

Evaluation de modèles conceptuels pour la simulation de l'étiage dans le bassin versant anthropisé du Kou (Burkina Faso)

Yacouba YIRA^{1*}, Manégawéné J. OUEDRAOGO²

Aymar Y. BOSSA³, Jean HOUNPE³

Djigbo F. BADO⁴, Luc O. SINTONDJI³

Résumé

La pression sur les ressources en eau est en constante augmentation du fait d'une demande de plus en plus croissante et des impacts de la variabilité et du changement climatique. Dans ce contexte également marqué par une connaissance limitée sur les ressources en eau, l'analyse des étiages suscite un intérêt croissant. La présente étude vise à combler le déficit lié à la rareté de l'information sur les étiages dans le bassin du Kou. Elle adopte une approche comparative basée sur les aptitudes (performance et robustesse) des modèles GR4J, GR6J et HBV-light à simuler les débits d'étiage sur la période 1981-2010. La méthodologie a consisté à rechercher les paramètres optimaux des modèles à l'aide de la méthode « Generalized Split-Sample Test » et à évaluer leurs performances en validation sur la base de la distribution des critères de performances. Les résultats présentent le modèle GR4J comme étant le plus performant sur la période 2006-2008 avec un intervalle interquartile pour le critère logNSE de 0,52 – 0,62, une moyenne de 0,58 et une valeur en calage de 0,8. La robustesse de ce modèle est de 0,22 sur la moyenne du critère en validation.

Mots-clés : Etiage ; Modélisation ; Generalized Split-Sample Test ; ressources en eau ; multi-model.

An assessment of conceptual hydrological models for simulating low-flow in the anthropized Kou catchment (Burkina Faso)

Abstract

Pressure on water resources is constantly increasing due to a growing demand and the impacts of climate variability and change. In such a context, marked by a limited knowledge of water resources, the analysis of low-flows is of growing interest. The current study aims to fill the gap related to the scarcity of information on low-flows in the Kou catchment. It applied a comparative approach based on the abilities (performance and robustness) of the GR4J, GR6J and HBV-light models to simulate low-flows over the 1981-2010 period. The methodology implied searching for the optimal parameters of the models using the *Generalized Split-Sample Test* method, and evaluating their performance during the validation on the basis of the robustness criteria. The results show that the GR4J model has the highest performance over the 2006-2008 period with an interquartile range for the logNSE criteria of 0.52 - 0.62, a mean of 0.58 and a calibration value of 0.8. The robustness of this model is 0.22 considering the mean of the criteria for the validation.

Keywords: Low-flow; modeling; Generalized Split-Sample Test; Water resources; multi-model

Introduction

La pression sur les ressources mondiales en eau est en nette augmentation et certaines régions de la planète connaissent d'importants déficits hydriques (ROHDE *et al.*, 2020). Ces pressions incluent d'une part celles exercées par une croissance continue de la population mondiale et l'augmentation de son niveau de vie, et d'autre part celles dues à la variabilité et au changement climatique (DOEFFINGER et HALL, 2020). Pour la région de l'Afrique de l'Ouest, plusieurs études sur la variabilité pluviométrique au cours des dernières décennies (1961 à ce jour) montrent une baisse significative de la pluviométrie annuelle à partir de 1970 (OLIVRY *et al.*, 1993 ; ARDOIN-BARDIN, 2004 ; BOUBACAR, 2012). Ce déficit pluviométrique, a entraîné

¹ Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies – IRSAT/CNRST, Ouagadougou, Burkina Faso ;

² Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement de la Boucle du Mouhoun – MEA/DREA-BMH, Dédougou, Burkina Faso ;

³ Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin ;

⁴ Ecole d'Horticulture et d'Aménagement des espaces Verts, Université Nationale d'Agriculture, Kétou, Bénin.

*Auteur correspondant : yira_y@uni-bonn.de / yira_y@yahoo.fr

par endroit, une situation de stress hydrique sévère dans la région. En outre, cette région se caractérise par une surexploitation des réserves d'eau (SUN *et al.*, 2021). En plus de la demande toujours croissante, les hydrosystèmes font l'objet de pollutions diverses, ainsi que de phénomènes d'ensablement de plus en plus récurrents (YALEU *et al.*, 2020).

Au Burkina Faso, depuis une vingtaine d'années déjà, les ressources en eau renouvelables étaient estimées à 852 m³/an/habitant (MEE, 2001), pour un seuil de pénurie établi à 1000 m³/an/habitant (MEE, 2001). Le pays est donc déficitaire au sens de la gestion durable des ressources en eau. L'eau est essentiellement utilisée à des fins agricoles, industrielles, domestiques et d'élevage. L'agriculture est de loin la plus consommatrice d'eau. Elle représente 64% de la demande globale en eau au Burkina Faso et une grande partie de cette demande est satisfaite à partir des eaux de surface (ZOUGMORE *et al.*, 2019). L'état des lieux des ressources en eau du bassin versant du Kou, dans la partie ouest du pays, est à l'image de celui du pays. En effet dans ce bassin, malgré la présence d'importantes sources d'eau, d'une nappe phréatique facilement exploitable et d'un cours d'eau permanent, les usagers de l'eau se retrouvent régulièrement confrontés à des pénuries résultant d'une surexploitation (WELLENS et COMPAORE, 2008).

Les pénuries d'eau dans le Kou, interviennent pour l'essentiel en période de basses eaux, pendant la saison sèche. La connaissance des débits d'étiage constitue dans un tel contexte un enjeu majeur pour une gestion rationnelle de la ressource en eau (LANG, 2011). En effet, la gestion des ouvrages, le développement des activités économiques et l'alimentation en eau potable sont tributaires des débits les plus faibles de l'année (SIOU, 2008). L'étiage du Kou est cependant très peu documenté, du fait de la brièveté, de la discontinuité, et de la faible fiabilité des séries chronologiques de débits (FRECAUT, 1979). L'analyse statistique des débits d'étiage nécessite pourtant des données en quantité et en qualité. En situation de déficit, comme cela est le cas du Kou, il est capital de développer des outils et approches permettant, sur la base de l'information disponible de générer de telles données.

La présente étude vise donc à évaluer la performance de trois outils (modèles hydrologiques conceptuels) dans la simulation de l'étiage au sein du bassin versant du Kou et déceler ainsi le modèle le mieux indiqué dans la caractérisation de cet étiage. Elle est par conséquent, une contribution à l'amélioration de la connaissance des étiages du bassin versant.

I. Matériel et méthode

1.1. Description de la zone d'étude

Le bassin versant du Kou constitue la zone d'investigation de la présente étude. Le secteur géographique se situe dans la province du Houet, à l'ouest du Burkina Faso (Figure I). Il couvre les communes de Bobo-Dioulasso, Bama et Péni. C'est l'un des bassins versants régionaux faisant partir du bassin versant national du Mouhoun. La rivière Kou, du même nom, est le cours d'eau principal. Il s'écoule permanemment vers le Nord-Est, raccordé par des affluents quasi permanents. Le bassin versant du Kou couvre une superficie d'environ 1 823 km² (dont 935 km² à la station de Badara) où résident des lacs, des mares ainsi que des sources d'eau, dont celles de Nasso/Guinguette et Pésso/Déso, les plus importants de l'Afrique de l'Ouest (SAURET, 2008). Il satisfait les besoins en eau de consommation et des activités hydroagricoles des habitants de la province du Houet, estimés à 1 358 224 habitants selon l'Institut National de la Statistique et du Développement (INSD, 2018). L'altitude moyenne dans le bassin du Kou est de 300 m. Le bassin se trouve dans la zone sud-soudanienne, qui est limitée au Nord par l'isohyète 900 mm et au Sud par l'isohyète 1200 (MEE, 2001). La saison pluvieuse y dure 5 à 6 mois (avril/mai à septembre) ; le reste de l'année étant sec. Les températures relativement basses s'observent pendant les mois de juillet et août, et les plus

élevées sont notées pendant les mois de mars et avril (26,9 °C comme moyenne annuelle, 5 °C comme amplitude thermique annuelle moyenne pour la période 1940-1996) (WELLENS et COMPAORE, 2003).

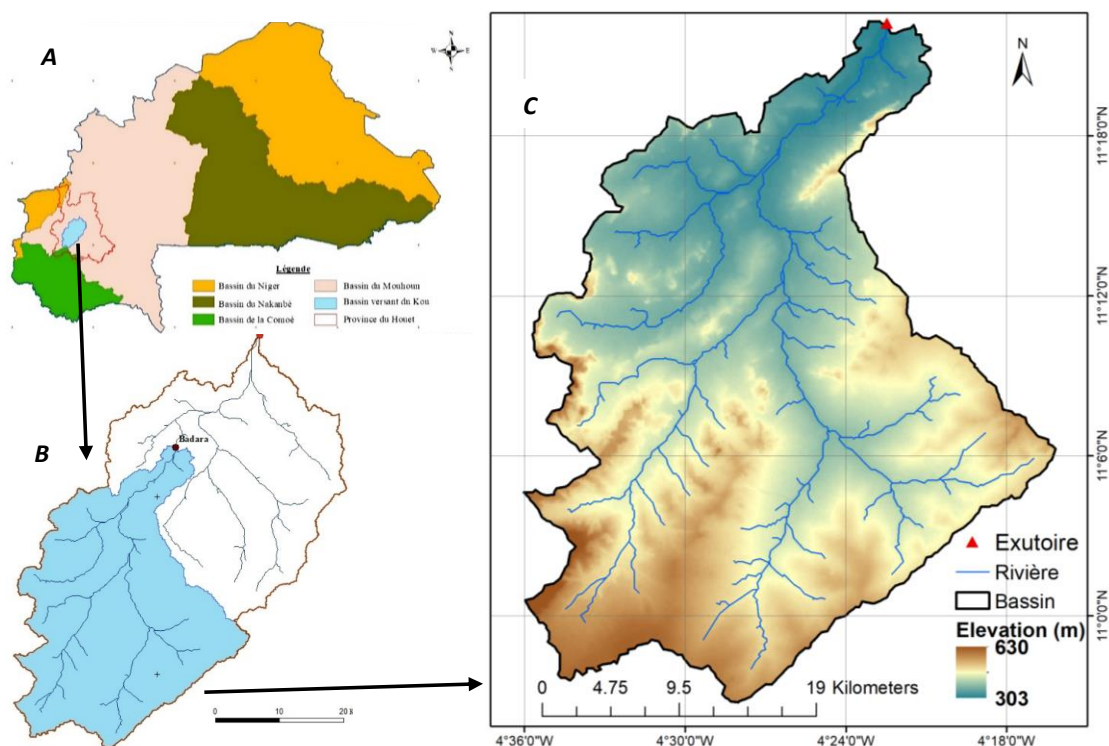


Figure I Localisation de la zone d'étude : **A**-situation du bassin versant du Kou, au Burkina Faso, **B**-bassin du Kou, et **C** sous-bassin versant du Kou à Badara (adapté de SAURET, 2013 et OUEDRAOGO, 2020)

1.2. Ensemble de modèles

Trois modèles conceptuels à structure simple ont été évalués : HBV-light (SEIBERT et VIS, 2012), GR4J (PERRIN *et al.*, 2003) et GR6J (PUSHPALATHA *et al.*, 2011). Neuf, six et quatre paramètres sont optimisables respectivement pour HBV-light, GR6J et GR4J. Les trois modèles requièrent par contre (dans le cadre de la présente étude) les mêmes données d'entrée, à savoir, les séries chronologiques journalières d'évapotranspiration potentielle, de précipitation, de débit et de température.

1.3. Calage-contrôle

Pour prendre en compte les dynamiques climatiques et anthropiques du bassin, l'approche de calage-contrôle proposée par CORON (2013), Generalized Split-Sample Test « test de validation généralisée » (GSST), est celle appliquée dans le cadre de cette étude. L'approche repose sur des séries de calage-contrôle sur un ensemble de sous-périodes obtenues par découpage selon une fenêtre glissante de taille fixe (trois ans pour le cas de cette étude, Figure 2). Un total de 15 fenêtres de trois ans, soit 15 calages et 166 tests en validation ont été effectués pour chacun des 3 modèles avec le Nash-Sutcliffe-NSE et le logNSE comme critères objectifs (Figure 2).

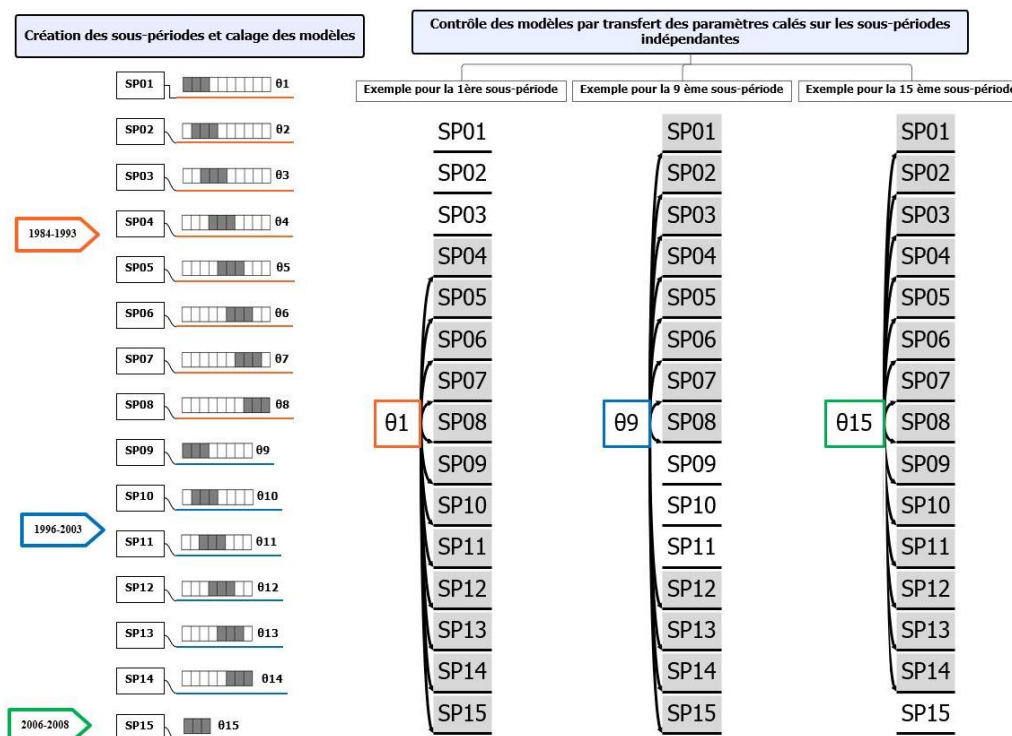


Figure 2 : Méthodologie de test de calage-contrôle généralisé GSST appliquée dans l'étude.

L'optimisation des paramètres de HBV-light a été faite de manière automatique à l'aide de l'algorithme du GAP optimization. GR6J et GR4J ont été également optimisés automatiquement, suivant la « Calibration Michel » (MICHEL, 1991).

1.4. Sources de données

La collecte des données climatiques (Evapotranspiration potentielle-ETP, précipitation, température) s'est faite auprès de l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso et de la Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement des Hauts-Bassins (DREA-HB). Elle a concerné les stations de Bobo-Dioulasso (station synoptique) et de la Vallée du Kou, et couvre globalement la période 1981-2010 (30 ans). Les données hydrométriques ont été obtenues auprès de la DREA-HB et couvrent la période 1980-2018 (39 ans).

II. Résultats

La méthode GSST a, entre autres, pour objet de rechercher les périodes de calage présentant les meilleurs paramètres optimaux pour chacun des modèles afin de simuler les bas débits (évaluation faite avec le critère logNSE). Il est cependant utile d'évaluer la performance des modèles à fournir un bilan hydrique réaliste sur la base de l'ensemble de la gamme des débits du bassin (évaluation faite avec le critère NSE). Les résultats des tests de transfert des paramètres pour les trois modèles sont représentés en fonction de ces deux critères objectifs (NSE et logNSE) et de leur variation en fonction des périodes de calage. Les boîtes de moustaches présentées par les Figure 3 et 4 fournissent les quantiles 25 %, 50 % et 75 % et les valeurs maximale, moyenne et minimale obtenus sur les variations des performances en validation.

Sur le critère de NSE, les performances des modèles GR4J, GR6J et HBV-ligh sont globalement moins satisfaisantes sur les périodes de calage, avec en moyenne 13 % (2/15) de ces périodes ayant au moins le 1^{er} quartile de leur NSE > 0,6 (Figure III). Les modèles GR4J et HBV-ligh paraissent les plus performants avec chacun 20 % (3/15) des périodes de calage ayant au moins le 1^{er} quartile de leur NSE > 0,6. Le modèle GR6J semble donc le moins

satisfaisant avec seulement une des quinze périodes (2000-2002) de calage ayant au moins le 1^{er} quartile du critère supérieur à 0,6. Les modèles GR4J et HBV-ligth ont chacun deux périodes de calage (1999-2001 et 2000-2002) dont le 2^{em} quartile (médiane) du NSE est supérieur à 0,66. La distribution du critère de la période 1999-2001 pour ces deux modèles se dégage de celle de la 2^{em} période avec des intervalles interquartiles à 0.55 – 0.65 et une moyenne de 0,59 pour le modèle GR4J et 0,58 – 0,63 et une moyenne de 0.6 pour le HBV-ligth. Il est à remarquer que les modèles GR4J, GR6J et HBV-ligth possèdent respectivement 33 %, 13 % et 40 % de leurs périodes de calage ayant au minimum une performance en calage satisfaisante.

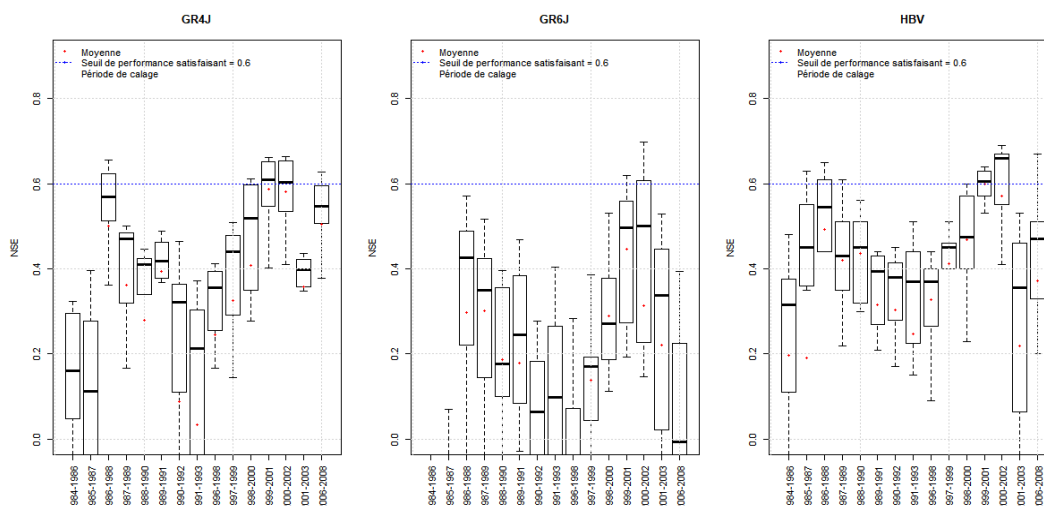


Figure 3 Boîte à moustache de la variabilité du critère de performance NSE en fonction des périodes de calage du modèle.

Sur le critère logNSE 53 % (8/15) des périodes de calage des modèles GR4J et HBV-ligth possèdent au moins un logNSE > 0,6 contre 33 % (5/15) pour le modèle GR6J. Le modèle GR4J est le plus performant avec la période de calage 2006-2008, qui présente plus de 25 % des critères en validation satisfaisants (logNSE >0,6) et un intervalle interquartile moins dispersé 0.52 - 0.62 et une moyenne de 0.58. Les modèles GR6J et HBV-light présentent leurs meilleures distributions de performance également pour la période 2006-2008, avec respectivement plus de 25 % et moins de 25 % des critères en validation satisfaisants. Le modèle HBV-light se démarque par la faible dispersion de ses critères en validation avec un intervalle interquartile 0,52 – 0,59 et une moyenne de 0,4 pour GR6J.

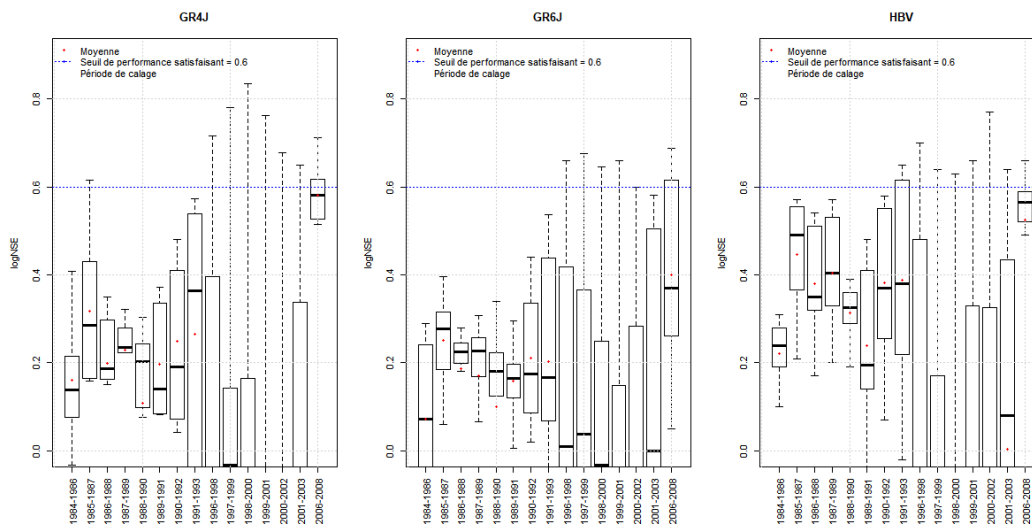
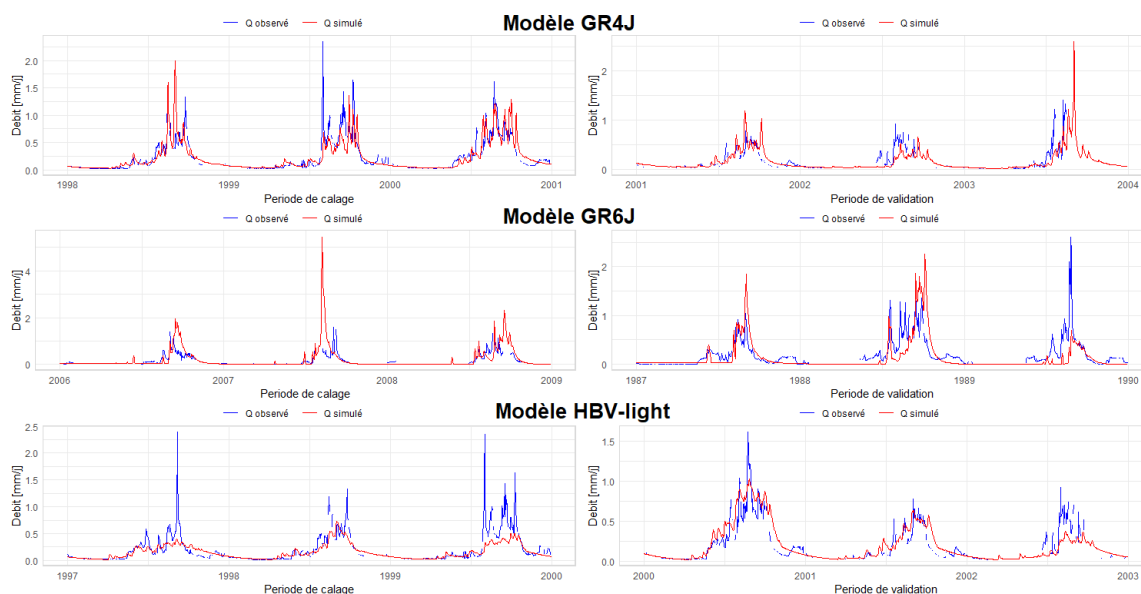


Figure 4 : Boîte à moustache de la variabilité du critère de performance logNSE en fonction des périodes de calage du modèle

Les meilleurs critères en validation pour les modèles GR4J, GR6J et HBV-ligth ont été obtenus respectivement sur les périodes 1998-2000, 2006-2008 et 2000-2002 pour le critère logNSE (Tableau I). Suivant le critère NSE, le paramétrage optimum est obtenu pour tous les modèles sur la période 2000-2002. LogNSE et NSE varient respectivement de 0,69 à 0,83 et de 0,66 à 0,70. Ils sont tous à 10^{-2} proches de ceux obtenus en calage et sont largement satisfaisants. Le modèle GR6J est le plus performant sur le NSE et GR4J l'est sur le logNSE. L'observation graphique (Figure 5) montre une tendance pour les trois modèles à bien reproduire le régime des écoulements à l'exutoire du bassin. L'on peut toutefois noter quelques écarts entre débits simulés et observés, surtout en ce qui concerne les pics d'écoulement. Sur ce critère qualitatif, les trois modèles présentent des performances comparables.

Tableau I : Meilleures performances en validation des modèles et les critères en calage correspondants

Critère	logNSE			NSE		
	Modèle	Période	Calage	Meilleure validation	Période	Calage
GR4J	1998-2000	0,85	0,83	2000-2002	0,71	0,66
GR6J	2006-2008	0,70	0,69	2000-2002	0,77	0,70
HBV-ligth	2000-2002	0,81	0,77	2000-2002	0,69	0,69



Figures 5 : Hydrogrammes des meilleures performances en calage et validation des modèles (suivant LogNSE).

À l'instar de la fiabilité des modèles identifiés en termes de critère de performance plus particulièrement en validation, la robustesse est l'une des qualités les plus importantes et les plus souhaitables des modèles permettant de leur conférer une bonne fiabilité. Les résultats du critère de robustesse indiquent des valeurs fluctuant pour les trois modèles entre 0,006 et 0,22 (Tableau II). Pour les variables médiane et moyenne, les trois modèles sont moins robustes (critère de robustesse $> 0,1$). Le modèle HBV-ligth pour ces mêmes variables présente le plus petit critère de robustesse, mais possède des critères logNSE en calage et validation inférieurs à ceux du modèle GR4J. C'est uniquement pour la variable meilleure critère logNSE que les trois modèles sont les plus robustes (critère de robustesse $< 0,1$).

Tableau II : Performance et robustesse suivant le critère logNSE pour les périodes de calages présentant la meilleure distribution des critères d'évaluation des modèles.

Modèle	GR4J			GR6J			HBV-ligth		
	2006-2008			2006-2008			2006-2008		
Période de calage	Cal	Val	Robustesse	Cal	Val	Robustesse	Cal	Val	Robustesse
logNSE									
Médiane		0,58	0,22		0,37	0,33		0,57	0,15
Moyenne	0,80	0,58	0,22	0,70	0,40	0,30	0,72	0,53	0,19
Meilleure		0,71	0,09		0,69	0,01		0,66	0,06

III. Discussions

L'évaluation de la performance des trois modèles montre des résultats globalement satisfaisants. La procédure de test du GSST a permis de détecter des périodes conduisant à des paramètres optimaux pour un critère d'évaluation performant ($> 0,6$). Il ressort pour le critère d'évaluation NSE, que les structures des modèles ayant une meilleure performance sont les modèles GR4J et HBV-light (respectivement 4 et 9 paramètres). La méthode a détecté la période 1999-2001 pour ces deux modèles comme ayant la meilleure distribution du critère d'évaluation avec plus de 50 % des périodes de validation jugées performantes. La performance du modèle HBV-light se distingue du modèle GR4J par la faible dispersion des critères NSE des périodes de validation et de sa moyenne qui est plus élevée.

Les données d'entrée et d'évaluation des performances étant les mêmes pour les trois modèles, la différence de performances entre modèles est à lier essentiellement à leur structure. La sensibilité du modèle aux conditions climatiques, l'outil d'optimisation (intégrée), le nombre de paramètres à optimiser étant fonctions de cette structure. Des investigations supplémentaires menées dans le cadre de l'étude montrent que HBV-light n'est pratiquement pas corrélé avec les indices de pluies contrairement à GR4J. Par ailleurs les périodes performantes étant les mêmes pour les deux modèles, donc mêmes conditions du milieu, la performance du modèle HBV-light pour ce critère d'évaluation NSE pourrait s'expliquer par la complexité de sa structure (notamment les paramètres ajustables, au nombre) par rapport au modèle GR4J. Ces résultats corroborent ceux de OUCI (2018), qui dans son étude de modélisation du bassin versant d'Oued Sebdou en Algérie, a obtenu de meilleures performances avec HBV-light comparé au modèle GR4J. DAKHLAOUI (2014) dans ses travaux d'amélioration de l'algorithme d'optimisation de calage des modèles, aboutis à des NSE en calage de 0,68 et 0,58 respectivement pour les modèles HBV-light et GR4J, valeurs qui sont du même ordre de grandeur que celles obtenues au cours de la présente étude.

Le modèle GR6J (malgré deux paramètres ajustables de plus que GR4J) est le moins performant avec un critère d'évaluation NSE $> 0,6$ sur moins de 25 % des périodes de validation pour la période de calage 2000-2002. Cette contre-performance par rapport aux autres modèles diffère des résultats obtenus par PUSHPALATHA *et al.* (2011) qui placent GR6J au-dessus de GR4J suivi de HBV en termes de performance moyenne sur un grand nombre de bassins versants. Cette disparité avec les résultats de la présente étude peut s'expliquer par le grand nombre de l'échantillon des bassins versants investigués par ces auteurs et aussi aux conditions du milieu de ces bassins. Les résultats sur les meilleures performances des modèles sont par contre

comparables à ceux de DAO *et al.* (2019) pour le modèle GR6J (NSE = 0,74).

Sur le critère de performance logNSE, la procédure GSST a permis de détecter les années 2006-2008, pour tous les trois modèles, comme étant la période qui présente les meilleurs paramètres optimaux (meilleures distributions des critères de performance). Les résultats placent le modèle GR4J comme le plus performant, suivi de HBV-light et de GR6J. Ayant les mêmes périodes de performance (2006-2008), ces modèles sont soumis aux mêmes conditions du milieu et aux mêmes conditions climatiques. Seule donc la structure des modèles et accessoirement les algorithmes d'optimisation justifient cet ordre de performance. La structure du modèle GR4J est donc celle qui restitue le mieux les bas débits dans le cas du Kou. Tout comme pour le critère NSE, ces résultats sont différents de ceux de PUSHPALATHA *et al.* (2011) pour qui GR6J fut plus performant que GR4J suivi de HBV en termes de performance moyenne (respectivement 0,662, 0,617, 0,559). Cependant les résultats atteints par ces auteurs sont inférieurs à ceux de la présente étude. Les résultats de l'étude sont par contre en phase avec ceux obtenus par HAU (2008) avec logNSE = 0,781 ; et NASCIMENTO (1995) avec logNSE = 0,7 – 0,9.

Conclusion

L'étiage des bassins versants nationaux est moins documenté par rapport aux crues. Pourtant, les pressions sur les ressources en eau sont multiples et diverses et ne font que s'accroître. Connaître la quantité d'eau disponible durant les périodes de pénurie semble donc capital pour une meilleure gestion de la ressource. Cette connaissance requière le développement d'outils adaptés à la rareté de données qui caractérise ces bassins. La présente étude visait en effet à améliorer la connaissance du régime d'étiage dans le bassin versant du Kou, à travers l'évaluation des performances de modèles de simulation de l'étiage. Cela s'est fait, à travers une approche comparative de 3 modèles conceptuels pluie-débits (GR4J, GR6J et HBV-light) avec pour objectif la recherche du modèle capable de restituer au mieux les débits (d'étiage) à l'aide de la méthode GSST.

Les résultats de la modélisation ont été satisfaisants pour tous les modèles en termes de performance du critère d'évaluation et aussi en termes de recherche des périodes avec des performances satisfaisantes (> 0,6) suivant la méthode GSST. Le modèle conceptuel GR4J s'est avéré le plus performant comparé aux modèles HBV-light et GR6J pour la simulation des débits d'étiage. En effet GR4J présente de meilleures distributions du critère de performance logNSE en validation pour la période 2006-2008 avec un intervalle interquartile 0.52 – 0.62 et une moyenne de 0.58. La valeur du critère en calage est de 0.8. La robustesse du modèle est évaluée à 0.22 sur la moyenne du critère en validation. Ainsi, Le modèle GR4J est donc le mieux indiqué pour simuler l'étiage du bassin versant du Kou à la station de Badara.

Les applications du modèle GR4J ainsi validés sont multiples et portent notamment sur la caractérisation du régime de l'étiage du bassin versant du Kou. Il est cependant à noter que, le modèle GR4J (de même que GR6J et HBV-light) n'a pas été évalué sur les débits manquants (lacunes) constatés dans la chronique des débits observés. Toute application du modèle devra se faire tenant compte de cette limitation. Des investigations avec des outils d'allocation ou intégrant une option de prélèvements d'eau sont également des voies d'amélioration des résultats de la présente étude.

Références bibliographiques

ARDOIN-BARDIN S., 2004. Variabilité hydro climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Sciences et techniques du Languedoc, Université Montpellier II, France. 437p.

BOUBACAR I., 2012. Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Thèse de Doctorat, Sciences de la Terre, Hydrologie, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, France. 246 p.

CORON L., 2013. Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens. Thèse de Doctorat, Hydrologie, AgroParisTech, France. 365 p.

DAKHLAOUI H., 2014. Vers une Procédure de Calage Automatique plus Efficace du Modèle HBV. Thèse de Doctorat, Génie Hydraulique, Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis, Tunisie. 249 p.

DAO A., FADIKA V., NOUFE D. D., DIABY A. A., KAMAGATE B., 2019. Contribution du modèle GR6J à l'évaluation du bilan hydrologique du sous bassin BÈTE (lagune Aghien, Sud Côte d'Ivoire). *EWASH & TI Journal*, 3(2) : 104-112.

DOEFFINGER T., HALL J.W., 2020. Water Stress and Productivity: An Empirical Analysis of Trends and Drivers. *Water Resources Research*, 56 (3) : 1-15.

HAU M., 2008. Modélisation hydrologique des sous-bassins versants de la Garonne à l'aide d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Master, Sciences et Technologies de l'Eau, Ecole Polytechnique Universitaire de Montpellier, France. 46 p.

Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD), 2018. Annuaire Statistique 2017 (Burkina Faso). Ministère de l'économie, des finances et du développement, Ouagadougou, Burkina Faso, 396 p.

LANG C., 2011. Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo : European Journal of Geography* [Online], Document 571. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.24827>

Ministère de l'Environnement et de l'Eau (MEE), 2001. Etat des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion. Ed. DGR - Direction Générale des Ressources en Eau, Ouagadougou, Burkina Faso, 252 p.

MICHEL C., 1991. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. Rapport technique Cemagref, Antony report, France, 439 p.

NASCIMENTO N. D. O., 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Thèse Doctorale, Hydrologie, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 420 p.

OLIVRY J. C., BRIQUET J. P., MAHE G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? *Hydrology of Warm Humid Region. IAHS*, 1985 (216) : 67-78.

OUEDRAOGO M. J., 2020. Hydrologie des basses eaux : modélisation et régime d'étiage à la station de Badara du bassin versant du Kou, Burkina Faso. Mémoire d'ingénieur, hydrologie, Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger. 84 p.

- OUICI F. Z. 2018. Etude de la performance du modèle hydrologique HBV appliqué au bassin versant d'Oued Sebdou (Tafna, Algérie). Thèse de Master, Hydraulique urbaine, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, Algérie. 128 p.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(4) : 275-289.
- PUSHPALATHA R., PERRIN C., LE N., MATHEVET T., ANDREASSIAN V., 2011. A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology*, 411(2) : 66-76.
- ROHDE M.M., REYNOLDS M., HOWARD J., 2020. Dynamic multibenefit solutions for global water challenges. *Conservation Science and Practice*, 2 (1) : 1-8.
- SAURET E. S. G., 2008. Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. Mémoire de DEA, science de l'ingénieur, Université de Liège, Liège, Belgique. 96 p.
- SAURET E. S. G., 2013. Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso). Université de Liège, Belgique. 215 p.
- SEIBERT J., VIS, M.J.P., 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 3315–3325.
- SUN D., ADDAE E. A., JEMMALI H., MENSAH I. A., MUSAH M., MENSAH C. N., APPIAH-TWUM F., 2021. Examining the determinants of water resources availability in sub-Saharan Africa: a panel-based econometrics analysis. *Environ Sci Pollut Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12256-z>
- WELLENS J., COMPAORE, N. F., 2008. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation. GE-eau, Rapport Annuel N°2, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 150 p.
- YALEU S. B. M., HAHIOU A. D., GUEL B., 2020. Assessment of Surface Water Contamination by Heavy Metals Due to Agricultural Practices in the Northern Part of Burkina Faso. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 21 (10) : 85–98.
- ZOUGMORE F., DAMIBA L., D'HAEN S., DAYAMBA S. D., 2019. État des connaissances scientifiques sur les ressources en eau au Burkina Faso et de l'impact des changements climatiques sur ces ressources. *Climate Analytics gmbH*, Berlin, Allemagne, 58 p.