

INFLUENCE DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET DE LA MODIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LA RELATION PLUIE-DEBIT A PARTIR D'UNE MODELISATION GLOBALE DU BASSIN VERSANT DU N'ZI (BANDAMA) EN COTE D'IVOIRE.

Amani Michel KOUASSI^{1*}, Koffi Fernand KOUAMÉ², Bi Tié Albert GOULA³, Théophile LASM², Jean Emmanuel PATUREL⁴ et Jean BIËMI²

¹ *Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Institut National Polytechnique Houphouët Boigny (INP HB), BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Tél. (225) 07 492 712.*

² *Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire).*

³ *Laboratoire Géosciences et Environnement, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement (SGE), Université d'Abobo-Adjamé, 02 B.P. 802 Abidjan 02 (Côte d'Ivoire).*

⁴ *HydroSciences Montpellier (HSM) – UM2, IRD, Case MSE – Place Eugène Batillon – 34095, Montpellier cedex 5 (France).*

(Reçu le 10 Septembre 2006, accepté le 05 Janvier 2008)

* Correspondance et tirés à part, e-mail : *michel.a_kouassi@yahoo.fr*.

RÉSUMÉ

Cette étude se propose de rechercher l'influence de la variabilité climatique et de la dynamique de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit et ses impacts sur la disponibilité des ressources en eau dans le bassin versant du N'zi (Bandama). A partir des données pluviométriques (1923-2004) et hydrométriques (1951-2000) constituées, un test statistique (test de Pettitt) a permis d'identifier les ruptures et évaluer les déficits hydroclimatiques. Les résultats obtenus montrent que des conditions prolongées de déficits pluviométriques (16%) et hydrométriques (52%) constituent une réalité dans le bassin versant du N'zi (Bandama, Côte d'Ivoire) depuis la fin des années 1960. La caractérisation de la relation pluie-débit a été menée au moyen d'un modèle conceptuel global au pas de temps annuel (modèle de Mouelhi). L'approche du multiple calage basée sur ce modèle, a permis de mettre en évidence une modification de la relation pluie-débit.

Mots-clés : *Test statistique ; non stationnarité ; modélisation hydrologique ; variabilité hydroclimatique ; ressources en eau ; N'zi ; Côte d'Ivoire.*

ABSTRACT

Influence of climate variability and vegetation cover modification in rainfall-runoff relationship through a global modelling on the N'zi watershed (Bandama) in Côte d'Ivoire.

This study proposes to investigate the influence of climate variability and vegetation cover dynamic on the rainfall-runoff relationship and its impact on the availability of water resources on the N'zi watershed (Bandama). Based on rainfall data (1923-2004) and runoff data (1951-2000) established a statistical test (test of Pettitt) has identified breaks and evaluate recession. The results shown that conditions of prolonged rainfall recession (16%) and runoff recession (52%) are a reality in the N'zi watershed (Bandama, Côte d'Ivoire) since the end of 1960. The characterization of the relationship rainfall-runoff was conducted through a conceptual model at an annual temporal scale (Mouelhi's model). The approach based on the Mouelhi's model (procedure of timing shifts) has revealed a change in the relationship rainfall-runoff.

Keywords : *Statistical test ; non-stationary ; hydrological modelling ; variability hydroclimatic; water resources; N'zi ; Côte d'Ivoire*

I - INTRODUCTION

La réalité d'un changement climatique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), et notamment du CO₂, fait désormais l'objet d'un consensus bien affirmé [1]. En raison de ses répercussions sur le milieu naturel et le développement socio-économique, les questions de variabilité climatique et leurs implications sur les ressources en eau sont placées depuis quelques temps au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde. Ainsi, de nombreuses études sur la variabilité climatique à l'échelle de l'Afrique [2-3] et de la Côte d'Ivoire [4-5], montrent qu'une tendance à la sécheresse s'est manifestée à partir de la fin de la décennie 1960. Le déficit pluviométrique observé sur plusieurs années consécutives s'est répercuté sur les écoulements des principaux fleuves et, leurs affluents en provoquant une baisse considérable de leurs caractéristiques hydrologiques (débits moyens annuels, débits moyens journaliers maximums, débits d'étiage). Les déficits d'écoulement semblent être amplifiés [6-7]. Les travaux de [8] sur des bassins versants en Afrique de l'Ouest et centrale ont montré que cette sécheresse semble avoir affecté la relation pluie-débit. Aussi, l'une des plus fortes perturbations des hydrosystèmes est due à l'activité humaine et concerne essentiellement la

modification du paysage phytogéographique [4-5 ; 9]. En Côte d'Ivoire le patrimoine forestier a été soumis à une déforestation systématique de grande échelle pour la création des plantations de café, cacao, palmiers à huile, hévéa, ananas, etc., qui ont fait du pays une grande région agricole [4]. Ainsi, le bassin versant du N'zi a subi une modification de son occupation du sol [10]. La dégradation de la couverture végétale influe sur les régimes climatiques et hydrologiques. La variabilité du climat et les modifications de l'occupation du sol soulèvent des questions de développement, notamment en ce qui concerne la disponibilité des ressources en eau [10], la sécurité alimentaire [4], la santé [11] et la dégradation des terres et des écosystèmes [9].

Cette étude se propose de rechercher l'influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit et ses impacts sur la disponibilité des ressources en eau à partir d'une modélisation conceptuelle globale des écoulements dans le bassin versant du N'zi (Bandama).

Ce travail est basé sur deux principales hypothèses. La première suppose une variabilité hydroclimatique générale d'où la nécessité de vérifier le comportement spécifique du bassin d'étude. La deuxième hypothèse dit que la stabilité des valeurs des performances du modèle traduit une stabilité hydrologique. En effet, la modification des conditions physiques influence le comportement hydrologique. Ainsi, le comportement hydrologique n'étant pas un phénomène directement observable, sa description et son analyse nécessitent la modélisation. Le but est d'argumenter et de tester le bien-fondé de ces deux postulats.

L'application d'un test de détection de rupture (test de Pettitt) a permis d'identifier des ruptures au sein des séries pluviométriques et hydrométriques. Le modèle de Mouelhi [12] a été utilisé pour analyser la relation pluie-débit au pas de temps annuel [13 ; 12]. La méthodologie appliquée est basée sur l'approche du multiple calage.

II - PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (*Figure 1*), sous-bassin du fleuve Bandama. Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6° et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km². Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkéssédougou à une altitude de 400 m et coule globalement dans une direction Nord-Sud. La courbe de hauteur d'eau du N'zi a une pente moyenne relativement constante de l'ordre 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.

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 partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 mm et 1600 mm. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat attiéen) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm (*Figure 1*).

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 [10]. Le relief du bassin est peu accidenté. Il est généralement constitué de plateaux (100 m à 400 m en moyenne). Cette monotonie est rompue par la chaîne Baoulé. Les principaux types de sol sont les sols ferrallitiques moyennement dessaturés (Nord) et les sols ferrallitiques fortement dessaturés (Centre et Sud) [10]. En effet, ces éléments (végétation, relief, types de sol, etc.) constituent les conditions physiques de l'écoulement.

III - DONNÉES ET MÉTHODES

III-1. Données

Les données pluviométriques proviennent de 12 postes pluviométriques (*Figure 2a*). Elles ont été mises à notre disposition par la société de météorologie nationale (SODEXAM : Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique). La constitution d'un vecteur régional a permis de reconstituer les données manquantes au sein des différentes séries pluviométriques annuelles (Dabakala, Bouaké, Dimbokro et Tiassalé). Les séries chronologiques harmonisées s'étendent sur la période 1923-2004.

Les pluies moyennes annuelles (1951-2004) dans le bassin versant du N'zi (Bandama) varient entre 1046 mm (Dabakala) et 1233 mm (Tiassalé) avec une moyenne générale de 1110 mm (*Tableau 1*). Les coefficients de variation (Cv) (rapport de l'écart-type de la série annuelle par sa moyenne) de ces pluies moyennes annuelles fluctuent entre 0,16 et 0,24. Cela signifie que la dispersion des données des séries pluviométriques considérées est assez faible. Ces valeurs montrent que les données pluviométriques retenues pour l'étude sont assez homogènes et représentatives de la zone d'étude.

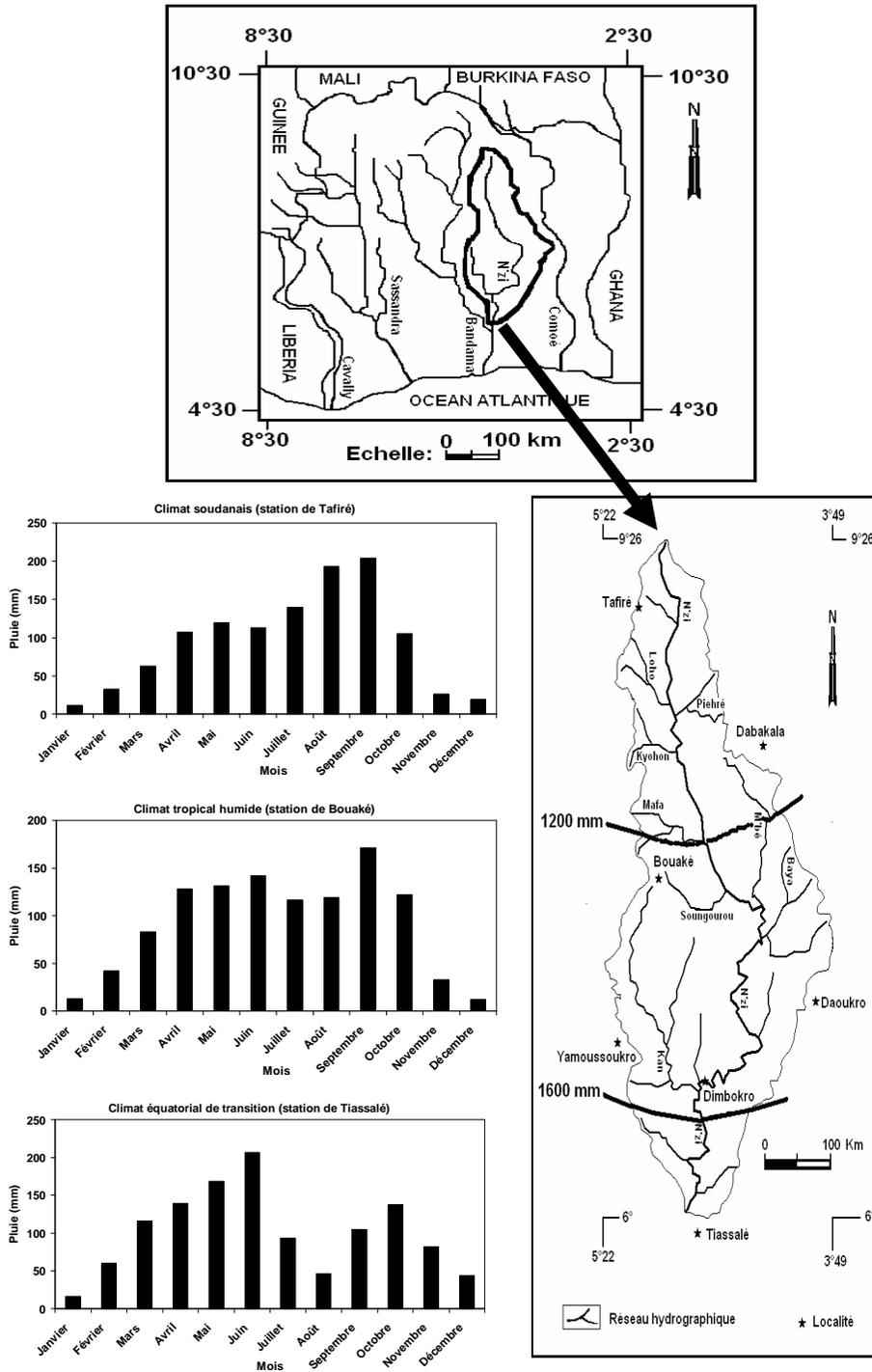


Figure 1 : Présentation du bassin versant du N'zi (Bandama)

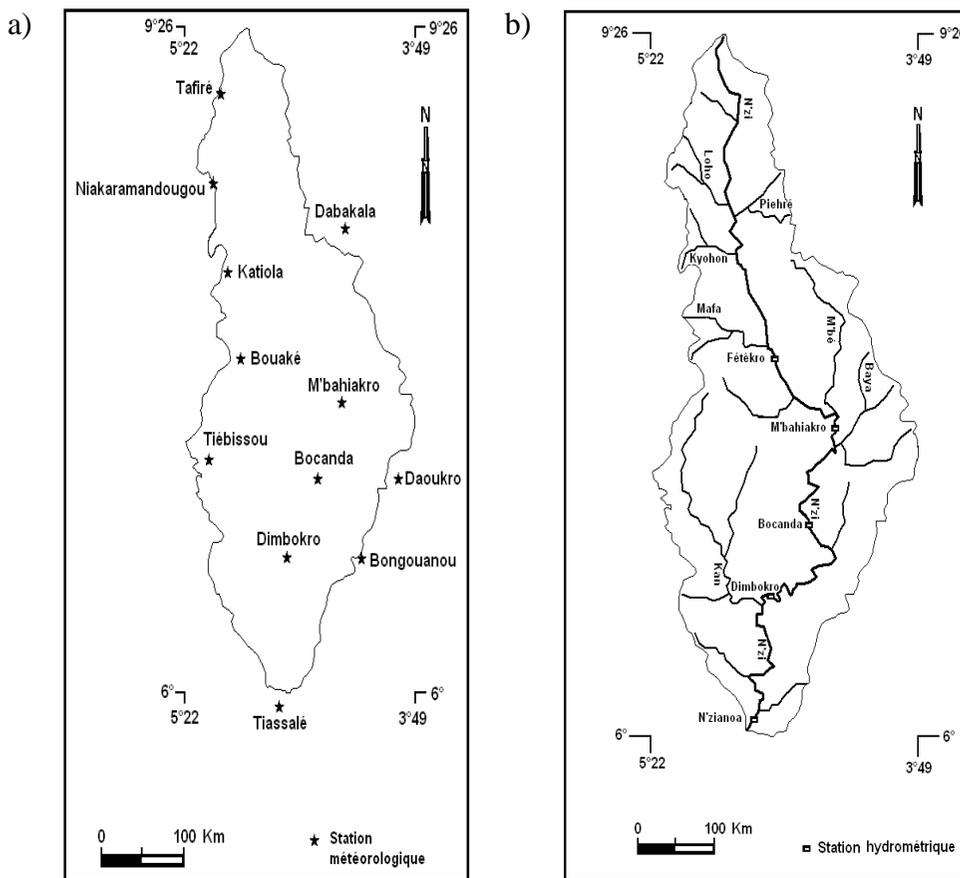


Figure 2 : Stations pluviométriques (a) et hydrométriques (b)

Les données hydrométriques ont été fournies par la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH), Sous-Direction de l'Hydrologie. Des régressions linéaires entre les débits des stations voisines ont permis de combler les valeurs manquantes et d'homogénéiser la durée d'étude sur la période 1951 à 2000. Les stations retenues sont celles de N'zianoa, Dimbokro, Bocanda, M'bahiakro et de Fêtékro, toutes situées sur le N'zi (**Figure 2b**). Les stations hydrométriques sélectionnées sont représentatives pour traduire de manière significative, le caractère climatique et physiographique du bassin du N'zi (Bandama).

Tableau 1 : *Caractéristiques statistiques des données climatologiques du N'zi (1951-2004)*

Stations	Latitude (°C)	Longitude (°C)	Moyenne	Ecart-type	Cv
Tafiré	9°04	5°09	1100	248	0,23
Niakaramandougou	8°40	5°17	1121	222	0,20
Katiola	8°08	5°06	1098	267	0,24
Dabakala	8°23	4°26	1046	272	0,26
Bouaké	7°44	5°04	1102	202	0,18
M'bahiakro	4°27	4°20	1070	240	0,22
Bocanda	7°04	4°31	1061	192	0,18
Tiébissou	7°09	5°13	1056	177	0,17
Daoukro	7°03	3°57	1094	180	0,16
Bongouanou	6°39	4°12	1201	251	0,21
Dimbokro	6°39	4°42	1134	197	0,17
Tiassalé	5°53	4°50	1233	255	0,21

Le **Tableau 2** présente quelques caractéristiques hydrologiques des bassins tests sur la période 1951-2000. La taille des bassins varie de 10 000 km² à 35 000 km². La lame d'eau moyenne décroît de l'amont (89,4 mm) vers l'aval (58,1 mm), de façon inversement proportionnelle à l'étendue des bassins versants. En effet, ces bassins représentent des conditions climatiques assez différentes.

La taille des bassins varie de 10 000 à 35 000 km². La lame d'eau moyenne décroît de l'amont (89,4 mm) vers l'aval (58,1 mm), de façon inversement proportionnelle à l'étendue des bassins versants.

Tableau 2 : *Lames d'eau moyennes écoulées aux stations hydrométriques du bassin versant du N'zi (1951-2000)*

Stations	Aires (km ²)	Lames moyennes (mm)
N'zianoa	35 000	58,1
Dimbokro	24 100	60,3
Bocanda	20 500	70,9
M'bahiakro	15 700	86,2
Fétékro	10 000	89,4

L'ETP est une donnée essentielle du modèle utilisé (modèle de Mouelhi). Il exprime les flux évaporatoires du bassin et est utilisée dans la fonction de production du modèle. Les valeurs d'ETP ont été estimées à l'aide de la méthode de Thornthwaite. Ces valeurs ont été calculées au pas de temps mensuel selon les exigences de la méthode de Thornthwaite puis cumulées au pas de temps annuel. Elles s'étendent sur la période 1961-2000. La période 1961-2000 a été choisie pour un synchronisme des données (pluie, ETP et débits). En effet, les données de température disponibles qui ont servi à l'évaluation des ETP s'étendent sur la période 1961-2000.

Ces différentes données (pluies, débits et ETP) ont servi à l'étude de la variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques ainsi que leur impact sur la relation pluie-débit dans le bassin versant du N'zi (Bandama).

III-2. Méthodes d'études de la variabilité hydro climatique

III-2-1. Test de Pettitt

Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées [14]. Le test de Pettitt (1979) cité par [14] a été retenu pour sa puissance et sa robustesse [15]. Ce test a été utilisé dans plusieurs études de changements hydroclimatiques notamment en Afrique de l'Ouest [14-16]. Il consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous séries à chaque instant t compris entre 1 et $N-1$. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous-séries ont des distributions différentes.

La variable de Pettitt ($U_{t,N}$) est définie par l'équation (1) :

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

- $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$;

- $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$;

- $\text{sgn}(X) = 0$ si $X = 0$;

- $\text{sgn}(X) = -1$ si $X < 0$.

La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k est définie et permet d'apprécier l'importance de la rupture (équation 2) :

$$\text{Pr ob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6k^2 / (N^3 + N^2)) \quad (2)$$

L'absence de rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

III-2-2. Estimation du déficit hydroclimatique

Le déficit hydroclimatique par rapport aux ruptures identifiées par le test de Pettitt a été évalué à partir de l'équation (3) [1]:

$$D = \frac{x_j}{x_i} - 1 \quad (3)$$

avec :

- D : Déficit hydroclimatique ;
- x_j : Moyenne de la série après rupture ;
- x_i : Moyenne de la série avant rupture ;

Dans le cas où aucune rupture n'est détectée par le test, le déficit est calculé en prenant l'année 1970 comme année de rupture [1]. En effet, l'année 1970 constitue l'année de référence de la plupart des ruptures identifiées en Afrique de l'Ouest.

III-3. Modélisation hydrologique et relation pluie-débit

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 du N'zi (Bandama) avec sa grande taille (35 500 km²) connaît un amortissement des paramètres intégrés comme les débits. En effet, dans la pratique, notamment pour les transferts d'eau, le niveau d'organisation de l'espace privilégié est celui du bassin versant, unité d'intégration des transferts hydriques locaux [17]. Le pas de temps annuel a été choisi pour cette étude. En effet, pour les évolutions d'origines anthropiques ou liées à des variations climatiques, le pas de temps annuel est adapté à de telles études [18-19].

III-3-1. Présentation du modèle de Mouelhi

Notre choix s'est porté sur le modèle de Mouelhi [12]. Il s'agit d'un modèle global au pas annuel. Ce type de modèle a l'avantage d'être peu consommateur de données (pluie, évapotranspiration et débit) pour le calage et les simulations. La plupart des données enregistrées par les réseaux climatologiques permettent de disposer de ces jeux de paramètres. Il permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données de pluie et d'ETP. Toutes ces données sont exprimées en lame d'eau (mm). Il s'agit d'un modèle de forme mathématique simple qui se présente comme une fonction (Q) de deux variables: pluie (P) et ETP (E). Il permet de

représenter les deux limites physiques dans le plan adimensionnel de ces variables. La première limite suppose qu'au maximum, le débit est égal à la totalité de la pluie tombée ($Q = P$). La deuxième suppose qu'au maximum, on ne pourra retrancher plus que la totalité de l'évapotranspiration potentielle de la pluie pour avoir le débit écoulé ($Q = P - E$). Partant de ces hypothèses, la formulation mathématique du modèle de Mouelhi est présentée comme suit (équation 4):

$$y = \frac{1}{1 + \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2}} \quad (4)$$

En remplaçant de part et d'autre (x) par (P/E) et (y) par (Q/P), le modèle s'écrit (équation 5):

$$Q = \frac{P}{1 + \frac{E}{P} + \left(\frac{E}{P}\right)^2} \quad (5)$$

L'affectation d'un paramètre « a » (coefficient correctif de l'évapotranspiration) a permis d'améliorer la performance du modèle de Mouelhi [12]. En effet, l'évapotranspiration est une variable non mesurée, mais plutôt estimée en utilisant des méthodes telles que celles de Penman, Turc, Thornthwaite, etc. Ne disposant pas d'information sur l'efficacité du choix de l'un ou l'autre modèle d'évaluation de cette variable, l'auteur a pensé que le paramètre « a » à affecter jouera un rôle correctif de l'évapotranspiration. En effet, un seul paramètre libre, semble suffisant pour le pas de temps annuel [12 ; 20-21]. Le paramètre « a » affecté prend des valeurs inférieures à l'unité, ce qui souligne son caractère correctif de l'évapotranspiration ou simplement le fait que l'ETR reste strictement inférieure à E même lorsque P tend vers l'infini. Ces limites supposent donc que le système {bassin versant} est fermé : avec la pluie comme entrée et le débit (Q) et l'évapotranspiration comme sorties. La nouvelle formulation généralisée du modèle de Mouelhi est présentée par l'équation (6):

$$Q = \frac{P}{\sum_{i=0}^{n=4} \left(\frac{aE}{P}\right)^i} \quad (6)$$

avec:

- Q : lame d'eau annuelle ruisselée (mm) ;
- P : lame d'eau précipitée annuelle (mm) ;
- E : lame d'eau évapotranspirée annuelle (mm) ;
- a : coefficient correctif de l'évapotranspiration potentielle.

Bien que ce modèle paraisse simple au point de vue formulation hydrologique du cycle de l'eau, sa performance est assez satisfaisante [12]. Ce modèle a été testé avec succès sur plus de 429 bassins dans le monde dont une dizaine en Côte d'Ivoire [12]. La performance et la robustesse du modèle de Mouelhi ont été testées dans le bassin versant du N'zi [10].

III-3-2. Critère mathématique d'optimisation du modèle (critère de Nash)

Le choix final de modèles 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 [12]. Le critère d'optimisation utilisé dans le cadre de notre étude est le rapport de la somme du carré des écarts entre les débits observés et ceux générés par le modèle à la somme du carré des écarts entre les débits observés et la moyenne des lames d'eau écoulées observées (critère de Nash) [12 ; 22]. Ce critère adimensionnel permet de juger la qualité de l'ajustement et faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements correspondent à des ordres de grandeur différents. Il est défini par l'équation (7):

$$Nash = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum (Q_o^i - Q_m)^2} \right] \quad (7)$$

avec :

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

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 est proche de 100. Un critère de moins de 60% ne donne pas une concordance satisfaisante entre les hydrogrammes observés et simulés par le modèle. En effet, les performances en terme de critère de Nash sont l'image de l'adéquation du modèle et du jeu de paramètres calés au bassin étudié [23].

III-3-3. Etude de la relation pluie-débit : approche du multiple calage

La caractérisation de la relation pluie-débit par l'approche du multiple calage a consisté en l'application de la procédure de calage à partir des données de

débits annuels par glissements successifs sur des périodes de 5 ans sur la période d'étude (1961-2000) suivie de l'analyse des performances obtenues. Le modèle est donc recalé sur chaque période de 5 ans. La méthodologie se présente comme suit [24]:

- 1- fractionnement de la période totale d'enregistrement en n sous-périodes ;
- 2- calage du modèle sur chacune des sous-périodes ;
- 3- évaluation des performances.

En effet, si l'on considère le modèle, une fois calibré, comme un bassin de contrôle c'est-à-dire un bassin au comportement stationnaire, la qualité des simulations (performances) de ce modèle déclinera au fur et à mesure de l'évolution du bassin. La tendance observée sur les performances permet donc de caractériser cette évolution.

IV- RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV-1. Variabilité des régimes hydroclimatiques

IV-1-1. Corrélation pluie-débit

Nous présentons sur le même graphique de la **Figure 3**, le nuage d'observations dans les deux plans (pluie-débit). Un ajustement du nuage de points a permis de montrer qu'il existe une forte corrélation d'une valeur de 0,84 (soit un coefficient de détermination de 0,713) entre le débit annuel et la pluie annuelle dans le bassin versant du N'zi (Bandama).

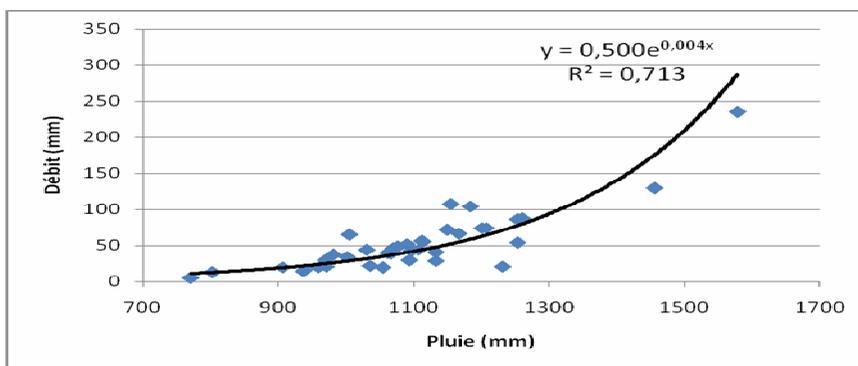


Figure 3 : Corrélation pluie-débit (1961-2000)

IV-1-2. Variabilité climatique

En se basant sur l'étude des séries, il est possible de situer la période actuelle de pluviométrie déficitaire dans une perspective historique afin de mieux percevoir ainsi l'importance réelle de cette évolution climatique récente.

Cette analyse est basée sur la période de 1923 à 2004. Sur l'ensemble de cette période et pour chacun des postes étudiés, les résultats de l'application du test de Pettitt et l'estimation des déficits pluviométriques sont consignés dans le **Tableau 3**.

Les ruptures identifiées ont des seuils de confiance variant d'une série à une autre et oscillant entre 95% et 99%. Deux ruptures très significatives (probabilité de dépassement < 1%) ont été détectées au niveau des stations de Dabakala et Dimbokro en 1968. Deux ruptures significatives (1% < probabilité de dépassement < 5%) sont détectées au niveau des séries de Bouaké (1968) et Tiassalé (1969). En effet, les probabilités de dépassement traduisent les marges d'erreur commises sur les résultats obtenus.

Tableau 3 : Années de rupture et déficits pluviométriques (1923-2004)

Stations	Test de Pettitt			Déficit pluviométrique (%)
	Rupture	Probabilité de dépassement	Seuil de confiance	
Bouaké	1972	$2,28.10^{-2}$	95%	24
Dabakala	1968	$1,17.10^{-4}$	99%	14
Dimbokro	1968	$9,13.10^{-3}$	99%	14
Tiassalé	1969	$2,35.10^{-2}$	95%	13

Les ruptures détectées correspondent à des baisses importantes des précipitations dans le bassin versant du N'zi (Bandama) entre 1968 et 1972. Ces résultats révèlent donc l'hétérogénéité des séries chronologiques constituées. Ils permettent ainsi de confirmer la baisse globale des précipitations autour des années 1970 (**Figure 4**) et partant mettent en évidence la variabilité climatique qu'a connue le bassin versant du N'zi (Bandama) ces 80 dernières années. Les déficits pluviométriques calculés sur la période 1923-2004 fluctuent entre 13% et 24% avec une moyenne de 16%.

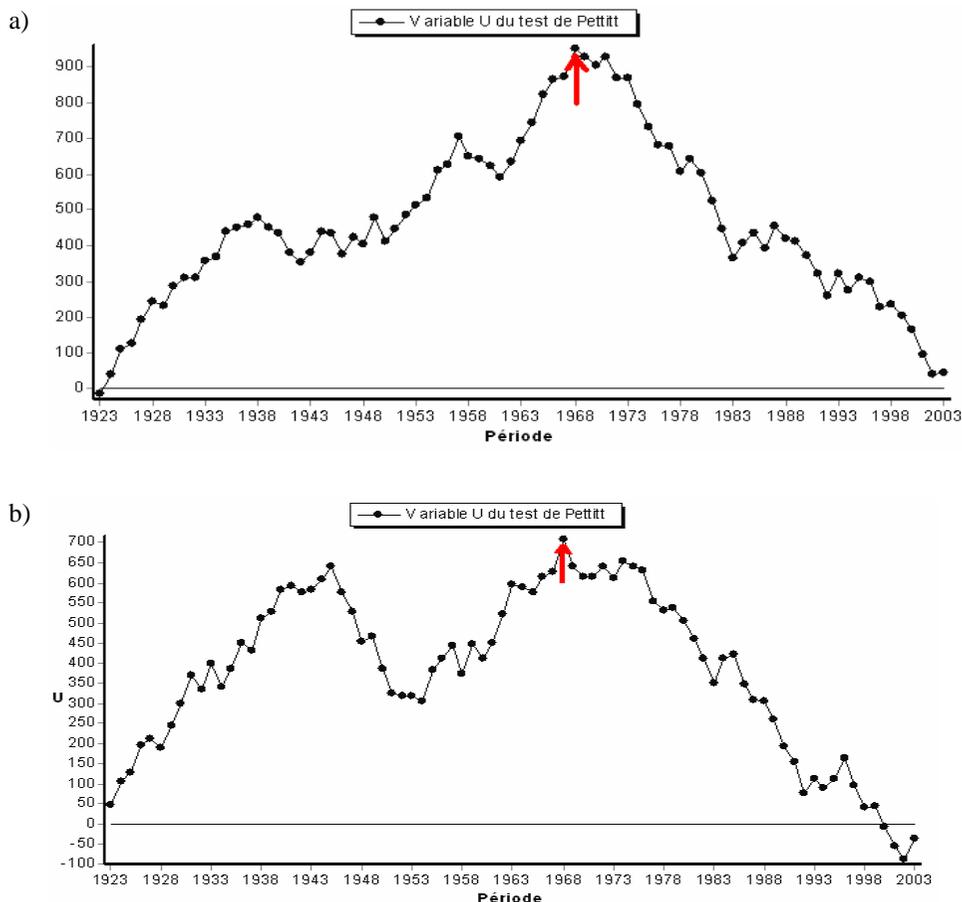


Figure 4 : Test de Pettitt appliqué aux séries pluviométriques annuelles (1923-2004) :
a- Dabakala (1968) ; b- Dimbokro (1968)

IV-1-2. Variabilité hydrologique

Les résultats de l'application du test de Pettitt et l'estimation des déficits pluviométriques sont consignés dans le Tableau 4. Les ruptures identifiées ont des seuils de confiance de 99% sauf à la station de Dimbokro où un seuil de 95% a été obtenu. Elles sont très significatives (probabilité de dépassement $< 10^{-2}$) à l'exception de celle de Dimbokro qui est significative ($1\% < \text{probabilité de dépassement} < 5\%$). Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des séries des débits annuels analysés, présente des ruptures quasi-synchrones (1968). Cependant, une rupture a été détectée en 1971 à Fétékro.

Tableau 4 : Résultats des tests de rupture appliqués aux données de débits annuels (1951-2000)

Stations	Test de Pettitt			Déficit d'écoulement (%)
	Rupture	Probabilité	Seuil de confiance	
N'zianoa (N'zi)	1968	$6,92.10^{-3}$	99%	51
Dimbokro (N'zi)	1968	$2,37.10^{-2}$	95%	51
Bocanda (N'zi)	1968	$8,14.10^{-3}$	99%	52
M'bahiakro (N'zi)	1968	$9,25.10^{-3}$	99%	55
Fétékro (N'zi)	1971	$6,92.10^{-3}$	99%	49

Les ruptures décelées correspondent à une baisse significative des débits moyens annuels à partir de la fin de la décennie 1970 (Figure 5). Les déficits d'écoulement calculés sur la période 1951-2000 fluctuent entre 49% (Fétékro) et 55% (M'bahiakro) avec une moyenne de 51,6%. Les déficits d'écoulement croissent de l'aval vers l'amont. Cette tendance est rompue par les résultats de la station de Fétékro (49%) qui se trouve en dessous de la moyenne générale (51,6%). L'observation de la figure 5b montre que le changement dans le comportement de la série hydrométrique de Fétékro a été amorcé en 1968 et s'est intensifié à partir de 1971, ce qui est donc en accord avec les résultats des autres stations. La différence de trois (3) années entre les différentes ruptures est acceptable. De ce fait, les ruptures peuvent être considérées comme globalement synchrones et décrivant le même phénomène sur le même espace géographique.

Cette importante variation hydroclimatique pose le problème de la tendance de la relation pluie-débit.

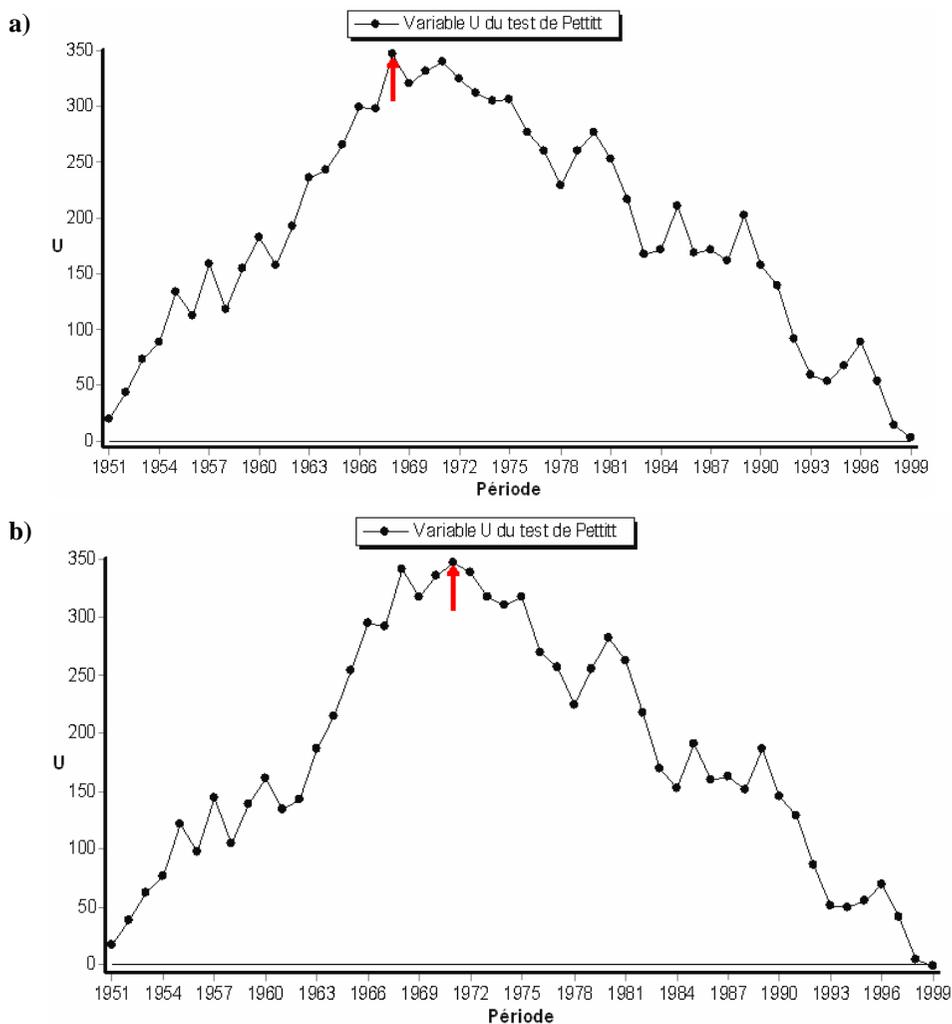


Figure 5 : Ruptures identifiées par le test de Pettitt au niveau du fleuve N'zi (1951-2000) :
a-station de N'zianoa (1968) ; b- station de Fêtékro (1971)

IV-2. Impact de la variabilité hydroclimatique sur la relation pluie-debit

IV-2-1. Analyse de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du paramètre « a »

Sur le bassin versant du N'zi, l'évapotranspiration potentielle (ETP) varie entre 1261 mm et 1667 mm (**Figure 6a**). La moyenne interannuelle est de 1419 mm avec un coefficient de variation de 0,07. Elle a une tendance

un fort rapprochement entre les débits observés et ceux simulés. Pendant ces périodes, le modèle de Mouelhi arrive à reproduire de façon satisfaisante le comportement hydrologique du bassin versant. Cependant, des phases de dégradation des performances sont observées au cours des périodes 1969-1974, 1983-1985 et 1989-1993 traduites par de faibles valeurs de Nash (<60%) ont été observées. Les différentes performances observées pendant ces différentes phases témoignent de la mauvaise simulation des écoulements par le modèle de Mouelhi. Ce résultat traduit un écart important entre les débits simulés et ceux observés. Le modèle a donc des difficultés à reproduire fidèlement le comportement hydrologique du bassin versant pendant ces périodes. Ces résultats amènent à penser que le calage d'un modèle ne peut être fonction que des seules caractéristiques climatiques (pluie, ETP) du bassin versant. Les caractéristiques physiques et géomorphologiques intrinsèques du bassin au cours des années ont assurément un rôle important et doivent être, nécessairement, prises en considération dans toute tentative d'explication des valeurs de performance prises par le modèle.

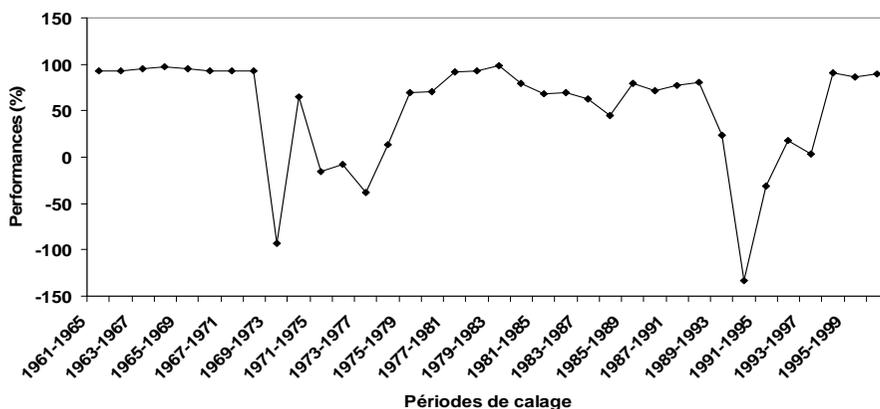


Figure 7 : Performances de simulation sur la période 1961-2000 quantifiées par le critère de Nash (modèle en « S ») au niveau du bassin du N'zi à N'zianoa

IV-3. Discussion

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 [1 ; 14-16] et en Côte d'Ivoire en particulier [4-5]. Les ruptures déterminées se situent en général entre 1968 et 1972 et s'intègrent dans l'intervalle défini par

les travaux de [4-5]. Ces ruptures coïncident avec les années de grandes sécheresses. Les déficits pluviométriques calculés en référence aux ruptures identifiées sont généralement inférieurs à 20%. Les déficits les plus élevés sont enregistrés dans le Nord du bassin qui correspond à la zone à climat soudanien. En dessous de cette zone, les déficits d

L'évolution de la relation pluie-débit se traduit d'une part, par une pseudo-stabilité des Nash, c'est-à-dire que les performances sont peu sensibles à l'évolution du bassin versant observé au cours de ces périodes. D'autre part, on assiste à une persistance de la dégradation du Nash. Ces périodes de dégradations identifiées (1969-1974, 1983-1985 et 1989-1993) correspondent aux grandes périodes sèches observées au niveau du bassin du N'zi depuis l'année 1970. Le caractère significatif et brutal des modifications de la relation pluie-débit est donc clairement mis en évidence. Les résultats obtenus montrent que les distributions des performances de simulations traduisent les changements observés dans la relation pluie-débit au niveau du bassin versant du N'zi (Bandama). Il ressort donc que l'hypothèse de stationnarité de l'écoulement annuel dans le bassin versant du N'zi peut être rejetée. Ces résultats mettent en évidence une modification de la relation pluie-débit au niveau du bassin versant du N'zi [27]. 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 [10]. 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 observé, conséquences de la diminution prolongée de la pluviométrie pourrait 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 [13 ; 28]. 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 [10]. Le bassin versant se caractérise par une forte diminution des surfaces boisées et une importante augmentation des terres destinées aux cultures et pâturages [10].

IV. CONCLUSION

Cette étude a permis de caractériser les principales manifestations de la variabilité climatique et hydrologique observée depuis plus de trois décennies au niveau de la région 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 et hydrométriques depuis les années 1970 ont été mises en évidence. Cette sécheresse s'est amplifiée pendant les années 1980. Si l'amplitude du phénomène, apparu aux alentours des années 1970, n'est pas uniforme, toutes les régions (Nord, Centre et Sud) ont cependant été touchées.

Les régimes hydrologiques ont également subi de profondes modifications. En effet, la baisse de la pluviométrie a eu pour effet, la diminution des débits des cours d'eau du bassin. Ainsi, depuis les années 1970, un effondrement des débits des cours d'eau est observé. Cette diminution est marquée par une rupture identifiée en 1968 sur l'ensemble des stations. Cette baisse avoisine en moyenne 52% et atteint par endroit 55%. L'incidence du déficit pluviométrique observé est manifeste sur la disponibilité des ressources en eau. La sécheresse météorologique se trouve ainsi amplifiée dans les écoulements.

Le modèle de Mouelhi (modèle conceptuel global au pas de temps annuel), a d'abord montré sa capacité à simuler les écoulements dans un contexte de variabilité climatique. Il a également permis de mettre en évidence une modification de la relation pluie-débit au niveau du bassin versant du N'zi au cours de ces dernières décennies (1970-2000). Vu l'incapacité du modèle de Mouelhi à prendre en compte la forte variabilité intra-saisonnière des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin versant du N'zi (Bandama), la caractérisation de la tendance pluie-débit sera approfondie par l'utilisation d'un modèle au pas de temps mensuel tel que GR2M.

RÉFÉRENCES

- [1] - B. S. ARDOIN, « 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 (2004) 330 p.
- [2] - M. BERGAOUI et A. ALOUINI, (2001) « Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie ». *Séch.*, 12 (4) (2001) 205-213.
- [3] - D. SIGHOMNOU, « Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau ». Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé 1, Cameroun (2004) 279 p.
- [4] - Y. T. BROU, « 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, (2005) 212 p.

- [5] - 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 ». *Séch.* 16 (1) (2005) 5-13.
- [6] - [6] I. SAVANE, K. M. COULIBALY et P. GIOAN, « Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man ». *Séch.* 4 (12) (2001) 231-237.
- [7] - B. T. A. GOULA, I. SAVANE, B. KONAN, V. FADIKA et G. B. KOUADIO « Etude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire ». *Sci. Nat.* 2 (2) (2005) 107-120.
- [8] - M. OUEDRAOGO, E. SERVAT, J. E. PATUREL, H. LUBES-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 Pub.* 252 (1998) 315-321.
- [9] - A. KANGAH, « Utilisation de la télédétection et d'un système d'information géographique (SIG) pour l'étude des pressions anthropiques sur les paysages géomorphologiques des savanes sub-soudanaises : exemple du degré carré de Katiola (centre-Nord ivoirien) ». Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire (2006) 186 p.
- [10] - A. M. KOUASSI, « Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire ». Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 210 p.
- [11] - T. C. NCHINDA, "Emerging Infectious Diseases". In *Malaria: A reemerging Disease in Africa*. juillet-septembre 1998". OMS. Genève (1998).
- [12] - C. MOUELHI, « Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier ». Thèse de Doctorat, Ecole nationale du génie rural des eaux et forêts de Paris, France (2003) 274 p.
- [13] - V. ANDREASSIAN, « Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants ». Thèse de Doctorat, Université de Paris 6, France (2002) 262 p.
- [14] - E. SERVAT, J. E. PATUREL, B. KOUAME, M. TRAVAGLIO, M. OUEDRAOGO, J. F. BOYER, H. LUBES-NIEL, M. FRITSCH, J. M. MASSON, et B. MARIEU, « Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale ». *IAHS Pub.* 252 (1998) 323-337.
- [15] - H. LUBES-NIEL, J. M. MASSON, J. E. PATUREL et E. SERVAT, « Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques ». *Sci. Eau* 3 (1998) 383-408.
- [16] - J. E. PATUREL, E. SERVAT et M. O. DELATTRE, « Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique ». *J. Sci. Hydrol.* 43 (3) (1998) 937-945.

- [17] - C. GASCUEL-ODOUX, L. M. MOY, P. ROBIN et C. WALTER, « Quelle échelle est pertinente pour définir des paramètres de fonctionnement d'un modèle hydrologique en milieu agricole intensif ? » Rapport de contrat (1994) 40 p.
- [18] - P. JAVELLE, « Caractérisation du régime des crues: le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France (2001) 238p.
- [19] - L. ZHANG, W. R. DAWES et G. R. WALKER, "Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale". *Water Resour. Res.* 37 (3) (2001) 701–708.
- [20] - C. PERRIN, C. MICHEL et V. ANDRÉASSIAN, "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation". *J. Hydrol.* 279 (2003) 275-289.
- [21] - [21] S. MOUELHI, C. MICHEL, C. PERRIN et V. ANDRÉASSIAN, "Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited". *J. Hydrol.* 318 (2006) 200-214.
- [22] - 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 (2000) 287 p.
- [23] - Z. MAKHLOUF et C. MICHEL, "A two-parameter monthly water balance model for French watersheds". *J. Hydrol.* 162 (1994) 299–318.
- [24] - M. LE LAY, « Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydroclimatique. Approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin ». Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, France (2006) 218 p.
- [25] - M. LANG, B. RENARD, E. SAUQUET, P. BOIS, A. DUPEYRAT, C. LAURENT, O. MESTRE, H. LUBES-NIEL, L. NEPPEL et J. GAILHARD, J. "A national study on trends and variations of French floods and droughts". *IAHS Pub.* 308 (2006) 514-519.
- [26] - B. RENARD, « Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, (2006) 214 p.
- [27] - A. M. KOUASSI, K. F. KOUAME, M. B. SALEY et B. K. YAO, « 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.*, 16 (3), (2007) 412-427.
- [28] - A. KINGUMBI, « Modélisation hydrologique d'un bassin versant affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale ». Thèse de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie (2006) 199 p.