



# Calage et validation de SWAT sur le bassin versant du Bafing (Fleuve Sénégal) en amont de BAFING MAKANA : vers une application à la gestion du barrage de Manantali

Soussou Sambou<sup>1</sup>, Moussé Landing Sane<sup>1</sup>, Issa Leye<sup>1</sup>, Didier Maria Ndione<sup>1</sup>, Seydou Kane<sup>1</sup>, and Mamadou Lamine Badji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Cheikh Anta DIOP University, Dakar, 5005, Senegal

<sup>2</sup>Unité de Formation et de Recherche Science et Technologie, Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Continent, Université Assane Seck de Ziguinchor, Ziguinchor, Senegal

**Correspondence:** Soussou Sambou (sousamb@hotmail.fr)

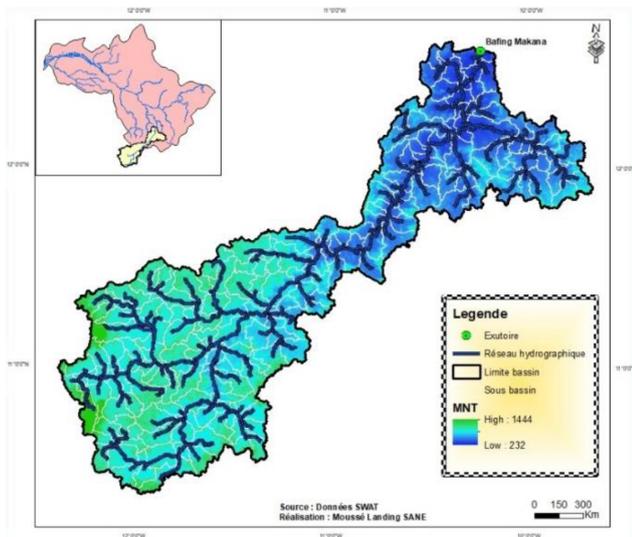
Published: 16 November 2021

**Résumé.** En matière de Gestion des Ressources En Eau, il devient de plus en plus nécessaire de remonter à l'information pluviométrique. La modélisation est devenue ainsi un outil incontournable. Les modèles hydrologiques reposent sur le cycle hydrologique. Ils transforment les pluies en débits sur le réseau hydrographique. L'objectif de cet article est de décrire le fonctionnement hydrologique du bassin versant du Bafing (principal affluent amont du fleuve Sénégal) en amont de Bafing Makana. Le modèle hydrologique semi distribué à base physique SWAT a été choisi comme modèle de base pour calculer les hydrogrammes de crue à la station de Bafing Makana qui contrôle les entrées au barrage de Manantali. Pour représenter la topographie de la zone d'étude, un MNT de résolution 12.5 m × 12.5 m a été retenu. Les observations de pluies et débits sur la période 1979–1986 (pour le calage) et 1988–1994 (pour la validation) ont été utilisées comme entrées. L'analyse de sensibilité a permis de faire apparaître les paramètres les plus significatifs du modèle. Les valeurs de ces paramètres ont été déterminées dans la phase calage puis validées dans la phase validation. La valeur du critère de Nash est de 0.71 pour la phase de calage et de 0.65 pour la phase de validation. Les résultats validés à partir du critère de Nash montrent que les valeurs prises par le critère entrent dans l'intervalle des valeurs satisfaisantes retenues pour ce critère. L'ensemble des résultats obtenus montre que le modèle hydrologique SWAT peut être utilisé dans la gestion du barrage de Manantali à l'horizon 2090.

## 1 Introduction

Avec le changement climatique et la variabilité climatique qui s'en est suivie, mais également avec l'accroissement de la population, il devient plus que nécessaire d'utiliser de façon aussi rationnelle que possible les ressources en eau. Cette contrainte nécessite une connaissance approfondie de la physique du bassin versant et une très bonne compréhension de la façon dont les processus hydrologiques liés au cheminement de l'eau dans le bassin versant s'y produisent. Le modèle hydrologique qui permet de calculer les flux (débits, sédiments, nutriments, substances chimiques, ...) au sein du bassin versant est devenu incontournable de nos jours, aussi bien pour la recherche fondamentale en hydrologie que pour

la planification et la gestion des ressources en eau (Xi Cheng et al., 2007). Les modèles hydrologiques peuvent être classés suivant la représentation spatiale du bassin versant ou selon la description des processus hydrologiques. Du point de vue spatial, on distingue les modèles globaux et les modèles distribués. Les modèles globaux sont unidimensionnels. Ces modèles ne tiennent compte ni des hétérogénéités spatiales du bassin versant ni des variations spatiales des variables hydrologiques et des processus hydrologiques. Les modèles distribués ont par contre une structure spatiale. Le bassin versant est divisé en mailles de résolution plus faible pouvant capturer explicitement la variabilité spatiale des processus hydrologiques et des caractéristiques du bassin versant. Du point de vue de la description des processus, le modèle hy-



**Figure 1.** Bassin versant du Bafing Versant en amont de Bafing-Makana.

drologique peut être conceptuel ou à base physique. Dans les modèles conceptuels, les différents processus du cycle hydrologique sont représentés par des éléments de stockage. Les transferts entre ces différents réservoirs sont représentés par des fonctions mathématiques (Noandis and Mimikou, 2013). Les modèles à base physique représentent généralement les différents processus du cycle hydrologique à l'aide d'équations aux dérivées partielles non linéaires issues des lois de conservation de la mécanique des fluides. Les modèles distribués spatialement et à base physique fournissent une information détaillée sur le fonctionnement du bassin versant. Ils sont ainsi utilisés pour approfondir la compréhension de la dynamique des processus hydrologiques et ainsi simuler à l'échelle spatiale la réponse hydrologique d'un bassin versant. Ils permettent ainsi de faire des prévisions hydrologiques (Tashikawa Yasuto, 2011).

L'objectif de cet article est d'utiliser un hydrologique semi-distribué à base physique SWAT pour comprendre la dynamique du bassin versant du Bafing en amont de Bafing Makana. Après une analyse de sensibilité, les paramètres les plus sensibles ont été calibrés sur la période 1979–1986 et validés sur la période 1988–1994.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Zone d'étude

Le sous bassin versant du fleuve Sénégal en amont de Bafing Makana couvre une superficie de 22 000 km<sup>2</sup>. Il se répartit entre la Guinée et le Mali. Le climat est subguinéen au Sud du sous bassin et soudanien au sud par soudanien au Nord. Les précipitations décroissent du Sud au Nord.

### 2.2 Sol et couvert végétal

La Fig. 1 représente le bassin versant du Bafing en amont de Bafing Makana. Le bassin versant comprend 4 différents classes de sol à savoir Acrisols, Cambisols, Leptosols and Regosols. Le couvert végétal est composé essentiellement de FRSD (37.2 %), RNGS (57.7 %), et dans une moindre proportion WWGR et CWGR.

### 2.3 Présentation du modèle hydrologique SWAT

SWAT est un modèle hydrologique continu, spatialement semi-distribué, à base semi-physique et à pas de temps journalier, téléchargeable gratuitement sur le site <https://swat.tamu.edu/software/> (la date du dernier accès : 5 Novembre 2021). SWAT offre la possibilité de simuler un grand nombre de processus physiques dans un bassin versant avec une haute résolution spatiale. Pour cela, le bassin versant est divisé en sous bassins, eux-mêmes subdivisés en Unités de Réponses Hydrologiques (URH). Les URH sont des unités spatiales homogènes caractérisées par le même sol, le même couvert végétal, et la même pente. Les bilans d'eau calculés sur les URH permettent de déterminer les débits à l'exutoire des sous-bassins versants. Ces différents exutoires sont reliés entre eux par le réseau hydrographique. Le bilan d'eau simulé par SWAT utilise l'équation ci-dessous (Peng Shi et al., 2011) :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

où  $t$  est le temps en jours,  $SW_t$  (mm) et  $SW_0$  (mm) représentent respectivement l'humidité contenue dans le sol à l'instant  $t$  et à l'instant initial,  $R_{\text{day}}$  (mm) la lame précipitée à l'instant  $i$ ,  $W_{\text{seep}}$  (mm) la lame infiltrée dans le sol à partir de la surface à l'instant  $i$ ,  $Q_{\text{surf}}$  (mm) est la lame disponible pour le ruissellement à l'instant  $i$ ,  $Q_{\text{gw}}$  (mm) le débit de base provenant de la nappe phréatique à l'instant  $i$ , et  $E_a$  (mm) est l'évapotranspiration à l'instant  $i$ . Dans ce travail, la méthode de Penmann-Monteith qui est la plus répandue est utilisée. La lame disponible pour le ruissellement est déterminée par la méthode du « Curve Number » mise au point par le SCS (Soil Conservation Service). L'écoulement de la surface du bassin versant vers le réseau hydrographique est simulé à l'aide de l'équation de l'onde cinématique. L'écoulement en rivière est calculé à l'aide de la méthode Muskingum (Peng Shi et al., 2011).

### 2.4 Données hydroclimatiques et topographiques utilisées

Les données utilisées dans cette étude sont les données hydrométriques, les données pluviométriques, les données climatiques et les données topographiques. Les données hydrométriques proviennent de la base de l'OMVS (l'organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal). Il s'agit des débits

moyens journaliers observés à la station de Bafing Makana sur la période 1961–2013. Les données pluviométriques observées s'étendent sur les périodes 1963–1986 et 1986–1994. Elles ont été extraites de la base ORSTOM. Les données climatiques journalières s'étendent sur la période 1979–2013. Il s'agit des précipitations, des températures maximales et minimales, du rayonnement solaire, de l'humidité relative, de la vitesse du vent tirées du site de SWAT <https://globalweather.tamu.edu/> (la date du dernier accès : 5 Novembre 2021). Les données topographiques sont constituées par le MNT obtenu à partir du SRTM  $12.5 \times 12.5$  m (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/penalty@M\hskip.5\fontdimen2\fontrelax?#>, la date du dernier accès : 5 Novembre 2021).

## 2.5 Calage du modèle et analyse de sensibilité

Le calage est le processus qui permet d'estimer les valeurs des paramètres les plus significatifs du modèle en comparant pour un jeu de paramètres fixé les grandeurs calculées par le modèle aux grandeurs observées. SWAT comporte un grand nombre de paramètres dont le spectre de variation spatiale et temporelle est très étendu. Son calage est très complexe et consomme un temps de calcul qui peut être très élevé. Il est donc nécessaire d'éliminer les paramètres qui ne sont pas sensibles et de rendre ainsi le calage plus aisé. Cet exercice est appelée analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité fournit une liste finale de paramètres classés en ordre décroissant de sensibilité. Ce sont ces paramètres qui seront utilisés pour le calage. Le calage comme l'analyse de sensibilité peuvent être effectués manuellement ou automatiquement à l'aide de l'algorithme SUFI-2 du SWAT-CUP (Jinkang Du et al., 2013 ; Manoj et al., 2014).

## 2.6 Evaluation des performances du modèle

L'évaluation du modèle calibré permet de vérifier l'aptitude des paramètres estimés du modèle à reproduire ultérieurement la réponse du bassin versant de façon réaliste en utilisant des indicateurs de performance qui sont soit graphiques soit statistiques. Les indicateurs graphiques consistent principalement à comparer les hydrogrammes calculés par le modèle avec les hydrogrammes observés. Parmi les indicateurs statistiques existant, nous avons choisi le critère de Nash qui est le plus utilisé par les hydrologues.

## 3 Résultats et discussions

### 3.1 Analyse de sensibilité – Calage

La période 1979–1986 a été retenue pour l'analyse de sensibilité et le calage du modèle. A la suite de l'analyse de sensibilité, sur les 22 paramètres testés, 19 ont été reconnus suffisamment sensibles par le modèle. Ces paramètres ont été estimés lors de l'étape de calage en prenant comme critère de qualité le critère de Nash. La valeur de 0.71 obtenue pour ce

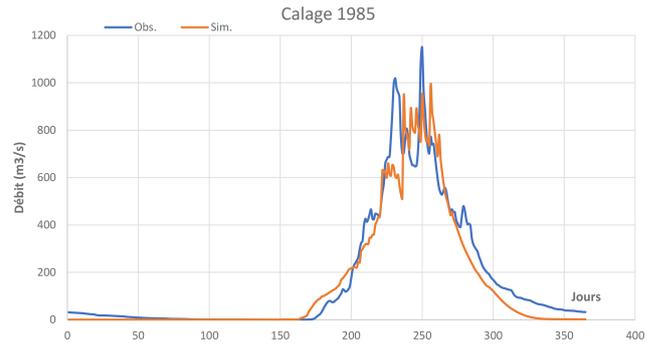


Figure 2. Hydrogrammes Bafing Makana : Calage année 1985.

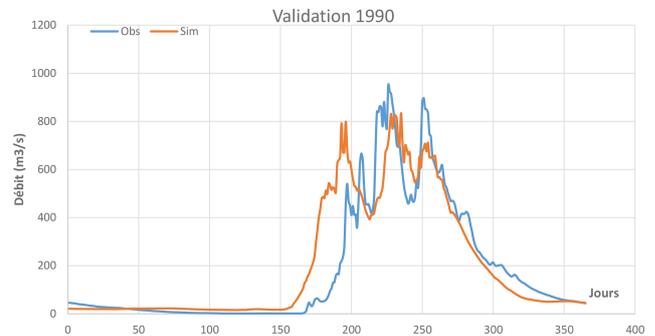


Figure 3. Hydrogramme Bafing Makana : Validation année 1990.

critère peut être considérée comme bonne. Nous présentons à titre d'illustration de la qualité du calage l'hydrogramme de la crue de l'année 1985 (Fig. 2) qui est restitué de façon satisfaisante par le modèle.

### 3.2 Validation

Les paramètres retenus après analyse de sensibilité et estimés après calage ont été appliqués sur la période 1988–1994 pour validation. Les mêmes indices de performance graphiques et statistiques ont été appliqués. Le critère de Nash calculé a une valeur de 0.65 sur l'ensemble de la période de validation. Bien qu'inférieure à celle obtenue lors du calage, il n'en demeure pas moins qu'elle est satisfaisante. Nous indiquons à titre d'illustration le graphe calculés-observés pour l'année 1990 (Fig. 3). Il y a un décalage important au début de la crue, alors que la décrue est mieux restituée.

## 4 Conclusion

La modélisation hydrologique joue un rôle très important dans la gestion des ressources en eau et la prise de décision. L'objectif de ce travail est de caler et valider le modèle hydrologique semi-distribué SWAT. L'application a été faite sur le bassin versant du Bafing en amont de Bafing Makana en vue de la gestion du barrage de Manantali. Les périodes de 1979–1986 et 1988–1994 ont été choisies respecti-

vement pour le calage et la validation. La qualité du calage tout comme celle de la validation a été mise en évidence par le critère de Nash. Les valeurs obtenues aussi bien pour le calage (0.71) que pour la validation (0.65) montrent que le modèle hydrologique SWAT peut être utilisé pour reproduire le fonctionnement du bassin versant du Bafing en amont de Bafing Makana et faire une gestion du barrage de Manantali.

**Disponibilité du code.** Le code est en accès libre et a été téléchargé dans le site <https://swat.tamu.edu/software/> (la date du dernier accès : 5 Novembre 2021).

**Disponibilité des données.** Les données hydrologiques proviennent de bases des services nationaux dans le cadre d'un projet sous condition de confidentialité et sans possibilité de divulgation. Les données climatiques proviennent du site de SWAT <https://globalweather.tamu.edu/> (la date du dernier accès : 5 novembre 2021).

**Collaborateurs.** SS est l'auteur principal. Il a assuré la coordination, le montage et la relecture de l'article. MLS et MLB ont fait le calage et la validation de SWAT, et effectué tous les calculs correspondants. Ils ont également participé à la rédaction. DMN a participé à la collecte et à la mise en forme des données nécessaires au calage et à la validation de SWAT. SK a participé à la rédaction et à la relecture de l'article.

**Intérêts concurrents.** Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts.

**Clause de non-responsabilité.** Publisher's note : Copernicus Publications remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

**Déclaration du numéro spécial.** This article is part of the special issue "Hydrology of Large River Basins of Africa". It is a result of the 4th International Conference on the "Hydrology of the Great Rivers of Africa", Cotonou, Benin, 13–20 November 2021.

**Remerciements.** Les auteurs remercient le projet WEF/AICS pour avoir appuyé le travail et les services techniques de l'Omvs pour avoir mis leur base de données à notre disposition.

## Références

- Jinkang Du, Hanyi Rui, Tianhui Zuo, Qian Li, Dapeng Zheng, and Ailin Chen : Hydrological simulation by SWAT Model with fixed and varied parameterization approaches under land use change, *Water Resour. Manag.*, 27, 2823–2838, 2013.
- Manoj Jain, Survey Daman, and SharmaVan Sadhara : Hydrological modeling of river basin using SWAT. International Conference on Emerging Trends in Computational and Imaging Processing (ICETCIP'2014), 15–16 December 2014, Pattaya, Thailand, 2014.
- Noandis, L. I. and Mimikou, M. A. : Intercomparison of the lumped versus semi-distributed HEC-HMS hydrological model in the Kalamas River basin, *Proceeding of the 13th International Conference of Environmental Science and Technology*, 5–7 September 2013, Athens, Greece, 2013.
- Peng Shi, Chao Chen, Ragawan Srinivasan, Xuesong Zhan, Xiuqin Fang, Simin Qu, Xi Chen, and Qiongfang Li : Evaluating the SWAT Model for hydrological modeling in the Xixian watershed and a comparison with the XAJ Model, *Water Resour. Manag.*, 25, 2595–2612, 2011.
- Tachikawa Yasuto : Distributed rainfall modeling, CE74.55 Modeling of water resources systems, 21 22 and 23 March 2012, Distributed flow routing model : 1K-FRM-event Demonstration and Project, disponible à : [https://hywr.kuciv.kyotou.ac.jp/publications/lectureNote/2012\\_MWR-DHM-Demo-Tachikawa.pdf](https://hywr.kuciv.kyotou.ac.jp/publications/lectureNote/2012_MWR-DHM-Demo-Tachikawa.pdf) (la date du dernier accès : 5 novembre 2021), 2011.
- Xi Chen, Yong Qin, David Chen, and Chong-yu Xu : A distributed monthly hydrological model for integrating spatial variation of basin topography and rainfall, *Hydrol. Process.* 21, 242–252, 2007.