filtre récursif Aquapak, en téléchargement libre sur : http://www.skmconsulting.com/Markets/environmental/resource_management. Cet outil a permis de séparer les débits de base (contribution des réserves souterraines à l'écoulement total) des débits totaux. Les séries pluviométriques proviennent de deux sources. Sur la période 1950-1999, les grilles de pluies SIEREM ont été utilisées. SIEREM [16] est une base de données reposant sur un schéma générique permettant la gestion d'une information hydroclimatique mais aussi environnementale sur l'Afrique. Cette base de données a été mise au point par le Laboratoire HydroSciences Montpellier-HSM, à partir d'un fond de données pluviométriques (environ 7000 points de mesure) africaines, hérité entre autre de l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer), et de son expérience en gestion des bases de données hydroclimatiques en région intertropicale [10, 17]. Parmi ses produits de valorisation, SIEREM propose des grilles de pluviométrie mensuelle sur la période 1940 - 1999. Leur unité d'espace est une maille de surface $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, soit approximativement 2 750 km² dans la zone considérée [18]. Les pas d'espace et de temps choisis semblent les résolutions les plus aptes à pouvoir apprécier, à la fois, les impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur les ressources en eau [19]. Les grilles en question sont en accès libre aux formats ASCII et NetCDF sur le site <http://www.hydrosciences.org/spip.php?article1387>. Avant toute utilisation, il a fallu les évaluer au moyen des comparaisons avec les pluies stationnelles.

Entre 2000 et 2017, le choix a été porté sur les estimations de pluies TRMM 3B42 V7, remplacées par les pluies GPM (Global Precipitation Measurement) depuis 2015. La plateforme TRMM a été lancée en 1997, construite conjointement par les Etats-Unis et le Japon. Elle offre plusieurs jeux de données pré-calibrés, au rang desquels, le produit journalier TRMM 3B42 V7 à une résolution spatiale de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Ces données combinent des synthèses d'images TRMM et d'autres données satellitaires [20]. Ainsi, les capteurs micro-ondes des satellites AQUA, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) et les données visible/infrarouge des satellites géostationnaires sont pris en compte dans les algorithmes d'estimation des précipitations [20]. Ces estimations sont ensuite ajustées en incorporant les mesures climatiques mensuelles au sol des réseaux GPCP (Global Precipitation Climatology Project) et CAMS (Climate Assessment and Monitoring System) pour donner les produits mensuels TRMM 3B43. Les coefficients d'ajustement calculés pour ce produit sont enfin appliqués aux données journalières pour donner le produit final TRMM 3B42, version 7 [20]. Les données GPM sont celles du programme GPM Core Observatory. Egalement mis au point par les Etats-Unis et le Japon, ce programme a pour objectif de mesurer les précipitations de manière globale et met en œuvre plusieurs satellites dont le principal est GPM Core Observatory. L'ensemble de ces estimations de pluies sont téléchargeables gratuitement sur le site <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>, au format ASCII. Les cumuls mensuels des pluies TRMM et GPM calculés ont d'abord été validés au moyen des comparaisons avec les pluies SIEREM sur les années de disponibilité commune (1998 et 1999). Les coefficients de correction ont par la suite été établis dans le cas des mois pour lesquels les écarts entre les deux sources étaient importants.

2-3. Analyse des données

L'analyse des pluies, des débits moyens, des débits de base et des coefficients d'écoulement a été réalisée à l'aide de tests statistiques de détection de rupture (corrélation sur le rang et test de Pettitt; [21]) au seuil de signification 95 %. Le test de Pettitt semble être le plus approprié pour l'analyse des séries lacunaires, parce

qu'il sépare la série uniquement en deux périodes ayant un comportement globalement distinct, ce qui évite la détection des fausses ruptures comme on peut parfois l'observer avec d'autres tests comme la segmentation d'Hubert. Son choix au détriment des tests de tendance (test de Mann-Kendall par exemple) se justifie par le fait qu'il indique une date à partir de laquelle le changement devient significatif statistiquement parlant (rupture), ce qui permet une meilleure appréciation de la variabilité. Son principe consiste à diviser la série étudiée (d'effectif N) en deux sous échantillons de tailles m et n respectivement. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous échantillon dans l'échantillon total. Une étude statistique est ensuite réalisée à partir des deux sommes ainsi déterminées, puis elle est testée selon l'hypothèse d'aucune appartenance des deux sous échantillons à la même population. Le test de Pettitt est non paramétrique et dérive de celui de Mann Whitney. L'absence de rupture dans la série (Xi) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Sa mise en œuvre suppose que pour tout instant T compris entre 1 et N, les séries chronologiques (Xi)_{i-1} à t et t + 1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable U t, N défini par :

$$U_{t, N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \tag{1}$$

où, $D_{ij} = \text{Signe}(X_i - X_j)$ avec : $\text{signe}(x) = 1$ si $x > 0$, 0 et -1 si $x < 0$

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant définissant le maximum en valeur absolue de la variable U t, N. Dans l'optique d'apprécier le comportement des débits extrêmes, l'outil Indicators of Hydrologic Alteration (IHA), version 7.1, développé par The Nature Conservancy a été utilisé. Cet outil offre la possibilité de comparer les paramètres caractérisant les régimes d'écoulements sous différentes conditions [22]. Il utilise les valeurs journalières de débits et produit plusieurs statistiques importantes. On s'intéressera uniquement à 4 d'entre elles jugées essentielles pour cette étude, parmi lesquelles : la moyenne et le coefficient de variation des différentes gammes de débits extrême, la date julienne du minimum et maximum annuel. En divisant la série de valeurs en période avant et après la rupture, l'outil calcule le changement survenu dans l'évolution de chacun de ces paramètres après la rupture. On peut ainsi être fixé après l'analyse, non seulement sur le sens de variation entre les deux périodes, mais aussi sur l'écart entre les valeurs de ces mêmes périodes.

3. Résultats

3-1. Évolution des précipitations annuelles et saisonnières

Les précipitations annuelles du bassin versant de l'Ogooué évoluent de manière non significative à la diminution entre 1940-41 et 2017-18 (*Figure 2*). Le test de Pettitt ne détecte d'ailleurs aucune rupture dans leur série chronologique. L'analyse des moyennes décennales révèle cependant dans leur évolution, une alternance des séquences sèches et humides plus ou moins longues. Ainsi, il a été observé au cours des décennies 1990 et 2000 une légère reprise consécutive à la sécheresse des décennies 1970 et 1980, qui semble avoir été interrompue à nouveau au cours de la décennie 2010 (*Tableau 2*). Les pluies des deux saisons sèches évoluent différemment sur le bassin versant de l'Ogooué (*Figure 2*). Les cumuls de la saison sèche d'été évoluent statistiquement à la hausse entre 1940-41 et 2017-18. Le test de Pettitt met en évidence dans leur série chronologique une rupture en 1979-80 (*Figure 2*). Le surplus par rapport à la moyenne enregistré suite à cette dernière est estimé +12,5 %. Pourtant excédentaire dans son ensemble, il est observé pour les précipitations de cette saison un relâchement progressif après la forte augmentation des décennies 1980 et 1990. Ce relâchement devient davantage important au cours de la décennie 2010, pour laquelle il est noté un écart négatif par rapport à la moyenne interannuelle de -3,2 % (*Tableau 2*). Les pluies

de la saison sèche d'hiver évoluent de manière non significative à la baisse. Cependant, on observe dans leur évolution une chute progressive entre les décennies 1970 et 1990, puis un relèvement au cours des deux décennies d'après, qui semble quand-même beaucoup plus important pour la décennie 2000 (*Tableau 2*). Les cumuls des saisons pluvieuses (automne et printemps) n'ont pas connu de diminution significative d'après le test de Pettitt. Les écarts des moyennes décennales à la moyenne interannuelle sont certes faibles dans l'ensemble, mais ils laissent transparaître comme dans le cas des totaux annuels, plusieurs séquences aux tendances évolutives différentes (*Tableau 2*). De l'analyse de ces écarts, il ressort que les pluies du printemps ont diminué de -2 % et -4,5 % au cours des décennies 1970 et 1980. Mais depuis le début de la décennie 1990, on note en général dans leur évolution un très léger rehaussement (*Tableau 2*). Dans le cas des pluies d'automne, une hausse de +1,5 et +4,3 % a été enregistrée durant les décennies 1980 et 1990, suivie d'une faible diminution depuis la décennie 2000.

3-2. Évolution des débits

3-2-1. Débits moyens

Les modules annuels de l'Ogooué évoluent de manière statistiquement significative à la baisse sur la période étudiée (*Figure 2*). Le test de Pettitt met en évidence dans leur série chronologique, deux principales périodes homogènes, séparées par une rupture majeure intervenue en 1972-73. La séquence homogène allant 1929-30 à 1972-73 est humide. Elle a un surplus par rapport à la moyenne interannuelle estimé à +5,4 % (*Figure 2*). La période comprise entre 1973-74 et 2017-2018 est sèche. La diminution par rapport à la moyenne interannuelle enregistrée durant cette dernière est de l'ordre de -6,3 %. Bien qu'elle soit déficitaire, cette seconde période a connu une légère reprise durant la décennie 2000. Mais la rechute (-13,2 %) qui s'en est suivie au cours de la décennie 2010 est la plus importante jamais observée (*Tableau 2*). L'examen des débits moyens des saisons sèches (été et hiver) montre une diminution statistiquement significative dans les deux cas (*Figure 2*). Le test de Pettitt situe une discontinuité dans la chronique des débits moyens d'été en 1950-51. La séquence qui intervient avant cette rupture est relativement stable et correspond à la période humide. Son surplus par rapport à la moyenne interannuelle est de +17,2 %. Celle intervenant après la rupture est sèche. Sa pénurie par rapport à la moyenne s'élève -4,8 %. Entamé assez timidement depuis la décennie 1950, la diminution des débits moyens d'été s'est intensifiée au courant de la décennie 2010 (*Tableau 2*), pour laquelle il a été enregistré l'écart négatif à la moyenne interannuelle le plus important de l'ensemble des décennies constituant la période d'observation (-12,1 %). Dans le cas des débits moyens d'hiver, le test de Pettitt décèle dans leur chronique une rupture un peu plus tardive qui se situe en 1969-70. La séquence humide située avant cette rupture a excédent par rapport à la moyenne de +6,3 %. La séquence sèche située après a un écart à la moyenne de -6,4 %. La diminution des débits moyens d'hiver entamée depuis la décennie 1970 a été stoppée momentanément durant la décennie 2000 pour reprendre de façon plus importante au cours de la décennie 2010 (*Tableau 2*). Les débits moyens des deux saisons de pluies évoluent différemment. Si ceux du printemps diminuent significativement, tel n'est pas le cas pour ceux d'automne (*Figure 2*). Le test de Pettitt identifie dans la série des débits moyens du printemps une rupture majeure intervenue en 1970-71 (*Figure 2*). Avant cette rupture, on a une période humide dont le surplus par rapport à la moyenne est de +9,5 %. La période située après la rupture est par contre sèche. Son déficit est de -10,3 %. Les débits moyens d'automne n'évoluent pas statistiquement parlant certes (*Figure 2*), mais les écarts décennaux à la moyenne interannuelle révèlent dans l'évolution des écoulements de cette saison, une reprise considérable, entre les décennies 1970 et 2000. Elle est suivie d'une baisse importante au cours de la décennie 2010 (*Tableau 4*).

3-2-2. Débits extrêmes

Une rupture marquant la diminution des modules de l'Ogooué a été identifiée dans leur série en 1972-73. Après cette rupture, on note une diminution des diverses gammes de débits maximums (*Tableau 3*). Cette diminution s'est amplifiée au fil du temps pour atteindre des taux record au cours de la décennie 2010 (*Tableau 4*). De véritables particularités ne subsistent pas d'une gamme à l'autre, quant aux taux de variation notés après la rupture (*Tableau 3*), tous étant en effet compris entre -10,3 % (pour les débits maximums sur 1 et 3 jours), et -8,2 % (pour le débit maximum sur 30 jours). La variabilité des débits maximums demeure modeste dans l'ensemble, avec des coefficients de variation oscillant entre 21 % et 23 % avant la rupture, et entre 25 % et 28 % après (*Tableau 3*). Les maximums annuels se produisent un peu plus tard après la rupture, leur date julienne moyenne d'apparition a été décalée de 33 jours (*Tableau 3*). Ce décalage n'est pas négligeable, il traduit manifestement une légère altération du rythme du cycle hydrologique dans ce bassin sur ce plan. Il semble d'ailleurs au regard dudit décalage que, le maximum intervient au cours de la même saison durant les deux périodes, mais pas au cours du même mois. Les débits minimums de l'Ogooué évoluent similairement aux maximums. Toutes leurs gammes ont également connu des diminutions après la rupture (*Tableau 3*). On note par ailleurs une proximité importante d'une gamme à l'autre au niveau du taux de variation après la rupture. Ces taux sont compris entre -4,3 % et -7,9 % (*Tableau 3*). L'analyse des écarts décennaux à la moyenne interannuelle de ces différentes gammes de débits révèle une brève interruption de la tendance déficitaire de cette seconde période au cours de la décennie 2000 (*Tableau 4*). Les coefficients de variation des débits minimums ont connu une légère diminution. Leurs valeurs sont comprises entre 19 % et 21 % avant la rupture, et entre 14 % et 17 % après (*Tableau 3*). Les minimums annuels interviennent un peu plus tard après la rupture sur ce bassin. Leur date julienne moyenne d'apparition est passée de 237 avant la rupture à 242 après (*Tableau 3*).

3-3. Sensibilité des écoulements moyens et extrêmes aux variations interannuelles des précipitations

3-3-1. Écoulements moyens

Il est certes vrai que les stationnarités des pluies et des écoulements ne montrent pas de liens apparents sur le bassin versant de l'Ogooué aux pas de temps étudiés (annuel et saisonnier), mais l'analyse des écarts décennaux à la moyenne interannuelle montre des liens relativement importants entre ces variables. Au pas de temps annuel, les tendances observées pour les précipitations entre les décennies 1970-1980 (baisse), 1990-2000 (rehaussement) et au cours de la décennie 2010 (rechute) sont identiques à celles enregistrées pour les écoulements (*Tableau 2*). On remarque cependant une diminution de débits plus forte que celle des pluies. Ceci ne pourrait s'expliquer que par une diminution des apports souterrains, ce que semble corroborer l'étude des débits de base (*Figure 3 et Tableau 2*). En effet, les débits de base diminuent considérablement, ce qui indique une vidange des nappes. Après les séries de sécheresse des années 1970 et 1980, on a assisté à un appauvrissement sévère des nappes phréatiques si bien que l'amélioration de la pluviométrie des décennies 1990 et 2000 sur le bassin n'a pas pu entraîner leur reconstitution. C'est ce qui a entraîné des disproportions parfois importantes entre les diminutions de la pluviométrie et de l'écoulement à partir de la décennie 1970. En saisons de pluies, s'agissant d'abord du printemps, les précipitations ont évolué modérément, de sorte qu'aucune rupture n'a été détectée dans leur série. A l'inverse, les débits de base, les débits moyens et les coefficients d'écoulement de cette saison diminuent de manière statistiquement significative depuis la décennie 1970 (*Figures 2 et 3*). De même, l'examen des écarts à la moyenne de ces variables montre généralement des diminutions importantes pour ces mêmes variables, pendant que les pluies ne diminuent pas ou diminuent peu (*Tableau 2*). Le fléchissement des pluies d'hiver depuis la décennie 1970 semble être en rapport étroit avec celui des écoulements du printemps. Le rythme d'évolutions de ces

deux variables au fil des décennies est similaire. Cela est clairement visible au cours de la décennie 2000 pour laquelle, une hausse des pluies d'hiver a entraîné un relèvement considérable des débits de base, des coefficients d'écoulement et des débits du printemps (*Tableau 2*). Il en est de même au cours de la décennie d'après où un fléchissement des pluies d'hiver est synchrone avec celui des variables d'écoulement étudiées, pendant que les pluies du printemps ont diminué elles-mêmes d'environ 2 %. Cette influence des précipitations d'hiver sur les écoulements du printemps a déjà été suggérée dans la région [14]. Ces auteurs soutiennent qu'à partir de la décennie 1970, la baisse des pluies d'hiver crée un plus important déficit hydrique (évaporation et réserve en eau du sol) du bassin versant au début de la première saison des pluies du printemps. Cette aridification de l'hiver fait qu'une partie plus importante des précipitations reçues pendant le printemps participe d'abord au comblement de ce déficit hydrique, et donc la fraction qui génère effectivement les écoulements se trouve réduite. Ce qui se traduit alors par des lames écoulées plus faibles pour les mêmes hauteurs moyennes de précipitations durant le printemps, c'est ce qui explique la baisse du coefficient d'écoulement (*Figure 3*). En automne, les pluies et les écoulements diminuent très légèrement sur l'ensemble de la période d'étude. Mais cependant, au cours des décennies 1980 et 2000, les variables d'écoulement augmentent, alors que les pluies ne varient pas beaucoup dans l'ensemble. Cette augmentation résulterait de la hausse des pluies d'été. L'impact des précipitations d'été sur les écoulements d'automne est davantage perceptible durant les décennies 2010 pour laquelle il est noté une diminution conjointe des pluies d'été, débits de base, des coefficients d'écoulement et des débits d'automne, malgré une variation négligeable des pluies d'automne (*Tableau 2*). Au regard de ces évolutions, il ressort que, l'augmentation des pluies au cours de la saison sèche d'été durant les décennies allant de 1970-1990, réduit considérablement le déficit d'évaporation et des réserves en eau du sol au début de la saison de pluies d'automne, favorisant le ruissellement [14]. La partie des précipitations qui participe effectivement à l'écoulement s'accroît, d'où une augmentation du coefficient d'écoulement d'automne au cours de ces décennies (*Tableau 2*).

La diminution des pluies d'été durant les décennies 2000 et 2010 entraîne l'effet inverse, c'est pourquoi il est noté au cours de ces dernières une réduction des coefficients d'écoulement, responsable d'une baisse des débits (*Figure 3*). En saison sèche d'été, on remarque que les précipitations augmentent de manière statistiquement significative, pendant que les écoulements diminuent significativement. Ces tendances opposées pourraient s'expliquer par le fait que les écoulements d'été sont en partie liés aux volumes précipités durant le printemps qui intervient juste avant. Raison pour laquelle on peut relever dans l'évolution des écoulements d'été, des décennies sèches, alors que la pluviométrie a été abondante au cours de ces dernières. C'est le cas des décennies 1980 et 2000 pour lesquelles il a été enregistré des surplus par rapport à la moyenne pour les pluies d'été, mais des pénuries à la fois pour les pluies du printemps et les variables d'écoulements en été. Cependant, les variations des précipitations d'été elles-mêmes semblent aussi être en rapport avec celles des écoulements de cette saison. Ils participent en cas d'évolution modérée des pluies du printemps, au maintien des écoulements dans certains cas, ou à leur diminution dans d'autres. Ce dernier cas de figure est observé au cours de la décennie 2010, où les précipitations du printemps ont légèrement augmenté, mais une diminution des pluies d'été est concomitante avec une baisse des écoulements dans le bassin (*Tableau 2*). En hiver, les précipitations et les débits diminuent suivant des ampleurs différentes. La stationnarité de ces deux variables ne laisse pas apparaître de lien apparent dans ce bassin, mais cependant, l'analyse des écarts à la moyenne montre des liens plus nets entre pluies et débits depuis le début de la sécheresse entamée durant la décennie 1970 (*Tableau 2*). La succession de séquences pluviométriques déficitaires qui se sont enchaînées entre les décennies 1970 et 1980 ont également entraîné des déficits au niveau des écoulements. De même, la reprise des pluies observée durant la décennie 2000 a provoqué une recrudescence des écoulements, qui s'est à nouveau interrompue au cours de la décennie 2010, suite à la rechute des pluies (*Tableau 2*).

Tableau 2 : *Ecart (%) des moyennes décennales annuelles et saisonnières des pluies, débits, débits de base et coefficients d'écoulement par rapport à leurs moyennes interannuelles sur le bassin étudié*

Variables	Périodes	Ecart à la moyenne interannuelle (%)				
		Annuel	Printemps	Été	Automne	Hiver
Précipitations	1940-49	-0,5	-2,8	29,6	-3,5	-8,1
	1950-59	-1,7	2,1	-31,1	-1,1	7,5
	1960-69	1,7	7,5	-28,8	0,9	11,1
	1970-79	-2,7	-1,9	-7,6	-1,4	-3,4
	1980-89	-3,1	-5,9	10	1,5	-14,7
	1990-99	2,3	0,9	20,3	4,3	-8,6
	2000-09	4,2	-1,3	12,1	-0,1	15,5
	2010-17	-1	1,9	-3,1	-1	0,2
Débits	1930-39	8,8	8,2	17,4	-1,5	13,6
	1940-49	14,9	17,7	17,3	12,7	12,7
	1950-59	-5,1	-2,4	-8,8	-4,5	-6,3
	1960-69	5,9	11,3	4,3	1,9	4,9
	1970-79	-4,6	-3,4	-6,3	-2,6	-6,8
	1980-88	-8,6	-17,8	-10,5	6,1	-10,9
	1990	-	-	-	-	-
	2001-09	0,1	-3,2	-4	1,5	4,6
2010-17	-13,2	-11,6	-15,1	-14,2	-13,1	
Débits de base	1930-39	14,1	10	21	5,3	18,2
	1940-49	23,4	22,5	22,5	22,5	23,1
	1950-59	-6,6	-11,9	-7,1	-3,3	-4,8
	1960-69	10,6	12,5	8,2	8,3	9,3
	1970-79	0,6	0,3	-1,2	2,5	-1,3
	1980-88	-33,5	-26	-22,3	-11,6	-22,8
	1990	-	-	-	-	-
	2001-09	6,5	2,5	-1,4	9,6	11
2010-17	-10,4	-10,1	-10,1	-14,4	-10	
Ke	1940-49	7,5	20,9	-15,9	17,1	19,8
	1950-59	11,6	-2,7	39,2	-6,3	-1,6
	1960-69	13,6	3,1	42,7	-3,4	-4,7
	1970-79	-3,7	-2,3	-5,8	-5,2	-2
	1980-88	-8,5	-12,7	-24,5	2,4	6,8
	1990	-	-	-	-	-
	2001-09	-7,6	1,3	-18,6	7,3	-9,5
	2010-17	-12,4	-8,4	-17,8	-14,2	-8,9

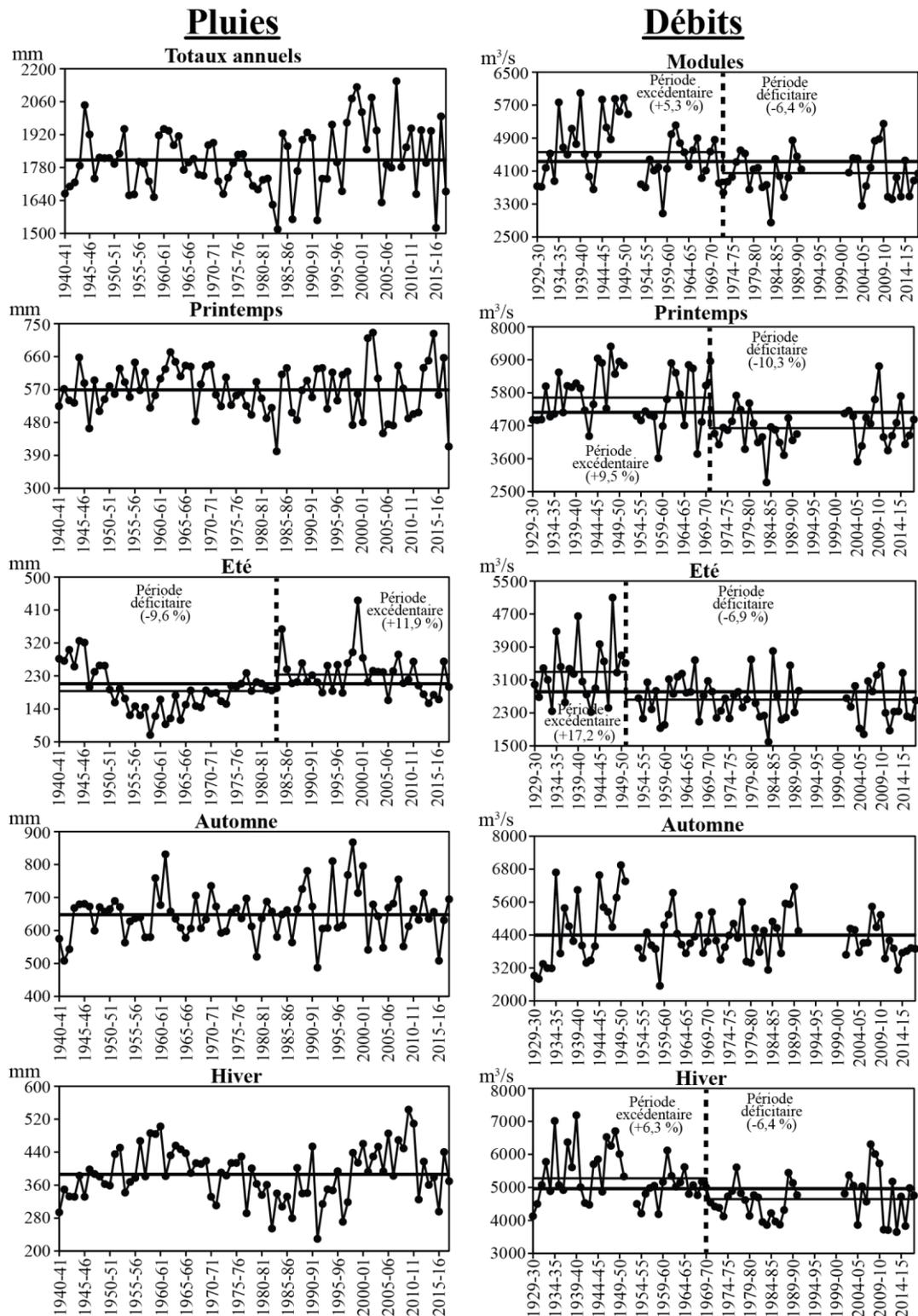


Figure 2 : Évolution des pluies et débits moyens annuels et saisonniers du bassin du l'Ogooué sur leurs périodes d'études respectives

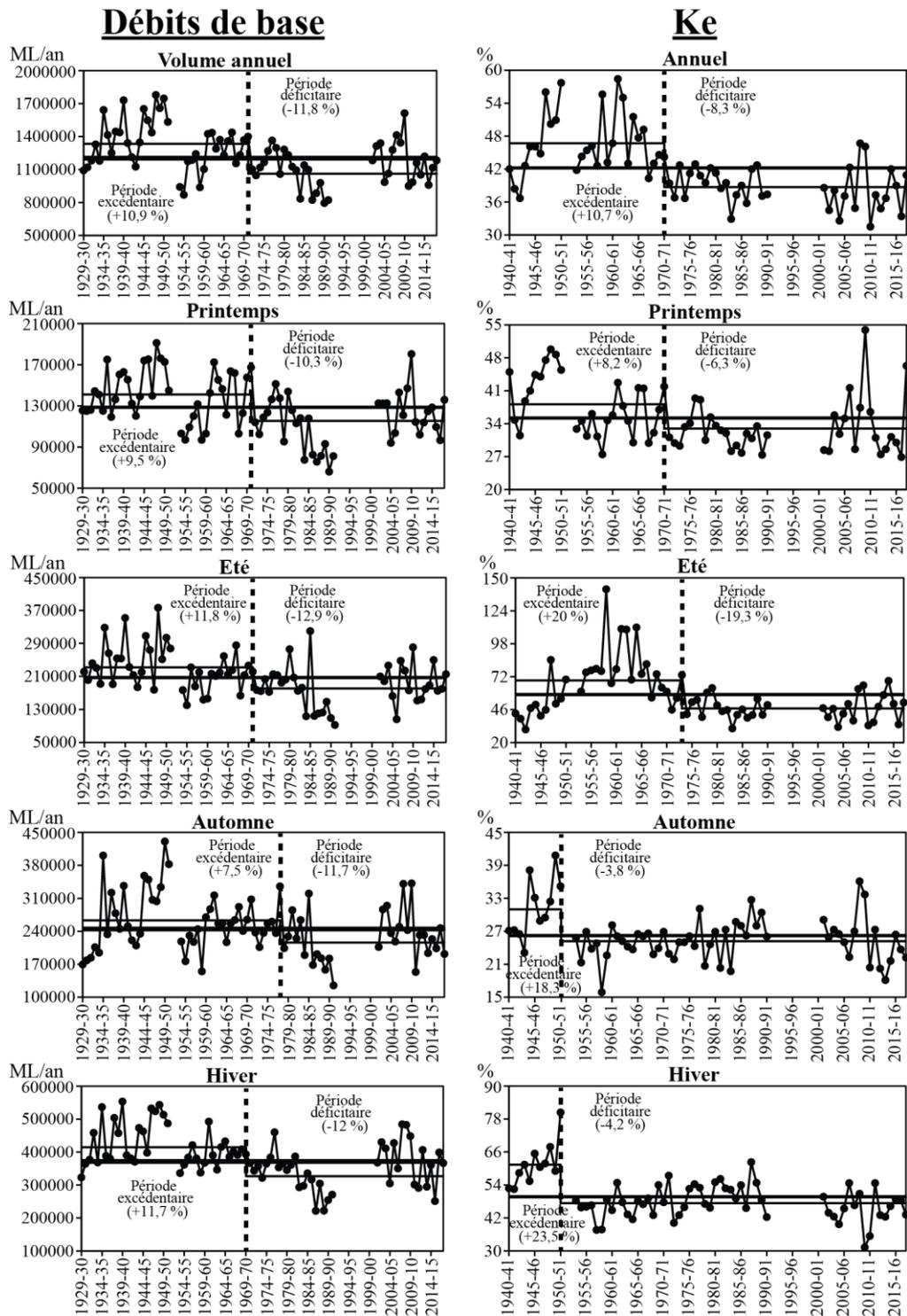


Figure 3 : Évolution débits de base et coefficients d'écoulement (Ke) annuels et saisonniers du bassin de l'Ogooué sur leurs périodes d'études respectives

3-3-2. Écoulements extrêmes

De même que les écoulements moyens, on constate une sensibilité importante des écoulements extrêmes aux variations pluviométriques enregistrées sur le bassin versant de l'Ogooué entre 1940-41 et 2017-18. La diminution générale des pluies notée depuis la décennie 1970 pourrait être à l'origine de celles des différentes gammes d'écoulements maximums et minimums enregistrée (Tableau 3). L'analyse des écarts

décennaux à la moyenne interannuelle de ces extrêmes se révèle très instructive à ce sujet. Elle montre dans le cas des minimums des liens importants avec les pluies du printemps et d'été (*Tableaux 2 et 4*). La diminution des différentes gammes de débits minimums durant les décennies 1970 et 1980, pourrait être en partie liée à celle des pluies du printemps qui ont une influence non négligeable sur les écoulements d'été durant lesquels sont généralement observés les minimums. Dans le même intervalle, il est enregistré une augmentation des pluies d'été qui ne saurait expliquer l'évolution des minimums. Au cours des décennies 2000 et 2010 par contre, les minimums semblent beaucoup plus dépendants des pluies d'été elles-mêmes, compte tenu de ce que les pluies du printemps évoluent en sens inverse durant chacune de ces décennies. Sur la période 1960-1980, il a été observé un relèvement des maximums de 1 à 30 jours pouvant être lié à l'effet conjugué des pluies d'été et d'automne, qui sur cet intervalle évoluent soit conjointement, soit individuellement à la hausse (*Tableau 4*). La diminution de ces mêmes gammes de maximums au cours des deux dernières décennies pourrait également être attribuée au relâchement des pluies de ces deux saisons. Sur le bassin de l'Ogooué, les maximums sur 90 jours sont généralement observés en hiver. Ainsi, leur diminution depuis la décennie 1970 semble être la conséquence de la baisse des pluies de cette saison à compter de cette décennie. Ce postulat s'avère davantage vrai dans la mesure où la décennie 2000 pour laquelle il a été enregistré un important relèvement des pluies d'hiver se trouve également être celle pour laquelle la diminution des maximums sur 90 jours a été périodiquement interrompue (*Tableaux 2 et 4*). S'agissant des dates d'occurrence des extrêmes, dans le cas des minimums, le léger retard observé pour leur date moyenne d'apparition peut s'expliquer par la hausse des pluies d'été qui les génèrent depuis la décennie 1970. Cette augmentation contribue à une recharge plus importante de la nappe qui soutient un peu plus longtemps les écoulements durant cette saison après 1970. Le retard observé pour l'apparition des maximums après la rupture est en rapport avec la diminution des volumes précipités durant la saison de pluies d'automne pendant laquelle ils sont généralement observés. Cette diminution augmente en effet le temps nécessaire pour la recharge de la réserve en eau du sol et l'apparition des maximums.

4. Discussion

4-1. Évolution de la pluviométrie

Cette étude met en évidence une légère diminution des quantités précipitations annuelles et des saisons pluvieuses dans le bassin de l'Ogooué ; des évolutions différentes des précipitations des saisons de sèches (légère diminution pour celles d'hiver et augmentation significative pour celles d'été). Un constat similaire a déjà été fait dans d'autres études menées en région équatoriale [14]. Ces résultats sont aussi similaires à ceux observés plus tôt sur ce même bassin [12], qui se retrouvent également en partie dans le bassin versant du Congo [23], et sur les fleuves du sud du Gabon et du nord du Congo comme le Nyanga et le Kouilou [14]. Un retour à des conditions plus humides au cours de la décennie 1990 a été suggéré partout en Afrique de l'ouest [24, 25]. Cela concorde avec les résultats de cette étude, qui ont mis en évidence un rehaussement des précipitations au cours des décennies 1990 et 2000, consécutif à la sécheresse des décennies 1970 et 1980. Cependant le rehaussement signalé dans cette étude s'estompe au cours de la décennie 2010, tandis que celui relevé en Afrique de l'ouest persiste jusqu'à présent [26].

4-2. Évolution des écoulements

Une discontinuité (en 1972-73) marquant une baisse des écoulements a été mise en évidence dans cette étude au moyen du test de Pettitt. Cela corrobore d'autres études de la région dans lesquelles les ruptures ont été signalées dans les séries hydrologiques de certains cours d'eau [14, 27]. Ces auteurs ont respectivement mis en évidence des ruptures à la baisse sur Ntem en 1970 et l'Ogooué en 1977. Des évolutions statistiquement

significatives à la baisse ont également été identifiées dans les débits de plusieurs cours d'eau d'Afrique de l'ouest à partir de la décennie 1970 [28]. Des dates de discontinuité différentes ont par contre été mentionnées dans d'autres travaux effectués en Afrique de l'ouest [6]. Dans ces études, les ruptures identifiées interviennent pratiquement une dizaine d'années après. C'est le cas de celles mises en évidence dans les écoulements de certains bassins comme le Logone sur les stations de Bongor (en 1981), Lai (en 1981) et Moundou (en 1982). D'autres travaux [29] ont aussi mis en évidence des dates de rupture différentes dans les séries de débits de certains bassins d'Afrique centrale comme celui de l'Oubangui (en 1982), du Congo-Zaïre (en 1981) et de la Likouala (en 1981). Cette différence de comportement entre les bassins équatoriaux pourrait s'expliquer par celle de leur pluviométrie, qui dépendrait elle-même de leurs différentes positions par rapport à l'équateur. Dans le cas des bassins d'Afrique de l'ouest, l'usage des séries de longueur différente pourrait être à l'origine des différences observées. Les séries utilisées dans l'étude portant sur le Logone [6] débutent en général au début de la décennie 1970, tandis que les autres études se fondent sur les séries qui débutent autour des années 1950, ou plus tôt. La variabilité des débits mise en évidence pour ces cours d'eau au plan saisonnier révèle une évolution différente des crues du printemps et d'automne. Les crues du printemps diminuent en réalité de façon importante comparée à celles d'automne qui varient peu dans l'ensemble. Le même constat avait déjà été fait sur l'Ogooué et le Kouilou [12]. D'une manière générale, cette diminution des crues du printemps et d'automne en zone équatoriale est associée à une diminution de la pluviométrie au cours de ces saisons qui résulterait elle-même, non seulement des anomalies de températures de surface océanique [30], mais également des anomalies des vents zonaux locaux [31, 32].

4-3. Impact du changement climatique sur les écoulements

Un impact du récent changement climatique sur les écoulements a été signalé dans cette étude. Cet impact se traduit par des évolutions en général identiques entre pluies et débits depuis la décennie 1970. Des études récentes menées en Afrique de l'ouest sont parvenues à des constats similaires [33, 34].

Tableau 3 : *Statistiques relatives aux débits maximums et minimums de l'Ogooué avant et après la rupture*

Statistiques IHA	Moyenne (m ³ /s)		Coefficient de variation (%)		Variation	
	Avant la rupture	Après la rupture	Avant la rupture	Après la rupture	m ³ /s	%
Débits minimums						
Sur 1 jour	1599	1435	0,23	0,26	-164	-10,3
Sur 3 jours	1612	1446	0,23	0,26	-166	-10,3
Sur 7 jours	1630	1468	0,23	0,27	-162	-9,9
Sur 30 jours	1719	1578	0,23	0,28	-141	-8,2
Sur 90 jours	2077	1885	0,21	0,25	-192	-9,2
Débits maximums						
Sur 1 jour	8999	8587	0,21	0,17	-412	-4,6
Sur 3 jours	8890	8511	0,21	0,17	-379	-4,3
Sur 7 jours	8699	8327	0,21	0,17	-372	-4,3
Sur 30 jours	7923	7531	0,21	0,15	-392	-4,9
Sur 90 jours	6568	6051	0,19	0,14	-517	-7,9
Date julienne						
Du minimum	228	243				
Du maximum	282	315				

Tableau 4 : *Ecart (%) des moyennes décennales des différentes gammes de débits maximums et minimums par rapport à leurs moyennes interannuelles sur le bassin étudié*

Débits minimums					
Périodes	Sur 1 jour	Sur 3 jours	Sur 7 jours	Sur 30 jours	Sur 90 jours
1930-39	0,1	0,04	0,1	0,8	4,2
1940-49	9,2	10,2	10,4	10,1	13,5
1950-59	4,8	4,1	3,7	2,4	-1,4
1960-69	3,4	3,1	2,9	1,8	2,8
1970-79	-5,9	-6,2	-6,4	-6,4	-6,8
1980-88	-3,6	-3,2	-2,1	0,7	-1,8
1990	-	-	-	-	-
2001-09	3,5	3,3	3	3,8	3
2010-17	-14,7	-14,7	-14,6	-15,4	-13,4
Débits maximums					
Périodes	Sur 1 jour	Sur 3 jours	Sur 7 jours	Sur 30 jours	Sur 90 jours
1930-39	6,1	5,7	5,5	5,6	8,8
1940-49	5,6	5,5	6,2	9,3	13,5
1950-59	-9,5	-9,4	-9,6	-10,9	-9,4
1960-69	8,5	8,5	7,9	6,3	6
1970-79	1,4	1,5	1,3	0,4	-3,9
1980-88	1,2	1,3	1,2	0,3	-3
1990	-	-	-	-	-
2001-09	-3,8	-3,4	-2,6	0	0,5
2010-17	-10,2	-10,2	-10,4	-11,7	-13,7

5. Conclusion

Les décennies 1970 et 1980 marquent le début d'un changement important dans l'évolution des précipitations des saisons sèches au Gabon, caractérisé par une augmentation des volumes précipités en été et une diminution en hiver. Ces modifications observées jusqu'à la fin de la décennie 1990 ont provoqué une modification des écoulements des saisons de pluies qui les suivent directement. Il a ainsi été relevé une augmentation des écoulements d'automne et une baisse de ceux d'hiver sur cette même période. Le début de la décennie 2000 est marqué par une inversion des tendances. On note désormais une baisse des pluies d'été accompagnée d'une diminution des écoulements d'automne, et inversement une hausse de celles d'hiver synchrones avec un relèvement des écoulements du printemps. Les évolutions des minimums sont calquées sur celles des précipitations du printemps et d'été, tandis que celles des maximums proviennent des variations des pluies d'automne et d'hiver. Les retards observés dans l'apparition des minimums et des maximums peuvent respectivement être imputés à l'augmentation des pluies d'été et la diminution des pluies d'automne.

Références

- [1] - D. SIGHOMNOU, "Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau", Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I, Cameroun, (2004) 291 p.
- [2] - J. A. AMOUGOU, N. J. NDAM, P. F. DJOCGOUE et B. S. BESSOH, *Afrique Science*, 11 (2015), <http://afriquescience.info>
- [3] - V. DUBREUIL, A. JALLET, J. RONCHAIL et G. MAITELLI, *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, 1 (2004) 133 - 156
- [4] - B. COLLISCHONN, D. ALLASIA, W. COLLISCHONN, C. E. TUCCI, *Revista Brasileira de Cartografia*, 59 (2007) 93 - 99
- [5] - P. CAMBERLIN, G. BARRAUD, S. BIGOT, O. DEWITTE, F. MAKANZU IMWANGANA, J. C. MAKI MATESO, N. MARTINY, E. MONSIEURS, V. MORON, T. PELLARIN, N. PHILIPPON, M. SAHANI and G. SAMBA, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 145 (2019) 2115 - 2138
- [6] - S. ARDOIN-BARDIN, "Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau des grands bassins hydrographiques en Afrique soudano-sahélienne", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, (2004) 437 p.
- [7] - J. E. PATUREL, I. BOUBACAR, A. CRES and G. MAHE, *Journal of Water Science*, 23 (4) (2010) 325 - 333
- [8] - E. D. F., Prospection hydro-électrique générale des bassins de l'Ogooué et de la Nyanga, Rapport intérimaire de la première campagne d'étude, Ministère des travaux publics, République gabonaise, (1989)
- [9] - P. CARRE, Fleuves et rivières du Gabon : Diversité des régimes hydrologiques, Centre national de la recherche scientifique et technologique, Section d'études et recherches en hydrologie, République gabonaise, (1978)
- [10] - A. BUISSON, *La Météorologie*, 8 (1985) 5 - 13
- [11] - G. MAHE, J. LERIQUE et J. C. OLIVRY, *Hydrologie Continentale*, 5 (1990) 105 - 124
- [12] - G. MAHE, G. LIENOU, L. DESCROIX, F. BAMBA, J. E. PATUREL, A. LARAQUE, M. MEDDI, H. HABAIEB, O. ADEGEA, C. DIEULIN, K. F. CHAHNEZ and K. KHOMSI, *Hydrological Processes*, 27 (2013) 2105 - 2114
- [13] - S. BOGNING, F. FRAPPART, A. PARIS, F. BLAREL, F. NINÓ, S. S. PICART, P. LANET, F. SEYLER, G. MAHE, R. ONGUENE, J. P. BRICQUET, J. ETAME, M. C. PAIZ and J. J. BRAUN, *Adv. Spa. Res.*, (2020)
- [14] - G. LIENOU, G. MAHE, J. E. PATUREL, E. SERVAT, D. SIGHOMNOU, G. E. EKOIDECK, A. DEZETTER et C. DIEULIN, *Journal des Sciences Hydrologiques*, 53 (2008) 789 - 800
- [15] - R. LETOUZEY, Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1 :500.000. IRA, Yaoundé, Institut de la Carte Internationale de la Végétation, Toulouse, (1985)
- [16] - J. F. BOYER, C. DIEULIN, N. ROUCHÉ, A. CRÈS, E. SERVAT, J. E. PATUREL et G. MAHE, *Water Resource Variability*, 308 (2006) 19 - 25
- [17] - N. ROUCHE, G. MAHE, S. ARDOIN-BARDIN, B. BRISSAUD, J. F. BOYER, A. CRES, C. DIEULIN, G. BARDIN, G. COMMELARD, A. DEZETTER, J. E. PATUREL and E. SERVAT, *Sécheresse*, 21 (2010) 336 - 338
- [18] - C. DIEULIN, G. MAHE, J. E. PATUREL, S. EJJYAR, Y. TRAMBLAY, N. ROUCHÉ and B. E. MANSOURI, *Water*, 11 (2019) 1 - 17
- [19] - P. H. GLEICK, *Journal of Hydrology*, 88 (1986) 97 - 116
- [20] - G. J. HUFFMAN, R. F. ADLER, D. T. BOLVIN, G. GU, E. J. NELKIN, K. J. BOWMAN, Y. HONG, E. F. STOCKER and D. B. WOLFF, *Journal of hydrometeorology*, 8 (2007) 38 - 55
- [21] - H. LUBES, J. M. MASSON, E. SERVAT, J. E. PATUREL, B. KOUAME et J. F. BOYER, Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etudes bibliographiques UR2-CEC, Orstom, Montpellier, (1994)
- [22] - B. D. RICHTER, J. V. BAUMGARTNER, D. P. BRAUN and J. POWELL, *Regulated Rivers : Research and Management*, 39 (1998) 329 - 340

- [23] - M. TSALEFAC, F. HIOL HIOL, G. MAHE, A. LARAQUE, D. SONWA, P. SHOLTE, W. POKAM, A. HAENSLER, T. BEYENE, F. LUDWIG, F. K. MKANKAM, V. M. DJOUFACK, M. NDJATSANA and C. DOUMENGE, In *"The forests of the Congo basin. Forests and climate change"*, Eds. C. WASSEIGE, M. TADOUM, A. EBA'A and C. DOUMENGE, Weyrich, Belgium, Vol. 2, (2015) 37 - 52
- [24] - A. ALHASSANE, S. SALACK, M. LY, I. LONA, S. B. TRAORE et B. SARR, *Sécheresse*, 24 (2013) 282 - 93
- [25] - T. LODOUN, A. GIANNINI, P. S. TRAORE, L. SOME, S. MOUSSA, M. VAKSMANN and J. M. RASOLODIMBY, *Environmental Development*, 5 (2013) 96 - 108
- [26] - L. DESCROIX, Y. SANE, T. MAMADOU, S. P. MANGA, D. BOUBACAR, J. MINGOU, V. MENDY, S. COLY, A. DIEYE, A. BADIANE, M. J. SENGHOR, A. B. DIEDHIOU, S. DJIBY, Y. BOUAITA, S. SOUMARÉ, A. DIOP, F. BAKARY, A. BAMOL, E. MACHU, J. P. MONTOROI, J. ANDRIEU and J. P. VANDERVAERE, *Water*, 12 (2020) 1 - 26
- [27] - D. P. CONWAY, A. PERSECHINO, S. ARDOIN-BARDIN, H. HAMANDAWANA, C. DIEULIN and G. MAHE, *Journal of hydrometeorology*, 10 (2009) 41 - 59
- [28] - L. MOUNIROU, Y. YACOUBA, H. KARAMBIRI, J. E. PATUREL et G. MAHE, *Comptes Rendus Géosciences*, 344 (2012) 441 - 448
- [29] - G. MAHE, Y. L'HÔTE, J. C. OLIVRY and G. WOTLING, *Hydrological Sciences Journal*, 46 (2) (2001) 211 - 226
- [30] - G. MAHE and J. CITEAU, *Veille Climatique Satellitaire*, 44 (1993) 34 - 54
- [31] - E. N. NICHOLSON and A. K. DEZFULI, *Journal of Climate*, 26 (2013a) 45 - 65
- [32] - E. N. NICHOLSON and A. K. DEZFULI, *Journal of Climate*, 26 (2013b) 66 - 84
- [33] - Y. YIRA, B. DIEKKRÜGER, G. STEUP and Y. B. AYMAR, *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 21 (2017) 2143 - 2161
- [34] - G. PANTHOU, T. LEBEL, T. VISHEL, G. QUANTIN, Y. SANE, A. BA, O. NDIAYE, A. DIONGUE-NIANG and M. DIOPKANE, *Environ. Res. Lett.*, 13 (2018) 064013