

Utilisation du Modèle GR4J pour la Simulation des Débits d'Étiage du Fleuve Mono (Bénin, Togo) à l'Exutoire d'Athiémé

¹Coffi Justin NOUMON*, ²Domihio Japhet KODJA, ¹Naboua KOUHOUNDI, ⁴Sostelle HOUSSOU,
^{2,3}Ernest AMOUSSOU, ¹Luc O. SINTONDJI, ²Expédit VISSIN, ¹Euloge K. AGBOSSOU.

¹Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME), Faculté des Sciences Agronomiques,
Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526 Cotonou (Bénin).

²Laboratoire Pierre Pagney Climat Eau Ecosystèmes et Développement, Université d'Abomey Calavi 01 BP
526 Cotonou (Bénin).

³Université de Parakou, DGAT/FLASH.

⁴Communauté Electrique du Bénin, Bénin/Togo.



Résumé – La gestion des ressources en eau recouvre des questions telles que l'hydrologie, les besoins des populations, la planification et la réalisation des infrastructures, la préservation de la ressource et sa gouvernance. Des méthodes d'investigations pour une meilleure connaissance des ressources en eau existent pour une meilleure description et une gestion des problèmes à l'échelle bassin versant par l'exploitation des données hydroclimatiques et la mise en œuvre de mécanismes de gestion durable des ressources du bassin (Zannou, 2011 ; Fofana, 2015).

L'objectif de la présente étude est de simuler les débits d'étiage du fleuve Mono à l'exutoire d'Athiémé en prévision de l'utilisation durable des ressources en eau à des fins agricoles. Les données hydroclimatiques journalières (Pluie, Evapotranspiration, Débits), sur la période de 1970 à 2019, ont été recueillies et exploitées avec l'utilisation de la version Perrin et al., (2003) du modèle Génie Rural à 4 Paramètres Journaliers (GR4J) à l'aide du logiciel R.

Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe avant la construction du barrage en 1988, sont de l'ordre de 70% (sous-estimation) en calage et validation et les valeurs de KGE (Gupta et al., 2009) de 0,8317 et 0,8421 (proches de 1). Ces valeurs traduisent une bonne performance et robustesse du modèle GR4J sur le bassin du Mono. Mais ces valeurs sont très dégradées sur la période après barrage du fait du régime hydrologique modifié par les lâchers d'eau lors du turbinage, contrariées par le caractère lacunaire des observations sur cette période. Ces résultats appellent à une meilleure attention et à des investissements conséquents pour une meilleure connaissance des ressources en eau, base d'une planification de leur utilisation durable.

Mots clés – Athiémé, Bassin du Mono, Débits d'étiage, Hydrologie, GR4J.

Abstract – Simulation of low flow of Mono river watershed (Benin and Togo) at Athiémé outlet with GR4J model.

Water resources management involved varied implications such hydrology, people needs, infrastructures planning and establishment, basin resources conservation and institutional management. Strategies and policy management for better knowledge of water resources by diagnostic of matter of the basin using hydroclimatic data and the implementation of integrated water resources management (Zannou, 2011; Fofana 2015).

This study aims in order to simulate low flow of Mono watershed at Athiémé outlet to evaluate water availability for agricultural uses. Therefore daily hydroclimatic data (rainfall, recharge and flow) were collected (1971-2019) and analyzed with Perrin and al., (2003) GR4J model using R software.

Results showed a good performance of the model to simulate low flow before the construction of Nangbeto dam in 1988, according to Nash-Sutcliffe, RMSE and KGE (Gupta et al., 2009) criteria. Criteria values of Nash-Sutcliffe before dam establishment in 1988 are around 70% both in calibration and validation where KGE values (Gupta et al., 2009) showed 0,8317 et 0,8421 (near 1). A worst performance of the model is noticed for the period after the dam establishment due to the change in the hydrological regime due to water jets for energy production and lack of historical data for this period.

This situation calls for serious attention and investment for all activities related to a better known of water resources, which is reliable tool for their sustainable use.

Keywords – Athiémé, Mono watershed, Low flood, Hydrology, GR4J.

I. INTRODUCTION

La disponibilité de l'eau constitue un des principaux facteurs d'essor des civilisations, que ce soit pour l'irrigation, le transport maritime ou fluvial, la production d'énergie, ou la consommation domestique et industrielle [1]. Des simulations hydrologiques pour une meilleure connaissance des ressources en eau ont été implémentées pour une description et une gestion des bassins hydrologiques par l'exploitation des données hydroclimatiques [2].

Conséquence ou non des changements climatiques, le risque de pénurie d'eau est réel car les besoins en eau ne cessent d'augmenter [3]. L'une des conséquences les plus préjudiciables à l'économie est la non-validité des normes hydrologiques devant permettre le dimensionnement des ouvrages [4]. En effet, la gestion rationnelle des ressources en eau à l'échelle des bassins versants en général et des écosystèmes en particulier nécessite une bonne connaissance de la variabilité des régimes hydrologiques surtout en période de crise liée aux événements de crue ou d'étiage [5]. Mieux, [6] souligne qu'une bonne connaissance des régimes hydrologiques permet de mieux estimer les apports volumétriques annuels pour mieux dimensionner les ouvrages de stockage et déterminer leur potentiel à contribuer au développement et à la satisfaction des besoins des populations.

Avec la construction du barrage de Nangbéto sur le fleuve Mono en 1988, les lâchers d'eau ont contribué, à un écoulement permanent qui a modifié la dynamique des écosystèmes de la basse vallée [7]. Plusieurs études ont abordé la dynamique des crues dans le bassin [8]. Mais, le régime hydrologique en période d'étiage est peu étudié. Si la construction des barrages permet d'écarter les crues et de soutenir les étiages, la survenance d'étiages sévères pose le problème de manque d'eau qui influe sur les capacités à répondre aux besoins en eau des populations riveraines. Cette étude a pour but de simuler les débits d'étiage afin d'apprécier la disponibilité de la ressource en période de basses eaux.

II. MATERIELS ET METHODES

2.1 Cadre d'étude

L'étude a porté sur le bassin transfrontalier du Mono (Bénin, Togo) à l'exutoire d'Athiémé. D'une forme allongée, le bassin du Mono s'étend sur une superficie de 22 932 km² à l'exutoire d'Athiémé. Il est orienté Nord-Est et Sud-Ouest sur un relief peu accentué. Le bassin du Mono est situé entre les latitudes 6° 15'25,2'' et 9° 20'52,8 Nord et entre les longitudes 0°41'56,4'' et 1° 55'30,6 Est [9]. Sa localisation géographique est présentée par la figure 1. De sa source à Alédjo (Bassila) au Nord du Bénin dans les monts Koura, à l'embouchure à Avlo (Grand-Popo), le fleuve Mono a une longueur de 491 km et son bassin jouit d'un régime tropical avec une seule crue se situant, en moyenne, au mois de septembre [10]. Il abrite dans sa partie nord-ouest depuis 1998, le barrage hydro-électrique de Nangbéto. Ce dernier

influence le régime hydrologique du fleuve. La lame d'eau écoulée à la station d'Athiémé n'est plus seulement sous l'influence de la pluie, du substratum géologique et des états de surface mais liée également aux lâchers d'eau provenant de la gestion du barrage hydroélectrique de Nangbéto [11]. Ces lâchers d'eau ont contribué ainsi à modifier le régime hydrologique.

Pour ce qui des états de surface, les Forêts Savanes (FS) sont passées de 57% en 1986 à 39% en 2000 puis à 31% en 2015 tandis que les Mosaïques Jachères Cultures (MJC) qui étaient de 35% en 1986 se sont étendues à 45% et à 60% pour les années 2000 et 2015. Durant cette période, on a observé une régression de l'aire des plans d'eau qui est passée de 2% en 1986 à 1,7% en 2015. Cette dernière témoigne d'un amenuisement des ressources en eau de surface.

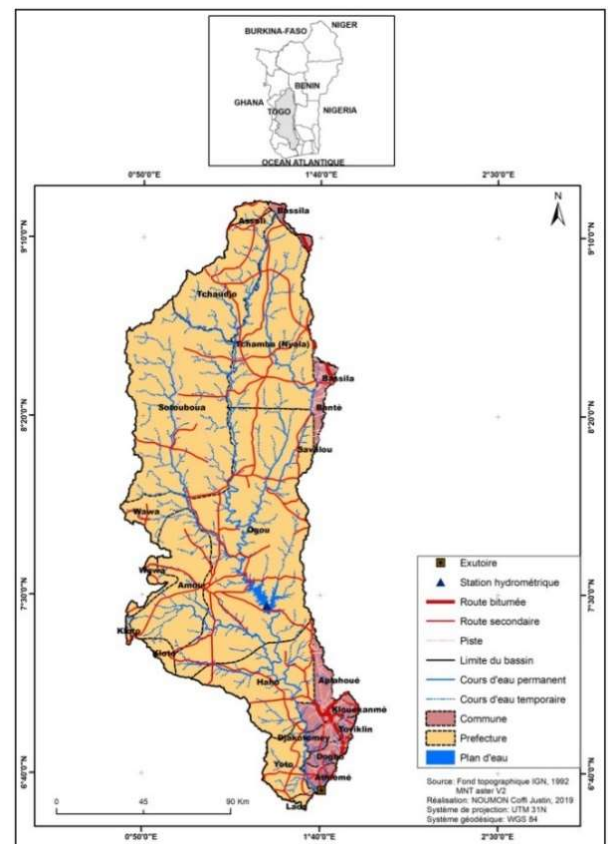


Figure 1 : Situation du bassin du Mono à Athiémé

2.2 Méthodes

Les données d'entrée du modèle GR4J sont la pluie moyenne journalière, l'évapotranspiration et l'écoulement observé. La sortie du modèle est le débit simulé.

Les séries de données hydro-climatiques utilisées pour la présente étude ont été fournies par la Direction Nationale de la Météorologie du Bénin et par la Direction Nationale de la Météorologie du Togo. Le réseau d'observations

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\text{Nobs}} (Q_{\text{sim}} - Q_{\text{mobs}})^2}{\sum_{i=1}^{\text{Nobs}} (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{msim}})^2}$$

où Q_{obs} et Q_{sim} sont respectivement les débits observés et simulés durant la période de calage Q_{mobs} est la moyenne des observations. Si $\text{Nash} \geq 70\%$, la simulation est bonne, si ce taux $< 70\%$, il s'agit d'une faible performance du modèle à simuler les débits.

➤ Root Mean Squared Error (RMSE)

$$\text{RMSE} = (1/n \sum_{i=1}^{\text{Nobs}} (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})^2)^{1/2}$$

Une faible valeur du critère RMSE indique de faible erreur sur les débits simulés.

- **KGE** [17] : ce critère compare la performance du modèle d'une période à une autre

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de la simulation est faite sur les différents périodes consignés dans le tableau 1. Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe avant barrage sont de l'ordre de 70% (sous-stimulation) en calage et validation avec des valeurs de KGE de 0,8317 et 0,8421 (proches de 1) respectivement. Ces valeurs traduisent une bonne performance et robustesse du modèle GR4J sur le bassin du Mono ; autrement les débits simulés sont très proches de ceux de référence. Mais ces critères montrent une forte dégradation du modèle après barrage à simuler les débits. Cette détérioration des valeurs des critères de performance s'explique essentiellement par l'anthropisation de l'écoulement due aux lâchers d'eau pour des raisons de turbinage au niveau de la centrale hydro-électrique de Nangbéto d'une part ; et la qualité médiocre des données historiques sur la période après barrage d'autre part. Toute chose qui n'offre pas des périodes assez larges favorables à une souplesse dans le choix des séquences de calage et de validation.

Tableau 2: Résultats de simulation des débits d'étiage par le modèle GR4J

Période Modélisation	Période avant barrage		Période après barrage	
	Calage (1971-1973)	Validation (1974-1976)	Calage (1988-1990)	Validation (2008-2010)
Paramètres de calibration (X1,X2,X3,X4)	(21807,299; 6,106 ; 0,002; 20,000)		(0,005; 3168,201 ; 21807,299; 20,000)	
NSE[log(Q)]	69,79%	71,36%	19,44%	NA
RMSE (log(Q))	1,3435	1,2794	0,5475	-0,2600
KGE[log(Q)]	0,8317	0,8421	0,5663	4,3006

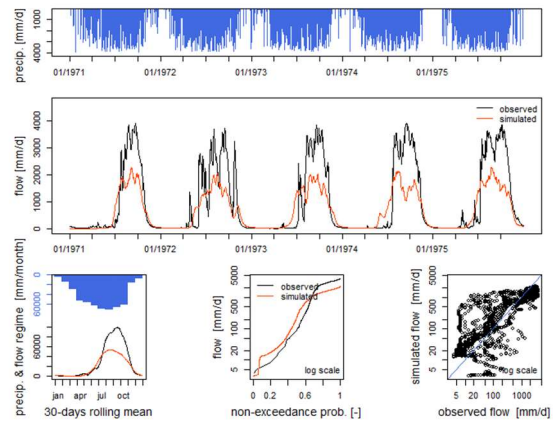


Figure 3 : Variation des débits observés et simulés avant barrage (1971-1976) de Nangbéto

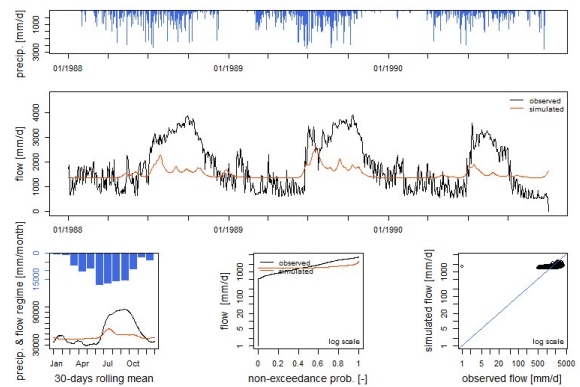


Figure 4 : Variation des débits observés et simulés après barrage de Nangbéto en phase de calage (1988-1990)

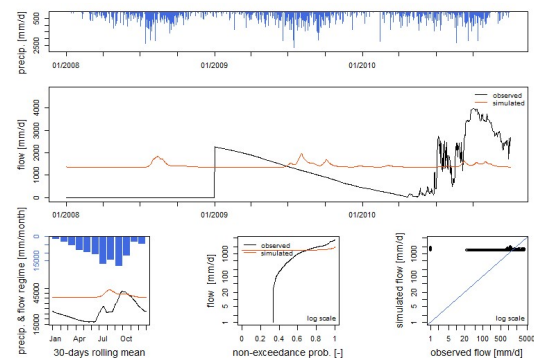


Figure 5 : Variation des débits observés et simulés après barrage en phase de validation (2008-2010)

Sur le bassin de l'Ouémé à Bonou, [18] a simulé les hautes eaux à l'aide du modèle GR4J et obtient des débits simulés surestimés avec une bonne performance des critères d'efficacité NSE, RMSE et KGE. Plusieurs auteurs ont implémenté d'autres modèles hydrologiques pour l'estimation des ressources en eau. [19] ont évalué la disponibilité de la ressource en eau du bassin de l'Ouémé à

l'exutoire de Kaboua par une simulation hydrologique à l'aide du modèle semi-distribué Soil and Water Assessment Tool (SWAT). [20] ont utilisé, le modèle d'analyse systémique FPEIR (Force Pression Etat Impact Réponse) pour établir le rapport entre l'implantation du barrage de Nangbéto et la vulnérabilité des écosystèmes de la basse et moyenne vallée du Mono. Les résultats soulignent une modification significative de l'écoulement en soutien aux étiages avec des inondations plus fréquentes qui affectent le bien-être des populations et la stabilité des écosystèmes du fleuve Mono.

Des investigations similaires ont été effectuées dans la sous-région. [21] ont simulé l'écoulement hydrologique du bassin du Bafing, affluent du fleuve Sénégal aux fins d'une appréciation de l'impact du climat sur les ressources en eau sur la retenue d'eau de Manantali. Dans leur étude, les auteurs ont utilisé les modèles GR4J et GR2M pour déterminer les paramètres de calage de l'entrée des entrées du barrage. Des résultats similaires satisfaisants [18] ont été obtenus dans la simulation pluie-débit par les modèles hydrologiques (GR1A, GR2M et GR4J) du bassin versant d'Oued Touil dont le cours principal, alimente le barrage de Boughzoul de l'Oued Cheliff en Algérie. Ces simulations soulignent une bonne performance, robustesse et fiabilité des modèles GR. Aussi, la version optimisée du modèle a-t-elle permis une prise en compte significative de la période avec ou sans neige en région méditerranéenne. [19] en optimisant la modélisation hydrologique par le modèle GR4J du bassin versant de Tensift à Ourika dans la région de Marrakech au Maroc ont utilisé avec succès les algorithmes génétiques et la méthode Gauss-Newton.

Toutefois, le problème structurel de la disponibilité des données historiques en Afrique en général, hypothèque la validation du modèle pour des sorties fiables.

Enfin, dans des contextes analogues de défaut de données historiques, certains hydrologues ont développés des modèles pour simuler les écoulements dans les bassins non jaugés.

IV. CONCLUSION

La simulation des débits d'étiage du fleuve Mono à l'exutoire d'Athiémé indique une bonne performance et robustesse du modèle GR4J pour le bassin du Mono sur la période avant la construction du barrage de Nangbéto. Mais les valeurs des critères de performances sont très dégradées sur la période après barrage du fait du régime hydrologique modifié par les lâchers d'eau lors du turbinage contrariées par le caractère lacunaire des observations sur cette période [22]. Ces résultats interpellent la responsabilité des décideurs et divers partenaires techniques sur la nécessité des investissements conséquents pour une meilleure connaissance des ressources en eau, base d'une planification de leur utilisation durable.

V. REMERCIEMENTS

Nous remercions le Partenariat National de l'Eau (PNE-Bénin) et la Coopération Allemande à travers le Programme

Eau Hygiène et Assainissement (ProSEHA/GIZ) pour leur assistance technique et financière dans la conduite de cette étude.

REFERENCES

- [1] Anctil F., Rousselle J., Lauzon., 2005. Hydrologie : Cheminement de l'eau. Presses internationales Polytechniques, 2005. 317p.
- [2] Fofana R. et Afouda A., 2014. Applying the Least Actions Principle to assess the trends in rainfall-runoff relations in a context of climate change at ungauged basin: case of Nanon basin in the northern region of Benin. IRJNS, www.eajournals.org, 2014 : 10-23.
- [3] Lang C., 2010. Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? l'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thèse de doctorat, Univ. Metz, France. 292p+ annexes.
- [4] Avahounli R.F., Lawin A. E., Alamou E., Chabi A. et Afouda A., 2013. Analyse fréquentielle des séries de pluies et débits maximum de l'Ouémé et estimation des débits de pointe. European Journal of Scientific Research. ISSN 1450-216X/1450-202X Vol.107 No 3 July, 2013, pp.355-369.
- [5] Sourrisseau J. et Galéa G., 1996. Représentativité des modèles QdF, application à la régionalisation des régimes de crues du bassin versant de la Loire, Cemagref, groupement de Lyon-Division hydrologie hydraulique ; EPFL-IATE ; Ministère de l'Environnement -Division de l'Eau, IAHS. Publ no.246, 1997, 277-285.
- [6] Alamou E., 2011. Application du principe de moindre action à la modélisation pluie - débit. Thèse de Doctorat, CIPMA Chaire UNESCO, Université d'Abomey-Calavi, Bénin ; 211p+annexes.
- [7] Amoussou E., Camberlin P., Boko M., Perard J., 2009b. Impact de la variabilité climatique sur les apports liquides dans la basse vallée du mono (Bénin, Afrique de l'ouest).
- [8] Houndenou C., Amoussou, E., et Totin, V., S. H., 2008. Variabilité pluvio-hydrologique et inondation dans la basse vallée du Mono (Bénin, Afrique de l'Ouest). Revue de Géographie du Bénin Université d'Abomey-Calavi (Bénin). N°3, juin 2008, pp 5 -22.
- [9] Le Barbe L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y., Gualde R., 1993. Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Editions ORSTOM. 540p.
- [10] CCRE (Centre de Coordination des Ressources en Eau), 2011. Etudes relatives à la promotion de trois (03) nouvelles organisations de bassins transfrontalières en Afrique de l'Ouest : cas du schéma du bassin du Mono. Rapport final. CCRE/CDEAO. 88p.

- [11] Blivi, A. B., 2000. Effet du barrage de Nangbéto sur l'évolution du trait de côte : une analyse prévisionnelle sédimentologie. J. Rech. Sci. Univ. du Bénin (Togo), pp 29-41.
- [12] DELHOMME, J. P. (1978) : Application de la théorie des variables régionalisées dans le domaine des sciences de l'eau. Bull. du BRGM (2ème série) Session III, 4, 341–375.
- [13] Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model, Part 2—towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303:290– 306.
- [14] Perrin C., Michel C., Andréassian V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology* 279 (1-4) 275-289.
- [15] Hubert P., Carbonel J.P., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de debits de l'Afrique de l'Ouest, *Journal de l'hydrologie*, 110, 349-367.
- [16] Nash J.E et Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I.a. Discussion of principales. *Journal of hydrology*, n°10, pp 282-290.
- [17] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. & Martinez, G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377 (1–2), 80–91.
- [18] Kodja J. D., 2018. Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest. Géographie. Université de Montpellier ; Université d'Abomey-Calavi (UAC), 2018. Français. MNT : 2018MONTGO14. Thèse de doctorat.288p.
- [19] Sintondji O. L., et Dossou-Yovo E.R., 2010. Modelling the hydrological balance of the Okpara cathment at the Kaboua outlet in Benin. Laboratory of Hydraulics and Water Control; Faculty of Agonomy Sciences; University of Abomey-Calavi. 18 p.
- [20] Houessou S., Amoussou E., Totin V.S.H., Sèmondji G.E., Ago E., Houndénou C., 2015. Influence de la Centrale Hydroélectrique de Nangbéto sur les écosystèmes de la basse vallée du fleuve Mono. *Revue Climat Eau et Développement*. Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat Eau Ecosystème et Développement (LACEEDE). N°18, juin 2015, 5-17p.
- [21] Sambou S., Boye M., Malang B.A., Malanda-Nimy E.N., Bodian A., Mussa K., Adama M., Fatogoma B., Dacosta H., Malou R., Barry A., Kane A., Niang Fall A., et Hamadoun S., 2011. Calage et validation des modèles hydrologiques GR4J et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafing-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manantali. Communication à la sixième édition des Journées Scientifiques du 2iE,Campus 2iE Ouagadougou, 4-8 avril 2011, 6p. Programme AMMA-IMPACTS.
- [22] Randrianasolo A., 2012. Généralisation de l'approche d'ensemble à la prévision hydrologique dans les bassins versants non jaugés. Thèse Doctorale, Paris : Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 2012, 314.