



Hydrologie, environnement

## Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire)

*Application of the crossed simulations method to the analysis of trends in the rainfall-runoff relation by using the GR2M model: Case of the N'zi-Bandama watershed (Ivory Coast)*

Amani Michel Kouassi<sup>a,\*</sup>, Tozan Michel N'guessan Bi<sup>b</sup>, Koffi Fernand Kouamé<sup>c</sup>, Kassi Alexis Kouamé<sup>c</sup>, Jean-Claude Okaingni<sup>a</sup>, Jean Biemi<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Département des sciences de la terre et des ressources minières (STeRMi), Institut national polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP HB) de Yamoussoukro, BP 1093, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>b</sup> Département infrastructures et transports (IT), Institut national polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP HB) de Yamoussoukro, BP 1093, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>c</sup> Département du génie de l'eau et de l'environnement (DG2E), UFR des sciences de la terre et des ressources minières (STRM), université de Cocody, 22 BP 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

### INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 17 juin 2011

Accepté après révision le 16 février 2012

Disponible sur internet le 18 mai 2012

Présenté par Ghislain de Marsily

Mots clés :

Variabilité climatique

Modèle GR2M

Tendances relation pluie-débit

N'zi-Bandama

Côte d'Ivoire

Keywords:

Climate variability

GR2M Model

Rainfall-runoff relationship trends

N'zi-Bandama

Ivory Coast

### RÉSUMÉ

La zone d'étude est le bassin versant du N'zi, sous-bassin du fleuve Bandama (Côte d'Ivoire). Le bassin versant du N'zi-Bandama est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6°00' et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km<sup>2</sup>. Cette étude a pour objectif d'identifier des tendances dans la relation pluie-débit à partir d'une modélisation conceptuelle mensuelle. La méthodologie a consisté, d'une part, à mettre en évidence l'existence d'une variabilité hydroclimatique interannuelle à partir de la méthode de segmentation de Hubert et, d'autre part, à appliquer la méthode des simulations croisées à partir du modèle GR2M, sur plusieurs sous-périodes de sept ans. Les résultats de l'application de la méthode de segmentation de Hubert ont confirmé l'existence d'une variabilité hydroclimatique dans le bassin versant du N'zi. Les modifications des conditions climatiques et physiques de l'écoulement ont eu pour conséquences une modification de la réponse hydrologique du bassin versant se traduisant par une non-stationnarité dans la relation pluie-débit.

© 2012 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

### ABSTRACT

The study area is the N'zi watershed, sub-watershed of the Bandama River (Ivory Coast). The N'zi watershed is located between longitudes 3°49' and 5°22' West and latitudes 6°00' and 9°26' North and covers an area of 35,500 km<sup>2</sup>. This study aims to identify trends in the rainfall-runoff relationship by using a monthly conceptual model. The methodology has consisted on the one hand in highlighting the existence of interannual climate and hydrological variability by using the method of segmentation of Hubert, and on the other

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [michel.a.kouassi@yahoo.fr](mailto:michel.a.kouassi@yahoo.fr) (A.M. Kouassi).

hand, in applying the crossed simulations method by using the GR2M model, over several 7-year sub-periods. The results of the application of the method of segmentation of Hubert have demonstrated the presence of a hydroclimatic variability in the N'zi watershed. The modifications of the climate and physical conditions of the flow resulted in a modification of the hydrological response of the watershed translated by a non-stationarity in the rainfall-runoff relation.

© 2012 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

## Abridged English version

The study area is the N'zi watershed, sub-watershed of the Bandama River (Ivory Coast). The N'zi-Bandama watershed is located between longitudes 3°49' and 5°22' West and latitudes 6°00' and 9°26' North and covers an area of 35,500 km<sup>2</sup>. Because of its elongated shape, the watershed is representative of the varied Ivory Coast climates: tropical transition regime in the North, humid tropical in the Center, and subequatorial in the South. The watershed is characterized by savanna vegetation in the Center and the North and forest cover in the South. The relief is very rugged (100 to 400 m). The main soil types are moderately ferrallitic (North) and strongly ferrallitic (Center and South).

Several studies have shown that Ivory Coast has experienced several severe droughts in the 20th century. The climate variability affected the country in varying degrees, and weakened forest and savanna ecosystems. It has had a significant impact on water resources in West Africa and particularly in Ivory Coast. Given the above, the question remains: is climate variability sufficient to explain the change in the flow series? Or should we look elsewhere for an aggravating factor in the rainfall-runoff relationship? This study attempts to answer the question through the study of this relationship. As hydrological behaviour is a complex phenomenon, its description and analysis require modelling. The model presented here is based on conceptual models used by several authors to study water resources in the context of hydroclimatic variability. The parameters of the conceptual models reflect the physical behaviour of the watershed. The monthly time-step is well suited to anthropogenic and climatic changes, and rainfall-runoff modelling can reveal the hydrological non-stationarity. In practical applications of the models, the problem of identifying and especially predicting the impact on the rainfall-runoff relationship of human or natural actions in the watershed is a current concern. An ability to explain and predict the effects on the hydrological regime of natural events and anthropogenic interventions is essential for efficient water resources management. This study aims to identify trends in the rainfall-runoff relationship at the monthly time-step by means of conceptual modelling.

The data used concern rainfall amounts from stations at Dabakala, Bouaké, Dimbokro and Tiassalé. The data cover the period 1923–2004. A regional vector was established to reconstruct the missing data in the annual rainfall series. The average rainfall was determined by the arithmetic mean of 12 rainfall stations. The Potential Evapotranspiration (PET) data are those of the synoptic stations of Bouaké and Dimbokro. The PET is calculated by the Thornthwaite

method over the period 1961–1995. The hydrometric data are from the stations at Dimbokro (24,100 km<sup>2</sup>) and Fêtékro (10,000 km<sup>2</sup>) and cover the period 1951–2000. All the data (rainfall, runoff and PET) were used to characterize hydroclimatic variability and study the rainfall-runoff relationship. The methodology consisted, on the one hand, in demonstrating the existence of interannual hydroclimatic variability by the Hubert et al. (1989) segmentation method, and on the other, in applying the method of crossed simulations from the GR2M model. The segmentation method of Hubert et al. (1989) was used because of its high performance and robustness. This method provides an algorithm that uses one or more specific break dates (possibly none) that separate contiguous segments whose means are significantly different. If the procedure does not produce an acceptable segmentation of an order greater than, or equal to, two, the assumption of stationarity of the series is adopted.

The method of crossed simulations began by cutting the series into independent subseries with a 7-year period. Then, the model calibration phase was used to characterize the hydrological behaviour of the model over the given period (sub-periods of 7 years). In this study, the period 1961–1995 was chosen. By applying the model calibrated on all other sub-periods, i.e. keeping the same parameters, we obtained the runoff which would have been produced if the basin had remained in the same conditions as in the calibration period. By repeating this operation after each control, a matrix pattern was determined. In this study, the target variable is the average monthly flow. In the simulation matrix, each value is replaced by a sign, reflecting a trend of increasing or decreasing mean flow. To this end, each value in the array is replaced by a “+” or “-” depending on whether the values are above or below the value of the diagonal. The GR2M model consists of a production reservoir that regulates the production function and is characterized by its maximum capacity and a reservoir of “free water” which governs the transfer function. This model of monthly water balance is governed by two parameters to be calibrated ( $X_1$  and  $X_2$ ). The first parameter ( $X_1$ ) is the maximum capacity of the “soil” reservoir. The second parameter ( $X_2$ ) is the exchange parameter in the underground “free water” reservoir. The optimization criterion used to evaluate the model is the Nash-Sutcliffe criterion, which is a dimensionless criterion for judging the goodness of fit and which facilitates the comparison of the fits of various watersheds whose flows are of different orders of magnitude.

The results of this study made it possible to characterize the main events of hydroclimatic variability observed over more than four decades in the humid tropical region of West Africa in general and of the N'zi (Bandama)

watershed in Ivory Coast in particular. Throughout the watershed, prolonged rainfall deficits since the 1970s were identified. This drought intensified during the 1980s. Hydrometric patterns have also undergone profound changes. Indeed, the rainfall decline has resulted in a decreased flow in the watershed rivers. Thus, since the end of the 1960s, a collapse of the flow rate in the rivers has been observed. The decrease was marked by a synchronous breakdown identified in 1968 at various stations. The simulation performances obtained in calibration and validation phases of the GR2M model are generally above 70%. The results of applying the method of crossed simulation showed a non-stationarity of the rainfall-runoff relationship in the N'zi watershed related to changes in climate and physical conditions. The crossed simulation approach appears efficient and robust in identifying possible changes in the rainfall-runoff relationship in West Africa.

## 1. Introduction

La Côte d'Ivoire a connu quatre périodes de sécheresse très marquée au cours du xx<sup>e</sup> siècle : l'année 1943, les années 1968–1970, les années 1982–1983 et l'année 1993 (Bigot et al., 2005 ; Brou, 2005). Ces périodes de sécheresse s'inscrivent dans le phénomène général de la sécheresse observée depuis 1970 en Afrique de l'Ouest en général et, en particulier, en Côte d'Ivoire (Ardoin, 2004 ; Ardoin et al., 2003a ; Mahé et Olivry, 1995 ; Mahé et al., 2001 ; Ouédraogo, 2001 ; Ouédraogo et al., 1998 ; Paturel et al., 1997, 1998, 2003a ; Servat et al., 1998). Les conclusions de travaux plus récents confirment le fait que le début de la longue période de sécheresse qui sévit depuis 1970 est identifiable par une rupture de la stationnarité des séries d'observations pluviométriques et variables afférentes (nombre de jours pluvieux) quasi générale entre 1968 et 1970 (Brou, 2005 ; Hubert et al., 1998 ; Kouassi et al., 2008, 2010 ; Paturel et al., 1998 ; Servat et al., 1997a, 1998). La baisse de la pluviométrie est remarquable, même dans les zones à forte pluviométrie (supérieure à 1800 mm), comme dans l'Ouest montagneux (Goula et al., 2006 ; Savané et al., 2001). Au-delà de cette évolution générale, le comportement inter-annuel des régions littorales se distingue de celui des régions intérieures, les anomalies pluviométriques de la zone littorale étant souvent moins intenses. La variabilité climatique est susceptible de fragiliser les écosystèmes de forêt et de savane, surtout à l'occasion des années anormalement sèches. En effet, ces années sont marquées par d'importants feux de brousse, des incendies de forêt et de plantation. À différents degrés, cette variabilité climatique a eu des impacts notables sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et particulièrement dans le contexte ivoirien (Ardoin et al., 2003b ; Kouassi et al., 2011 ; Mahé et al., 2005 ; Paturel et al., 2003a, 2003b).

Au regard de ce qui précède, une question subsiste : la variabilité climatique suffit-elle à expliquer le changement observé dans les séries de débit ? Ou faut-il chercher un facteur aggravant ailleurs tel que dans la relation pluie-débit ? Cette étude tente d'apporter une réponse à cette question à travers l'étude de la relation pluie-débit. Ainsi, le comportement hydrologique étant un phénomène

complexe, sa description et son analyse nécessitent la modélisation. Cette modélisation s'est appuyée sur des modèles conceptuels qui sont utilisés par plusieurs auteurs dans le domaine de l'étude des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique (Ardoin et al., 2003b ; Ouédraogo et al., 1998 ; Paturel et al., 2003b, 2003c). En effet, les paramètres des modèles conceptuels reflètent le comportement physique du bassin (Dechemi et al., 2003). Pour les évolutions d'origine anthropique ou liées à des variations climatiques, le pas de temps mensuel est bien adapté (Dechemi et al., 2003) et la modélisation pluie-débit peut mettre en évidence les non-stationnarités hydrologiques (Andréassian, 2002, 2004 ; Andréassian et al., 2003). En effet, le fait d'utiliser le modèle dans des conditions de changement de la relation pluie-débit doit être vu comme un test considérablement plus exigeant que la validation classique par le partage de la série de données en deux sous-séries, l'une destinée au calage et l'autre réservée au contrôle (Kuczera et al., 1993). D'autre part, dans un contexte d'application pratique des modèles, le problème de pouvoir identifier et surtout prédéterminer les conséquences sur la relation pluie-débit d'actions anthropiques ou naturelles sur le bassin versant est d'actualité (Nascimento, 1995). Être capable d'expliquer et de prévoir les effets sur le régime hydrologique d'interventions naturelles et anthropiques est essentiel pour une gestion adéquate des ressources en eau. L'espace géographique choisi est le bassin versant qui est l'unité hydrologique au sein de laquelle se déroulent les différents processus du cycle de l'eau. Le bassin versant est donc l'entité géographique généralement retenue pour répondre aux questions basées sur la modélisation pluie-débit. Le pas de temps mensuel a été choisi pour cette étude.

Cette étude a pour objectif d'identifier des tendances dans la relation pluie-débit à partir d'une modélisation conceptuelle mensuelle. La méthodologie a consisté, d'une part, à mettre en évidence l'existence de la variabilité hydroclimatique interannuelle à partir de la méthode de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989) et, d'autre part, à appliquer la méthode des simulations croisées à partir du modèle GR2M, sur plusieurs sous-périodes de sept ans.

## 2. Présentation de la zone d'étude

Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (Fig. 1), sous-bassin du fleuve Bandama (Côte d'Ivoire). Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6°00' et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km<sup>2</sup>. Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessedougou à une altitude de 400 m et coule globalement suivant une direction nord-sud. Le N'zi a une pente moyenne de 0,053 %. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord. L'affluent principal du N'zi est le Kan qu'il reçoit à environ 5 km en aval de Dimbokro (Kouassi et al., 2008). De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du N'zi est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Au Nord, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec des pluies annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) est caractéristique de la

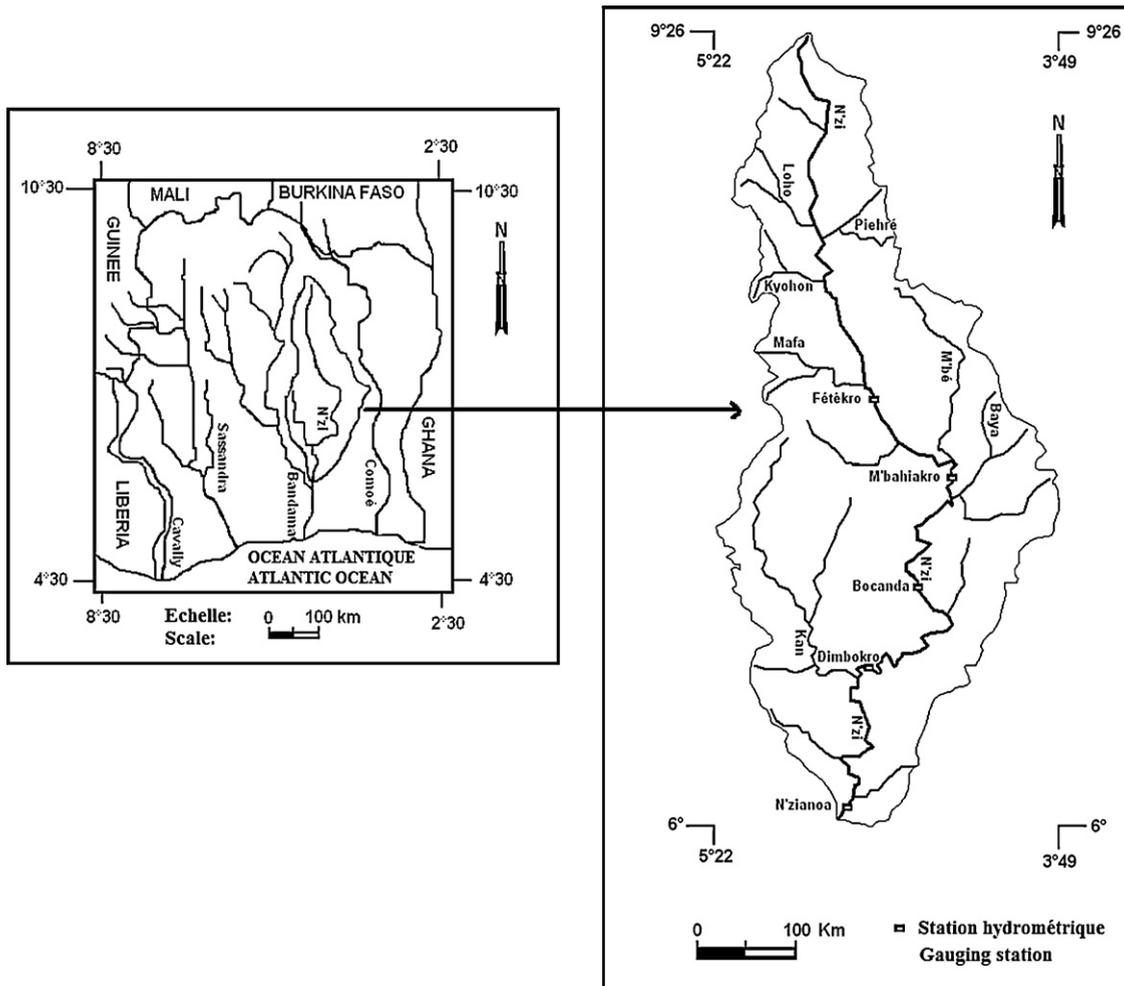


Fig. 1. Présentation du bassin versant du N'zi (Bandama).

Fig. 1. Presentation of the N'zi watershed (Bandama).

partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 et 1600 mm/an. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat attién) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm/an (Kouassi et al., 2008). Le bassin du N'zi se caractérise par une végétation savanicole dans le Centre et le Nord. La partie sud est couverte par la forêt. Le relief du bassin est peu accidenté. Il est généralement constitué de plateaux (100 à 400 m en moyenne). Cette monotonie est rompue par la chaîne Baoulé. Les principaux types de sol sont les sols ferrallitiques moyennement désaturés (Nord) et les sols ferrallitiques fortement désaturés (Centre et Sud). Ces éléments (végétation, relief, types de sol, etc.) définissent les conditions physiques de l'écoulement (Kouassi et al., 2008).

### 3. Matériel et méthodes

#### 3.1. Données

Les données de hauteurs pluviométriques utilisées proviennent de la société de météorologie nationale (SODEXAM : Société de développement et d'exploitation

aéronautique, aéroportuaire et météorologique). Ces données concernent les stations pluviométriques disposant d'informations datant du début de la décennie 1920, période d'implantation des premières stations pluviométriques en Côte d'Ivoire. Les stations remplissant cette condition et utilisées pour l'analyse temporelle des séries pluviométriques sont celles de Dabakala, Bouaké, Dimbokro et Tiassalé. La période utilisée va de 1923 à 2004. La constitution d'un vecteur régional a permis de reconstituer les données manquantes au sein des différentes séries pluviométriques annuelles (Hiez, 1977). La détermination de la pluie moyenne a été effectuée à partir de la méthode arithmétique avec 12 stations pluviométriques. Les données d'ETP utilisées sont celles des stations synoptiques de Bouaké et Dimbokro. L'ETP est calculée par la méthode de Thornthwaite sur la période 1961–1995. Les données hydrométriques ont été fournies par la Direction de l'hydraulique humaine (DHH), sous-direction de l'hydrologie. Elles concernent les stations de Dimbokro (24 100 km<sup>2</sup>) et de Fétékro (10 000 km<sup>2</sup>) (Fig. 1) et couvrent la période 1951–2000. Ces deux stations hydrométriques sont représentatives pour traduire de manière significa-

tive, le caractère hydroclimatique et physiographique du bassin versant du N'zi (Bandama). Les différentes données utilisées (précipitations, débits et ETP) ont servi à la caractérisation de la variabilité hydroclimatique et à l'étude de la relation pluie-débit. Nous faisons l'hypothèse que la qualité des données est la même tout le temps.

### 3.2. Méthode d'étude de la variabilité hydroclimatique : segmentation de Hubert

En vue d'apprécier la variabilité hydroclimatique, la méthode de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1998) a été utilisée à cause de sa performance et de sa robustesse (Lubès-Niel et al., 1998).

Elle a été déjà utilisée par beaucoup d'auteurs (Ardoin et al., 2003a ; Goula et al., 2006 ; Kouassi et al., 2010 ; Lubès-Niel et al., 1998 ; Mahé et al., 2001 ; Patrel et al., 1997, 1998 ; Savané et al., 2001 ; Servat et al., 1998). La méthode de segmentation de Hubert fournit au moyen d'un algorithme spécifique une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à deux, l'hypothèse de stationnarité de la série est acceptée. Les résultats obtenus sont définis par rapport au nombre de segments. La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique est minimum. Cette condition est nécessaire, mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. On définit :  $i_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ , le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du  $k^e$  segment,  $\bar{X}_k$  la moyenne du  $k^e$  segment,  $Dm$  l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée. L'écart quadratique dans ces conditions est exprimé par l'Éq. (1) :

$$Dm = \sum_{k=1}^{k=m} d_k \quad (1)$$

avec

$$d_k = \sum_{i=i_{k-1}-1}^{i=i_k} (X_i - \bar{X}_k)^2 \quad (d_k \text{ doit être minimum})$$

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une série hydrométéorologique contrairement à celle de Pettitt. La méthode est considérée comme un test de stationnarité. En effet, « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test. Cependant, il est difficile d'attribuer un niveau de signification à ce test (Hubert et al., 1998).

### 3.3. Description du modèle GR2M version Mouelhi (2003)

La description exhaustive de la version du modèle GR2M utilisé peut être consultée auprès des auteurs, tels que Mouelhi (2003), Mouelhi et al. (2006), Kouassi (2007). De façon simplifiée, on retient que le modèle GR2M est constitué d'un réservoir de production qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale et d'un réservoir « eau gravitaire » qui régit la fonction de transfert. Ce modèle mensuel de bilan d'eau est

régi par deux paramètres à caler ( $X_1$  et  $X_2$ ). Le premier paramètre ( $X_1$ ) représente la capacité maximale du réservoir « sol ». Le deuxième paramètre ( $X_2$ ) représente le paramètre d'échange souterrain au niveau du réservoir « eau gravitaire ». D'après Mouelhi (2003), un nombre de deux paramètres libres dans un modèle conceptuel global est suffisant pour représenter la relation pluie-débit au pas de temps mensuel (Mouelhi, 2003). Les possibilités de succès dans des études de non-stationnarité passent par l'utilisation de modèles à peu de paramètres qui est une condition nécessaire pour réduire les incertitudes du calage et garantir au modélisateur une bonne compréhension du comportement du modèle (Nascimento, 1995). D'autres versions du modèle GR2M ont été déjà utilisées en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier (Ardoin, 2004 ; Ardoin et al., 2003a ; Ouédraogo et al., 1998). La version utilisée a déjà démontré sa performance et sa robustesse sur le bassin versant du N'zi-Bandama (Kouassi et al., 2011). Les données d'entrée du modèle GR2M sont la pluie et l'ETP et les données de sortie sont les débits.

### 3.4. Critère mathématique d'optimisation du modèle (critère de Nash-Sutcliffe)

Le choix final de modèle repose tout d'abord sur la performance. La cohérence n'intervient que si les performances des modèles en concurrence pour chaque pas de temps demeurent très proches. Le critère d'optimisation utilisé dans le cadre de notre étude est le critère de Nash-Sutcliffe (Éq. (2)) (Perrin et al., 2003). Ce critère adimensionnel permet de juger la qualité de l'ajustement et facilite la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements correspondent à des ordres de grandeur différents. Il est défini par l'Éq. (2) :

$$\text{Nash-Sutcliffe} = 100 \left[ 1 - \frac{\sum (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum (Q_o^i - Q_m)^2} \right] \quad (2)$$

où :  $Q_o^i$  : débits mensuels observés ;  $Q_c^i$  : débits mensuels calculés ;  $Q_m$  : débit moyen observé sur l'ensemble de la période d'observation sans lacune.

La valeur du critère de Nash-Sutcliffe est comprise entre  $-\infty$  et 100 %. Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash-Sutcliffe est proche de 100 %. Ainsi, une performance supérieure ou égale à 60 % peut être jugée satisfaisante (Perrin, 2000). Les performances en termes de critère de Nash-Sutcliffe sont l'image de l'adéquation du modèle et du jeu de paramètres calés au bassin étudié.

### 3.5. Étude de tendance dans la relation pluie-débit : approche des simulations croisées

La description de la méthodologie est basée sur les travaux de Andréassian et al. (2003) et Kouassi et al. (2007). Cette méthodologie commence par le découpage de la série en sous-séries indépendantes d'une durée de sept ans. Ensuite, la phase de calage du modèle permet de caractériser le comportement hydrologique du modèle sur

la période choisie (sous-période de sept ans). Dans cette étude, la période 1961–1995 a été choisie. En appliquant ensuite le modèle calé sur toutes les autres sous-périodes, c'est-à-dire en gardant les mêmes paramètres, on obtient l'écoulement qu'aurait donné le bassin s'il était resté dans les conditions de la période de calage. En renouvelant cette opération après chaque contrôle, une matrice de tendance est déterminée. Dans cette étude, la variable cible considérée est le débit moyen mensuel. Dans la matrice de simulation, chaque valeur est remplacée par un signe, traduisant une évolution croissante ou décroissante du débit moyen. À cet effet, chaque valeur du tableau est remplacée par un « + » ou un « - », suivant que les valeurs sont supérieures ou inférieures à la valeur de la diagonale. La valeur située sur la diagonale représente pour chaque ligne la meilleure référence, dans la mesure où il s'agit de la valeur la plus proche de la valeur réellement observée (car prédite par le modèle calé sur la période en question). La comparaison s'effectue ligne par ligne, car il est nécessaire de se placer dans des conditions d'égale pluviométrie. Si les « + » sont majoritaires, cela signifie que la variable hydrologique simulée dans le tableau à tendance à croître avec le temps, si les « - » sont majoritaires, c'est l'inverse.

#### 4. Résultats et interprétations

##### 4.1. Analyse de la variabilité hydroclimatique dans le bassin versant du N'zi

L'application de la procédure de segmentation de Hubert aux séries chronologiques de hauteurs annuelles de pluie des stations de Dabakala, Bouaké, Dimbokro et Tiassalé sur la période 1923–2004 a permis d'identifier des ruptures au cours des années 1938 (Dimbokro), 1968 (Dabakala), 1972 (Bouaké) et 1983 (Dabakala) (Tableau 1).

Les variations des hauteurs pluviométriques interannuelles révèlent donc des irrégularités sur l'ensemble du bassin. L'ensemble des résultats montre que, pendant la période 1923–2004, une période globalement humide est observée avant 1970 marquée par une prédominance des années excédentaires. La fin de cette phase humide est caractérisée par une phase normale qui se situe globalement entre 1940 et 1970. La sécheresse actuelle a été amorcée depuis la fin des années 1970 et persiste jusqu'à nos jours avec une amplification au cours de l'année 1983.

Les résultats de l'application de la méthode de segmentation de Hubert aux séries hydrométriques montrent que les ruptures identifiées aux stations de Fétékro et Dimbokro sont synchrones (1968). Ces ruptures décelées correspondent à une baisse significative des débits moyens annuels à partir de la fin de la décennie 1970. Le forçage climatique (pluviométrie) étant non stationnaire, cela implique une non-stationnarité des débits. Mais qu'en est-il de la relation pluie-débit ?

##### 4.2. Analyse de tendances dans la relation pluie-débit

L'analyse de tendance a été réalisée à la station de Dimbokro. Les performances en termes de critère de Nash-Sutcliffe associées aux différentes simulations sont consignées dans le Tableau 2.

**Tableau 1**  
Résultats de la méthode de segmentation de Hubert (1923–2004).

Stations	Année de rupture ( <i>Break year</i> )
Bouaké	1972
Dabakala	1968 ; 1983
Dimbokro	1938
Tiassalé	Absence de rupture ( <i>No break</i> )

**Tableau 2**  
Matrice des performances de simulation à Dimbokro (1961–1995).

Périodes ( <i>Periods</i> )	61–67	68–74	75–81	82–88	89–95
61–67	<b>84,6</b>	77,5	77,4	81,8	73,0
68–74	66,6	<b>83,4</b>	70,5	79,6	69,8
75–81	71,0	77,3	<b>87,8</b>	81,3	72,0
82–88	70,6	74,8	74,6	<b>89,2</b>	72,6
89–95	71,3	76,3	76,6	80,1	<b>84,7</b>

Les différentes valeurs de performances obtenues à la suite des différents calages sur les sous-périodes de sept ans, en termes de critère de Nash-Sutcliffe, à partir du modèle GR2M, au niveau de la station de Dimbokro varient entre 83,4 et 89,2 %. Ces performances sont donc satisfaisantes. Les différentes valeurs de performances obtenues en phases de validation oscillent entre 66,6 et 81,8 %. Ces performances restent dans l'ensemble supérieures à 60 % et sont de ce fait satisfaisantes en calage comme en validation. Ces résultats montrent que le modèle GR2M est performant et robuste. Il arrive donc à reproduire de façon satisfaisante le comportement hydrologique du bassin versant.

Au regard de la qualité des simulations, les lames d'eau écoulées ont été estimées. Les résultats des simulations en termes de productivité (lames d'eau mensuelle écoulée en millimètre) (Tableau 3) et les résultats transformés sous forme de matrice de signes à partir de la matrice des simulations croisées sont consignés dans le Tableau 4.

Les lames d'eau simulées en phases de calage varient entre 3,66 et 6,68 mm. Quant aux lames d'eau simulées en phases de validation, elles fluctuent entre 1,93 et 8,27 mm. Un total de 18 signes négatifs a été enregistré contre deux

**Tableau 3**  
Matrice des lames d'eau moyennes mensuelles, simulées (mm) à Dimbokro (1961–1995).

Périodes ( <i>Periods</i> )	61–67	68–74	75–81	82–88	89–95
61–67	<b>6,68</b>	3,90	3,48	3,57	2,38
68–74	8,27	<b>4,85</b>	4,28	4,13	3,08
75–81	5,56	3,21	<b>3,75</b>	2,90	1,93
82–88	7,11	4,12	3,62	<b>3,66</b>	2,56
89–95	7,04	4,25	3,83	4,01	<b>3,71</b>

**Tableau 4**

Matrice de signes à Dimbokro (1961–1995).

**Table 4**

Matrix of signs at Dimbokro (1961–1995).

Périodes (Periods)	61–67	68–74	75–81	82–88	89–95
61–67	<b>0</b>	–	–	–	–
68–74	–	<b>0</b>	–	–	–
75–81	–	+	<b>0</b>	–	–
82–88	–	–	+	<b>0</b>	–
89–95	–	–	–	–	<b>0</b>

signes positifs. Il ressort que les signes négatifs sont majoritaires par rapport aux signes positifs dans le bassin versant du N'zi. L'hypothèse de stationnarité du comportement hydrologique analysé du point de vue du bilan en eau dans le bassin versant du N'zi est à rejeter. Ces résultats confirment la présence d'une tendance dans le comportement hydrologique du bassin principal du N'zi. L'ensemble des résultats obtenus dans cette étude de tendance dans le comportement hydrologique du bassin du N'zi met en évidence une modification de la relation pluie-débit. Cette modification traduite par une tendance à la décroissance est donc présente au sein du comportement hydrologique du bassin versant du N'zi à Dimbokro.

## 5. Discussion

Les résultats de l'application de la méthode de segmentation de Hubert mettent en exergue une importante baisse de la pluviométrie sur le bassin versant du N'zi depuis la fin de la décennie 1960. Les résultats obtenus au cours de ce travail sont en accord avec les conclusions des travaux antérieurs réalisés par Kouassi et al. (2008) sur le bassin versant du N'zi à partir d'autres tests statistiques de rupture (test de Pettitt). Les résultats de la variabilité climatique obtenus dans le bassin versant du N'zi (Bandama) sont en accord avec les conclusions des travaux antérieurs réalisés sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest en général (Ardoin, 2004 ; Ardoin et al., 2003a ; Ardoin-Bardin et al., 2005 ; Lubès-Niel et al., 1998 ; Paturol et al., 1998 ; Servat et al., 1997a, 1998, 1999) et en Côte d'Ivoire en particulier (Bigot et al., 2005 ; Brou, 2005 ; Goula et al., 2006 ; Kouassi et al., 2008). Les ruptures hydrométriques ont été identifiées en 1968. Le caractère synchrone des ruptures identifiées au sein des séries chronologiques de pluies et de débits souligne le lien indiscutable qui existe entre la baisse de la pluviométrie et la diminution des écoulements de surface sur le bassin versant du N'zi (Kouassi et al., 2008). D'après les résultats des travaux de Kouassi et al. (2008), les déficits d'écoulement (52 %) sont très supérieurs aux déficits pluviométriques (16 %), ce qui traduit une amplification de la sécheresse météorologique au niveau des écoulements. Les ruptures identifiées au sein des séries hydrométriques en Afrique de l'Ouest sont localisées entre 1968 et 1972 (Ardoin-Bardin et al., 2005 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Servat et al., 1997b, 1998) et coïncident donc avec celles identifiées dans les stations hydrométriques du bassin versant du N'zi.

L'approche de la simulation croisée est un support d'interprétation original lié aux étapes de calage et de validation (Andréassian, 2002, 2004 ; Andréassian et al., 2003 ; Kouassi et al., 2007). En effet, elle est basée sur un modèle hydrologique conceptuel pluie-débit au pas de temps mensuel (GR2M) qui a été utilisé dans le contexte ouest-africain par d'autres auteurs (Ardoin, 2004 ; Ouédraogo, 2001 ; Ouédraogo et al., 1998). Cette approche permet de tester si les tableaux de simulations croisées peuvent être considérés comme l'expression d'un comportement stationnaire. Cette approche a été utilisée par Andréassian (2002, 2004) et Andréassian et al. (2003). Plusieurs cas ont été choisis au cours des travaux précédemment cités (cas d'évolution progressive, cas de perturbations brusques et cas de stabilité présumée). Quatre variables hydrologiques ont été utilisées par les auteurs pour caractériser de façon aussi complète que possible le comportement hydrologique d'un bassin versant. Ces quatre variables permettent une interprétation concrète des tendances observées. Ces variables sont les suivantes :

- l'écoulement total ;
- l'écoulement en crue (défini comme le volume écoulé au-dessus d'un seuil égal à quatre fois le module de l'écoulement) ;
- l'écoulement en étiage (défini comme le déficit d'écoulement au-dessous d'un seuil égal à un quart du module de l'écoulement) ;
- l'écoulement de base (l'indice considéré correspond au rapport entre l'écoulement de base calculé par la méthode de L'vovitch (1979) citée par Andréassian (2004) et l'écoulement total).

Plusieurs bassins ont été choisis pour l'application de l'approche de simulations croisées :

- bassin de Coshocton (un cas d'évolution progressive) ;
- bassins de Three Bar et du Réal Collobrier (deux cas de perturbations brusques) ;
- Andrews Experimental Forest (un cas de stabilité présumée).

Il ressort de leur étude que cette approche a pu montrer la preuve de sa capacité à détecter des changements progressifs et brusques dans le comportement hydrologique d'un bassin versant.

Ainsi, l'approche de la simulation croisée est l'approche la plus rigoureuse et robuste au regard de son support qui est le modèle hydrologique conceptuel. Cette qualité a été également manifestée au cours de cette étude à travers la mise en évidence de la modification du comportement hydrologique du bassin du N'zi liée à la variabilité climatique et à la modification de l'occupation du sol (Kouassi et al., 2008). Kouassi et al. (2007) sont parvenus à cette conclusion au cours de leurs travaux sur le même bassin à partir de l'approche basée sur les coefficients d'écoulement et de celle de la simulation croisée mais avec un modèle conceptuel global au pas de temps annuel (modèle en « S » de Mouelhi (2003)), Kouassi et al. (2011)

sont également parvenus à la non-stationnarité hydrologique dans la reproduction des débits mensuels et saisonniers à partir de l'analyse des paramètres de calage ( $X_1$  et  $X_2$ ) du modèle GR2M. Nous sommes passés du modèle conceptuel au pas de temps annuel à un modèle conceptuel au pas de temps mensuel, qui prend mieux en compte le comportement hydrologique du bassin versant. Les résultats des différentes études corroborent les résultats obtenus par Ouédraogo et al. (1998) dans le contexte ouest-africain en général et en particulier au Bénin par Le Lay (2006).

Selon Kouassi et al. (2008), un certain nombre de facteurs peuvent expliquer l'évolution observée dans la relation pluie-débit. La variabilité pluviométrique, caractérisée par une diminution de la quantité et de la fréquence des hauteurs de pluie, et la modification saisonnière de la distribution des précipitations sont les causes probables des changements dans la réponse du bassin (Kouassi et al., 2010). Aussi, de plus en plus, l'essentiel des précipitations se retrouve-t-il sous forme d'évapotranspiration conséquence de la hausse des températures ce qui pourrait expliquer en partie l'évolution de la relation pluie-débit. En effet, l'évolution de l'ETP, variable essentielle dans la modélisation pluie-débit, influence les résultats de simulation. Une baisse des volumes d'eau mobilisés par les nappes d'eau souterraines et une diminution des coefficients d'écoulement observée, conséquences de la diminution prolongée de la pluviométrie, pourraient expliquer cette variabilité constatée dans la relation pluie-débit. La modification de l'occupation du sol dans le bassin versant du N'zi, conséquence éventuelle de la variabilité pluviométrique et de la forte anthropisation du bassin, peut être un facteur de l'évolution de la relation pluie-débit (Andréassian, 2002 ; Andréassian et al., 2003 ; Kingumbi, 2006 ; Mahé et al., 2002, 2003, 2005). Sous la pression démographique croissante et la nécessité de développement économique, l'occupation du sol a été très modifiée au niveau du bassin versant du N'zi (Kouassi, 2007).

## 6. Conclusion

Cette étude a permis de caractériser les principales manifestations de la variabilité hydroclimatique, observée depuis plus de quatre décennies en zone tropicale humide de l'Afrique de l'Ouest en général, et en particulier, dans la région du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Sur l'ensemble du bassin, des conditions prolongées de déficits pluviométriques depuis les années 1970 ont été mises en évidence. Cette sécheresse s'est amplifiée pendant les années 1980. Les régimes hydrométriques ont également subi de profondes modifications. En effet, la baisse de la pluviosité a eu pour effet, la diminution des débits des cours d'eau du bassin. Ainsi, depuis la fin de la décennie 1960, un effondrement des débits des cours d'eau est observé. Cette diminution est marquée par une rupture synchrone identifiée en 1968 sur les différentes stations. Les différentes performances de simulation obtenues avec un modèle pluie-débit au pas de temps mensuel en phase de calage et de validation sont généralement supérieures à 70 %. Les résultats de l'application de la méthode de la simulation croisée ont

mis en évidence une non-stationnarité de la relation pluie-débit au niveau du bassin versant du N'zi, liée à la modification des conditions climatiques et physiques. L'approche de la simulation croisée semble performante et robuste pour rechercher les modifications éventuelles dans la relation pluie-débit en régions ouest africaines. La modification de la relation pluie-débit doit nous interpeller sur la gestion intégrée et durable des ressources en eau en Afrique de l'Ouest de façon générale et en Côte d'Ivoire en particulier.

## Remerciements

Les auteurs de cet article remercient Messieurs J.E. Paturel, P. Hubert, N. Le Moine et V. Andréassian, dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la Société d'exploitation et de développement aéroportuaire, aéronautique et météorologique (SODEXAM) et la Direction de l'hydraulique humaine (DHH) pour leur avoir fourni les données climatiques et hydrométriques utilisées dans cette étude.

## Références

- Andréassian, V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse, Université de Paris 6, France, 262 p.
- Andréassian, V., 2004. Waters and forests: from controversy to scientific debate. *J. Hydrol.* 291, 1–27.
- Andréassian, V., Parent, E., Michel, C., 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water Resour. Res.* 39 (9), 1252, doi:10.1029/2003WR002081.
- Ardoin, B.S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse, Université de Montpellier II, France, 330 p.
- Ardoin, B.S., Lubès-Niel, H., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, J.F., 2003a. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. IAHS Publication 278, 223–228.
- Ardoin, B.S., Dezetter, A., Servat, E., Mahé, G., Paturel, J.E., Dieulin, C., Boyer, J.F., 2003b. Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grand pas de temps et d'espace. *J. Eau Environ.* 3, 5–13.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Mahé, G., Paturel, J.E., Dieulin, C., Casenave, L., 2005. Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et centrale. IAHS Publication 296, 194–202.
- Bigot, S., Brou, Y.T., Oszwaid, J., Diedhou, A., 2005. Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse* 16 (1), 5–13.
- Brou, Y.T., 2005. Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212 p.
- Dechemi, N., Benkaci, T., Issolah, A., 2003. Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. *Rev. Sci. Eau* 16 (3), 407–424.
- Goula, B.T.A., Savané, I., Konan, B., Fadika, V., Kouadio, G.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* 1, 1–12.
- Hiez, G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahier ORS-TOM, Série Hydrologie* 14 (2), 129–160.
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chauchoe, A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol. Amsterdam* 110, 349–367.
- Hubert, P., Servat, E., Paturel, J.E., Kouamé, B., Bendjoudi, H., Carbonnel, J.P., Lubès-Niel, H., 1998. La procédure de segmentation, dix ans après. IAHS Publication 252, 267–273.
- Kingumbi, A., 2006. Modélisation hydrologique d'un bassin versant affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguelli en

- Tunisie centrale. Thèse de l'École nationale d'ingénieurs de Tunis, Tunisie, 199 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) en Côte d'Ivoire, Thèse, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 210 p.
- Kouassi, A.M., Kouamé, K.F., Goula, B.T.A., Lasm, T., Paturel, J.E., Biémi, J., 2008. Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoirienne Sci. Technol.* 11, 207–229.
- Kouassi, A.M., Kouamé, K.F., Saley, M.B., Yao, B.K., 2007. Identification de tendances dans la relation pluie-débit et recharge des aquifères dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Eur. J. Sci. Res.* 3, 412–427.
- Kouassi, A.M., Kouamé, K.F., Yao, K.B., Dje, K.B., Paturel, J.E., Oularé, S., 2010. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Européenne de Géographie (Cybergeo)*, décembre 2010, <http://cybergeo.revues.org/index23388.html>.
- Kouassi, A.M., Kouamé, K.F., Yao, K.B., Kouamé, K.A., Oularé, S., Biémi, J., 2011. Modélisation des débits mensuels par un modèle conceptuel : application à la caractérisation de la relation pluie-débit dans le bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *J. Afr. Commun. Sci. Technol.* 11, 1409–1425.
- Kuczera, G., Raper, G.P., Brah, N.S., Jayasuriya, M.D., 1993. Modelling yield changes following strip thinning in a mountain ash catchment: an exercise in catchment model validation. *J. Hydrol.* 150, 433–457.
- Le Lay, M., 2006. Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydroclimatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin. Thèse, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 218 p.
- Lubès-Niel, H., Masson, J.M., Paturel, J.E., Servat, E., 1998. Variabilité climatique et statistiques. Étude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Rev. Sci. Eau* 3, 383–408.
- Mahé, G., Olivry, J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse* 1 (6), 109–117.
- Mahé, G., Dray, A., Paturel, J.E., Cres, A., Koné, F., Manga, M., Cres, F.N., Djoukam, J., Maïga, A., Ouédraogo, M., Servat, E., 2002. Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina Faso. IAHS Publication 274, 69–76.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J.C., Wotling, G., 2001. Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa–1951–1989. *Hydrol. Sci. J.* 46 (2), 211–226.
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J.E., Girard, S., Servat, E., Dezetter, A., 2003. Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. IAHS Publication 278, 215–222.
- Mahé, G., Paturel, J.E., Servat, E., Conway, D., Dezetter, A., 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina Faso. *J. Hydrol.* 300, 33–43.
- Mouelhi, C., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse, École nationale du génie rural des eaux et forêts de Paris, France, 274 p.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., 2006. Stepwise development of a two parameter monthly water balance model. *J. Hydrol.* 318, 200–214.
- Nascimento, O., 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Thèse, École nationale des ponts et chaussées de Paris, France, 390 p.
- Ouédraogo, M., 2001. Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale, Thèse, Université de Montpellier II, France, 257 p.
- Ouédraogo, M., Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Masson, J.M., 1998. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. IAHS Publication 252, 315–321.
- Paturel, J.E., Ouédraogo, M., Servat, E., Mahé, G., Dezetter, A., Boyer, J.F., 2003a. The concept of hydropluviometric normal in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrol. Sci. J.* 48 (1), 125–137.
- Paturel, J.E., Ouédraogo, M., Mahé, G., Servat, E., Dezetter, E., 2003b. Utilisation de modèles hydrologiques pour évaluer les ressources en eau de surface et leur évolution spatio-temporelle : application à l'Afrique de l'Ouest. IAHS Publication 280, 117–123.
- Paturel, J.E., Ouédraogo, M., Mahé, G., Servat, E., Dezetter, A., Ardoin, B.S., 2003c. The influence of distributed input data on the hydrological modelling of monthly river flow regimes in West Africa. *Hydrol. Sci. J.* 48 (6), 881–890.
- Paturel, J.E., Servat, E., Delattre, M.O., Lubès-Niel, H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol. Sci. J.* 43 (6), 937–946.
- Paturel, J.E., Servat, E., Lubès-Niel, H., Delattre, M.O., 1997. Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 325, 779–782.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 287 p.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279, 275–289.
- Savané, I., Coulibaly, K.M., Gioan, P., 2001. Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse* 4 (12), 231–237.
- Servat, E., Paturel, J.E., Kouamé, B., Travaglio, M., Ouédraogo, M., Boyer, J.F., Lubès-Niel, H., Fritsch, J.M., Masson, J.M., Marieu, B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. IAHS Publication 252, 323–337.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J.M., 1997a. Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 324, 835–838.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Travaglio, M., Marieu, B., 1997b. De la diminution des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 325, 679–682.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J.M., Travaglio, M., Marieu, B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Rev. Sci. Eau* 12 (2), 363–387.