



CONTRIBUTION DU MODELE GR4J A LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'AGNEBY AU SUD- EST DE LA COTE D'IVOIRE

CONTRIBUTION OF GR4J MODEL FOR MODELING AGNEBY WATERSHED RUNOFF IN SOUTHEAST OF COTE D'IVOIRE

***KAMAGATE B., DAO A., NOUFE D., YAO K.L.,
FADIKA V., GONE D.L., SAVANE I.***

Laboratoire de Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua,
Côte d'Ivoire ; 02 BP 801 Abidjan 02

daoamidou@hotmail.fr

RESUME

Le bassin versant de l'Agnéby situé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire présente une vulnérabilité face au changement climatique qui se manifeste par une sensibilité accrue aux situations extrêmes (inondation et sécheresse) depuis le début de la décennie 1970. Ce déterminisme naturel semble être renforcé par une population galopante dont les activités économiques sont liées aux ressources en eau. Vue cette problématique dont l'enjeu est de satisfaire la demande en eau du bassin, nous nous sommes proposés de faire une modélisation hydrologique des écoulements en vue d'une évaluation immédiate du bilan hydrologique. Pour y parvenir des données journalières de précipitations, d'évapotranspiration et de débits collectées sur la période 1984-2009 ont été éjectées dans le modèle GR4J afin d'apprécier sa performance à simuler les écoulements. Les résultats ont donné des valeurs de Nash en calage globalement satisfaisantes (60-80%). Cela a mis en évidence une bonne performance du modèle à reproduire les écoulements sur le bassin. Ainsi, le bilan hydrologique calculé, a permis de constater que 75% de la pluie moyenne annuelle estimée à 1168 mm sur la période 1984-2009 s'est évaporée. La part de la lame d'eau écoulee est de 2% tandis que l'infiltration est de l'ordre de 23%.

Mots clés : Modèle GR4J, bilan hydrologique, bassin versant de l'Agnéby, Côte d'Ivoire

ABSTRACT

Watershed Agneby is located southeast of the Côte d'Ivoire. This basin has a vulnerability to climate change manifested by an increased sensitivity to extreme situations (floods and drought) since 70's. This natural determinism seems to be reinforced by population increasing whose economic activities are based on water resources. View this problem which challenge is to satisfy water demand; we proposed to model the flows for an immediate assessment of the water balance. To achieve this, data of precipitation, evapotranspiration and runoff discharge collected over the 1984-2009 period were ejected in GR4J model to assess its performance in runoff simulating. The results gave satisfactory wedging in Nash values (60-80%). In addition, the comparison of observed and simulated hydrographs showed that the flow dynamics is well respected and floods are reproduced in calibration and validation. All these results have shown a good performance of GR4J model to reproduce the flows in the basin. Thus, the calculated water balance showed that 75% of the annual average rainfall estimated at 1168 mm for the period 1984 to 2009 has evaporated. The runoff is about 2%, while infiltration is about of 23%.

Keywords: GR4J model, water balance, Agneby watershed, Côte d'Ivoire

INTRODUCTION

L'Afrique de l'Ouest a subi une sécheresse particulièrement forte durant les quarante dernières années. Calculé par rapport à la période 1950-1970, le déficit pluviométrique occasionné sur la période 1970-1990 a été d'environ 30% au Sahel (Sénégal, Mali, Burkina Faso et Niger) et légèrement moins marqué pour les pays bordant le golfe de Guinée (Mahé *et al.*, 2005). Toutefois, la tendance aujourd'hui de cette sécheresse est à la modération notamment dans les zones les plus anciennement marquées comme au Niger et au Burkina-Faso (LebeL et Ali, 2009). Cette baisse des précipitations a entraîné une chute importante des écoulements des grandes rivières. En effet, le fleuve Sénégal a perdu 60% de ses écoulements pour une baisse pluviométrique de 30% tandis que l'Ouémé au Bénin a perdu 40% de son écoulement pour un déficit des précipitations allant de 15 à 20% (Kamagaté *et al.*, 2006). Il en est de même pour l'écoulement annuel du Bani au Mali, principal affluent du fleuve Niger qui s'est vu amputé de plus de 70% de ses eaux (Dao, 2013). Les conditions hydro-climatiques sur le bassin de l'Agnéby situé en zone forestière de la Côte d'Ivoire, sont à l'image de celles de l'Afrique de l'Ouest. En effet, la Côte d'Ivoire a connu 4 périodes

de sécheresse très marquée au cours du 20^{ème} siècle : l'année 1943, les années 1968-1970, les années 1982-1983 et l'année 1993 (Brou *et al.*, 2005). Ces années de sécheresse s'inscrivent dans le phénomène général de la sécheresse globale observée depuis la fin de la décennie 1960. Ainsi, le début de la longue période de sécheresse qui sévit depuis 1970 est identifiable par une rupture de la stationnarité des séries d'observations pluviométriques. La baisse pluviométrique qui s'en est suivie, a été remarquée même dans le Sud forestier et l'Ouest montagneux (Kouamé, 2010). Au-delà de cette évolution générale, le comportement interannuel de l'espace du littoral se distingue de celui des régions intérieures, la variabilité climatique y est souvent moins intense (Brou, 1997). Cette variabilité climatique s'est aussi manifestée à l'échelle saisonnière. Elle a été également accompagnée par une diminution du nombre de jours de pluie à partir de la décennie 1970 (Kouassi, 2007). Depuis les années 1970, les modules annuels de nombreux cours d'eau sont inférieurs à la moyenne générale calculée sur la période 1950-2000 (Savané *et al.*, 2001).

Les bassins des fleuves ivoiriens font partie des fleuves les plus touchés par la baisse des écoulements dans la région ouest africaine (Ouédraogo, 2001). En effet, un déficit moyen de 47% est enregistré au niveau des débits des cours d'eau ivoiriens (Servat *et al.*, 1998). En plus, de la variabilité climatique que subit le bassin de l'Agnéby, il est le siège d'une forte pression anthropique qui lui a fait perdre plus de 2% de son couvert végétal entre seulement entre 1990 et 2001 (Kouadio, 2011). Dans cette partie du pays située en milieu granitique de socle, l'eau de surface demeure la principale source d'adduction en eau potable de la ville d'Agboville (chef-lieu de région). Les eaux souterraines y sont logées dans les aquifères superficiels d'altérites peu potables et les aquifères de socle fissurée sous-jacents dont l'exploitation nécessite de gros moyens d'investigations.

Vue cette problématique dont les enjeux sont d'ordre divers : demandes en eau de consommation et demande en eau pour les besoins agropastoraux, il apparaît nécessaire de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Ce travail a pour objectif de déterminer les capacités du modèle conceptuel GR4J (Génie Rural à 4 paramètres avec un pas de temps Journalier) à modéliser les écoulements sur le bassin versant de l'Agnéby dans un contexte de forte variabilité climatique et intensification agricole.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Situation géographique

Le bassin versant de l'Agnéby à Agboville d'une superficie de 4693 km², est situé en zone forestière entre les longitudes 340000 à 420000 mètres et les latitudes 650000 à 770000 mètres dans le référentiel UTM Clarke 1880, fuseau 30. Il est drainé par la rivière Agnéby qui se jette dans la lagune Ebrié au voisinage de l'Océan Atlantique au Sud de la Côte d'Ivoire. La ville d'Agboville retenue comme exutoire de la présente étude est à plusieurs dizaines de kilomètres au Nord de la lagune Ebrié (Figure 1).

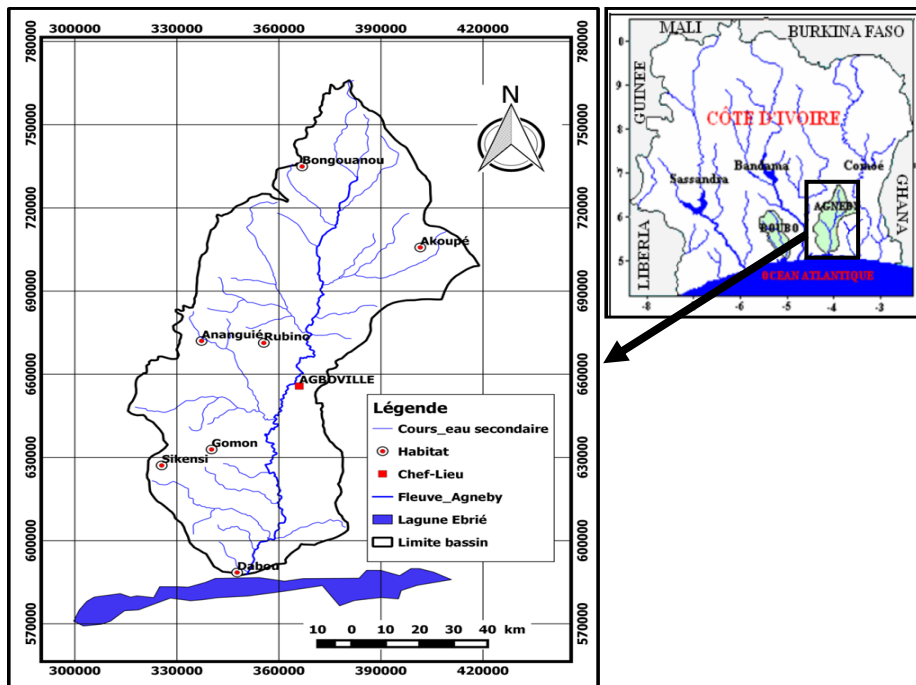


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'Agnéby

Climat et végétation

Le bassin versant de l'Agnéby à Agboville est sous l'influence du climat équatorial de transition marqué par quatre saisons : une grande saison sèche, de

décembre à mars précède d'une grande saison pluvieuse, d'avril à juillet tandis que la petite saison pluvieuse d'octobre à novembre fait suite à la petite saison sèche d'août à septembre. L'inégale répartition des saisons est due aux mouvements ascendant et descendant du FIT (Front Intertropical). La pluviométrie annuelle atteint et dépasse souvent les 2000 mm (Kouamé, 2007). La végétation du bassin est composée de forêt dense humide, de forêt défrichée, de forêt marécageuse et très rarement de savanes incluses (Avenard, 1971). Selon les travaux de Kouadio (2011) sur le bassin versant, la forêt dense est passée de 335164 ha en 1990 à 274783 ha en 2001, soit une régression de 60381 ha correspondant à un taux de déforestation de 2%.

Géologie

Les formations géologiques de la zone étudiée sont constituées de roches cristallines essentiellement schisteuses, fortement plissées et métamorphosées du birimien, parsemées de tâches granitiques. Dominé en grande partie par le socle cristallin précambrien (92%) dans sa partie supérieure, le bassin appartient au domaine Protérozoïque (moyen et inférieur) qui a été structuré au cours des mégacycles orogéniques éburnéens composé des formations schisteuses birimiennes auxquelles sont associées des formations granitiques isolées ou intrusives (Delor *et al.*, 1992).

Population et activités économiques

Selon MINAGRA (2001), pour une population estimée à environ 730 000 habitants, près de 85% ont leurs activités économiques basées sur des cultures à vocation vivrière (manioc, maïs, igname, riz pluvial) ou de rente (banane douce, café, cacao, palmier à huile et hévéa). Parmi ces agriculteurs, il en a qui pratique des cultures de contre-saison nécessitant une irrigation (riz de bas-fonds, banane douce, aubergines et tomates). Les cultures de rente occupent à elles seules près de 60% des superficies. La Société de Distribution d'Eau de Côte-d'Ivoire (SODECI) assure l'approvisionnement en eau potable des populations en exploitant essentiellement les eaux de surface.

Ainsi, à Agboville, l'eau de la rivière Agneby est traitée et servie aux populations. Ces prélèvements modifient très sensiblement le régime hydrologique du cours d'eau (Kouamé, 2013).

MATERIEL

Données

Les données d'entrée du modèle GR4J sont des données hydro-climatologiques constituées de chroniques journalières de précipitations, d'évapotranspirations (ETP) et de débits. Les précipitations sont extraites de la base de données de la SODEXAM (Société d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique) collectées à travers un réseau de mesure de 7 postes pluviométriques. La pluie moyenne est calculée par la méthode de Thiessen. Etant donné qu'il n'existe pas de station météorologique sur le bassin versant, les données d'ETP sont celles de la station météo l'aéroport d'Abidjan située dans la même zone climatique. Les données de débit sont obtenues auprès de la Direction des Normes de la Réglementation et de la Qualité (DNRQ) et de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH). Elles sont enregistrées à la station hydrométrique d'Agboville. Les caractéristiques de toutes ces données sont mentionnées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des données de l'étude

Stations	Période	Durée (ans)
Séries pluviométriques		
Bongouanou	1947-2013	66
Arrah	1976-2013	37
M'batto	1976-2013	37
Akoupé	1979-2010	31
Céchi	1950-1999	49
Adzopé	1944-2010	66
Agboville	1923-2013	90
Série hydrométrique		
Agboville	1955-2012	57
Série de l'évapotranspiration potentielle (ETP)		
Abidjan	1984-2012	28

METHODES

La méthodologie de la modélisation hydrologique sur le bassin est expliquée avec l'étalage du schéma de fonctionnement du modèle GR4J exécutable sous Microsoft Excel.

Fonctionnement du modèle GR4J

La conception du modèle GR4J est présentée par la figure 2.

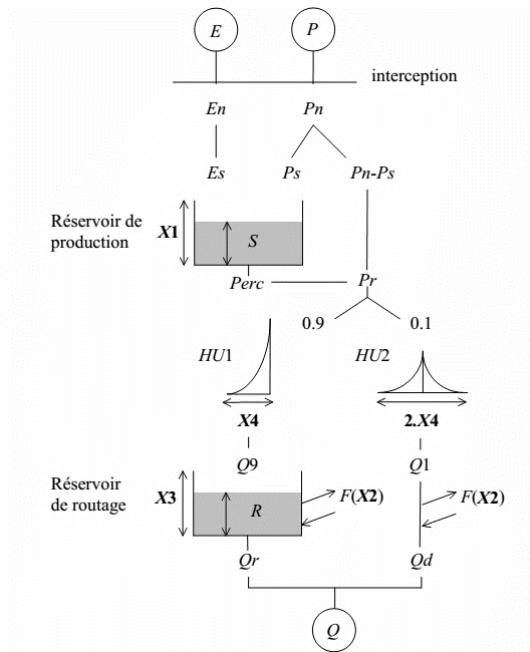


Figure 2 : Structure du modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003)

On désigne par P (mm) la hauteur de pluie et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP). P est une estimation de la pluie du bassin et E peut être issue d'une courbe d'ETP moyenne interannuelle. Le modèle a quatre paramètres à optimiser en calage que sont :

- $X1$: capacité du réservoir de production (mm),
- $X2$: coefficient d'échanges souterrains (mm),
- $X3$: capacité à un jour du réservoir de routage (mm),

- X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours).

Plus d'informations sur son fonctionnement sont disponibles à l'adresse : http://webgr.irstea.fr/modeles/journalier-gr4j-2/fonctionnement_gr4j/

Calage et validation du modèle

Calage

L'objectif de cette étape est de caler les 4 paramètres du modèle GR4J en minimisant, via un algorithme numérique itératif, l'erreur entre les débits simulés et les débits observés. La simulation avec le modèle GR4J requiert une période d'initialisation des états des réservoirs de stockage et de routage. Dans la procédure utilisée, la période d'initialisation est prise égale à un an (12 mois). L'erreur à minimiser est quantifiée sous la forme d'un critère numérique également appelé « fonction objectif », qui peut être défini de différentes façons. La « fonction objectif » utilisée ici est le critère de Nash et Sutcliffe (1970) qui s'exprime par l'équation 1.

$$NS = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sm,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{obs})^2} \right] \quad (Eq.1)$$

$Q_{obs,i}$ et $Q_{sm,i}$ sont respectivement les débits observés et calculés au pas de temps i ; Q_{obs} est la moyenne des débits observés sur la période considérée.

Dans la pratique, la performance du modèle est jugée selon les valeurs prises par le critère de NS (Quillat, 2007). On estime que la simulation est parfaite (excellent) lorsque le critère de NS est supérieur à 90%, acceptable (satisfaisant) lorsque le critère est compris entre 60% et 80%, mauvaise qualité lorsque le critère de NS est faible (<60%). Il existe des variantes pour le choix de la fonction objectif, en particulier NS peut être calculé non plus à partir des débits bruts Q (applications aux crues), mais à partir de leurs racines carrées (\sqrt{Q}) (Modèle polyvalent : efficace dans plusieurs cas possibles), voire de leurs logarithmes $\log(Q)$ (applications aux étiages). Ces variantes permettent de favoriser davantage la contribution au critère de NS de l'ensemble des jours présentant des débits faibles ($\log(Q)$), cela revêt un intérêt pour la prévision d'étiage. D'une façon générale, l'opération de calage des paramètres du modèle est absolument nécessaire dans la mesure où GR4J est un modèle conceptuel qui ne repose pas sur une description physique des processus (Staub, 2008).

Validation

Cette étape qui ne doit pas être dissociée de la phase de calage, permet d'évaluer la robustesse du calage effectué consistant à éprouver les débits simulés avec les paramètres obtenus durant le calage sur une période de validation indépendante de la période ayant servi au calage (Klemes, 1986). Ainsi, la validation est faite de façon progressive sur des périodes différentes.

Simulation des écoulements et calcul du bilan hydrologique

Cette étape consiste à retenir la meilleure performance lors des phases de calage et faire la validation sur toute la série. Le bilan hydrologique du bassin versant découle des paramètres obtenus à l'aide de critère de NS calculé par le débit (Q) appliquée aux crues. Ce bilan concerne les quatre principales composantes du cycle de l'eau que sont les hauteurs de pluies (P), les évapotranspirations réelles (ETR), les lames d'eau écoulées (Q) et infiltrées (I). Il exprime le partage des précipitations entre celles-ci comme définit par l'équation 2.

$$P = Q + ETR + I \quad (\text{Eq.2})$$

La lame d'eau infiltrée (I) est déduite de l'équation 2 selon la formule donnée par l'équation 3.

$$I = P - (ETR + Q) \quad (\text{Eq.3})$$

L'ETR est déterminée par de l'équation 4.

$$ETR = (ETP - E_n) + E_s \quad (\text{Eq.4})$$

Avec : E_n : l'évapotranspiration nette et E_s : la quantité d'évaporation retirée du réservoir de production.

RESULTATS

Résultats des Calages et validations du modèle GR4J

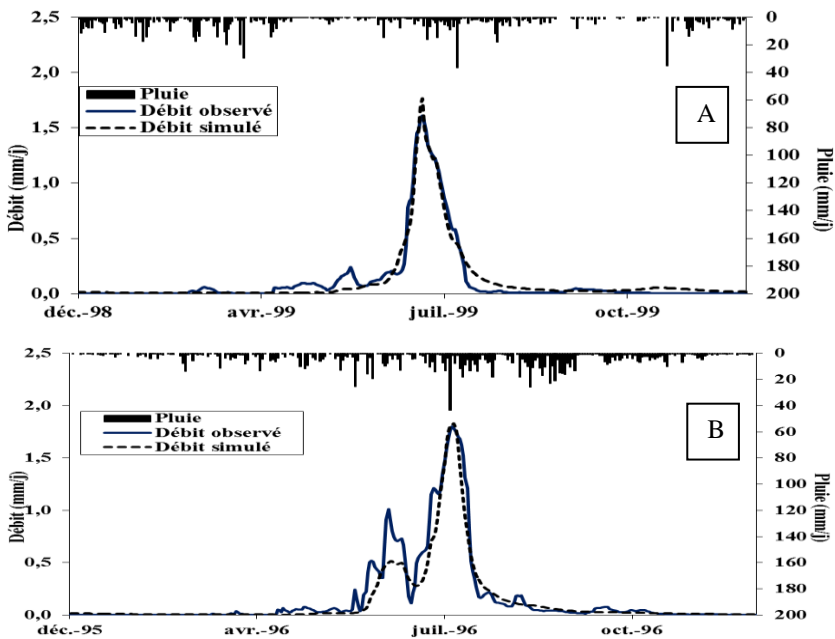
Les paramètres du modèle ainsi que les critères de performances obtenus à la fin des tests de calage et de validation sur la période 1984-2009 sont enregistrés dans le tableau 2.

La capacité du réservoir de production (X_1) varie de 6,97 mm à 3,18 mm pour un paramètre d'échange souterrain (X_2) négatif dans l'ordre de -5,40 mm à -2,32 mm. La capacité à un jour du réservoir de routage (X_3) varie de 6,13 mm à 3,89 mm pour un temps de base (X_4) dans l'ordre de 2,25 j. à 1,44 j. Lors des différentes périodes de calages, les valeurs de Nash-Sutcliffe (NS) varient de 96,2% à 62,5%. Ce qui montre que sur ces périodes, le modèle est «satisfaisant». Il simule bien les débits de crues. Par contre, en périodes de validations, le modèle a des valeurs de NS allant de 92,1% à 47,3%.

Tableau 2 : Synthèse des calages et validations du modèle GR4J

Longueur de la période de mise en route (1 année)			Sorties du modèle						
Phase de calage	de	Phase de validation	de	Paramètres				critères d'efficacité	
				X_1	X_2	X_3	X_4	NS calage (%)	NS validation (%)
		1995-1996							92,1
		1994-1996							82,0
1998-1999		1994-1997	3,8	- 5,0	5,6	2,2	96,2		71,5
		1993-1997							65,7
		1990-1997							63,1
		2007-2009							73,6
1985-1987		2006-2009	5,1	- 4,0	5,2	2,2	90,9		62,7
1996-1999		1984-1988	5,7	- 3,9	4,8	2,2	82,5		65,5
		1995-2000							71,9
2005-2009		1994-2001	6,6	- 2,4	4,2	2,1	68,8		61,3
1991-1996		1997-2003	3,1	- 5,3	6,1	1,6	75,0		65,6
		1997-2003							67,6
1990-1996		1997-2004	3,2	- 5,4	6,1	1,4	72,0		60,3
		2002-2009							63,1
1985-1992		2000-2009	6,0	- 2,7	4,2	2,2	62,5		43,8
1994-2002		1984-1992	6,9	- 2,3	3,9	2,0	76,1		47,3
1994-2003		1984-1993	5,8	- 3,8	4,5	2,2	73,3		49,4
1987-1997		1998-2008	6,0	- 3,4	4,3	2,2	63,3		54,7

Les débits calculés et observés en calage et en validation pour les différentes périodes, permettent de vérifier visuellement la performance du modèle utilisé (Figures 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 ; 11 et 12). De façon générale, il ressort des observations que les hydrogrammes calés et validés sont de bonne qualité. En effet, la dynamique des écoulements est bien respectée et les crues sont reproduites en calage et en validation. On constate qu'en calage les hydrogrammes simulés et observés sont presque confondus avec des écarts moins importants. Par contre, en validation le modèle surestime les débits calculés avec des écarts plus ou moins importants. Il faut noter que le modèle sous-estime les débits simulés sur certains pics de débits en 1989 ; 1995 ; 1996 et 2004 en calage. En validation le modèle surestime les débits observés sur certains pics de débits en 1990 ; 1997 ; 2007 et 2009. Il existe des estompes (dégradation des débits) dans les hydrogrammes simulés et observés en calage comme en validation. Cependant, il y a une bonne répartition saisonnière des pluies sur les périodes de calage et de validation.



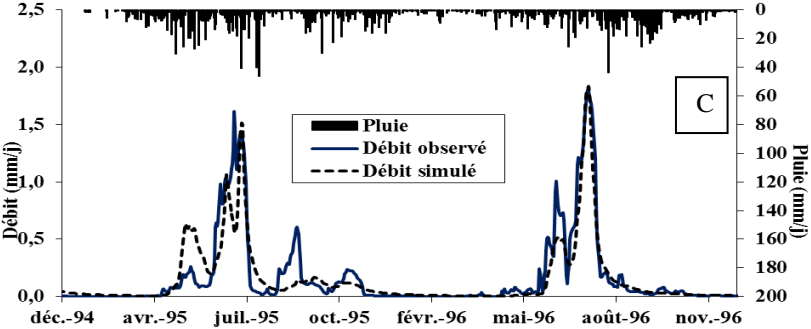


Figure 3 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1998-1999) et en validation (B : 1995-1996 ; C : 1994-1996)

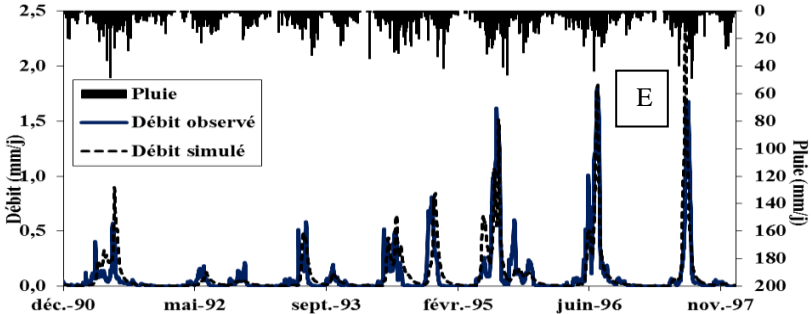
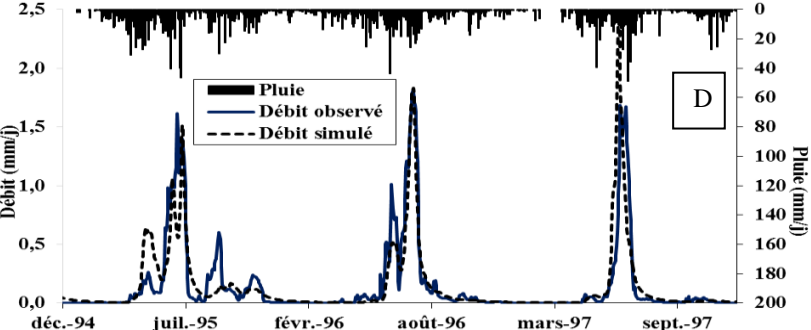


Figure 3 (suite) : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en validation (D : 1994-1997 ; E : 1990-1997)

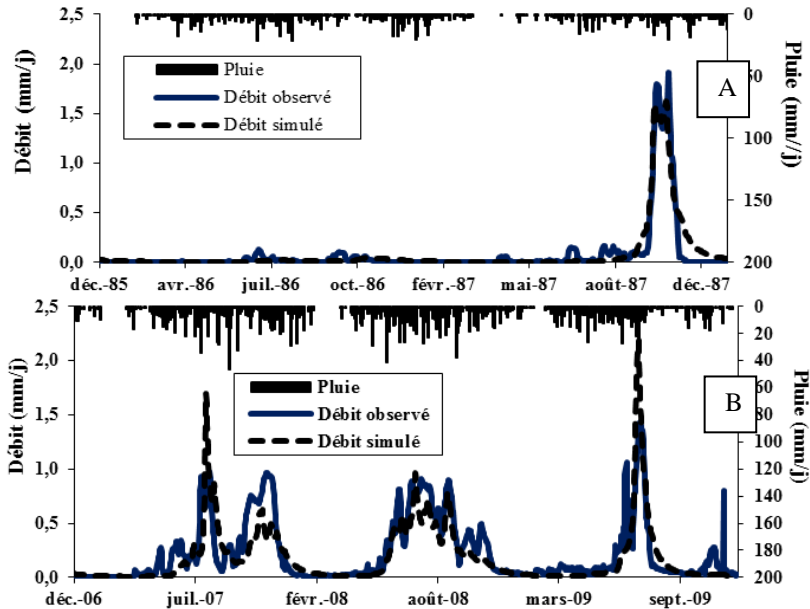


Figure 4 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1985-1987) et en validation (B : 2006-2009)

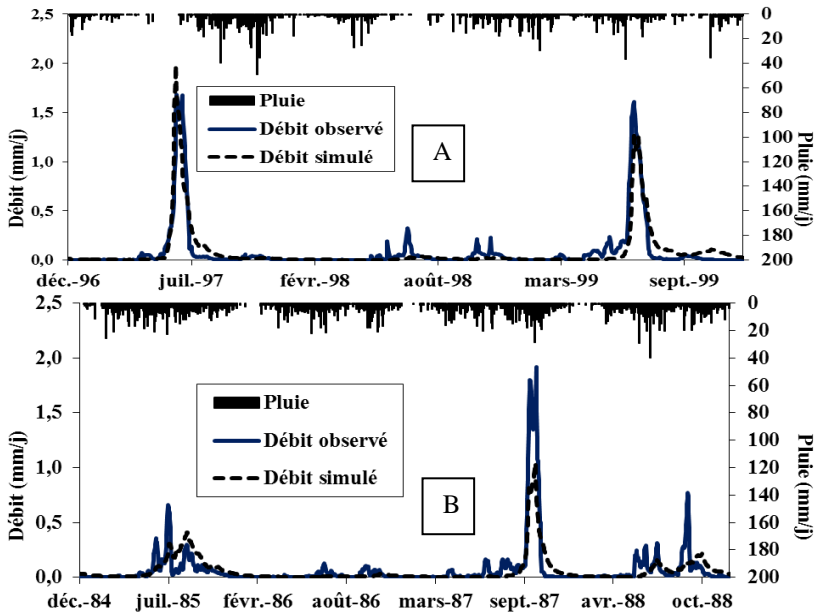


Figure 5 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1996-1999) et en validation (B : 1984-1988)

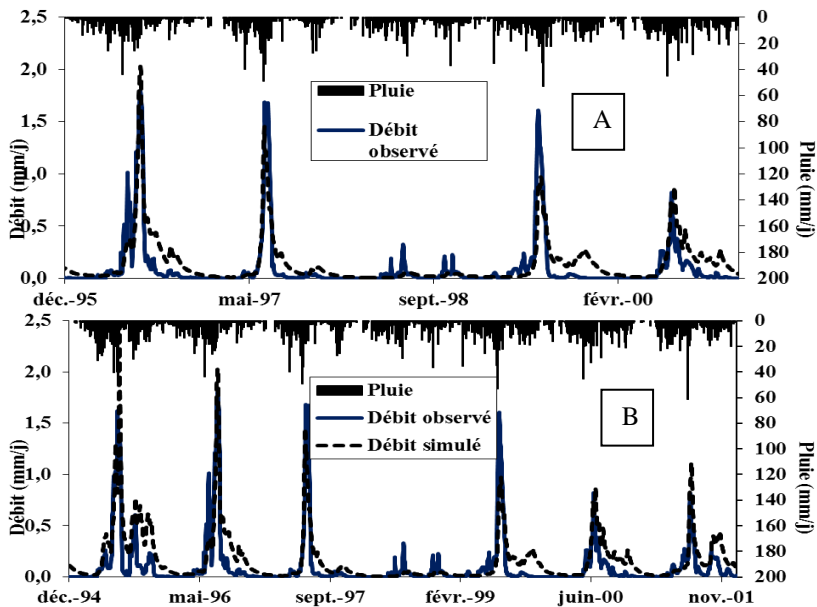


Figure 6 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1995-2000) et en validation (B : 1994-2001)

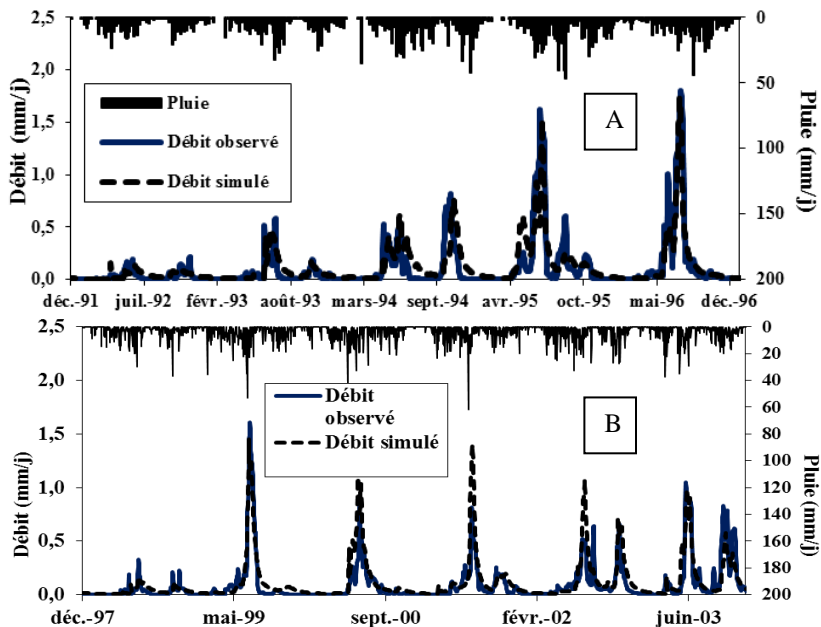


Figure 7 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1991-1996) et en validation (B : 1997-2003)

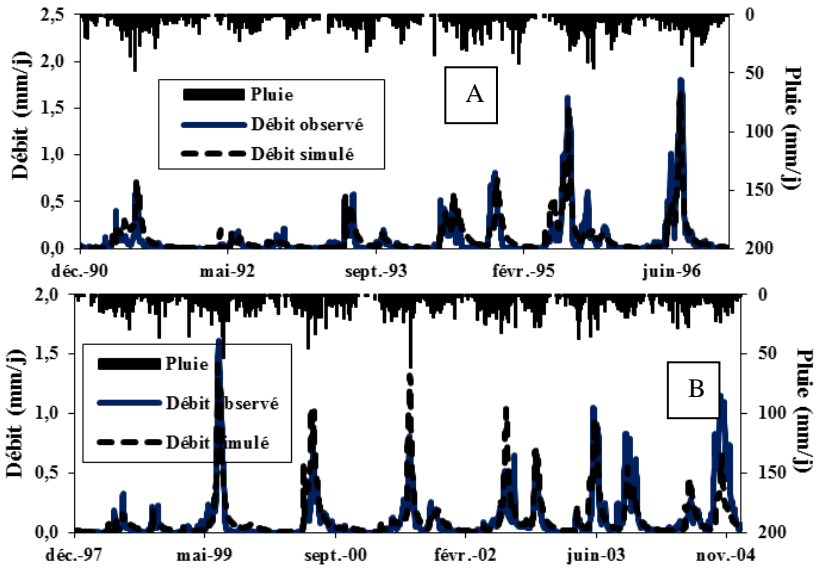


Figure 8 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1990-1996) ; validation (B : 1997-2004)

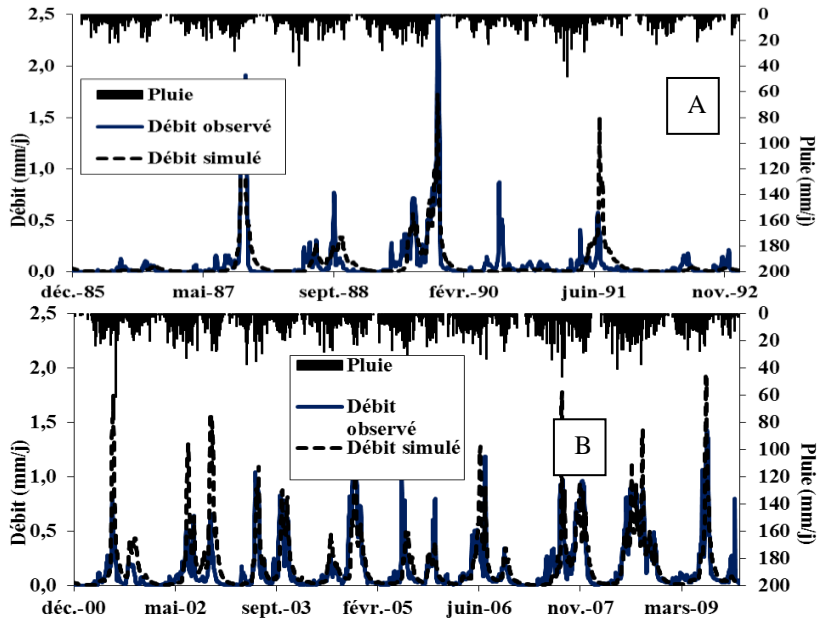


Figure 9 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1985-1992) et en validation (B : 2000-2009)

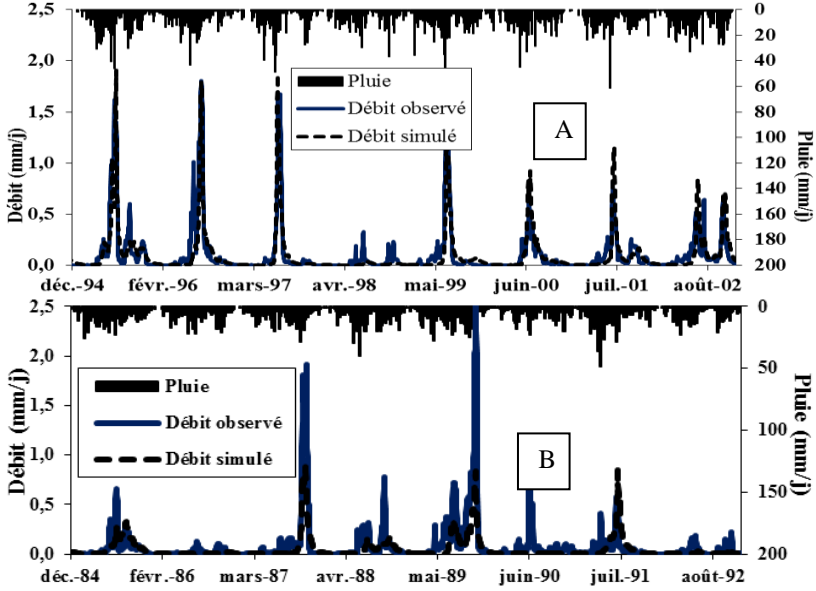


Figure 10 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1994-2002) et en validation (B : 1984-1992)

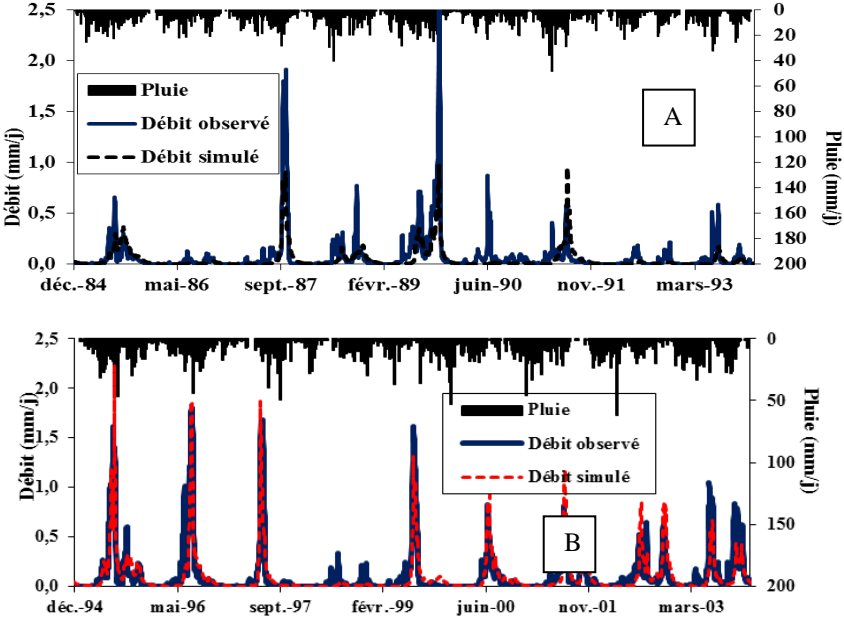


Figure 11 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1994-2003) et en validation (B : 1984-1993)

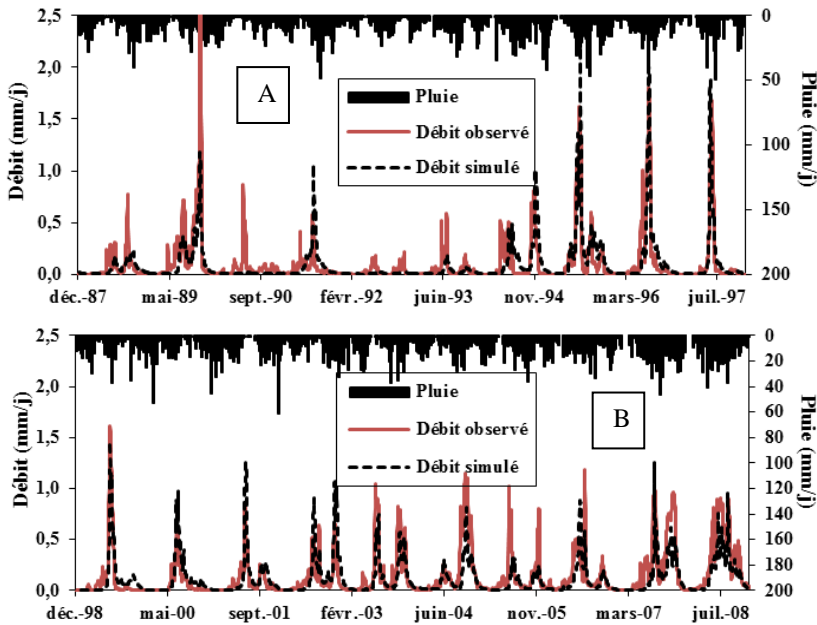


Figure 12 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés en calage (A : 1987-1997) et en validation (B : 1998-2008)

La synthèse de tous les résultats obtenus en calage et validation sur la période 1984-2009 a montré que le modèle est très sensible aux paramètres X_1 et X_3 par rapport aux autres paramètres. Ainsi donc, les valeurs de NS se dégradent lorsqu'on augmente progressivement le pas de temps (de 1 an, 2 ans, 3 ans, 4 ans, 5 ans ; 6 ans ; 7 ans ; 8 ans ; 9 ans et 10 ans) des périodes de calage. Cela est également constaté au cours des périodes de validation. Il faut noter que lorsque la période calage ou de validation est longue ; le critère d'efficacité du modèle se dégrade. Par conséquent le modèle perd sa robustesse sur de longues périodes.

Résultats des simulation du modèle GR4J sur la période 1984-2009

Le résultat graphique de la simulation des débits montre une assez bonne représentation entre les débits calculées et observées qui évoluent ensemble et les étiages sont correctement reproduits. Cependant, des écarts existent entre les débits de pointe des hydrogrammes simulés et des hydrogrammes observés

pour les années 1987 et 1989. En plus, les hydrogrammes simulés sont sous-estimés de 1984 à 1994 et de 2004 à 2009 par rapport aux hydrogrammes observés. Par contre les hydrogrammes simulés sont surestimés de 1995 à 2003. Cependant, les écarts demeurent acceptables avec une bonne répartition saisonnière des précipitations (Figure 13).

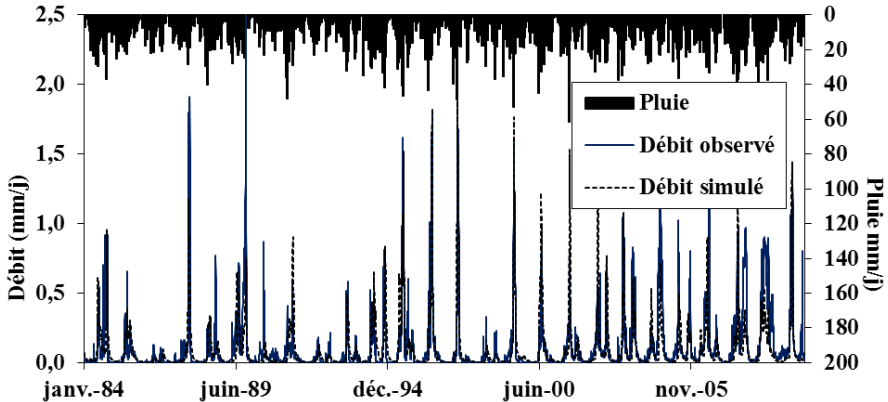


Figure 13 : Comparaison des hydrogrammes des débits calculés-observés sur la période 1984-2009 en phase de simulation

Le bilan hydrologique à l'échelle annuelle sur la période de 1984 à 2009 est présenté par la figure 14. La pluviométrie moyenne par an est estimée à 1168 mm. Cette pluviométrie annuelle est répartie entre ces différentes composantes que sont l'évapotranspiration réelle (ETR), les écoulements (Q) et l'infiltration (I) avec des valeurs respectives de : 881 mm, 28 mm et 269 mm. Il faut noter que près de 75% des précipitations sont évaporés tandis que le reste 25% constitue des eaux mobilisables.

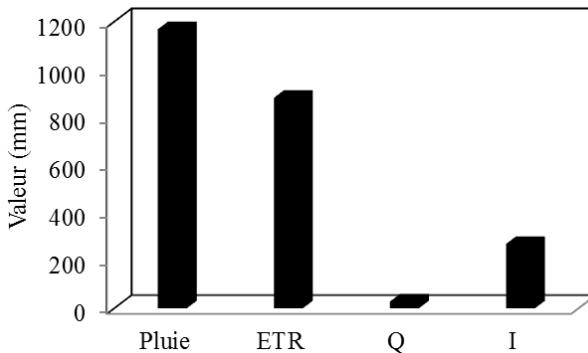


Figure 14 : Bilan hydrologique annuel sur la période 1984-2009

DISCUSSION

Les résultats de la compilation des données avec le modèle GR4J sur la période 1984-2009, ont données des critères de Nash-Sutcliffe (NS) satisfaisantes en calage variant globalement de l'ordre de 90% à 60%. En validation, le modèle a produit des valeurs de NS dans l'ordre de 80% à 60 aussi satisfaisantes. En revanche, des valeurs allant de 60% à 40% sont obtenues sur quelques sous-périodes de validation. Tous ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Yao (2012) sur bassin de la Lobo dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Par ailleurs, plusieurs auteurs (Perrin, 2000 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoin, 2004 ; Sighomnou, 2004 ; Kouassi, 2007 ; Kouakou et al., 2007; Mangoua, 2013) ont montré une dégradation des valeurs de NS en passant du calage à la validation. Ces contres performances du modèle en validation peuvent être attribués à la longueur de la période de validation. En outre, l'observation générale des hydrogrammes a montré des écarts entre les hydrogrammes des débits simulés et observés sur les pointes de crues. Ces décalages (retard ou avance) de l'hydrogramme simulé pourraient s'expliquer en grande partie par les contrastes climatiques et la non prise en compte des états de surface du bassin versant dont la dégradation du couvert végétal est mis en évidence par les travaux de (Kouadio, 2011).

Le bilan hydrologique ainsi calculé sur la période 1984-2009, montre que l'ETR est le paramètre dominant du cycle de l'eau avec un pourcentage de 75% des précipitations. Il semble est favorisé par le couvert végétal dominé plus ou moins par des forêts dégradées, la jachère et les champs de culture. Ensuite, vient la lame infiltrée qui représente 23% de la pluie. Elle représente la part susceptible d'alimenter les nappes. Selon Hughes (2004), les lames infiltrées, sont généralement comprises entre 10% et 30% des précipitations. Enfin, les lames d'eaux ruisselées (débits) que sont les écoulements de surface avoisinent 2% des précipitations moyennes du bassin. Ces faibles valeurs des écoulements peuvent s'expliquer par l'intensité des besoins domestiques et agropastoraux retenus par les barrages.

CONCLUSION

Ce travail a eu pour objectif d'estimer la performance du modèle GR4J à simuler les écoulements du bassin versant de l'Agneby à Agboville. En effet, les sorties du modèle ont donné des valeurs de Nash (NS) globalement satisfaisantes (90%-60%) sur l'ensemble de la période de calage 1984-2009

malgré une faiblesse des performances du modèle en validation sur quelques sous-périodes. De plus, l'observation des hydrogrammes calés et validés sont également de bonne qualité. En conséquence, la dynamique des écoulements est bien respectée et les crues sont reproduites en calage et en validation. En période de calage, le modèle a surestimé les débits calculés sur la période de 1987-1993 tandis que les hydrogrammes calculés et observés présentent de bonnes similitudes entre eux sur la période 1994-1997. En validation, l'hydrogramme des débits observés et les débits calculés sont nettement confondus sur la période de 1998-2003 tandis qu'il surestime les débits calculés sur la période de 2003-2008 avec des écarts plus ou moins importants.

Le bilan hydrologique calculé, a permis de constater que 75% de la pluie moyenne annuelle estimée à 1168 mm sur le bassin, s'est évaporée. La part de la lame d'eau écoulé est de 2% tandis que l'infiltration est de l'ordre de 23%.

Ainsi pour atteindre notre objectif définitif qui est celui de faire la modélisation du bassin avec un modèle distribué, les résultats de cette étude nous permettront de combler les lacunes observées dans les séries chronologiques des données hydrométriques. D'ores et déjà, ce modèle peut constituer une base pour la prévision des eaux mobilisables sur le bassin.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARDOIN-BARDIN. S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II (France), 440 p.
- AVENARD J.M. (1971). Aspect de la géomorphologie in : Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris, France, 50, pp.8-73.
- BROU Y. T. (1997). Analyse et dynamique de la pluviométrie dans le Sud forestier ivoirien : recherche de corrélations entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. Thèse de Doctorat de 3ème cycle de l'Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 211 p.
- BROU, Y.T., AKINDES, F. ET BIGOT, S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. Cahiers Agricultures, vol. 14, n° 6, pp 533-540.
- DAO .A. (2013). Caractérisation des composantes du cycle de l'eau et processus de production de l'écoulement : cas du bassin versant transfrontalier de Kolondieba au sud du Mali en milieu tropicale de socle. Thèse de Doctorat, Univ. Nangui Abrogoua, 225 p.

- DELOR C., DIABY I., SIMEON Y., YAO B., AKRE.D., TASTET J.-P., VIDAL M., TRAORE I., DOMMANGET A., CAUTRUJ.-P., KONAN G., CHIRON.J.-C., (1992). Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000 ; Feuilles Abidjan, Dimbokro et Abengourou. Direction des Mines et de la Géologie, Abidjan, Côte-d'Ivoire.
- HUGHES A.D., (2004). Incorporating groundwater recharge and discharge functions into an existing monthly rainfall model. Institute for Water Research, Rhodes University, Grahamstown 6140, South Africa: 297-311.
- KAMAGATE B., SEGUIS L., GONE D.L., FAVREAU G. KOFFI K. (2008) : Processus hydrogéochimiques et séparation d'hydrogrammes de crue sur un bassin versant en milieu soudano-tropical de socle au Bénin (Donga, haute vallée de l'Ouémé), Revue des sciences de l'eau, vol. 21, n° 3, 2008, p. 363-372.
- KLEMES V., (1986). Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological sciences, pp 13-24.
- 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, 188 p.
- KOUAKOU K. E., GOULA B. T. A., SAVANE I., (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso). European Journal of Scientific Research, 16 (1), pp 31-43.
- KOUAME K. F., (2010). Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL. Thèse d'État des sciences naturelles, Université de Cocody, 379 p.
- KOUAME K.I., (2007). Pollution physico-chimique des eaux dans la zone de la décharge d'Akouédo et analyse du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants. Thèse de Doctorat Unique, Univ. Abobo-Adjamé, 206 p.
- KOUAME L.B.C., (2013). Transport particulaire et dissous d'une rivière côtière de Côte d'Ivoire : cas de l'Agnéby. Diplôme Etude Approfondie, UFR Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua, 89 p.
- KOUASSI A.M., (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte-d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Univ. Cocody-Abidjan, Côte-d'Ivoire, 234 p.
- LEBEL T., ALI A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). Journal of Hydrology 375 (1-2), 52-64.

- MAHE G., PATUREL J.E., SERVAT E., CONWAY D. AND DEZETTER A., (2005). Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, N°300, pp 33-43.
- MANGOUA M.J., (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), 169 p.
- MINAGRA., (2001). Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales, Direction des statistiques, de la Documentation et de l'Informatique (DSDI). Recensement National de l'Agriculture. Abidjan, Côte d'Ivoire, 57 p.
- NASH J.E. AND SUTCLIFFE J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A
- OUEDRAOGO M., MAHE G., SERVAT E., (2001). Conséquences des déficits pluviométriques observés depuis le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale : Normes hydrologiques, gestion et planification des ressources en eau. *IAHS Pub*, N° 274, pp 149-156.
- PERRIN C., MICHEL C., ET ANDREASSIAN V., (2003). Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1 et 4), pp.275-289.
- QUILLAT B., (2007). Caractérisation hydrologique du bassin de la Garonne à l'aide d'un modèle pluie-débit global. Rapport de stage de 2ème année, Département Hydraulique et mécanique des fluides, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 54 p.
- SERVAT E., PATUREL J.-E., LUBES-NIEL H., KOUAME B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M. ET 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, pp 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 Université de Yaoundé1, Cameroun 209 p
- SAVANE I., KAPO C. ET GION P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eau souterraine dans la région semi montagneuse de Man. *Revue sécheresse*, vol.12, n°4, pp 232-237.
- STAUB J.F., (2008). Prévision d'étiage par modélisation hydrologique : mise au point d'une méthode d'évaluation. Rapport de Master 2, UFR Sciences et Techniques, Université de Tours, pp 16-17.
- YAO A.B., GOULA B.T.A., KOUADIO Z.A., KOUAKOU K.E., KANE A ET SAMBOU S., (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte-d'Ivoire *Rev.Ivoir.Sci. Technol.*, 19 (2012) pp 136-157.