



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Prévision des crues dans le bassin versant du Kou, Burkina Faso

Sidiki GUELBEOGO^{1*}, Lucien OUEDRAOGO^{1,2} et Sayouba ILBOUDO¹

¹Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Milieux et Territoires, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso.

²Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Ouagadougou, Burkina Faso.

*Auteur correspondant, E-mail : gsidiki76@gmail.com

Received: 31-01-2023

Accepted: 08-04-2023

Published: 30-04-2023

RESUME

Les inondations constituent un enjeu majeur du 21^{ème} siècle. En effet, ces phénomènes imprévisibles ont pris une ampleur considérable ces dernières décennies, en grande partie à cause des effets du changement climatique. Ainsi, la compréhension de ces phénomènes est essentielle pour les décideurs locaux, car elle fournit des informations précieuses pour prévenir et gérer leurs conséquences. Cette étude propose donc une prévision des crues dans le bassin versant du Kou pour éclairer la décision publique. Pour cela, une approche mixte, combinant le système de modélisation hydrologique (HEC-HMS) et les systèmes d'information géographique (SIG), a été utilisée pour simuler les débits futurs du bassin versant. L'analyse du critère de Nash pour le calibrage et la validation du modèle a révélé des valeurs très satisfaisantes, atteignant respectivement 88,1 % et 82,6 %. Les prévisions indiquent que le bassin versant du Kou sera confronté à des épisodes de crues en 2025, 2031, 2042, 2044, 2047 et 2049. Ces résultats exigent des responsables et des décideurs du bassin versant du Kou qu'ils renforcent la protection des équipements de mesure des débits pour éviter leur emportement par les crues prévues, et qu'ils mettent en place des mesures structurelles capables de résister aux volumes importants simulés.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Inondation, changement climatique, HEC-HMS, SIG, crues, Nash.

Flood forecasting in the Kou watershed, Burkina Faso

ABSTRACT

Floods are a major concern of the 21st century. These unpredictable phenomena have taken on a particularly significant dimension in recent decades, largely due to the effects of climate change. Therefore, understanding these phenomena is essential for local decision-makers, as it provides valuable information to prevent and manage their consequences. This study proposes a flood forecast in the Kou watershed to inform public decision-making. To achieve this goal, a mixed approach combining the Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) and Geographic Information Systems (GIS) was used to simulate future flows in the watershed. Analysis of the Nash criterion for model calibration and validation revealed very satisfactory values, reaching

88.1% and 82.6% respectively. The forecasts indicate that the Kou watershed will experience flood episodes in 2025, 2031, 2042, 2044, 2047, and 2049. These results require Kou watershed officials and decision-makers to strengthen the protection of flow measurement equipment to prevent their removal by predicted floods, and to implement structural measures capable of withstanding the significant simulated volumes.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Flood, climate change, HEC-HMS, GIS, high water, Nash.

INTRODUCTION

Les phénomènes météorologiques extrêmes liés au changement climatique sont le principal moteur du doublement des catastrophes naturelles dans le monde (GIEC, 2007). La planète terre a été témoin de 16 grandes catastrophes dans les années 1960, de 29 dans les années 1970, de 70 dans les années 1980 et 960 dans les années 2010 (ONU-HABITAT, 2007 ; Ouédraogo, 2013). Une tendance à la hausse qui se poursuit aujourd'hui. Au sein des désastres touchant l'Afrique sahélienne, les sécheresses et les inondations sont parmi les plus prégnants, se distinguant autant par leur ampleur, leur récurrence, leur impact humain que leurs conséquences économiques (Tanguy, 2012 ; Bronfort, 2017). Les inondations constituent 80% des catastrophes naturelles du XXI^e siècle (Barry, 2008). Ces dernières années, l'Afrique de l'Ouest a été fréquemment impactée par des inondations ayant entraîné des pertes humaines significatives ainsi que des dommages matériels considérables (OCHA, 2009 ; Mohamed et Abdelkader, 2014). Au Burkina, le bilan s'élevait à 93 000 personnes affectées dont 28 000 déplacés. Le bassin versant du Kou a été affecté par des conséquences similaires, ces dernières années, et a subi des inondations répétées. En effet, de grandes inondations ont frappé ce bassin versant au cours des dernières décennies, causant d'importants dégâts matériels et des pertes humaines considérables (CONASUR, 2019). Selon les chiffres du CONASUR, entre 2009 et 2018, le nombre de ménages touchés par les inondations dans le bassin versant du Kou est passé de 8 à 3 323, pour un total de 14 280 ménages sinistrés sur la même période. Pendant la même période, les quantités de pluie recueillies ont été estimées à 1000 mm/an (ANAM, 2018). Dans les

communes de Bobo-Dioulasso et de Bama, les inondations provoquent régulièrement des dommages (Soma, 2015). Les facteurs explicatifs de la survenue de ces inondations sont multiples et complexes. Ils incluent notamment la modification des pratiques agricoles, l'occupation anarchique des zones à risque, le changement climatique et la construction inadéquate d'infrastructures de drainage et d'assainissement (Leumbe et al., 2018, Soma et al., 2018 ; CONASUR, 2019). La croissance démographique rapide et l'urbanisation galopante sont également des facteurs aggravants, qui ont augmenté la pression sur les ressources naturelles et favorisé l'occupation de zones à risque. Il existe un corpus important de travaux de recherche consacrés aux inondations au Burkina Faso, cependant la plupart de ces études se sont principalement attachées à l'analyse des causes, des conséquences et des stratégies d'adaptation des populations. À cet égard, le nombre d'études portant sur la prévision des crues reste relativement limité, alors que cette thématique pourrait apporter des éléments déterminants pour éclairer les décisions des responsables dans la gestion des inondations. Ces constats suscitent des questionnements dont le principal est de savoir *comment prédire les crues dans le bassin versant du Kou?* On admet en hypothèse qu'une prospective pluie-débit permet de prévoir les crues dans le bassin versant du Kou. L'objectif principal de l'étude est de proposer une prévision des crues dans le bassin versant du Kou afin d'éclairer la décision publique.

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant du Kou est situé à l'Ouest du Burkina Faso, dans la province du Houet, région des Hauts-Bassins. Il tire son

nom de de la rivière Kou, affluent du fleuve Mouhoun (ex. Volta noire) qui est l'un des 3 grands cours d'eau du pays (Mouhoun, Nakanbé et Nazinon). Le Kou constitue le principal exutoire des eaux de bassin versant. Il est long de 30 km avec un débit variant entre 3,5 et 15 m³/s dans l'année (Millogo, 2013). Le bassin versant du Kou est situé entre les méridiens 4°0'00' et 4°40'00'' de longitude Ouest d'une part et les parallèles 11°00'00'' et 11°30'00'' de latitude nord d'autre part (Figure1). Il couvre une superficie de 1 803 Km² et est partagé entre trois communes en l'occurrence : Bobo-Dioulasso, Bama et Peni. La situation géographique de la zone d'étude est présentée à la Figure 1.

Les données utilisées

Trois types de données ont été utilisés dans le cadre de cet article, il s'agit de données géographiques, climatiques et hydrométriques.

❖ *Données géographiques*

Les données géographiques ont concerné essentiellement l'image SRTM de 2015. Téléchargée sur Google Earth engine, elle a servi à la délimitation du bassin versant. Elle a aussi permis de générer le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de donner les caractéristiques morphométriques du bassin versant du Kou.

❖ *Données climatiques*

Elles ont porté sur la pluviométrie, l'évapotranspiration, la température maximale et la température minimale de la station synoptique de Bobo-dioulasso de 1988-2018. Les scénarii des paramètres climatiques à l'horizon 2050 ont été utilisés pour la prévision des crues dans le bassin versant du Kou. Ces données ont été téléchargées sur le site www.climatexplorer.com du Centre National de la Recherche Météorologique (CNRM). Elles appartiennent aux Modèles de Circulation Générale (MCG) qui à ce jour incluent des projections dans le futur et tiennent compte des incidences des bouleversements locaux sur une autre région du globe. Le choix des modèles Representative Concentration Pathway (RCP 4.5 et 8.5) du Centre National de la Recherche Météorologique (CNRM) se justifie principalement par le fait que ces outils

peuvent être téléchargés directement sur le site. De plus, ils présentent beaucoup d'avantages, qui sont entre autres :

- la complexification avec prise en compte de composantes supplémentaires pour certains modèles (carbone couplé au climat, aérosols interactifs...);
- la résolution augmentée parfois avec un accroissement du nombre de niveaux verticaux mais le plus souvent le nombre de points de maillage sur l'horizontal.

Les données de pluviométrie sont extraites directement des sorties du modèle CNRM. Quant à l'ETP, elle a été calculée. Pour ce faire, cette étude a privilégié un modèle de calcul simple qui s'appuie sur un minimum de données. Ainsi, la méthode de (Hargreaves et Samani, 1985) a servi au calcul de l'ETP journalière. Cette méthode a été retenue car elle nécessite peu de données. De plus, elle a déjà montré de bonnes performances à estimer l'ETP en zone sahélienne au Burkina Faso selon Ibrahim (2012) et Karambiri (2017).

❖ *Données hydrométriques*

Ces données ont porté principalement sur les débits des points d'eau des stations hydrométriques de Badara, Nasso milieu, Nasso Aval, Confluence Niamé-Baoulé et Koumi. Les données de ces écoulements sont relevées entre 1988 à 2018. Notons que ces débits sont au pas de temps journalier. Ces données ont servi de référence pour la construction et pour l'approbation du test de validation du modèle pluie-débit.

Simulation pluie-débit avec HEC-HMS

La modélisation avec HEC-HMS peut être décomposée en trois grands modules qui sont le module du bassin versant, le module de la météorologie et les spécifications particulières. Ces dernières sont sélectives parce qu'elles sont fonctions du type de modélisation choisie (continue dans notre cas), des données disponibles et des objectifs à atteindre.

❖ *Modélisation du bassin versant*

Elle a consisté en premier lieu, en un découpage du bassin versant en plusieurs sous-

bassins versants élémentaires, ensuite, en une spécification des méthodes utilisées pour le calcul des infiltrations, du ruissellement et des écoulements souterrains. Ces traitements sont réalisés à l'aide du logiciel HEC-GeoHMS qui est une extension de ArcGis à travers son extension « Spatial Analyst » développé comme outil hydrologique géospatial. Ce paquet technologique est disponible auprès de l'Environmental Systems Research Institute (ESRI). En analysant les données numériques de terrain, HEC-GeoHMS transforme les chemins de drainage et les limites des bassins versants en une structure de données hydrologiques qui représente le réseau de drainage. Le programme permet aux utilisateurs de visualiser les informations spatiales, de documenter les caractéristiques des bassins versants, d'effectuer une analyse spatiale et de délimiter les sous-bassins et les cours d'eau. HEC-GeoHMS est mis à contribution dans le présent travail de recherche en raison de sa facilité d'utilisation avec HEC-HMS.

❖ *Modélisation météorologique*

Le modèle météorologique regroupe les données de précipitations, d'insolation, de température et d'évapotranspiration nécessaire au calcul de la réponse hydrologique du bassin versant. Les données météorologiques ont été implémentées dans le logiciel HEC-HMS à travers un programme téléchargeable sur internet. Ce programme offre également des possibilités du formatage et du copiage des données dans un fichier séquentiel ASCII, facilement transférable sur un autre ordinateur et ou logiciel/application. Les données importées sont visualisées sous forme d'histogramme via l'interface HEC-HMS dont l'intérêt est de s'assurer de la cohérence et la qualité des données.

Dans la présente étude, les données de la station synoptique de Bobo-Dioulasso seront affectées à tous les sous bassins versants de façon manuelle en les introduisant à partir de HEC-HMS.

❖ *Spécifications particulières*

Les spécifications de contrôle ont été la dernière composante indispensable effectuée pour la simulation. C'est à cette phase que les

instants de départ et de fin de la simulation ainsi que le pas de temps de calcul ont été effectués. Toutes les trois parties indispensables à la simulation hydrologique étant réunies, nous avons procédé à la simulation. Les résultats ainsi obtenus sont présentés sous forme de graphique, histogramme, etc.

Évaluation des performances du modèle

Les performances du modèle HEC-HMS ont été évaluées à l'aide de divers tests statistiques qui sont : le coefficient de Nash, le RMSE et le biais.

❖ *Coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE)*

Le Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe est utilisé pour évaluer la puissance prédictive des modèles hydrologiques. Il exprime la proportion de la variance résiduelle entre les valeurs simulées et les valeurs observées par rapport à la variance expliquée des valeurs observées.

En hydrologie, il est le plus utilisé pour mesurer la qualité de l'ajustement. Il est défini par l'équation 1 de (NASH et Sutcliffe, 1970).

$$\text{Equation 1 : } NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Q_{obs} : Débits observés
 \bar{Q}_{obs} : Moyenne des débits observés
 Q_{sim} : Débits simulés

Ce coefficient varie entre -∞ et 1. La valeur optimale est 1, c'est-à-dire l'hydrogramme simulé est parfaitement corrélé à l'hydrogramme observé.

❖ *RMSE observation standard déviation ratio (RSR)*

C'est le rapport entre la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type des débits simulés et observés (Moriassi et al., 2007). Sa valeur optimum est 0 et il est décrit par l'Equation 2.

$$\text{Equation 2 : } RSR = \frac{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}}$$

Q_{obs} : Débits observés
 \bar{Q}_{obs} : Moyenne des débits observés
 Q_{sim} : Débits simulés

❖ *Le pourcentage de biais (PBIAIS)*

C'est le pourcentage de la variation totale

entre les valeurs simulées et les valeurs observées (Moriassi et al., 2007). Sa valeur optimale est de 0 et il est exprimé par l'équation 4.

$$\text{Équation 4 : } PBIAIS = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim}) * 10^i}{\sum Q_{obs}}$$

Q_{sim} = Débits simulés
 Q_{obs} = Débits observés

Le Tableau 1 présente les intervalles des critères de performance pour juger la qualité de l'ajustement. Pour la présente recherche, il s'agira de comparer les résultats du calage et de la validation avec les indicateurs de performance et d'en déduire leur niveau.

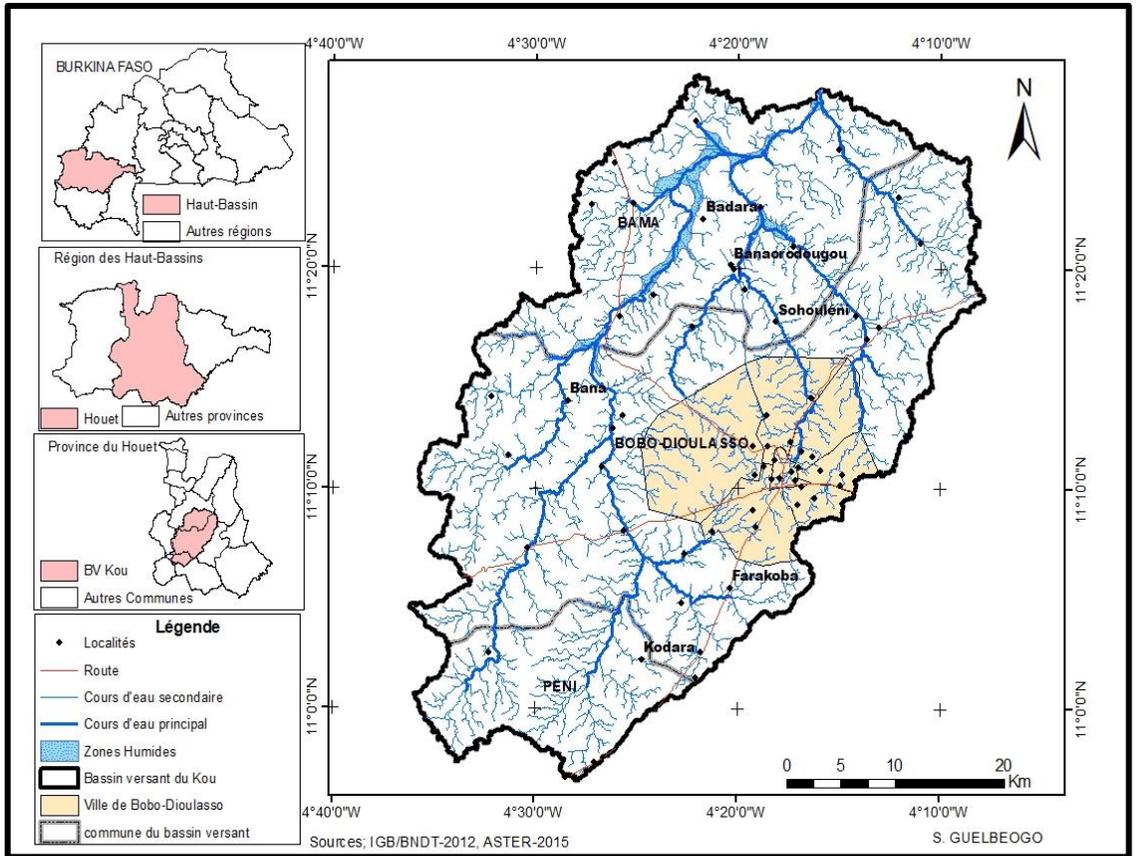


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Kou.

Tableau 1: Indicateurs de critères de performance.

Critères	RSR	NSE	PBIAIS
<i>Très bon</i>	0,00<RSR≤0,50	0,75<NSE≤1,00	PBIAIS<±10
<i>Bon</i>	0,50<RSR≤0,60	0,65<NSE≤0,75	±10≤PBIAIS<±15
<i>Satisfaisant</i>	0,60<RSR≤0,70	0,50<NSE≤0,65	±15≤PBIAIS<±25
<i>Mauvais</i>	RSR>0,70	NSE≤0,50	PBIAIS≥±25

Source : (Singh et al., 2005).

RESULTATS

Schématisation du bassin versant avec l'extension HEC-GeoHMS

La schématisation a permis de subdiviser le bassin versant en quatre sous bassins. La Figure 2 illustre la schématisation du bassin versant du Kou. Elle présente un exutoire, des sous bassins versants reliés entre eux par des jonctions. Ces opérations ont été réalisées de façon automatique sur HEC-GeoHMS. L'écriture alphanumérique (W210) correspond au numéro du sous bassin versant. Le « W » étant l'initial de « Watershed » (bassin versant en anglais).

L'utilisation de l'extension HEC-GeoHMS a permis de déterminer les paramètres morphométriques de chaque sous bassin versant. Les paramètres issus des traitements sont résumés dans le Tableau 2. L'analyse du Tableau 2 montre que le sous bassin W350 a la plus grande superficie (641,22 km²). Il est secondé respectivement par les sous bassins W300, W250 et W210. Le taux d'imperméabilité est élevé dans le sous bassin versant W300. Ce taux élevé d'imperméabilisation peut entraîner un ruissellement important des eaux de pluie, qui peut causer des inondations, de l'érosion et la dégradation de la qualité de l'eau. L'interception de la végétation est maximum et minimum respectivement au niveau du sous bassin versant W250 et W300. Quant aux dépressions, elles sont nombreuses dans le sous bassin versant W210. L'interception de la végétation se réfère à la capacité des plantes à capturer l'eau de pluie, à la stocker et à la libérer lentement dans le sol. Cette interception peut jouer un rôle crucial dans la régulation des flux d'eau et la prévention des inondations en période de fortes précipitations. Par conséquent, une gestion adéquate de la végétation peut contribuer à la prévision et à la réduction des risques d'inondations.

Calibration et validation

Le modèle a été calibré et validé sur des petites périodes de trois (3) ans (deux ans pour le calage et un an pour la validation) entre 1988 et 2018. Ce choix s'explique par les lacunes constatées dans les séries chronologiques des données. Aussi, le pas de temps réduit permet

d'avoir des résultats de qualité. Nous avons considéré 7 tranches de trois ans parce que les données hydrométriques contiennent des lacunes ; parfois des années toutes entières sont exemptées de données. Le Tableau 3 présente les critères d'optimisation (calage et validation) sur différentes périodes de 1988 à 2018 (1988-1990, 1991-1993, 1996-1998, 1999-2001, 2006-2008, 2011-2013 et 2014-2016).

A l'issue des simulations de chaque tranche, les critères de Nash varient entre 77% et 91% pour la calibration et entre 72% et 88% pour la validation. Quant aux critères RSR, ils varient entre 3% et 5% pour la calibration et validation. Les Pbiais varient entre $\pm 5,67\%$ et $\pm 19,82\%$ pour la calibration et entre $\pm 2,46\%$ et $\pm 19,33\%$ pour la validation.

Les hydrogrammes de calibration et de validation de la simulation

❖ Hydrogramme de calibration : 1988-1989

La Figure 3 montre que l'hydrogramme simulé (en bleu) reproduit très bien les pics de l'hydrogramme observé (en noir) même s'ils sont peu sous-estimés. Nous remarquons qu'à chaque crue, les deux hydrogrammes croissent et décroissent au même moment. Le modèle est alors capable de bien simuler les crues. La Figure 4 présente les résultats du calage du modèle HEC-HMS.

Les résultats du calage présentés à la Figure 4 montrent effectivement que les hydrogrammes simulés et observés sont très bien rapprochés. D'après le tableau des indicateurs de critères de performance (Tableau 1), le coefficient de Nash qui est de **88,1%**, est compris entre **75% et 100%**. Par conséquent, le calage des paramètres est de très bonne qualité. Les autres coefficients RSR et le PBIAS indiquent également la même interprétation.

Le taux de variation entre les volumes observés et simulés est de **9,9%** et celui entre les pics des débits observés et simulés est de **9,02%**. Ces deux faibles valeurs indiquent que les volumes et la crue maximale sont également bien simulés.

En résumé, le calage du modèle HEC-HMS a été très bien exécuté. Pour confirmer la

performance du modèle, nous procéderons à sa validation.

❖ *Hydrogramme de validation : 1990*

La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenus par la calibration, pour simuler sur une période différente à celle du calage. Elle permet de juger la reproductivité du modèle et la représentativité des paramètres calés. La Figure 5 présente les résultats de la validation du modèle. L'analyse de cette Figure montre que l'hydrogramme simulé reproduit bien l'hydrogramme observé à l'image des résultats du calage. Malgré quelques crues et les étiages qui ne sont pas bien reproduits, globalement les deux hydrogrammes se rapprochent très bien. La Figure 6 présente les résultats de la validation du modèle HEC-HMS. Les résultats de la validation présentés à la Figure 6 montrent que les hydrogrammes observés et simulés se rapprochent bien. D'après le Tableau 1, le coefficient de Nash, qui est de **82,6%**, est compris entre **75% et 100%**. Par conséquent, la validation des paramètres est de bonne qualité. Les autres coefficients RSR et le PBIAS indiquent également la même interprétation.

Le taux de variation entre les volumes observés et simulés est de **8,58%**, et celui entre les pics des débits observés et simulés est de **13,82%**. Les volumes et la crue maximale sont alors bien simulés compte tenu des faibles valeurs des taux des variations.

L'analyse de la corrélation entre débits observés et simulés sur la sous-période 1988-2016, donne des meilleurs résultats (coefficient de Nash > 80%). On note que la simulation des écoulements au pas de temps dans le bassin versant du Kou au Burkina Faso est meilleure. Le logiciel HEC-HMS étant efficace pour simuler les débits moyens, il est utilisé pour prédire les crues futures dans le bassin versant du Kou. Avant cette prévision, l'étude de l'évolution future de certains paramètres climatiques s'avère nécessaire.

Prévision des crues dans le bassin versant du Kou à l'horizon 2050

Pour les prévisions des crues dans le bassin versant du Kou, il est judicieux de

comparer les données historiques issues des modèles climatiques aux données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM). Cela permet d'utiliser les données qui se rapprochent le plus aux champs de pluies du bassin versant pour faire la prévision. Le Tableau 4 présente les données historiques du RCP 8.5 et 4.5 ainsi que les données de champs de pluie du bassin versant du Kou. De l'analyse du Tableau 4, il ressort que les pluies des modèles climatiques restent sensiblement égales aux pluies de la période d'observations. Parmi les deux scénarii, les données historiques du RCP 4.5 se rapprochent le plus des données de champs de pluie du bassin versant du Kou. Les écarts globaux entre les données observées et les données des modèles climatiques sont respectivement de 0,6 mm pour RCP 4.5 et 9,2 mm pour RCP 8.5. De ce fait, ce sont les données du scénario RCP 4.5 qui seront utilisées pour prédire les crues d'inondation dans le bassin versant du Kou à l'horizon 2050, car elles sont beaucoup plus proches de la réalité. La Figure 7 présente la simulation des débits dans le bassin versant du Kou à l'horizon 2050.

L'analyse de l'hydrogramme généré montre une évolution en dents de scie des crues de 2022 à 2050 avec des pics en 2025, 2032, 2042, 2047 et 2049. Durant la même période, l'année 2047 sera l'année de très haute crue avec un débit de plus de 100m³/s. A contrario, l'année 2036 sera l'année de très basse crue avec un débit de moins de 9m³/s.

Le débit maximal et le volume ruisselé sont donnés par la Figure 8. Ils sont respectivement de 115,1m³/s et 1 522 752,4 m³. L'analyse statistique des données de sorties permet de mieux apprécier l'évolution des débits prédits. La Figure 9 présente les projections des débits maximaux de 2022 à 2050. L'analyse de la Figure 9 montre une tendance globale à la hausse des débits maximaux ruisselés comme l'indique la droite de tendance. Cette généralité cache cependant des spécificités. En effet, de 2022 à 2050, les débits vont évoluer en dents de scie avec des pics en 2025, 2031, 2042, 2044, 2047 et 2049.

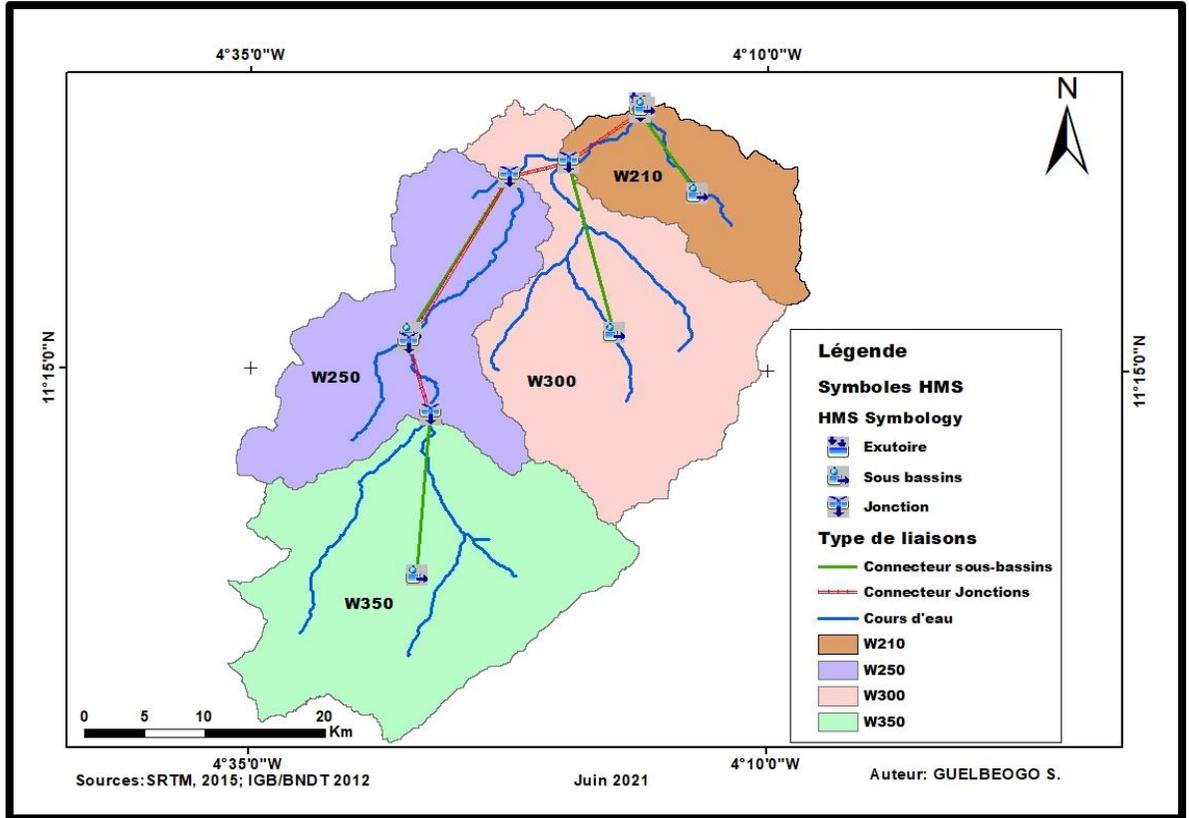


Figure 2: Schématisation du bassin versant du Kou en sous bassin versant avec HEC-GeoHMS.

Tableau 2: Paramètres déterminés par HEC- GeoHMS.

Nom	Surface (km ²)	Périmètre (km ²)	Pente (%)	Curve number (CN)	Tlag (h)	Imperméabilité (%)	Interception Canopée (mm)	Surface dépression (mm)
W210	212,15	90,90	2,29	60,71	12,58	1,78	1,57	49,59
W250	416,56	159,36	9,64	62,43	9,57	2,61	1,59	46,80
W300	532,93	166,72	9,09	67,60	7,93	7,02	1,43	43,24
W350	641,22	165,43	15,82	65,54	5,65	2,15	1,50	46,47

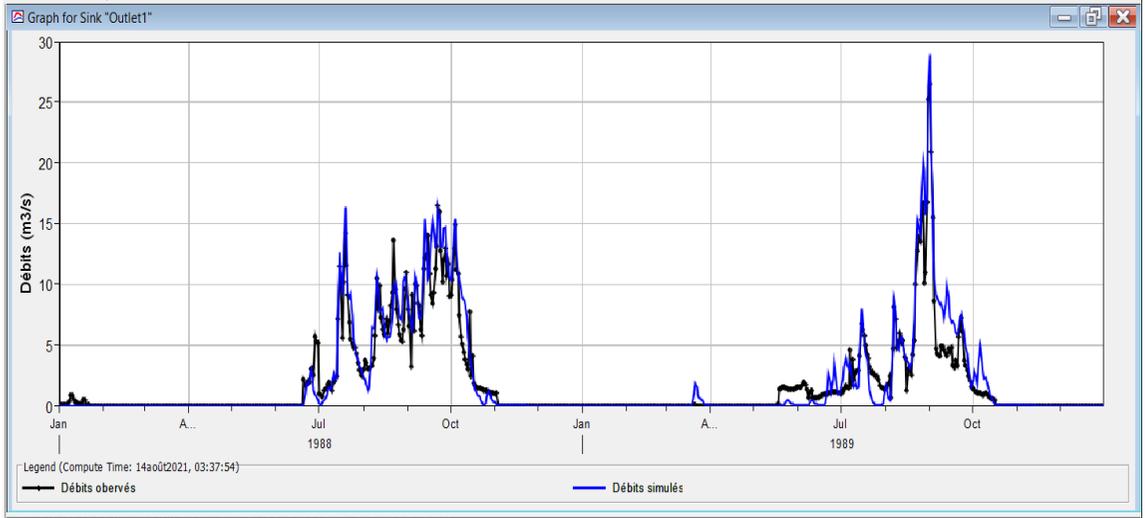
Source : Traitement données issues de la modélisation.

Tableau 3: Evaluation des performances du modèle HEC HMS par tranche de 3 ans.

Tranches	Simulations	Années	Nash (%)	RSR (%)	Pbiais (%)
1	Calibration	1988-1989	0,88	0,3	9,9
	Validation	1990	0,83	0,4	19,33
2	Calibration	1991-1992	0,77	0,5	19,82
	Validation	1993	0,72	0,5	3,93
3	Calibration	1996-1997	0,89	0,3	-5,67
	Validation	1998	0,84	0,4	-9,8
4	Calibration	1999-2000	0,91	0,3	-7,56

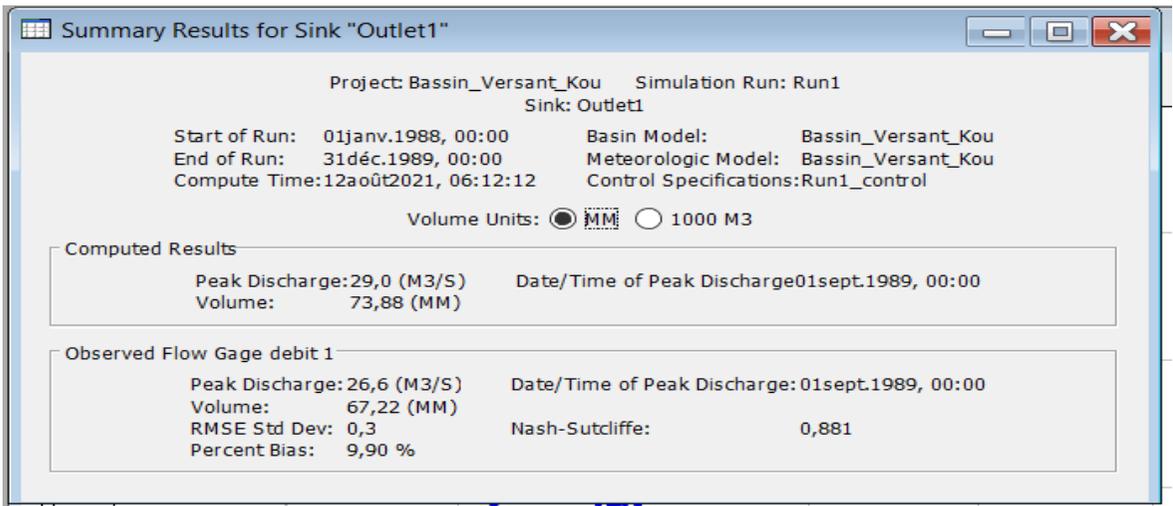
	Validation	2001	0,88	0,3	-14,21
5	Calibration	2006-2007	0,78	0,5	18,07
	Validation	2008	0,80	0,4	2,46
6	Calibration	2011-2012	0,88	0,3	7,76
	Validation	2013	0,82	0,4	-2,72
7	Calibration	2014-2015	0,91	0,3	12,51
	Validation	2016	0,86	0,4	15,22

Source : Traitement données issues de la modélisation.



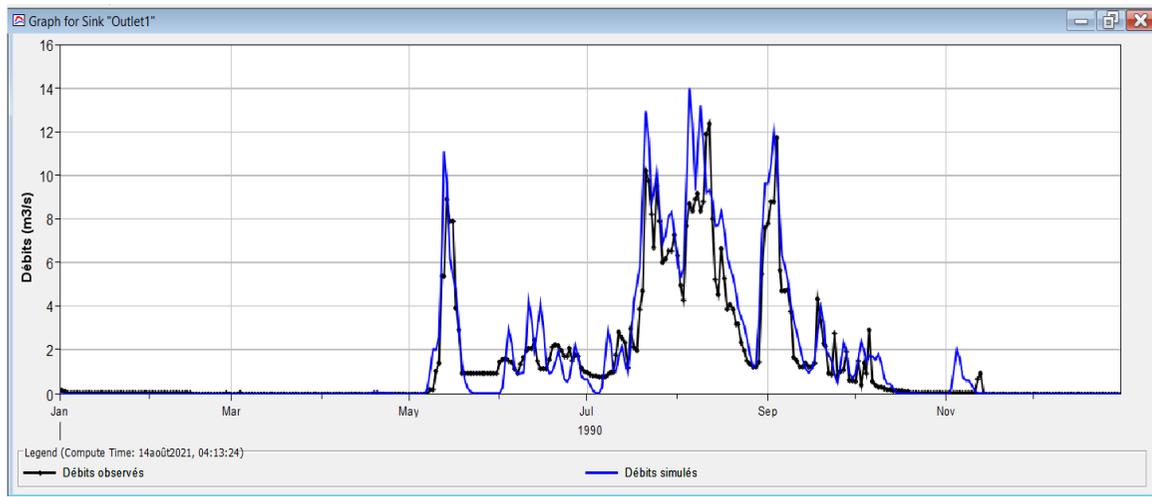
Source : Traitement de données issues de la modélisation.

Figure 3 : Hydrogrammes simulés et observés pour le calage du modèle HEC-HMS.



Source : Traitement de données issues de la modélisation.

Figure 4 : Résultats du calage du modèle HEC-HMS.



Source : Traitement données issues de la modélisation.

Figure 5 : Hydrogramme simulé et observé pour la validation du modèle HEC-HMS.



Source : Traitement données issues de la modélisation

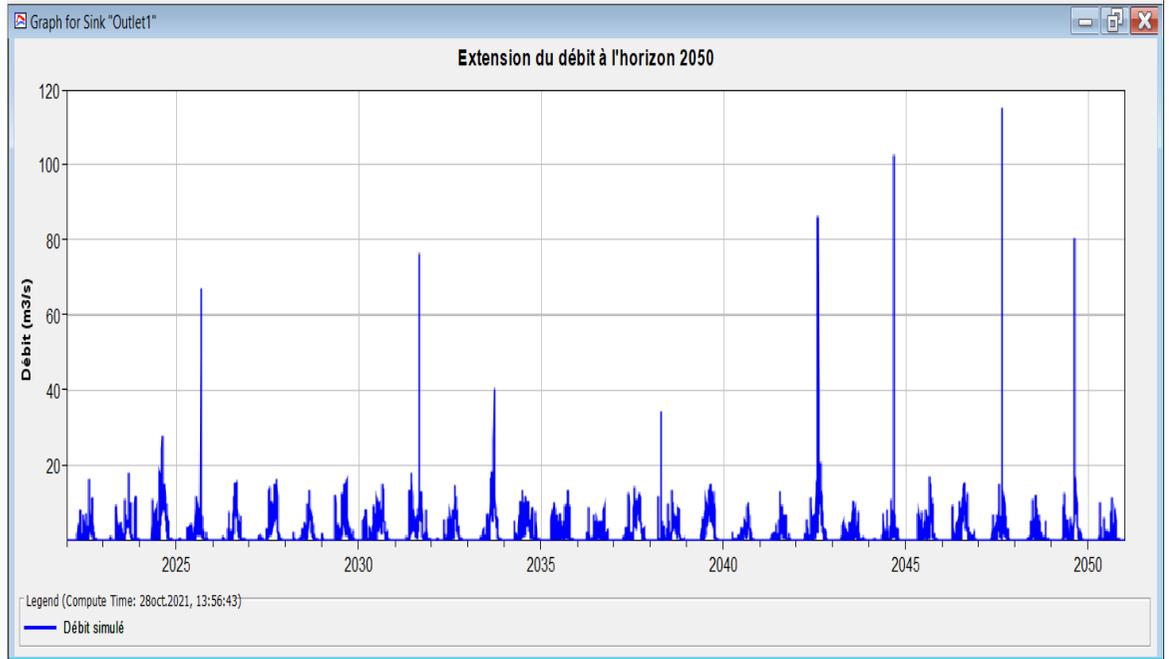
Figure 6 : Résultats de la validation du modèle HEC-HMS.

Tableau 4 : Comparaison entre les données pluviométriques observées et issues des scénarii climatiques de 1988 à 2018.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total
Observation	0,1	6,6	11,5	30,2	87,8	182,3	201,3	233,1	170,1	64	5,6	1,1	993,7
CNRM RCP 4.5	0,1	6,6	12	29,8	87,8	182,3	202	233,1	169,8	64,1	5,6	1,1	994,3

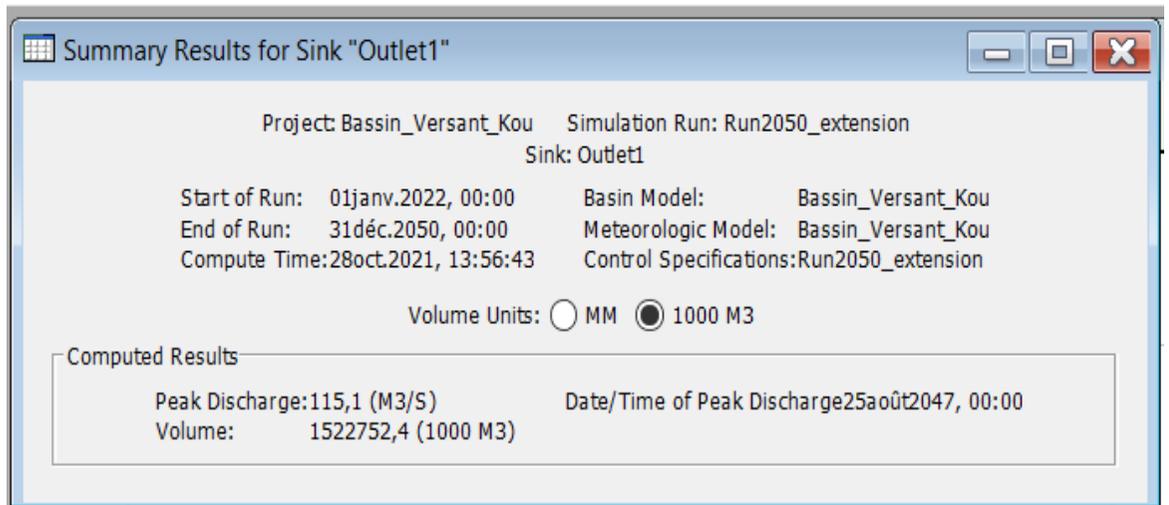
Ecart RCP 4.5	0	0	-0,5	0,4	0	0	-0,7	0	0,3	-0,1	0	0	-0,6
CNRM RCP8.5	0,2	7,6	11,4	34,8	88,4	184,4	202,1	234,4	169,8	63,1	5,7	1	1002,9
Ecart RCP 8.5	-0,1	-1	0,1	-4,6	-0,6	-2,1	-0,8	-1,3	0,3	0,9	-0,1	0,1	-9,2

Source : ANAM, 2018 et CORDEX CNRM, 2018.



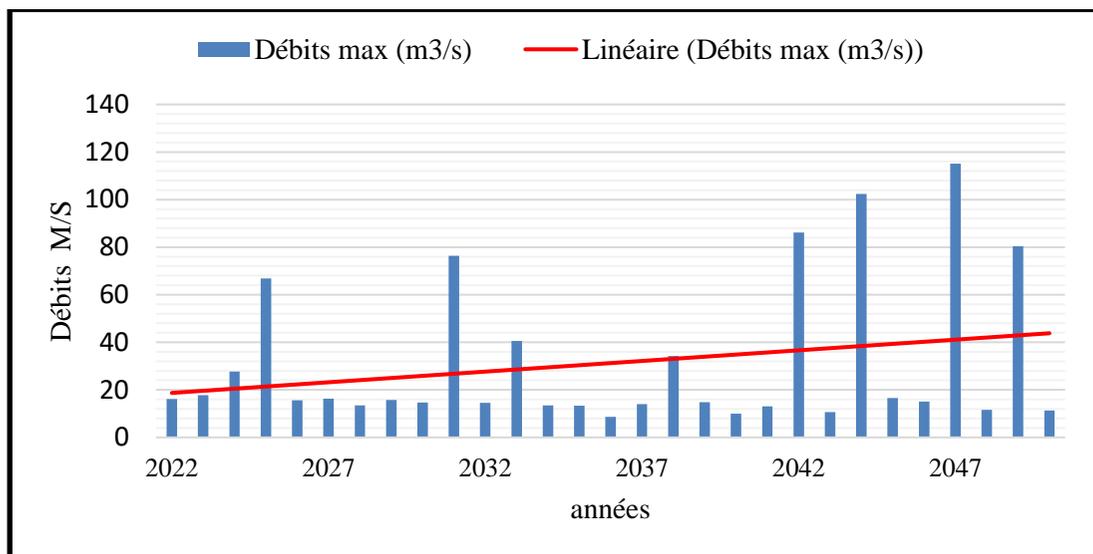
Source : Traitement données issues de la modélisation.

Figure 7 : Hydrogramme de prévision des débits dans le bassin versant du Kou entre 2022 et 2050.



Source : Traitement données issues de la modélisation.

Figure 8 : Débit maximal et volume ruisselé.



Source : Traitement données issues de la modélisation.

Figure 9 : Débits maximaux de 2022 à 2050.

DISCUSSION

L'extension HEC-GeoHMS du logiciel ArcGis a permis de subdiviser le bassin versant du Kou en quatre sous bassins (W210, W250, W300, W350). Les analyses ont montré que le sous bassin W300 a le taux d'imperméabilité le plus élevé. Cela s'explique par le fait que ce sous bassin versant couvre la ville de Bobo-Dioulasso qui concentre un taux d'aménagement important. Les divers aménagements (routes, pavés...) effectués dans la ville contribuent à réduire fortement l'infiltration et accélère le ruissellement susceptible de provoquer des inondations. A contrario, la capacité d'interception de la canopée (couverture végétale) est faible dans ce sous bassin. Dans le sous-bassin W210, les surfaces de dépression sont nombreuses (48,59 mm). Dans leurs travaux de recherche respectifs, Ramde (2019) et Messak (2015) ont obtenu des résultats similaires. Ramde (2019) a utilisé l'extension HEC-GeoHMS pour subdiviser le bassin versant du Mouhoun en deux sous-bassins et a observé que les surfaces de dépression étaient nombreuses, favorisant ainsi l'infiltration des eaux de pluie. Le taux d'infiltration était relativement élevé dans le

sous-bassin abritant la ville de Dédougou. Messak (2015) a également constaté que le sous-bassin II du bassin versant de l'oued Mina était occupé par des aménagements humains qui le rendaient imperméable.

L'analyse du critère de Nash pour le calage et la validation du modèle HEC-HMS donne des valeurs respectivement de 88,1% et 82,6%. D'après le (Tableau 1), ces valeurs font partie de la plage de critère « satisfaisant » à « très bons satisfaisant », caractérisant ainsi la bonne simulation des écoulements du bassin versant du Kou. De ce qui précède, il ressort que le modèle HEC-HMS présente une certaine efficacité à simuler les écoulements du bassin versant du Kou. Cela montre une bonne corrélation entre les débits observés et ceux calculés en périodes de calage et de validation. Ces résultats concordent avec ceux de Henine (2009) ; Ahbari (2013) ; Fleming et Doan (2013) ; Benhamidcha (2019) et Batiéon (2021) ; qui ont trouvé dans leurs études que le modèle HEC-HMS donne des Nash très bons en calage et en validation, montrant ainsi son efficacité à simuler les écoulements dans les différents bassins versants étudiés.

L'analyse des résultats de prévision montre une tendance globale à la hausse des débits maximaux ruisselés entre 2022 et 2050, comme l'indique la droite de tendance (Figure 9). Les années 2044 et 2047 connaîtront de très hauts débits. Ces résultats interpellent les responsables/décideurs du bassin versant du Kou à renforcer la protection des équipements de mesure des débits pour qu'ils ne soient pas entraînés par les crues prévues, et à mettre en œuvre des mesures structurelles qui peuvent encaisser les énormes volumes simulés. Des résultats similaires ont été trouvés dans les bassins versants du barrage de Beni Haroun en Algérie et de L'Oued Iarbaa au Maroc respectivement par (Salhi, 2021) et (Layan et al., 2010). Le premier à travers le modèle HEC-HMS a prédit les crues pour différents événements et des périodes de retour de 100 ans. Les valeurs prévues du débit de pointe sont : $T2= 143\text{m}^3/\text{s}$, $T10= 259,30 \text{ m}^3/\text{s}$, $T50= 524,10\text{m}^3/\text{s}$ $T100= 708,60\text{m}^3/\text{s}$. Le second quant à lui, a déterminé les débits futurs en se basant sur les pluies journalières maximales annuelles pour une longue série d'observations (49 ans). Ousmane et al., (2000) ont aussi trouvé des résultats différents dans les bassins versants du Niger et du Sénégal. Les stations sur le cours d'eau principal du Niger verront leur débit diminué en moyenne de 16% à l'horizon 2024. Dans le cas du fleuve Sénégal, les résultats prévoient une baisse modérée du débit (Bodian, 2011). Dans leurs études, Koumassi et al. (2014) ont constaté que les crues récurrentes dans le bassin de la Sota présentent des variations, allant de $254 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le sous-bassin de Gbassè à $285 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le sous-bassin de Coubéri. De plus, les hauteurs de précipitations les plus fréquentes sont estimées entre 39 et $52 \text{ m}^3/\text{s}$, en fonction des stations étudiées.

Conclusion

La modélisation HEC-HMS a permis de prédire les débits des crues dans le bassin versant du Kou. Cette étude a également

permis de :

- subdiviser le bassin versant en quatre sous-bassins (W210, W250, W300 et W350) et de déterminer les paramètres morphométriques de chaque sous-bassin à l'aide de l'extension HEC-GeoHMS. L'analyse de ces paramètres a révélé que le taux d'imperméabilisation est élevé dans le sous-bassin W300, ce qui peut entraîner des problèmes tels que des inondations, de l'érosion et la dégradation de la qualité de l'eau ;
- calibrer et valider le modèle HEC-HMS sur des périodes de trois ans entre 1988 et 2018 en raison des lacunes dans les données hydrométriques. Les critères d'optimisation (Nash, RSR et Pbias) ont été évalués pour chaque période de calibration et de validation, qui étaient de deux ans pour la calibration et d'un an pour la validation. Les résultats montrent que le modèle a des performances satisfaisantes pour simuler le régime hydrologique du bassin versant du Kou.
- générer des hydrogrammes de crue du bassin versant du Kou pour la période de 2022-2050. L'analyse de l'hydrogramme généré montre une évolution en dents de scie des crues de 2022 à 2050 avec des pics en 2025, 2032, 2042, 2047 et 2049. L'année 2047 sera l'année de très haute crue avec un débit de plus de $100\text{m}^3/\text{s}$, tandis que l'année 2036 sera l'année de très basse crue avec un débit de moins de $9\text{m}^3/\text{s}$.

Après avoir pleinement validé le modèle HEC-HMS pour le bassin versant du Kou, il est désormais possible d'utiliser ce modèle pour la prévention des inondations, en utilisant la modélisation en temps réel qui repose sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire à chaque pas de temps où la donnée de pluie est mesurée. Les résultats obtenus permettent de fournir l'hydrogramme d'une crue au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. Ces résultats nécessitent des décisions à l'échelle du bassin versant du

Kou afin de limiter les effets des futures inondations. Ils offrent également une opportunité stratégique pour la prévention du risque d'inondation dans le bassin versant du Kou, tout en appelant les autorités et les acteurs du domaine de la gestion des inondations à prendre des mesures nécessaires.

CONFLIT D'INTERETS

Il n'existe pas de conflit d'intérêts entre les différents auteurs de cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

GS a élaboré cet article. Il a participé à la lecture et à sa mise en forme. La participation à l'article peut être évaluée à hauteur de 50%. OL a participé au suivi technique de la méthodologie consignée par le reviewer et aux corrections de fond et de forme de l'article. La participation peut être évaluée à hauteur de 25%. IS a participé à la lecture et aux corrections de fond et de forme de l'article. La participation peut être évaluée à hauteur de 25%.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude envers le Directeur Général de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) ainsi que celui des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso pour avoir mis gracieusement à leur disposition les données climatiques et hydrométriques.

REFERENCES

Ahbari A. 2013. Le Bassin versant de Rhéraya: Modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique, mémoire de master en eau et environnement, faculté des sciences et techniques Guéliz-Marrakech, département des sciences de la terre, p.101.

ANAM. 2018. Bulletin Agro météorologique Décadaire, Agence Nationale de la Météorologie, p.11.

Barry J. 2008. La prévention des catastrophes: le rôle de l'UNESCO. Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, p.12.

Batienon SI. 2021. Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du MASSILI à GONSE au Burkina Faso à travers une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J), mémoire de master 2, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, p.77.

Benhamidcha E. 2019. Modélisation hydrologique du bassin versant de l'oued Saf Saf par HEC-HMS, Memoire de Master en science et technologie, Université Badji Mokhtar-Annaba, Faculté des sciences de l'ingénieur, département d'hydraulique, p.85.

Bodian A. 2011. Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau. Application au haut bassin du fleuve Sénégal, Thèse de doctorat, UCAD. DOI : 10.4000/physio-geo, p.2561

Bronfort S. 2017. Les stratégies d'adaptation face au risque d'inondation dans les zones d'habitat spontanés de Ouagadougou, Burkina Faso, Mémoire de master en sciences de gestion de l'environnement, Université de Liège, p.152.

CONASUR. 2019. Plan multirisque de contingence de la région des Haut-Bassins, p.51.

Fleming M, Doan J. 2013. GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual. California: US Army Corps of Engineers), p.14.

GIEC. 2007. 5ème Rapport du GIEC sur les Changements Climatiques et leurs évolutions futures, p.51.

Koumassi DH, Tchibozo AE, VISSIN E, Houssou C. 2014. Analyse fréquentielle des évènements hydro-

- pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. *Afrique SCIENCE*, **10**(2): 137 – 148. DOI : <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/109659>. p.12
- Leumbe LO, Bitom D, Mamdem L, Denis TIKI D, Ibrahim A. 2015. Cartographie des zones à risques d'inondation en zone soudano-sahélienne : cas de Maga et ses environs dans la région de l'extrême-nord Cameroun. *Afrique SCIENCE*, **11**(3) : 45 – 61. DOI : <https://www.ajol.info/index.php/afsci/issue/current>. P.17
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1985. Évapotranspiration des cultures de référence à partir de la température. *Ingénierie appliquée à l'agriculture*, **1** : 96-99. DOI : <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>, consulté le 25/06/2021
- HEC. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. 2000. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 609 Second Street, Davis, CA 95616-4687 USA, p.148 .
- Henine H. 2009. Interfaçage entre modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG, Mémoire de magister en hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique d'Algérie, 114p.
- Ibrahim B. 2012. Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Hydrologie, Thèse de Doctorat, UPMC, Paris VI, France. DOI: <https://tel.archives-ouvertes.fr/>, p.246.
- Karambiri BLCN. 2017. Variabilité climatique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin-versant du Sourou au Burkina Faso, Thèse de doctorat unique de géographie, Université Professeur Joseph Ki ZERBO, p.237.
- Layan B, Dridri A, Benaabidate L, Zemzami M. 2010. Détermination des crues de projet par les aspects du débit de pointe et de L'HYDROGRAMME de crue au niveau de la Commune Ain Boukellal, bassin versant de l'Oued Larbaa, Maroc. P.12
- Messak A. 2015. Modélisation pluie-débit des bassins versants de l'oued Mina : application du modèle hydrologique HEC-HMS, mémoire de master en hydraulique, option ressource en eau, Université des Sciences et de la Technologies d'Oran Mohamed BOUDIAF de l'Algérie, p.132
- Millogo A. 2013. Analyse des disparités spatiales de la transmission du paludisme dans la vallée du Kou et sa gestion par un SIG, mémoire de master professionnel en SIG, université de Ouagadougou, p.113.
- Mohamed M, Abdelkader SBA. 2014. Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie), Revue « Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement, n° 10/Janvier 2014, DOI : <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/47/6/1/43152>. P.11
- OCHA, 2009. OCHA. novembre.2009, rapport de situation n° 11, Burkina Faso • Inondations 2009, p.26.
- ONU-Habitat. 2007. Plan stratégique et institutionnel à moyen terme d'ONU-Habitat pour la période 2008-2013, p.36.
- Ouédraogo M. 2013. La gestion des inondation en Afrique sahélienne, mémoire de master recherche en géographie, option gestion des ressources naturelles (GRN),

- département de Géographie Université de Ouagadougou, p.106.
- Ousmane SS, IBRAH S, Gnoumou Y. 2000. Impacts hydrologiques des changements climatiques sur les bassins versants du Niger et du Sénégal, p.25.
- Ramde WN. 2019. Modélisation pluie-débit du bassin versant du Mouhoun à Banzon au Burkina Faso : application du modèle hydrologique HEC-HMS, mémoire de Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2IE, p.80
- Salhi A. 2021. Modélisation Pluie – Débit par l'application du modèle hydrologique HEC HMS dans le bassin versant du barrage de Beni Haroun, memoire de master en hydraulique, Université mohamed bouafia - M'Sila, faculté de Technologie, p.69.
- Soma A, Wetta C, Sampana L. 2018. Gestion des inondations dans les villes de Ouagadougou et de Bobo-Dioulasso dans un contexte urbain – entre jeux d'acteurs et logiques territoriales, p.39.
- Soma A. 2015. Vulnérabilité et résilience urbaines : perception et gestion territoriale des risques d'inondation dans la ville de Ouagadougou, Thèse de doctorat unique, université de Ouagadougou, p.433.
- Tanguy M. 2012. Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise analyse préliminaire, Thèse de doctorat en science de l'eau, Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement 490, rue de la Couronne Québec, p.103.