



HAL
open science

Approche de la prévision des crues fluviales à partir d'une modélisation hydrologique : cas du modèle GR4J appliqué au bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire)

Fidèle Constant Kouame

► To cite this version:

Fidèle Constant Kouame. Approche de la prévision des crues fluviales à partir d'une modélisation hydrologique : cas du modèle GR4J appliqué au bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Espace géographique et société marocaine, 2024, VOL. 1 (NO. 83 (2024)), 10.34874/IMIST.PRSM/EGSM/46955 . hal-04494665

HAL Id: hal-04494665

<https://hal.science/hal-04494665>

Submitted on 7 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Approche de la prévision des crues fluviales à partir d'une modélisation hydrologique :
cas du modèle GR4J appliqué au bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à
l'exutoire de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire)**

Kouakou Fidèle Constant KOUAME, Doctorant, Institut de Géographie Tropicale (IGT),
groupe de recherche « **Gestion des risques naturels dans les territoires et les sociétés** »
(GRTS), Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, kouakou07@gmail.com

Résumé

L'exploitation du bassin fluvial du Sassandra à Soubré cumulé aux fortes précipitations occasionne chaque année des risques d'inondation dues aux crues saisonnières avec diverses conséquences sur les populations et leurs biens. L'objectif de cette étude est d'appréhender la prévision des crues à risque d'inondation fluviale par l'application du modèle hydrologique du Génie Rural à 4 paramètres Journaliers (GR4J) dans le bassin versant du Sassandra à Soubré. La technique de cross-validation (validation croisée) a été également appliquée aux données de débits de la période 1980-2016. Les résultats du modèle GR4J sont satisfaisants avec un critère de Nash de 62 % en calibration et 55 % en validation. Il ressort que le modèle GR4J est capable de reproduire les débits de crues à l'exutoire du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré sous réserve de la disponibilité de données historiques de qualité.

***Mots clés :** modélisation pluie-débit, GR4J, validation croisée, risque d'inondation, bassin versant de Soubré*

Abstract

The exploitation of the Sassandra river basin in Soubré combined with heavy rainfall causes each year risks of flooding due to seasonal floods with various consequences on populations and their property. The objective of this study is to understand the forecasting of floods at risk of river flooding by the application of the Rural Engineering hydrological model with 4 daily parameters (GR4J) in the Sassandra watershed in Soubré. The cross-validation technique was also applied to flow data from the period 1980-2016. The results of the GR4J model are satisfactory with a Nash criterion of 62% in calibration and 55% in validation. It appears that the GR4J model is capable of reproducing flood flows at the outlet of the Sassandra River watershed in Soubré subject to the availability of quality historical data.

Key words: *rain-flow modeling, GR4J, cross-validation, flood risk, Soubré watershed*

1.1 Introduction

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité de plusieurs types d'évènements météorologiques et climatiques extrêmes entraîne des impacts irréversibles sur les systèmes naturels et humains, au-delà de leurs limites d'adaptation dans toutes les régions du monde (GIEC, 2023, p.6). L'occurrence de ces phénomènes extrêmes tels que les fortes précipitations couplées aux actions anthropiques a fait de l'Afrique de l'Ouest l'une des zones les plus vulnérables au changement climatique (A. FAYE, 2019, p.8). A l'instar de ces nombreux pays d'Afrique de l'Ouest dans la zone intertropicale, la Côte d'Ivoire n'est pas épargnée par les impacts extrêmes des changements climatiques. L'ensemble de son système hydrologique et pluviométrique subit de façon imprévisible les conséquences induites par les effets de cette variabilité du climat (V. M. SOROKOBY, 2013 ; p.288 ; K. K. MARTIN, 2018, p.135 ; A. M. KOUASSI et *al.*, 2010, p.3). Dans ce contexte, 29% de la population mondiale sont exposées à une crue centennale à risque, soit une probabilité de survenance de 1% sur 10 ans ou de 50% sur une vie de 68 ans (J. RENTSCHLER et M. SALHAB, 2020, p.4). A titre d'illustration, en octobre-novembre 2010 et 2011 et juillet 2018, la crue de la Bia, fleuve transfrontalier (Côte d'Ivoire, Ghana) a occasionné des inondations. Ces inondations d'une extrême ampleur ont provoqué des destructions de plantations, de constructions et fait des pertes en vie humaines à l'aval des barrages hydroélectriques D'AYAME, (N. H. MELEDJE et *al.*, 2015, p.187 ; L. A. N'CHO 2022, p.127-129). Au Centre-ouest en septembre 2018, le fleuve Bandama sort de son lit et inonde plusieurs localités riveraines dont des quartiers des villes de Bouaflé et Zuénoula. En septembre 2019, une crue du fleuve Sassandra dans la zone du barrage de Soubré a poussé les autorités régionales et CI-ENERGIES à la production d'un communiqué d'alerte et de vigilance sur le risque d'inondation découlant de ces crues. Ainsi, 45 000 personnes sont touchées par les inondations chaque année pendant les saisons de pluie en Côte d'Ivoire (CIMA Research Foundation, 2021, p.16). Pourtant, ces cours d'eau offrent également des potentialités de développement d'infrastructures liées à l'eau. C'est l'exemple du bassin versant de Sassandra à l'exutoire de Soubré dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Cette partie du bassin versant est au cœur d'importants aménagements, avec les barrages de Buyo et de Soubré respectivement mis en service en 1980 et 2018 et le barrage de Gribo-Popoli en construction depuis 2018. De sorte que la zone est fréquemment touchée par des crues imprévues dues aux fortes

précipitations. Ces crues combinées aux effets des aménagements hydroélectriques entraînent des inondations dans la zone aménagée du bassin du Sassandra. Ces situations hydrométéorologiques causent de nombreuses perturbations, notamment des pertes en vie humaine, des destructions de cultures, et des dégâts environnementaux.

Pour prévenir ces phénomènes hydrométéorologiques, plusieurs méthodes et outils existent dont la modélisation hydrologique. Elle permet d'apprécier la relation pluie-débit capable de générer des situations telles que les inondations par crues. L'objectif de cette étude est par conséquent d'appliquer le modèle hydrologique du Génie Rural, spécifiquement le modèle à quatre (4) paramètres journaliers (GR4J) afin de connaître les paramètres optimaux de simulation des crues susceptibles de générer des risques d'inondation dans le bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

Présentation du milieu d'étude

La zone aménagée du bassin qui fait l'objet de cette étude est une section du bassin versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré. Le bassin-versant du fleuve Sassandra s'étend du Nord au Sud dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire, entre les coordonnées 9°45' et 4°55' de latitude Nord et entre les 8°45' et 5°45' de longitude Ouest (carte 1).

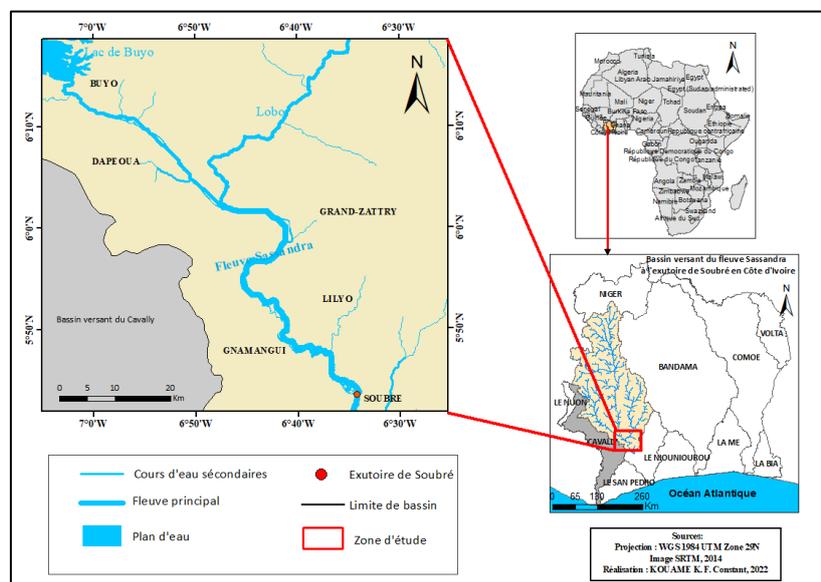


Figure 1 : localisation du bassin versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

Les conditions climatiques spécifiques et la présence d'un relief élevé au Nord-ouest du bassin lui confèrent un réseau hydrographique dense (CAMUS, 1969, p.5). Ainsi le bassin aménagé à l'exutoire de Soubré est caractérisé par un régime subéquatorial où la première

saison des pluies est observée de mars à juin, suivie d'un ralentissement entre juillet et août et enfin d'une seconde saison des pluies de septembre à octobre (CAMUS, 1969, p.13). La saison sèche, entre novembre et février, est assez bien marquée. Dans cette partie du bassin (zone de Soubré), la pluviométrie annuelle oscille selon l'année et le lieu entre 1 500 mm et 1 600 mm, avec une moyenne annuelle de 1600 mm au poste pluviométrique de Soubré (CAMUS, 1969, p.14).

L'analyse des valeurs mensuelles des précipitations à ces deux stations météorologiques (1989-2019), montre que celles de Buyo dépassent celles de Soubré au cours des saisons pluvieuses et le rapport s'inverse pendant les saisons sèches. Le déficit hydrique cumulé varie de 150 mm à 250 mm.

2. Données et approche méthodologique

2.1 Données utilisées

L'approche prévisionnelle des crues à risque d'inondation à travers la mise en œuvre du modèle hydrologique GR4J s'est faite sur la base des données suivantes :

- Les hauteurs pluviométriques de la période 1989-2019 émanant des services de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM)
- Les données de débits recueillis à l'exutoire de Soubré sur la période 1980-2019 fournies par le service des études de la Direction de l'Hydrologie en 2020
- Les données du CHIRPS sont un ensemble de données pluviométriques quasi mondiales sur plus de 35 ans. Couvrant 50°S-50°N (et toutes les longitudes) et allant de 1981 à presque aujourd'hui, CHIRPS intègre notre climatologie interne, CHPclim, des images satellites à résolution de 0,05° et des données de stations in situ pour créer des séries chronologiques de précipitations maillées pour l'analyse des tendances et la surveillance saisonnière de la sécheresse (<https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>, consulté le 22 juillet 2022)
- Les données atmosphériques de la deuxième réanalyse atmosphérique mondiale effectuée par l'Agence météorologique japonaise (JMA) sur 55 ans ou JRA-55. Il couvre la période à partir de 1958, lorsque les observations régulières par radiosondage ont commencé à l'échelle mondiale. JRA-55 est la première réanalyse complète qui a couvert le dernier demi-siècle depuis la réanalyse sur 45 ans du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ERA-40), et est la

première à appliquer une analyse variationnelle en quatre dimensions à cette période. (<https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis>, consulté le 22 juillet 2022).

Ces données maillées ont été utilisées lorsque la corrélation avec les données locales sont satisfaisantes dans un contexte de comblement des lacunes observées sur les données hydroclimatologiques collectées. Enfin, la modélisation s'est faite à l'aide du langage de programmation du package R airGR

2.2 Traitement des données

2.2.1 Application du modèle hydrologique GR4J pour la prévision des crues dans le bassin hydrographique du Sassandra à l'exutoire de Soubré

La modélisation hydrologique est l'ensemble des techniques et méthodes mises en œuvre pour reproduire le comportement hydrologique du bassin, en l'occurrence les débits à l'exutoire du bassin. Autrement dit, c'est une représentation mathématique des processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant. De la revue bibliographique, il existe une panoplie de modèles hydrologiques réparties en plusieurs classes, suivant l'unité spatiale, la description du processus hydrologique, le pas temps, etc. Cependant, il convient de noter que les modèles hydrologiques ne sont qu'une représentation simpliste de la réalité. C'est pourquoi, lors de la mise en œuvre d'un modèle sur un bassin, on procède à un ajustement des paramètres en vue de l'adapter au mieux que possible au contexte du bassin et des données disponibles.

- ***Structure et fonctionnement du modèle GR4J***

Le modèle de modélisation choisi est celui du génie rural à quatre (4) paramètres journalier (GR4J) (figure 2). Il s'agit donc d'analyser la prédétermination des crues pouvant aboutir sur des risques d'inondation à travers les paramètres hydro-climatiques à l'échelle du bassin aménagé à l'exutoire de Soubré.

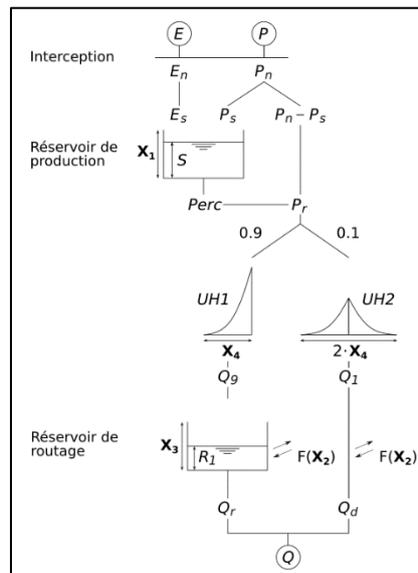


Figure 2 : Structure schématique de fonctionnement du modèle GR4J

Où

- E_0 est l'évapotranspiration potentielle, P la précipitation, T la température et Q le débit.
- X_1 : paramètre représentant la capacité du réservoir de production (mm). Lorsqu'il diminue, l'amplitude du débit augmente. Il y a donc un étirement vertical des valeurs de débit. La capacité de rétention diminuant, le débit issu de ce réservoir est donc plus important.
- X_2 : coefficient d'échanges souterrain (mm). Lorsque ce paramètre diminue, les valeurs de débits sont translatées vers le bas. En effet, $X_2 > 0$ correspond à un apport souterrain, tandis que $X_2 < 0$ correspond à une perte.
- X_3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm) Lorsqu'il diminue, les valeurs de Q sont augmentées. En effet, si la capacité de réservoir diminue, l'excédent d'eau arrivant au réservoir est restitué sous forme de débit, d'où son augmentation.
- X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire (jour). Lorsque ce paramètre augmente, une translation des valeurs de débit vers la droite est constatée. Les pics de valeurs sont également lissés. L'augmentation de X_4 entraîne l'allongement de la réponse du bassin versant, d'où la translation

Ainsi, ces réservoirs se remplissent et se vident afin de modéliser la réponse du bassin versant. Il existe un régime transitoire pendant lequel les différents réservoirs se remplissent avant d'atteindre le régime avec les valeurs demandées. Il est donc nécessaire de réaliser une

initialisation du modèle. Les quatre (4) paramètres optimisables du modèle GR4J permettent de réguler la capacité des réservoirs et leurs remplissages. Aussi, pour de meilleurs résultats, il est important de disposer d'une chronique de débits observés suffisamment longue et de bonne qualité. Par conséquent, les données de débits utilisées dans cette étude ont été soumises à la technique de validation-croisée

2.2.2 Validation-croisée et comblement des débits lacunaires

- ***Validation-croisée (cross-validation)***

La validation-croisée ou cross-validation est une technique très utilisée en machine Learning pour la conception et l'évaluation des modèles. Elle permet d'étudier la performance du modèle et la pertinence des intrants utilisés. Selon Cornec (2009), c'est une méthode très pratique utilisée depuis plus de 40 ans avec plus de 200 000 citations sous Google Scholar. Pour Arlot (2017), la validation croisée se place dans un contexte de prévision et permet d'éviter les erreurs empiriques d'échantillonnage.

De façon pratique, la technique consiste à découper la série de données en n sous-séries et utiliser les $n-1$ sous-séries pour calibrer le modèle. La sous-série restante est conservée pour la validation. La technique se fait de façon itérative en changeant à chaque itération les sous-séries de calibration et de validation. Dans cette étude, la série de données a été découpée en trois (3) sous-séries de dix (10) années chacune (1980-1989 ; 1990-1999 ; 2000-2009). Deux processus de mise en œuvre ont été effectués. Pour le premier processus, la calibration du modèle a été effectuée sur les deux premières sous-séries, c'est-à-dire de 1980-1999. La validation quant à elle s'est faite sur la dernière sous-série (2000-2009). Pour le second processus, les deux dernières sous-séries (1990-2009) ont été utilisées pour la calibration et l'autre sous-série (1980-1989) pour la validation.

Le test de validation-croisé a révélé que les données de débits observés à la station de Soubré n'étaient pas idoines pour la réalisation d'une modélisation pluie-débit efficiente. Par conséquent, il faut procéder à un comblement des débits lacunaires au niveau de la station de Soubré par la méthode du critère de proportionnalité analogue devant une palette de méthodes disponibles (transposition géographique, conservation des volumes, régression linéaire, etc.)

- *Comblement des données de débits*

Le comblement ou la reconstitution des données de débits de la station de Soubré s'est fait avec les données de la station de Piébly comme référence, située en aval de la première. Les deux stations hydrométriques sont placées sur le même cours d'eau (fleuve Sassandra) et les superficies des sous-bassins de Soubré et Piébly fournies par la direction de l'hydrologie sont connues. Cette méthode est basée sur une relation linéaire de type d'équation suivante :

$$\frac{Q1}{S1} = \frac{Q2}{S2}$$

Avec Q1 et Q2 représentent les débits observés aux exutoires des stations 1 et 2 ; S1 et S2 les superficies des sous-bassins.

2.2.3 Critère de qualité de l'ajustement du modèle

La validation du modèle est vérifiée par une comparaison des débits calculés et observés à travers un ou plusieurs critères de qualité. Les critères utilisés pour évaluer la performance du modèle sont le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970), le R^2 et le pourcentage de biais. Les plages de valeurs acceptables pour ces différents critères sont consignées dans le Tableau 1. Ces critères ont été proposés par Arnold et *al.*, (2012). Le critère de Nash et Sutcliffe (1970) est sans doute le critère le plus utilisé en modélisation hydrologique, il varie entre $-\infty$ et 1, le meilleur score étant 1. Toutefois, il convient de noter que dans la pratique, cette valeur optimale ne peut être atteinte. Lorsque le Nash est $\geq 0,5$, le $P_{biais} \pm 25\%$ et le $R^2 \geq 0,5$, le modèle est jugé acceptable. Le critère de Nash et Sutcliffe (1970) comme susmentionné s'exprime à travers l'équation ci-dessous :

$$Nash \& \text{Sutcliffe} (\%) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (Q_{i \text{ obs}} - Q_{i \text{ cal}})^2}{(\sum_i (Q_{i \text{ obs}} - \overline{Q_{i \text{ obs}}})^2)} \right]$$

Dans cette formule, on a :

- *Nash* exprimé en pourcentage (%), $Q_{i \text{ obs}}$: débit observé, $Q_{i \text{ cal}}$: débit calculé, $\overline{Q_{i \text{ obs}}}$: moyenne des débits observés sur la période

Également, on estime la performance du modèle ou la qualité de la simulation selon les valeurs prises par le critère de Nash (Berthier, 2005) :

- $Nash \geq 90\%$: le modèle est excellent ;

- 80% < Nash < 90% : le modèle est très satisfaisant ;
- 60% < Nash < 80% : le modèle est satisfaisant ;
- Nash < 60% : le modèle est mauvais.
- Le coefficient R^2 s'exprime selon l'équation suivante :

$$R^2 = \frac{\sum_t (Q_{Sim}^t - \underline{Q_{Sim}^t}) (Q_{Obs}^t - \underline{Q_{Obs}^t})}{\sqrt{(\sum_t (Q_{Sim}^t - \underline{Q_{Sim}^t})^2)} \sqrt{(\sum_t (Q_{Obs}^t - \underline{Q_{Obs}^t})^2)}}$$

- Le pourcentage de biais :

$$P_{biais} = \frac{\sum_t (Q_{Obs}^t - Q_{Sim}^t)^2}{\sum_t Q_{Obs}^t} * 100$$

Tableau 1 : Critères de performance

Critère	Plage	Meilleur score
Nash	[0.5 ; 1]	1
Pbiais	[-25% ; 25%]	0
R^2	[0.5 ; 1]	1

2.2.4 Calibration du modèle

Pour mener à bien cette modélisation hydrologique, la calibration constitue une étape du travail à réaliser. Celle-ci a pour but de définir le modèle à construire et de le faire coïncider au maximum avec un événement réel pris comme référence. C'est-à-dire l'objectif de la calibration est d'établir une concordance entre les débits simulés et observés en ajustant de façon itérative les paramètres internes du modèle. Pour les modèles à base physique qui sont fortement paramétrés, en amont de la calibration une étude de sensibilité est souvent nécessaire pour identifier les paramètres qui influent plus sur le processus hydrologique. Par contre, pour un modèle conceptuel comme le GR4J qui ne possède que quatre (4) paramètres journaliers, cette étape peut être négligée. Les paramètres du modèle seront adaptés au modèle et au phénomène étudié afin de tendre plus vers la réalité. Cette phase doit être effectuée avec la plus grande attention car elle constitue la base du travail qui permet de déterminer le paramètre optimal. En d'autres termes, il s'agira de 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 (Madsen, 2000).

Dans le contexte de notre modélisation hydrologique, la calibration du modèle a été effectuée sur une période comportant treize (13) années d'observation (1983-1995). La période 1981-1982 a servi de période de routage du modèle.

2.2.5 Validation du modèle

La validation succède la calibration ; elle a pour but de tester les performances du modèle sur une période autre que celle utilisée pour la calibration. C'est-à-dire que la validation porte sur l'application des données qui n'ont pas été utilisées lors de la calibration du modèle. En d'autres termes, elle vise à étudier la transférabilité des paramètres du modèle dans le temps, en évaluant les performances du modèle sur une période différente de celle de la calibration. Ainsi, la modélisation sera d'autant plus satisfaisante que les débits calculés (Q_c) seront proches des débits effectivement observés (Q_o).

Techniquement, la validation s'effectue en forçant le modèle avec les paramètres optimaux identifiés lors de l'étape de la calibration tout en évaluant les performances.

Pour cette étude, la validation a été réalisée sur la période 1996-2001 soit six années d'observation. Le modèle est validé lorsque les trois critères de qualités cités plus haut satisfont aux conditions définies par (Arnold *et al.*, 2012). Une fois le modèle validé, on procède ensuite à la simulation en utilisant les paramètres optimaux et les données climatiques.

3. Résultats

3.1 Vérification de la consistance des données de modélisation avant reconstitution

Le tableau 2 ci-dessous donne quelques caractéristiques sur la consistance des données. Il ressort de l'examen des données de ce tableau une bonne couverture temporelle des différentes variables. Cependant les données de débit sont caractérisées par la présence de lacunes, c'est-à-dire des données manquantes. La figure 2 ci-dessous met en évidence les pourcentages des lacunes observées dans la série chronologique des débits. De l'analyse graphique de la figure, on note fondamentalement, la présence de cinq (5) années consécutives sans observation (2007 à 2013).

Tableau 2 : Données utilisées pour la modélisation

Variables	Pas de temps	Période	Observation
Débit	Jour	1980-2019	Présence de lacune
Précipitation	Jour	1977-2016	Pas de lacune
Températures (max, min)	Jour	1977-2016	Pas de lacune

Source : nos traitements de données, 2021

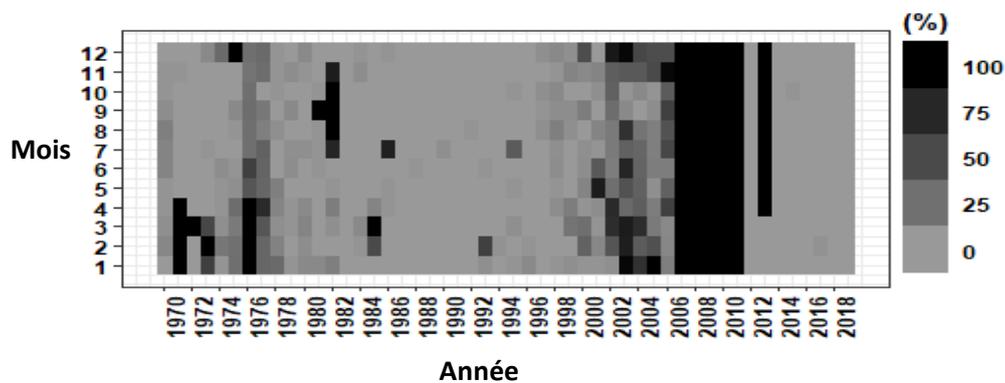


Figure 2 : Mise en évidence des lacunes sur les séries chronologiques des débits

3.2 Cohérence entre les données de débits observés et les précipitations enregistrées à la station de Soubré

La figure 3 ci-dessous met en évidence la cohérence des données hydrologiques ainsi que la relation entre les débits et les précipitations. L'examen graphique révèle que le régime hydrologique du cours d'eau est très variable suivant les années. Qui plus est, on remarque que les débits mensuels sont presque invariables pour certaines années, notamment les années 1991, 1997 et 2022. Pour ces trois années, aucun pic ne se manifeste malgré les variations pluviométriques. En ce qui concerne la relation entre les débits et les précipitations, on constate que cette relation est totalement instable. En effet, d'une année à une autre, la relation en les débits et les précipitations varie de façon significative.

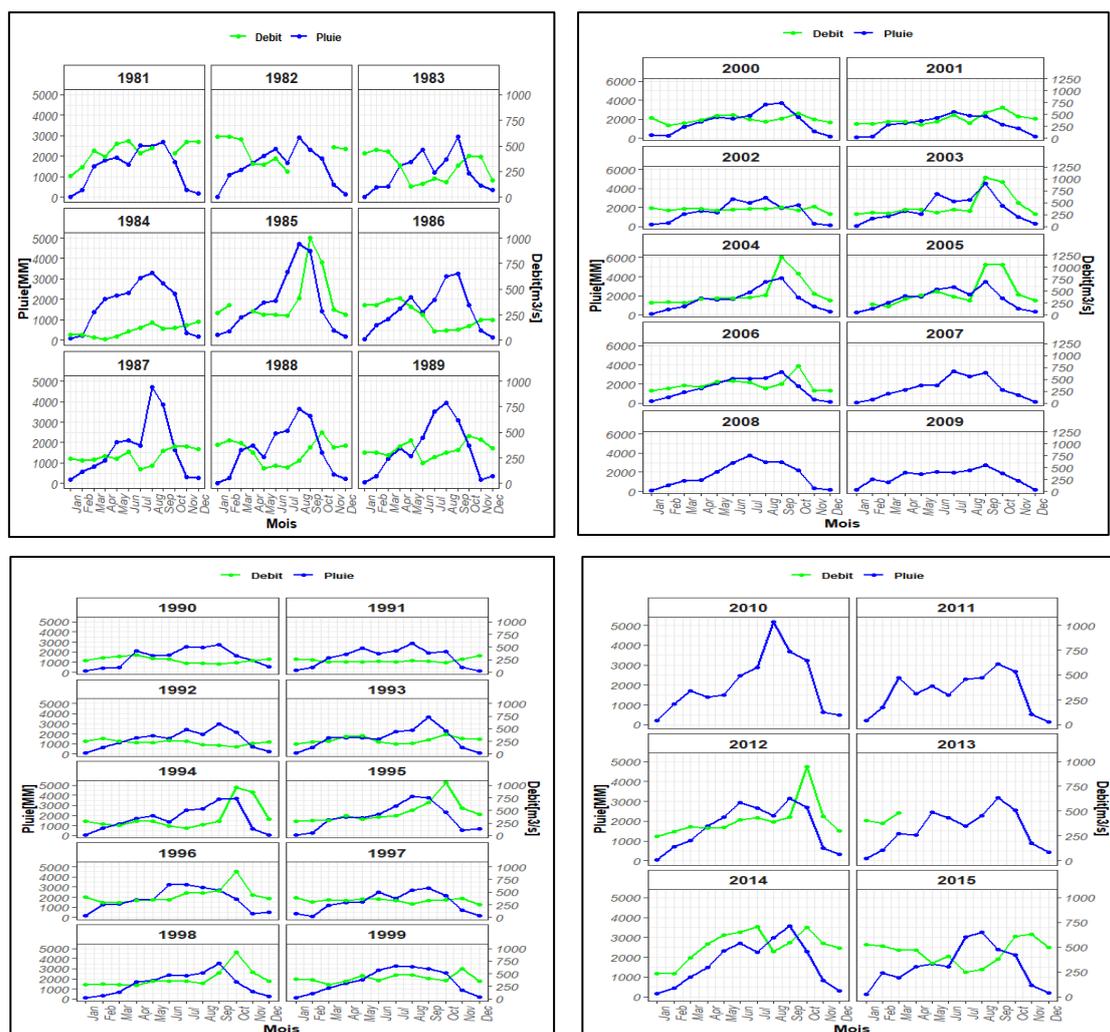


Figure 3 : Vérification de la cohérence des données de l'étude

3.3 Variabilité des débits observés et simulés à Soubré avant reconstitution

La figure 4 illustre l'évolution du critère de Nash en fonction des valeurs prises par les paramètres du modèle. De l'observation de ces différentes figures, il ressort que l'évolution du Nash en fonction des paramètres est indépendante de la période de calibration. En effet, l'évolution du Nash sur les deux périodes de calibration (1980-1999 ; 1990-2009) est presque identique. L'analyse des dites figures a permis de réajuster les plages de variation des différents paramètres de sorte à optimiser les performances de l'algorithme de calibration à travers les fonctionnalités du logiciel R.

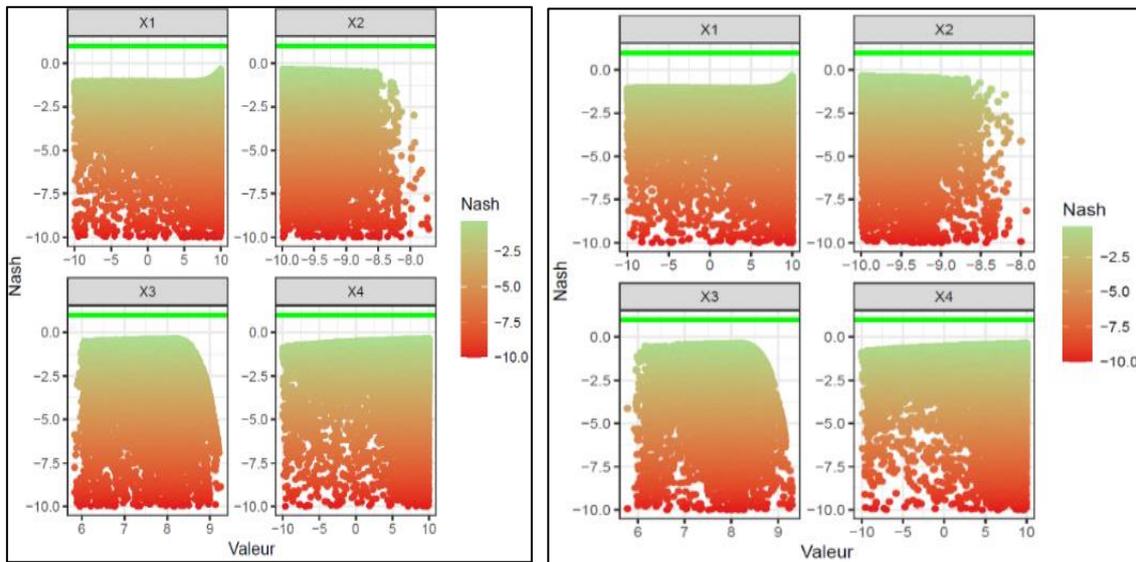


Figure 4 : Evolution du critère de Nash en fonction des paramètres du modèle (1980-1999) et (1990-2009)

Quant aux figures 5 et 6, elles décrivent la variation du Nash au cours des différentes itérations. Ce sont 215 484 et 488 665 itérations effectués respectivement pour le premier et le deuxième processus. On constate à travers l'analyse graphique de ces différentes figures que la variation du critère de Nash devient de plus en plus faible lorsque le nombre d'itérations augmente. Toute chose qui indique que le modèle a convergé vers sa performance limite. Les performances obtenues lors de la calibration et de la validation pour chaque processus sont présentées dans le tableau 3. Les données de ces tableaux montrent que les performances du modèle sont insatisfaisantes à tous les niveaux. Par ailleurs, on note également un risque de "overfitting" (surajustement), lorsque le nombre d'itérations est important.

En effet pour le processus 2, où le nombre d'itération est plus important, on remarque que les performances du modèle sont meilleures à la calibration qu'à la validation. La figure 7 est une illustration graphique de la performance du modèle à la calibration et la validation, pour chaque processus. L'analyse graphique confirme la mauvaise représentation des débits par le modèle.

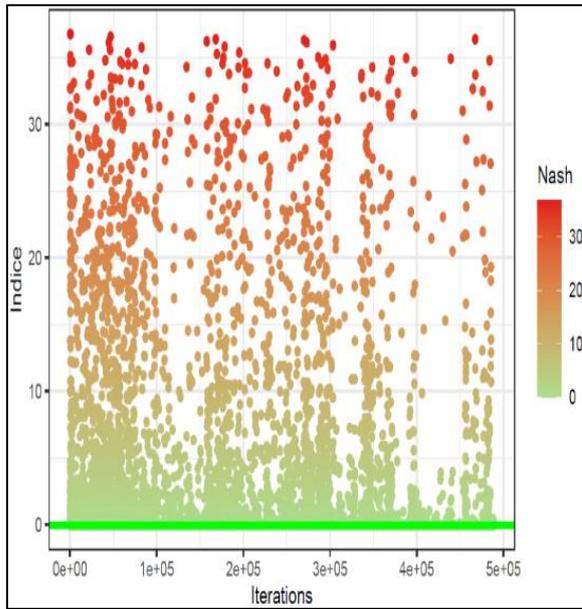


Figure 5 : Variation du critère de Nash au cours des différentes itérations (1980-1999)

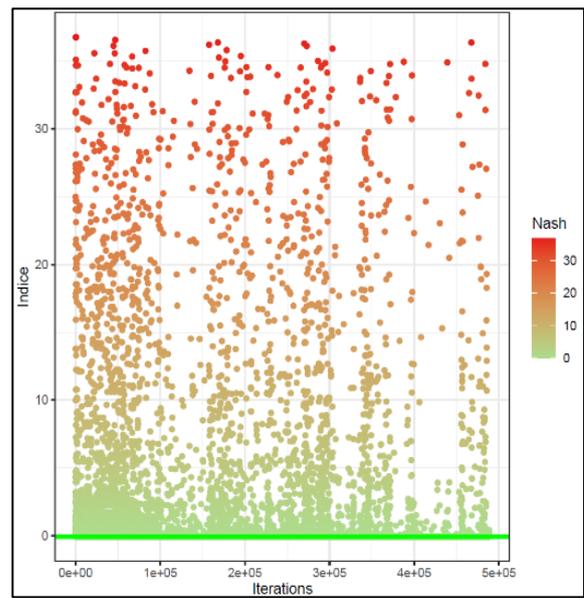


Figure 6 : Variation du critère de Nash au cours des différentes itérations (1990-2009)

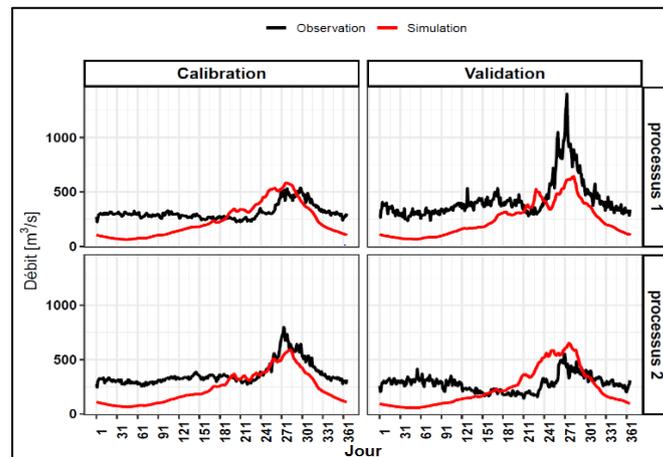


Figure 7 : Comparaison des hydrogrammes moyen journalier

Tableau 3 : Meilleurs résultats obtenus des processus 1 et 2

Processus 1			Processus 2		
Critères de qualité	Calibration (1983-1999)	Validation (1990-2009)	Critères de qualité	Calibration (1990-2009)	Validation (1983-1989)
Nash	-0.37	-0.14	Nash	-0.13	-0.67
R2	0.13	0.35	R2	0.28	0.06
P-biais	-24.20	-40.30	P-biais	-34.70	-13.50

Source : nos traitements de données, 2021

L'analyse exploratoire a révélé des lacunes assez importantes dans les données hydrologiques « naturelles » à la station de Soubré. Les résultats de la simulation hydrologique sont insatisfaisants à tous les niveaux avec des critères de Nash négatifs (tableau 3) pour les différentes sous-séries des processus simulés. Par conséquent, pour parvenir à des résultats plus satisfaisants, la reconstitution des données débitométriques lacunaires est apparue nécessaire avec les données de la station hydrométrique de Piéibly établie dans les mêmes conditions climatiques et sur le même cours d'eau.

3.4 Variabilité des débits observés et simulés à l'exutoire de Soubré après reconstitution

Les figures 8 et 9 présentent les résultats obtenus après la reconstitution des données débitométriques à la station de Soubré ainsi que l'évolution du critère de Nash. La corrélation entre les débits observés et simulés est suffisamment stable et forte avec des paramètres optimaux acceptables (tableau 4). Autrement dit, les fluctuations pluviométriques sont ressenties au niveau des débits. Les résultats de la simulation hydrologique ont donné après itérations, un critère de Nash (0,65) et (0,52) respectivement en calibration (1983-1995) et validation (1996-2001). Le coefficient R^2 est de 0,64 avec un pourcentage de biais (Pbiais) de 22.8 en validation (tableau 5)

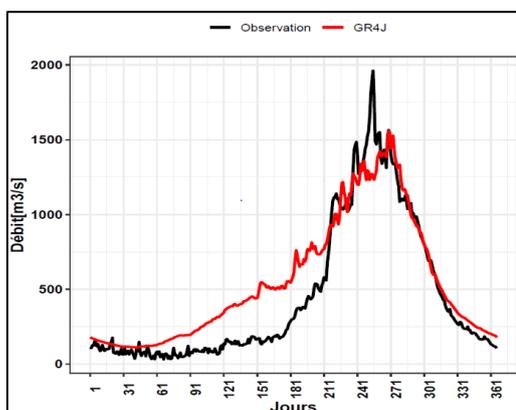


Figure 8 : Comparaison des hydrogrammes simulés et observés (calibration)

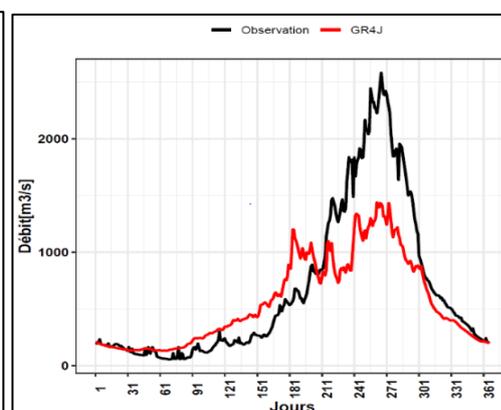


Figure 9 : Comparaison des hydrogrammes simulés et observés (validation)

Tableau 4 : Paramètres optimaux de la modélisation

Paramètre	X1	X2	X3	X4
Valeurs	9.551839	-9.98073	9.031441	-8.967319

Tableau 5 : Critères de performance obtenue

Critère	Nash	R ²	Pbiais
Valeur	0.62	0.64	22.8

Source : nos traitements de données, 2021

4. Discussion

L'analyse de la prévision des crues à l'exutoire du bassin versant aménagé de Soubré s'est faite à partir des données de précipitations et de débits journaliers. Les données de précipitations journalières sont issues de la plate-forme satellitaire du JRA-55. Les lacunes observées sur les débits ont favorisé un comblement des chroniques à partir de la méthode de proportionnalité analogue. De ces différents résultats susmentionnés, il ressort que la qualité des débits disponibles après reconstitution permet de simuler avec une bonne précision la réponse hydrologique du bassin à partir du modèle conceptuel GR4J.

Cependant, les résultats pourraient être très satisfaisants si les données ou les intrants étaient moins lacunaires. Cette situation pourrait s'expliquer par la présence des barrages de Soubré et Buyo ou des erreurs dans les relevés des données. En ce qui concerne les barrages de Buyo par exemple, les différentes opérations de manipulation et vidanges d'eau rendent invariable le débit du fleuve Sassandra presque toute l'année à l'aval du barrage à l'exutoire de Soubré. En effet, ce constat est confirmé par Adja et *al.* (2020, p.207) citant Brou et *al.* (1997) qui ont signifié que certaines perturbations anthropiques sont à l'origine de la modification du régime hydrologique des bassins versants soumis déjà aux effets de la variabilité climatique. Ainsi, cet état de fait complexifie davantage les simulations hydrologiques et donc la prévision des risques de crues et inondations fluviales. Des résultats sensibles ont été aussi obtenus par Sossou et *al.* (2011, p.4) dans le sous-bassin du Bafing où des critères de Nash inférieurs à 70 % ont été obtenus avec des débits naturels en amont du barrage de Manantali. Dans le sous-bassin versant de Kouto au Nord de de la Côte d'Ivoire, Adja et *al.* (2020, p.207) ont obtenu

également un critère de Nash compris entre 68,10 % et 78,60 % en validation et 69 % à 52,10 % en calibration par la méthode de validation-croisée avec le modèle GR4J. Egalement, Fossou et *al.* (2020, p.84) ont obtenu des résultats similaires dans le bassin du N'Zi avec un critère de Nash qui varie de 40,80 à 67,40 % pour les débits élevés, identiquement aux résultats de Kouassi (2007) dans le même bassin versant du N'Zi à Dimbokro. Ces simulations ont été faites à travers des sous-séries chronologiques comme procédé dans cette étude. Pour ces différentes études, les critères de performance obtenus sont supérieurs à 60 % à tous les niveaux.

En somme, il revient d'indiquer que le modèle GR4J convient véritablement à reproduire les débits de crues dans un contexte de disponibilité totale des données d'entrée. Sa facilité de mise en œuvre fait du modèle GR4J, un modèle régional applicable à l'échelle d'un bassin versant pour la simulation des débits (Mouheli, 2003, p.266). Cependant, la qualité des intrants (débits, pluies) constituera un élément de réussite fondamentale de ce processus. Car plusieurs facteurs anthropiques notamment la dynamique des hydro-aménagements à l'intérieur des bassins versants influencent énormément le comportement et l'évolution des débits comme c'est le cas au niveau du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.

Avec la disponibilité de données satellites mergées, la prévision des crues à travers la relation-pluie-débit peut constituer un outil de prise décision pour les gestionnaires et exploitants des bassins fluviaux dans un contexte de prévision et prévention des risques hydrométéorologiques tels que les inondations fluviales dues aux crues de débits.

Références bibliographiques

Adja M. G., Djémin E. J., N'Dri O. F. A., Tohoury P., Kouamé K. J. et Jourda J. P., (2019). *Apport de l'analyse hydrologique et de la modélisation de la relation pluie-débit dans le suivi quantitatif des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : cas du sous-bassin versant du Kouto (Nord de la Côte d'Ivoire).* European Scientific Journal, Vol. 154, N° 2 Octobre 2019, pp. 192-212

Amoussou E., Totin V. S. H., Houessou S., Trambly Y., Camberlin P., Houndenou P., Boko M., Mahé G. et Paturel J-E. (2015). *Application d'un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin-versant en milieu tropical humide : cas du fleuve Mono,* XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015, 8p

Arnold J. G., Moriasi D. N., Gassman P. W., Abbaspour K. C., White M. J., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R., Van Griensven A., Van Liew M. W. (2012) *SWAT: Model use, calibration, and validation.* Transactions of the ASABE, 55(4): 1491-1508.

Camus H. (1969). *Hydrologie du bassin du Sassandra (Note préliminaire)*, Côte d'Ivoire : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Centre d'Adiopodoumé d'Abidjan, volume N°5/69, 79p.

CIMA Research Foundation, (2018), *Profil de Risque de Catastrophe en Côte d'Ivoire*, 24p

Fossou N. M. R., Soro T. D., Soro G., Orou K. R. Et Goné D. L. (2020). *Modélisation de la relation pluie-débit dans un contexte de gestion en eau : cas du sous bassin versant du N'zi en Côte d'Ivoire.* European Scientific Journal, Vol. 16, N° 21 Juillet 2020, pp62-88

Kodja D.J (2018). Indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest. Thèse de Doctorat en Géographie. Université Montpellier, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 288p

Konan B., (2001). Modélisation hydrologique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra à Soubré. Thèse de 3^{ème} Cycle en science et gestion de l'environnement. Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, 182p

Kouassi A. M. (2007). *Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire.* Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 234p

Meledje N. H., Kouassi K. L., N'Go Y. A., et Savané I. (2015). *Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : contribution des chaînes de Markov.* Cah Agric vol. 24 n° 3, mai-juin 2015, pp186-197

N'Cho O. K. L. A., (2022), *Analyse du risque d'inondation en cas de rupture des barrages Ayamé 1 et 2 dans le département d'Aboisso (Sud-Est, Côte d'Ivoire)*, Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, 262p.

Morton F. I. (1983). *Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology.* Journal of hydrology, 66(1-4): 1-76.

Mouheli S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Ecole National du Génie Rural des Eaux et Forêts, Université Paris VI, France, 323p

Nash J. E., Sutcliffe J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3): 282-290.

Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F. et Loumagne C., (2005). *Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling.* Journal of hydrology, 303(1-4): pp290-306

Perrin C., Michel C. et Andréassian V. (2007). Les modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Rapport technique Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés. Antony, 16p

Sorokoby V. M., (2013), *Etude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique.* Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 219p

Sossou S., Masseck B., Badji A. M., Edmond N. M. N., Ansoumana B., Kuruma M., Mariko A., Bamba F., Dacosta H., Malou R., Barry A., Kane A., Fall A. N. Et Hamadoun S. (2011). *Calage et validation des modèles hydrologiques GRJ4 et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafin-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manantali.* 6^{ème} Journée Scientifique du 2IE, 4 – 8 avril 2011, Campus 2IE Ouagadougou, 6p.