

## Étude De La Variabilité Hydroclimatique Et De Ses Conséquences Sur Les Ressources En Eau Du Sud Forestier Et Agricole De La Côte d'Ivoire : Cas De La Région d'Abidjan-Agboville

**Kouassi Ernest AHOUSSE<sup>1</sup>**

**Yao Blaise KOFFI<sup>1</sup>**

**Amani Michel KOUASSI<sup>22</sup>**

**Gbombélé SORO<sup>1</sup>**

**Nagnin SORO<sup>1</sup>**

**et Jean BIÉMI<sup>1</sup>**

### Abstract

*Climate variability observed since the 1970s has resulted in a drought last thirty years in West Africa in general and in the Sahelian and humid countries bordering the Gulf of Guinea. It results in severe reductions in rainfall, groundwater levels and stream flows drop of water. In order to examine the existence of the climate variability in Côte d'Ivoire, precisely in the region of Abidjan-Agboville, and highlight its impact on the supply of water, that this study was initiated. To do this, various data and methods were used. Thus, the methodology involves the calculation of centered reduced indices of NICHOLSON, testing PETTIT, the Bayesian method of LEE and HEGHINIAN and Segmentation of HUBERT. The region is marked by alternating normal period, wet and dry, with a long period deficit starting from 1970. The rainfall deficit is between 10 % and 31%, with an average value of 20 %. The largest deficits were recorded in the southern region, including Alépé (31 %), Adiaké (25 %) and Abidjan (20 %). Hydrological regimes have also undergone profound changes over the period 1955-2003. The decline in rainfall has resulted in a reduction of water supplies that pass through the rivers of the region. This decrease is marked by a very significant breach identified in 1968 at the Agboville station on the river Agnéby. The lack of flow is very important and is estimated at 41.3 %, double the rainfall deficit (20 %). At the river Agnéby, coefficients of drying of MAILLET (with flow in  $m^3 s^{-1}$  and time in days) are changing from 0.0314 to 0.106 before 1968 and from 0.0367 to 0.124 after 1968. This increase in the coefficient of drying after 1968 shows a much faster draining aquifers supplying base flow. The mean values ranged from 0.065 before 1968 and 0.0814 after this year. The volume of water mobilized aquifer rises to  $0.143 km^3$  for an average depletion coefficient of 6.53 during the period 1956-1968 and  $0.058 km^3$  for a coefficient of drying average of 0.0814 from 1969 to 2003. Volumes mobilized aquifer after 1968 fell 59.45 %, resulting in a considerable reduction of groundwater reserves. The fluctuation of rainfall isohyets shows that 2300 mm and 2200 mm in the region during the decade 1950-1959 have disappeared to make room for 1500 mm isohyets during the decade 1990-1999.*

**Key-words:** decrease rainfall, drought, environment, water supply and Abidjan-Agboville, Côte d'Ivoire.

<sup>1</sup> Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 ABIDJAN 22, CÔTE D'IVOIRE.

<sup>2</sup> Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, BP 1093 YAMOOUSSOUKROU, CÔTE D'IVOIRE

## **Introduction**

Les variations climatiques observées dans le monde pendant les dernières décennies ont beaucoup influencé les ressources en eau du continent africain. En effet, les études portant sur la variabilité et les changements climatiques ont intéressé la communauté mondiale suite à plusieurs manifestations climatiques de grande ampleur et l'on note parmi celles-ci la sécheresse qui a touché les deux bandes tropicales de notre planète (surtout les pays sahéliens d'Afrique de l'Ouest) depuis les années 1970 (J. SIRCOULON, 1976). Cette variation climatique se traduit sur le continent africain par une sécheresse qui sévit depuis une trentaine d'années dans les pays sahéliens et qui connaît une extension vers les pays humides en bordure du Golfe de Guinée. Cette sécheresse a pour conséquence de graves baisses des précipitations, des niveaux piézométriques et la chute des débits des cours d'eau (É. SERVAT *et al.*, 1998).

La Côte d'Ivoire n'est pas en marge de ce phénomène. En effet, tous les auteurs qui ont travaillé dans le domaine de l'hydrogéologie ivoirienne : N. SORO (1987), dans le bassin versant de la Mé, J. BIÉMI (1992) dans la région de la Marahoué, I. SAVANÉ (1997) à Odiénné, K.F. KOUAMÉ (1999) et M.B. SALEY (2003) dans la région semi-montagneuse de Man, T.D. SORO *et al.* (2011) à Grand Lahou, ont fait cas de ces différentes variations sur les niveaux piézométriques des nappes. Ces variabilités imprévisibles du climat ont considérablement perturbé les systèmes cultureux existants dans les régions de la Côte d'Ivoire. Ces perturbations climatiques sont également observées dans la région d'Abidjan Agboville, située dans le Sud forestier de la Côte d'Ivoire. Ainsi les retenues d'eau de la région sont souvent menacées par des phénomènes de tarissement et de dégradation de leur qualité physico-chimique. De même, les précipitations qui constituent la fonction d'entrée principale des nappes d'eau souterraine se raréfient. Cela se traduit dans par une baisse des niveaux piézométriques des nappes phréatiques suivie d'une dégradation de leur qualité physico-chimique. L'étude des paramètres hydroclimatiques permet de comprendre les variations climatiques qui ont affecté la région d'Abidjan-Agboville et surtout de la placer dans un contexte régional. Les effets de celles-ci présentent parfois des impacts sur les réserves en eau de la région, d'où leur intérêt dans cette étude. Les différentes méthodes utilisées ont été appliquées en Afrique de Ouest par de nombreux auteurs dont P. HUBERT *et al.* (1989), G. MAHÉ et J.C. OLIVRY (1995), É. SERVAT *et al.* (1999) et J.E. PATUREL *et al.* (2002, 2004), et particulièrement en Côte d'Ivoire par I. SAVANÉ *et al.* (2003), M.B. SALEY (2003), Y.A. N'GO *et al.* (2005), A.M. KOUASSI (2007), B. T. A. GOULA (2009), F. KANOHIN (2009) et Y. T. BROU (2010). Ces méthodes ont donné dans l'ensemble des résultats satisfaisants dans la compréhension de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire ; ce qui a motivé leur choix et leur application dans la région d'Abidjan-Agboville.

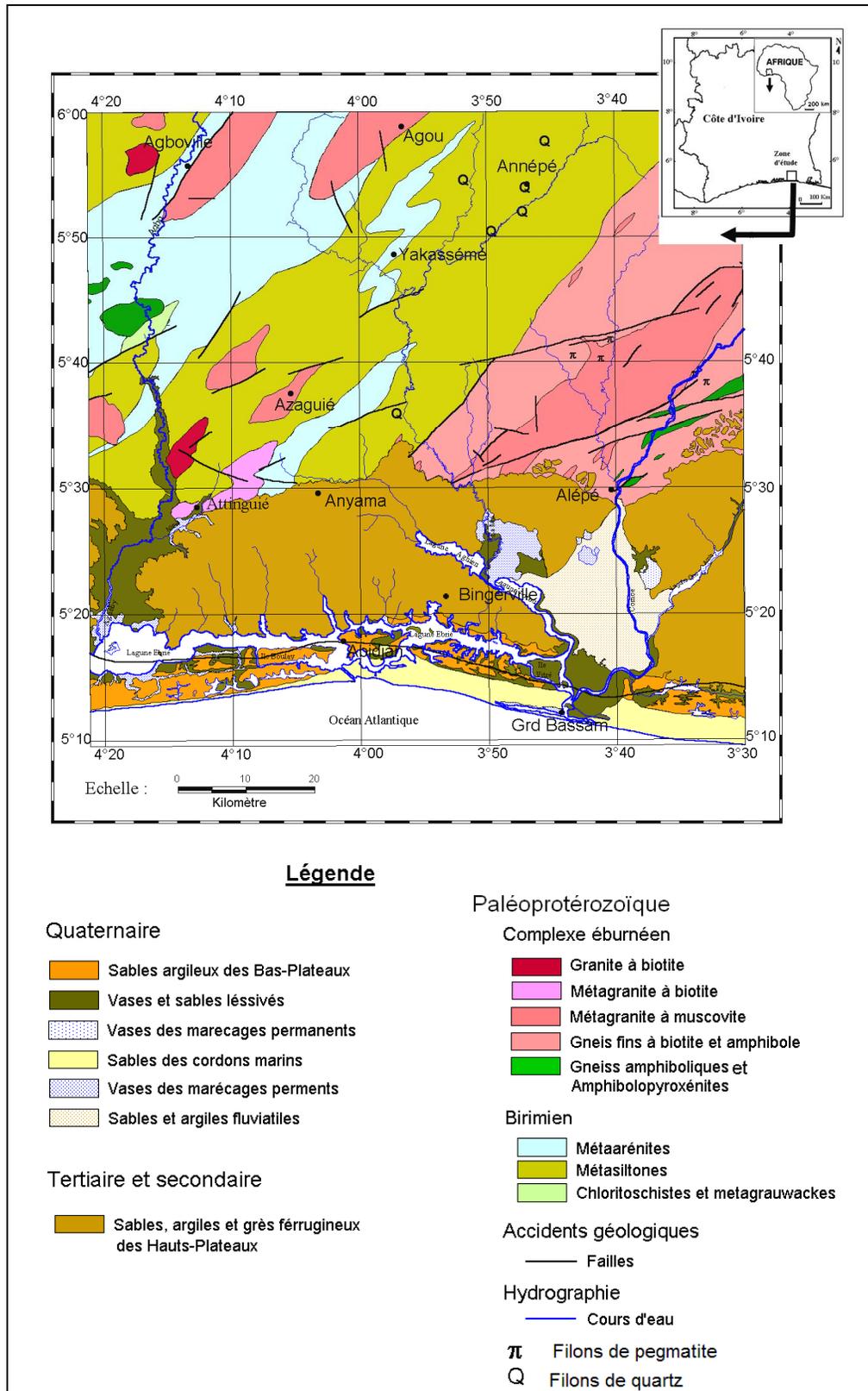
## **Cadre géographique et géologique de l'étude**

Le secteur d'étude est situé au Sud de la Côte d'Ivoire, en zone forestière, entre les latitudes 5°30 et 6°00 Nord et les longitudes 3°30 et 4°20 Ouest (Fig. 1). Cette région, d'environ 5 millions d'habitants, est confrontée à une énorme croissance démographique, liée à l'exode massif des populations venant des autres régions du pays. Le climat de la région est de type équatorial dans la zone littorale, et tropical humide vers Agboville. Le régime pluviométrique de la région est influencé par le déplacement du front intertropical. Cette région est une zone pluvieuse, avec des précipitations interannuelles supérieures à 1500 mm. Elle est caractérisée par quatre saisons dont deux saisons pluvieuses, une grande saison de pluie d'avril à juillet et une petite saison de pluie d'octobre à novembre. Ces deux saisons sont entrecoupées par deux périodes sèches qui s'étendent de décembre à mars et d'août à septembre.

La végétation évolue de la forêt claire sur le littoral au sud à la forêt dense sempervirente et ombrophile vers le Nord de la région. Cette forêt est largement dégradée suite à la croissance de l'habitat humain, au développement de l'agriculture et à son exploitation abusive. Ladite localité renferme également un réseau hydrographique très dense composé du fleuve Comoé et des rivières Mé et Agnéby ainsi que de leurs affluents.

Du point de vue géologique, la région d'Abidjan-Agboville appartient à un ensemble formé de deux unités géologiques dont le bassin sédimentaire situé au Sud et le socle cristallin et cristallophyllien au Nord, constitué de roches volcano-sédimentaires. Les formations du socle qui affleurent dans la région sont attribuées au Paléoprotérozoïque et définissent le cycle de dépôt birimien (C. DELOR *et al.*, 1992). Leur origine est essentiellement sédimentaire, avec un fort pourcentage de faciès détritiques grossiers. Le socle est constitué de formations birimiennes qui sont les schistes, les métaarénites et les métasiltones. Dans ces formations, apparaissent en intrusions des granitoïdes éburnéens composés de gneiss, de granites, de granito-gneiss, auxquels sont associés des auréoles de métamorphisme. L'altération de ces formations produit une épaisse couche d'altérites dont la puissance varie de 4 à 40 m (Y.A. N'GO *et al.*, 2005). Le socle est de manière générale incliné du nord au sud en direction de l'Océan Atlantique, avec une pente qui varie entre 6 et 9 %.

L'hydrogéologie de la zone d'étude est caractérisée par la présence de haut en bas de deux aquifères. Il s'agit premièrement de l'aquifère du bassin sédimentaire et l'aquifère du socle. L'aquifère du bassin sédimentaire contient les nappes les plus importantes de la région. Parmi ces nappes, on mentionne la nappe du Continental Terminal qui est utilisée pour l'alimentation en eau de la population de la ville d'Abidjan. L'aquifère du socle recèle les nappes de fractures ou de fissures qui sont peu productives. Les débits rencontrés lors des formations sont faibles et varient de 0,5 m<sup>3</sup>/h à 17 m<sup>3</sup>/h pour des grandes agglomérations comme la ville d'Agboville.



**Figure 1 - Carte géologique de la région d'Abidjan-Agboville (d'après C. DELOR *et al.*, 1992).**

### ***Matériel Et Méthodes***

L'approche méthodologique utilisée s'appuie sur des données climatiques et un ensemble de méthodes statistiques, et sur l'évaluation des modifications des conditions hydriques.

#### **Données de l'étude hydroclimatologique et hydrologique**

Les données comprennent les données pluviométriques et hydrométriques au pas de temps mensuel. Les données pluviométriques utilisées sont celles des stations d'Abidjan, Adiaké, Azaguié, Alépé et Agboville (Fig. 2). Ces données s'étendent sur la période 1923-2000 et proviennent de la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéro-nautique et Météorologique (SODEXAM) qui est le principal gestionnaire sur le territoire ivoirien. Les données de température provenant de la station synoptique d'Abidjan ont été également utilisées et étendues à l'ensemble de la région.

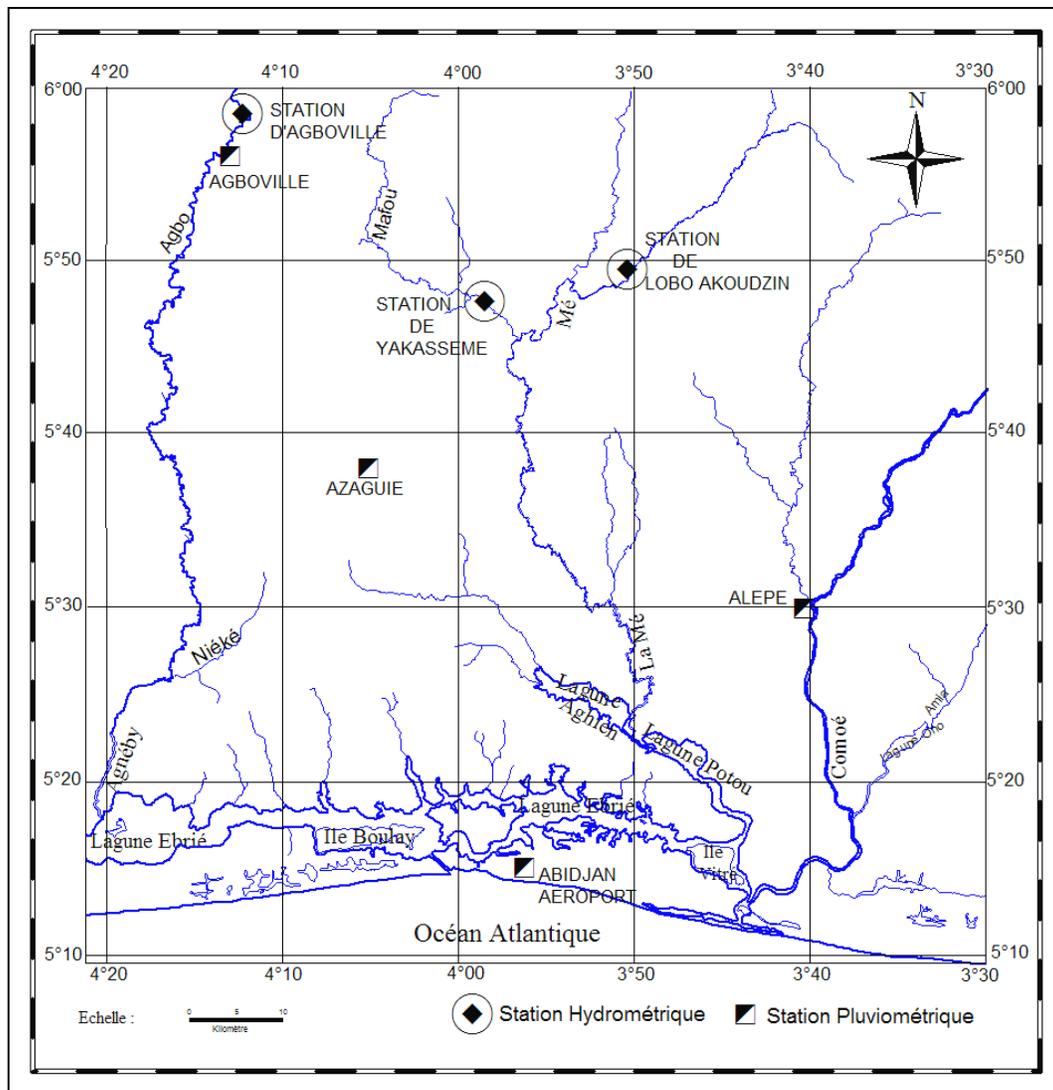
Les données de débits de trois stations hydrométriques ont servi à l'étude. Ces dernières ont été fournies par la Direction de l'Hydrologie, sous Direction de la Direction de l'Hydraulique Humaine.

#### **a. Critique des données**

Des lacunes ont été remarquées dans les séries chronologiques des pluies et de débits pendant certaines années ou mois d'une année. Celles-ci ont été comblées pour éviter l'introduction d'erreur avant le traitement des données.

#### **b. Corrections des données pluviométriques**

Les données pluviométriques sont bonnes dans l'ensemble mais comportent quelques lacunes. Avant de combler ces lacunes, nous avons utilisé la méthode des doubles masses (doubles cumuls) afin de vérifier l'homogénéité des séries de l'ensemble du réseau de postes pluviométriques. Cette méthode permet de tester l'homogénéité et de critiquer les données brutes du réseau pluviométrique. Cette comparaison utilise, au pas de temps choisi, non pas les valeurs observées mais leur cumul (P. MEYLAN et A. MUSY, 1998, *in* S. RIAD, 2003).



**Figure 2 - Localisation des stations pluviométriques et hydrométriques.**

L'évaluation des données manquantes à une station a été déterminée à partir des valeurs provenant de la station voisine présentant le meilleur coefficient de corrélation et ayant fonctionné durant le mois manquant. La formule la plus simple pour combler, sans erreur majeure les lacunes des séries, est de remplacer la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance mensuelle des stations (A. MUSY et V. LAGLAINE, 1992, in S. RIAD, 2003). Dans notre cas, le test du double cumul a montré que les données des différentes stations pluviométriques sont homogènes, avec de très forts coefficients de corrélation. Dans ce cas, nous pouvons utiliser les données d'une station voisine.

### c. Correction des données hydrométriques

La méthode utilisée pour reconstituer les données hydrométriques manquantes de la station d'Agboville est celle du critère de proportionnalité analogue. Les différentes surfaces des sous bassins ont été calculées et les rapports ont été utilisés. En régime tropical, les débits d'étiage sont très faibles voire nuls et peuvent être remplacés, très souvent, par les moyennes interannuelles sans avoir recours à des corrélations mensuelles ou aux débits journaliers (S. ARDOIN-BARDIN, 2004). Cette méthode a été utilisée en complément de la première.

### Méthode d'étude de la variabilité climatique

L'étude de la variabilité climatique a été réalisée à l'aide de l'analyse des données collectées sur les quatre stations de la région. À partir de l'analyse de la variabilité des précipitations, les périodes de déficits et d'excédents pluviométriques à l'échelle spatio-temporelle ont été mises en évidence. L'évolution des précipitations a été réalisée par la méthode de calcul de l'indice pluviométrique de NICHOLSON et la méthode du filtre passe-bas de "HANNING d'ordre 2".

#### a. Indice de NICHOLSON

Il permet d'observer les variations pluviométriques sur une longue série d'observations. Le calcul de cet indice a été réalisé sur les quatre stations de la zone d'étude pour une durée de 45 à 78 ans d'observation. L'indice de NICHOLSON (S.E. NICHOLSON *et al.*, 1988) est exprimé par la formule suivante :

$$I_p = (X_i - \bar{X}) / \sigma \quad (1)$$

où  $I_p$  est l'indice pluviométrique,  $X_i$  les précipitations de l'année  $i$ ,  $\bar{X}$  les précipitations annuelles moyennes sur la période d'observation et  $\sigma$  l'écart type sur la même période.

#### b. Filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2 ou méthode des moyennes mobiles pondérées

Une meilleure observation des fluctuations interannuelles s'obtient en éliminant les variations saisonnières. Dans ce cas, les totaux pluviométriques annuels sont pondérés en utilisant les équations suivantes recommandées par A. ASSANI (1999) :

$$x_{(t)} = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)} \quad \text{pour } 3 \leq t \leq (n-2) \quad (2)$$

où  $x_{(t)}$  est le total pluviométrique pondéré du terme  $t$ ,  $x_{(t-2)}$  et  $x_{(t-1)}$  sont les totaux pluviométriques des deux termes qui précèdent immédiatement le terme  $t$ , et  $x_{(t+2)}$  et  $x_{(t+1)}$  sont les totaux pluviométriques des deux termes qui suivent immédiatement le terme  $t$ .

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes [ $x_{(1)}$ ,  $x_{(2)}$ ] et des deux derniers termes [ $x_{(n-1)}$ ,  $x_{(n)}$ ] de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes ( $n$  étant la taille de la série) :

$$X_{(1)} = 0,54x_{(1)} + 0,46x_{(2)} \quad (3)$$

$$X_{(2)} = 0,25x_{(1)} + 0,50x_{(2)} + 0,25x_{(3)} \quad (4)$$

$$X_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (5)$$

$$X_{(n)} = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)} \quad (6)$$

Les indices centrés et réduits des hauteurs pluviométriques annuelles pondérées obtenues sont calculés pour mieux distinguer les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique.

Les séries de débits sont soumises aux mêmes procédures de calculs que les séries pluviométriques.

### Méthodes de détection de rupture dans les précipitations de la région

Le traitement statistique des séries hydrologiques porte essentiellement sur l'étude de la stationnarité et la synthèse des données sous différents paramètres statistiques. Plusieurs méthodes, disponibles dans la littérature permettent l'analyse de ces phénomènes dans une série chronologique. Les tests utilisés sont extraits de l'étude de H. LUBES-NIEL *et al.* (1994).

Leur choix se justifie par la robustesse de leur procédure et du fait qu'ils ont été déjà appliqués à des séries hydrométriques observées en Afrique soudano-sahélienne par les auteurs tels que J.E. PATUREL *et al.* (2004), Y.A. N'GO *et al.* (2005), B.T.A. GOULA *et al.* (2006). Ces tests permettent de vérifier le caractère aléatoire des séries de variables et de détecter une éventuelle rupture dans les séries chronologiques (Y.T. BROU, 1997).

#### a. Test de PETTIT

Le test de PETTIT (A.N. PETTIT, 1979) est non-paramétrique et dérive du test de MANN-WHITNEY. L'absence d'une rupture dans la série ( $X_i$ ) de taille  $N$  constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant  $t$  compris entre 1 et  $N$ , les séries chronologiques ( $X_i$ ), de  $i=1$  à  $t$  et de  $t+1$  à  $N$  appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$  définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (7)$$

où  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ , avec  $\text{sgn}(X) = 1$  si  $X > 0$ ,  $0$  si  $X = 0$  et  $-1$  si  $X < 0$ .

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

#### b. Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

La méthode bayésienne de A.F.S. LEE et S.M. HEGHINIAN (1977) vise à confirmer ou à infirmer l'hypothèse d'un changement de moyenne dans la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. La procédure repose sur le modèle suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i=1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i=\tau+1, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

où les  $\varepsilon_i$  sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ . Les variables  $\tau$ ,  $\mu$ ,  $\delta$  et  $\sigma$  sont des paramètres inconnus.  $\tau$  et  $\delta$  représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement sur la moyenne. La méthode fournit donc la probabilité que la rupture se produise au moment  $\tau$  dans une série où on suppose *a priori* qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé.

#### c. Segmentation de HUBERT

La procédure de la segmentation de HUBERT (P. HUBERT *et al.*, 1989) des séries chronologiques est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne dans une même série. Elle a pour principe de répartir la série en "m" segments, de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment (s) voisin (s). Pour un ordre donné, la segmentation retenue présente le plus faible écart quadratique entre la segmentation considérée et la série. Soit une segmentation quelconque, d'ordre m, pratiquée sur la série initiale,  $i_k$  le rang ( $k=1,2,\dots,m$ ) dans la série initiale de l'extrémité terminale du  $k^{\text{ième}}$  segment,  $n_k$  la longueur ( $=i_k - i_{k-1}$ ) du  $k^{\text{ième}}$  segment et  $X_k$  la moyenne du  $k^{\text{ième}}$  segment, l'écart quadratique  $D_m$  entre la segmentation considérée et la série est donné par l'expression :

$$D_m = \sum_{k=1}^m d_k \quad \text{où} \quad d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (X_i - \bar{X}_k)^2 \quad (9)$$

Cette procédure peut être observée comme un test de stationnarité où l'hypothèse nulle est "la série étudiée est stationnaire" (P. HUBERT *et al.*, 1989). Si la procédure ne produit pas de segment acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée. Aucun niveau de signification n'est associé à cette méthode.

### **Étude des précipitations à partir de l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN).**

La variabilité régionale des précipitations a été étudiée à partir de l'ACPN. Cette analyse a été réalisée sur les précipitations interannuelles. Les 6 stations pluviométriques de la région ont été utilisées comme des variables et les unités statistiques sont représentées par les années. La période concernée par cette étude part de 1956 à 2000, soit 45 descripteurs.

### **Étude du tarissement des cours d'eau et des volumes mobilisés par les aquifères**

L'étude du tarissement des cours d'eau dans la région d'Abidjan-Agboville a été réalisée à l'aide du calcul du coefficient de tarissement.

#### **a. Calcul du coefficient de tarissement : loi de Maillet et méthode dichotomique**

Pour le calcul, nous avons utilisé la méthode de MAILLET améliorée par résolution dichotomique et proposée par I. SAVANÉ *et al.* (2003). Elle est basée sur la loi de MAILLET, dont l'expression mathématique est la suivante :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (10)$$

où  $Q_t$  est le débit à l'instant  $t$  donné,  $Q_0$  le débit initial (débit au début du tarissement) et  $k$  le coefficient de tarissement de MAILLET.

Dans la méthode dichotomique, on estime que la courbe annuelle de tarissement est l'expression de la vidange du réservoir souterrain. La quantité d'eau récupérée à la station de jaugeage correspond exclusivement aux volumes dynamiques ( $V$ ) mobilisés par l'ensemble des aquifères du bassin. L'équation du coefficient de tarissement ( $k$ ) s'écrit :

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Q_0} - \frac{1}{k} = 0 \quad (11)$$

#### **b. Évaluation du volume mobilisé par les aquifères**

Le volume mobilisé par l'ensemble des aquifères est donné par l'équation :

$$V_{\text{mobilisé}} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{Q_0}{k} \quad (12)$$

où  $Q_0$  est exprimé en  $m^3/\text{jour}$  et  $k$  en jours.

## **Résultats**

### **Fluctuation du régime pluviométrique interannuel**

#### **a. Analyse des indices de NICHOLSON et de la méthode des moyennes mobiles pondérées**

Les résultats du calcul de l'indice de NICHOLSON et des moyennes mobiles pondérées sont présentés dans le tableau I. Ces indices permettent de partager les séries pluviométriques en trois grandes périodes : une période normale, une période humide et une période sèche.

**Tableau I - Résultats du calcul de l'indice NICHOLSON.**

Stations	Période d'étude	Période normale	Période humide	Période sèche
Abidjan	1937-2000	1937-1948	1948-1970	1970-2000
Adiaké	1945-2000	1945-1970	-	1970-2000
Alépé	1956-2000	-	1956-1970	1970-2000
Azaguié	1934-2000	1934-1951	1951-1978	1978-2000
Agboville	1923-2000	1923-1941	1941-1970	1970-2000
Adzopé	1945-2000	-	1945-1970	1970-2000

Ces résultats montrent que toutes les stations étudiées sont marquées par une alternance de période normale, humide et sèche. En effet, la région présente une période normale qui s'est fait ressentir sur toutes les stations, à l'exception de celle d'Alépé et d'Adzopé. L'adoucissement du climat s'est accru avec une grande période humide qui est observée dans toute la région à l'exception d'Adiaké. Cette grande période excédentaire est suivie d'une longue période déficitaire qui débute à partir des années 1970. Elle est ressentie dans toute la région et se traduit par un déficit pluviométrique important.

#### b. Test de rupture de PETTIT

Les résultats de ce test sont consignés dans le tableau II. L'analyse des résultats montre que toutes les stations présentent une rupture proche des années 1970, à l'exception de la station d'Adiaké qui présente une rupture tardive en 1982. La variation de rupture sur la période de 1963 à 1982 montre que cette période est profondément marquée par une diminution de la pluviométrie moyenne annuelle.

**Tableau II - Ruptures des séries pluviométriques selon le test de PETTIT.**

Stations	Longueur de la série en années	Année de rupture	Probabilité de dépassement	Niveau de signification
Abidjan	64	1969	0,21 %	Très significatif
Adiaké	56	1982	0,01 %	Très significatif
Alépé	45	1963	5,21 %	Peu significatif
Azaguié	67	1976	0,01 %	Très significatif
Agboville	78	1963	6,08 %	Peu significatif
Adzopé	56	1968	2,71 %	Significatif

Un niveau de signification du test de PETTIT a été attribué à chaque station selon la classification dressée dans le tableau III. Les ruptures très significatives ont été signalées sur trois stations dont celles d'Abidjan (0,21 %), d'Adiaké (0,01 %) et d'Azaguié (0,01 %).

**Tableau III - Niveau de signification des résultats du test de PETTIT.**

Probabilité associée	Classe	Niveau de signification
$\alpha < 1 \%$	Rupture très significative	3
$1 \% < \alpha < 5 \%$	Rupture significative	1
$5 \% < \alpha < 20 \%$	Rupture peu significative	2
$\alpha > 20 \%$	Série homogène	0

### c. Test de rupture de LEE et HEGHINIAN

Les résultats du test de rupture de LEE et HEGHINIAN appliqué aux séries pluviométriques sont présentés par le tableau IV. Ce test confirme également la présence de rupture dans les séries pluviométriques de la région. En effet, il donne la date à laquelle la rupture s'est produite. L'analyse des résultats montre qu'à l'exception des stations d'Abidjan, d'Agboville et d'Azaguié où un décalage de la période de rupture est observé, les dates de rupture sont identiques à celles données par le test de PETTITT à Adiaké, Alépé et Adzopé.

**Tableau IV - Ruptures des séries pluviométriques selon le test de LEE et HEGHINIAN.**

Stations	Année de rupture	Probabilité associée
Abidjan	1982	0,33
Adiaké	1982	0,38
Alépé	1963	0,52
Azaguié	1978	0,31
Agboville	1968	0,07
Adzopé	1968	0,17

### d. Test de rupture par la segmentation de Hubert

Les résultats de la segmentation de HUBERT appliquée aux séries chronologiques sont consignés dans le tableau V. Cette segmentation met également en évidence plusieurs ruptures dans les séries pluviométriques. Les stations du Sud de la région sont marquées par deux à trois ruptures respectivement à Abidjan en 1953 ; 1957 et 1982 et à Adiaké en 1949 et 1970. Dans les stations d'Azaguié, d'Alépé et d'Adzopé la date de rupture varie de 1963 à 1978. Les résultats des différents tests sont consignés dans le tableau VI.

Une rupture significative a été signalée à Adzopé (2,21 %). Quant aux stations d'Agboville (6,08 %) et d'Alépé (5,21 %), la rupture est peu significative. Aucune absence de rupture (série homogène) n'a été enregistrée par ce test dans la région.

### e - Déficit pluviométriques après rupture selon le test de PETTITT

Les résultats du déficit pluviométrique calculé par rapport à la moyenne déterminée avant le moment de la rupture dans chaque station sont consignés dans le tableau VII. Ce déficit

**Tableau V - Résultats du test de segmentation de HUBERT.**

Stations	Segmentation	
	Nombre de ruptures	Dates des ruptures
Abidjan	3	1953 ; 1957; 1982
Adiaké	2	1949 ; 1970
Alépé	1	1963
Azaguié	1	1978
Agboville	0	Pas de rupture
Adzopé	1	1968

**Tableau VI - Récapitulatif des ruptures détectées par les tests de PETTIT, de LEE et HEGHINIAN et de HUBERT.**

Stations	Période d'observation	Dates d'occurrence des ruptures		
		Test de PETTIT	Test de LEE et HEGHINIAN	Segmentation de HUBERT
Abidjan	1937- 2000	1969	1982	1953, 1957, 1982
Adiaké	1945-2000	1982	1982	1949, 1970
Azaguié	1934-2000	1976	1978	1978
Alépé	1956-2000	1963	1963	1963
Agboville	1923-2000	1963	1968	Pas de rupture
Adzopé	1945-2000	1968	1968	1968

permet de quantifier l'ampleur de la baisse pluviométrique observée dans la région depuis ces dernières décennies. L'analyse du tableau VII montre que celui-ci oscille entre 10 % et 31 %, avec une moyenne de 20 %. Les déficits les plus importants sont enregistrés dans le Sud de la région, notamment à Alépé (31 %), Adiaké (25 %) et à Abidjan (20 %). Ces résultats mon-trent que la diminution des précipitations est plus brutale dans le Sud, en zone littorale qu'à l'intérieur de la région.

**Tableau VII - Déficit pluviométriques après rupture selon le test de HUBERT.**

Stations	Date de rupture	Moyenne avant la rupture (mm)	Moyenne après la rupture (mm)	Déficit (%)
Abidjan	1969	2 115	1 701	20
Adiaké	1982	2 053	1 546	25
Alépé	1963	2 060	1 419	31
Azaguié	1978	1 759	1 383	21
Agboville	1968	1 434	1 294	10
Adzopé	1968	1 495	1 262	16

### Étude de l'évolution du régime pluviométrique interannuel à partir des isohyètes (période 1950-2000)

Au cours des cinq dernières décennies, la pluviométrie a baissé de façon notable dans toute la région d'Abidjan-Agboville (Fig. 3). La décennie 1950-1959 est assez pluvieuse. Pendant cette période, le sud côtier est marqué par la présence des isohyètes 2300 mm et 2200 mm respectivement à Abidjan et à Adiaké. Durant cette décennie, la région est délimitée dans sa partie nord par les isohyètes 1500 mm, notamment à la station d'Adzopé. La décennie 1960-1969 reste humide, avec une légère diminution des quantités de pluies annuelles observées dans la région. C'est véritablement pendant la décennie 1970-1979 que la baisse de la pluviométrie prend une importance particulière dans la région. La quasi-totalité des stations a été touchée. Cette baisse se traduit par un déplacement des isohyètes dans toute la région, suivi d'une disparition des isohyètes 2300 mm et 1600 mm au profit des isohyètes 2000 mm et 1400 mm. La diminution de la pluviométrie est encore très accentuée durant la décennie 1980-1989. La classe de pluviométrie inférieure à 1600 mm s'élargit plus et atteint dans son avancée le littoral au niveau d'Abidjan et d'Adiaké. Cette période déficitaire est également marquée par l'apparition des isohyètes 1300 mm dans le nord de la région.

Les perturbations pluviométriques observées au cours des années 1970 se poursuivent pendant la décennie 1990-1999. Les pluviométries égales à 1500 mm s'élargissent encore et atteignent dans leur progression la zone côtière de la région.

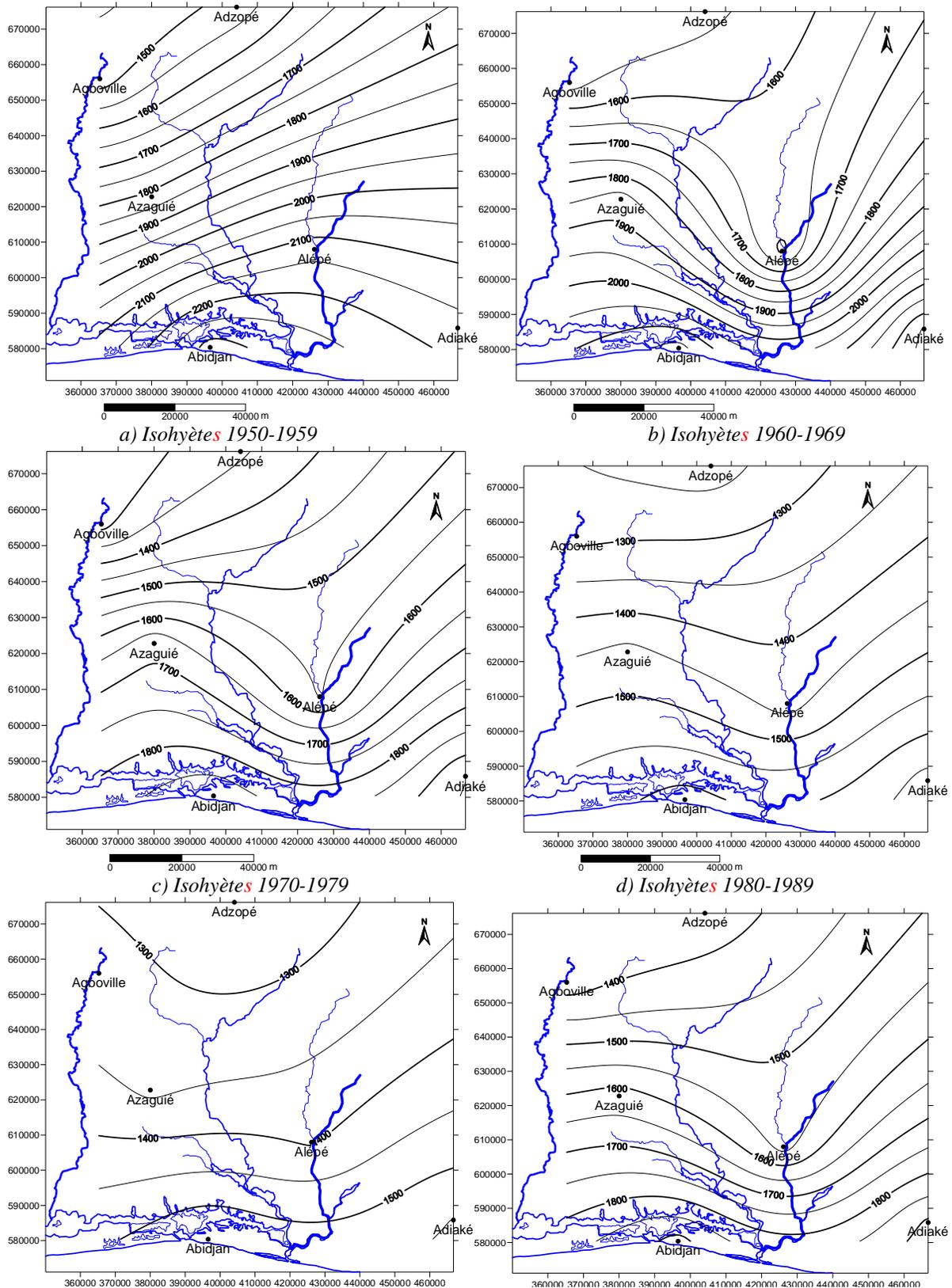
### **Analyse en composantes principales normées (ACPN) des précipitations sur la période de 1956 à 2000**

Les résultats de l'ACPN montrent que l'ensemble des variances exprimées par les trois facteurs retenus est de 88,5 %, ce qui reste supérieur à 70 % acceptable dans le cadre d'une ACPN. Les tableaux VIII et IX présentent respectivement les valeurs propres de chaque facteur et les corrélations entre les différentes stations.

#### **a. Analyse des variables des plans factoriels F1-F2 et F2-F3**

Le plan factoriel F1-F2 exprime 80,49 % de la variance exprimée. Dans cercle de communauté (Fig. 4) trois regroupements de variables s'opposent. Il s'agit des regroupements représentés respectivement par Abidjan-Adiaké, Alépé-Azaguié et Adzopé-Agboville). Ce plan factoriel traduit une distribution sud-nord des précipitations. Le facteur F1 qui est le plus important met en évidence l'hétérogénéité spatiale des précipitations dans la zone d'étude.

Le plan factoriel F2-F3 exprime 28,98 % de la variance exprimée. Le cercle de communauté montre que le facteur F2 est déterminé par deux regroupements de variables (Fig. 3). Le premier regroupement (Adzopé, Agboville) s'oppose au deuxième (Abidjan, Adiaké). Les stations d'Agboville et d'Adzopé situées au nord de la région sont opposées dans le cercle de communauté à celles d'Abidjan et d'Adiaké situées sur la côte. Elles présentent une forte corrélation (0,76) et leur rapprochement montre que les pluies issues de ces deux stations ont une origine commune. La proximité de ces stations dans le cercle de communauté signifie que leurs précipitations ont une évolution commune. En effet, en zone forestière les précipitations peuvent avoir un caractère continental. La forte corrélation entre la station d'Abidjan et celle d'Adiaké (0,77) et leur proximité dans le cercle de communauté révèlent que les précipitations issues de ces deux stations ont une évolution commune. Les moyennes pluviométriques obtenues sont 1904 mm pour Abidjan et 1890 mm pour Adiaké. Ces deux stations reçoivent donc des précipitations identiques (pluies homogènes).



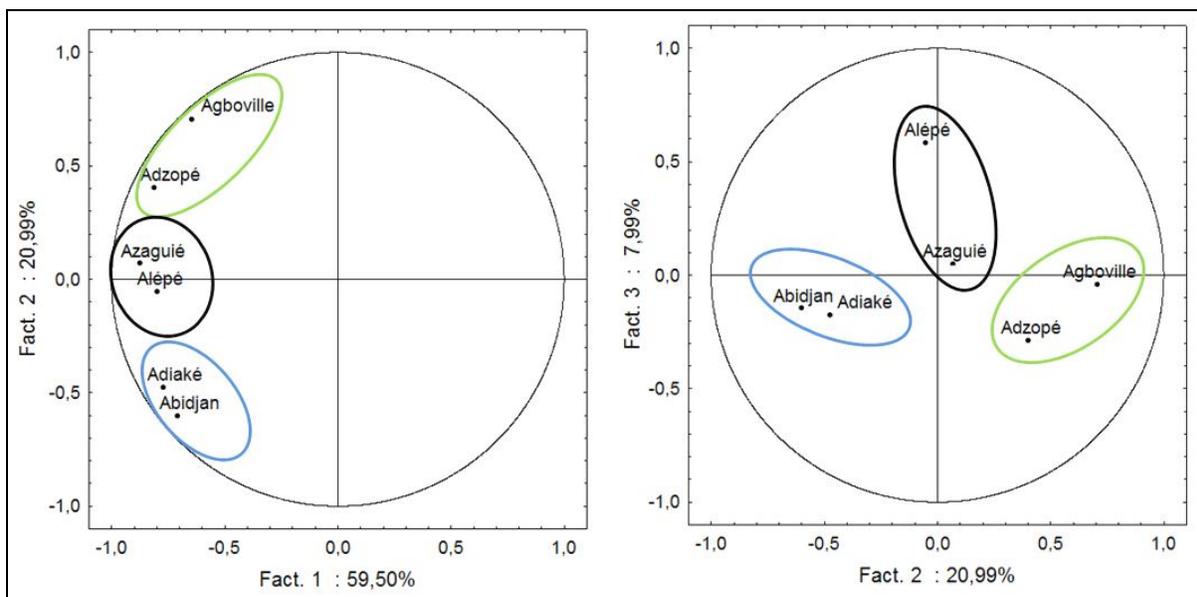
**Figure 3 - Répartition spatiale des précipitations annuelles moyennes de 1951 à 2000 et par périodes de 10 ans.**

**Tableau VIII - Valeurs propres des facteurs de l'analyse en composantes principales normées (ACPN).**

	F1	F2	F3
Valeur propre	3,57	1,26	0,48
% du total de la variance exprimée	59,50	20,99	7,99
Valeur propre cumulée	3,57	4,83	5,31
% de la variance exprimée cumulée	59,50	80,49	88,48

**Tableau IX - Matrice de corrélation de l'analyse en composantes principales normées (ACPN).**

	Abidjan	Adiaké	Alépé	Azaguié	Agboville	Adzopé
Abidjan	1			0,53	0,06	
Adiaké	0,77	1		0,59	0,21	
Alépé	0,52	0,54	1	0,64	0,45	0,49
Azaguié				1	0,54	
Agboville					1	
Adzopé	0,39	0,46		0,67	0,76	1



**Figure 4 - Analyse des variables du plan factoriel F1-F2 et F2-F3.**

Leur opposition aux autres regroupements indique que la zone d'étude reçoit des précipitations variables. Cette différence d'origine (océanique ou continentale) des précipitations se traduit par un écart considérable, de l'ordre de 540 mm, entre les stations de la partie nord de la zone d'étude (1377 mm à Agboville ; 1362 mm à Adzopé) et celles de la partie côtière (1904 mm à Abidjan ; 1890 mm à Adiaké).

Ainsi le facteur F2 met-il en évidence la distribution spatiale des stations, les régions intérieure (Agboville et Adzopé) et littorale (Abidjan et Adiaké) étant nettement individualisées.

Le facteur F3 est déterminé principalement par la station d'Alépé et à un degré moindre par celle d'Azaguié. La matrice de corrélation présente une corrélation moyenne de 0,64 entre ces stations. Cette valeur de corrélation montre que ces deux stations sont sous l'influence du même phénomène climatique. Ces stations sont situées au centre de la région et de par leur position dans le cercle de communauté, elles sont influencées par une variabilité spatiale des précipitations. Le facteur F3 met en évidence la région centre, représentée par les stations d'Azaguié et d'Alépé. Ainsi l'ACPN traduit-elle la variabilité spatiale des précipitations dans la région.

### Étude hydrologique : variation du régime mensuel des écoulements

Les variations du régime moyen mensuel des cours d'eau de la région (Agnéby, Mé et Mafou) sont présentées par la figure 5. Les fluctuations saisonnières des débits des cours d'eau se traduisent par une succession de crue et d'étiage. Il ressort que les débits de pointe ont lieu en juin, juillet et octobre, période qui correspond aux épisodes pluvieuses de la grande et de la petite saison des pluies. Cependant les débits de pointe sont plus importants durant la grande saison des pluies. De janvier à mai, un étiage s'installe, il devient plus prononcé de février à avril. Cette période est donc synchrone de la grande saison sèche.

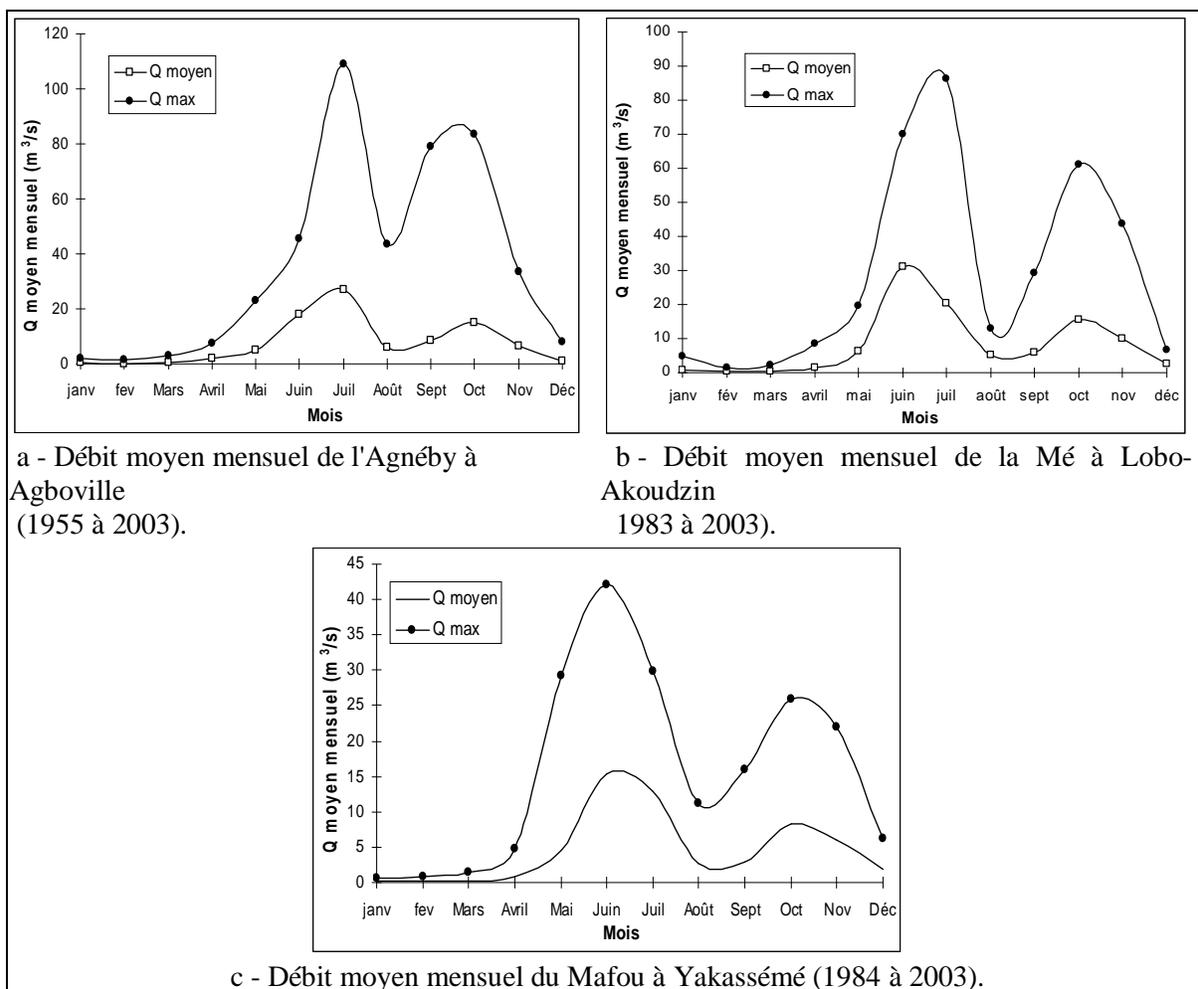


Figure 5 - Débit moyen mensuel interannuel des rivières Agnéby, Mé et Mafou.

### a. Variation du régime annuel des écoulements

Les débits moyens annuels de la rivière Agnéby montrent des fluctuations importantes sur la période 1955-2003 (Fig. 6). Outre les variations d'une année à l'autre, il apparaît que les débits annuels deviennent plus faibles à partir de 1968. De 1955 à 1968, le débit annuel moyen est de  $9,70 \text{ m}^3/\text{s}$  (avec une valeur annuelle maximale de  $26,61 \text{ m}^3/\text{s}$ , en 1963). Sur la période 1969-2003, le débit annuel moyen tombe à  $5,11 \text{ m}^3/\text{s}$  (avec une valeur annuelle maxi-male de  $12,74 \text{ m}^3/\text{s}$  seulement, en 1989).

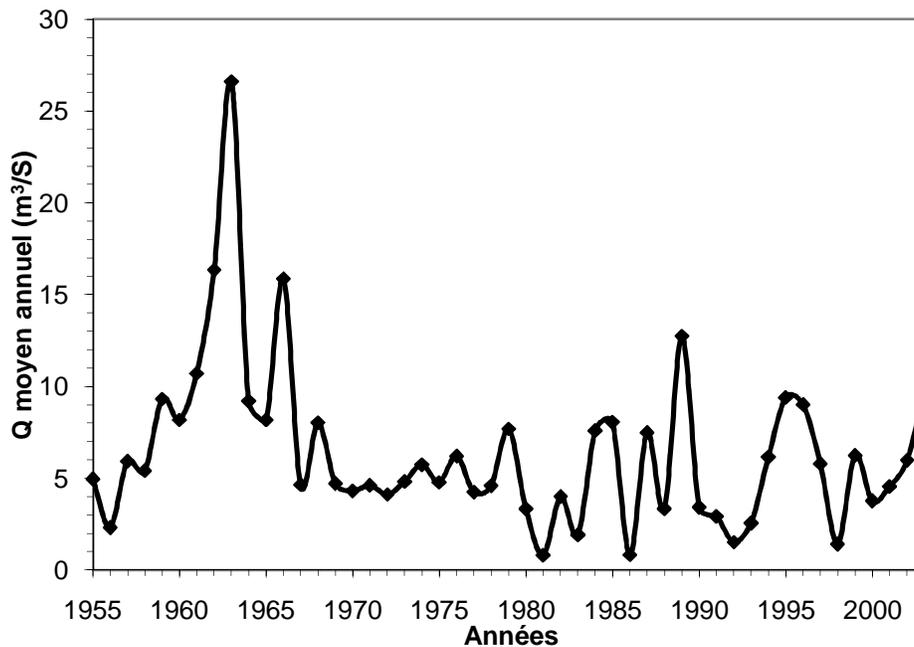
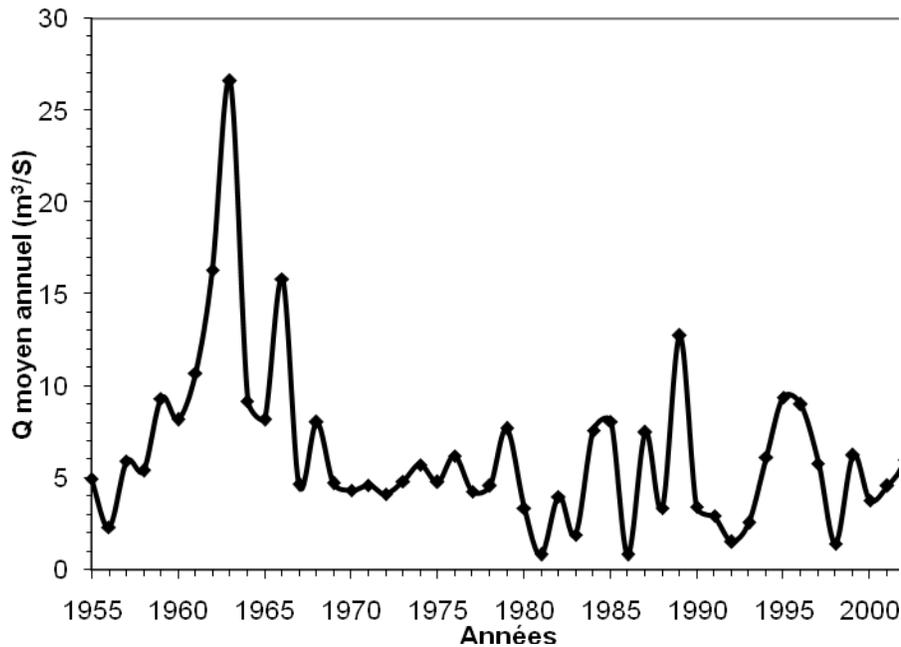


Figure 6 - Débit moyen annuel de l'Agnéby à Agboville (1955 à 2003).

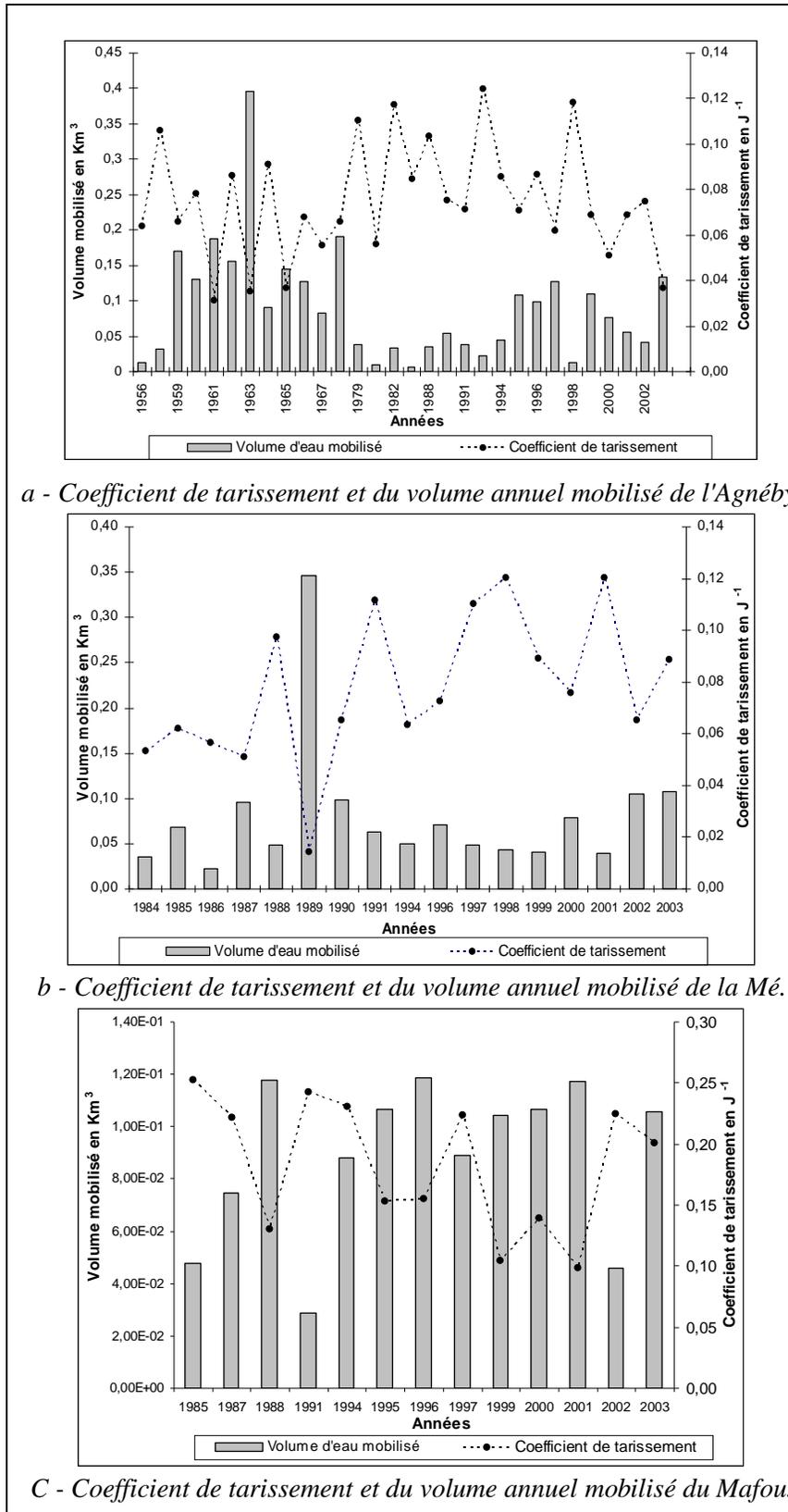
L'année 1968 correspond à l'année de rupture mise en évidence par le test de PETTITT pour la station pluviométrique d'Agboville. La diminution des précipitations se traduit par une forte décroissance des écoulements, qui atteint 41,3 %.

#### **b. Coefficient de tarissement et volume d'eau mobilisé par les aquifères**

##### **Cas de l'Agnéby, la Mé et du Mafou**

Les coefficients de tarissement de MAILLET sur la période 1956-2003 montrent de fortes fluctuations interannuelles (Fig. 7).

Pour l'Agnéby, les valeurs annuelles oscillent de 0,0314 à 0,106 avant 1968 et de 0,0367 à 0,124 après cette date (avec les débits exprimés en  $\text{m}^3/\text{jour}$  et le temps en jours). Les valeurs moyennes sur ces deux périodes s'établissent à 0,0653 et 0,0814 respectivement. Dans les deux cas, la valeur obtenue traduit un tarissement rapide du cours d'eau. Mais l'augmentation des coefficients de tarissement après 1968 est la conséquence d'une recharge insuffisante des aquifères. La valeur moyenne du volume d'eau mobilisé en phase de tarissement, qui atteint  $0,092 \text{ km}^3$  sur l'ensemble de la période d'observation, s'élève à  $0,143 \text{ km}^3$  sur la période 1956-1968 et tombe à  $0,058 \text{ km}^3$  sur la période 1969-2003, ce qui donne une diminution de 59,45%, sur une superficie de  $4600 \text{ Km}^2$ .



**Figure 7 - Variation du coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisė de l'Agnėby, de la Mė et du Mafou.**

Les coefficients de tarissement annuels de la rivière Mé varient de 0,0141 à 0,120, pour des volumes d'eau mobilisés par les aquifères entre 0,02 et 0,35 km<sup>3</sup>. Sur le Mafou, les coefficients de tarissement vont de 0,0461 à 0,117 et les volumes d'eau mobilisés, de 0,060 à 0,250 km<sup>3</sup>. En effet, le Mafou qui couvre une superficie totale de 922 Km<sup>2</sup> est l'un des principaux affluents de la Mé.

Pour la Mé comme pour l'Agnéby, les coefficients de tarissement les plus forts correspondent à de faibles volumes d'eau mobilisés et les plus faibles coefficients s'accompagnent de forts volumes d'eau mobilisés (Fig. 7).

Dans le cas du Mafou, les réserves d'eau souterraine apparaissent relativement faibles de 1984 à 1994, alors que la recharge des nappes se révèle plus efficace de 1995 à 2003. Les coefficients de tarissement moyens pour ces deux périodes s'établissent respectivement à 0,10 et 0,08. Les volumes d'eau mobilisés sont faibles pendant la période sèche (0,150 km<sup>3</sup> en moyenne) et plus élevés sur la période 1995-2003 (0,210 km<sup>3</sup> en moyenne –augmentation de 39 % par rapport à la période antérieure), pour une superficie totale de 922 Km<sup>2</sup>.

Sur la Mé, une bonne recharge des nappes souterraines est observée uniquement en 1989, avec un coefficient de tarissement faible (0,014) et un volume d'eau mobilisé assez élevé (0,350 km<sup>3</sup>). À l'exception de cette année 1989, toute la période d'observation (1984-2003) est marquée par de faibles réserves d'eau souterraines, avec un volume mobilisé moyen de 0,063 km<sup>3</sup>. Ces résultats montrent que les perturbations pluviométriques qui ont affecté la région pendant ces dernières décennies sont ressenties sur les écoulements et les réserves en eau souterraine.

### **Discussion**

Les fluctuations interannuelles de la pluviométrie régionale sont très importantes sur l'ensemble des stations. Toutefois, c'est la manifestation à l'échelle saisonnière de la variabilité climatique qui augmente l'effet. Comme dans l'étude d'A.A. ASSANI (1999), les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques apparaissent plus nettement après filtrage des variations saisonnières. Cette étude montre que le régime pluviométrique de la région a subi pendant ces dernières décennies (1989-1999) une baisse brutale. En effet, c'est réellement à partir des années 1970 que cette sévère sécheresse a touché la quasi-totalité des stations. Elle se traduit par un déplacement des isohyètes dans toute la région. Les isohyètes 2300 mm et 1600 mm disparaissent au profit des isohyètes 2000 mm et 1400 mm. La diminution de la pluviométrie est encore très accentuée durant la décennie 1980-1989, avec un élargissement des classes de pluviométrie inférieure à 1600 mm sur le littoral au niveau d'Abidjan et d'Adiaké. Cette baisse de la pluviométrie régionale a été mise en évidence par les travaux d'Y. BROU (1997) dans le Sud forestier de la Côte d'Ivoire. I. SAVANÉ (1997) a également mis en évidence les perturbations climatiques sur les réserves en eau de la région d'Odienné. Les travaux de K.F. KOUAMÉ (1999) et M.B. SALEY (2003) ont abouti aux mêmes conclusions dans la région de Man. La diminution de la pluviométrie interannuelle en Côte d'Ivoire a été également révélée par les travaux de J.E. PATUREL *et al.* (1995). Ces études ont montré que les isohyètes 1300 et 1800 mm ont connu une importante évolution durant ces dernières décennies (1950-1980) dans le pays.

La présence de rupture dans les séries chronologiques étudiées se situe dans les périodes de 1963, 1968 et 1969. Ces différentes périodes s'insèrent bien dans la période de rupture (1966-1971) de la majorité des stations pluviométriques identifiée en Côte d'Ivoire par J.E. PATUREL *et al.*, (1997) ; É. SERVAT *et al.*, (1999) et en particulier dans la région de Grand-Lahou par T.D. SORO *et al.* (2011). La rupture observée à Abidjan en 1969 a été également révélée dans les travaux de B.T.A. GOULA *et al.* (2006) à la station pluviométrique de Dimbokro. Elle constitue la plus importante enregistrée sur les 33 stations pluviométriques en Afrique de l'Ouest par P. HUBERT *et al.* (1989).

Ces ruptures montrent bien que la région s'intègre à la fluctuation du régime pluviométrique observée à la fin des années 1960 et au début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et centrale sahélienne comme non sahélienne (P. HUBERT *et al.*, 1989 ; G. MAHÉ et J.C. OLIVRY, 1995 ; J.E. PATUREL *et al.*, 1997 ; É. SERVAT *et al.*, 1999). Le déficit pluviométrique qui en résulte varie de 10 % à 31 %, avec une moyenne de 20 %.

Ce phénomène serait dû à une dérégulation climatique liée à l'influence défavorable de certains facteurs à caractère synoptique et/ou environnemental sur le mécanisme de migration du front intertropical (FIT) qui détermine le climat en Afrique de l'Ouest (B.C. PENE et A.D. ASSA, 2003). Selon B.T.A. GOULA *et al.* (2006), les principaux facteurs impliqués dans la genèse des anomalies pluviométriques sont à l'échelle régionale ou globale. Les activités humaines ont très certainement contribué à accroître ce phénomène de sécheresse. En effet, ces dernières décennies, la déforestation y a pris une ampleur considérable qui même si elle ne peut être considérée comme la principale cause de cette sécheresse, ne peut pas être étrangère à l'affaiblissement de la pluviométrie annuelle.

La répartition spatiale des stations pluviométriques s'identifie en deux principaux groupes qui sont : les stations de la région intérieure composées par Agboville et Adzopé et celles de la région littorale (Abidjan et Adiaké). Ces deux régions ont été relevées dans les travaux de Brou (1997). Une région intermédiaire s'intercale entre ces deux régions. Il s'agit de la région formée par les stations d'Azaguié et d'Alépé. La fluctuation du régime pluviométrique observée à la fin des années 1960 et au début des années 1970 en Afrique de l'Ouest se traduit par une baisse du régime hydrologique des cours d'eau. En effet, depuis l'année 1968, le cours moyen de l'Agnéby est en baisse, avec un déficit estimé 41,3 %, ce qui est largement supérieur à celui des précipitations. En effet, ces résultats corroborent ceux de A.M. KOUASSI (2007) dans le bassin versant du N'zi (Bandama) où les débits moyens annuels des cours d'eau de surface présentent un déficit moyen de 52%. La plus grande baisse des écoulements par rapport à celle des précipitations peut être liée à la longue durée du déficit pluviométrique (B.T.A. GOULA *et al.*, 2006). La succession d'années à pluviométrie déficitaire marque aussi négativement l'écoulement. L'écart entre déficits pluviométrique et hydrologique viendrait d'une contribution réduite des apports d'origine souterraine à l'écoulement de surface depuis les années 1970 (G. MAHÉ et J.C. OLIVRY, 1995 ; J.P. BRICQUET *et al.*, 1997 ; G. MAHÉ *et al.*, 2000).

Des débits extrêmes de période de retour 100 ans et 50 ans ont été enregistrés sur l'Agnéby (226 m<sup>3</sup>/s) et sur le Mafou (110 m<sup>3</sup>/s) malgré le caractère déficitaire des écoulements. Les coefficients de tarissement et les volumes mobilisés par les aquifères montrent que les réserves en eaux souterraines sont sensibles aux fluctuations de la pluviométrie. En effet, sur l'Agnéby, les coefficients de tarissement diminuent en période humide (1955-1968) et augmentent en période déficitaire (1969-2003). Le volume d'eau mobilisé varie en fonction des différentes périodes, avec un déficit de 59,5 %. La vidange de ce cours d'eau est semblable à celle des bassins fluviaux en zone soudano-sahélienne qui sont caractérisés par la présence d'une rupture dans leur régime de tarissement consécutive à la période de déficit pluviométrique observée depuis les décennies 1970 (J.P. BRICQUET *et al.*, 1997). Il en est de même pour le volume mobilisé.

La reconstitution des réserves du sol se fait principalement à partir du mois d'avril. Ce mois a été mis en évidence dans le degré carré de Grand-Lahou comme point de départ de l'année hydrologique par les travaux de N. SORO (2002).

## Conclusion

La région d'Abidjan-Agboville connaît une variabilité pluviométrique marquée par une longue période sèche amorcée depuis les années 1970. Cette fluctuation du régime pluviométrique se traduit par une évolution des isohyètes dans la région. En effet, les isohyètes 2300 mm et 2200 mm présentes dans la région pendant la décennie 1950-1959 ont disparu pour faire place aux isohyètes 1500 mm pendant la décennie 1990-1999. Elle est également marquée par une alternance de période normale, humide et sèche, avec une longue période déficitaire qui débute à partir des années 1970. Le déficit pluviométrique oscille entre 10 % et 31 %, avec une valeur moyenne de 20 %. Les déficits les plus importants sont enregistrés dans le sud de la région, notamment à Alépé (31 %), Adiaké (25 %) et à Abidjan (20 %). La diminution des précipitations est plus brutale dans le sud, en zone littorale, qu'à l'intérieur de la région.

Les régimes hydrologiques ont également subi de profondes modifications au cours de la période 1955-2003. La baisse de la pluviométrie a eu pour effet une diminution des apports d'eau qui transitent dans les cours d'eau de la région. Cette diminution est marquée par une rupture très significative identifiée en 1968 sur la station d'Agboville au niveau de la rivière Agnéby. Le déficit d'écoulement est très important et est estimé à 41,3 %, soit le double du déficit pluviométrique (20 %). Sur l'Agneby, les coefficients de tarissement évoluent de 0,0314 à 0,106 avant 1968 et de 0,0367 à 0,124 après 1968. Cette augmentation du coefficient de tarissement après 1968 montre une vidange beaucoup plus rapide des aquifères alimentant l'écoulement de base. Les réserves en eaux souterraines sont sensibles aux variations pluviométriques. Le volume d'eau mobilisé par les aquifères s'élève à 0,143 km<sup>3</sup>, pour un coefficient de tarissement moyen de 0,0653 au cours de la période 1956-1968 et à 0,058 km<sup>3</sup>, pour un coefficient de tarissement moyen de 0,0814 de 1969 à 2003, soit une baisse de 59,45 %. Ces résultats indiquent une diminution des volumes d'eau mobilisés par les aquifères après 1968, ce qui suggère une baisse considérable des réserves souterraines.

## Références

- ARDOIN-BARDIN S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc. Spécialité : Mécanique, Génie Mécanique, Génie civil, 437 p.
- ASSANI A. A. (1999). Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña), *Sécheresse*, 10,4, pp. 245-252
- BIEMI J. 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse d'Etat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 480.
- BRICQUET J. P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M. et OLIVRY J.C. (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *PHI-V*, 6, pp. 83-95.
- BROU Y. T. (1997). Analyse et dynamique de la pluviométrie dans le Sud forestier ivoirien : recherche de corrélations entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. Thèse de Doctorat 3<sup>e</sup> cycle en Géographie, Université de Cocody, p. 201
- BROU Y. T. (2010). Variabilité climatique, déforestation et dynamique agrodémographique en Côte d'Ivoire. *Sécheresse* 2010 ; 21, pp. 1-6.
- DELOR C., DIABY I. et YAO B. 1992. Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000. Feuille de Grand-Bassam, 1<sup>ère</sup> édition.

- GOULA B. T. A., KOUASSI F. W., FADIKA V., KOUAKOU K. E., KOUADIO G. B., K. KOFFI, BAMORY K., INZA D., SAVANE I., 2009. Impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les eaux souterraines en zone tropicale humide: Cas de la Côte d'Ivoire. *IAHS*, 334, pp. 190-202.
- GOULA B. T. A., SAVANÉ I., KONAN B. FADIKA V. et GNAMIEN K. B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, Vol.7 n°1, pp.1-12.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P. et CHAUCHE A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 110, pp. 349-367.
- KANOHN F., SALEY M. B., SAVANE I., 2009. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zone tropicale humide: cas de la région de Daoukro en Côte D'ivoire. *European Journal of Scientific Research*, vol. 26, 2, pp. 209-222
- KOUAME K. F (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistiques et fractales à l'élaboration d'un système d'information hydrologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Cocody, 194 p.
- KOUASSI A. M. (2007). 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) Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, 214 p.
- LEE A. F. S. et HEGHINIAN S. M. (1977). A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables: A Bayesian approach. *Technometrics*, 19 (4), pp. 503-506.
- LUBES-NIEL H., MASSON J. M., SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAME B. et BOYER J. F. (1994). Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques –Etude bibliographique. ORSTOM FREIND AOC, Pragramme ICCARE, n°3, 21p.
- MAHÉ G. et OLIVRY J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6, 1, pp.109-117.
- MAHÉ G. OLIVRY J.C., DESOUASSI R., ORANGE D., BAMBA F. et SERVAT E. (2000). Relation eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Sciences de la terre et des planètes*, vol. 330, pp. 689-692.
- MUSY A. et LAGLAINE V. (1992) - *Hydrologie générale*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, cours polycopié, 480 p.
- MEYLAN P. et MUSY A. (1998) - *Hydrologie fréquentielle*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, cours polycopié, 260 p.
- N'GO Y.A., GONE D.L., SAVANÉ I., et GOBLE M.M. 2005. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique Science*, 1(1) : 127-144.
- NICHOLSON S.E., KIM J., HOOPINGARNER J. (1988) - *Atlas of African rainfall and its interannual variability*. Édit. Department of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Floride, USA, 237 p.
- PATUREL J. E., SERVAT É., KOUAMÉ B. et BOYER J. F. (1995) - Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, vol. 6, n°1, pp. 95-102.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES H., MASSON J.M., BOYER J. F., TRAVAGLIO M. et MARIEU B. (1997) - Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée. Approche régionale intégrée. *PHI-V*, 16, pp.1-31.
- PATUREL J.E., KOUKPONOU P., OUATTARA F. L'AOUR A. MAHÉ G. et CRES F. N. (2002) - Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. *Sud Sciences et Technologies* n°8, pp. 41-49.

- PATUREL J.E., BOUBACAR I. et L'AOUR A. (2004). Évolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XX<sup>ème</sup> siècle. *Sud Sciences et Technologies* n°13, pp. 40-46.
- PENE B. C. et ASSA A. D. (2003). Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 14(1), pp. 43-52.
- PETTITT A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Application Statistique* 28 (2), pp. 126-135.
- RIAD S. (2003) - *Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc*. Thèse de l'Université de Lille 1 et de l'Université Ibnou Zohr d'Agadir, 154 p.
- SALEY M.B. (2003) - *Cartographie thématique des aquifères de fissures pour l'évaluation des ressources en eau. Mise en place d'une nouvelle méthode d'extraction des discontinuités images et d'un SIHRS pour la région semi-montagneuse de Man (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, 209 p.
- SAVANÉ I. (1997) - *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, 396 p.
- SAVANÉ I., COULIBALY K.M. et GIOAN P. (2003) - Étude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. *Sécheresse*, vol. 14, n° 1, pp. 37-42.
- SERVAT É., PATUREL J.E., KOUAMÉ B., TRAVAGLIO M., OUÉDRAOGO, M., BOYER J.F., LUBÈS H., FRISTCH J.M., MASSON J.M. et MARIEU B. (1998) - Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *In : Water Resources Variability in Africa during the XX<sup>th</sup> Century*, IAHS Publications, n° 252, p. 323-337.
- SERVAT É., PATUREL J.E., LUBÈS H., KOUAMÉ B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M. et MARIEU B. (1999). Différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 12, n° 2, p. 363-387.
- SIRCOULON J. (1976) - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses de 1913 et 1940. *Cahiers ORSTOM*, série Hydrologie, vol. 13, n° 2, p. 75-134.
- SORO N. (1987) - *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du sud-est de la Côte d'Ivoire, bassin versant de la Mé*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Grenoble, 243 p.
- SORO N. (2002) - *Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody, 272 p.
- SORO T.D., SORO N., OGA Y.M.S., LASMT., SORO G., AHOUSSE K.E. et BIEMI J. (2011) - La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, vol. V, p. 55- 73.