

Analyse de tendances dans la relation pluie-débit dans un contexte de changements climatiques: cas du bassin versant du N'zo-Sassandra (Ouest de la Côte d'Ivoire)

[Analysis of trends in the rainfall-runoff relation in the context of climate change: case of the N'zo-Sassandra watershed (Western Côte d'Ivoire)]

***KOUAMÉ Koffi Fernand¹, KOUASSI Amani Michel², N'GUESSAN Bi Tozan Michel³,
KOUAO Jean Muller¹, LASM Théophile¹ et SALEY Mahaman Bachir¹***

¹Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Institut 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 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

³Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département Infrastructures et Transports (IT), Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The study area is the N'zo-Sassandra watershed (Ivory Coast) located between longitudes 7°15' and 8°05' West and latitude 6°50' and 7°50' North. Its surface is estimated at 4310 km². The climate regime prevailing at the N'zo-Sassandra watershed at Kahin is a mountain climate (subequatorial regime) with annual rainfall amounts sometimes exceeding 2000 mm. N'zo-Sassandra has a single hydrological regime. The N'zo-Sassandra watershed is a part of the West forest zone characterized by a degraded dense forest. This study aims to identify trends in the rainfall-runoff relationship from an overall conceptual modeling monthly runoff. The data (rainfall, ETP, flow) used in this study cover the period of 1980-2000.

The methodological approach is based on the one hand, on the evaluation criteria of the model used (GR2M) and secondly, on the crossed simulations method (1980-2000). The results showed that the GR2M model was efficient and robust on the N'zo-Sassandra watershed. Indeed, the values of the Nash-Sutcliffe obtained are greater than 60% in the calibration phase (81.95%) as validation phase (72.40%). Degradation recorded at the Nash-Sutcliffe criterion passing the validation phase in the calibration phase is less in absolute value than 10%. In addition, it is shown that there is a vast majority of the positive signs in relation to the negative signs. These results highlight the existence of non-stationarity of the rainfall-runoff relation at the N'zo-Sassandra watershed during the period 1980-2000, suggesting a rising trend of monthly runoff.

KEYWORDS: Rainfall-runoff modeling, trend analysis, crossed simulations method, GR2M model, N'zo-Sassandra, Côte d'Ivoire.

RESUME: La zone d'étude est le bassin versant du N'zo-Sassandra (Ouest de la Côte d'Ivoire) qui se situe entre les longitudes 7° 15' et 8° 05' Ouest et les latitudes 6° 50' et 7° 50' Nord. Sa superficie est estimée à 4 310 Km². Le régime climatique régnant au niveau du bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin est un climat de montagne (régime subéquatorial) avec des hauteurs pluviométriques annuelles dépassant parfois les 2 000 mm. Le N'zo-Sassandra a un régime hydrologique simple. Le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin fait partie de la zone forestière de l'Ouest caractérisée par une forêt dense dégradée. Cette étude a pour objectif d'identifier des tendances dans la relation pluie-débit à partir d'une modélisation

conceptuelle globale des écoulements mensuels. Les données utilisées (pluie, ETP, débit) dans le cadre de cette étude s'étendent sur la période 1980-2000. L'approche méthodologique de l'étude est basée d'une part, sur les critères d'évaluation du modèle utilisé (GR2M) et d'autre part, sur la méthode des simulations croisées (1980-2000). Les résultats de l'étude ont permis de montrer que le modèle GR2M a été performant et robuste sur le bassin versant du N'zo-Sassandra. Les résultats de la méthode des simulations croisées ont mis en évidence l'existence d'une non stationnarité de la relation pluie-débit au niveau du bassin versant du N'zo-Sassandra au cours de la période 1980-2000, qui suggère une tendance à la hausse des écoulements mensuels.

MOTS-CLEFS: Modélisation pluie-débit, analyse de tendance, méthode de simulations croisées, modèle GR2M, N'zo-Sassandra, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

La communauté internationale s'est engagée à réduire de moitié, d'ici 2015, la proportion des personnes qui n'ont pas accès à l'eau potable ou qui n'ont pas les moyens de s'en procurer et à mettre fin à l'exploitation irrationnelle des ressources en eau, en formulant des stratégies de gestion de l'eau aux niveaux régional, national et local, permettant notamment d'assurer aussi bien un accès équitable qu'un approvisionnement adéquat [1]. A l'origine de cette déclaration, les constats suivants sont observés : la ressource en eau douce facilement accessible ne représente que 2,5% de l'hydrosphère terrestre ; la population mondiale s'accroît et change ses habitudes de consommation. Pour assurer leur pérennité, les sociétés humaines se doivent de garantir la durabilité de leur approvisionnement en eau. Aussi, la question de la stationnarité du régime hydrologique des bassins versants est-elle une préoccupation récurrente des gestionnaires de la ressource en eau, qui doivent prendre de lourdes décisions d'investissement dans un contexte rendu incertain par les changements climatiques [2]. Là où les pressions sur les ressources en eau sont fortes, on suit avec anxiété les évolutions qui pourraient remettre en cause une situation déjà tendue. Si le thème du changement climatique lié au réchauffement global a été largement médiatisé au cours de la dernière décennie, il existe une autre source de non-stationnarité qui revient à l'attention du public de façon récurrente : il s'agit du changement de l'aptitude des bassins versants à transformer la pluie en écoulement (souterrain ou de surface) utilisable par l'homme [2]. On peut identifier deux grands types de méthodes permettant de détecter les non-stationnarités (ou les tendances) dans le comportement hydrologique d'un bassin versant [2]-[4]:

- Les méthodes utilisant un modèle hydrologique fondé sur une représentation explicite des phénomènes physiques mis en jeu;
- Les méthodes fondées sur le principe des bassins versants appariés (bassins réels ou simulés).

Cette dernière méthode constitue la référence pour toutes les études d'impact des opérations de gestion des bassins versants sur l'hydrologie [2]. Cependant, il est difficile de disposer d'un bassin de référence dont l'occupation du sol soit restée la même pendant toute la durée de l'étude. Le plus souvent, on ne dispose de données de débit et de pluie que pour un seul bassin versant (le bassin versant modifié). Il est alors très difficile de juger d'un changement de comportement, dans la mesure où les périodes « avant changement » et « après changement » diffèrent forcément du point de vue climatique. Ces observations mettent en évidence la nécessité de l'utilisation d'un modèle pluie-débit [2], [5]-[7].

Une modélisation au pas de temps mensuel a été choisie pour cette étude. En effet, pour les évolutions d'origines anthropiques ou liées à des variations climatiques, le pas de temps mensuel est adapté à de telles études.

Les études menées à l'Ouest de la Côte d'Ivoire et particulièrement sur le bassin versant du N'zo-Sassandra montrent l'importance des changements climatiques dans cette région marquée par une tendance à la sécheresse qui s'est manifestée à partir du début de la décennie 1970 [8]-[12]. Les fluctuations pluviométriques observées se sont en effet produites sur plusieurs années consécutives, et concernent l'ensemble du bassin versant. Ces changements climatiques ont engendré une baisse des débits des cours d'eau. Aussi, la région ouest de la Côte d'Ivoire regorge-t-elle encore de forêts susceptibles d'être exploitées [13]. L'importance socio-économique que représente cette région entraîne des mutations de populations vers elle. Cette pression démographique a déjà des effets sur l'occupation du sol [13]. Les changements climatiques couplés aux modifications de l'occupation du sol soulèvent des questions de développement, notamment en ce qui concerne la disponibilité des ressources en eau. Les travaux de [14]-[16] ont montré que les changements climatiques liés à la dynamique de l'occupation du sol ont eu, entre autres pour impacts, la modification de la relation pluie-débit. Au regard de l'importance économique que constitue la région ouest, nous voulons tenter d'étudier la tendance dans la relation pluie-débit dans cette zone au relief très accidenté avec une végétation de forêt dense.

Cette étude a pour objectif d'identifier des tendances dans la relation pluie-débit à partir d'une modélisation conceptuelle mensuelle dans le bassin versant du N'zo-Sassandra. La méthodologie a consisté d'une part, à évaluer le modèle utilisé sur le bassin test à partir des critères de performance et de robustesse, et d'autre part, à appliquer la méthode des simulations croisées à partir du modèle GR2M, sur plusieurs sous-périodes de 5 ans.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est le bassin versant du N'zo à Kahin, sous-bassin du fleuve Sassandra. Il est compris entre les longitudes Ouest de coordonnées 7°15' et 8°05' et les latitudes Nord de coordonnées 6°50' et 7°50' (Fig. 1). La superficie du bassin est estimée à 4 310 Km². Le N'zo, cours d'eau d'ordre 6 (méthode de Strahler), prend sa source dans les monts, dans une région située entre Biankouma et Man et coule globalement dans une direction Nord-Sud. C'est un affluent de la rive gauche du fleuve Sassandra.

Le régime climatique régnant au niveau du bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin est un climat de montagne (régime subéquatorial) avec des hauteurs pluviométriques annuelles dépassant parfois les 2 000 mm. L'orientation des reliefs majeurs par rapport aux vents dominants et la répartition des altitudes par rapport aux zones atmosphériques, sont autant de facteurs qui militent en faveur de ce climat de montagne. Cependant, la distribution spatiale des précipitations est faite selon un gradient essentiellement de direction NE- SW. Le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin est soumis à deux saisons:

- Une saison sèche qui s'étend de novembre à février, avec des précipitations moyennes mensuelles dépassant rarement 50 mm. Les plus faibles valeurs des précipitations sont observées pendant le mois de janvier avec à peine 5 mm de pluie ;
- Une saison de pluies qui s'étend de mars à octobre. Les mois d'août et septembre sont les mois les plus pluvieux, avec des moyennes mensuelles dépassant 300 mm. Les paramètres climatiques ci-dessous ont été évalués sur la période 1971-2000. Les températures annuelles varient globalement entre 15 °C et 33 °C avec une moyenne de 25 °C. Une moyenne de 2 272 heures d'ensoleillement par an est enregistrée. L'humidité relative varie entre 61 et 99% avec une valeur moyenne de 98% à Man. Les vents de direction N-S (Harmattan et Alizé boréal) sont dominants en saison sèche tandis qu'en saison des pluies, c'est le vent de la mousson de direction NW- SE qui prédomine.

Le N'zo a un régime hydrologique simple (un minimum en février et un maximum en septembre). En effet, une période de faibles écoulements allant de décembre à mai est observée, ainsi qu'une période de forts écoulements allant de juin à novembre. Le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin fait partie de la zone forestière de l'Ouest caractérisée par une forêt dense. Cependant, on assiste à une dynamique régressive de la forêt au profit des cultures/jachères due à des pratiques agricoles et une exploitation forestière accélérée [13]. Une partie de cette végétation est conservée sous forme de forêts classées (Ira, Sangouiné, Gueouélé, Mont Tonkoui, Goin-Debé, Scio) dans lesquelles l'exploitation forestière est autorisée mais, les défrichements agricoles sont interdits.

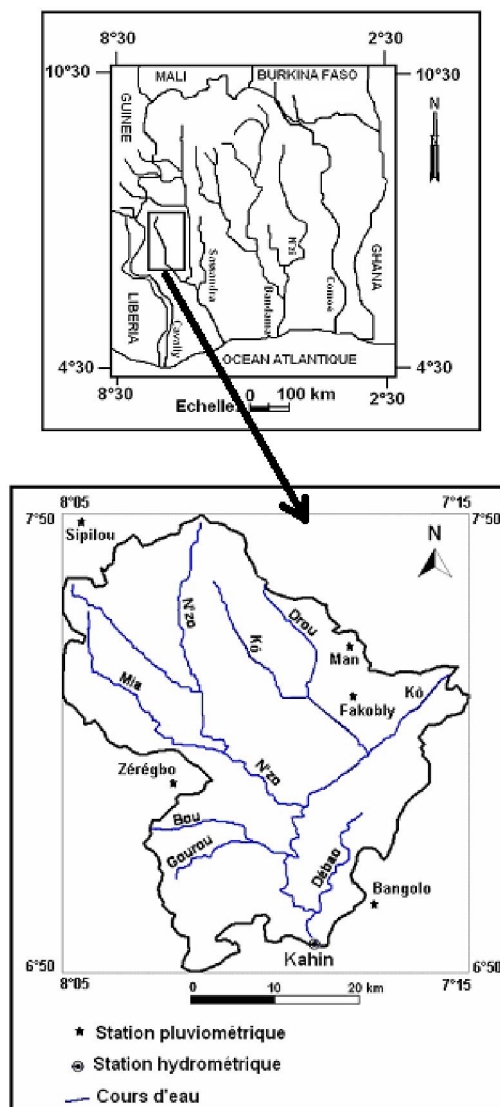


Fig. 1. Présentation du bassin versant du N'zo-Sassandra.

Ces domaines forestiers permanents de l'Etat doivent permettre de garantir l'équilibre écologique. En effet, l'occupation du sol influence la quantité d'eau disponible pour l'écoulement de surface et l'infiltration selon la nature des végétaux. Les sols du bassin versant du N'zo-Sassandra sont constitués essentiellement de sols ferralitiques et de sols hydromorphes. Le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin appartient à la région la plus accidentée de la Côte d'Ivoire. Les altitudes des sommets sont généralement supérieures à 800 m et dépassent parfois les 1 000 m. L'altitude moyenne des bas plateaux est égale à 300 m. La côte minimale du N'zo est de 225 m.

3 DONNEES ET METHODES

3.1 DONNEES

Au cours de cette étude, nous ne partons pas d'une idée *a priori* du fonctionnement physique de la transformation pluie-débit, mais nous partons seulement des données qui reflètent la réalité d'une manière implicite. En effet, le calage et la validation d'un modèle nécessitent des séries de données observées. La pluviométrie et l'évapotranspiration reflètent les phénomènes climatologiques. Le débit, mesuré à l'exutoire, révèle le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Les données utilisées concernent les précipitations, les évapotranspirations potentielles (ETP) (calculées avec la méthode de Thornthwaite) et les débits. Les données pluviométriques proviennent des stations de Bangolo, Fakobly, Man, Sipilou et Zérégbo. Ces stations qui sont situées à l'intérieur et près du bassin, ont été sélectionnées pour la fiabilité et la représentativité spatiale et temporelle de leurs données (Fig. 1).

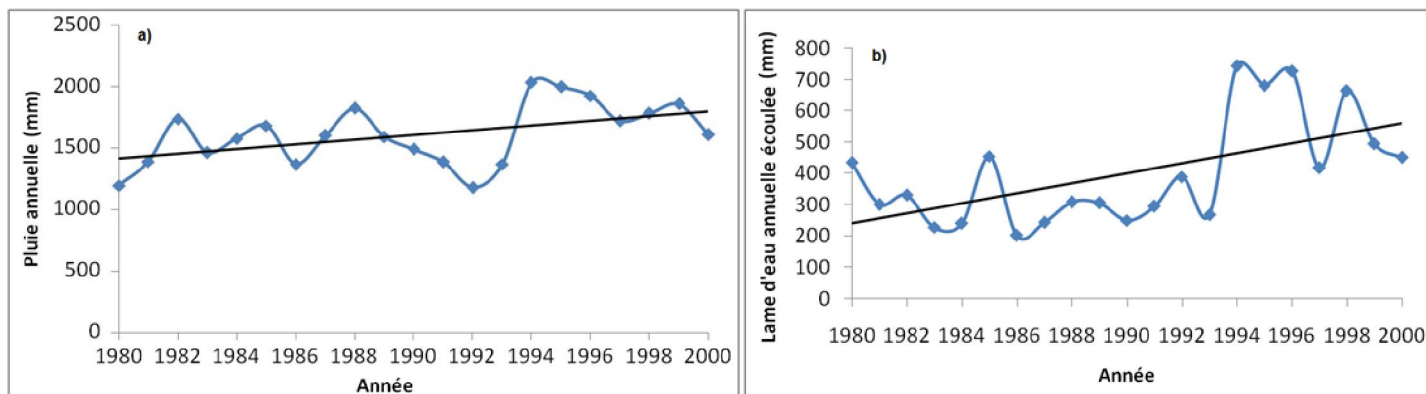


Fig. 2. Tendance générale des pluies et des lames d'eau annuelles écoulées (bassin versant du N'zo-Sassandra 1980-2000)

Les valeurs moyennes des précipitations ont été calculées à partir de la méthode des moyennes arithmétiques. Les différentes données ont été mises à notre disposition par la société de météorologie nationale (SODEXAM : Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique-Côte d'Ivoire). Les données hydrométriques ont été fournies par la Direction de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP). La station retenue est celle de Kahin (Fig. 1). L'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est une donnée essentielle du modèle utilisé, exprime la demande climatique et intervient dans la fonction de production du modèle. Les valeurs d'ETP ont été estimées à l'aide de la méthode de Thornthwaite [17] à partir des données de températures de la station de Man et des pluies mensuelles présentées précédemment. Ces valeurs ont été calculées au pas de temps mensuel selon les exigences de la méthode de Thornthwaite. Les données de températures ont été fournies par la SODEXAM. La période 1980-2000 a été choisie pour un synchronisme des données (pluie, ETP et débits). En effet, les données de débits de la station de Kahin sont disponibles à partir de 1980. Ces différentes données (pluies, débits et ETP), définies au pas de temps mensuel, ont servi à l'étude des tendances dans la relation pluie-débit dans le bassin versant du N'zo-Sassandra.

Les précipitations moyennes annuelles varient entre 1181 mm et 2034 mm avec une moyenne de 1610 mm, un écart-type de 246 mm et un coefficient de variation de 15%. Quant aux lames d'eau écoulées, elles oscillent entre 202 mm et 743 mm avec une moyenne de 401 mm, un écart-type de 172 mm et un coefficient de variation de 43%. Le coefficient de variation des lames d'eau écoulée représente près de trois (3) fois celui des pluies annuelles. Les données de pluie annuelle sont homogènes alors que les données de lames d'eau écoulée sont hétérogènes. Les variations interannuelles des précipitations (Fig. 2a) et des débits (Fig. 2b) sur la période 1980-2000 montrent que malgré des valeurs faibles enregistrées avant 1993, une tendance générale à la hausse est mise en évidence au niveau des deux paramètres.

La figure 3 présente la corrélation entre les pluies et lames d'eau écoulées au pas de temps annuel. Un ajustement du nuage de points à partir de la régression linéaire a permis de montrer qu'il existe une bonne corrélation d'une valeur de 0,68 entre le débit annuel et la pluie annuelle dans le bassin versant du N'zo-Sassandra.

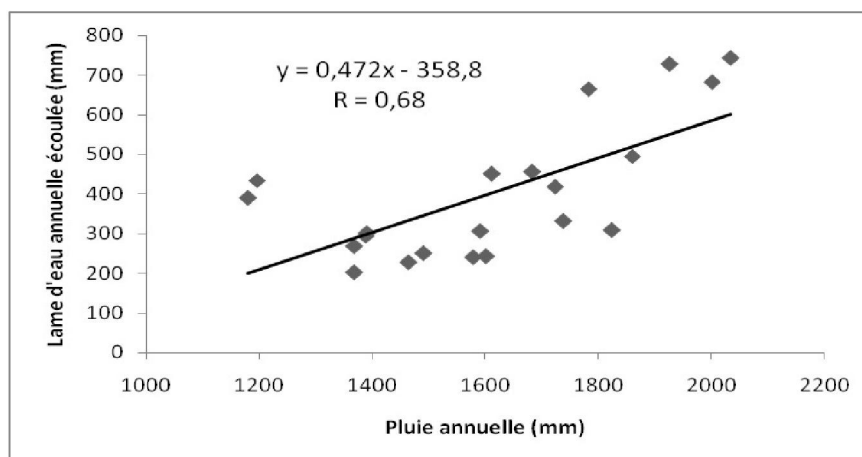


Fig. 3. Corrélation entre lame d'eau annuelle écoulée et pluie annuelle (1980-2000)

3.2 DESCRIPTION DU MODELE GR2M

La modélisation hydrologique est beaucoup utilisée ces dernières années [1, 18, 19, 20, 21, 22]. Du pas de temps horaire jusqu'au pas de temps pluriannuel, il existe de nombreux modèles fonctionnant à chaque pas de temps. Un certain nombre d'études réalisées en Côte d'Ivoire utilisant les modèles conceptuels, ont été présentés dans la littérature hydrologique [19, 20, 21, 23]. Plusieurs modèles (GR2M, GR4J, Conway, Yates, WBM, ou encore VUB) ont été utilisés au cours des travaux de ces auteurs. Notre choix a porté sur le modèle GR2M [24]. Ce modèle a l'avantage d'être peu consommateur de données (précipitation, évapotranspiration et débit pour le calage) enregistrées par nos réseaux climatologiques. La description exhaustive du modèle GR2M version Mouelhi peut être consultée auprès des auteurs tels que [17, 24, 25]. 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». Un nombre de deux paramètres libres dans un modèle conceptuel global est suffisant pour représenter la relation pluie-débit au pas de temps mensuel [24]. 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 [26]. D'autres versions du modèle GR2M ont été déjà utilisées en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier [19, 23, 27]. La version utilisée a déjà démontré sa performance et sa robustesse sur le bassin versant du N'zi-Bandama [28]. Les données d'entrée du modèle GR2M sont la pluie et l'ETP et les données de sortie sont les débits.

3.3 PRINCIPE DE LA MODELISATION PLUIE-DEBIT

L'évaluation du modèle GR2M s'est appuyée sur le principe du split-sample test qui consiste à faire le calage sur les deux tiers (2/3) de l'échantillon de données disponibles et de faire la validation sur le tiers (1/3) restant et vice versa [29]. Il nous semble en effet que ce test est assez robuste pour évaluer les qualités premières requises pour un modèle [29]. La longueur de la période de calage a été choisie de façon à permettre une estimation robuste des paramètres, grâce à un jeu de données aussi riches que possibles. La période d'étude (1980-2000) comprend une phase homogène sèche (1980-1986) qui correspond au 1/3 de la série et une phase homogène humide (1987-2000) qui correspond au 2/3 de la série.

3.4 CRITERE MATHEMATIQUE D'OPTIMISATION DU MODELE : CRITERE 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 cette étude est le critère de Nash-Sutcliffe (équation 1), car il est l'un des critères les plus performants [30]. 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'équation 1 [31]:

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

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 [29]. 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. L'analyse des résultats de simulation est portée sur les performances des modèles au calage et en validation. En effet, les performances au calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation [26]. Le calage a été réalisé de façon manuelle par recherche d'un minimum du critère de Nash-Sutcliffe.

3.5 EVALUATION DE LA ROBUSTESSE DU MODELE ET ANALYSE DES DEBITS SIMULES

L'une des techniques les plus utilisées, pour évaluer la robustesse d'un modèle dans des situations les plus proches possibles de celles dans lesquelles il est censé fonctionner, est la technique du double échantillon [28, 29]. Cette technique permet de tester l'adaptabilité des modèles quelle que soit leur complexité. Dans le cas où l'on disposerait d'observations se présentant comme des séries chronologiques (cas des pas de temps mensuel), il suffira de subdiviser la période d'observation de chaque bassin versant en sous-périodes, avec calage sur une période et contrôle sur le reste des observations, tout en veillant à réserver une période de mise en route. Cette tâche est répétée de façon à caler successivement sur toutes les sous-périodes. La robustesse des différents modèles est évaluée par la différence des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe en phase de calage et en phase de validation. Outre l'évaluation à l'aide d'un critère numérique, une analyse comparative des débits observés aux débits simulés a été réalisée. Le tracé de diagrammes de dispersion des débits simulés en fonction des débits observés a aussi permis d'apprécier la qualité de la modélisation effectuée.

3.6 METHODE D'ETUDE DE LA NON-STATIONNARITE HYDROLOGIQUE

Plusieurs méthodes existent dans l'étude de la relation pluie-débit. Il y a celles basées sur des analyses simples et celles basées sur une modélisation pluie-débit. Une approche simple est celle par exemple qui consiste à l'étude du coefficient d'écoulement qui traduit le rendement du bassin versant au cours des années (débit annuel/pluie annuelle) [14]. Parmi les approches s'appuyant sur la modélisation pluie-débit, on peut citer l'approche de simulation croisée, l'approche basée sur l'analyse des résidus de simulation, l'approche basée sur l'analyse des paramètres de calage, etc. La simulation croisée des débits annuels, appliquée au moyen du modèle en « S » ou modèle de Mouelhi et l'approche du coefficient d'écoulement, ont été utilisées avec succès par [14] sur le bassin versant du N'zi-Bandama en Côte d'Ivoire. L'approche basée sur l'analyse des performances des modèles a été également appliquée sur le bassin versant du N'zi-Bandama par [15] à partir du modèle en « S » de Mouelhi. Malgré les difficultés que présente la modélisation, notamment en raison de la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations et de la faible disponibilité des observations (densité et fiabilité), l'approche de la simulation croisée, basée sur la modélisation pluie-débit est plus robuste que les autres méthodes utilisées pour l'étude des tendances dans la relation pluie-débit [14]. [3] sont parvenus également à cette conclusion. Ainsi, la caractérisation de la tendance dans la relation pluie-débit a été réalisée à partir de l'approche des simulations croisées sur la période 1980-2000 [2, 3, 14, 16]. L'approche des simulations croisées a consisté à découper une série de données en sous-séries indépendantes d'une longueur de 5 ans. Cette approche part du principe que le calage permet de caractériser le comportement hydrologique du modèle sur la période de calage (sous-période de 5 ans). 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, on peut ainsi construire une matrice de tendance. Pour cette étude, la variable cible considérée est le débit moyen mensuel transformé en lame d'eau (mm). Dans l'interprétation des matrices de simulations, chaque valeur est remplacée par un signe, traduisant une évolution croissante ou décroissante de la variable hydrologique considérée dans le temps. A cet effet, chaque valeur de la matrice 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 la matrice à tendance à croître avec le temps, si les «-» sont majoritaires, c'est l'inverse.

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 RESULTATS D'EVALUATION DU MODELE GR2M

L'évaluation du modèle GR2M porte sur l'examen des valeurs de performance traduit par le critère de Nash-Sutcliffe et l'examen des tracés des hydrogrammes observés et simulés en phase de calage et en validation. Le tableau 1 regroupe les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe obtenues lors des différentes procédures de calage et validation.

Tableau 1. Performances en phases de calage et de validation du modèle GR2M à la station de Kahin

Calage		Validation	
Période	Nash (%)	Période	Nash (%)
1980-1993	77,40	1994-2000	82,90
1994-2000	86,50	1980-1993	61,90
Moyenne	81,95	Moyenne	72,40

L'observation des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe du tableau 1 montrent que le GR2M a été performant sur le bassin versant du N'zo-Sassandra d'exutoire Kahin. En effet, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe obtenues sont supérieures à 60% en calage (81,95%) comme en validation (72,40%). La dégradation enregistrée par le critère de Nash en validation vis-à-vis du calage, et qui définit le critère de robustesse du modèle est acceptable. Elle est en moyenne de -9,55% dont la valeur absolue est inférieure à 10%, ce qui traduit la robustesse du modèle GR2M version Mouelhi sur le bassin versant du N'zo-Sassandra.

Les hydrogrammes obtenus sont également de bonne qualité dans l'ensemble. La dynamique des écoulements étant bien respectée (Fig. 4). En général, les débits de pointe sont bien situés dans le temps mais sous-estimés en phase de validation. Les étiages sont mieux reproduits que les pointes de crues.

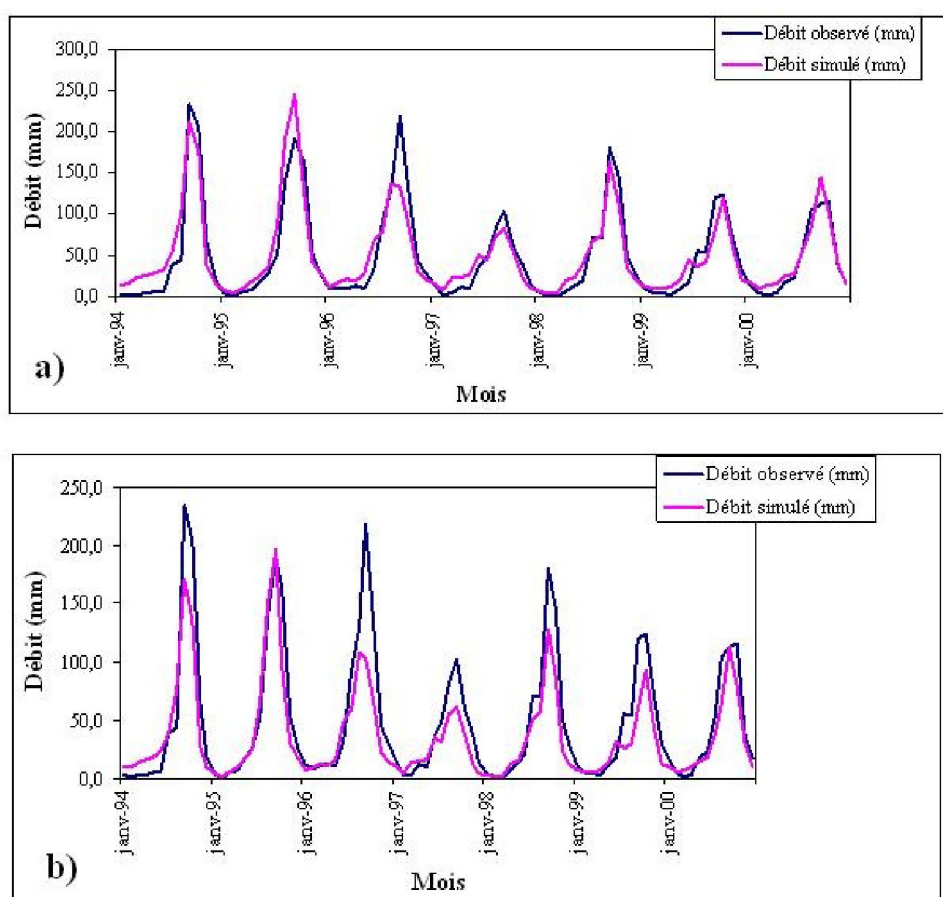


Fig. 4. Hydrogrammes observés et simulés par GR2M en phase de calage (a) et en validation (b) sur le N'zo-Sassandra à Kahin

Le modèle GR2M a montré sa capacité à simuler les écoulements au niveau du bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin. Le modèle GR2M version Mouelhi est donc performant et robuste sur la zone d'étude. De ce fait, il a été utilisé pour l'étude de la tendance dans la relation pluie-débit dans le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin.

4.2 CARACTERISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT

La matrice de simulation issue des opérations de simulations croisées est présentée dans le tableau 2 avec en gras, la valeur de référence pour une ligne considérée. Les valeurs du tableau 2 représentent les lames d'eau moyennes annuelles écoulées simulées à partir du modèle GR2M sur les sous-périodes de 5 ans.

Tableau 2. Matrice de simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm) (1980-2000).

	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999
1980-1984	20,77	31,82	30,27	39,29
1985-1989	16,94	26,54	25,24	33,14
1990-1994	21,22	32,34	30,36	39,46
1995-1999	26,85	39,97	38,23	48,86

Pour une analyse plus simple de cette matrice, chaque ligne de celle-ci a été normée par rapport à la valeur située sur la diagonale (qui représente la valeur proche de celle réellement observée). En exprimant le résultat en pourcentage, des valeurs «100 » sont obtenues sur la diagonale. Le tableau 3 montre la matrice de tendances normées issue de la matrice du tableau 2.

Tableau 3. Matrice de simulations normées (1980-2000).

	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999
1980-1984	100	151	146	188
1985-1989	64	100	95	125
1990-1994	70	107	100	130
1995-1999	55	82	78	100

La matrice de tendances normées a été transformée en matrice de signes. Les résultats de cette transformation sont consignés dans le tableau 4. Puisqu'il faut se placer dans le sens de l'évolution progressive dans le temps du débit moyen annuel, la moitié supérieure du tableau a été considérée. Les gains et pertes y sont matérialisés respectivement par des signes « + » et des signes « - ».

Tableau 4. Matrice des signes (1980-2000).

1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999
0	+	+	+
	0	-	+
		0	+
			0

Une analyse visuelle de la matrice des signes (Tableau 4) met en évidence un total de cinq (5) signes « + », contre un seul signe « - ».

4.3 DISCUSSION

Le modèle GR2M version Mouelhi, avec deux paramètres de calage (X_1 et X_2), a été utilisé pour la modélisation des débits mensuels dans le bassin versant du N'zo-Sassandra. Les performances obtenues en calage comme en validation sont en général supérieures à 60%. Aussi, les valeurs du critère de robustesse sont-elles généralement inférieures à 10% en valeur absolue. Ces résultats témoignent de la performance et de la robustesse du modèle GR2M version Mouelhi sur le bassin

versant du N'zo-Sassandra à Kahin. Cette performance et cette robustesse ont été également démontrées par ce modèle dans le bassin versant du N'zi-Bandama [28]. D'autres auteurs ont utilisé d'autres versions de ce modèle pour des études en Afrique de l'Ouest [20, 21, 23, 27]. Au niveau de la Côte d'Ivoire, Ardoin (2004) a appliqué le modèle GR2M au bassin versant du Sassandra. Les résultats obtenus montrent que pour le calage, les performances fluctuent entre 62% et 90,2% avec une moyenne de 83,4%. En validation, les performances varient entre 21,1% et 83,4% avec une moyenne de 55,5%. Les performances sont plus satisfaisantes en calage sur le bassin versant du Sassandra que sur le bassin versant du N'zi-Bandama. Par contre, elles sont plus satisfaisantes sur le N'zi-Bandama que le Sassandra en validation. Les résultats de [32] sur l'ensemble des sept (7) bassins tests répartis entre le Burkina Faso, le Mali et la Côte d'Ivoire, ont permis de se rendre compte d'une manière générale que les calages du modèle GR2M sont de bonne qualité. La moyenne du critère de Nash-Sutcliffe est égale à 76% avec la plupart des valeurs supérieures à 60%. En phase de validation, une dégradation du critère de Nash-Sutcliffe a été observée. La moyenne du critère n'est plus que de 48% avec l'apparition de valeurs négatives du critère de Nash-Sutcliffe. Des performances de 73%, 78% et 79% respectivement à Dimbokro, Fétékro et M'bahiakro en phase de calage par l'application du modèle GR2M version Mouelhi sur le bassin versant du N'zi-Bandama ont été obtenues par [28]. En validation, les performances sont respectivement de 73%, 76% et 79%. Ce qui donne des valeurs de critère de robustesse de 0%, -2% et -1% respectivement à Dimbokro, Fétékro et M'bahiakro. Les résultats de performance obtenus sur les différents bassins tests s'inscrivent dans l'ordre des performances obtenues en général sur les bassins versants ouest africains avec la même version du modèle GR2M et d'autres versions. Ces résultats sont confirmés par [33], qui affirment que la version Mouelhi du modèle GR2M, qui est celle utilisée au cours de cette étude, paraît la plus performante. Les valeurs du critère de robustesse traduisant les écarts de variation entre les performances moyennes du calage à la validation sont comprises entre 0 et 10% en valeur absolue. Ces résultats démontrent la robustesse du modèle GR2M. Cette robustesse du modèle mise en évidence au cours de cette étude est conforme aux résultats obtenus par d'autres auteurs tels que [27, 28, 32].

Au regard de sa qualité (performance et robustesse), le modèle GR2M a été utilisé pour l'étude de la tendance dans la relation pluie-débit. Les résultats de la méthode des simulations croisées montre qu'il y a une grande majorité des signes (+) par rapport aux signes (-). Ces résultats suggèrent une tendance à produire des débits mensuels de plus en plus forts au cours de la période 1980-2000. Il ressort que l'hypothèse de stationnarité de l'écoulement mensuel dans le bassin versant du N'zo-Sassandra peut être rejetée. Les résultats obtenus au cours de cette étude, ont mis donc en évidence une non stationnarité dans la réponse hydrologique du bassin versant du N'zo-Sassandra. Ces résultats montrent que des changements importants ont pu affecter le bassin du N'zo-Sassandra à Kahin de façon générale qui seraient non seulement contenus dans les données hydrométriques, pluviométriques et évaporatoires, mais aussi dans les caractéristiques physiographiques du bassin [14]. Des variations saisonnières, annuelles et interannuelles des précipitations ont été révélées sur l'ensemble du bassin [9, 11]. Ces fluctuations climatiques influencent l'état d'humidité du sol, la couverture végétale, et d'autres facteurs physiographiques capables de modifier l'hydrologie du bassin. La modification de l'occupation du sol dans le bassin versant du N'zi-Bandama, mise en évidence par [13] est une conséquence de la forte anthropisation du bassin. Ces paramètres climatiques et physiques sont des facteurs de l'évolution de la relation pluie-débit [2, 4, 14, 15, 16, 28]. Plusieurs auteurs ont mis en évidence des non stationnarités dans la tendance de la relation pluie-débit à partir de modèles globaux aux pas de temps mensuel et annuel, sur le bassin versant du N'zi-Bandama suggérant une baisse des écoulements mensuels et annuels [14, 15, 16, 28]. Ces résultats sont contraires à ceux obtenus sur le bassin versant du N'zo-Sassandra au niveau de la tendance. Cette différence dans la tendance pourrait s'expliquer par les caractéristiques physiographiques, particulièrement le relief qui est très accidenté dans le bassin du N'zo-Sassandra et le couvert végétal (forêt dense) qui est en forte dégradation du fait des cultures pérennes (café, cacao) [13, 34]. Aux caractéristiques physiographiques, on peut ajouter les périodes d'études qui diffèrent. Ainsi, l'augmentation des précipitations enregistrées au cours de la période d'étude associée à la forte dégradation du couvert végétal et au relief élevé va se traduire par une hausse des écoulements.

5 CONCLUSION

Les résultats de simulation obtenus avec le modèle GR2M version Mouelhi sur le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin sont satisfaisants et ont montré que le modèle GR2M version Mouelhi est performant et robuste. Il a donc attesté de sa capacité à simuler les écoulements au niveau du bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin. En effet, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe obtenues, au cours de cette étude, sont en moyenne de 81,95% en phase de calage et 72,40% en phase de validation. La valeur du critère de robustesse (-9,55%) est acceptable. La méthode des simulations croisées a été jugée capable de détecter des changements dans les tendances de la relation pluie-débit du bassin versant du N'zo-Sassandra. S'appuyant sur le modèle conceptuel mensuel GR2M, les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence une non stationnarité de la relation pluie-débit au niveau du bassin versant du N'zo-Sassandra au cours de la période 1980-2000 qui suggère une tendance à la hausse des écoulements mensuels. Nous pensons que la méthode des simulations croisées

couplée à un modèle mensuel peut être utilisée pour mettre en évidence des tendances dans la relation pluie-débit en Afrique de l'Ouest de façon générale et en Côte d'Ivoire en particulier. Dans une perspective de variabilité climatique et de pression anthropique plus accrue, la zone ouest étant aujourd'hui le pôle de l'attraction agricole, on est en droit de redouter une modification plus intense des réponses hydrologiques dans le bassin versant du N'zo-Sassandra. Aussi, ces tendances ne pourraient-elles pas être traitées par d'autres approches telles que l'usage du coefficient d'écoulement qui est basé uniquement sur des observations?

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient la société nationale de météorologie (SODEXAM) et la Direction de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) pour la mise à disposition des données nécessaires à la réalisation de ce travail. Ils remercient également les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article.

REFERENCES

- [1] N. Varado, "Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 320 p., 2004.
- [2] V. Andreassian, "Impact de l'évolution du couvert végétal forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants," Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, 262 p., 2002.
- [3] V. Andreassian, E. Parent et C. Michel, "A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior," *Water resources research*, vol. 39, no. 9, pp. 1-11, 2003.
- [4] V. Andreassian, "Waters and forests: from controversy to scientific debate," *Journal of Hydrology*, Vol. 291, pp.1-27, 2004.
- [5] B.S. Ardoïn, A. Dezetter, E. Servat, G. Mahe, J.E. Paturel, C. Dieulin, et J.F. Boyer, "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," *Journal de l'Eau et de l'Environnement*, vol. 3, pp. 5-13, 2003.
- [6] G. Mahé, J.E. Paturel, E. Servat, D. Conway, A. Dezetter, "The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina Faso," *Journal of Hydrology*, vol. 300, pp.33-43, 2005.
- [7] A. Dezetter, S. Girard, J.E. Paturel, G. MAHÉ, B.S. Ardoïn et E. Servat, "Simulation of runoff in West Africa : is there a single data-model combination that produces the best simulation results ?," *Journal of Hydrology*, vol. 354, no. 1-4, pp. 203-212, 2008.
- [8] T. Lasm, "Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen)," Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, France, 274 p, 2000.
- [9] I. Savane, K.M. Coulibaly et P. Gioan, "Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man », *Sécheresse*, vol. 4, no. 12, pp. 231-237, 2001.
- [10] M.B. Saley, "Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)," Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, 211p., 2003.
- [11] B.T.A. Goula, I. Savané, B. Konan, V. Fadika et G.B. Kouadio, "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. 1, pp. 1-12, 2006.
- [12] K.F. Kouamé, "Gestion intégrée des ressources en eau en Afrique tropicale humide. Cas du bassin versant du N'zo à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des systèmes d'informations géographiques et de la modélisation hydrologique," Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 250 p., 2011.
- [13] Y.T. Brou, "Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire," Mémoire pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologie de Lille, 226 p., 2005.
- [14] A.M. Kouassi, K.F. Kouamé, M.B. Saley et Y.B. Koffi, "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," *European Journal of Scientific Research*, vol. 16, no. 3, pp. 412-427, 2007.
- [15] A.M., Kouassi, K.F. Kouamé, B.T.A. Goula, T. Lasm, J.E. Paturel et J. Biémi, "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," *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, vol. 11, pp. 207-229, 2008.
- [16] A.M. Kouassi, B.T.M. N'guessan, K.F. Kouamé, K.A. Kouamé, J.C. Okaingni et J. Biemi, "Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M: cas du bassin

- versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire)," *Comptes Rendus Académie des Sciences Géoscience*, vol. 344, no. 5, pp.288-296, 2012.
- [17] A.M. Kouassi, "Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire," Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, 210 p., 2007.
- [18] E. SERVAT, B. Kouamé, A. Dezetter et J.E. Paturel, "Modélisation pluie-débit et régionalisation: le programme ERREAU en Côte d'Ivoire," Edition CEMAGREF, FRIEND, troisième rapport 1994-1997, 431 p., 1997.
- [19] B.S. Ardoïn, A. Dezetter, E. Servat et C. Bocquillon, "Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain," Publication IAHS, vol. 274, pp. 197-203, 2002.
- [20] J.E. Paturel, M. Ouedraogo, G. Mahé, E. Servat et E. Dezetter, "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, vol. 280, pp. 117-123, 2003a.
- [21] J.E. Paturel, M. Ouedraogo, G. Mahé, E. Servat et E. Dezetter, "The influence of distributed input data on the hydrological modelling of monthly river flow regimes in West Africa," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, no. 6, pp. 881-890, 2003b.
- [22] G. Mahé, J.E. Paturel, E. Servat, D. Conway, et E. Dezetter, "The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina Faso," *Journal of Hydrology*, vol. 300, pp. 33-43., 2005.
- [23] M. Ouedraogo, E. Servat, J.E. Paturel, H. Lubès-Niel et J.M. Masson, "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, vol. 252, pp. 315-321, 1998.
- [24] C. Mouelhi, "Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier," Thèse de Doctorat de l'Ecole nationale du génie rural des eaux et forêts de Paris, France, 274 p., 2003.
- [25] S. Mouelhi, C. Michel, C. Perrin et V. Andréassian, "Stepwise development of a two parameter monthly water balance model," *Journal de l'Hydrologie*, vol. 318, pp. 200-214, 2006.
- [26] O. Nascimento, "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 de Doctorat de l'Ecole Nationale de Ponts et Chaussées, France, 390 p., 1995.
- [27] B.S. Ardoïn, "Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne," Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 330 p., 2004.
- [28] A.M. Kouassi, K.F. Kouamé, Y.B. Koffi, K.A. Kouamé, S. Oularé et J. Biemi, "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)," *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique*, vol. 11, pp. 1409-1425, 2011.
- [29] C. Perrin, "Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 287 p., 2000.
- [30] C. Perrin, C. Michel et V. Andréassian, "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation," *Journal of Hydrology*, vol. 279, pp. 275-289, 2003.
- [31] J.E. Nash et J.V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles," *Journal of Hydrology*, vol. 27, no. 3, pp. 282-290, 1970.
- [32] M. Ouedraogo, "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 de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 257 p., 2001.
- [33] C. Perrin, C. Michel et V. Andréassian, "Modèles hydrologiques du génie rural (GR)," Rapport, Edition CEMAGREF, 100 p., 2007.
- [34] S. Bigot, Y.T. Brou, J. Oszwaid et A. Diedhou, "Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales," *Sécheresse*, vol. 16, no. 1, pp. 5-13, 2005.