

Variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique par approches statistiques et géo-spatiales et son impact sur l'écoulement des cours d'eau dans le bassin versant de la Bagoé (Nord de la Côte d'Ivoire)

[Spatial and temporal variability of the rainfall regime using statistical and geo-spatial approaches and its impact on the runoff of rivers in Bagoé watershed (Northern Côte d'Ivoire)]

Germain Miessan Adja¹, Jacques Edoukou Djemin², Privat Tohouiri², Franck-Armstrong Okon N'dri², Jean Kan Kouame², Roger Patrice Jean Jourda²⁻³, and Jean Biemi²⁻³

¹Département des Sciences et Technologies, Section des Sciences de la Vie et de la Terre (SVT), École Normale Supérieure (ENS), Abidjan, 08 BP 10 Abidjan 08, Côte d'Ivoire

²Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Abidjan, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Abidjan, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The general downward trend in rainfall in West Africa since the 1970s has favored long periods of drought. The rainfall decrease has not only caused the depletion of water resources, but has also led to a disruption of the runoff regime of rivers. The objective of this study is to carry out a spatial and temporal characterization of the rainfall regime in the Bagoé watershed over the period from 1928 to 2000 in order to analyze its influence on the rivers runoff to better predict adaptation solutions. Statistical approaches and a GIS were used to characterize the rainfall variability which was then analyzed in relation to the runoff regime of rivers over the period from 1961 to 1986. The average annual precipitation recorded is 1397.04 mm with two dry periods (1928-1949 and 1976-2000) which frame the only wet period (1950-1975). A secondary rainfall rupture in 1949 and a principal rainfall rupture in 1975 were highlighted. The principal rainfall rupture in 1975 suggests a significant drop in precipitation from 1976 to 2000 marked geo-spatially by the predominance of 1100 mm and 1200 mm isohyets during the decade 1991-2000. This drop in rainfall led to a decrease in the water flow of rivers, also due to hydraulic activities in the basin. Adaptation solutions should therefore be found in the planning of development projects.

KEYWORDS: Rainfall Variability, Spatial and Temporal, Runoff, Bagoé Watershed.

RESUME: La tendance à la baisse de la pluviométrie constatée de façon générale en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970, a favorisé de longues périodes de sécheresse. La baisse des précipitations a non seulement occasionné l'amenuisement des ressources en eau, mais a entraîné aussi une perturbation du régime d'écoulement des cours d'eau. L'objectif de cette étude est d'effectuer une caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du bassin versant de la Bagoé sur la période 1928-2000 en vue d'analyser son influence sur l'écoulement des cours d'eau pour mieux prévoir les solutions d'adaptation. En effet, les approches statistiques et un SIG ont été utilisés pour caractériser la variabilité pluviométrique qui a été ensuite

analysée par rapport au régime d'écoulement des cours d'eau sur la période 1961-1986. La précipitation moyenne annuelle enregistrée est de 1397, 04 mm avec deux périodes sèches (1928-1949 et 1976-2000) qui encadrent l'unique période humide (1950-1975). Une rupture climatique secondaire en 1949 et une rupture principale en 1975 ont été mises en évidence. La rupture climatique principale de 1975 laisse entrevoir une baisse significative des précipitations de 1976 à 2000 marquée au plan géo-spatial par la prédominance des isohyètes 1100 mm et 1200 mm au cours de la décennie 1991-2000. Cette baisse de la pluviométrie a entraîné la diminution des lames d'eau écoulées qui est attribuable aussi aux activités hydrauliques sur le bassin. Il convient donc de trouver des solutions d'adaptation dans la planification des projets de développement.

MOTS-CLEFS: Variabilité Pluviométrique, Spatio-Temporelle, Écoulement, Bassin Versant de la Bagoé.

1 INTRODUCTION

La variabilité climatique, notamment pluviométrique, en Afrique de l'Ouest en général et en zone sahélo-saharienne en particulier, présente d'énormes conséquences pour le développement socio-économique [1]. L'importance des précipitations pour les populations et les écosystèmes fait que la plupart des travaux de recherche portent sur cette variable [2]. En effet, les ressources en eau de surface se constituent essentiellement à partir des précipitations qui représentent un paramètre de très forte expression de la variabilité du climat. De plus, les données pluviométriques sont facilement mesurables et disponibles. Autant de raisons qui justifient le choix de l'analyse pluviométrique dans plusieurs études pour caractériser la variabilité ou le changement climatique et d'analyser son influence sur les ressources en eau. Il s'agit notamment des études effectuées en Afrique de l'Ouest et Centrale et/ou précisément en Côte d'Ivoire par [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Dans cet ordre d'idées, des études plus récentes ont été réalisées par [2], [11], [12], [13], [14]. Ces études ont montré, depuis les années 1970, une baisse significative des précipitations qui a entraîné l'amenuisement des ressources en eau en général et des cours d'eau en particulier. La diminution des ressources en eau de surface est perçue au niveau de l'analyse du régime d'écoulement des cours d'eau qui s'est fortement dégradé conduisant souvent à leur assèchement.

En Côte d'Ivoire, précisément dans le bassin versant de la Bagoé, la variabilité climatique se manifeste par des sécheresses récurrentes, des pluies irrégulières avec un décalage saisonnier. À cela, s'ajoute la baisse de la disponibilité des ressources en eau exacerbée par la dégradation de leur qualité. Les niveaux des cours d'eau artificiellement mis en place (barrages) pour faciliter l'approvisionnement en eau potable des populations et certaines activités socio-économiques (agriculture, élevage...), connaissent une baisse drastique due certainement aux anomalies et aux insuffisances pluviométriques. Ce phénomène peut s'amplifier et entraîner le tarissement pur et simple de ces plans d'eau. En milieu rural, pendant la saison sèche, les puits s'assèchent, l'eau consommée par les populations est de mauvaise qualité. Ces populations sont ainsi exposées à toutes sortes de maladies hydriques. En effet, pour pouvoir envisager des stratégies d'adaptation efficaces pour protéger les populations et planifier les projets de développement, il est toujours nécessaire d'étudier et de mieux comprendre la variabilité pluviométrique à partir d'approches statistiques qui ont déjà montré leur pertinence. Cette étude vise donc à effectuer une caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du bassin versant de la Bagoé en vue d'analyser son influence sur l'écoulement des cours d'eau pour mieux prévoir les solutions d'adaptation. Il s'agit d'analyser les séries chronologies de précipitations en précisant leur évolution temporelle à partir d'approches statistiques et leur distribution géo-spatiale à partir d'un SIG. Enfin, il s'agit d'effectuer une analyse de la relation pluie-débit par corrélation entre la variabilité du régime pluviométrique et celui de l'écoulement des cours d'eau.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est le bassin versant du fleuve Bagoé qui fait partie du grand bassin versant du fleuve Niger. La Figure 1 montre la localisation géographique de la zone d'étude qui est comprise entre les longitudes -6°00' et -7°00' Ouest et les latitudes 9°00' et 11°00' Nord. Le territoire ivoirien qu'elle définit, est circonscrit par les Districts des Savanes et du Denguélé du Nord et Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Ce territoire est limité au Nord par la République du Mali, au Sud par les régions du Béré et du Worodougou, à l'Est par celle du Poro et à l'Ouest par celles du Kabadougou et du Folon. Couvrant les départements de Boundiali et de Tengréla, il abrite une population de plus de 415.391 habitants [15]. C'est une région essentiellement rurale dominée par les activités agricoles et pastorales lesquelles restent confrontées au problème de la disponibilité spatio-temporelle des ressources en eau. La morphologie de la région est marquée par des formes massives sans relief véritablement élevé (chaînes de collines, dômes cristallins, barres entrecoupées de vallées et de plateaux de 600 à 800 m d'altitude et glacis cuirassés de 300 à 400 m d'altitude). La végétation est marquée par la savane arborée et arbustive ponctuée d'îlots de forêts claires et par la forêt galerie se développant le long des cours d'eau. Le climat est de type tropical de transition à deux saisons:

une saison des pluies couvrant la période d'avril à octobre et une saison sèche de la période d'octobre à avril. La température moyenne est de 26, 5°C avec de fortes insulations. Le réseau hydrographique a une densité de drainage de 0, 84km.km⁻², avec un cours d'eau principal qui est le fleuve Bagoé et ses principaux affluents (Gnangbé, Palé, Gbanani et Katiananka). Ce réseau hydrographique a favorisé la construction de plusieurs barrages pour l'approvisionnement en eau potable et le développement d'activités socio-économiques.

Au plan géologique, la zone d'étude est caractérisée par les formations éburnéennes (granitoïdes, migmatites et granodiorites), les formations birimiennes (métasédiments, schistes, brèches volcaniques, grauwackes et métavulcanites) et les formations antébirimiennes (migmatites anciennes, granites migmatitiques et gneiss). Le plutonisme basique est représenté dans la région par les gabbros. Au plan hydrogéologique, les aquifères d'altérites, dont le niveau piézométrique subit d'importantes variations, sont exploités par de nombreux puits. Les aquifères de fissures situés en profondeur sont exploités par les forages dont plusieurs de ceux-ci ont été abandonnés soit par leur assèchement soit à cause des pannes techniques ou mécaniques des pompes ou de la mauvaise qualité de l'eau prélevée. Au plan hydraulique, appuyée par la volonté politique des gouvernants dès les années 1970-1980 [16], [17], la vocation agro-pastorale ainsi que le secteur de l'approvisionnement en eau potable ont permis à la région de bénéficier de nombreux barrages pour mobiliser les ressources en eau. Malheureusement, plusieurs de ces barrages ont tari puisque les précipitations qui constituent l'essentiel de leurs apports [1], sont en baisse.

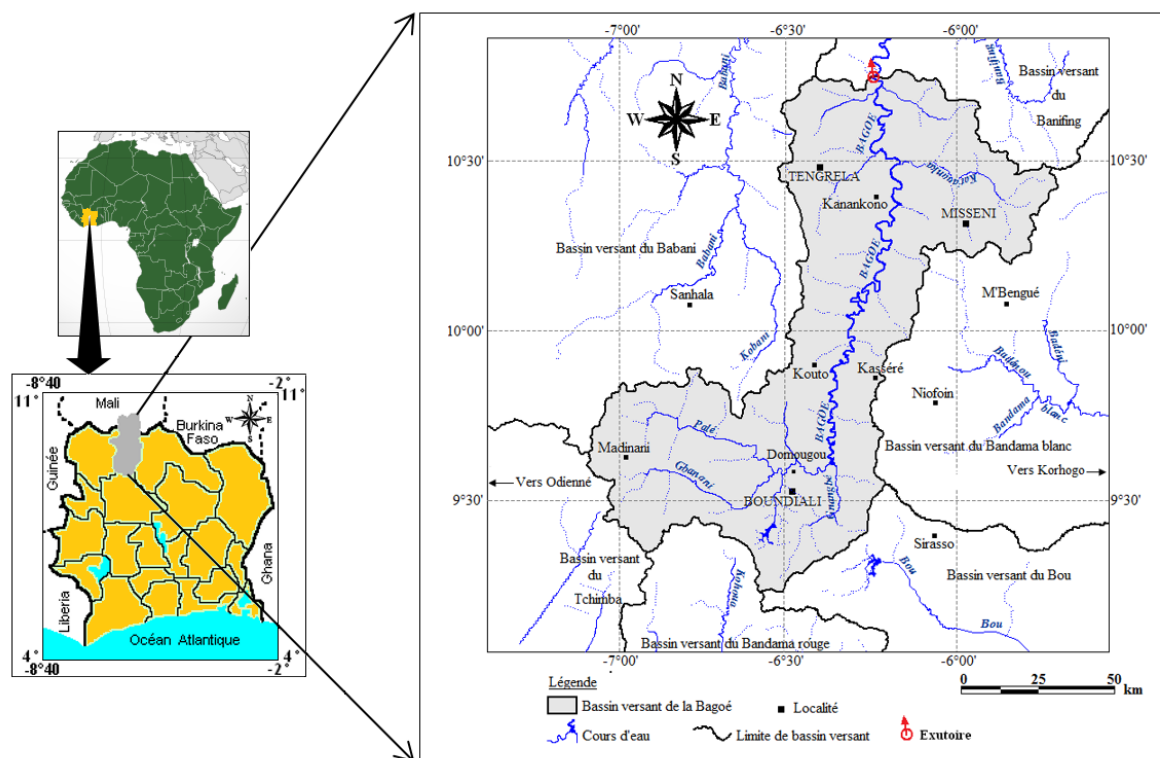


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 MATÉRIEL

Les données utilisées se composent de données moyennes annuelles de précipitations de diverses stations pluviométriques et de débits d'écoulement du fleuve Bagoé. La zone d'étude circonscrit six (06) stations pluviométriques. Les données pluviométriques de la station de Boundiali, constituées de 73 années d'observations des pluies sur la période 1928-2000, jugées fiables, sont utilisées pour l'analyse temporelle des pluies. En effet, elles respectent deux critères importants qui sont la longueur des chroniques (couvrir la plus longue période de temps possible) et la qualité des données c'est-à-dire la rareté des

lacunes dans les séries observées [2]. Concernant l'étude géo-spatiale de la pluviométrie, les données pluviométriques moyennes annuelles utilisées proviennent de dix-neuf (19) stations du Nord de la Côte d'Ivoire. Les données de débits d'écoulement utilisées sont celles mesurées à la station hydrométrique de Kouto comportant moins de lacunes et homogènes sur 26 années (1961-1986). Elles ont servi à l'analyse de la relation pluie-débit pour caractériser l'écoulement du fleuve Bagoé.

Le logiciel Excel a servi à la gestion de la base de données des précipitations et des débits d'écoulement du fleuve Bagoé. Il a servi aux calculs et à la détermination des paramètres statistiques et à l'élaboration des graphes. Le logiciel khronostat [18] de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) est utilisé pour l'analyse statistique de détection de ruptures au sein des données pluviométriques. Les logiciels Surfer 8.0 et mapinfo 7.5 sont utilisés pour éditer les cartes des variations spatio-temporelles de la pluviométrie.

3.2 MÉTHODES

3.2.1 MÉTHODES D'ANALYSE STATISTIQUE DE LA PLUVIOMÉTRIE

Cette analyse concerne la pluie moyenne interannuelle (P_{moy}) sur le bassin versant représentant approximativement l'ordre de grandeur de l'ensemble des observations pluviométriques et des pluies extrêmes (P_{max} et P_{min}). L'analyse de la fluctuation autour de la pluie moyenne interannuelle s'apprécie à travers:

- L'intervalle de variation qui est la différence entre le module pluviométrique (P_{max}) moyen de l'année la plus humide et celui de l'année la plus sèche (P_{min}) dont l'expression est donnée par la formule de l'équation 1 notée:

$$W = P_{max} - P_{min} \quad (1)$$

Où, W (mm) est l'intervalle de variation, P_{max} (mm) est la pluie maximale moyenne de l'année la plus humide et P_{min} (mm) est la pluie minimale moyenne de l'année la plus sèche.

- L'écart moyen absolu qui est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts par rapport à la moyenne. Il est déterminé à partir de la formule de l'équation 2 notée:

$$e_a = \frac{1}{n} \sum |x_i - \bar{x}| \quad (2)$$

Où, e_a (mm) est l'écart moyen absolu, x_i (mm) est la valeur annuelle de la série, \bar{x} (mm) est la valeur moyenne de la série et n est la taille de la série de cette variable climatique.

- Le coefficient de variation qui est le rapport de l'écart-type par la moyenne, est déterminé à partir de la formule de l'équation 3 notée:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

Où, V est le coefficient de variation, σ (mm) est l'écart-type de la série et \bar{x} (mm) est la valeur moyenne de cette série.

3.2.2 MÉTHODES D'ANALYSE DE L'HOMOGENÉITÉ DES SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES

L'étude de l'homogénéité ou de la stationnarité des séries pluviométriques permet de définir l'existence de périodes à pluviométrie homogène. Il s'agit de l'analyse des anomalies pluviométriques, de la détection des ruptures climatiques ou hydrologiques et de la mise en évidence des périodes des excédents et des déficits pluviométriques.

• Indice de Nicholson pour la Détermination des Périodes Humides et Sèches

L'indice de Nicholson ou indice pluviométrique (I_p) est une variable centrée réduite qui traduit l'écart de la pluie d'une année i à la pluie moyenne de la période considérée par rapport à l'écart-type. Cet écart indique soit des excédents, soit des déficits pluviométriques annuels. L'expression de cet indice est donnée par la formule de l'équation 4 notée:

$$I_p = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (4)$$

Où, I_p (mm) est l'indice pluviométrique, P_i (mm) est la pluviométrie de l'année i , \bar{P} (mm) est la pluviométrie moyenne interannuelle de la chronique considérée et σ (mm) est l'écart type de cette chronique d'observations pluviométriques.

Disposant d'une longue chronique d'observations pluviométriques, les moyennes mobiles sont centrées et réduites pour étudier les grandes tendances de celle-ci. Elles sont déterminées généralement pour un nombre d'années impaires (11, 15 et 25 ans dans le cas de cette étude).

- **Tests de Détection des Ruptures au sein des Séries Pluviométriques**

Les séries pluviométriques annuelles sont analysées à l'aide du logiciel khronostat [18], en vue de détecter une éventuelle rupture liée à une non-stationnarité [12]. Parmi les tests d'homogénéité (absence de rupture dans la série) de khronostat, le test de Pettitt et la procédure de segmentation d'Hubert réputés pour leur robustesse et leur fiabilité ont été retenus. Ces tests ont été expérimentés avec succès dans de nombreuses études dont celles de [3], [4], [19]. Pour l'ensemble des tests de khronostat, l'hypothèse nulle (H_0) correspond à l'absence de rupture au seuil de 1% [12], [13].

- **Test de Pettitt**

Le test de Pettitt défini par [20] admet dans son principe que toute série de données chronologiques constituée d'une séquence de variables aléatoires indépendantes, est supposée présenter une rupture à une date quelconque si ces variables ont une première distribution commune différente de la deuxième distribution commune. Dans ce contexte, le test de l'hypothèse H_0 de non-rupture par rapport à l'hypothèse alternative H_1 de rupture est réalisé par le biais d'un test statistique non-paramétrique. Aucune hypothèse n'est alors faite sur la nature de la distribution de probabilité de la variable définissant la série des observations.

- **Procédure de Segmentation d'Hubert**

La méthode de segmentation d'Hubert définie par [21] convient pour la recherche d'une ou de plusieurs ruptures dans une série chronologique de données. Dans la pratique, la série initiale est découpée en M segments ou sous-séries selon la technique des moindres carrés ($M > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du ou/des segment (s) voisin (s). Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse de stationnarité de la série est acceptée.

- **Estimation des Déficits ou Excédents Produits par les Ruptures**

L'influence hydro-climatique de rupture identifiée dans une série chronologique de précipitations est appréciée par le calcul des taux de variation de part et d'autre de cette série, représentant le déficit ou l'excédent pluviométrique selon la formule de l'équation 5 notée:

$$D (\%) = \frac{\bar{X}_j - \bar{X}_i}{\bar{X}_i} \times 100 \quad (5)$$

Où, $D (\%)$ est le déficit ou l'excédent pluviométrique, (mm) est la moyenne des précipitations après rupture et $\bar{X}_i (mm)$ est la moyenne des précipitations avant la rupture.

Dans cette étude, le déficit et l'excédent pluviométrique sont déterminés en fonction de la précipitation moyenne annuelle de la série chronologique considérée.

3.2.3 MÉTHODES D'ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PLUVIOMÉTRIE

L'analyse de la variabilité spatiale des précipitations à l'image des travaux de [3], [22] et ceux de [23], requiert un nombre important de postes pluviométriques dotés de mesures de précipitations de longue chronique. De même, elle se fait sur un espace géographique de vaste étendue offrant une bonne répartition spatiale des dites stations pluviométriques. En effet, les cartes de la dynamique spatiale décennale de la zone d'étude résultent des cartes de la dynamique spatiale décennale des isohyètes de 1961 à 2000 de la partie nord du territoire ivoirien comprise entre les 8^e et 11^e parallèles. Cette zone couvre plusieurs stations dont 19 géographiquement bien réparties, dotées de chroniques de pluies homogènes. Ces dernières sont sélectionnées pour établir par krigeage les cartes d'iso-valeurs de pluies décennales ou de réseau décennale des isohyètes sur les périodes 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 et 1991-2000. L'application "d'un masque de la zone d'étude" sur celles-ci permet d'avoir les cartes des fluctuations spatiales et décennales de la pluviométrie de la zone d'étude. Les isohyètes sont définies selon un pas de 100 mm de pluie. Une analyse des fluctuations spatiales (régressives ou progressives) de la pluviométrie au niveau de la zone d'étude, est ensuite effectuée suivant la dynamique de ces isohyètes.

3.2.4 MÉTHODES D'ANALYSE DE L'IMPACT DE LA VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS SUR LES ÉCOULEMENTS

Cette méthode consiste à effectuer une analyse de la relation pluie-débit sur la période 1961-1986 pour la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin et sa participation au cycle de l'eau. Elle met l'accent sur les débits moyens annuels d'écoulement du fleuve Bagoé, qui peuvent s'exprimer en lames d'eau écoulées. En effet, la lame d'eau moyenne annuelle écoulée ou lame d'eau équivalente (L_e) est la hauteur fictive d'une nappe d'eau superficielle uniformément répartie sur une surface horizontale égale à la surface du bassin. Son volume est égal à celui écoulé au droit de la station de mesure pendant la période étudiée. L'expression de la lame d'eau moyenne annuelle écoulée s'exprime selon la formule de l'équation 6 notée:

$$L_e = \frac{Q \times 31536}{S} \quad (6)$$

Où, L_e (mm.an⁻¹) est la lame d'eau annuelle écoulée, Q (m³.s⁻¹) est débit moyen annuel de la série et S (km²) est la surface totale du bassin.

Les lames d'eau moyennes annuelles écoulées sont alors centrées et réduites pour mieux comprendre les fluctuations de l'écoulement des cours d'eau par rapport aux tendances pluviométriques préalablement définies.

4 RÉSULTATS

4.1 CARACTÉRISTIQUES STATISTIQUES DES PRÉCIPITATIONS

Le tableau 1 présente les variables statistiques de la pluviométrie déterminées à partir de la longue série des pluies de la station hydrométrique de Boundiali sur la période 1928-2000. L'analyse montre que les précipitations annuelles fluctuent entre 783 et 2298 mm. La précipitation la plus faible a été enregistrée en 1967 et la plus importante en 1965 (deux années d'intervalle). La précipitation moyenne annuelle est de 1397, 04 mm avec un écart-type de 319, 81 mm et un coefficient de variation de 0, 229. L'écart important de 1515 mm entre les précipitations extrêmes (minimale et maximale), enregistrées seulement à deux années d'intervalle, montre déjà l'hétérogénéité de l'événement pluvieux et le contraste entre les hauteurs d'eau enregistrées. Ces caractéristiques statistiques démontrent la variabilité des précipitations sur le bassin depuis 1928 jusqu'en 2000, s'illustrant par une succession d'événements pluvieux différents.

Tableau 1. Caractéristiques statistiques de la pluviométrie sur la période 1928-2000

Précipitation maximale (mm)	Précipitation minimale (mm)	Précipitation moyenne (mm)	Écart-type (mm)	Coefficient de variation	Intervalle de variation (mm)
2298	783	1397, 04	319, 81	0, 229	1515

4.2 ANALYSE DE LA VARIABILITÉ TEMPORELLE DE LA PLUVIOMÉTRIE

La figure 2 présente les fluctuations générales des indices de pluie (I_p) couplées à celles des moyennes mobiles déterminées sur la période 1928-2000. L'analyse de cette figure fait ressortir trois grandes périodes climatiques:

- La période sèche de 1928 à 1949 (soit 22 années) a enregistré une lame d'eau moyenne précipitée de 1298, 26 mm ($I_p = -0, 352$). Cette période est marquée par un déficit pluviométrique de 7, 6% par rapport à la pluviométrie moyenne annuelle;
- La période humide de 1950 à 1975 (soit 26 années) a enregistré une pluviométrie moyenne de 1600, 25 mm ($I_p = +0, 733$) avec un excédent pluvieux de 12, 70% par rapport à la pluviométrie moyenne annuelle. Cette période humide reste marquée par quelques séquences sèches qui concernent l'année 1956 et les périodes 1958-1961 et 1967-1969 caractérisées par des pluviométries inférieures à la moyenne interannuelle;
- La période sèche de 1976 à 2000 (soit 25 années), succédant à l'unique période humide, s'est manifestée par une sécheresse plus rude car le déficit pluviométrique induit par la pluviométrie moyenne de 1233 mm sur cette période, est devenu plus important soit 13, 30% ($I_p = -0, 453$) par rapport à la première période sèche.

L'analyse des courbes des moyennes mobiles déterminées sur les périodes impaires de 11, 15 et 25ans, montre que leur allure générale régresse, se ramollit au fur et à mesure que la période de calage est effectuée sur un nombre d'années impair plus grand. En effet, ces courbes font mieux ressortir les tendances climatiques presque similaires au découpage climatique

défini précédemment. Deux phases de pluviométrie déficitaire ou période sèche (1928-1948 et 1976-2000) encadrent une phase de pluviométrie excédentaire ou période de bonne humidité (1949-1975). Sur l'ensemble de la chronique, l'intensité des deux périodes sèches a été statistiquement atténuée par celle de l'unique période humide. Ainsi, se perçoit moyennement la tendance à la baisse généralisée des précipitations sur le bassin versant.

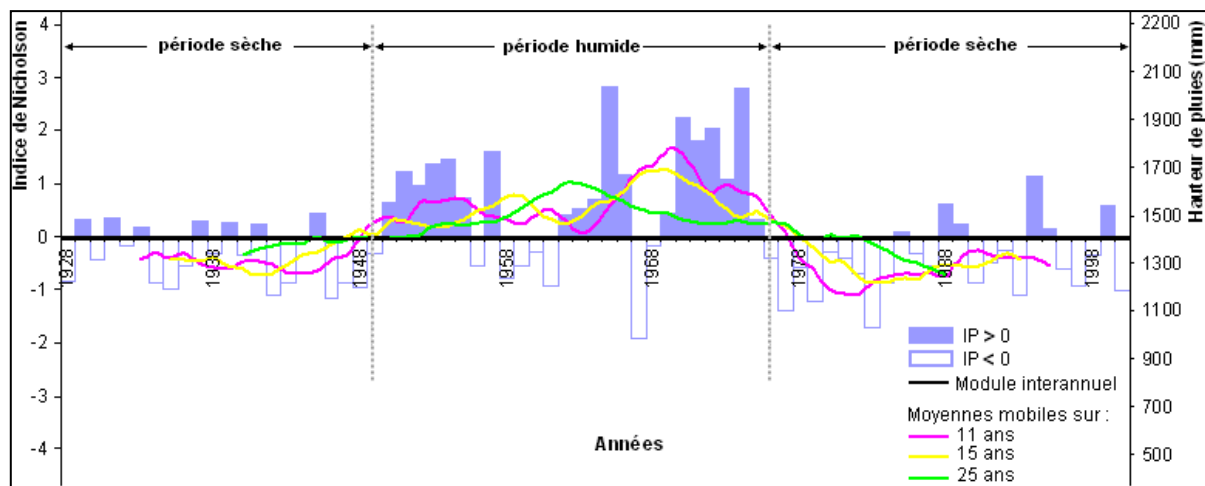


Fig. 2. Variations couplées des indices pluviométriques et des moyennes mobiles

La figure 3 montre les fluctuations de la variable U du test de Pettitt couplées à celles de l'indice pluviométrique. La phase négative de la courbe de cette variable de 1928 à 1963 (descendante et ascendante) est à cheval sur la période sèche de 1928 à 1949. Elle est marquée par la plus faible valeur de la variable U (-303) signalée en 1949. La phase positive de celle-ci (ascendante et descendante) débute au cours de la période humide en 1964 pour s'étaler sur toute la période sèche de 1976 à 2000 avec la plus forte valeur de la variable U (+474) observée en 1975. Les deux pointes d'amplitudes identifiées sont l'indication de la présence probable de deux ruptures dans la série chronologique des pluies: une rupture en 1949 et une autre en 1975. À l'année charnière de 1975, la lame d'eau précipitée sur le bassin a atteint 1504 mm correspondant à un excédent de 105, 95 mm de pluie. Juste après cette année, en 1976, la série a enregistré un déficit pluviométrique très important (-131, 05 mm). Ceci explique l'importance de la rupture de 1975 dite principale. Elle a rompu la tendance à l'accroissement des pluies constatée de 1950 à 1975 et consacré la fin de l'unique période humide sur le bassin. Antérieurement à la rupture principale, la pointe d'amplitude de la phase négative révèle une probable rupture secondaire survenue en 1949. Cette rupture probable marque le passage d'une phase à pluviométrie déficitaire (période sèche de 1928 à 1949) à une phase à pluviométrie excédentaire (période humide de 1950 à 1975). Le contraste pluviométrique très marqué entre les lames d'eau enregistrées en 1949 et 1950 conforte la présence de cette seconde rupture. Les deux ruptures constatées expriment des variations brusques de la pluviométrie entre l'année de rupture et l'année d'après. La figure 4 montre la concordance entre ces ruptures et le découpage climatique.

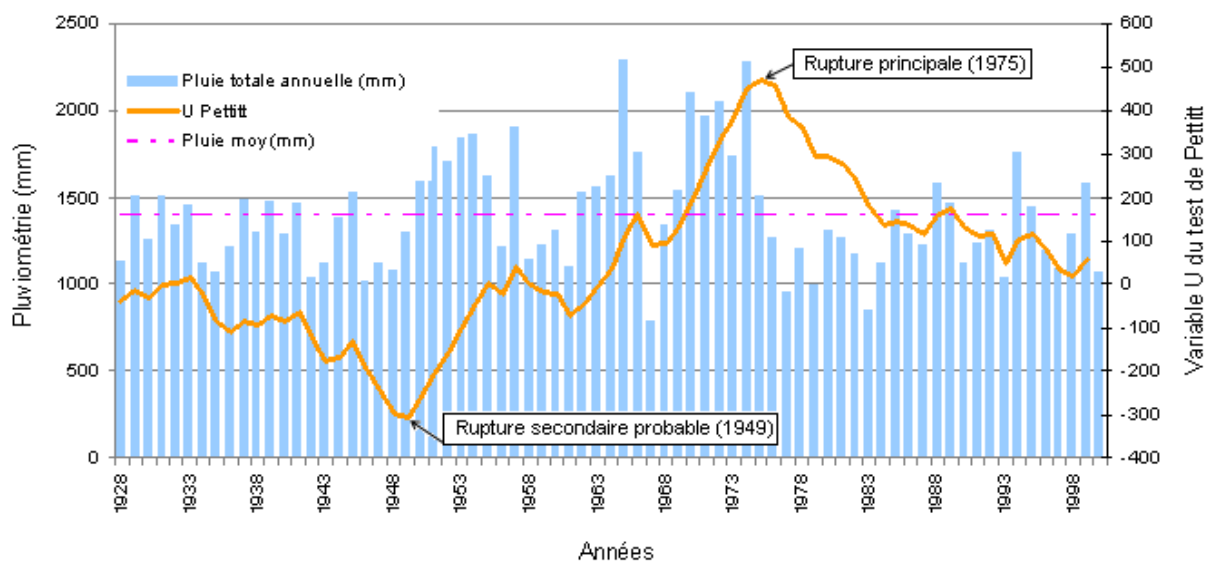


Fig. 3. Variation temporelle couplée de la variable U du test de Pettitt et de la pluviométrie sur la période 1928-2000

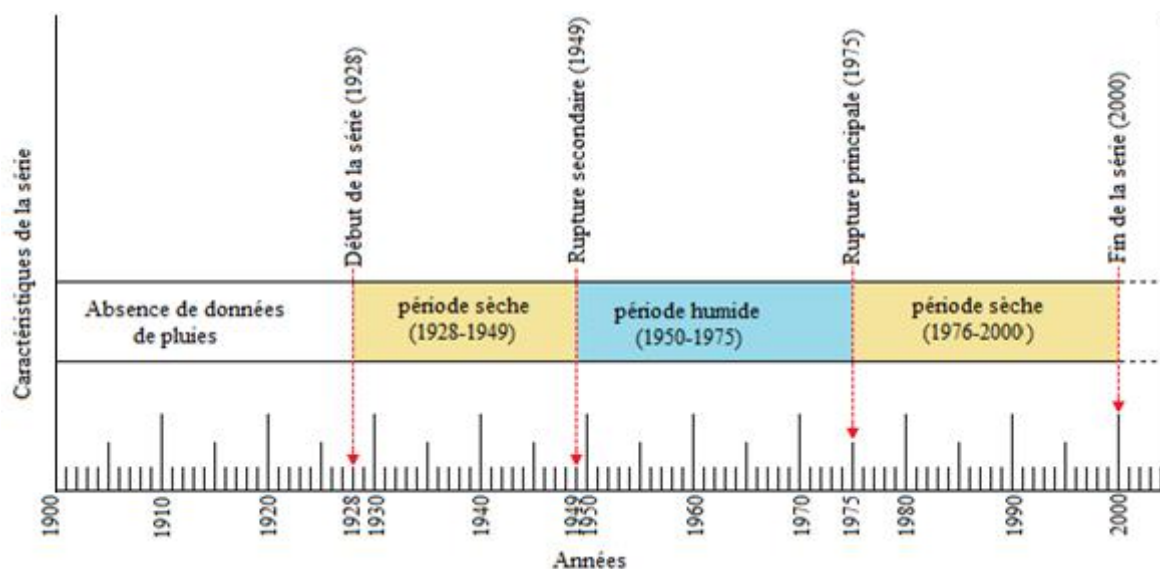


Fig. 4. Chronologie des caractéristiques climatiques de la série des pluies de la période 1928-2000

La figure 5 présente la segmentation de la série chronologique de pluie par la procédure de segmentation d'Hubert couplée aux fluctuations pluviométriques. En effet, trois segments définis, consacrent la non-stationnarité de la série chronologique des pluies. Les trois segments indiquent deux ruptures très proches qui se sont produites respectivement entre 1969-1970 et 1974-1975.

Le premier segment de 41 années, part de 1928 à 1969 avec une pluviométrie moyenne de 1405, 43 mm soit un écart quasi-insignifiant de 8, 37 mm de pluie par rapport à la pluviométrie moyenne du bassin. Le second segment, le plus court (5 ans), débute en 1970 et prend fin en 1974 avec une bonne pluviométrie (pluie moyenne de 2030mm) très supérieure à la pluie moyenne du bassin. Le dernier segment, moins long que le premier (25 ans), s'étend de 1975 à 2000 avec une pluviométrie moyenne de 1261, 79 mm en-dessous de la moyenne interannuelle, soit un écart de 135, 25 mm. Ce segment illustre nettement une période de déficit au niveau de la lame d'eau précipitée. Il coïncide avec la période sèche de 1976 à 2000, révélée par les fluctuations de l'indice pluviométrique.

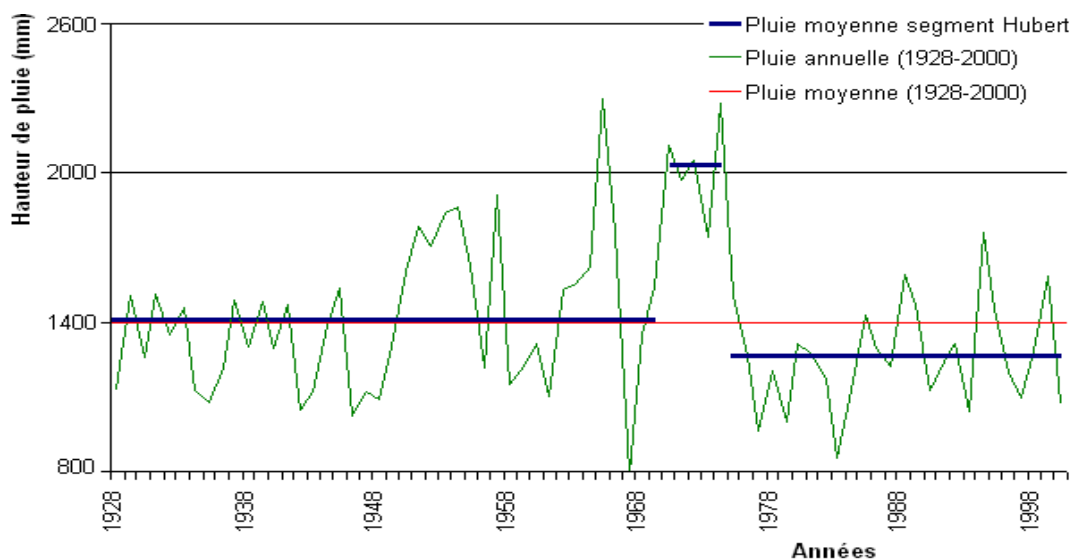


Fig. 5. Illustration de la segmentation de la série chronologique des pluies par la procédure d'Hubert couplée aux fluctuations pluviométriques de la période 1928-2000

Les deux méthodes de détection de ruptures ont mis en évidence l'existence d'hétérogénéités au sein de la série chronologique des pluies de la station de Boundiali. La rupture principale de 1975, caractérisée par un déficit pluviométrique de 13, 30%, est formellement avérée par ces deux méthodes. Le test de Pettitt a montré une rupture secondaire probable produite en 1949. Par contre, pour la méthode de segmentation d'Hubert, celle-ci s'est déroulée entre 1969 et 1970. Les trois périodes climatiques identifiées, associées aux ruptures climatiques décelées dont la principale s'est produite en 1975 et la détermination de 64, 38% d'années sèches contre 35, 62% d'années humides sur la période 1928-2000 expriment la variabilité temporelle des précipitations sur le bassin.

4.3 ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PLUVIOMÉTRIE

La figure 6 montre les cartes de la dynamique spatiale décennale de la pluviométrie représentée par des isohyètes sur la période 1961-2000. L'analyse de ces cartes montre que la zone d'étude est restée durant quatre décennies (1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 et 1991-2000) sous l'influence des isohyètes 1100, 1200, 1300, 1400 et 1500 mm. La chute des précipitations s'est manifestée par la disparition des isohyètes 1300, 1400 et 1500 mm au cours des trois premières décennies au profit des isohyètes 1100 et 1200 mm. Au cours de la décennie 1981-1990, la lame d'eau a le plus baissé sur le bassin. L'isohyète 1200 mm, faiblement étendue, s'est localisée dans la partie Sud-Ouest du bassin tandis que l'isohyète 1100 mm a couvert la quasi-totalité du bassin. L'isohyète 1300 mm qui avait pratiquement disparu à la décennie précédente, est réapparue au cours de la décennie 1991-2000 reconnue comme marquant une faible reprise des précipitations. Cette reprise de la pluviosité s'est traduite par la réapparition dans la partie Sud-Ouest de l'isohyète 1300 mm, la progression de l'isohyète 1200 mm vers le Nord du bassin et la diminution de l'extension de l'isohyète 1100 mm. Les fluctuations décennales régressives des isohyètes sont restées sur le bassin autour de l'isohyète de référence 1200 mm. L'observation de la régression spatiale de la pluviométrie est perceptible à l'échelle de la zone d'étude.

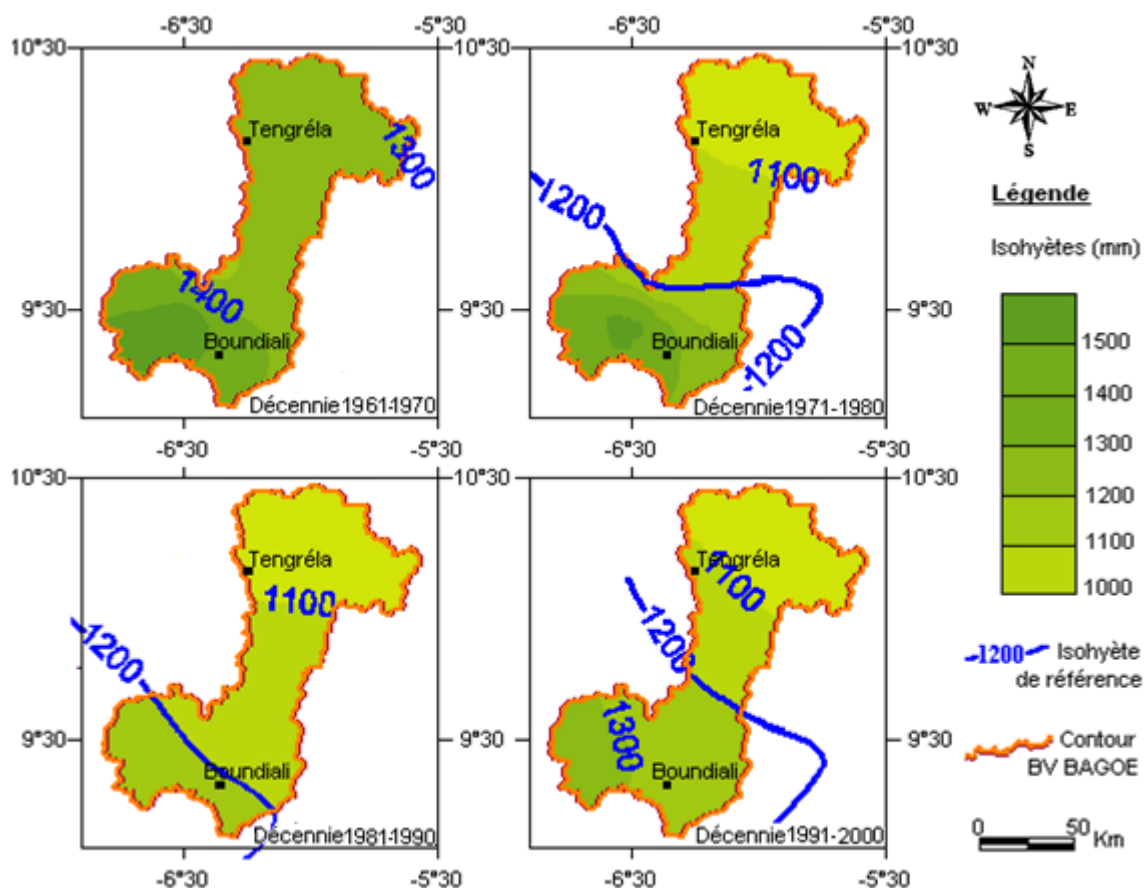


Fig. 6. Cartes de la dynamique spatiale décennale des isohyètes sur la période 1961-2000

4.4 IMPACT DE LA VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS SUR LES ÉCOULEMENTS

La figure 7 présente la courbe de la variation des lames d'eau moyennes annuelles écoulées centrées et réduites sur la période 1961-1986. L'analyse montre que les lames d'eau écoulées ont baissé sur toute la chronique d'observation. Cette baisse est représentée par la droite de tendance associée à la courbe de la variation des indices des lames d'eau écoulées. Cette courbe est structurée en deux phases caractéristiques (positive et négative) séparées par une rupture hydrologique à la fin de l'année 1970. La phase des fluctuations positives concerne la période 1961-1970, caractérisée par une succession de crues moyennes d'amplitudes fluctuant entre 231, 92 mm (38, 17 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 443 mm (67, 21 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ces lames d'eau écoulées sont largement supérieures à la lame d'eau moyenne interannuelle écoulée qui est de 32, 29 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La phase des fluctuations négatives concerne la période 1971-1986. Au cours de cette phase, le fleuve Bagoé a enregistré ses plus faibles lames d'eau écoulées qui ont fluctué entre 22, 18 mm (3, 34 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 184, 95 mm (28, 02 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

La figure 8 montre les courbes des fluctuations moyennes annuelles des lames d'eau écoulées et précipitées (en variables centrées et réduites) sur la chronique commune de données de la période 1961-1986. L'analyse montre qu'à la suite de la rupture hydrologique survenue en 1970, le bassin est rentré en récession hydrique hydrologique plutôt que la récession hydrique climatique indiquée par la période sèche de 1976 à 2000 sur les pluies. En effet, la baisse des écoulements a commencé en 1971 soit cinq ans plutôt que la période climatique sèche de 1976 à 2000.

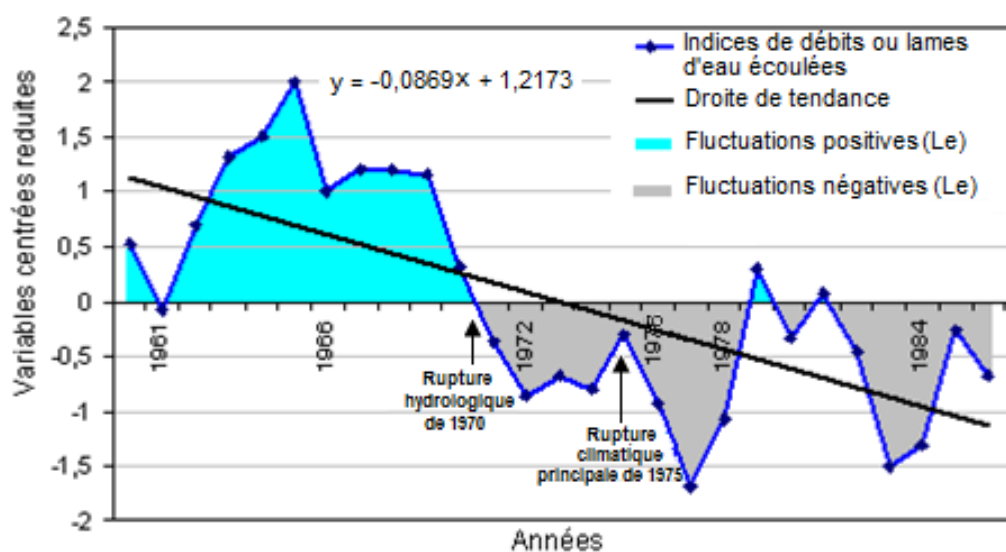


Fig. 7. Fluctuations moyennes annuelles de la lame d'eau écoulée centrées et réduites sur la période 1961-1986

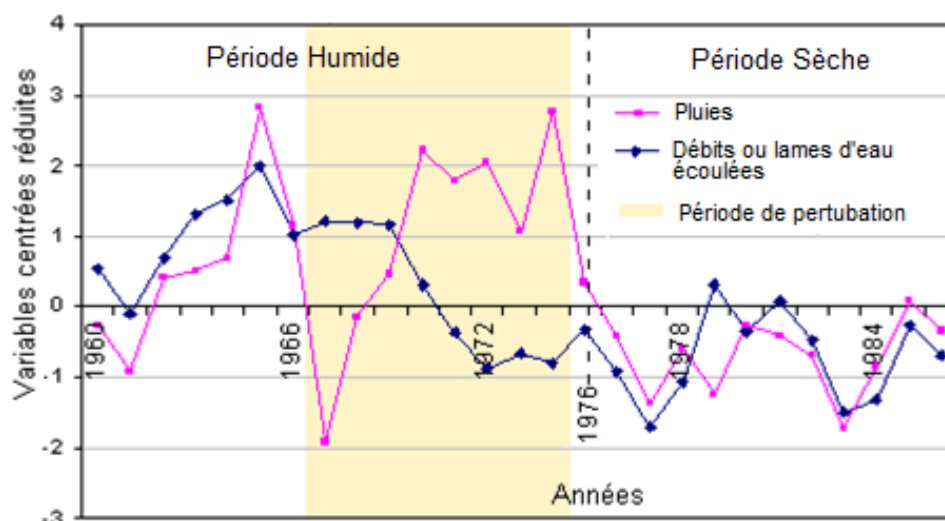


Fig. 8. Fluctuations moyennes annuelles des lames d'eau écoulées couplée à celles des précipitations moyennes annuelles sur la période 1961-1986

Une tendance synchrone s'observe entre les fluctuations des pluies et des lames d'eau écoulées de 1961 à 1966 et de 1975 à 1986. Au cours de la période 1961-1966 (une partie de l'unique période humide), les lames d'eau écoulées ont augmenté en même temps que les pluies. Pendant cette période, la zone d'étude fut sous l'emprise des isohyètes 1300, 1400 et 1500 mm. Au cours de la période 1975-1986, les lames d'eau écoulées ont baissé considérablement pendant que le bassin enregistrait des déficits pluviométriques importants avec une prédominance des isohyètes 1100 et 1200 mm. Il s'agit de la phase des fluctuations négatives des lames d'eau écoulées, qui coïncide en partie avec la période sèche de 1976 à 2000.

La période 1967-1974 est une période de perturbation pendant laquelle les lames d'eau écoulées et les lames d'eau précipitées ont évolué de manière asynchrone. En effet, de 1967 à 1969, les faibles pluies enregistrées n'ont pas eu d'effets significatifs sur les lames d'eau écoulées qui sont restées très importantes. À *contrario*, de 1970 à 1974, les lames d'eau écoulées ont fortement baissé quoique les précipitations enregistrées fussent très importantes. À la suite de tout ce qui précède, la période 1967-1974 se présente comme une période anormale dans l'analyse de la relation pluie-débit sur le bassin.

5 DISCUSSION

Les caractéristiques statistiques de la pluviométrie dans le bassin versant de la Bagoé s'inscrivent dans la gamme de celles des pluviométries enregistrées dans le Nord de la Côte d'Ivoire. La précipitation moyenne annuelle de 1397, 04 mm enregistrée, est bien comprise entre 1000 et 1400 mm comme l'ont révélé plusieurs auteurs dont [24], [25]. La tendance quasi générale à la baisse des précipitations est observée comme la plupart des études effectuées en Afrique de l'Ouest [26], [27], [28], [29]. La période sèche allant de 1928 à 1949 avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1298, 26 mm et un déficit de 7, 60%, a été également identifiée par [26] et [30]. Toutefois, cette période sèche demeure insuffisamment mise en évidence dans les travaux climatologiques antérieurs. La période humide, avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1600, 25 mm et un excédent de 12, 70%, qui survient par la suite, a été identifiée par plusieurs auteurs au cours de la période 1950-1970 [22], contre 1950-1975 dans le cas de cette étude. Ainsi, la vague des sécheresses des années 1970, qui a causé de nombreuses pertes humaines et dégâts agricoles et pastoraux [31], a débuté sur le bassin après l'année 1975 c'est-à-dire entre 1976 et 2000 avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1233 mm et un déficit plus important de 13, 30%. L'année 1975 est celle de la rupture climatique principale que le test de Pettitt et la procédure de segmentation d'Hubert ont formellement mis en évidence dans la série des pluies, conformément aux études menées par [32] sur le bassin versant du N'Zi en Côte d'Ivoire. Cette rupture s'inscrit parfaitement dans la période de 1968 à 1980 des principales ruptures identifiées en Côte d'Ivoire par [4], [9], [22], [33] et en Afrique de l'Ouest par [6], [21], [22]. Par ailleurs, une rupture secondaire probable qu'aurait décelée le test de Pettitt en 1949 ne coïncide pas avec la seconde rupture obtenue par la segmentation d'Hubert entre 1969 et 1970. La date la plus probable de cette seconde rupture serait l'année 1949 car, l'évolution de la lame d'eau précipitée sur le bassin est très contrastée de 1949 à 1950. L'existence probable d'une rupture secondaire dans la série des pluies de Boundiali par le test de Pettitt a été également signalée par [33] et [32] respectivement dans la région de Man et sur le bassin versant du N'Zi en Côte d'Ivoire. L'existence probable de deux ruptures au sein de la série des pluies conforte le découpage climatique en trois périodes. L'existence des deux périodes sèches (1928-1949 et 1976-2000) témoigne de la récession hydrique que connaît le bassin, également ressentie dans tout le Nord de la Côte d'Ivoire [34]. Cela fait suite à la persistance de la sécheresse sur la période d'étude longue de 73 années contenant 64, 38% d'années sèches contre 35, 62% d'années humides.

Au plan géo-spatial, le glissement des isohyètes vers le Sud-Ouest traduit comme l'indique le programme ICCARE, la diminution généralisée de la pluviométrie annuelle dans le bassin versant de la zone d'étude. Ce glissement des isohyètes dans la direction Sud-Ouest a également été observé en milieu forestier ivoirien par [35]. Ce même constat se rapproche de celui de [36] qui ont évoqué un glissement continu des isohyètes vers le Sud au niveau du haut bassin du fleuve Sénégal. Cette expression de la baisse spatiale des précipitations est beaucoup remarquable qualitativement par l'enfoncement de l'isohyète 1200mm du Nord-Est au Sud-Ouest. Les décennies 1971-1980 et 1981-1990 témoignent de la baisse des précipitations, très accentuée au cours de la décennie 1981-1990 en Côte d'Ivoire [22], [35], et dans la sous-région. Le comportement des précipitations à la dernière décennie, qualifié de réajustement spatial des pluies ou de préparation à la reprise pluviométrique, a aussi été observé sur le bassin du N'Zo par [9]. Ce même constat a été signalé par [30] à Aleg en Mauritanie, mais qui ont plutôt conclu directement à un retour à l'humidité.

Dans l'analyse de la relation pluie-débit, les anomalies constatées sur la période de perturbation de 1967 à 1974 expriment selon [37], une augmentation continue du tarissement telle qu'observée par [9] dans le régime d'écoulement du fleuve N'Zi en Côte d'Ivoire. Ces perturbations du régime hydrologique des cours d'eau vis-à-vis des précipitations, résultent du prolongement sur plusieurs années des déficits pluviométriques [8], [38] enregistrés sur le bassin. En effet, la relation entre les cours d'eaux superficielles et les réservoirs souterrains (relation rivière-nappe) et/ou la relation de rétention-restitution des réservoirs souterrains serait aussi à l'origine de ces perturbations. La baisse des lames d'eau écoulées intimement liée à celle des précipitations, caractérisée au plan spatial par la disparition des isohyètes 1300, 1400 et 1500 mm au profit des isohyètes 1100 et 1200 mm, est aussi attribuable à l'aménagement de nombreux barrages hydrauliques. Ces ouvrages sont complétés par des canalisations d'irrigation et des aménagements de Prise au Fil d'Eau (PFE), réalisés en majorité dans les années 1970 pour assurer l'Alimentation en Eau Potable (AEP) des populations et pour satisfaire les besoins en eau au plan agricole et pastoral. Les barrages contribuent à amplifier les perturbations du régime hydrologique des cours d'eau suscitées par la sécheresse [39]. En effet, dans ce même ordre d'idées, [40] a indiqué, sur le bassin de l'Oued Merguellil en Tunisie, que ces aménagements de conservation d'eau sont l'objet d'importants prélèvements d'eau lesquels entraînent la forte baisse du niveau piézométrique. Une telle situation favorise l'assèchement en surface des cours d'eau, donc la réduction des apports à l'écoulement de base. Le régime hydrologique du fleuve Bagoé s'inscrit dans le contexte général de l'écoulement des cours d'eau en Afrique, qui ont connu leur principale rupture hydrologique en 1970 [8], [39]. La baisse des écoulements sur le bassin est traduite par une tendance à la chute des lames d'eau écoulées qui ont varié de 231, 92 mm (38, 17 m³.s⁻¹) à 443 mm (67, 21 m³.s⁻¹) de 1961 à 1970 et de 22, 18 mm (3, 34m³.s⁻¹) à 184, 95 mm (28, 02 m³.s⁻¹) de 1971 à 1986.

6 CONCLUSION

La variabilité spatio-temporelle des précipitations sur le bassin versant de la Bagoé est étudiée à l'aide de la longue série chronologique (1928-2000) des pluies de la station de Boundiali. Cette série qui admet une pluviométrie moyenne annuelle de 1397, 04 mm, a fait ressortir deux périodes sèches séparées par une période humide. La première période sèche allant de 1928 à 1949 est marquée par une pluviométrie moyenne de 1298, 26 mm et un déficit de 7, 60%. L'unique période humide part de 1950 à 1975 avec une pluviométrie moyenne de 1600, 25 mm et un excédent de 12, 70%. La deuxième période sèche couvre la période 1976-2000 avec une pluviométrie moyenne de 1233 mm et un déficit plus important de 13, 30%. Cette série des pluies de la station de Boundiali comporte une rupture secondaire produite en 1949 et une rupture principale produite en 1975, mises en évidence par le test de Pettitt et la procédure de segmentation d'Hubert. La rupture principale de 1975 a engendré un déficit pluviométrique de l'ordre de 13, 30% sur la période sèche allant de 1976 à 2000. Cette manifestation de la variabilité temporelle du climat sur le bassin est marquée par 64, 38% d'années sèches contre 35, 62% d'années humides.

Au plan géo-spatial, l'analyse décennale de la dynamique des précipitations a montré une régression ou un glissement des isohyètes du Nord-Est vers le Sud-Ouest traduisant la diminution généralisée de la pluviométrie annuelle sur le bassin versant de la zone d'étude. Cette régression est très expressive au cours des décennies 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 et 1990-2000 marquée par la disparition des isohyètes de fortes pluviométries (1300, 1400, 1500 mm) au détriment de l'extension des isohyètes de faibles pluviométries (1100 et 1200 mm).

Les lames d'eau écoulées au niveau des cours d'eau notamment du fleuve Bagoé ont considérablement baissé, passant d'une variation de 231, 92 mm ($38, 17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à 443 mm ($67, 21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de 1961 à 1970 à une variation de 22, 18 mm ($3, 34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à 184, 95 mm ($28, 02 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de 1971 à 1986 avec une période de perturbation de 1967 à 1974. La lame d'eau moyenne écoulée est de 196 mm ($32, 29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La baisse des lames d'eau écoulées est aussi attribuable à la construction de barrages hydrauliques pour l'alimentation en eau potable et pour le développement des activités agro-pastorales. L'étude de la variabilité spatio-temporelle des pluies et son incidence sur le régime d'écoulement des cours d'eau ainsi mise en évidence, devra être prise en compte dans la planification et dans l'exécution des projets de développement sur le bassin versant de la Bagoé.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Prof. JOURDA Jean Patrice Roger pour ses remarques avisées qui ont permis d'améliorer le contenu de cet article ainsi que le Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) d'avoir fourni le matériel et les données nécessaires à la réalisation de ce travail. Ils remercient enfin le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique d'avoir financé ce projet de recherche.

REFERENCES

- [1] Faty, A. Kane & L. A. Ndiaye, "Influence de la manifestation climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers dans le haut bassin versant du Sénégal," *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 30, no 2, pp. 79–87, 2017. DOI: 10.7202/1042915ar.
- [2] Bodian, O. Ndiaye & H. Dacosta, "Évolution des caractéristiques des pluies journalières dans le bassin versant du fleuve Sénégal: Avant et après rupture," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 61, no. 5, pp. 905-913, 2016. DOI: 10.1080/02626667.2014.950584.
- [3] DOI: 10.1080/02626667.2014.950584.
- [4] E. J. Paturel, E. Servat et O. M. Delattre, "Analyse des séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique," *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 43, no. 3, pp. 937-945, 1998. DOI: 10.1080/02626669809492188.
- [5] E. Servat, E. J. Paturel, B. Kouamé, M. Travaglio, M. Ouédraogo, F. J. Boyer, H. Lubes-Niel, M. J. Fritsch, M. J. Masson. Et B. Marieu, "Identification, caractérisation et conséquence d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale," *IAHS*, no. 252, pp. 323-337, 1998.
- [6] E. Servat, E. J. Paturel, H. Lubès-Niel, B. Kouamé, M. J. Masson, M. Travaglio et B. Marieu, "De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale," *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 12, no. 2, pp. 363-387, 1999.
- [7] Ardoin-Bardin, S., Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, France, 440 p, 2004.

- [8] Malou, R., Impact du climat sur les ressources en eau en zone soudano-sahélienne (Sénégal), Thèse de Doctorat d'État, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 147 p, 2004.
- [9] G. Mahé, C. J. Olivry et E. Servat "Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux: extrêmes et paradoxes," IAHS Publication, no. 296, pp. 169-177, 2005.
- [10] T. B. Goula, I. Savané, B. Konan, V. Fadika et B. G. Kouadio, "Étude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du n'zo et du n'zi en Côte d'Ivoire," Sciences & Nature, vol. 2, no. 1, pp. 19-34, 2005.
- [11] T. Lebel et A. Ali, "Recent trends in the central and western Sahel rainfall regime (1990–2007)," Journal of Hydrology, vol. 375, pp. 52–64, 2009. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.11.030.
- [12] T. Abrate, P. Hubert et D. Sighomnou, "A study on hydrological series of the Niger River," Hydrological Sciences Journal, vol. 58, no. 2, pp. 271–279, 2013. DOI: 10.1080/02626667.2012.752575.
- [13] Bodian, "Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest)," Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement, vol. VIII, pp. 297-312, 2014. DOI: 10.4000/physio-geo.4243.
- [14] G. A. Wassilé, A. Madi et E. F. Dassou, "Caractérisation de la variabilité pluviométrique sur les bassins versants des barrages collinaires des Monts Mandara, extrême-nord Cameroun," Afrique SCIENCE, vol. 15, no. 4, pp. 215-231, 2019.
- [15] G. M. Adja, J. E. Djémin, A-F O. N'Dri, P. Tohouri, J. K. Kouamé et P. J. Jourda, "Apport de l'Analyse Hydrologique et de la Modélisation de la Relation Pluie-Débit dans le Suivi Quantitatif des Ressources en Eau dans un Contexte de Variabilité Climatique: Cas du Sous-Bassin Versant du Kouto (Nord de la Côte d'Ivoire)," European Journal of Scientific Research, vol. 154, no. 2, pp. 192-212, 2019.
- [16] INS, Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RPGH), Résultats Globaux (par Districts, régions, Départements et Sous-Préfectures) du Secrétariat Technique Permanent du Comité Technique du RGPH, Institut National de la Statistique Côte d'Ivoire, 26 p, 2014.
- [17] ORSTOM, Journées de la recherche scientifique en région de savane; Korhogo, 12-15 avril 1976, République de Côte d'Ivoire, Ministère de la Recherche Scientifique, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Centre d'Adiopodoumé, 20 p, 1976.
- [18] Kientz, A., Développement rural du département de Boundiali-Côte d'Ivoire: Bilan diagnostic, Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales, CIDT, GmbH (GTZ), Coopération technique République Fédérale d'Allemagne, 121 p, 1993.
- [19] F. J. Boyer, H. Lubès-Niel, E. J. Paturel et E. Servat, "Khronostats-Logiciel de détection des fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques," IRD, UMR Hydrosociétés, 1998.
- [20] H. Lubès-Niel, M. J. Masson, E. J. Paturel et E. Servat, "Variabilités climatiques et statistiques: Étude 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, vol. 11, no. 3, pp. 383-408, 1998.
- [21] N. A. Pettitt, "A non-parametric approach to the change-point problem," Appl. Statistics, vol. 28, no. 2, pp. 126-135, 1979.
- [22] P. Hubert, P. J. Carbonnel et A. Chauouche, "Segmentation des séries hydrométéorologiques: Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest," Journal of Hydrology, vol. 110, no. 3, pp. 349-367, 1989.
- [23] Paturel, J. E., Servat E., Kouamé, B., Lubès H., Masson, J. M., Boyer J.F., Travaglio M. Et Marieu B., Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du golfe de Guinée: Approche régionale intégrée, In: Programme d'Hydrologie International (PHI), Premier atelier scientifique du projet FRIEND-AOC, 14 décembre 1995: Variabilité climatique et variabilité des ressources en eau, PHI-IV, projet H-5/PHI-V projet 1-1, Documents techniques en hydrologie/no.16, UNESCO, Paris, SC-98/ws/10, pp. 5-35, 1997.
- [24] S. Bigot, T. Y. Brou, J. Oszwald et A. Diedhiou, "Facteurs de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales," Sciences et Changements Planétaires/Sècheresse, vol. 16, no. 1, pp. 5-13, 2005.
- [25] Savané, I., Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire): Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale, Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 396 p, 1997.
- [26] Jourda, J. P., Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'informations géographiques à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale: cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 430 p, 2005.
- [27] S. Janicots et B. Fontaine, "L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récentes des précipitations en Afrique de l'Ouest," La météorologie, 8e série, no. 1, pp. 28-41, 1993.
- [28] V. Moron, "Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992)," Sciences et Changements Planétaires/Sècheresse, vol. 1, no. 7, 25-34, 1996.
- [29] D. J. M. Makanga et G. Samba, "Organisation pluviométrique de l'espace Congo-Gabon (1951-1990)," Sciences et Changements Planétaires/Sècheresse, vol. 1, no. 8, pp. 39-45, 1997.

- [30] B. Sultant, C. Baron, M. Dingkuh, B. Sarr et S. Jannicot, "La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnières et intra-saisonnières. II: application à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel, " Sciences et Changements Planétaires/Sécheresse, vol. 16, no. 1, pp. 23-33, 2005.
- [31] J. Lejot et Y. Callot, "l'homme et l'eau à Aleg (Mauritanie): de la pénurie à l'excès, " Sciences et Changements Planétaires/Sécheresse, vol. 3, no. 16, pp. 175-181, 2005.
- [32] Guillaumie, K., Hassoun, C., Manero, A., Chourrout, M. Et Scholler, M., La sécheresse au Sahel, un exemple de changement climatique, Atelier « Changement Climatique », ENPC-Département VET, 40 p, 2004.
- [33] Kouassi, A. M., Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 217 p, 2007.
- [34] Savané, M. K. Coulibaly et P. Gioan, "Variabilité climatique et ressource en eau souterraine dans la région semi-montagneuse de Man, " Sciences et Changements Planétaires/Sécheresse, vol. 12, no. 4, pp. 231-237, 2001.
- [35] DTHK, Rapport d'activité 1999, Direction de l'Hydraulique Humaine, Direction Territoriale d'Hydraulique de Korhogo, 36 p, 2000.
- [36] Brou, T. Y., Servat, E. Et Paturel, J. E., Interaction entre pluviométrie et activités agro-économiques en milieu forestier ivoirien. Premier atelier scientifique du projet FRIEND-AOC, Cotonou (Benin), 14 décembre 1995 In: Variabilité climatique et variabilité des ressources en eau; PHI-IV, projet H-5/PHI-V projet 1-1, Documents techniques en hydrologie, no. 16, UNESCO, Paris, SC-98/ws/10, pp. 115-126, 1997.
- [37] Bodian, H. Dacosta et A. Dezetter, "Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique, " Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement, vol. V, pp. 107-124, 2011.
- [38] G. Mahé et C. J. Olivry, "Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989, " Sciences et Changements Planétaires/Sécheresse, vol. 6, no. 1, pp. 109-117, 1997.
- [39] C. J. Olivry, P. J. Bricquet et G. Mahé, "Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies, " IAHS Publication, no. 252, pp. 189-197.1998.
- [40] Aka, A. A., Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturel, J. E. Et Kouamé, B., Analyse de l'évolution temporelle des écoulements en Côte d'Ivoire. Approche statistique et caractérisation des phénomènes In: Programme d'Hydrologie International (PHI), Premier atelier scientifique du projet FRIEND-AOC, 14 décembre 1995: Variabilité climatique et variabilité des ressources en eau. PHI-IV, projet H-5/PHI-V projet 1-1, Documents techniques en hydrologie, no. 16, UNESCO, Paris, SC-98/ws/10, pp. 46-63, 1997.
- [41] Kingumbi, A., Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation: Cas du Merguellil en Tunisie Centrale, Thèse de Doctorat (Génie hydraulique), Université de Tunis El Manar, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 218 p, 2006.