



ESSAI DE MODELISATION DES ECOULEMENTS D'UN COURS D'EAU TRANSFRONTALIER : LA RIVIERE BIA AU SUD-EST DE LA COTE D'IVOIRE

TEST OF MODELING OF THE FLOWS OF A CROSS-BORDER WATER COURSE: THE BIA RIVER SOUTHEAST OF COTE D'IVOIRE

FADIKA V., DAO A., NOUFE D. D., BAKAYOKO S., KAMAGATE B.

Laboratoire Géosciences et Environnement, UFR des Sciences et Gestion de
l'Environnement, Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

fvamoryba@yahoo.fr

RESUME

Le bassin versant de la Bia, d'une superficie de 9650 km² s'étend entre la Côte d'Ivoire et le Ghana. Les chroniques de débits à l'exutoire de ce bassin contiennent des lacunes qui peuvent s'étendre sur des mois alors que leur continuité doit être assurée pour une bonne maîtrise des apports aux lacs d'Ayamé 1 et 2. L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer notre aptitude à simuler les écoulements sur le bassin versant de la Bia. Pour ce faire, les périodes stationnaires ont été déterminées dans l'évolution des pluies et débits annuels du bassin versant avec le test de stationnarité de Hubert avant de procéder au calage et à la validation du modèle GR2M par les méthodes du differential split-sample test et de la simulation croisée. Les valeurs de Nash pouvant atteindre 80 % montrent que ce modèle peut simuler les écoulements sur le bassin versant de la Bia.

Mots clés : modèle GR2M, écoulement, bassin versant de la Bia, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The Bia basin covers an area of 9650 km² and extends between Côte d'Ivoire and Ghana. The chronic flows at the outlet of this basin contain gaps that can extend over months while their continuity must be ensured for a good control of the contributions to the lakes of Ayamé 1 and 2. The objective of this work is to help improve our ability to simulate runoff in the Bia watershed. To do this, the stationary periods were determined in the evolution of the annual rainfall and discharge of the watershed with Hubert's stationarity test before calibrating and validating the model using the differential split-sample test methods and cross simulation. Nash values of up to 80% show that this model can simulate flows over the Bia watershed.

Keywords : GR2M model, flow, Bia basin, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

L'eau facilement accessible et renouvelable ne représente que 0,01% de la ressource totale en eau de la planète (Fao, 2012). Elle se retrouve dans les rivières, ruisseaux et lacs exposés aux pollutions et prélèvements croissants à cause de la croissance économique et démographique. L'intensification des effets du changement climatique est une pression supplémentaire sur les ressources en eau de surface qui s'amenuisent et pourrait conduire à une situation de pénurie future dans certaines zones. En effet, les deux tiers des habitants de la planète pourraient vivre dans des pays soumis à un stress hydrique en 2025 si les modèles de consommation actuels restent les mêmes (Fao, 2017). Dans l'optique d'un développement durable, une bonne planification des ressources en eau plus que nécessaire. L'utilisation des modèles en hydrologie répond à plusieurs besoins opérationnels dans la gestion des ressources en eaux et la maîtrise du risque hydrologique (Perrin, 2000). La modélisation permet ainsi d'étendre les séries de débit et d'anticiper l'évolution future des débits d'un cours d'eau. C'est donc un outil d'interpolation et d'extrapolation pour lesquels les modèles hydrologiques conceptuels sont préférentiellement utilisés (Koné, 2015). Le modèle GR2M peu consommateur en données (Haziza, 2003) est un exemple utilisé dans de nombreuses études pour sa robustesse permettant de faire des prévisions hydrologiques (Kouakou, 2011 ; Yao, 2015 ; nounangnonhou *et al.*, 2018). Mais les modèles hydrologiques nécessitent pour leur fonctionnement, des séries de données observées de pluie, débit et autres paramètres (Aurore *et al.*, 2008).

Malheureusement, ces données ne sont pas toujours disponibles en Afrique, ou elles le sont, mais avec des lacunes pour différentes raisons. La difficulté d'instrumenter les cours d'eau faute de moyens financiers ou de volonté suffisante des gestionnaires en sont des causes. Les lacunes peuvent être dues aussi à la mauvaise gestion des stations hydrométriques, souvent confiées à des observateurs plus ou moins qualifiés et souvent mal rémunérés (Dubreuil, 1974). De plus les inondations des dispositifs de mesure par les fortes crues sont susceptibles d'interrompre les campagnes de mesure (Kouassi, 2008).

La Bia est un cours d'eau partagé entre la Côte d'Ivoire et le Ghana. L'accessibilité de toutes les données relatives à son bassin versant est plus complexe pour quelqu'un résidant dans un de ces pays. La modélisation de son comportement hydrologique permettra de résoudre ce problème.

L'objectif de ce travail est de rechercher la meilleure simulation du fonctionnement du bassin versant de la Bia à Bianouan avec le modèle GR2M. Pour ce faire, plusieurs simulations pluie-débit sur différentes périodes seront réalisées sur ce bassin versant.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La Bia est une rivière transfrontalière entre la Côte d'Ivoire et le Ghana, de coordonnées 5°30' et 5°50' de latitude Nord ; 3° et 3°15' de longitude Ouest (Figure 1). Elle abrite les lacs des barrages hydroélectriques d'Ayamé 1 et 2. Le bassin versant de la Bia appartient au climat équatorial humide, caractérisé par l'importance de la première saison des pluies (mars à juillet) avec un maximum de précipitation en juin et une deuxième saison humide assez forte de septembre à novembre. Selon les travaux de Adjanohoun et Guillaumet (1971) et de Girard et *al.* (1970), la rivière Bia s'écoulait entièrement sous forêt dense avec un débit moyen de 82 m³/s.

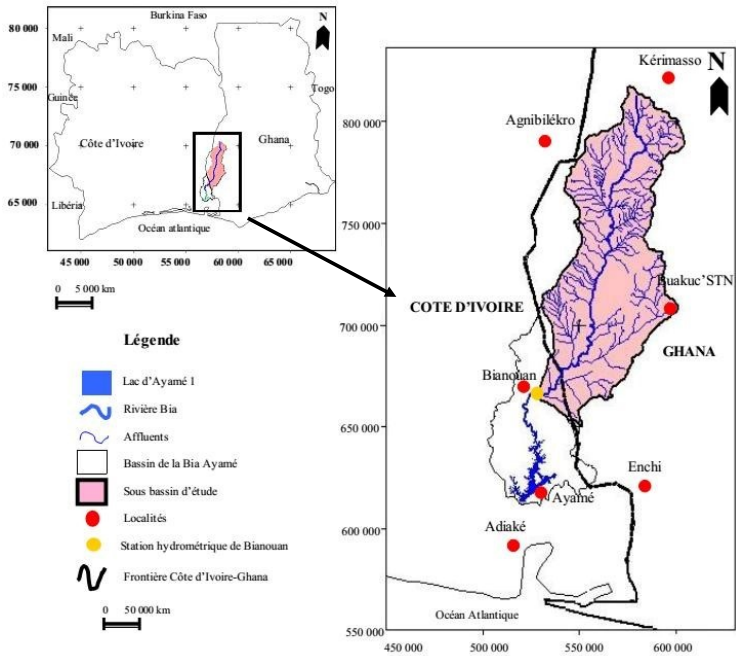


Figure 1 : Localisation du bassin de la Bia (Kouassi, 2008)

DONNEES ET METHODES

Données

Cette étude a nécessité l'utilisation de données pluviométrique, d'ETP et de débit. Les données mensuelles de pluie et d'ETP ont été relevées aux stations de Bianouan et d'Agnibilékro en Côte d'Ivoire et de Buakuc'STN et de Enchi au Ghana (Figure 2). Elles ont été fournies par la SODEXAM et le département du service météorologique du Ghana et s'établissent globalement sur la période 1960-2002 (Tableau 1). La série de débits mensuels de la station hydrométrique de Bianouan, sur la période 1973-1998, provient de la direction de l'hydraulique humaine. Les valeurs d'ETP mensuelles, sur la période 1973-1998 ont été obtenues auprès de la DMECIE (Direction des Mouvements de l'Energie de la Compagnie Ivoirienne d'Electricité).

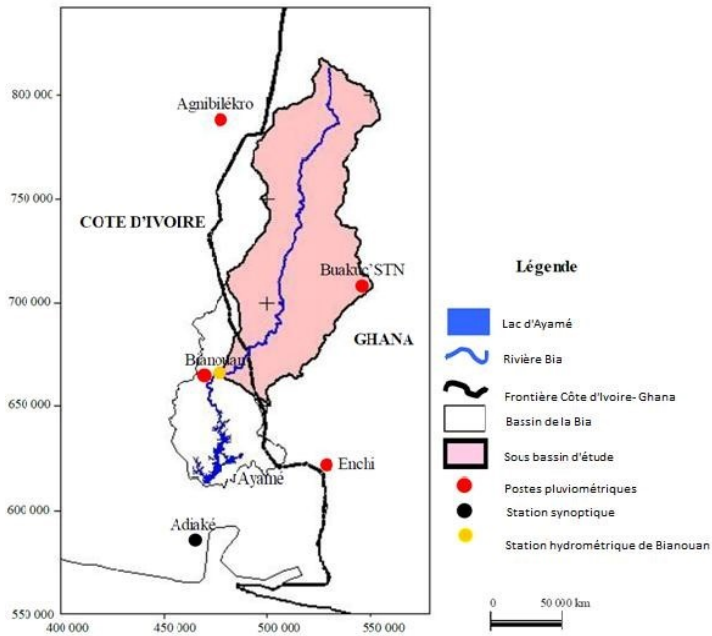


Figure 2 : Localisation des stations de mesure des données sur la Bia (Kouassi, 2008)

Tableau 1 : Etendues des séries de pluie aux quatre stations

Stations	Bianouan	Agnibilékro	Buakuc	Enchi
Périodes	1973-1998	1970-2002	1967-2002	1960-2002

Méthodes

Détection de rupture de stationnarité dans les séries de pluie et de débit

La simulation pluie-débit s'effectue sur des périodes stationnaires là où les conditions hydrologiques sont supposées être homogènes. Ainsi la détection de rupture permet de mettre en ces périodes qui sont limitées par la date de rupture. Le test de stationnarité de Hubert (Hubert *et al.*, 1989), programmé dans le logiciel KhronoStat de l'IRD, sera utilisé pour déterminer les périodes stationnaires. La segmentation a pour principe le découpage d'une série hydroclimatique en m segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit nettement différente de la moyenne du (des) segment (s) voisin (s).

La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique (D_m) entre elle et la série est minimum. L'écart quadratique se note :

$$D_m = D(i_1, i_2, \dots, i_m) = \sum_{k=1}^{k=m} \sum_{i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x}_k)^2 = \sum_{k=1}^{k=m} d_k$$

Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre, par application du test de Scheffé, la contrainte selon laquelle les moyennes des deux segments contigus doivent être significativement différentes.

Des écarts moyens consécutifs aux ruptures peuvent être évalués. Les déficits ou excédents obtenus caractérisent ainsi les fluctuations des paramètres hydroclimatiques par rapport à la période de référence qui est celle avant la rupture de stationnarité.

Modélisation pluie-débit

Présentation du modèle GR2M

Le modèle GR2M est un modèle pluie-débit global réglé par deux paramètres et qui fonctionne au pas de temps mensuel. Ce modèle a connu plusieurs versions évolutives depuis 1990 dont celle de Mouelhi *et al.* (2006) choisie pour cette étude car elle semble être la plus performante (Perrin *et al.*, 2007). Sa structure est celle d'un modèle conceptuel à réservoirs interconnectés que la pluviométrie tombée sur le bassin alimente au fur et à mesure pour être transformée en débit à l'exutoire (Figure 3). Ainsi, un réservoir de production et un réservoir de routage plus une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique sont notés. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin. Le modèle a deux paramètres optimisables : X_1 : capacité du réservoir de production (mm) et X_2 : coefficient d'échanges souterrains (adimensionnel).

Dans la conception du modèle, F représente la résultante des flux d'eau échangés entre la partie souterraine du bassin versant et sa partie externe, considérée comme complexe et par conséquent difficile à estimer avec une approche globale de modélisation hydrologique. Une valeur de X_2 supérieure à 1 représente un gain d'eau pour le bassin tandis qu'une valeur inférieure à 1 correspond à une perte d'eau. En pratique, X_2 agit en fait comme un paramètre correcteur permettant d'équilibrer les valeurs des débits observés et simulés.

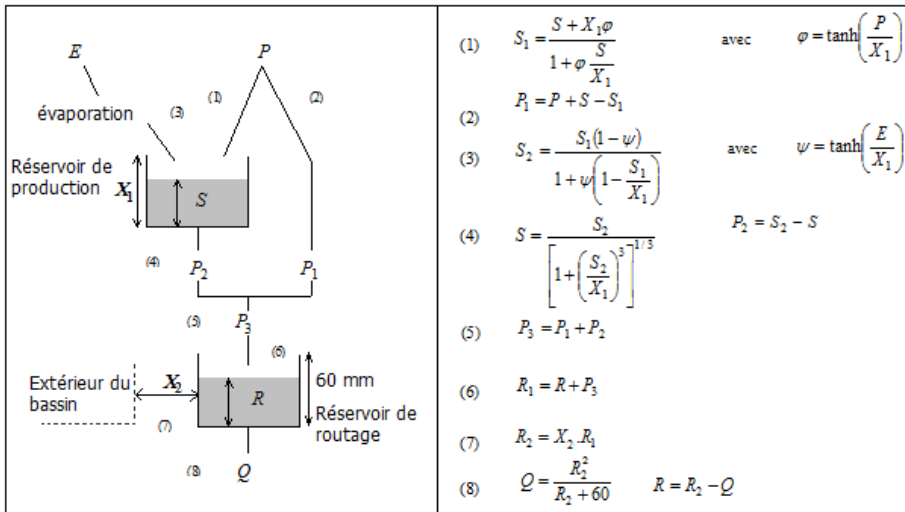


Figure 3 : Schéma de fonctionnement du modèle GR2M de Mouelhi et al. (2006)

L'évaluation des performances du modèle GR2M se fera avec le critère de Nash et Sutcliffe (1970) comme dans (Djellouli *et al.*, 2015 ; Soro *et al.*, 2018).

$$Nash(Q) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_i (Q_0^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_0^i - Q_m^i)^2} \right]$$

Avec : Q_0^i : débit mensuel observé ; Q_c^i : débit mensuel calculé ; Q_m^i : débit moyen mensuel observé sur l'ensemble de la période d'observation.

Les valeurs prises par le Nash indiquent la performance du modèle (Perrin, 2000) :

- Nash $\geq 90\%$: le modèle est excellent ;
- $80\% < \text{Nash} < 90\%$: le modèle est très satisfaisant ;
- $60\% < \text{Nash} < 80\%$: le modèle est satisfaisant ;
- Nash $< 60\%$: le modèle est mauvais.

Choix des périodes de calage et de validation

L'identification des périodes optimales de calage et de validation est faite sur la période 1973-1998.

- Principe du differential split-sample test

Ce test consiste à séparer la période disponible en deux (2) sous périodes indépendantes et présentant un caractère non-stationnaire (caractéristiques climatiques différentes d'une période à l'autre), de caler le modèle sur la première période et de le valider sur la deuxième puis inversement (Figure 4). Les découpages 1 et 2 correspondent à ce principe. Il s'agit de faire deux sous périodes de part et d'autre de l'année de rupture de stationnarité. Le découpage 1 correspond au calage sur la période d'avant rupture et à la validation sur la période d'après rupture ; le découpage 2 correspond au calage sur la période sèche et à la validation sur la période humide.

- Principe du split-sample test de (Klemes, 1986)

Il consiste au calage sur les deux tiers de l'échantillon de données disponibles et validation sur le dernier tiers et ce, sur la période déficitaire (découpage 3) et sur la période humide (découpage 4). Ce principe se conforme aussi aux recommandations de Gupta et Sorooshian (1985) et aux résultats de Perrin (2000).

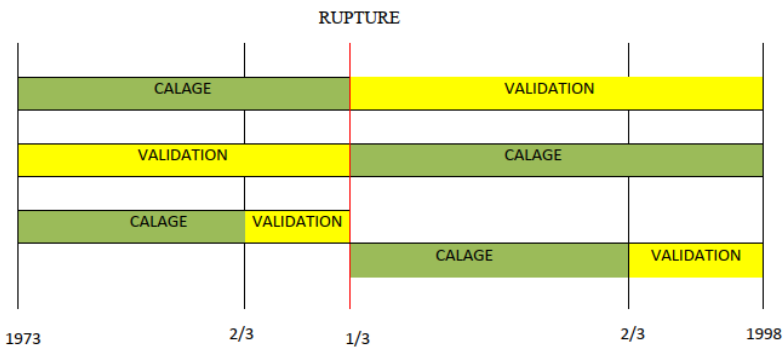


Figure 4 : Découpage de la chronique des données selon le principe du split-sample test

- Simulation croisée

Elle se déroule sous la contrainte que les deux périodes aient une longueur de plus de deux (2) ans avec une période de validation postérieure à la période de calage. Nous avons ainsi défini les périodes de longueur croissante dans les séries de pluie et de débits par cette évaluation en commençant par une longueur minimale de cinq (5) ans. L'augmentation de la longueur des séries se fait par des incréments successifs de cinq (5) années jusqu'à la longueur totale de la série (Diello, 2007). Le tableau 2 montre ce découpage. L'année de rupture permet d'avoir deux sortes de périodes :

- une période homogène au sens que l'on peut présumer qu'il n'y a pas de rupture au sein des débits et de pluie ;
- au contraire, inclure l'année de la rupture climatique.

Tableau 2 : Découpage en périodes croissantes de calage et de validation

PERIODES DE CALAGE	PERIODES DE VALIDATION
1973-1978	1979-1984 ; 1979-1989 ; 1979-1994 ; 1979-1998
1973-1983	1984-1989 ; 1984-1994 ; 1984-1998
1973-1988	1988-1993 ; 1988-1998
1973-1993	1993-1998
1979-1984	1985-1990 ; 1985-1995 ; 1985-1998
1981-1986	1987-1992 ; 1987-1997
1979-1989	1990-1995 ; 1990-1998
1979-1994	1995-1998

RESULTATS

Tests de rupture appliqués aux données pluviométriques

Les dates de rupture de stationnarité varient de 1968 à 1979 et s'accompagnent de diminution de la pluviométrie annuelle de 11 à 24% pour trois séries et par contre d'une augmentation de 7% pour la série d'Agnibilékro (Tableau 3).

Tableau 3 : Résultats des tests de rupture appliqués aux données pluviométriques

Stations	Périodes	Année de rupture	Moyenne avant rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Ecart moyen (%)
Bianouan	1973-1998	1979	1464	1309	- 10,58
Agnibilékro	1970-2002	1970	1095	1172	+ 7
Buakuc	1967-2002	1968	1767	1350	- 23,62
Enchi	1960-2002	1968	1700	1414	- 16,83

Test de stationnarité appliqué aux séries de débits moyens annuels

L'application de ce test a permis de déceler l'année 1980 comme année de rupture dans les séries de débits. Le déficit engendré par cette rupture est de 42,65%, avec des débits moyens de 29,26 m³/s et 16,78 m³/s respectivement avant et après cette date.

Modélisation de la relation pluie-débit par GR2M

Calage et validation croisée

Le calage du modèle sur les périodes 1973-1978, 1973-1983 et 1973-1988 donne les valeurs respectives de 54,10%, 59,30%, et 58,50%. Celui effectué sur les périodes 1979-1984 et 1981-1986 donne des valeurs respectives de 69,3% et 80,1%, jugées satisfaisantes. La validation sur les périodes 1979-1984 et 1979-1989, fournit respectivement des valeurs satisfaisantes de Nash de 65,6% et 61,7% et celle effectuée sur les autres périodes donne des valeurs de Nash inférieurs à 60%. La valeur moyenne de Nash au calage est de 64,26%. Cette valeur se dégrade pour atteindre 44,23% à la validation. Les meilleures valeurs de Nash tant en calage qu'en validation s'obtiennent sur des périodes longues de cinq (5) ans (Tableau 4). La forme des hydrogrammes observés est bien reproduite par le modèle. Les débits d'étiage sont bien simulés. Cependant, force est de constater que le modèle a du mal à bien reproduire les pics de crue (Figure 5).

Tableau 4 : Valeurs de Nash en calage et en validation par la méthode de simulation croisée

Période de calage	Nash calage	Période de validation	Longueur (années)	Nash Validation
Cal 73-78	54,10%	Val 79-84	5	65,60%
		Val 79-89	10	61,70%
		Val 79-94	15	58,40%
		Val 79-98	19	56,40%
Cal 73-83	59,3%	Val 84-89	5	52,50%
		Val 84-94	10	29,20%
		Val 84-98	14	44,4%
Cal 73-88	58,50%	Val 89-94	5	-7,60%
		Val 89-98	10	42,60%
Cal 79-84	69,30%	Val 85-90	5	43%
		Val 85-95	10	31%
		Val 85-98	13	45%
Cal 81-86	80,10%	Val 87-94	5	44,40%
		Val 87-98	11	52,70%
Moyenne	64,26%			44,23%

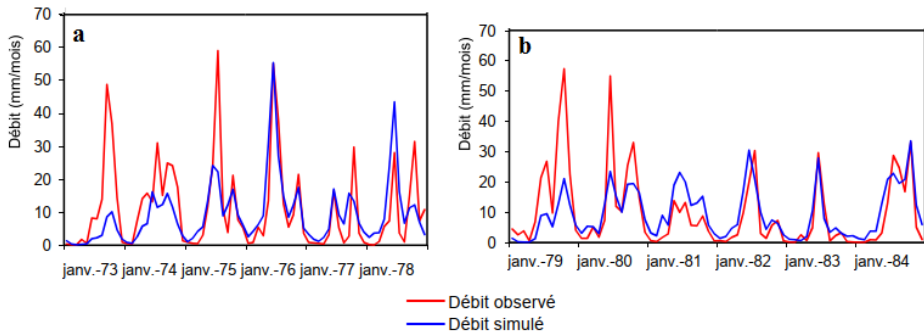


Figure 5 : Comparaison des hydrogrammes des débits observés et simulés : (a) calage sur 1973-1978 et (b) validation sur 1979 -1984

Simulation suivant le principe du differential split-sample test

Les valeurs des résultats de ce principe sont consignées dans le tableau 5. Les valeurs moyennes de Nash sont respectivement de 58,40% en calage et de 48,97% en validation. Les valeurs les plus élevées sont respectivement de 60,90% en calage et de 53,40% en validation. Les plus petites valeurs de Nash en calage et en validation sont respectivement 56,80% sur la période 1980-1998 et 44,10% sur la période 1973-1979.

Tableau 5 : Valeurs des paramètres et de Nash sur les périodes de calage (1973-1979) et de validation (1980-1998).

Période de calage	Nash/calage	Période de validation	Nash/validation
1973-1979	57,4%	1980-1998	44,1 %
1980-1998	56.8 %	1973-1979	50,50 %
1973-1976	60.9 %	1977-1979	53,40 %
1979-1991	58.6 %	1992-1998	47,1 %
Moyenne	58,40 %	Moyenne	48,97 %

DISCUSSION

L'application des tests de rupture a permis d'identifier des ruptures en 1979 (Bianouan), 1970 (Agnibilékro) et 1968 à Buakuc et Enchi dans les séries pluviométriques. Une rupture en 1980 a été identifiée dans la série hydrométrique à la station de Bianouan. La non stationnarité du régime hydrologique de la Bia, s'inscrit dans la logique générale qui admet que les

ruptures hydrométriques interviennent à la suite des ruptures pluviométriques (Kouadio, 2011). Les ruptures de 1979 et 1980 sont toutes deux tardives car ne s'intégrant pas à la fluctuation du régime pluviométrique observée à la fin des années 1960 et au début des années 1970 en Afrique de l'Ouest par le Borgne (1970) ; Servat *et al.* (1995) ; Savané *et al.* (2001), cités par Dao (2013). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Kouassi (2007) et Vissin (2007). Le premier a détecté sur le bassin du N'zi, par le test de Pettitt, une rupture en 1980, et le second, à l'échelle africaine, à Malanville à l'extrême Nord du bassin béninois du fleuve Niger, a détecté des ruptures en 1971 et 1979 par la même méthode.

Les déficits pluviométriques calculés par rapport aux années de ruptures identifiées sont compris entre 10% et 23%. Ces résultats sont conformes aux travaux réalisés en Côte d'Ivoire par Servat *et al.* (1998). Les ruptures tardives provoquent généralement de grands déficits. Les 10% de déficits pluviométriques observés dans la présente étude pourraient s'expliquer par le fait que la série est moins longue et n'inclut pas une longue période avant 1970 où les pluies annuelles sont élevées. Le déficit hydrométrique est de 42%. Pour Mahé et Olivry, (1995) ; Bricquet *et al.* (1997) ; Mahé *et al.* (2000), l'explication de l'écart entre déficit pluviométrique et hydrologique viendrait d'une contribution réduite des apports d'origine souterraine à l'écoulement de surface. Selon ces mêmes auteurs, les réserves d'eau souterraines diminueraient au fur et à mesure que le déficit pluviométrique se prolonge. Ainsi, une diminution de 19 à 33% de la lame d'eau infiltrée a été notée à Bocanda et Dimbokro plus au Nord du bassin de la Bia en Côte d'Ivoire (Fossou *et al.*, 2015).

Un excès pluviométrique de 7% a été enregistré à la station d'Agnibilékro. Ce résultat est en congruence avec ceux de Dao (2013) sur le bassin transfrontalier du Kolondiéba. Cet auteur a déterminé une rupture intervenue autour de 1992 engendrant un excès pluviométrique de 17% après cette année.

L'application du modèle GR2M aux données hydropluviométriques a donné dans l'ensemble des résultats satisfaisants malgré le caractère lacunaire des données. Avec la méthode de simulation croisée, incluant ou non la date de rupture, le modèle se comporte bien avec un Nash moyen en calage de 64,26%. Quant à la méthode du "differential split-sample test", nous n'avons noté qu'une seule valeur satisfaisante du critère Nash. Cette valeur obtenue en calage, est de 60,90%. En combinant les résultats des différentes méthodes, nous obtenons des Nash moyens de 61,66% en calage contre 47,96% en validation. La valeur la plus élevée en calage est de 80,10% obtenue sur une

période de cinq (5) ans. Ce résultat est soutenu par l'affirmation de Perrin (2000) qui stipule que cinq (5) ans semblent être la période la plus stable de calage. La plus faible valeur de Nash en validation est de -7,60%, obtenue sur la période 1989-1994. La forme des hydrogrammes observés est bien reproduite par le modèle et aussi les débits d'étiage sont bien simulés. Cependant le modèle sous-estime les pics de crue. Cette contre-performance pourrait avoir deux origines (Diello, 2007) : les contrastes climatiques et la non- prise en compte des états de surface du bassin versant (occupation du sol, barrages hydro-agricoles). Les valeurs de Nash dans notre étude sont similaires à celles obtenues par Diello (2007). En effet, sur des bassins versants du Burkina Faso, les résultats obtenus par cet auteur, ont mis en évidence trois éléments fondamentaux du comportement GR2M :

- un calage relativement moyen avec des critères de Nash voisins, voire relativement supérieurs à 50% ;
- une validation non satisfaisante caractérisée par des critères de Nash généralement inférieurs à 50% avec assez souvent des Nash négatifs et des écarts importants entre les hydrogrammes observés et calculés sur les différentes périodes de validation.

Par ailleurs, Kouamé *et al.* (2013) dans une comparaison des performances du modèle GR2M sur le bassin versant du Sassandra et celui du N'zi-Bandama montre que les performances sont plus satisfaisantes en calage sur le bassin versant du Sassandra que sur le bassin versant du N'zi-Bandama, alors qu'en validation c'est l'inverse. Vissin (2007) a utilisé ce modèle pour des études en Afrique de l'Ouest, sur des bassins béninois. Il a obtenu des valeurs de Nash supérieures à 60%. 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 résultats de Ouédraogo (2001) 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 est égale à 76% avec la plupart des valeurs supérieures à 60%. En phase de validation, une dégradation du critère de Nash a été observée. La moyenne du critère n'est plus que de 48% avec l'apparition des valeurs négatives de Nash.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de simuler les écoulements dans le bassin de la Bia. Des ruptures pluviométriques ont été identifiées par la procédure bayésienne de Lee et Leghinian, et le test de Pettitt en 1979 pour Bianouan, 1968 pour Buakuc et Enchi. Ces ruptures ont engendré généralement des déficits compris entre 10% et 23% dans les séries pluviométriques. Le déficit hydrométrique est de 42,65%. Le calage selon la méthode de la simulation croisée, a donné des résultats satisfaisants comparativement à la méthode du split sample test. Par la simulation croisée, la valeur moyenne de Nash est de 64,26% et de 43,68% respectivement en calage et en validation. Quant à la méthode du "differential split-sample test" a donné en moyenne 58,42% de Nash en calage et 48,97% en validation. Par ailleurs, sur des périodes de cinq (ans), (notamment 1979-1984 et 1981-1986), des valeurs satisfaisantes de Nash ont été obtenues ; elles sont respectivement de 69,30%, de 80,10%.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADJANOHOUN E, GUILLAUMET J. L. (1971). La végétation. In *Le Milieu Naturel de Côte d'Ivoire*. Mémoire ORSTOM 50, pp. 161-162.
- ARDOIN B. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano-Sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 351p.
- AUORE D., SYLVIA D., CATHERINE S., OLIVIER D. (2008). Statistique des extrêmes dans les bassins faiblement jaugés : application d'un modèle global pluie-débit à cinq bassins versants en région Wallonne (Belgique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* vol.12, no 4, pp. 379-391.
- BRICQUET J. P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M., OLIVRY J.C. (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *PHI-V*, 6, pp. 83-95.
- DAO A. (2013). Caractérisation des composantes du cycle de l'eau et processus de production de l'écoulement : cas du bassin versant transfrontalier au Sud du Mali en milieu tropical de socle. Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, 225 p.
- DIELLO P. (2007). Interrelation Climat-Homme-Environnement dans le Sahel Burkinabé : Impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 367 p.

- DJELLOULI F., BOUANANI A., BABA-HAMED K. (2015). Caractérisation hydrologique du bassin d'Oued Louza à l'aide d'un modèle pluie-débit global. *Larhyss Journal*, no 23, pp. 275-286.
- DUBREUIL P. (1974). Initiation à l'analyse hydrologique. Mémoire ORSTOM 50, pp. 129-136.
- FAO (2017). La pénurie d'eau – un des plus grands défis de notre temps. Disponible en ligne : <http://www.fao.org/zhc/detail-events/fr/c/880882/> (page consultée le 31/12/2019).
- GIRARD G, SIRCOULON J, TOUCHEHBEUF P. (1970). Aperçu sur les régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire. Orstom Centre d'Adiopodoumé, Service Central Hydrologique, Rapport ORSTOM, pp. 109-155.
- FOSSOU R.M.N, LASM T., SORO N., SORO T., SORO G., DE LASME O.Z., BAKA D., ONETIE O.Z., OROU R. (2015). Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Larhyss Journal* no 21, pp. 97-120.
- GUPTA V.K., SORROSHIAN S. (1985). The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. *Journal of hydrological* 81, pp. 57-77.
- HUBERT P., CARBONEL J. P., CHAUCHE A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology* 110, pp. 349-367.
- HAZIZA E. (2003). Modélisation mensuelle pluie-débit/Apport de la spatialisat-ion-Cas des données de sols. DEA, Université Montpellier II, 87 p.
- KLEMES V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*. 31, pp. 13-24.
- KONE S. (2015). Apport de la Géostatistique à la Modélisation Hydrologique : Etude de Bassins Hydrologiques en Zone Soudano-Sahélienne. Thèse en Hydrologie de l'Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée, ISFRA-USJPB, Bamako- Mali, 315p. Disponible en ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01166018> (Page consultée le 10 juin 2018).
- KOUADIO Z. A (2011). Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique. Cas des bassins versants côtiers de l'Agnéby et du Boubo, Thèse unique de Doctorat de l'Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 188p.
- KOUAKOU K. E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse Unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 186 p.

- KOUAME K. F., KOUASSI A. M., N'GUESSAN B. T. M., KOUAO J. M., LASM T., SALEY M. B (2013). 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). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 2, no 2, pp. 92-103.
- KOUASSI K.M. (2008). Modélisation pluie-débit à la station hydrométrique de Bianouan sur la rivière Bia (Sud-Est Côte d'Ivoire) : Application des réseaux de neurones artificiels, DEA, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 55 p.
- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., SALEY M.B., KOFFI Y.B. (2007). "Identification de tendances dans la relation pluie-débit et recharge des aquifères dans un contexte de variabilité hydroclimatique: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire," *European Journal of Scientific Research*, vol. 16, no 3, pp. 412-427.
- LUBES H., MASSON J.M., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., BOYER J.F. (1994). Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. *Etudes bibliographiques. Programme ICCARE, Rapport n°3, ORSTOM, Montpellier.*
- MAHE 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. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, Sciences de la terre et des planètes*, vol. 330, pp. 689-692.
- MAHE G., OLIVRY J.C. (1995). Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse* no 1, vol.6, pp. 109-117.
- MOUELHI C., MICHEL C., PERRIN C., ANDREASSIAN V. (2006). Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of hydrology* no 328, pp 283 -296.
- NASH J. E., SUTTCIFFE J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290.
- NOUNANGNONHOU T.C., FIFATIN F.X.N., LOKONON B.E., ACAKPOVI A., SANYA E.A. (2018). Modelling and prediction of Ouémé (Bénin) river flows by 2040 based on GR2M approach. *Larhyss Journal*, no 33, pp. 71-91.
- OUEDRAOGO M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. *Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale,* Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 257 p.
- PERRIN C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 527p.

- PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16 p. Disponible en ligne : <http://www.cemagref.fr/webgr> (Page consultée le 27 juillet 2009).
- SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., BOYER J.F., LUBES-NIEL H., FRISTCH J.M., MASSON J.M., MARIEU B., (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. IAHS Publications no 252, pp. 323-337.
- SAVANE I., COULIBALY K. M., GIOAN P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région sémi-montagneuse de Man. Sécheresse vol. 12 no 4, pp. 231-237.
- SERVAT E., PATUREL, BROU K., BOYER J F. (1995). Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne : Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. Sécheresse, 6, pp. 95-102.
- SORO G. E., NOUFE D., GOULA BI T. A. (2018). Analyse de la sensibilité d'un modèle hydrologique global aux estimations de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle : application au bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire. Larhyss Journal, no 33, pp. 155-168.
- VISSIN E.W. (2007). Impact de la variabilité climatique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, université de Bourgogne, 286 p.
- YAO A.B (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 225 p.