

MODELISATION PLUIE-DEBIT POUR LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU (GIRE) DE SURFACE DANS LE BASSIN-VERSANT DE LA VOLTA AU BENIN

Ernest AMOUSSOU^(1&2), Henri S. V. TOTIN^(1&2), Expédit W. VISSIN⁽²⁾, Gil MAHE⁽³⁾, Constant HOUNDENOU⁽²⁾ & Michel BOKO⁽²⁾

⁽¹⁾ Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Université de Parakou, BP 123 Parakou, Bénin. ⁽²⁾Laboratoire Pierre Pagny: Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin, 03 BP1122 Cotonou (Benin). E-mail : ajernest@yahoo.fr, sourouhenri@yahoo.fr, exlaure@yahoo.fr, constant500@yahoo.fr & bokomichel@gmail.com. ⁽³⁾Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM), Université de Montpellier 2 E-mail : gil.mahe@ird.fr

RESUME

En Afrique tropicale et dans le bassin béninois de la Volta, de nombreuses études montrent que les eaux de surface sont très tributaires de la variabilité climatique. L'instabilité pluviométrique des années 1960 à nos jours a contribué à une modification des régimes hydrologiques dans le bassin de la Pendjari. Le but de cette étude est la modélisation pluie-débit à partir du modèle GR2M au cours des séquences sèches et des séquences humides. Il s'agit aussi d'analyser la disponibilité de la ressource en eau à partir du calcul des indices de déficit hydrique et des coefficients de tarissement, afin d'apprécier le rôle du substratum géologique en place et l'évolution climatique du bassin. Cette étude s'appuie sur les données de pluies et d'ETP des stations climatiques du bassin et des stations environnantes du Togo et du Burkina-Faso d'une part; de débits à la station hydrométrique de Porga et de Tiélé d'autre part. Une interpolation cubique spline qui s'appuie sur la triangulation de Delauney est faite pour l'obtention de champ de pluie en amont de chaque station hydrométrique afin de mieux cerner la relation pluie-débit dans le sous-bassin. Les résultats obtenus ont permis de constater une persistance de la sécheresse depuis les années 1970, avec une baisse pluviométrique de l'ordre de 10 %, qui a amplifié une baisse d'écoulement de l'ordre de 30 à 40 %. Cette baisse parfois très marquée associée aux changements environnementaux globaux engendre un tarissement rapide préjudiciable à la disponibilité et à la gestion des eaux de surface.

Mots Clés: Bénin, Volta, GIRE, modélisation, GR2M

MODELING RAIN-FLOW IN INTEGRATED OF SURFACE WATER RESOURCES MANAGEMENT (IWRM) ON THE VOLTA RIVER BASIN IN BENIN

ABSTRACT

In the tropical Africa and the Volta basin, of many studies show that surface water and their management are very dependent on climate variability. The rainfall instability of years 1960 at our days, contributed to a modification of hydrological modes and by consequence with nonthe control of water resource in the basin of Penjari. The goal of this study is modeling rain-flow starting from model GR2M during dry and wet sequences. It is also a question of analyzing the availability of water resource to leave the indices hydrous deficit and the coefficients drying up, in order to appreciate the role of geological substratum and climatic evolution of basin. This study is based on the data of rains and ETP of the rainy stations of basin and the surrounding stations of Togo and Burkina-Faso on the one hand; flows at the hydrometric station of Porga and Tiele on the one hand. A cubic interpolation spline which is based on the triangulation of Delauney will be made for obtaining field of rain in each hydrometric station in order to better determine the relation rain-flow in under-basin. The results obtained made it possible to note a persistence of the dryness since the

1970, with a rainfall of about 10 %, which amplified a fall of flow of about 30 to 40 %. This very marked fall sometimes associated the total environmental changes generate a fast drying up prejudicial with the availability and the management of surface water.

Key Words: Benin, Volta, IWRM, modeling, GR2M

INTRODUCTION

En Afrique tropicale, les ressources en eau de surface, tributaires des précipitations très irrégulières dans le temps et dans l'espace, deviennent de plus en plus limitées du fait de la péjoration climatique. Ce changement observé du climat et ses impacts sur les systèmes hydriques sont très tôt devenus des sujets de préoccupations scientifiques à des échelles continentales, régionales ou sous-régionales ou nationales (Van Dam, 1999; Amoussou, 2010; Totin *et al.*, 2010; etc.). Ainsi, il ressort une tendance à la baisse de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à partir de la fin des années 1960 et du début des années 1970 jusqu'au début de la décennie 1990 (Hubert *et al.*, 1989) de même que pour l'écoulement des grandes rivières (Mahé et Olivry, 1995) avec des déficits très marqués de 15 à 30 % pour les pluies et de 40 à 60 % pour les écoulements de surface (Vissin, 2007; Amoussou, 2010).

A l'échelle du bassin de la Volta, les études sur la variabilité hydroclimatique sont d'ordre global. Elles ont été réalisées de manière éparse dans les différents pays qu'il couvre (Opoku-Ankomah & Minia, 2005). Cependant, Andreini *et al.* (2000) évaluent les ressources en eau pluviale à 400 km³/an et les volumes d'eau écoulée de l'ordre de 30 à 35 km³ dans le bassin de la Volta. Le bassin d'Oti au Bénin enregistre en année hydrologique normale un volume annuel d'eau écoulée de 1,85 km³ (Barry *et al.*, 2005). Les simulations faites par Opoku et Minia (2005) indiquent une réduction de l'écoulement de 16 et 37 % aux horizons 2020 et 2050 des changements climatiques qui, pour Kunstmann et Jung (2005), seront marqués par une tendance significative à la baisse des précipitations. Ainsi, la maîtrise de l'eau et une meilleure gestion de cette ressource ne sauraient être fondées sur une situation hydrologique normale et sur des données moyennes mais sur une réelle appréciation des dimensions spatiale et temporelle de sa disponibilité.

Au regard de ces changements climatiques, l'apparition des régimes pluvio-hydrologiques extrêmes (surtout déficitaires), les crises annoncées de la gestion de l'eau imposent une meilleure connaissance de sa disponibilité et sa variabilité spatio-temporelle. Ainsi, cette étude vise à contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau à partir d'un modèle conceptuel pluie-débit (modèle GR2M du CEMAGREF : Génie Rural, 2 paramètres, Mensuel).

1. PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE

Le secteur d'étude est situé au nord-est du bassin de la Volta et s'étend sur les départements de l'Atacora et de la Donga au Bénin entre 0°40' et 2°10' Est et 11°40' et 9°21' Nord (figure 1). Il couvre une superficie de 13 590 km², soit 3,4 % du bassin global de la Volta et 12,1 % du territoire béninois (Barry *et al.*, 2005). Le Bénin fait partie des trois pays, avec le Mali et la Côte d'Ivoire, qui occupent une portion partie du bassin.

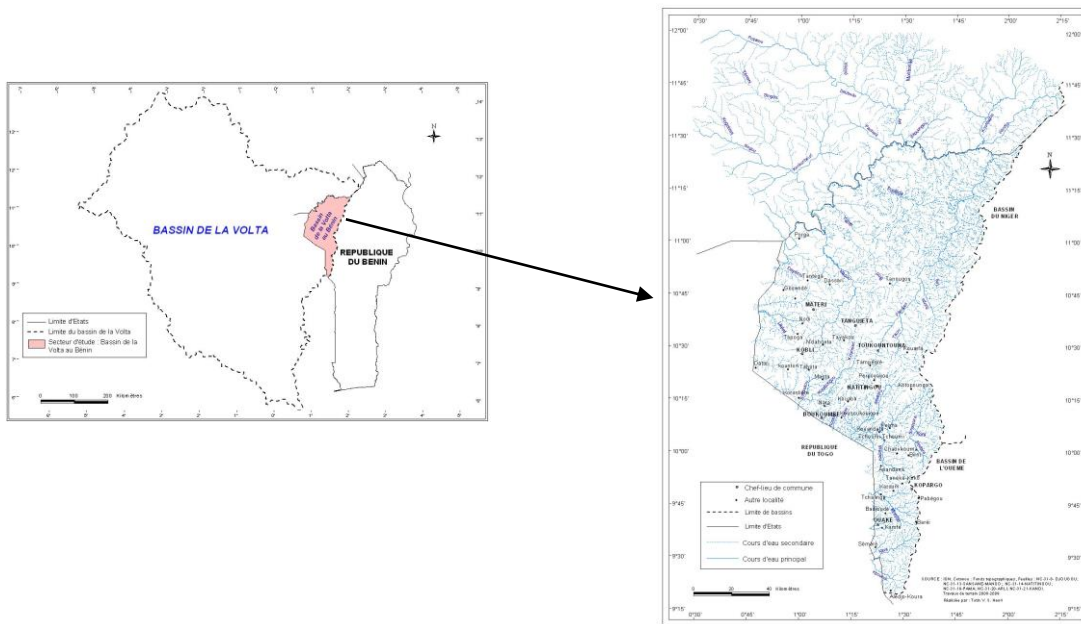


Figure 1 : Localisation géographique du bassin béninois de la Volta

Le bassin-versant de la Volta au Bénin a un régime climatique de type soudanien, caractérisé par une saison sèche (novembre à mars) et une saison pluvieuse (avril à octobre). Ce climat sert de transition entre le climat subéquatorial (humide) au sud et le climat sahélien (sec) au nord.

Il a un relief très accidenté dominée dans sa partie orientale par la chaîne de l'Atacora et occidentale par la plaine de Gourma. Les hauteurs hypsométriques varient globalement entre 160 m et 680 m de la plaine de Gourma à la chaîne de l'Atacora.

Le réseau hydrographique du bassin de la Volta au Bénin est drainé par des cours d'eau permanents et temporaires (en majorité) qui se jettent pour la plupart dans la rivière Pendjari, d'une longueur de 380 km. Cette rivière prend sa source au nord du village Tagayé au sud-ouest de Natitingou (Totin *et al.*, 2010). Elle coule dans la combe anticlinale du massif atacorien, longe la crête occidentale jusqu'à la latitude de Batia au Bénin (Houssou, 1998).

2. DONNEES ET METHODES

Les données utilisées sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle mensuelles de 1961 à 2005 d'un réseau de treize stations réparties dans le bassin et à proximité, provenant de la base de données de l'ASECNA de Cotonou (Bénin), de Ouagadougou (Burkina Faso) et de la Météorologie Nationale de Lomé (Togo). Les données de débit mensuel de 1961-2005 des stations de Porga et Tiélé du bassin de la Pendjari sont collectées au Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau au Bénin.

Pour établir la relation pluie/débit, le coefficient de tarissement et la modélisation pluie-débit, une interpolation spatiale des données de pluie est nécessaire et a été réalisée en quatre étapes. Il s'agit de :

- l'établissement d'un modèle spatial (un par mois) de régression linéaire multiple, liant les moyennes pluviométriques mensuelles des treize stations à la latitude, à la longitude et à l'altitude (Modèle Numérique de Terrain GTOPO30). Cette méthode s'inspire de celle de Amoussou (2010) ;

- une interpolation cubique spline sous Matlab de l'information résiduelle, exprimée sous forme de ratios (rapport des pluies observées et estimées par le modèle de régression). Par combinaison avec les estimations par régression linéaire multiple, les ratios interpolés permettent d'obtenir les précipitations moyennes mensuelles en tout point du bassin-versant ;
- une interpolation cubique des ratios interannuels, par combinaison avec les précipitations moyennes estimées par le modèle, permettant d'obtenir les précipitations de chaque année en tout point du bassin-versant (champs pluviométriques interannuels) ;
- une validation croisée de type « leave-one-out » utilisée par Philippon *et al.* (2002) et Amoussou (2010), qui fut développée par Lachenbruch et Mickey (1968) dans le cadre de recherches sur l'estimation de l'erreur de modèles d'analyse discriminante, a permis enfin de vérifier la fiabilité des données estimées. Cette méthode consiste à masquer tour à tour chacune des stations disponibles et à prévoir pour la station masquée les valeurs de pluie à partir des autres stations.

La détection des ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques et hydrométriques (1960-2005) a été faite à l'aide du logiciel Khronostat 1.01, à travers le test de Pettitt qui est un test non paramétrique dérivant de celui de Mann-Whitney. Ce test, par sa robustesse à détecter une rupture dans les séries chronologiques, a été utilisé pour l'étude des fluctuations de variables hydrométéorologiques (Lubès *et al.*, 1998; Servat *et al.*, 1999). La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$, définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}, \text{ où } D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \text{ avec } \text{sgn}(x) = 1 \text{ si } x > 0, 0 \text{ si } x = 0 \text{ et } -1 \text{ si } x < 0$$

A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est exprimée approximativement par :

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

H_0 est rejetée pour un risque α de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α . La série comporte une rupture localisée au moment où est observé $\max |U_{t,N}|_{t=1, N-1}$.

La corrélation pluie/débit sur la période 1961-2005 permet d'apprécier la dépendance entre les lames d'eau précipitées (données interpolées) et les lames d'eau écoulées dans le bassin-versant à Porga (Rivière Pendjari) et à Tiélé (Ruisseau Magou). Le coefficient de tarissement quant à lui permet d'apprécier la variabilité probable d'un aquifère « global » sur le bassin au niveau des stations de mesure de débit. Le coefficient de tarissement de Maillet (k) est donné par la loi selon laquelle k est directement proportionnel à la conductivité hydraulique et inversement proportionnel aux dimensions de l'aquifère (Mahé *et al.*, 2000). Il a la dimension de l'inverse du temps (j^{-1}) et est calculé par la formule :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt}$$

avec Q_0 et Q_t (m^3/s) débits aux instants t_0 (début du tarissement) et t donné ; k , coefficient de tarissement de Maillet qui a la dimension de l'inverse du temps (j^{-1}).

La modélisation hydrologique à partir du modèle GR2M (Génie Rural 2 paramètres Mensuel) du CEMAGREF va permettre d'apporter des approches de solutions aux questions que pose la dynamique des eaux continentales en termes de risques et de ressources, comme la prévision des crues et des étiages. Ainsi, dans le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), la simulation des débits moyens mensuels à partir de la pluie (Pluie) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est nécessaire et exige un nombre relativement faible de paramètres (deux paramètres X_1 et X_2) :

- un réservoir sol qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale X_1 , correspondant à la capacité de rétention en eau du sol.
- un réservoir d'eau gravitaire qui régit la fonction de transfert caractérisée par un coefficient d'échange souterrain X_2 .

Il existe plusieurs versions du modèle GR2M. Celui utilisé sur le bassin de la Volta au Bénin est la dernière version adaptée par Mouelhi (2003) et illustrée par la figure 2.

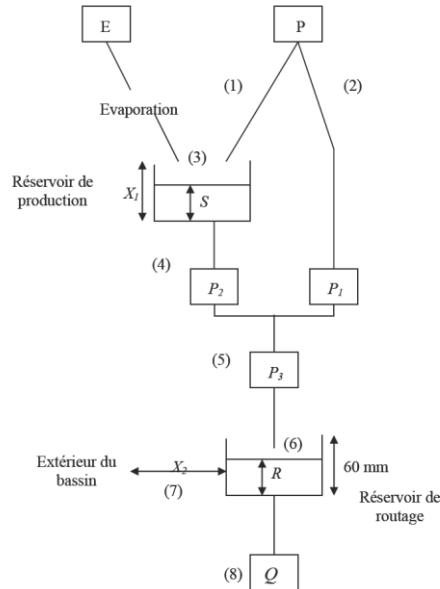


Figure 2 : Fonctionnement du modèle GR2M (Source : Mouelhi, 2003)

Pour la pluie P , le niveau S dans le réservoir de production devient S_1 , défini par :

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \text{où} \quad \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (1)$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en millimètres. La pluie P_1 en excès est donnée par : $P_1 = P + S - S_1$ (2)

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau S_1 devient S_2 :

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{où} \quad \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad (3)$$

E étant l'évapotranspiration potentielle, le réservoir sol se vidange ensuite en une percolation.

P_2 et son niveau S , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par les formules :

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^{2.5}\right]^{0.4}} \quad \text{et} \quad P_2 = S_2 - S \quad (4)$$

La pluie totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par : $P_3 = P_1 + P_2$ (5)

Le niveau R dans le réservoir de routage devient alors R_1 : $R_1 = R + P_1$ (6)

Un terme d'échange en eau est alors calculé par : $F = (X_2 - 1).R_1$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient : $R_2 = X_2.R_1$ (7)

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange suivant une fonction quadratique. Le débit est donné par :

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (8)$$

et le niveau du réservoir est enfin mis à jour par : $R = R_2 - Q$

La fonction critère que nous avons retenue pour l'optimisation des paramètres X_1 et X_2 du modèle est un critère numérique de calage. La fonction critère que nous avons utilisée est une des transformations de celle proposée par Nash et Sutcliffe (1970) et désignée sous l'appellation « Nash », qui se définit par :

$$Nash(\sqrt{Q}) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i \left(\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{cal}^i} \right)^2}{\sum_i \left(\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{moy}^i} \right)^2} \right] \text{ en } \%$$

avec Q_{obs}^i : débit mensuel observé ; Q_{cal}^i : débit mensuel calculé ; Q_{moy}^i : débit moyen mensuel observé ; i : mois considéré.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

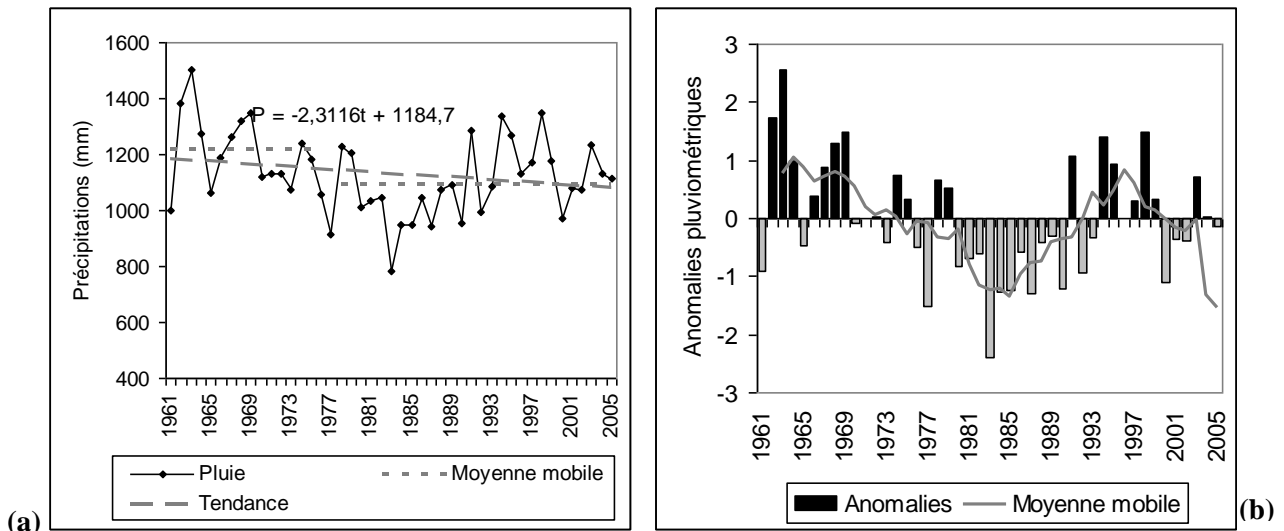
3.1. Variabilité hydroclimatique

Les cumuls pluviométriques varient en saison pluvieuse de 775 à 1330 mm et en saison sèche de 9 à 76 mm selon les données du champ pluviométrique régionalisé du bassin. Mais à l'intérieur du bassin, c'est-à-dire avec les stations béninoises du bassin, les cumuls pluviométriques varient de 933 à 1242 mm en saison pluvieuse et de 30 à 41 mm en saison sèche. Cela montre une variabilité intra-saisonnière et inter-saisonnière marquée par des écarts importants en termes de volume d'eau pluviale brute entre les champs de pluie stationnaires. La saison sèche est ainsi caractérisée par une extrême rareté des pluies du fait des influences de masses d'air continentales en provenance de l'anticyclone de Libye, qui dirige un flux d'alizé de nord-est et sec.

Le déficit pluviométrique entre la saison pluvieuse et la saison sèche est en général de l'ordre de 97 % dans le bassin. Cette variation inter-saisonnière est très forte montrant que le secteur nord du bassin connaît une forte variation des cumuls pluviométriques entre la saison pluvieuse et la saison sèche.

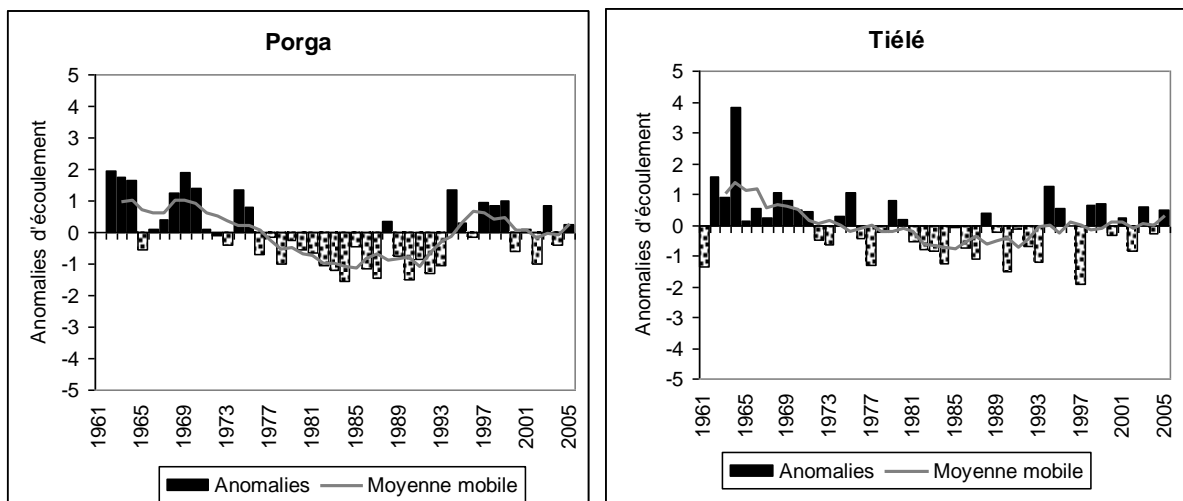
La figure 3 montre l'évolution interannuelle de la pluviométrie dans le bassin béninois de la Volta. Il en ressort une diminution des hauteurs de pluie de 2,3 mm/an, soit une réduction des lames d'eau précipitée de 0,2 % /an sur la période d'étude (1961-2005). Les indicateurs de variation des hauteurs de pluie dans le bassin indiquent une réduction considérable des apports d'eau en période de sécheresse et non compensée même en période très humide du fait certainement du réchauffement climatique. La persistance des conditions climatiques de sécheresse est certainement liée à une variation à la hausse de la demande évaporatoire et à un bilan climatique déficitaire dans le bassin. Cela n'est pas conséquence sur les ressources en eau de surface.

Figure 3 : Evolution interannuelle des champs de pluie moyens (a) et de anomalies pluviométriques (b) dans le bassin de la Volta au Bénin



La figure 4 présente en valeurs centrées réduites l'évolution interannuelle de l'écoulement moyen annuel dans les sous-bassins de la Pendjari et de Magou. La variabilité interannuelle montre une période de fort écoulement marqué par les anomalies positives des années 1960 et une séquence de déficit des décennies 1971-1980 et 1981-1990. Cette période de faibles débits semblables aux déficits pluviométriques (10,24 %) a marqué négativement le comportement hydrologique du bassin étant donné que les excédents d'écoulement actuellement observés n'ont plus égalé ceux des années 1960 au même titre que la pluviométrie. Cette tendance persistante de la sécheresse hydrologique (-10,5 % à Porga et -4,3 % à Tiélé) confirme la dégradation continue de l'écoulement malgré la légère reprise des précipitations de 4 % des années 1990 dans le bassin.

Figure 4 : Evolution de l'écoulement dans le bassin béninois de la Volta (1961-2005)



En condition climatique moyenne, une année sur deux et sur cinq, les débits enregistrés sont respectivement de 46 et 68 m³/s à Porga et de 4 et 6 m³/s à Tiélé. Pour mieux apprécier la baisse des ressources en eau superficielle consécutive à la persistance de la sécheresse, une détection des ruptures de stationnarité dans les séries hydroclimatiques est nécessaire.

3.2. Ruptures de stationnarité

La détection des ruptures par l’approche combinée du test de Pettitt et de la méthode bayésienne montre un changement dans l’évolution des chroniques pluviométriques et hydrométriques.

Les deux sous-bassins de Pendjari et de Magou sont caractérisés par une rupture de stationnarité, apparue en 1975 avec respectivement une probabilité de dépassement de la valeur critique du test de $4,8.10^{-3}$ et de $8,13.10^{-2}$. Cette date de rupture est conforme à celle de la pluviométrie aussi. Cette rupture est établie aux seuils de confiance 90 %, 95 %, 99 % à Porga et de 90 % (avec rejet aux seuils de 95 % et 99 %) à Tiélé. Ainsi, le mode de la fonction de densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture 0,30 est situé également en 1975 dans le premier sous-bassin mais en 1971 dans le second.

La variation intervenue dans les séries hydrologiques, au regard de la rupture de 1975 montre une nette différence entre les débits des deux sous-séries 1961-1975 et 1976-2005, de même que les précipitations comme l’illustre le tableau I.

Tableau I: Déficits de débits moyens entre les sous-périodes 1961-1975 et 1976-2005

Sous-bassins	Débits moyens en m ³ /s (1961-1975)	Débits moyens en m ³ /s (1976-2005)	Ecart en m ³ /s	Déficits de débits (%)
Pendjari à Porga	70,51	38,73	-31,77	-45,06
Magou à Tiélé	5,45	3,78	-1,67	-30,64
Pluie du bassin (mm)				
	1961-1975	1976-2005	Ecart	Déficit pluviométrique (%)
Bassin-versant	1215	1090	- 125	-10

La variabilité interannuelle des lames écoulées dans les sous-bassins pour les sous-périodes 1961-1975 et 1976-2005 montre un déficit hydrique important d’environ 45 % à Porga contre 31 % à Tiélé. L’impact de la sécheresse est ainsi largement amplifié dans l’écoulement des cours d’eau du

bassin qui enregistre une baisse trois à quatre fois plus importante (30 à 40 %) que celle de la pluviométrie (10 %). Ceci concorde avec les résultats de Vissin (2007) sur le fleuve Niger au Bénin et Amoussou (2010) sur les fleuves Mono et Couffo.

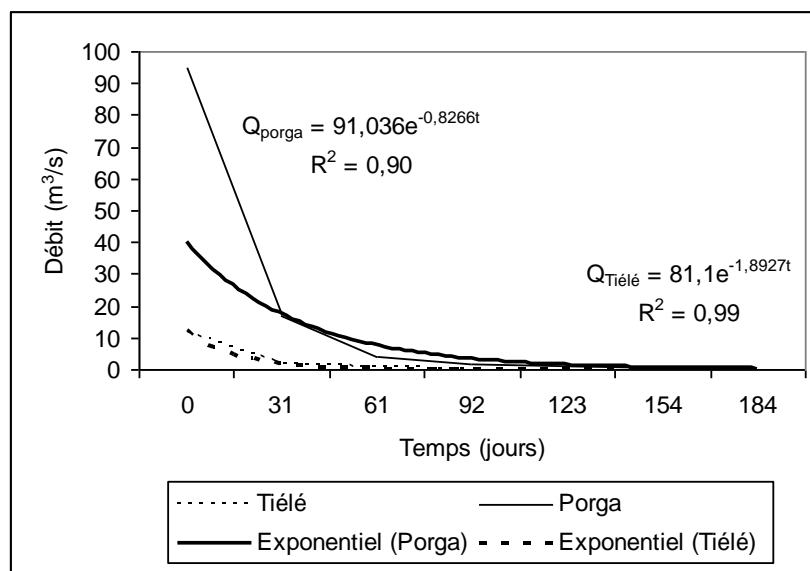
Les déficits d'écoulement, très élevés, observés pourraient être le résultat de l'effet conjugué de la récession pluvieuse et d'importantes pertes d'eau par évaporation. Le bassin de la Volta est aujourd'hui dans une phase de récession hydrologique, préjudiciable à l'approvisionnement en eau particulièrement en saison sèche.

Les écoulements de surface sont conditionnés par les pluies dont l'irrégularité est souvent accentuée par les conditions locales de ruissellement et d'infiltration suivant les états de surface des sols (Vissin, 2007). La vidange des nappes de versant, pour alimenter l'écoulement en période d'étiage, est plus considérable dans le sous-bassin de la Pendjari (22 280 km²) que celui de Magou (836 km²). L'analyse des coefficients de tarissement va permettre de confirmer le fonctionnement des aquifères des deux sous- bassins.

3.3. Coefficient de tarissement

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique tropical (Briquet *et al.*, 1996). Il peut correspondre à deux processus: le déstockage de l'eau accumulée dans le réservoir hydrographique et/ou à la vidange de la nappe souterraine. Le régime de tarissement dans le bassin de la Volta est rapide à Tiélé et lent à Porga (figure 5).

Figure 5: Tarissement moyen (1951-2005) de la Pendjari à Porga et de Magou à Tiélé



L'analyse de la figure 5 montre que le sous bassin de Magou à Tiélé tarit en moins de 90 jours contre 180 jours pour la Pendjari. Le tarissement très rapide dans les deux sous-bassins pendant les 30 premiers jours qui suivent la fin de la saison pluvieuse traduit une baisse progressive des débits.

Cette diminution du déficit d'écoulement signifie que la part du bilan hydrique qui n'est pas évacuée en écoulement de surface diminue (Wesselink *et al.*, 1995).

Les coefficients de tarissement dans le bassin béninois de la Volta sont en moyenne de $0,053 \text{ j}^{-1}$ à Porga et de $0,066 \text{ j}^{-1}$ à Tiélé pour des volumes d'eau mobilisés respectifs de 270.10^6 m^3 et 17.10^6 m^3 . Cet écart entre les deux sous-bassins oscille entre $0,013 \text{ j}^{-1}$ avec 253.10^6 m^3 d'eau, traduisant la variation des volumes d'eau mobilisés par les réservoirs souterrains, et qui dépend des lames d'eau précipitées, de la taille des différents sous-bassins et de la capacité des réservoirs.

La modélisation hydrologique permet de mieux apprécier l'impact de la dynamique climatique sur la variabilité des ressources en eau superficielle.

3.4. Modélisation hydrologique dans le bassin béninois de la Volta

3.4.1. Calage et validation

La simulation du fonctionnement hydrologique dans le bassin béninois de la Volta à l'aide du modèle GR2M a été faite à travers les opérations de calage et de validation des débits moyens mensuels et l'appréciation de la significativité à partir des valeurs de Nash en optimisation. Mais, ne pouvant pas afficher les résultats de toutes les années, quelques-uns ont été choisis. Ainsi, le modèle est calé (1961-1963) et validé (1964-1966) en période humide d'une part et calé (1973-1975) et validé (1976-1978) en période sèche d'autre part.

Les valeurs de Nash, généralement comprises entre 80 et 90 % dans les sous-bassins de la Pendjari à Porga et de Magou à Tiélé montrent une bonne qualité du calage du bassin béninois de la Volta avec le modèle GR2M. Les valeurs de Nash obtenues sur le bassin de la Volta à la validation humide par humide et sec par sec sont résumées dans les tableaux II et III.

Tableau II: Calage/validation pour le bassin béninois de la Volta avec le modèle GR2M sur la période humide (1961-1966)

Sous-bassins	Paramètre X1	Paramètre X2	Nash calage (1961-1963)	Nash validation (1964-1966)
Pendjari à Porga	607,7	1,3	81	72
Magou à Tiélé	943,3	0,3	91	83
Moyenne	775,5	0,8	86	77,5

Tableau III: Calage/validation pour le bassin béninois de la Volta avec le modèle GR2M sur la période sèche (1973-1978)

Sous-bassins	Paramètre X1	Paramètre X2	Nash calage (1973-1975)	Nash validation (1976-1978)
Pendjari à Porga	682,5	1,3	70	61
Magou à Tiélé	950,6	0,4	92	77
Moyenne	816,6	0,9	81	69

L'analyse des valeurs du Nash sur les différentes sous-périodes montre une bonne efficacité du modèle GR2M à simuler les écoulements de la Pendjari à Porga et de Magou à Tiélé. De plus, le calage des deux sous-bassins avec le modèle est de bonne qualité. Le critère de Nash moyen est égal à 86 % pour la séquence humide et de 81 % pour la séquence sèche dans le bassin béninois de la Volta. Des deux sous-bassins, celui de la Pendjari à Porga montre une valeur inférieure avec un critère de Nash de 81 % en période humide et de 70 % en période sèche. Le sous-bassin de Magou (le plus petit) présente un critère de Nash supérieur à la moyenne en calage.

Au total, le modèle a mieux simulé les écoulements dans le sous-bassin de la Magou que dans celui de la Pendjari. Ceci peut se justifier par la grande taille du deuxième sous-bassin (22 280 km²) par rapport au premier (830 km²) et dans une certaine mesure à leurs caractéristiques biophysiques (couvert végétal, morphostructure, formations géologiques et hydrogéologiques, degré d'anthropisation, etc.).

L'analyse de la relation débits observés/débits simulés permet d'appréhender et de confirmer la significativité des simulations et la fiabilité d'estimation des ressources en eau de surface dans le bassin béninois de la Volta.

3.4.2. Variabilité des hydrogrammes et de la disponibilité en eau

L'analyse des hydrogrammes de la Pendjari et de Magou (figure 6) permet d'observer un retard des débits maximaux observés et simulés par rapport à ceux des pluies, et cela sur les deux sous-périodes. Cela se justifie par le temps de réponse des sous-bassins aux événements pluvieux. Un léger décalage et un écart sont notés entre les débits maximaux observés et ceux simulés dans les deux sous-bassins. Cette discordance est liée au choix opéré dans cette étude de simuler les écoulements moyens. Pour Vissin (2007) et Amoussou *et al.* (2007), ce biais ne dépend pas du modèle et Ardoin Bardin (2004) explique que les forts débits de pointe ne sont jamais bien simulés. Pour Sighomnou (2004), ces débits de pointe sont sous-estimés plus souvent à partir de la même date par le modèle GR2M.

Figure 6: Hydrogrammes observés et simulés en calage (1961-1963) et en validation (1964-1966) pour les sous-bassins de la Pendjari à Porga et de Magou à Tiélé

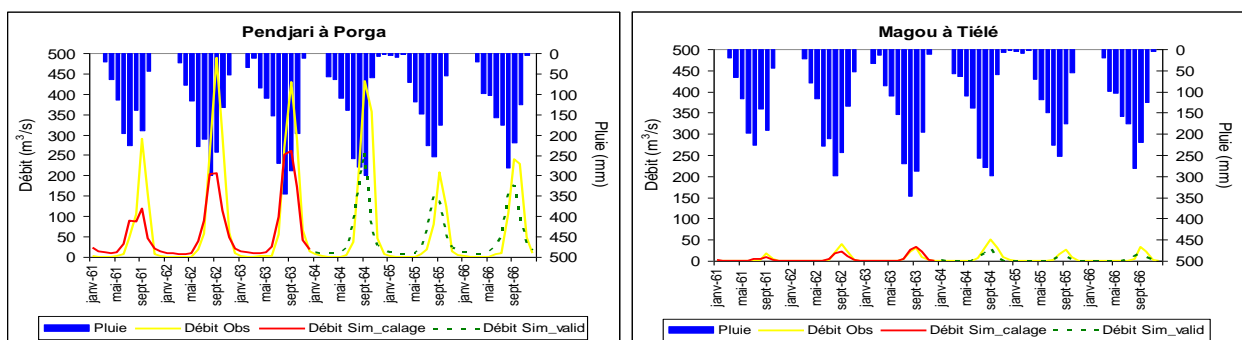
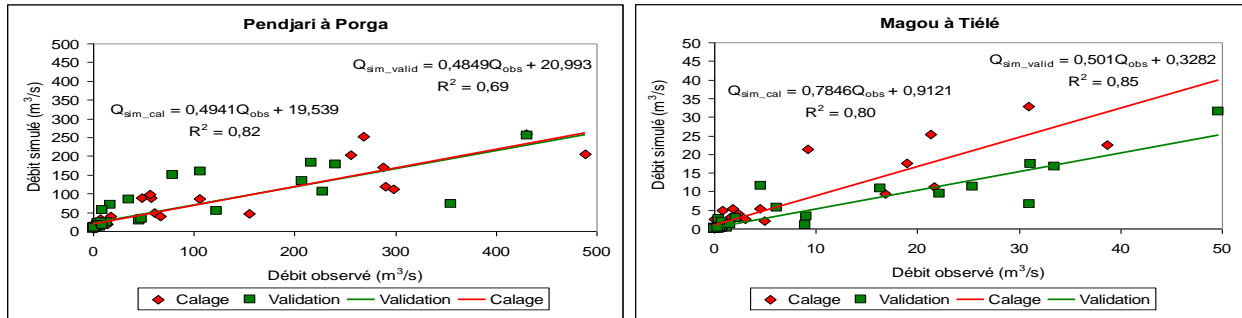


Figure 7 : Corrélation des débits observés et simulés en calage (1961-1963) et en validation (1964-1966) dans les sous-bassins de la Pendjari à Porga et de Magou à Tiélé

L'étude de la relation entre débits observés et simulés pour les sous-périodes 1961-1963 et 1964-1966 présente des valeurs du coefficient de détermination élevées dans tous les deux sous-bassins (figure 7).



Les corrélations entre les écoulements observés et calculés présentent de forts coefficients de détermination (70 à 85 %) qui témoignent de l'efficacité du modèle à simuler la disponibilité des ressources en eau superficielle dans le bassin de la Volta au Bénin. La variabilité des ressources en eau au pas de temps mensuel est mieux reproduite par le modèle GR2M dans le sous-bassin de Magou que dans celui de la Pendjari pendant une phase hydroclimatique humide.

La figure 8 illustre par ailleurs le rapport entre les hydrogrammes observés et simulés pour une séquence sèche dans le bassin béninois de la Volta. Dans un contexte hydroclimatique marqué par la sécheresse, le modèle GR2M donne des résultats peu intéressants par rapport à la période humide. Le bassin présente des hydrogrammes dont la forme concorde assez peu pour la Pendjari et bien pour Magou à Tiélé. L'étude de la corrélation entre débits observés et simulés en optimisation est très bonne sur la sous-période 1973-1975 dans tous les deux sous-bassins mais plus dans celui de Magou (figure 9).

Figure 8: Hydrogrammes observés et simulés en calage (1973-1975) et en validation (1976-1978) pour les sous-bassins de la Pendjari à Porga et de Magou à Tiélé

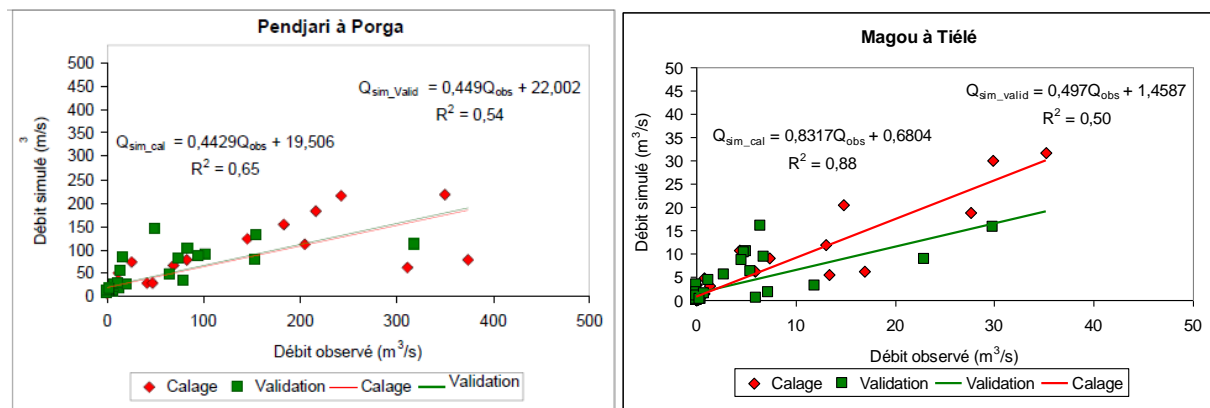
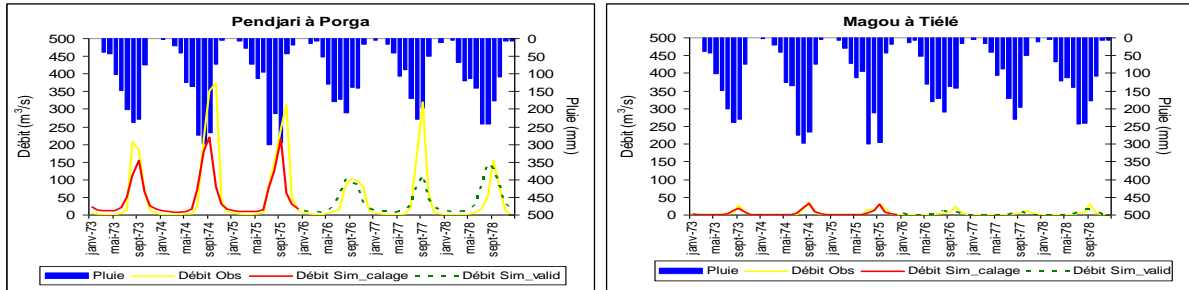


Figure 9: Corrélation débits observés et débits simulés en calage (1973-1975) et en validation (1976-1978) dans les sous-bassins de la Pendjari à Porga et de Magou à Tiélé



La validation sur la sous-période 1976-1978 présente des coefficients de détermination (R^2) faibles, respectivement 54 % et 50 % pour la Pendjari et Magou à Porga même si les coefficients de Nash (61 % et 77 %) restent très significatifs. Cette performance atteste de la validité du modèle.

Malgré quelques discordances entre débits observés et calculés, le modèle GR2M présente globalement une bonne aptitude à simuler le fonctionnement hydrologique, apprécié à travers différents hydrogrammes du bassin.

La simulation de la disponibilité en eau de surface dans le bassin de la Volta par ce modèle (au pas de temps mensuel) donne des résultats satisfaisants qui peuvent être exploités dans le nouveau contexte de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau.

CONCLUSION

L'évaluation de la disponibilité en eau dans le bassin béninois de la Volta, dans le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau, basée sur l'analyse statistique et les travaux de terrain montre une variation des régimes hydroclimatiques à partir de 1975. Le déficit pluviométrique de 10 % sur la période 1976-2005 a induit un déficit des ressources en eau de surface 3 à 4 fois plus sévère, en réponse à la forte variabilité climatique.

Le tarissement rapide des cours d'eau et la sévérité des étiages sont évocateurs de la sécheresse hydrologique qui influe considérablement sur la disponibilité en eaux superficielle et souterraine. Le coefficient de tarissement confirme cette baisse qui est accentuée dans le bassin de Magou installé sur le socle que dans celui de la Pendjari recouvert en partie de grès. Il montre l'importance de la taille du réservoir de la Pendjari que celle de Magou Cette situation compromet les politiques de réduction de la pauvreté et d'aménagement des terres irrigables.

Le modèle conceptuel pluie/débit s'est révélé très efficace à simuler les débits moyens du bassin. Les différents résultats obtenus par la simulation, en calage et en validation, confirment que le modèle reproduit bien le fonctionnement hydrologique et peut être adopté comme un outil de gestion des ressources en eau de surface du bassin.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amoussou E. (2010). Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat unique, Université de Bourgogne, Dijon, CRC – CNRS- UMR5210, 313 p.
- Amoussou E., Vissin E. W., Boko M. (2007). Simulation des écoulements dans le bassin versant du fleuve mono (Afrique de l'Ouest) avec le modèle GR2M. In Actes du colloque UAC, Cotonou, pp. 129-137.
- Andreini M., Van de Giesen N., Van Edig A., Fosu M., Andah W. (2000). Volta Basin Water Balance. ZEF, Discussion Papers on Development Policy, N° 21, Bonn, 37 p.
- Ardoin-Bardin S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat. Univ. Montpellier II. 440 p.
- Barry B., Obuobié E., Andreini M., Andah W., Pluquet M. (2005). The Volta River Basin. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Comparative Study of River Basin development and Management. IWMI, 198 p.
- Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F., Olivry J.C. (1996). Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, pp. 157-166.
- Houssou S.C. (1998). *Les bioclimats humains de l'Atacora et leurs implications socio-économiques dans le Nord-Ouest du Bénin*. Thèse de Doctorat de Géographie. Univ. de Bourgogne, Dijon, France, 336 p.
- Hubert P., Carbonel J.P., Chaouche A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367.
- Kunstmann H., Jung G. (2005). Impact of regional climate change on water availability in the Volta basin of West Africa. In: *Regional Management of Water Resources*, IAHS Publ. n° 295, 1-11.
- Lachenbruch P. A., Mickey M. R. (1968). Estimation of error rate in discriminant analysis. *Technometrics*: 10, 1-11.
- Lubès Niel H., Masson J. M., Paturol J. E., Servat E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Rev. Sci. Eau*, 11(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*, 6(1) pp. 109-17.
- Mahé G., Olivry J.C., Desouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E. (2000). Relation eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali, C.R. Acad. Sci., Sciences de la Terre et des Planètes, 330, pp. 689-692.
- Mouelhi S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF/CEMAGREF, Paris, 312 p.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10, pp. 282-290.

- Opoku-Ankomah Y., Minia Z. (2005). Climate Change Scenarios and Impacts on Surface Water Resources of the Volta River Basin. In: Climate and Anthropogenic Impacts on the Variability of Water Resources, IHP/UNESCO, Technical Document in Hydrology, N° 80, pp. 165-172.
- Philippon N., Camberlin P., Fauchereau N. (2002). Empirical Predictability study of October-December » East African rainfall. Q.J. Roy. Meteor. Soc., 128, 585, 2239-2256.
- Servat E., Paturol J.-E., Lubes-Niel H., Kouame 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. Revue des Sciences de l'Eau, 12(2) 363-387.
- Sighomnou D. (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun: perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences, Université de Yaoundé I, Cameroun.
- Totin V. S. H., Afouda A., Amoussou E., Tumbulto J., Boko M., (2010). Variabilité hydroclimatique et des ressources en eau de surface dans le bassin béninois de la Volta (Afrique de l'Ouest). IAHS Publ. 340, pp 164-171
- Van Dam J.C. (1999). Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes. International Hydrology Series, UNESCO, Cambridge University Press, 137 p.
- Vissin E. W. (2007). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse. de Doct. de l'Univ. de Bourgogne, Dijon, France, 5210, 280 p.
- Wesselink A. J., Orange D., Feizoure C. T., Randriamiarisoa (1995). Les régimes hydro-climatiques et hydrologiques d'un bassin-versant de type tropical humide : l'Oubangui (République Centrafricaine). In «L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement ». IAHS Publ. 238, 179- 194.