

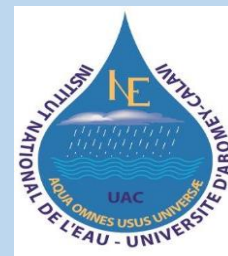


UNIVERSITE D'ABOMEY- CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES

EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

KPOSSOU Mahutin Aristide Oluwatobi

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie Quantitative

**Approche multimodèle pour l'évaluation de
l'influence des critères de calage sur le bilan
hydrologique**

Maître de Mémoire

Dr HOUNKPE Jean (Enseignant chercheur à l'INE)



PROMOTION : 2019 - 2020



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



**DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET DE GESTION DES
RESSOURCES EN EAU**

Mémoire de fin de formation

Pour l'obtention du diplôme de

Licence professionnelle en Hydrologie

Option : Hydrologie Quantitative

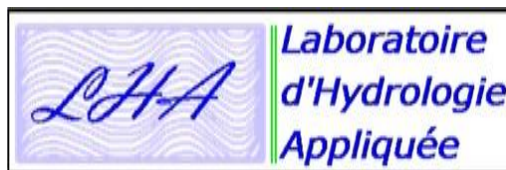
**Approche multimodèle pour l'évaluation de
l'influence des critères de calage sur le bilan
hydrologique**

Présenté par :

KPOSSOU Mahutin Aristide

Maitre mémoire:

Dr HOUNKPE Jean (Enseignant chercheur à l'INE)



Promotion : 2019-2020

DEDICACE

A mes chers parents Basile KPOSSOU et Lucienne ONIOSSOU. Recevez ce travail comme la récompense des nombreux efforts consentis pour nous donner une éducation de qualité.

REMERCIEMENT

Le présent mémoire a été réalisé grâce à l'appui et la contribution de plusieurs personnes. Une note spéciale de gratitude revient à mon maître mémoire **Dr HOUNKPE Jean** pour s'être rendu disponible et pour avoir supervisé ce travail ainsi que pour ses conseils scientifiques.

Un sincère merci

- A tout le personnel administratif, technique et le corps enseignant de l'Institut National de l'Eau et spécialement celui intervenant au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée. Nous vous remercions pour les nombreux efforts que vous faites pour que notre formation soit de qualité.
- A tous mes camarades de l'INE pour la convivialité et l'entraide qui ont régné en notre sein tout au long de notre formation ;
- A tous les membres de ma famille, mes amis, qui m'ont toujours encouragé dans mes études et grâce à qui j'ai grandi dans un milieu épanouissant.
- Aux honorables membres du jury, pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'examiner et de juger ce travail.
- Enfin à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

RESUME

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau dans son ensemble (les eaux de surface, les eaux souterraines, les eaux de ruissellement, les eaux de pluie et les eaux de fonte des neiges).

Elle permet, entre autres, d'analyser les précipitations et leur distribution sur un bassin versant. Toutefois, la complexité de cette science et son étroite relation avec la météorologie fait en sorte qu'elle s'entrecoupe avec les autres sciences de la Terre. Il est donc d'autant plus important, mais complexe, de considérer tous les aspects découlant du cycle de l'eau. C'est pourquoi les hydrologues utilisent des modèles hydrologiques qui simplifient le processus physique du cycle de l'eau.

Dans le but d'évaluer l'influence des critères de calage sur le bilan, deux modèles pluie-débits globaux (HBV et GR4J) ont été utilisés pour la reproduction des éléments du bilan hydrologique sur le bassin versant de l'Ouémé aux exutoires de Bonou et de Savè. Trois (3) critères d'efficacité (le Nash, le coefficient de détermination (R^2) et le Kling gupta efficiency (KGE) ont été considérés pour le calage et la validation. Les résultats montrent que le critère de Nash permet de bien apprécier la simulation des différentes parties de l'hydrogramme. Quant au KGE, il permet de mieux simuler les débits de pointes et les éléments du bilan hydrologique plus que les autres critères d'efficacité. Cette étude pourrait servir de base pour le choix des critères de performance en modélisation hydrologique.

Mots clés : Critères de calage, Hydrogramme, Bilan hydrique, modèle pluie-débit

ABSTRACT

Hydrology is the science that studies the entire water cycle (surface water, groundwater, runoff, rainwater and snowmelt). It allows, among other things, the analysis of precipitation and its distribution over a catchment area. However, the complexity of this science and its close relationship with meteorology means that it overlaps with the other earth sciences. It is therefore all the more important, but complex, to consider all aspects arising from the water cycle. This is why hydrologists use hydrological models that simplify the physical process of the water cycle.

In order to evaluate the influence of the calibration criteria on the balance, two global rainfall-flow models (HBV and GR4J) were used to reproduce the elements of the hydrological balance in the Ouémé catchment area at the Bonou and Savè outlets. Three (3) efficiency criteria (Nash, coefficient of determination (R^2) and Kling gupta efficiency (KGE)) were considered for calibration and validation. The results show that the Nash criterion allows a good appreciation of the simulation of the different parts of the hydrograph. As for the KGE, it allows better simulation of the peak flows and the elements of the hydrological balance than the other efficiency criteria. This study could serve as a basis for the choice of performance criteria in hydrological modelling.

Key words: calibration criteria, hydrograph, water balance, rainfall-runoff model

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ΔS	Variation du stock
DGeau	Direction Générale de l'eau
ETR	Evapotranspiration réelle
GR4J	modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journaliers
HBV	Hydrologiska Bryans Vattenbalansadelning
INE	Institut National de l'Eau
KGE	Kling gupta efficiency
P	Précipitation
Qobs	Débit observé
Qsim	Débit simulé
R^2	Coefficient de détermination

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les deux stations utilisées	14
Tableau 2 : Performance des modèles en calage	22
Tableau 3 : Performance des modèles en validation	22
Tableau 4 : Performance des critères d'efficacité en période humide.....	28
Tableau 5 : Performance des critères d'efficacité en période sèche	29
Tableau 6 : Performance des critères de calage et différence des éléments du bilan hydrologique en calage.	30
Tableau 7 : Performance des critères de calage et différence des éléments du bilan hydrologique en calage	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.....	9
Figure 2 : Structure générale du modèle HBV	16
Figure 3 : Structure générale du modèle GR4J.....	17
Figure 4 : HBV Savè calage	24
Figure 5 : GR4J Savè calage	24
Figure 6 : HBV Bonou calage	25
Figure 7 : GR4J Savè calage	25
Figure 8 : HBV Savè validation	26
Figure 9 : GR4J Savè validation.....	26
Figure 10 : HBV Bonou validation.....	27
Figure 11 : GR4J Bonou validation.....	27

Table des matières

.....	1
DEDICACE.....	iv
REMERCIEMENT	v
RESUME	vi
ABSTRACT	vii
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
INTRODUCTION GENERALE.....	2
1. Mise en Contexte et Problématique	2
2. Revue de littérature.....	3
2.1. Clarification conceptuelle	3
2.2. Modélisation hydrologique multiple	5
3. But de la recherche.....	6
4. Problème et question de recherche	6
5. Objectif du mémoire	6
5.1. Objectif général	6
5.2. Objectifs spécifiques.....	6
CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIEL ET METHODES	7
CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIEL ET METHODES	8
1.1. Introduction	8
1.2. Milieu d'étude.....	8
1.2.1. Localisation	8
1.2.2. Géomorphologie et Géologie.....	10
1.2.3. Hydrogéologie	11
1.2.4. Hydrologie.....	12
1.2.5. Sol, Végétation, Climat, Hydrographie	12
1.2.6. Quelques aspects socio-économiques	13
1.3. Données utilisées/Collectées	14
1.4. Matériel utilisé	14
1.5. Méthodes	19
1.6. Conclusion.....	20
CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSION	21

CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSION	22
2.1. Introduction	22
2.2. Simulations avec les modèles HBV et GR4J et les éléments du bilan hydrologique.	22
2.3. Influences des critères de calage sur la simulation des débits extrêmes	28
2.3.1. Performance des critères de calage en période humide	28
2.3.2. Performance des critères de calage en période sèche	29
2.4. Comparaison et identification des critères de calage influençant les éléments du bilan hydrologique	30
2.5. Discussion	33
2.6. Conclusion	33
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	34
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	35
Synthèse des principaux résultats	35
Perspectives	35
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	36

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. Mise en Contexte et Problématique

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau dans son ensemble (les eaux de surface, les eaux souterraines, les eaux de ruissellement, les eaux de pluie et les eaux de fonte et des neiges). Elle permet, entre autres, d'analyser les précipitations et leur distribution sur un bassin versant.

On peut souvent entendre sur les médias que des inondations ont provoqué des dégâts considérables et tuées un bon nombre de personnes. Ce fut le cas en octobre-septembre 2010 au Bénin. Ces phénomènes, loin d'être extraordinaires, ont davantage de conséquences à l'heure actuelle car les hommes, en quête de plus d'espace, construisent leurs habitats dans le lit majeur des rivières. Il devient alors nécessaire de prévoir l'élévation du niveau dans les cours d'eau, afin d'avertir rapidement les populations en cas de danger et ainsi, éviter les victimes et des dommages trop importants.

Dans ce but, des auteurs se servent des modèles hydrologiques qui permettent, à partir des prévisions de pluie et des connaissances des pluies passées, de prévoir des débits et donc des hauteurs d'eau en un point d'un cours d'eau. Or de nos jours les changements climatiques ont et auront des impacts hydrologiques significatifs sur la prévision des débits. De nouvelles approches en modélisation doivent donc être explorées afin de combler les lacunes actuelles (Liu et Gupta, 2007). Ainsi, plutôt que d'entrer dans la course à la création de nouveaux modèles pour des gains de performance souvent limités (Sanders, 1963), une approche multimodèle combinant plusieurs modèles hydrologiques globaux peut être privilégiée.

Ces modèles comportent un certain nombre de paramètres non directement mesurables et qui doivent donc être déterminés par calage. Pour cela, on fait appel à une fonction objectif, qui est un critère numérique que l'on essaie d'optimiser, mesurant l'écart entre les observations et les simulations. Parmi ces critères on peut citer le critère du Nash-Sutcliffe, le coefficient de détermination R^2 et le King-Gupta Efficiency KGE.

Le mémoire aura pour objectif d'examiner comment les critères de calage influencent le bilan hydrologique résultant de la modélisation. En d'autres termes, le mémoire cherchera à répondre à la question suivante : « Comment les différents critères de calage peuvent-ils affecter la précision de la simulation des éléments du bilan hydrologique ? » IL convient de souligner que les critères de calage les plus efficaces permettent généralement de mieux simuler les composantes du bilan hydrologique.

2. Revue de littérature

2.1. Clarification conceptuelle

- **Approche multimodèle :**

L'approche multimodèle en hydrologie a fait l'objet de plusieurs recherches depuis les dernières décennies.

Nous pensons qu'il est important de bien définir ce qu'est un modèle hydrologique avant de détailler l'approche multimodèle. Dans sa plus simple expression, un modèle accepte des intrants pour produire des extrants, généralement en utilisant des équations mathématiques pour représenter les phénomènes impliqués dans la réalité que le modèle essaie de reproduire. Pour l'utilisateur, l'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse "satisfaisante" aux questions qu'il se pose à propos de l'objet modélisé. De nos jours il existe différents types de modèles : du modèle physique au modèle empirique, du distribué au global, et chaque type exprime une façon de concevoir le cycle hydrologique.

En général un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique). De nombreux modèles hydrologiques ont été développés depuis la fin des années 1960. Le choix du type de modèle à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation ainsi que des données d'entrées disponibles.

Le constat des difficultés pour un modèle unique à prendre en compte la totalité des informations climatiques et l'existence de potentielles complémentarités entre modèles a conduit un certain nombre d'hydrologues (Clemen, 1989 ; Coulibaly et al., 2003 ; Shamseldin et O'Connor, 1996 ; etc.) à s'intéresser aux méthodes multimodèles (basées sur la combinaison de plusieurs modèles) dans le but d'augmenter les performances et de réduire les incertitudes des simulations. A partir des sorties des modèles, l'approche multimodèle sera développée. Les méthodes multi modèles sont toutes basées sur un même principe : la combinaison des sorties de différents modèles (Obada, 2016).

L'approche multimodèle a déjà fait l'objet de plusieurs études en hydrologie, mais dans notre cas actuel elle nous aidera à comparer les extrants des modèles utilisés afin de déterminer les critères de calage qui influencent au mieux le bilan hydrologique à long terme et sur les périodes extrêmes c'est-à-dire les périodes de crue et les périodes d'étiage.

- **Calage**

Le calage consiste à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible. Le calage se fait avec deux ou plusieurs années de mise en route, c'est-à-dire une année pendant laquelle les erreurs du modèle ne sont pas comptabilisées dans le critère d'adéquation permettant de juger la performance du modèle calé. « Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage » (Houngpè, 2022).

Le modèle hydrologique adopté devra être calé afin d'identifier et de reconnaître certaines propriétés hydrologiques du bassin versant. En effet, la simplification de la réalité implique que certains, voire la totalité, des paramètres utilisés pour décrire le modèle, ne peuvent être reliés directement à des mesures de terrain, d'où la nécessité d'un calage. Ainsi, à partir de pluies, on déduit des estimations de débits que l'on compare aux débits observés, grâce à des critères appelés fonctions objectif. Le calage s'effectue sur une période où la pluie, le débit et l'évapotranspiration potentielle doivent être connus. En général, on considère une période d'une à plusieurs années afin de caler nos paramètres pour l'ensemble des saisons, sur des événements très différents.

Par ailleurs ils existent deux types de calages que sont : le calage manuel et le calage automatique. En ce qui concerne le calage manuel c'est l'utilisateur du modèle qui recherche la valeur des paramètres qu'il va utiliser pour faire tourner le modèle. Cette technique laisse une part de subjectivité due à l'utilisateur. Par contre pour le calage automatique on enlève la part de subjectivité due à l'utilisateur pendant le calage manuel, un algorithme mathématique peut déterminer les paramètres par essais successifs, en tâtonnant. Cet algorithme est capable de déterminer les paramètres les plus appropriés pour que les débits calculés soient les plus proches possibles de la réalité. Mais cette méthode, comme le calage manuel, reste soumis au risque de rencontrer un optimum secondaire.

Une majorité des utilisations de modèle reposent sur ces techniques d'estimations mathématiques des paramètres. Le mode de calage semi-automatique est préféré en général à des méthodes manuelles ou automatiques.

- **Critère de calage**

Le critère de calage est le critère numérique qui permet de juger de l'adéquation d'un modèle, c'est-à-dire de la comparaison entre la chronologie réelle des débits et celle simulée par le modèle. Les critères de calage ou critères d'ajustement peuvent être calculés (entre autres) sur :

- les débits Q Renseigne sur les débits élevés
- la racine carrée du débit $Q^{0.5}$ Renseigne sur les débits moyens
- le logarithme du débit $\log Q$ Renseigne sur les faibles débits.

- **Bilan hydrologique**

Selon le *Dictionnaire de la Géographie*, le bilan hydrologique est l'étude comparée de la lame d'eau tombée à la surface d'un territoire ou d'un bassin versant et des différentes formes de transfert de cette eau soit par évapotranspiration, écoulement, infiltration et alimentation des nappes souterraines.

L'expression du bilan hydrologique ou le bilan hydrique peut s'écrire sous la forme :

$$P = Q + ETR \pm \Delta S$$

P : Précipitation : Eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, sous forme liquide (bruine, pluie, averse) ou solide (neige, grêle) ainsi que les précipitations déposés ou occultes (rosée ;),

Q : Ruissellement : La lame d'eau écoulée par le réseau hydrographique,

ETR : Evapotranspiration réelle : la tranche d'eau retournée à l'atmosphère par évapotranspiration

ΔS : Variation de stock : la variation de stock se distingue en général sous deux formes, d'une part on a les eaux accumulées dans les dépressions de la surface du sol, d'autre part les eaux emmagasinées dans le sol et dans le sous-sol.

2.2. Modélisation hydrologique multiple

Les travaux de (Gaba, al., 2015) ont porté sur la modélisation d'une approche d'ensemble pour évaluer les ressources en eau dans le bassin de la Mékrou au Bénin. L'objectif de leurs études était de tester l'éventuelle adéquation d'un modèle d'ensemble pour reproduire les écoulements observés dans le bassin de la Mékrou et dans quelle mesure cette simulation d'ensemble pourrait être utilisée à la place d'un modèle unique. L'application de modèle unique a montré des lacunes en termes de simulation simultanée des hauts et des bas débits. Ainsi les modèles (HBV, GR4J, et MODHYPMA) ont été calibrés selon deux modes différents (hauts et bas débits) et ils ont été testés plus avant à travers l'élaboration de trois différents ensembles. Ces auteurs ont évalué l'influence des critères Nash, NashRoot, Nashlog, KGE, wR^2 , APB, PB, RSR et R^2 sur les débits d'étiage et de crue au niveau du bassin de la Mékrou. Les hydrogrammes observés ont été séparés en trois parties afin d'évaluer avec précision quel modèle ou ensemble s'adapte le mieux aux hydrogrammes. Sur la base de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), les modèles et les ensembles dérivés ont été évalués en utilisant les données de décharge. La comparaison a été faite entre les modèles, les

ensembles moyens et médians. De bons résultats ont été obtenus pour tous les modèles et ensembles, mais les meilleurs ont été obtenus par l'ensemble basé sur la moyenne. Les analyses faites avec HBV ont montré que ce modèle simule plus ou moins bien les différentes parties de l'hydrogramme.

3. But de la recherche

Cette étude a pour but d'évaluer l'influence des critères de calage sur le bilan hydrologique à partir de plusieurs modèles hydrologiques (HBV et GR4J). Elle sera ainsi une contribution aux connaissances sur la modélisation hydrologique.

4. Problème et question de recherche

Les questions de recherches suivantes ont été formulées

- Le modèle HBV permet-il de bien simuler le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou et de Savè ?
- Le modèle GR4J permet-il de bien simuler le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou et de Savè ?
- Quelle est l'influence des critères de calage et de validation sur le bilan hydrologique du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou et de Savè ?

5. Objectif du mémoire

5.1. Objectif général

L'objectif général de cette étude est d'utiliser l'approche multi modèle pour évaluer l'influence des critères de calage sur le bilan hydrologique.

5.2. Objectifs spécifiques

- Caler et valider le modèle HBV sur le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou et de Savè en utilisant séparément plusieurs critères de performance.
- Caler et valider le modèle GR4J sur le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou et de Savè en utilisant séparément plusieurs critères de performance.
- Identifier l'influence des critères de calage et de validation sur le bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou et de Savè.

CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIEL ET METHODES

1.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons le milieu d'étude c'est-à-dire la situation géographique, le climat, l'hydrographie et la végétation. Enfin, nous présenterons les données, les critères de calage utilisés et la méthodologie utilisée pour les modélisations avec les modèles HBV et GR4J.

1.2. Milieu d'étude

Dans cette étude, nous utiliserons deux stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé que sont la station de Savè et la station de Bonou.

1.2.1. Localisation

Le bassin versant de l'Ouémé est situé en Afrique de l'ouest en République du Bénin. Ce bassin versant est à cheval sur les départements de la Donga, du Borgou, des Collines, du Zou, de l'Ouémé, du Plateau et du Littoral et compte en son sein 38 communes soit 49,35 % sur les 77 communes du Bénin. Avec ses affluents, dont le Zou et l'Okpara, il couvre une superficie de 46 200 km² répartis d'une part sur le socle Dahoméen, partie supérieure du bassin et d'autre part sur les formations sédimentaires du bassin côtier, appelé l'Ouémé inférieur (Moniod, 1973). La diversité de ces substratums géologiques influence directement ou indirectement la manifestation des événements extrêmes hydro climatiques (Kodja et al., 2018).

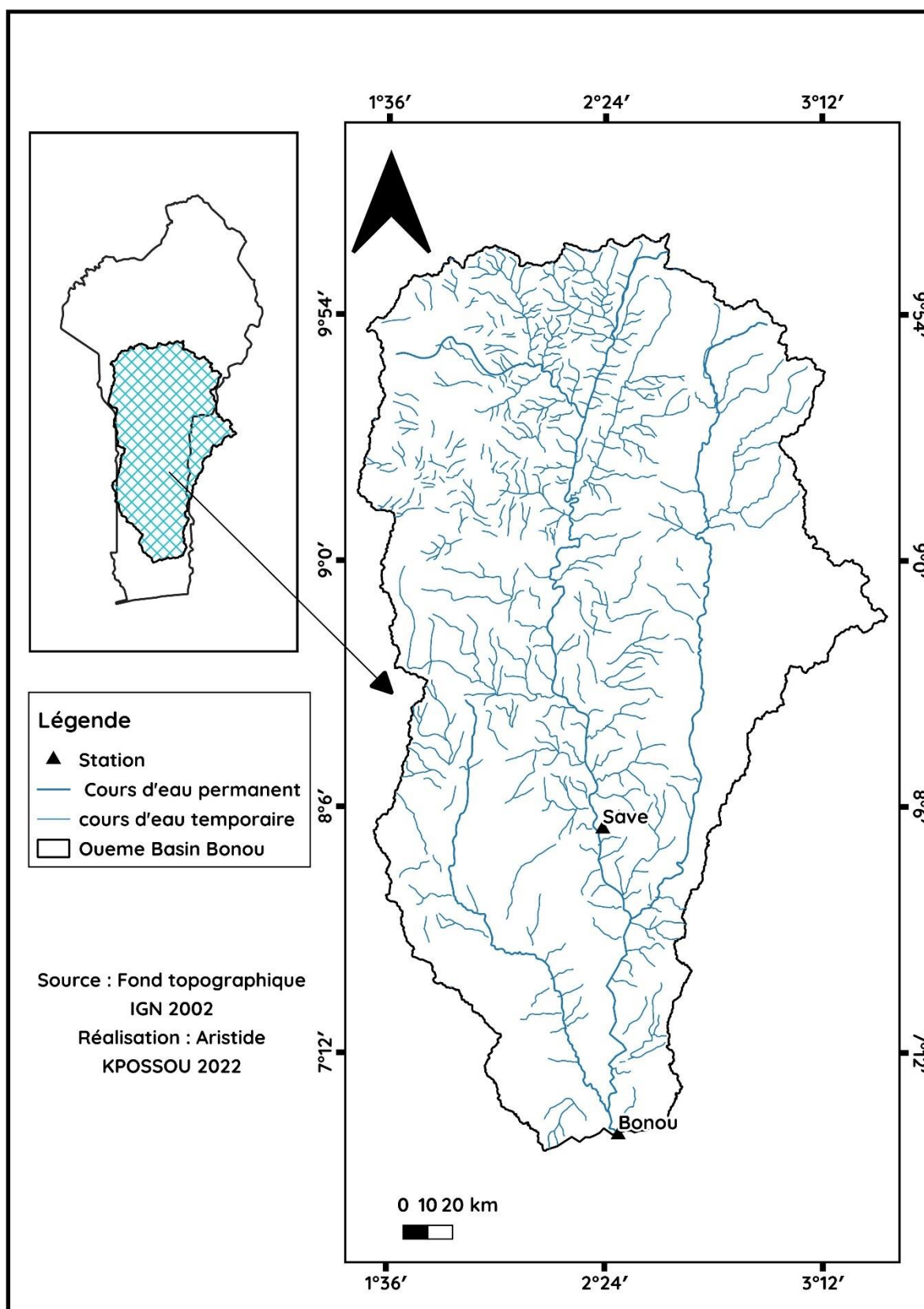


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

1.2.2. Géomorphologie et Géologie

Le bassin de l'Ouémé comprend deux unités géologiques : un bassin supérieur à substrat intégralement précambrien, et au relief accusé ; un bassin inférieur à substrat sédimentaire tendre, au relief peu accentué et monotone qui favorise l'étalement et la divagation des cours d'eau, l'érosion et l'alluvionnement. La limite entre les deux bassins se situe un peu au nord du confluent du Zou et de l'Ouémé. Le delta de l'Ouémé est situé entre 7°16'N et le lac Nokoué (16°30'N) et 2°15'-2°35'E, en république du Bénin. La zone deltaïque occupe une superficie de 9000 Km² et s'étend sur 90 Km le long du fleuve jusqu'à son débouché dans la zone lagunaire de Porto-Novo. (Colombani et al. 1972). Le fleuve Ouémé, en pénétrant dans le bassin sédimentaire côtier par le nord-est du plateau de Zangnanado, reçoit son principal affluent Zou à la latitude de Pobè puis longe le plateau de Pobè-Porto-Novo avant de se jeter dans la lagune de Porto-Novo. La zone ainsi traversée constitue le delta de l'Ouémé qui couvre les communes de Bonou, d'Adjohoun, de Dangbo et des Aguégus. Son relief est peu marqué avec une pente très faible favorisant l'étalement des eaux pendant la crue. Le delta de l'Ouémé est subdivisé en 3 grandes parties :

- Le haut-delta, constituant sa partie nord, est un couloir ouvert dans les formations argileuses du crétacé et de l'éocène sur une distance de 20 à 30 Km. Il s'étend jusqu'à la limite de Bonou où commence le moyen delta.
- Le moyen delta est une plaine longue de 50 Km environ qui s'étend de Bonou à Azowlissè en passant par Adjohoun. La largeur est relativement uniforme dans cette zone où elle ne dépasse guère 10 Km (Nonfon, 1988). Le lit du fleuve est sablonneux ; l'eau est peu profonde en saison sèche et les berges sont assez hautes.
- Le bas delta débute de l'aval d'Azowlissè où la vallée s'élargit brusquement jusqu'à 20 Km et se termine à la façade sud où le fleuve se jette dans la lagune de Porto-Novo. Dans cette partie, le lit du fleuve est vaseux, l'eau profonde en saison sèche et les berges sont basses. La plaine inondable est également basse et reste marécageuse toute l'année. Le moyen delta et le bas delta constituent la basse vallée de l'Ouémé. Les coupes topographiques (est-ouest) de la vallée de l'Ouémé font apparaître deux unités morphologiques très importantes : le plateau et la basse plaine inondable.
 - Le plateau : c'est une formation latéritique d'une grande perméabilité. Les eaux d'infiltration réapparaissent en de nombreuses sources au pied du plateau. Ces résurgences (par exemple Sissèkpa, Saôrô dans le bas-delta) offrent des possibilités de pêche et donnent naissance à des marécages permanents.
 - La basse plaine inondable : les crues de l'Ouémé qui s'étalent chaque année et déposent leur charge d'alluvions, sont responsables du modelé de la vallée et de la nature des sols qui la recouvrent. En effet, le fleuve

en débordant se débarrasse sur ses berges des alluvions les plus lourdes et les éléments les plus fins sont déposés aux limites de la zone d'inondation. De l'amont vers l'aval, les dépôts sont d'autant plus fins que la pente de la plaine est plus faible d'est en ouest. Ce mécanisme de dépôt des charges solides est à l'origine de la formation de bourrelets de berge de part et d'autre du lit mineur du fleuve. Ceux-ci sont aplatis au fur et à mesure qu'on descend du nord vers le sud. La séparation entre les bassins inférieur et supérieur de l'Ouémé n'est pas artificielle ; elle est marquée par le passage brutal du socle précambrien aux terrains sédimentaires de la zone côtière. Ce sont les roches métamorphiques entrecoupées de roches éruptives dures qui composent le substratum précambrien qui donnent au bassin supérieur un relief plus accusé avec des collines granitiques et des « monts » gneissiques ou quartzitiques, coupés de thalwegs marqués peu alluvionnaires. Le bassin de l'Ouémé au pont de Savé (23600 Km) étend 55% de sa superficie entre 300 et 400 m d'altitude. Le delta proprement dit est à une altitude comprise entre 0 et 20 m. Les profils en long de l'Ouémé et de ses affluents montrent que ces rivières n'ont pas encore atteint leur équilibre et continuent à creuser leur lit. Sur le socle précambrien, la nature lithologique des terrains traversés provoque des ruptures de pentes rapides et même des chutes comme celles de l'Okpara en aval de Kaboua. D'une façon générale, la pente du lit est de l'ordre de 10m/Km dans la plus haute partie du cours et atteint 0,5 m/Km, parfois moins, en arrivant dans le delta. Là, la pente diminue fortement puisqu'elle n'est en moyenne que de 10,6 cm/ Km entre Sagon et Houédomé.

1.2.3. Hydrogéologie

La partie du bassin de l'Ouémé située dans la zone tropicale sèche encore appelée zone soudanienne avec une saison sèche et une saison humide se caractérise par une coexistence de ruissellement hortonien et d'écoulements de subsurface et souterrains sur surfaces saturées (Chevallier et Planchon, 1986). Les nappes y sont peu profondes et affleurantes et contribueraient aux écoulements. Elle recouvre la partie amont de l'Ouémé qui prend sa source au pied de l'Atacora. Le haut bassin de l'Ouémé repose sur un socle fracturé granito-gneissique dit dahoméen constitué essentiellement de migmatites et gneiss (Faure et Volkoff, 1998). Ainsi, ce socle est altéré, fracturé et fissuré dans sa partie supérieure puis de moins en moins en profondeur et agit comme un réservoir de stockage, avec une transmissivité faible de l'ordre de $10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ (Kamagaté, 2006). Le bassin de l'Ouémé utilise les chenaux de Lagos et de Cotonou pour communiquer avec l'océan atlantique.

1.2.4. Hydrologie

L'hydrologie du bassin de l'Ouémé est influencée par plusieurs facteurs, notamment la topographie, la géologie, le climat et l'utilisation des terres. Les précipitations dans la région varient considérablement d'une saison à l'autre, avec une saison des pluies de Mai à Octobre dans le nord du bassin. Les eaux de surface du bassin de l'Ouémé sont utilisées pour l'irrigation, la pêche et d'autres activités économiques. Cependant, l'utilisation croissante des terres pour l'agriculture, l'exploitation minière et la construction de barrages peut entraîner une diminution de la quantité d'eau disponible. Pour répondre à ces défis, le gouvernement béninois a élaboré des plans de gestion intégrée des ressources en eau pour le bassin de l'Ouémé, qui visent à promouvoir une utilisation durable et équitable des ressources en eau, la réduction des impacts environnementaux et sociaux de l'utilisation des terres, et la promotion de pratiques agricoles durables pour assurer la sécurité alimentaire dans la région.

1.2.5. Sol, Végétation, Climat, Hydrographie

1.2.5.1. Sols et Végétation

Selon Sylvain et al. (2005), 5 ou 6 types différents d'occupation des sols ont été caractérisés sur le haut bassin de l'Ouémé. Ainsi, la végétation typique de la zone est la savane arborée. On y trouve également d'autres états dégradés de la forêt claire naturelle : savane arbustive, jachère, cultures, zones ouvertes. Les études de reconnaissance pédologiques menées sur le haut bassin de l'Ouémé ont mis en évidence une structure verticale des sols, conforme à celle observée sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest en zone Soudanienne. Une couche de sol de surface de 1 à 3 mètres d'épaisseur surplombe une zone d'altérites de 10 à 20 mètres d'épaisseur formées par les arènes issues de la décomposition des roches du sol, qui repose elle-même sur le socle. Les sols sont ferrugineux et se caractérisent par une stratification marquée. Un premier horizon argileux, relativement imperméable s'observe à une profondeur de l'ordre d'un mètre. La profondeur de cet horizon, ses caractéristiques hydrodynamiques ainsi que celle des horizons qui le surmontent, sont les principaux facteurs contrôlant le stock d'eau présent dans le sol, la production des écoulements et la recharge des nappes souterraines.

Actuellement les couverts végétaux sont en pleine évolution du fait de l'anthropisation croissante de la zone : les forêts sont de plus en plus défrichées (par brûlis) au profit de culture de rente (coton) ou vivrière (igname, manioc, maïs, sorgho, riz). Aussi, on tend de plus en plus vers la savane qui montre une forte évaporation et des pertes d'interception accompagnées d'une forte capacité de stockage en raison des horizons du sol plus épais parce que l'érosion est moins prononcée sur ces secteurs avec pour conséquence un écoulement lent de surface.

1.2.5.2. Le Climat

Dans la partie Sud du bassin de l'Ouémé qui correspond à la zone du delta et des lagunes, le climat est du type subéquatorial. Il règne jusqu'à la latitude de Savè et est caractérisé par une forte humidité, une température élevée et plus ou moins constante.

1.2.5.3. Hydrographie

Le système hydrographique du delta est fort complexe. Au niveau du confluent de l'Ouémé et du Zou se trouve une plaine d'inondation bien individualisée, sorte de delta intérieur du Zou, qui s'étend sur une grande superficie. En aval du confluent, le cours d'eau de l'Ouémé longe des terres exondées situées à l'est. Les plaines d'inondation s'étendent presque exclusivement à l'ouest de l'Ouémé, sur une largeur de 6 à 8 Km. La rivière Sô, qui sort du lac Hlan, coule dans cette dépression, parallèlement à l'Ouémé. Lors des fortes crues, ce lac est alimenté par des eaux provenant du Zou, et la Sô reçoit deux affluents de rive gauche : la Zounga, provenant du Zou et l'Agbagbe provenant de l'Ouémé. Lors des faibles crues, la Sô supérieure et le lac Hlan ne sont plus alimentés que par leur bassin propre. Un peu en aval, un défluent de l'Ouémé l'Ouovi rejoint la Sô. La vaste plaine déprimée entre le fleuve Ouémé et la Sô est presque entièrement recouverte par les eaux en période de crue. Le régime hydrologique de l'Ouémé est de type tropical de transition, avec une période d'étiage rigoureux de janvier à mai. La crue débute en juin et le débit mensuel maximum a lieu en septembre. La décrue est rapide en novembre et décembre. Les deux principaux affluents de l'Ouémé sont : le Zou (sur sa rive droite, long de 150 Km) qui prend sa source dans la région de Savalou et se jette dans le fleuve peu avant Bonou, et l'Okpara (sur sa rive gauche, long de 200 Km), plus important que le premier, qui prend sa source dans les régions de Nikki et se jette dans le fleuve à la hauteur du village Okpa non loin de Bétékoukou formant une série de chutes et de rapides. On distingue également plusieurs lacs le long de l'Ouémé dont les plus importants sont les lacs Azili et Célé et dont la productivité est liée à celle du fleuve. La lagune de Porto-Novo, d'une superficie de 50 Km², est située au sud du delta et constitue l'exutoire par lequel les eaux du fleuve Ouémé se jettent dans l'Océan par le chenal de Lagos.

1.2.6. Quelques aspects socio-économiques

La pêche est active surtout en période de crue. Il existe des méthodes autochtones de pisciculture : des parcs (acadja) et des étangs (whedo) creusés dans la plaine inondable, des trous Cahlo creusés dans la berge du fleuve.

En saison sèche, les pêcheurs pratiquent l'agriculture dans la plaine inondable fertile. Les principales activités économiques du delta de l'Ouémé sont également la pêche et l'agriculture dont l'exercice est régi par le régime du fleuve Ouémé.

Dans les bas-fonds, on n'y effectue qu'une seule culture de décrue : les cultures maraîchères et le maïs. L'élevage est également pratiqué dans cette zone du delta de l'Ouémé. On y élève des bovins, des porcins, des caprins et de la volaille. La pêche représente près de 30 à 40 % du revenu du paysan, ce qui est considérable. Seules les femmes mènent une activité commerciale. Elles vendent du poisson et des produits alimentaires de première nécessité.

1.3. Données utilisées/Collectées

Les données hydrométriques (débits) ont été obtenues à la DGEau. Quant aux données de précipitation, d'évapotranspiration et de température journaliers ont été obtenus à l'agence Météo-Bénin. Ces données proviennent des stations pluviométriques et hydrométriques et s'étendent sur la période de 1986 à 2016. Cette étude s'est focalisée sur la série de donnée de 1986 à 1988 pour la mise en route, de 1989 à 2002 pour le calage et enfin de 2003 à 2016 pour la période validation.

Tableau 1 : Les deux stations utilisées

Nom de la station Hydrométrique	Code	Longitude (Degré décimal)	Latitude (Degré décimal)
Bonou	1114500107	2.45	6.9
Savè (Synoptique)	1110012400	2.43	7.98
Nom de la station Pluviométrique	Code	Longitude (Degré décimal)	Latitude (Degré décimal)
Bonou	1110004000	2.45	6.9
Savè	1110012400	2.43	7.98

1.4. Matériel utilisé

- Le logiciel Excel a été utilisé pour arranger les données avant de les insérer dans les logiciels de modélisation,
- La modélisation avec le modèle GR4J a été faite avec le logiciel Excel,
- Le logiciel HBV a été utilisé pour la modélisation,
- Le logiciel QGIS Desktop 2.6.1 a servi à la réalisation de la carte de la zone d'étude

➤ Modèle HBV

Le modèle HBV et ses variantes ont été appliqués dans un grand nombre de pays et d'environnements (Graham, 2000). Bergström (1992) mentionne des applications à plus de 200 bassins dans 30 pays, y compris des bassins nivaux et glaciaires des Alpes, de l'Himalaya, de Nouvelle-Zélande, du Groenland et d'Amérique du Nord, des bassins arctiques en Scandinavie et en Alaska du nord et des bassins à environnements de basse latitude tant humides que semi-arides comme au Panama.

Le modèle HBV se compose de différentes routines et simule le débit d'un bassin versant, généralement à un pas de temps quotidien, sur la base de séries chronologiques de précipitations et de température de l'air ainsi que d'estimations des taux

d'évapotranspiration potentiels mensuel à long terme. Il prend en compte les caractéristiques topographiques comme la superficie et l'altitude pour la discrétisation spatiale du domaine d'étude en zones homogènes. Le modèle HBV consiste en une fonction de production pour l'écoulement vertical où la recharge de la nappe et l'évapotranspiration réelle sont des fonctions du stockage en eau actuel dans le réservoir sol et où la formation de l'écoulement de surface se fait à travers trois réservoirs dont le premier est non-linéaire. Pour les fonctions de production neige et sol, les calculs sont réalisés pour chaque zone. Ainsi le modèle est semi-distribué alors que les paramètres de la fonction de transfert sont globaux par sous-bassin. Les paramètres de la neige ne seront pas considérés dans cette étude.

Les paramètres du modèle sont :

TT : Température critique de fonte de la neige

CFMAX : facteur

SFCF : facteur de correction des tombées de neige

CFR : coefficient de regel

CWH : Capacité de rétention de l'eau

FC : Seuil de saturation du sol

LP : valeur d'humidité du sol au-dessus de laquelle AET atteint PET

BETA : Paramètre puissance du modèle (infiltration)

PERC : Coefficient de percolation

UZL : paramètre de seuil

K0 : Coefficient puissance de vidange du réservoir supérieur

K1 : Coefficient 1 de vidange dans le réseau hydrographique

K2 : Coefficient 2 de vidange dans le réseau hydrographique

MAXBAS : Temps de base de l'hydrogramme unitaire

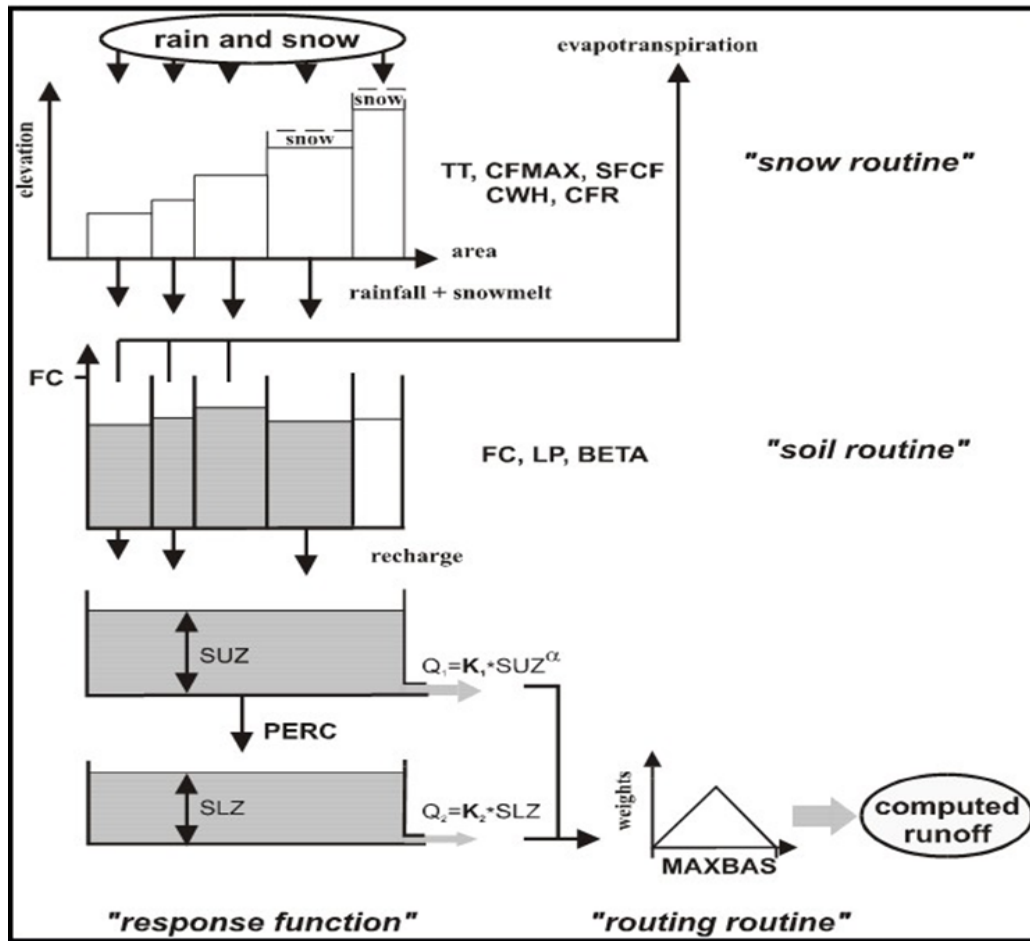


Figure 2 : Structure générale du modèle HBV

➤ Modèle GR4J

Le développement du modèle GR4J a été initié par Claude Michel au début des années 1980 au Cemagref, un institut public de recherche en France. La première version du modèle n'avait qu'un seul paramètre. Le développement ultérieur du modèle GR4J a été entrepris en utilisant une approche de modélisation avec un grand nombre de bassin versants qui ont été utilisés pour évaluer et améliorer le modèle.

L'approche de modélisation GR4J est principalement empirique (Michel et al., 2006), et consiste à rechercher dans les données les plus efficaces, dans le but d'obtenir un modèle général, efficace et robuste. Le résultat étant un modèle hydrologique parcimonieux, avec des versions améliorées successives.

Le modèle GR4J est un modèle de bilan hydrique de captage qui relie le ruissellement aux précipitations et à l'évapotranspiration à l'aide de données quotidiennes. Ce modèle fonctionne à l'échelle d'un bassin versant avec un pas de temps journaliers. Pour une utilisation du modèle sur un bassin versant donné on fait entrer dans ce dernier la superficie du bassin versant en km^2 , les séries temporelles des précipitations quotidiennes (mm), les séries temporelles de l'évapotranspiration

potentielle quotidienne (mm) et les séries temporelles du débits quotidien. Les données de débits sont utilisées pour l'étalonnage et l'évaluation du modèle.

IL contient quatre paramètres :

X1 : Capacité du magasin de production (mm)

X2 : Coefficient d'échange d'eau (mm)

X3 : Capacité du magasin de routage (mm)

X4 : temps de base (jour)

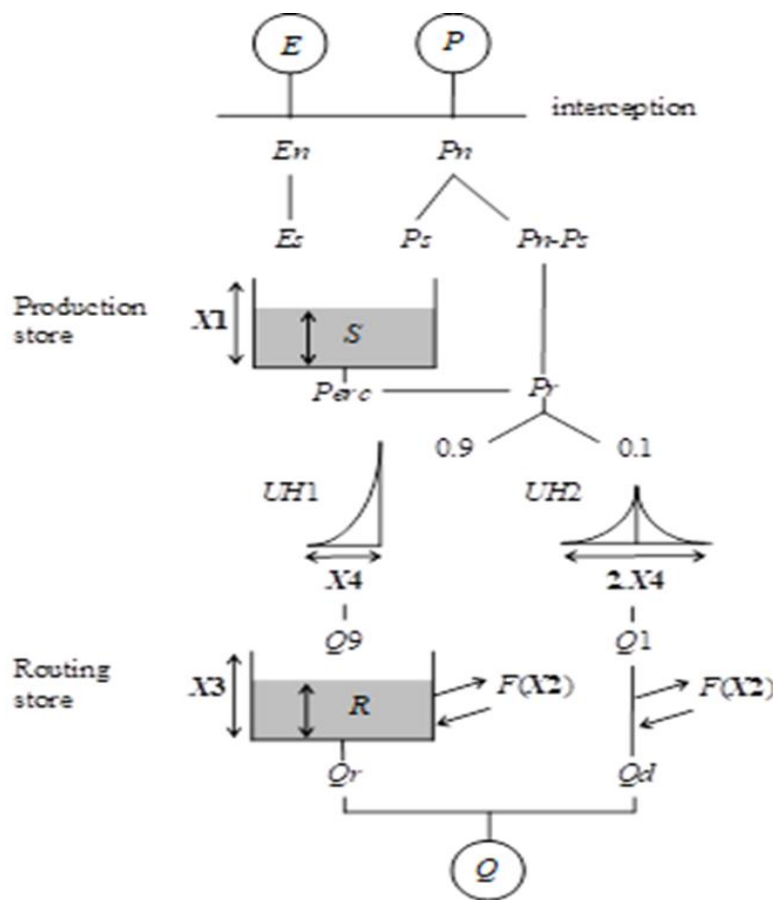


Figure 3 : Structure générale du modèle GR4J (Perrin et al., 2007)

➤ Présentation des critères de calage utilisés

- Nash

Le Nash (Nash-Sutcliffe Efficiency) est un critère largement utilisé en hydrologie pour la modélisation. Le coefficient d'efficacité du Nash-Sutcliffe exprime la proportion de la variance résiduelle entre les valeurs simulées et les valeurs observées par rapport à la variance expliquée des valeurs observées. Une valeur de NSE de 0,5 pour une comparaison des débits journaliers est considérée comme une valeur acceptable dans certaines études hydrologiques (Moriasi et al, 2007; Zhang et al, 2013; McCloskey et al, 2011).

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,\text{obs}} - Q_{i,\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,\text{obs}} - \text{moy}Q_{\text{obs}})^2} \quad (1)$$

- Le coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination est compris entre 0 et 1, et décrit combien de fois la distribution des débits simulés concorde avec ceux observés. Une valeur zéro décrit qu'il n'y a aucune corrélation alors que la valeur 1 décrit que la dispersion des débits simulés est égale à ceux observés. Des auteurs tels Moriasi et al (2007) suggèrent que toute valeur de R^2 supérieur à 0,5 pour des comparaisons des débits journaliers est un seuil acceptable en simulation hydrologique.

$$R^2 = \frac{\{\sum_{i=1}^n (Q_{i,\text{obs}} - \text{moy}Q_{\text{obs}})(Q_{i,\text{sim}} - \text{moy}Q_{\text{sim}})\}^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,\text{obs}} - \text{moy}Q_{\text{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{i,\text{sim}} - \text{moy}Q_{\text{sim}})^2} \quad (2)$$

- Le KGE

Le KGE (Kling Gupta Efficiency) a été développé par Gupta et al (2009) pour fournir une décomposition intéressante du critère de Nash. Dans le calcul de cet indice, trois composantes principales interviennent :

r : le coefficient de corrélation

β : le rapport entre l'écart type des valeurs simulés et l'écart type des valeurs observés

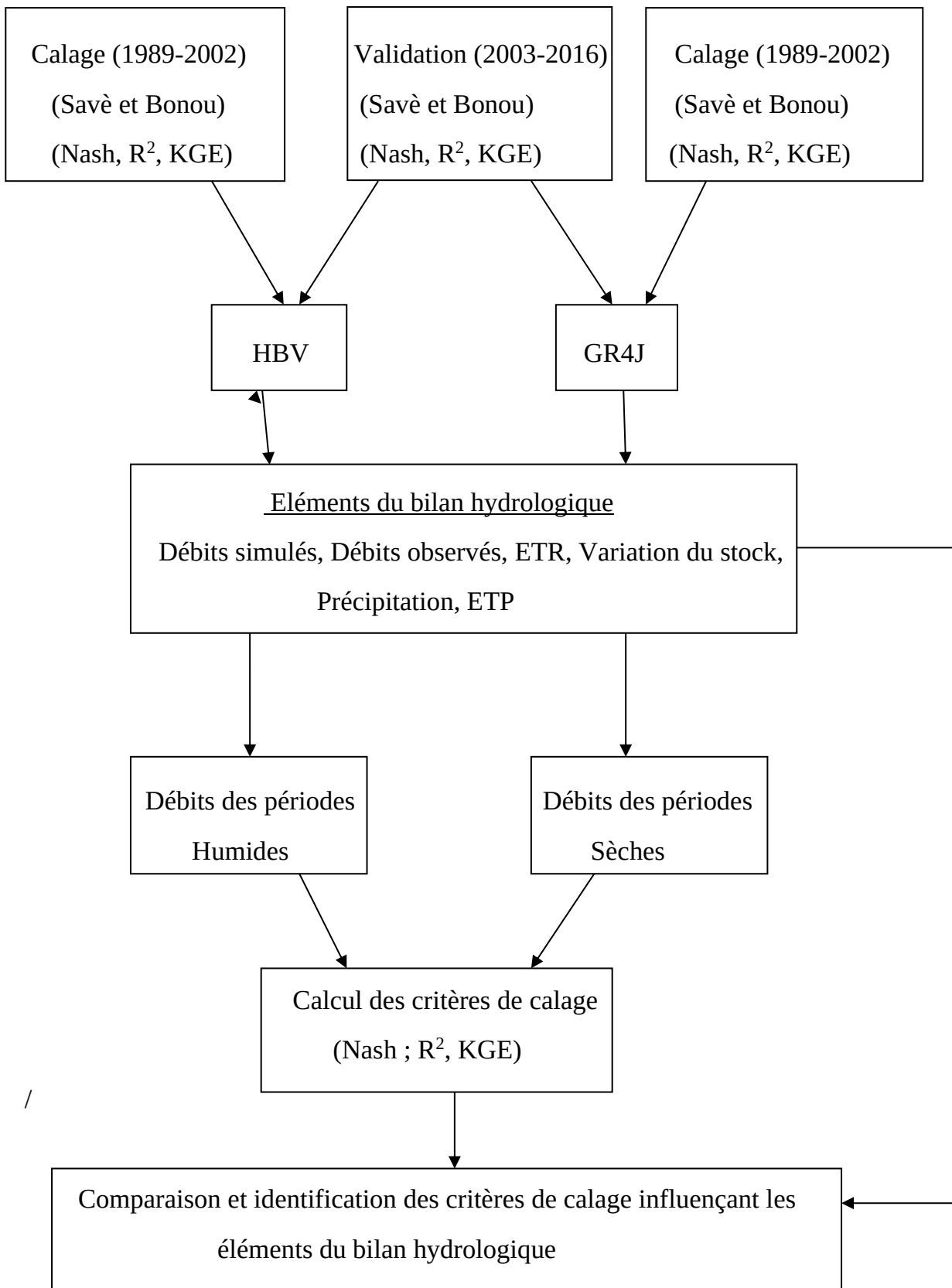
α : Le biais qui est égale au rapport de la moyenne des valeurs simulés et la moyennes des valeurs observés

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (3)$$

Plus le KGE est proche de 1 plus le modèle est précis.

1.5. Méthodes

La période de calage a été choisie de telle sorte qu'elle englobe toute la variabilité hydrologique du bassin versant (années humides, années sèches et année moyennes).



Les simulations sont faites en considérant simultanément le résultat des trois critères de calage tout en se focalisant chaque fois sur le meilleur résultat d'un seul critère d'efficacité choisi au préalable parmi les trois critères pour la simulation.

Pour les périodes humides, on extrait les débits simulés qui correspondent aux débits observés supérieur au troisième quartile. Pour les périodes sèches, on retire les débits simulés qui correspondent aux débits observés inférieur au premier quartile. On recalcule les critères de calage des périodes extrêmes.

Enfin les différences de pourcentages ont été utilisés pour évaluer l'influence des critères de calage sur chaque élément du bilan hydrologique. Dans notre étude A, B et C représentent respectivement les différences de pourcentages des débits, de l'évapotranspiration réelle et de la variation du stock.

$$A = \left[\frac{Q_{sim}}{Moyenne\ Q_{sim}} - 1 \right] * 100 ; \textbf{(4)} \qquad B = \left[\frac{ETR}{Moyenne\ ETR} - 1 \right] * 100 ; \textbf{(5)}$$

$$C = \left[\frac{\Delta S}{Moyenne\ \Delta S} - 1 \right] * 100 \textbf{ (6)}$$

Les moyennes ont été calculés par station et par période de calage et de validation.

1.6. Conclusion

Ce chapitre a donné un aperçu sur la localisation, la végétation, le climat, et l'hydrographie de notre zone d'étude. Les matériels utilisés ont été présenté et une méthodologie élaborée. Ceci permettra d'évaluer l'influence des critères de calage sur le bilan hydrologique à travers deux modèles que sont HBV et GR4J.

CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats issus de l'application de la méthodologie décrite dans le chapitre précédent. Après une analyse approfondie des résultats, on a pu déterminer les critères de calage qui influence au mieux les résultats du bilan hydrique.

2.2. Simulations avec les modèles HBV et GR4J et les éléments du bilan hydrologique.

Les tableaux 2 et 3 présentent respectivement les résultats de calage et de validation avec les modèles HBV et GR4J sur les deux stations d'étude en considérant trois critères de performance.

Tableau 2 : Performance des modèles en calage. Les lignes correspondant aux chiffres en rouge indiquent les critères de calage considérés

	CALAGE (1989-2002)											
	HBV Savè			GR4J Savè			HBV Bonou			GR4J Bonou		
Nash	0.51	-4.57	0.56	0.52	0.6	0.48	0.64	0.62	0.35	0.58	0.63	0.43
R²	0.61	0.55	0.61	0.6	0.61	0.58	0.67	0.64	0.54	0.62	0.64	0.54
KGE	0.57	-2.27	0.51	0.53	0.64	0.5	0.68	0.67	0.53	0.57	0.68	0.69
%Qobs	8.96	8.96	8.96	8.96	8.96	8.96	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
%Qsim	12.3	34.7	12.7	12.6	10.4	12.9	13.2	13.2	14.7	14.5	10.1	12.4
% ETR	87.4	65.3	87	74.2	72.5	70.2	86.9	86.9	85.4	95.2	93.8	91.1
%ΔS	0.32	0	0.26	13.1	17.1	16.9	-0.16	-0.13	-0.07	-9.71	-3.9	3.05
% P	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
% ETP	117	117	117	117	117	167	149	149	149	149	149	149

Tableau 3 : Performance des modèles en validation. Les lignes correspondant aux chiffres en rouge indiquent les critères de validation considérés

	VALIDATION (2003-2016)											
	HBV Savè			GR4J Savè			HBV Bonou			GR4J Bonou		
Nash	0.5	-0.67	0.44	0.5	0.42	0.54	0.45	0.45	0.31	0.4	0.29	0.32
R²	0.56	0.67	0.51	0.53	0.51	0.57	0.46	0.45	0.39	0.39	0.34	0.36
KGE	0.4	-0.56	0.36	0.43	0.3	0.51	0.56	0.57	0.62	0.46	0.28	0.5
%Qobs	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
%Qsim	8.45	28	9.14	9.8	8.18	10.3	10.7	10.9	11.4	11.8	7.45	9.26
% ETR	92.4	72.6	92.2	81.5	79.9	77.7	91.3	90.8	89.4	96.4	95.6	93.7
%ΔS	-0.84	-0.59	-1.33	8.66	11.9	12.1	-2.02	-1.67	-0.08	-8.15	-3.01	-2.91

**APPROCHE MULTIMODELE POUR L'EVALUATION DE L'INFLUENCE DES
CRITERES DE CALAGE SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE**

% P	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
% ETP	132	132	132	132	132	132	162	162	162	162	162	162

Le tableau 2 présente les résultats des simulations en calage et ainsi que les éléments du bilan hydrique issus des sorties de la simulation avec les modèles HBV et GR4J à l'exutoire de Savè et à l'exutoire de Bonou. Il ressort de l'analyse de ces tableaux que les deux modèles présentent de très bons résultats en calage. D'une part les critères de Nash, de R^2 et KGE varient respectivement de 0.51 à 0.64, de 0.55 à 0.64 et de 0.51 à 0.53 pour le modèle HBV sur Savè et Bonou et d'autre part ils varient respectivement 0.52 à 0.58, 0.61 à 0.64 et 0.5 à 0.69 pour le modèle GR4J sur Savè et Bonou. Ces valeurs qui sont supérieures à 0.5 qui est le seuil acceptable en modélisation pluie-débit à l'échelle journalière selon Morisa et al (2007) ; démontrent une très grande similitude entre les débits observés et les débits simulés (le pourcentage des débits observés est proche de celle des débits simulés) et donc indirectement une très bonne reproduction des éléments du bilan hydrologique sur le bassin versant. On note également à partir de l'analyse du tableau 1 que le critère d'efficacité R^2 malgré des résultats comprises entre 0.5 et 0.7 pour le calage lors de la simulation de HBV à Savé, présente de faible similitude entre les débits observés et les débits simulés et donc par la bande une mauvaise influence sur les résultats des éléments du bilan hydrique.

Le tableau 3 présente les résultats des simulations en validation et ainsi que les éléments du bilan hydrologique issus des sorties de la simulation avec les modèles HBV et GR4J à l'exutoire de Savè et de Bonou. En validation, on remarque une baisse générale des performances des critères d'efficacité. D'un côté le Nash, le R^2 et le KGE sont respectivement comprises entre 0.45 à 0.51, 0.45 à 0.67 et 0.36 à 0.62 pour le modèle HBV à Savè et Bonou et d'un autre côté ils varient respectivement de 0.4 à 0.5, 0.34 à 0.51 et 0.5 à 0.51. Malgré cette tendance d'une part les critères de calage sont généralement supérieurs à 0.5 pour les deux modèles à l'exutoire de Savè et reproduisent très bien les éléments du bilan hydrologique ; à l'exception du KGE inférieur à 0.5 pour la modélisation de HBV à Savè. Ils présentent en dépit de sa mauvaise performance, une très bonne similitude entre les débits observés et les débits simulés. D'autre part, pour les deux modèles à l'exutoire de Bonou, les critères de Nash et de R^2 sont inférieurs à 0.5, ce qui n'est pas un seuil acceptable en modélisation pluie-débit. Ces derniers présentent une petite indifférence entre les débits observés et les débits simulés et par la suite une, très bonne reproduction des éléments du bilan hydrique excepter le R^2 sur la modélisation de GR4J à Bonou. Quant au KGE, il est supérieur à 0.5 pour les deux modèles à Bonou et donc une homogénéité entre les débits observés et les débits simulés et par conséquent une bonne influence sur les éléments du bilan hydrique.

Au bien en calage qu'en validation, le critère de R^2 est le pire pour la simulation des éléments du bilan de l'eau avec des débits très éloignés des observations. KGE est le meilleur critère de performance car les débits simulés en l'utilisant sont très proches des observations.

Les figures suivantes présentent les hydrogrammes des débits observés et simulés des trois critères d'efficacité en calage et en validation.

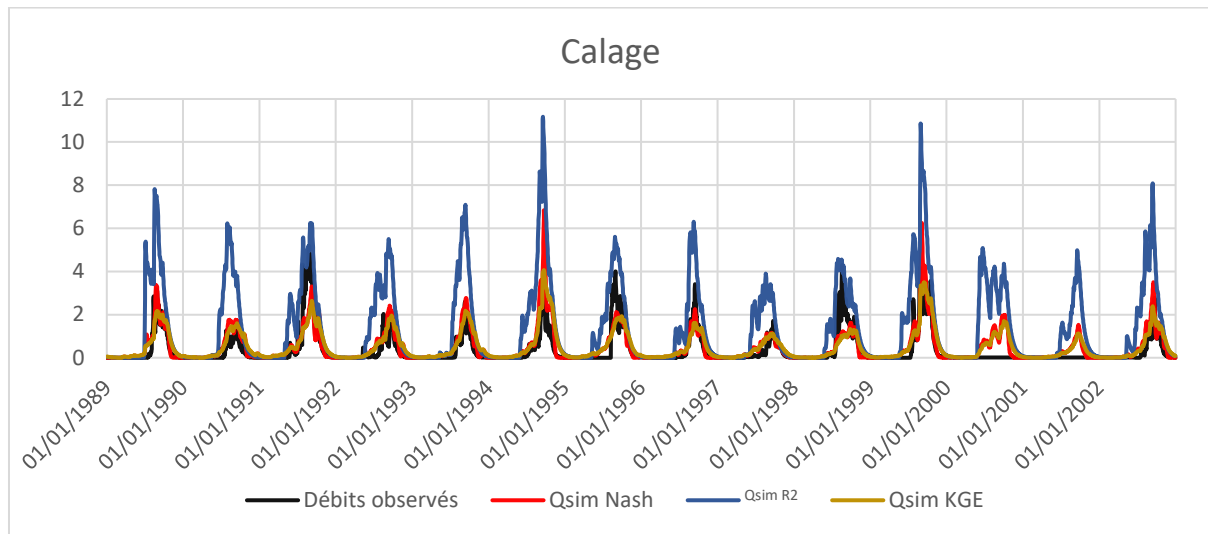


Figure 4 : HBV Savè calage

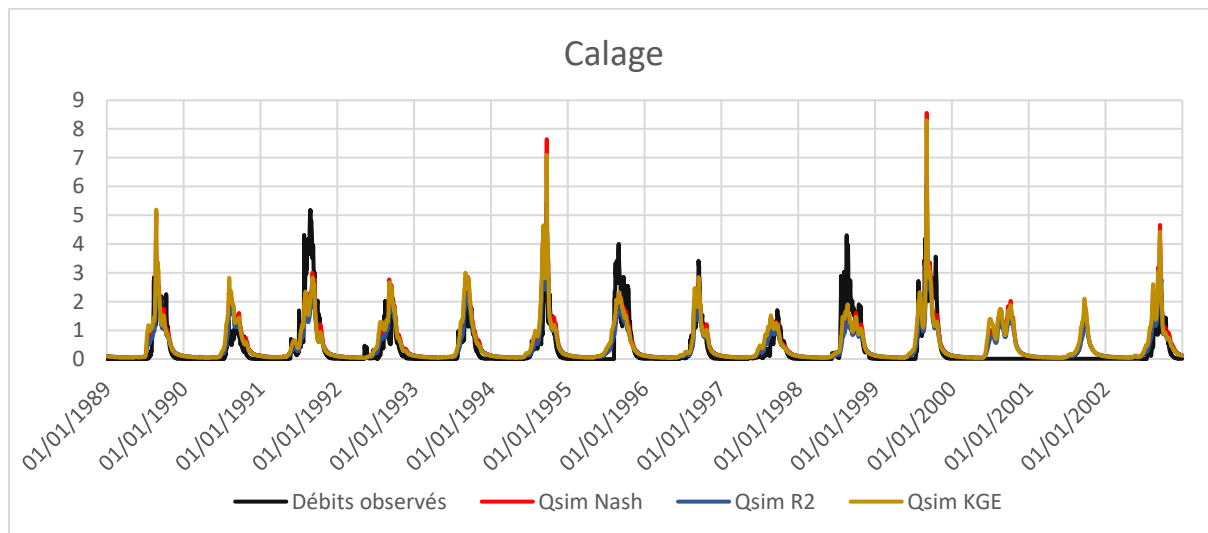


Figure 5 : GR4J Savè calage

L'observation des hydrogrammes (figure 4, figure 5) de calage des deux modèles à Savè montrent que les pics des débits observés (1991, 1995, 1998) ont été sous-estimés par les trois critères de calage excepté le R^2 qui a surestimé avec une importante marge d'erreur tous les pics des débits observés avec HBV. Par contre, les pics moins importants ont été bien estimés par les trois critères de calages. La lame d'eau moyenne annuelle écoulee sur ce bassin sur la période de 2000 à 2001 est de 0.3 mm/j contre 0.61 mm/j pour la période de 1998 à 1999 soit une baisse de 50%. Ceci justifie la

surestimation avec une forte marge d'erreur des débits des périodes allant de 2000 à 2001.

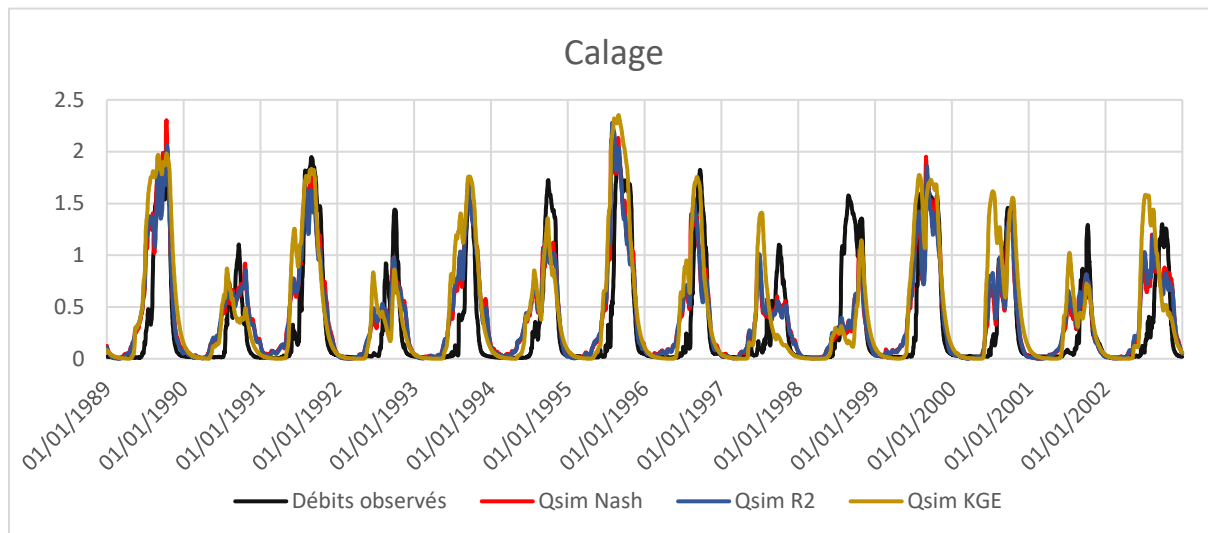


Figure 6 : HBV Bonou calage

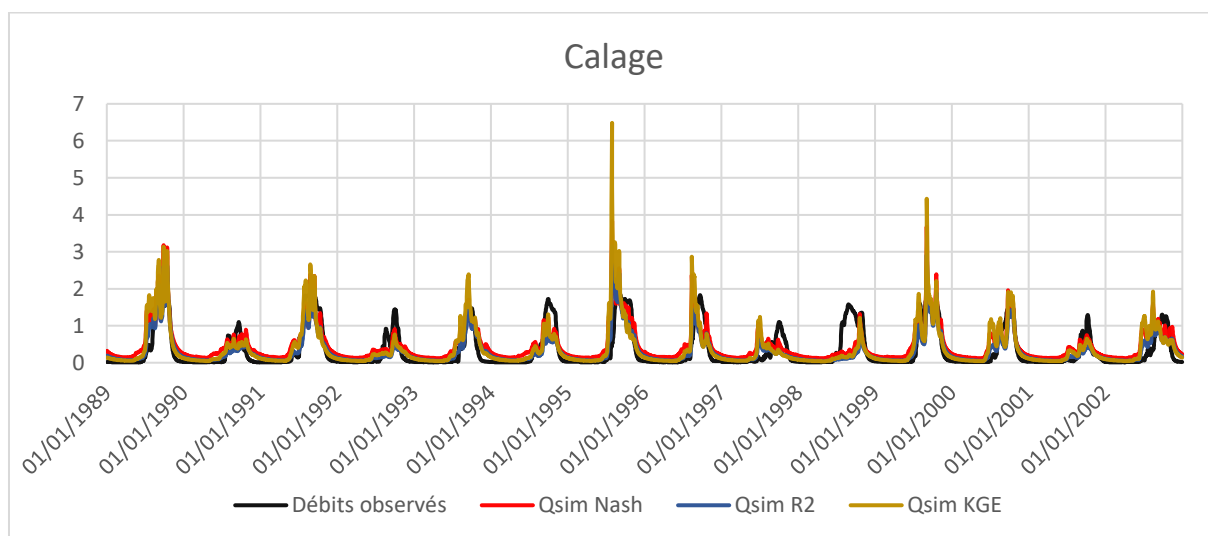


Figure 7 : GR4J Bonou calage

L'analyse des hydrogrammes (figure 6, figure 7) de calage des deux modèles à Bonou montrent une légère sousestimation des débits de pointes des années (1992,1994,1998) par les trois critères de calage. Par ailleurs, les pics des débits moins importants ont été bien estimé par les trois critères de calage.

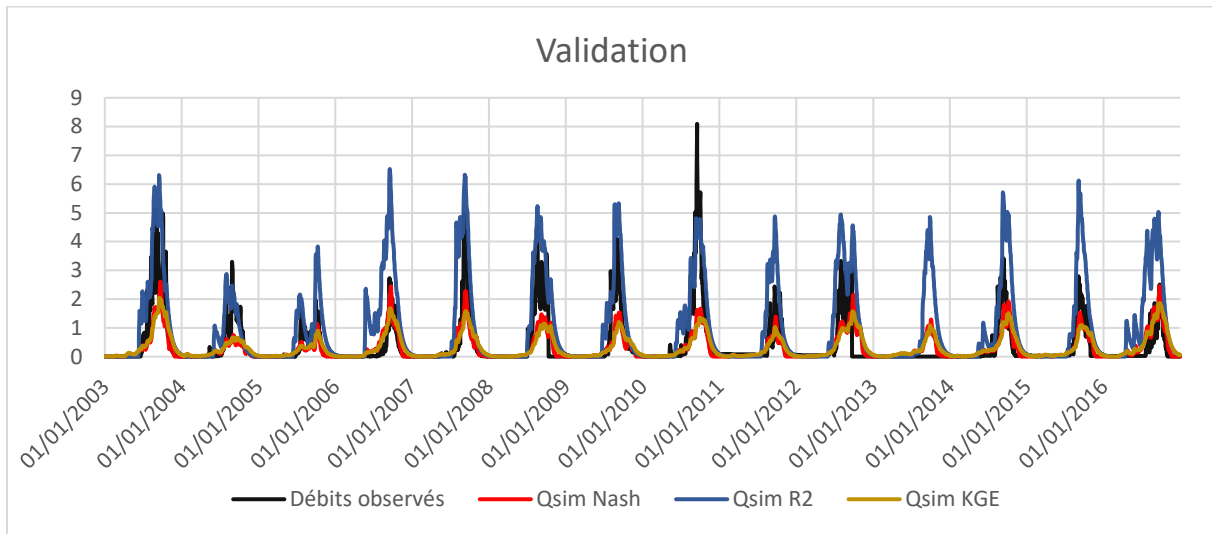


Figure 8 : HBV Savè validation

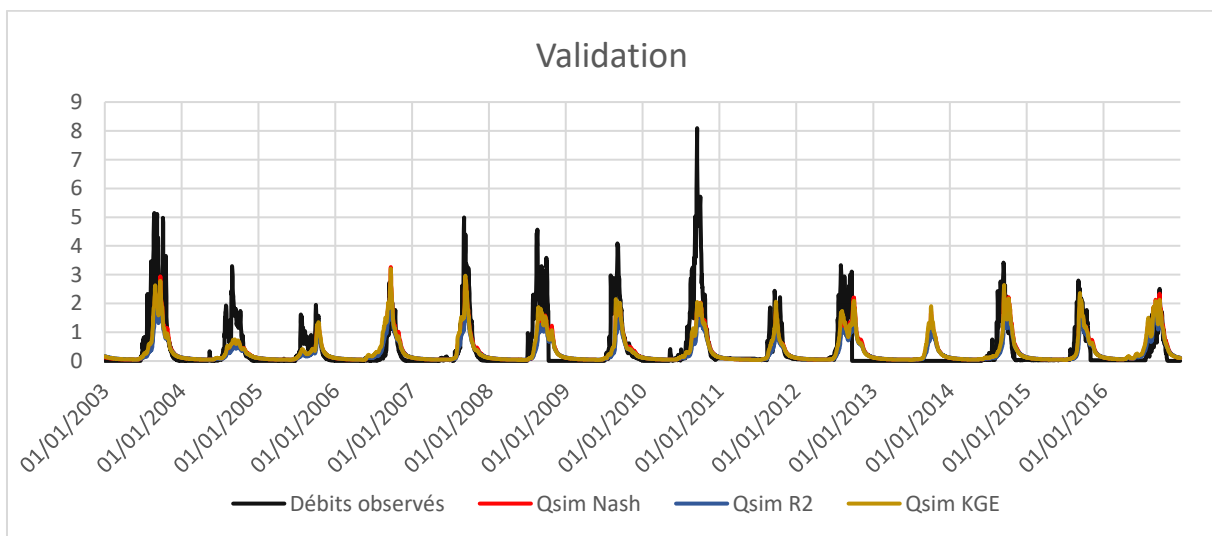


Figure 9 : GR4J Savè validation

L'observation des hydrogrammes (figure 8, figure 9) de validation des deux modèles à Savè montrent que les pics des débits observés moins importants ont été bien estimé par les trois critères d'efficacité, sauf les débits calculés avec R^2 sur HBV. La lame d'eau moyenne écoulee en octobre sur ce bassin sur la période de 2010 est de 1.26 mm/j contre 0.98 mm/j pour la période de 2006 soit plus de 28%. Ceci justifie la sousestimation avec une forte marge d'erreur de pic de l'année 2010. On note également une surestimation des débits de pointe de l'année 2013 et de l'année 2008.

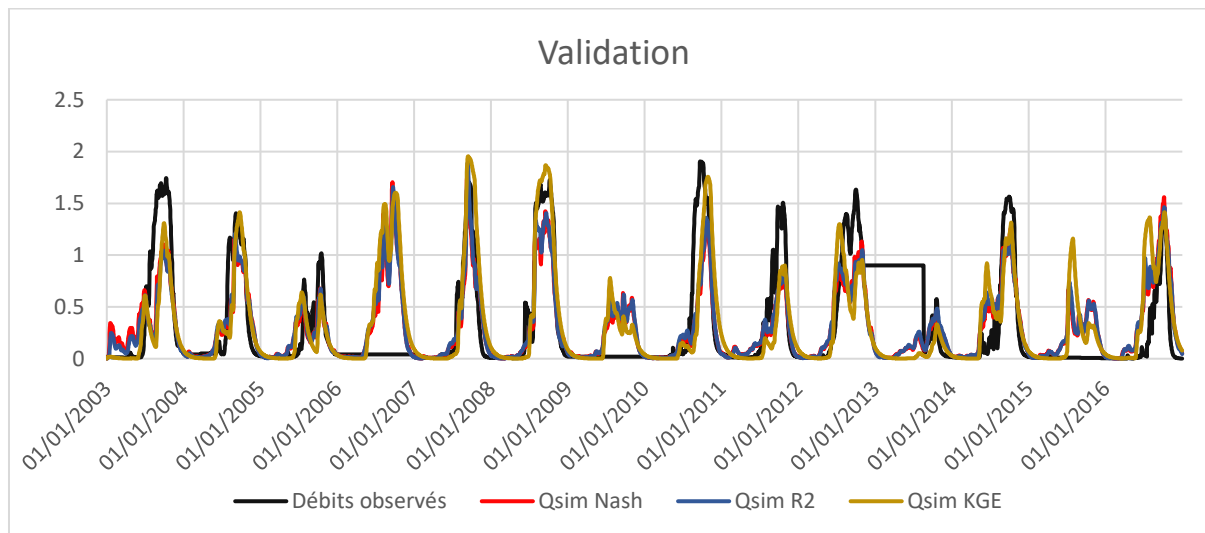


Figure 10 : HBV Bonou validation

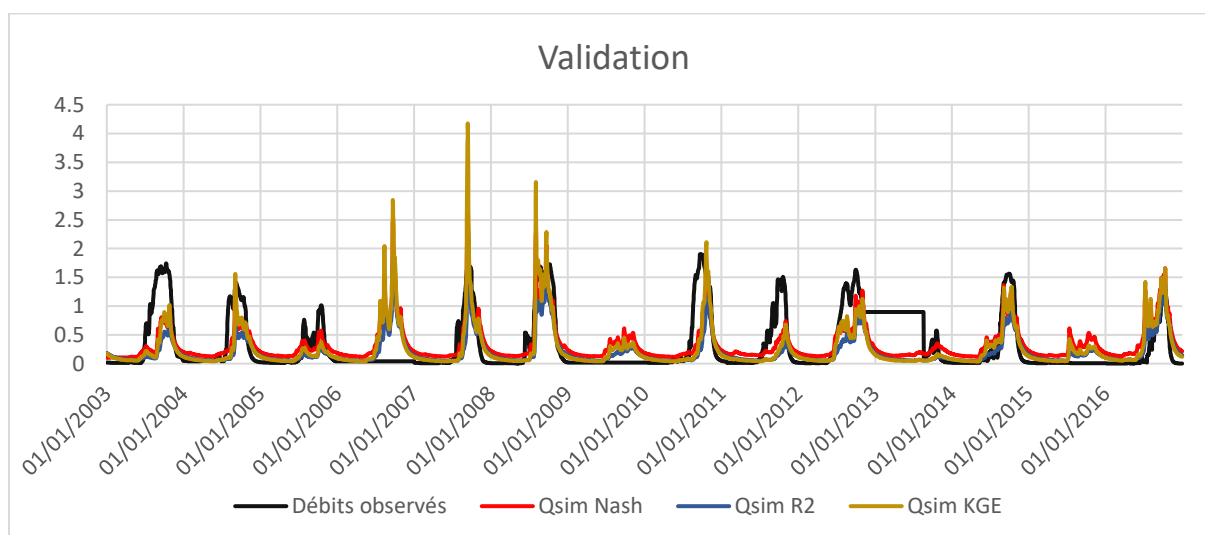


Figure 11 : GR4J Bonou validation

L'analyse des hydrogrammes de validation à Bonou montrent que les pics des débits observés moins importants ont été bien simulés par les trois critères de calage au niveau des deux modèles d'étude. Par contre on note une sous-estimation par les trois critères de calage des débits observés des années 2003, 2011 et 2013 et une très forte surestimation des débits observés des années 2006, 2009 et 2015.

2.3. Influences des critères de calage sur la simulation des débits extrêmes

En statistique descriptive le 3^{em} quartile est la donnée de la série qui sépare les 75% inférieur des données. Les troisièmes quartiles des débits observés dans la période de calage allant 1989 à 2002 pour Bonou et Savè sont respectivement 0.42mm/j et 0.23mm/j. Pour la période validation allant de 2003 à 2016 les troisièmes quartiles des données de Bonou et de Savè sont respectivement 0.47mm/j et 0.269mm/j. Par contre le 1^{er} quartile est la donnée de la série qui sépare les 25% inférieurs des données. Les premiers quartiles des débits observés dans la période de calage allant de 1989 à 2002 pour Bonou et Savè sont respectivement 0.017mm/j et 0.001mm/j. Pour la période validation allant de 2003 à 2016 les premiers quartiles des données de Bonou et de Savè sont respectivement 0.014mm/j et 0.006mm/j.

2.3.1. Performance des critères de calage en période humide

Le tableau 4 présente les performances des deux modèles en calage et validation pour les débits de pointes. Dans le contexte actuel de notre étude, les périodes humides utilisées pour calculer les critères d'efficacité sont définies par les débits observés supérieur au troisième quartile et les débits simulés correspondant aux débits observés supérieur au troisième quartile.

En effet, excepté les critères de Nash et de KGE qui ont donnés des valeurs comprises entre -1.32 et -2.67 pour le calage et -0.07 et -0.02 pour la validation en utilisant le critère de R^2 avec HBV à Savè, tous les autres résultats de simulation, c'est-à-dire les résultats des simulations du Nash, du KGE et les résultats du R^2 sur Bonou ont données des valeurs acceptables pour la reproduction des débits des périodes humides. On constate également que le KGE et le Nash permettent de reproduire acceptablement les débits de pointe. Le critère de R^2 n'est pas donc très recommandé pour la simulation des débits de pointes.

Tableau 4 : Performance des critères d'efficacité en période humide

		Simulation avec le Nash		Simulation avec le R^2		Simulation avec le KGE	
		Calage	Validation	Calage	Validation	Calage	Validation
HBV Bonou	Nash	0.82	0.68	0.82	0.69	0.77	0.65
	R^2	0.83	0.77	0.83	0.77	0.79	0.68
	KGE	0.81	0.46	0.79	0.47	0.86	0.58
GR4J Bonou	Nash	0.77	0.63	0.7	0.43	0.36	0.53
	R^2	0.77	0.74	0.74	0.63	0.5	0.6
	KGE	0.79	0.4	0.6	0.18	0.69	0.4
HBV Savè	Nash	0.69	0.55	-2.67	-0.02	0.7	0.59
	R^2	0.69	0.7	0.72	0.74	0.71	0.72
	KGE	0.82	0.32	-1.32	-0.07	0.82	0.36
GR4J Savè	Nash	0.65	0.57	0.69	0.46	0.65	0.61
	R^2	0.69	0.65	0.7	0.64	0.68	0.69

**APPROCHE MULTIMODELE POUR L'EVALUATION DE L'INFLUENCE DES
CRITERES DE CALAGE SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE**

	KGE	0.82	0.38	0.69	0.21	0.81	0.43
--	-----	------	------	------	------	------	------

2.3.2. Performance des critères de calage en période sèche

Le tableau 5 présente les performances des deux modèles en calage et validation pour les débits d'étiage. Dans le contexte actuel de notre étude, les périodes sèches utilisées pour calculer les critères d'efficacité sont définies par les débits observés inférieur au premier quartile et les débits simulés correspondant aux débits observés inférieur au premier quartile. Par ailleurs on a constaté une baisse drastique des performances des trois critères de calage utilisés.

Tableau 5 : Performance des critères d'efficacité en période sèche

		Simulation avec le Nash		Simulation avec le R ²		Simulation avec le KGE	
		Calage	Validation	Calage	Validation	Calage	Validation
HBV Bonou	Nash	-0.81	-2.93	-81.44	-305	-48.75	-449.48
	R ²	0.33	0.21	0.33	0.17	0.12	0.08
	KGE	-8.44	-17.04	-8.44	-17.19	-5.5	-20.18
GR4J Bonou	Nash	-184.04	-469	-36.56	-116	-27.51	-135.37
	R ²	0.88	0.6	0.85	0.57	0.8	0.44
	KGE	-15.56	-25.45	6.36	-11.96	-5.29	-12.45
HBV Savè	Nash	-358	-680	-67	-503	-335	-71.1
	R ²	0.02	0.01	0.011	0.03	0.023	0.01
	KGE	-121	-88.85	-429.8	-257	-132	-92.8
GR4J Savè	Nash	-713.5	-406.9	-479	-265.6	-101	-406
	R ²	0.16	0.01	0.18	0.01	0.15	0.02
	KGE	-46.4	-311.6	-132.3	-269.5	-45.9	-310.9

2.4. Comparaison et identification des critères de calage influençant les éléments du bilan hydrologique

Les tableaux 6 et 7 suivants présentent respectivement les résultats de calage et de validation avec les modèles HBV et GR4J ainsi que les différences de pourcentages des éléments du bilan hydrologique.

Tableau 6 : Performance des critères de calage et différence de pourcentage des éléments du bilan hydrologique en calage.

	CALAGE (1989-2002)											
	HBV Savè			GR4J Savè			HBV Bonou			GR4J Bonou		
Nash	0.51	-4.57	0.56	0.52	0.6	0.48	0.64	0.62	0.35	0.58	0.63	0.43
R²	0.61	0.55	0.61	0.6	0.61	0.58	0.67	0.64	0.54	0.62	0.64	0.54
KGE	0.57	-2.27	0.51	0.53	0.64	0.5	0.68	0.67	0.53	0.57	0.68	0.69
%Qobs	8.96	8.96	8.96	8.96	8.96	8.96	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
%Qsim	12.3	34.7	12.7	12.6	10.4	12.9	13.2	13.2	14.7	14.5	10.1	12.4
% ETR	87.4	65.3	87	74.2	72.5	70.2	86.9	86.9	85.4	95.2	93.8	91.1
%ΔS	0.32	0	0.26	13.1	17.1	16.9	-0.16	-0.13	-0.07	-9.71	-3.9	3.05
% P	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
% ETP	117	117	117	117	117	167	149	149	149	149	149	149
A	-23.1	118	-20.2	-20.7	-34.7	-19.1	1.49	1.41	12.9	11.1	-22.4	-4.51
B	14.9	-14.2	14.3	-2.46	-4.79	-7.72	-3.27	-3.29	-5.03	5.96	4.33	1.3
C	-96	-99.9	-96.7	65.2	115	112	-91.2	-92.9	-96.3	433	114	-267

**APPROCHE MULTIMODELE POUR L'EVALUATION DE L'INFLUENCE DES
CRITERES DE CALAGE SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE**

Tableau 7 : Performance des critères de calage et différence de pourcentage des éléments du bilan hydrologique en validation

	VALIDATION (1989-2002)											
	HBV Savè			GR4J Savè			HBV Bonou			GR4J Bonou		
Nash	0.5	-0.67	0.44	0.5	0.415	0.543	0.45	0.45	0.31	0.395	0.29	0.32
R²	0.56	0.67	0.51	0.53	0.51	0.57	0.46	0.45	0.39	0.39	0.34	0.36
KGE	0.4	-0.56	0.36	0.43	0.3	0.51	0.56	0.57	0.62	0.46	0.28	0.5
%Qobs	11.78	11.78	11.78	11.78	11.78	11.78	11.33	11.33	11.33	11.33	11.33	11.33
%Qsim	8.45	28	9.14	9.8	8.18	10.26	10.73	10.89	11.41	11.76	7.45	9.26
% ETR	92.38	72.58	92.19	81.52	79.87	77.66	91.27	90.77	89.4	96.39	95.56	93.7
%ΔS	-0.84	-0.586	-1.33	8.66	11.94	12.06	-2.015	-1.67	-0.081	-8.15	-3.01	-2.91
% P	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
% ETP	131.7	131.7	131.7	131.6	131.6	131.6	162.2	162.2	162.2	162.1	162.1	162.1
A	-31.33	127.5	-25.72	-20.36	-33.52	-16.62	4.683	6.244	11.32	14.73	-27.32	-9.659
B	11.7	-12.24	11.48	-1.427	-3.422	-6.094	-1.7	-2.238	-3.714	3.814	2.921	0.917
C	-116.9	-111.8	-126.7	73.76	139.6	142	-32.22	-43.82	-97.28	174.2	1.256	-2.108

Dans les tableaux ci-dessus A, B et C représentent respectivement la différence de pourcentage des débits simulés, des ETR et des variations de stock.

Pour le calage, les différences de pourcentage des débits sont très importantes pour les trois critères de calage avec les deux modèles à Savé. D'un autre côté à Bonou, on note une faible variation de pourcentage (comprises entre {-10 ;10}) pour les simulations avec le Nash et le R² avec le modèle HBV ainsi que pour les résultats de simulation du KGE avec le modèle GR4J.

Les différences de pourcentage de l'évapotranspiration réelle sont satisfaisantes pour les simulations avec les trois critères de calage à Bonou. Pour Savé, les résultats de simulation des trois critères de calage avec HBV présentent des variations de pourcentage très importantes. Les résultats de simulation des trois critères de calage présentent les résultats contraires avec le modèle GR4J.

En ce qui concerne les différences de pourcentage des variations du stock, les trois critères de calage ont présenté de très grande variation (incomprises entre {-10 ;10}) pour les deux modèles aux deux stations ce qui n'est pas acceptable.

Par ailleurs en validation, les différences de pourcentages de l'évapotranspiration réelle sont comprises entre $\{-10 ; 10\}$ ce qui est acceptable pour les trois critères de calage à Bonou. En revanche, les différences de pourcentage de l'ETR pour le modèle HBV à Savé ne sont pas acceptables pour les trois critères de calage.

Les différences de pourcentages de la variation du stock ne sont pas acceptables pour les deux stations excepté les résultats des simulations avec le R^2 et KGE avec le modèle GR4J.

Enfin en ce qui concerne les différences de pourcentage des débits, celles-ci ne sont pas acceptables pour les trois critères de calage à Savé et aussi à Bonou pour la modélisation avec le modèle GR4J. Par contre elles sont très acceptables pour les trois critères de calage avec le modèle HBV à Bonou.

- Après l'analyse des tableaux 2 ; 3 ; 6 et 7 et des hydrogrammes, on note que les trois critères de calage, le Nash, le KGE et le R^2 simulent très bien les débits à long terme et donc indirectement les éléments du bilan hydrologique,
- Après l'analyse des tableaux 4 et 5, on note que le KGE simule bien les débits de pointe que les autres critères et le Nash, le R^2 simulent mieux les débits de pointe que ceux d'étéage,
- Le Nash simule mieux les débits à long terme et les débits d'étéage que le R^2 ,
- Le Nash simule très bien les débits à long terme que le KGE.
- Les différences de pourcentage des éléments du bilan hydrologique montrent que le KGE influence au mieux chaque élément du bilan hydrologique plus que le Nash et le R^2 ;
- Le Nash influence au mieux tous les éléments du bilan hydrologique plus que le R^2 ;
- L'analyse des tableaux montrent que les modèles sont plus précis et ont une marge d'erreurs plus faible lorsque les trois critères de calage (Nash, R^2 et le KGE) donnent simultanément des résultats acceptables.

2.5. Discussion

L'analyse de l'influence des critères de calage sur le bilan hydrologique à travers deux modèles permet d'indiquer que pour une simulation générale des débits et pour une bonne représentation des éléments du bilan hydrologique, le Nash et le KGE sont mieux indiqués pour le calage et la validation par rapport au R^2 . Cependant quand on s'intéresse au débit pointe, le KGE permet d'obtenir une très bonne simulation par rapport au critère de Nash et du R^2 . Par contre, aucun des trois critères de calage ne se démarque quant à la simulation des débits d'étiage. De plus si les trois critères d'efficacités présentent simultanément des résultats acceptables pour une seule simulation, les résultats sont plus précis et présente de faible marge d'erreur. Ces résultats sont à peu près conformes aux résultats des travaux de Gaba et al. (2015) qui ont porté sur la modélisation d'une approche d'ensemble pour évaluer les ressources en eau dans le bassin de la Mékrou au Bénin.

2.6. Conclusion

Ce chapitre a donné un aperçu des résultats des simulations avec les modèles HBV et GR4J ainsi que les éléments du bilan hydrologique, les hydrogrammes des débits observés et simulés des trois critères d'efficacités en calage et en validation. Il nous a permis aussi de présenter l'influence des critères de calage sur la simulation des débits extrêmes, de comparer et l'identifier les critères de calage influençant les éléments du bilan hydrologique et enfin la discussion.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Synthèse des principaux résultats

L'intérêt de ce travail est d'étudier l'influence des critères de calage sur le bilan hydrologique à travers plusieurs modèles. L'exercice de modélisation hydrologique faite grâce aux données hydrométriques et pluviométriques du bassin de l'Ouémé à Bonou et à Savè a permis d'identifier les critères d'efficacités qui simulent mieux les éléments du bilan hydrologique à long terme et les débits de pointe.

La période de calage était de 1989 à 2002 et la période validation était de 2003 à 2016. Les résultats obtenus nous permettent de répondre convenablement à nos trois questions de recherche. Tout d'abord, les simulations avec les deux modèles nous ont permis d'obtenir des données avec des valeurs des critères assez bonnes. Le modèle HBV et le modèle GR4J permettent de bien simuler le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à Bonou et Savè.

Ces simulations ont permis de déduire aussi que le Nash, le KGE et le R^2 simulent très bien les débits à long terme et donc indirectement chaque élément du bilan hydrologique. On a pu retenir que le critère qui influence au mieux les éléments du bilan hydrologique, le critère pour lequel les paramètres simulent mieux les débits de pointe est le KGE.

On a aussi retenu que le critère de R^2 n'est pas donc très recommandé pour la simulation des débits de pointes. Les valeurs du Nash n'étaient pas meilleures pour les débits de pointes et d'étiage comparativement à la valeur lorsqu'on tient compte d'une simulation générale des débits.

Perspectives

Au vu de ses différents résultats, un certain nombre de dispositions doivent être prise afin d'améliorer nos connaissances sur l'influence des critères d'efficacités sur le bilan hydrologique. Le même travail pourrait être fait en se basant sur d'autres critères de calage que sont (le RMSE, le Nashlog, indice d'affinité et l'erreur moyenne absolue) et sur d'autre bassin versant. L'étude pourrait se faire avec d'autres modèles hydrologiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bergström., (1992), THE HBV MODEL : Its structure and application. Volume 4 SMHI reports / Hydrology : SMHI reports.
- Charles Perrin, Claude Mochel, (2007), Vazken Andréassian: modèles hydrologique du Génie Rural(GR) . Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés; pp 9
- Chevallier P., (1988), Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide: Booro-Borotou (Côte d’Ivoire). ORSTOM Etudes et Thèses, Paris, 332 pages.
- Clemen R. T., (1989), Combining Forecasts: a review and annotated bibliography International Journal of Forecasting, 5: 559-581.
- Colombani.J, SIRCOULON.J, MONIOD.J, RODIER (1972), MONOGRAPHIE DU DELTA DE L’OUEME; Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, Bureau centrale Hydrologique-paris,
- Coulibaly P., Haché M., Fortin V., Bobée B., (2003). Improving daily reservoir inflow forecasts with model combination. J. Hydrol. Eng. 10, 91–99.
- Gaba O. U. C., Biao I. E., Alamou A. E., Afouda A., (2015). An Ensemble Approach Modelling to Assess Water Resources in the Mékrou Basin, Benin. Hydrology. Vol. 3, No. 2
- Graham., (2000). LARGE-SCALE HYDROLOGIC MODELING IN THE BALYIC BASSIN (Thèse)
- HOUNKPE Jean,2022. MODELISATION HYDROLOGIQUE 2021,Université d’Abomey-Calavi, p3-4-18-19
- Kamagate Bamory (2006) : Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant en milieu tropicale de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (haute vallée de l’Ouémé) ; Université Nangui Abrogoua.
- KODJA Domiho Japhet, (2018) : Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin-versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bonou en Afrique de l’ouest, Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université de Montpellier, 288p.
- Liu, Y., et Gupta, H. V. (2007). Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. Water Resources Research, 43(7), n/a-n/a.
- McCloskey G. L., Ellis R. J., Waters D. K. and Stewart J., (2011). PEST hydrology calibration process for source catchments–applied to the Great Barrier Reef, Queensland, 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia. 12-16 December 2011, pp2359-2366.
- Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Oudin,L. and Mathevet, T.(2006) Has basin-scale modelling advanced beyond empiricism ? In : Andréassian, V., Hall, A.,

- Chachinan, N . and schaaake, J. (eds) Large sample basin experments for hydrological modél parameterization :results of the model parameter experiment (MOPEX) 2006 pp.108-116. IAHS Publication 307.
- Moniod F. (1973) : Régime hydrologique de l'Ouémé (Dahomey), Paris, O.R.S.T.O.M., Hydrol., vol. X, no 2, 13pages
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M.W., Bingner R. L., Harmel R. D., and Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(3):885-900.
- Nonfon M., (1988). Données préliminaires sur l'écologie et la production halieutique des "trous à poissons " de la rive gauche de la basse vallée de l'Ouémé (République Populaire du Bénin) Mémoire d'Ingénieur Agronome, FSA, UNB, Bénin, 152 p
- Obada Ezéchiel., (2016). Evaluation de la performance de neuf (09) Modèles hydrologiques Pluie-débit Globaux sur le bassin de la Mékrou à l'exutoire de KOMPONGOU (Bénin). National University of science.(Article) pp :416
- Sanders, F. (1963). On subjective probability forecasting. Journal of Applied Meteorology, 2(2), 191-20
- Shamseldin A. Y. and O'Connor K. M., (1996). Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models. Journal of Hydrology, 197: 189-202.
- Sylvain Bigot et Thao T. (2005). Variabilité de l'activité végétale dans le bassin versant de l'Ouémé (Bénin) : Comparaison entre les données modis et écoclimao-2 (2005-2007); Université de Joseph Faurier-Grenoble1
- Volkoff B. Faure,D. Dubroeuq et Viennot M. (1998). Estimation des stocks de carbone des sols du Bénin. IRD(ex-ORSTOM) 32 avenue Henri Varagnar 93143 BONDY , France,
- Zhang X., Water D. and Ellis R., (2013). Evaluation of Simhyd, Sacramento and GR4J rainfall runoff models in two contrasting Great BarrierReef catchments. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia.