



**MODÉLISATION PLUIE-DEBIT DU BASSIN VERSANT DU MOUHOUM À
BANZON AU BURKINA FASO : APPLICATION DU
MODÈLE HYDROLOGIQUE HEC-HMS**

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
**SPECIALITE : INFRASTRUCTURE ET RESEAUX HYDRAULIQUES/RÉSEAUX
HYDRAULIQUES.**

Présenté et soutenu publiquement le 24/01/2020 par

RAMDE Wend Noaga

N°20160474

Sous la direction :

Encadrant 2iE : Dr Dial NIANG Maître Assistant

Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA)

Maître de stage : M. Soumahila SANKANDE ; Ingénieur Génie Rural

Structure (s) d'accueil du stage : Direction des Études et de l'Information sur l'Eau

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Lawani Adjadji MOUNIROUR

Membres et correcteurs :

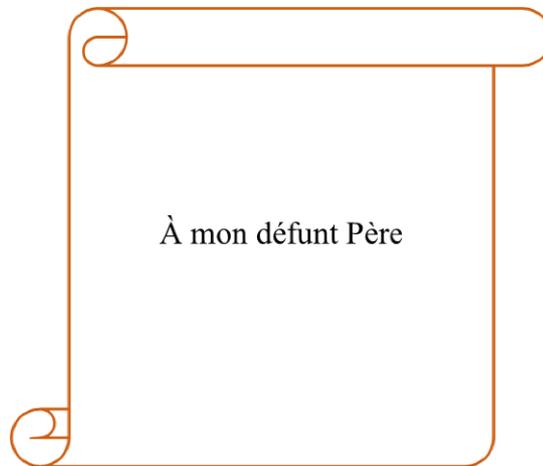
Dr Chaim Vivien DOTO

Mr Bassirou BOUBE

Mr Moussa Diagne FAYE

Promotion [2018-2019]

Dédicaces



Citation

« Aucune science de la terre n'est mieux que l'hydrologie orientée par les objectifs d'un monde meilleur » OMM.1977

Remerciements

L'être humain ne saurait réussir dans sa vie sans l'aide de son créateur pour ses multiples bénédictions. En effet, la rédaction de ce document, est l'œuvre de plusieurs personnes qui, en dépit de leur programme très chargé ont montré leur disponibilité pour différentes corrections et divers conseils. Nous tenons à exprimer toute notre gratitude envers ces personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'établissement de ce document.

Ainsi, nous adressons nos remerciements sincères :

- Au corps professoral et administratif de l'institut 2iE, pour les efforts fournis afin de nous donner un encadrement de qualité ;
- A mon directeur de mémoire Docteur Dial NIANG pour sa disponibilité, son engagement et ses précieux conseils tout au long de la rédaction de ce présent document ;
- A notre maître de stage SANKANDE Soumahila qui en plus de sa disponibilité nous a inculqué avec efficacité le sens du travail bien fait. Ses conseils ont été très enrichissants pour le présent document ;
- Au Professeur Harouna KARAMBIRI pour les conseils donnés dès le début de ce présent document sur les différents objectifs ;
- Au Docteur Boureima KOUANDA et à M. Roland YONABA pour leur disponibilité, leur accompagnement et conseils tout au long de notre stage ;
- Au Directeur des Etudes et de l'Information sur l'Eau (DEIE) pour avoir donné une suite favorable à notre demande de stage et à l'ensemble de son staff pour l'accueil chaleureux au sein de la direction ;
- A notre famille et à nos ami (e)s pour la compréhension, l'accompagnement et les conseils tant sur le plan académique que professionnel ;

Toute personne ayant contribué de près ou de loin à la rédaction de ce présent mémoire, nous vous adressons nos sincères remerciements. Que le Dieu créateur des cieux et de la terre vous rende au centuple vos bienfaits.

Résumé

Depuis quelques années, les principales stations hydrométriques du Mouhoun au Burkina Faso connaissent d'importantes fluctuations des écoulements sur plusieurs reliées à la combinaison de la modification des états de surface et de l'action de l'Homme. En vue d'une meilleure prise en compte de ses deux facteurs sur l'hydraulicité du fleuve Mouhoun, une modélisation a été initiée sur le bassin versant de Banzon, une des principales stations hydrométriques du fleuve Mouhoun. Le modèle HEC-HMS a été utilisé pour simuler les différentes composantes du bilan hydrologique de ce bassin versant dont la zone d'étude a une superficie de 2788 km² avec une plaine aménagée de plus de 300 ha. Cette modélisation à travers HEC-HMS permet de déterminer les différentes composantes du bilan hydrique. La démarche méthodologique repose sur une simulation des écoulements en faisant une calibration et une validation du modèle en fonction des années selon le pas de temps journalier. Les résultats montrent des coefficients témoignant d'une bonne performance du modèle. Pour le calibrage on a les valeurs suivantes : $0.55 < \text{NASH} < 0.7$; $0.75 < R^2 < 0.95$; le PBIAIS= ± 10 , RMSE tourne autour de 8. L'erreur sur le débit de pointe est environ 0.4, l'erreur sur la lame d'eau écoulée environ 0.1 et le KGE varie entre 0.56 à 0.8. Pour la validation $0.70 < \text{NASH} < 0.9$; $85 < R^2 < 0.95$; le PBIAIS= ± 2 , RMSE ± 7 l'erreur sur le débit de point est environ ± 0.4 l'erreur sur la lame d'eau écoulée environ ± 0.001 et le KGE varie entre 0.7 à 0.90. Quant à l'étude du bilan hydrique, nous remarquons que l'évapotranspiration réelle représente plus de 68%/an soit une valeur journalière de 2 mm contre 5mm/j pour la moyenne nationale. Quant aux autres composantes, nous avons une recharge de l'ordre de 25% et un ruissellement d'environ 7%.

Mots Clés

1 – HEC-HMS

2 - Banzon

3 - Recharge

4 - Ruissellement

5 - Évapotranspiration

Abstract

For the past few years, the main hydrometric stations in Mouhoun in Burkina Faso have experienced significant fluctuations in flows over several related to the combination of surface texture modification and human action. In order to take better account of its two factors on the hydraulicity of the Mouhoun river, modeling has been initiated on the Banzon watershed, one of the main hydrometric stations of the Mouhoun river. The HEC-HMS model was used to simulate the various components of the hydrological balance of this watershed whose study area has an area of 2,788 km² with a developed plain of more than 300 ha. This modeling through HEC-HMS makes it possible to determine the different components of the water balance.

The methodological approach is based on a simulation of flows by calibrating and validating the model according to the years according to the daily time step. The results show coefficients reflecting a good performance of the model. The following values are available for calibration: $0.55 < \text{NASH} < 0.7$; $0.75 < R^2 < 0.95$; the PBI AIS = ± 10 , RMSE is around 8. The error on the peak flow is around 0.4, the error on the flow of water flows around 0.1 and the KGE varies between 0.56 to 0.8. For validation $0.70 < \text{NASH} < 0.9$; $85 < R^2 < 0.95$; the PBI AIS = ± 2 , RMSE revolves around 7 the error on the point flow is approximately ± 0.4 the error on the flow of water passed approximately ± 0.001 and the KGE varies between 0.7 to 0.90. As for the study of the water balance, we note that the actual evapotranspiration represents more than 68% / year or a daily value 2.mm against 5mm / d for the national average. As for the other components, we have a recharge of around 25% and a runoff of around 7%.

Keywords

1 - HEC-HMS

2 -Banzon

3 - Refill

4 - Runoff

5 - Évapotranspiration

Listes des abréviations

HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

SPI : Indice Standardisé de Précipitation

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

Ha : Hectare

BNDT : Base National des Données Topographies

BDOT : Base de Données d'Occupation des Terres

IGB : Institut Géographique de Burkina Faso

MNT : Modèle Numérique de terrain

USGS : United States Geological Survey

DSS : Système Spécifique de Stockage de Données

SCS : Soil Conservation Service

SMA : Sol-Moisture Accounting

CN : Curve Number

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation

ETP : Evapo transpiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

Sommaire

<i>Dédicaces</i>	<i>i</i>
<i>Citation</i>	<i>ii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Listes des abréviations</i>	<i>vi</i>
<i>Sommaire</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>x</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xi</i>
I. INTRODUCTION GENERALE	1
1.1 Objectif général	2
1.2 Objectifs spécifiques	2
1.3 Hypothèses	2
II. Études bibliographiques de la modélisation	3
2.1 Définition	3
2.2 Classification des modèles hydrologiques	3
2.2.1 Les modèles physiques	3
2.2.2 Les modèles mathématiques.....	3
2.2.3 Les modèles empiriques	4
2.2.4 Les modèles statistiques	4
2.2.5 Les modèles conceptuels	4
2.2.6 Les modèles mécanistes (ou à base physique)	5
2.3 Processus de modélisation.....	5
2.3.1 Modélisation hydrologique	5
2.3.1.1 L'évapotranspiration	6
2.3.1.2 L'interception et le stockage dans les dépressions.....	6
2.3.1.3 L'infiltration	6
2.3.2 Les écoulements	7

2.3.2.1	Précipitation directe.....	7
2.3.2.2	Écoulements de surface ou ruissellement.....	7
2.3.2.3	Écoulements de subsurface (ou hypodermique).....	7
2.3.2.4	Écoulements souterrains.....	8
2.3.3	Modélisation hydraulique - propagation des écoulements.....	8
2.3.4	Modélisation polluative.....	8
2.3.5	Modèle d'accumulation.....	9
2.3.6	Modèle de lessivage	9
2.3.7	Spécificités de l'hydrologie urbaine	9
2.3.8	Synthèse des études hydrologique et hydrogéologiques menées dans la zone	10
2.4	Choix du modèle	13
2.5	Mise en œuvre d'un modèle	14
2.6	Recherche et préparation des données	14
2.7	L'estimation des paramètres (calibration).....	14
2.8	Validation du modèle	15
2.9	Exploitation et interprétation.....	15
III. Présentation du modèle semi-distribué (HEC-HMS)		15
3.1	Schématisation du bassin par HEC-GEOHMS	15
3.2	Simulation avec HEC-HMS.....	16
3.2.1	Pour le module de transfert	17
3.2.2	Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting).....	17
3.2.3	Le module de production.....	18
3.2.4	Le module météorologique.....	18
3.2.5	Module de base.....	19
3.2.6	Muskingun.....	20
IV. Matériel et méthodes		20
4.1	Localisation de la zone d'étude.....	20
4.1.1	Géologie, sol et végétation	21
4.1.2	Activités socio-économiques.....	25
4.1.3	Plaine aménagée de Banzon.....	25
4.1.4	Hydrographie du bassin versant de Banzon	26
4.2	Matériel	26

4.2.1	Données topographiques	26
4.2.2	Données hydrométriques.....	27
4.2.3	Pédologie et type de sols	27
4.2.4	Occupations des sols	28
4.2.5	Analyse critique des données	29
4.3	Méthodes	29
4.3.1	Caractéristiques du bassin versant de Banzon.....	29
4.3.2	Modélisation par HEC-HMS.....	30
4.3.2.1	Données d'entrées	30
4.3.2.2	Étude des performances des modèles.....	30
□	Les incertitudes liées aux différents modèles.....	31
V.	Résultats et discussion.....	38
5.1	Résultats	38
5.1.1	Caractéristiques hydrologiques du bassin versant de Banzon.....	38
5.1.2	Eude des données climatiques.....	39
5.1.2.1	Pluviométrie	39
5.1.2.2	Température	41
5.1.3	Étude des débits de 1960 à 2016	41
5.1.4	Périodes de calage	42
5.1.4.1	Calibration-validation sur les années alternance	45
5.1.4.2	Calibrage sur une période sèche et validation sur une période d'alternance 46	
5.1.4.3	Calage validation sur une période sèche	47
5.1.4.4	Calage validation sur 28 ans.....	50
5.1.5	Estimation du bilan hydrique	51
5.2	Discussion	53
VI.	Conclusion.....	53
VII.	Références bibliographiques	55
<i>Annexes</i>	<i>57</i>
<i>Annexes</i>	<i>xii</i>

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition du bassin de la Volta entre les six pays riverains (source The Volta River Barry (2005)	20
Tableau 2: Données d'entrées du modèle	30
Tableau 3: valeur des paramètres du modèle HEC-HMS	33
Tableau 4: Caractéristiques hydrologiques du bassin versant de Banzon	38
Tableau 5: Ruptures de la série avec la méthode de PETTIT et de Hubert	39
Tableau 6: Résultats de la calibration-validation.....	42
Tableau 8: Résumé du bilan hydrique	Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

Figure 1: Relation entre le SIG, HEC-GeoHMS et HEC-HMS.....	16
Figure 2: Bassin versant de Banzon (pente).....	21
Figure 3: Géologie du bassin versant de Banzon	22
Figure 4: Différents types de sols du bassin versant de Banzon	24
Figure 5: Végétation du bassin versant de Banzon	25
Figure 6: Topographie du bassin versant de Banzon	27
Figure 7: Classe des sols de la FAO.....	28
Figure 8: Carte d'occupation des sols.....	28
Figure 9: Réseau hydrographique du bassin versant de Banzon	38
Figure 10: Évolution de la pluviométrie de la station de Bobo de 1900 à 2010	39
Figure 11: SPI	40
Figure 12: Moyenne mensuelle de pluie, d'évapotranspiration potentielle (formule de Penman) et de la temperature de 1961 à 2014 pour la station de bobo (Justine, 2016).....	41
Figure 13: Indice des débits moyens annuels.....	42
Figure 14: Phase de calage 1995-1999.....	45
Figure 15: Phase de validation 2000-2001	46
Figure 16: Phase de calage 1985-1991	46
Figure 17: Phase de validation 1998-2002.....	47
Figure 18: Phase de calage 1987-1989.....	48
Figure 19: Phase de validation 1990	49
Figure 20: Phase de calage 1981-1982.....	49
Figure 21: Phase de validation 1985-1986.....	50
Figure 22: Phase de calage 1981-2009.....	50
Figure 23: Phase de validation 1985-1991	51
Figure 24: Phase de validation 1994-2005	51

I. INTRODUCTION GENERALE

La terre est couverte d'eau sur ses trois quarts dont 97% sont représentés par d'eaux salées impropres à la consommation. Quant aux eaux douces, elles ne représentent qu'environ 3% et les 9/10 de cette eau sont difficilement accessibles à l'Homme (Chuzeville, 1994). Ces statistiques montrent que la gestion des ressources en eau est un besoin crucial à tous les niveaux tant sur le plan local, régional, national, et international. En effet, cette ressource en eau est indispensable pour la vie.

En Afrique de l'Ouest, la variabilité climatique enregistrée depuis les années 1970 constitue une préoccupation majeure en ce sens que les ressources en eau deviennent une denrée rare et précieuse (Karambiri, 2009).

Quant au Burkina Faso, cette irrégularité pluviométrique se traduit par une alternance de plusieurs cycles de sécheresses et d'inondations comme en témoigne la plus importante inondation du pays intervenue le 1^{er} septembre de 2009. Cette situation est accentuée par une augmentation de plus en plus importante de zones imperméables favorisant ainsi plus le ruissellement aux dépens de l'infiltration.

Face à pareille situation, l'estimation des ressources en eau renouvelables devient une priorité. Les résultats de cette étude révèlent une disponibilité de l'ordre de 850 m³/an/habitant, plaçant ainsi ce pays en dessous du seuil de pénurie habituellement fixé à 1000 m³/an/habitant. La part fournie par les eaux souterraines destinées essentiellement à la satisfaction des besoins en eau et à la consommation humaine est de l'ordre de 85% et les 15% restants sont assurées par les eaux de surface (Dérrouane et Dakouré, 2006).

La pérennisation de la ressource en eau passe impérativement par un meilleur suivi des eaux de surface qui sont les plus exploitées. Le principal constat montre que les chroniques des débits sont souvent lacunaires, discontinues et par conséquent sont difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable sur les différents bassins versants du pays.

Sur les 40 dernières années, les précipitations (207 milliards de m³) génèrent un écoulement de 8,79 milliards de m³ soit 4.2% et une infiltration de 32 milliards de m³. La part réellement utilisable de cet écoulement, les pertes par évaporation de l'eau stockée dans les retenues, est d'environ 4,75 milliards de m³ en moyenne. En année très sèche, ce volume est de l'ordre de 2,32 milliards de m³.

Face à pareille situation, la question qui se pose est comment mobiliser et mieux gérer le potentiel hydrique du pays pour une meilleure satisfaction des besoins en eau des populations

sans porter un préjudice irréversible au système global d'écoulement de maintien de la biodiversité des cours d'eau (DGRE, 2009) ? Pour répondre à cette question, une étude sur le potentiel hydrique des différents bassins du pays s'impose, et c'est dans ce contexte que cette recherche sur la modélisation pluie-débit du bassin versant du Mouhom à Banzon à l'aide du modèle HEC-HMS a été initiée. Il s'agit d'une démarche reposant sur la transformation de la pluie pour générer les écoulements à l'exutoire du bassin versant. Pour mener à bien cette recherche, un certain nombre d'objectifs a été défini.

1.1 Objectif général

L'objectif global de cette étude est de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau du bassin versant du Mouhoum à travers une modélisation Pluie-Débit.

1.2 Objectifs spécifiques

Il s'agira plus spécifiquement :

- de simuler les écoulements du bassin versant de Banzon par le modèle HEC-HMS
- d'étudier ou d'évaluer les composantes du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant.

1.3 Hypothèses

Pour mener cette étude un certain nombre d'hypothèses ont été émis :

- L'uniformité de la pluie sur toute la superficie du bassin versant
- Le modèle est performant

II. Études bibliographiques de la modélisation

2.1 Définition

Un modèle hydrologique est une représentation simplifiée, relativement abstraite d'un processus ou d'un système en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir. La modélisation hydrologique doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier l'apparition des étiages et formation des crues (Ambroise, 2014). Un modèle hydrologique permet de décrire les étapes de la transformation pluie-débit particulièrement les processus de formation des crues, des étiages ; il fournit également des informations permettant le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques.

2.2 Classification des modèles hydrologiques

« Il existe autant de modèles que d'hydrologues » (Ambroise, 1998b). En faire la sélection est une tâche peu aisée, au vu du nombre de modèles disponibles dans la littérature. Néanmoins, il est possible de les classer par types d'approche. Ces approches ne sont pas exclusives les unes des autres et peuvent même être complémentaires.

2.2.1 Les modèles physiques

Les modèles physiques représentent une maquette reproduite à une échelle spécifique. La principale difficulté revient à transposer le résultat dans la réalité par rapport au facteur d'échelle. Il est souvent impossible d'éviter des distorsions dans les phénomènes. Il devient donc nécessaire de négliger certains aspects. Par exemple, les forces de viscosité sont négligées si les forces de gravité dominent. On parle alors de similitude de Froude. Si au contraire, les forces de gravité peuvent être négligées au profit des forces de viscosité, on parle de similitude de Reynolds.

2.2.2 Les modèles mathématiques

Le modèle mathématique représente sous forme d'équations les phénomènes physiques de la réalité. Il se compose d'une ou plusieurs équations dont l'origine, le degré de complexité et le réalisme multiplient les possibilités de construction. Ainsi, il est possible de distinguer :

2.2.3 Les modèles empiriques

Ils sont représentés par des formules et équation simples et empiriques. Par exemple, la formule rationnelle qui permet de déterminer le débit de pointe en fonction d'information minimale du bassin versant, à savoir le coefficient de ruissellement. Les inconvénients de ces modèles sont divers. Parfois, les coefficients locaux interviennent et ne sont pas transposables directement. Il n'y a pas de moyens de contrôle de l'ordre de grandeur et il n'est pas possible de rattacher d'autres processus (par exemple un bilan pollutif ou le transport solide aux crues calculées).

2.2.4 Les modèles statistiques

Ils utilisent des fonctions de distribution (loi Normale, de Gumbel) afin d'évaluer ou de prédire un comportement observé. Ces méthodes analysent les variables en tant qu'échantillon d'une population statistique dans le but d'une régionalisation ou en vue de la prédiction de certaines grandeurs. En hydrologie, la variable la plus utilisée est le débit à l'exutoire d'un bassin versant, et notamment le débit maximum et minimum journalier, mensuel ou annuel.

L'expérience indique que les valeurs moyennes d'un comportement sont représentées correctement par la loi Normale, et que les valeurs maximums et minimums sont mieux approchées par une loi de type « extrême » telle que la loi de Gumbel. Les principales faiblesses de ces modèles sont :

- Estimation d'une valeur caractéristique seulement ;
- Non prise en compte de nombreux paramètres ;
- Impossibilité de rattacher d'autres processus ;
- Résultats dépendent des données ;
- Difficulté de calculer les erreurs de simulation ;

2.2.5 Les modèles conceptuels

Ces modèles tentent de reproduire la réponse d'un bassin versant en remplaçant la réalité de l'écoulement par une idéalisation fort simplifiée de la géométrie du bassin versant et de l'écoulement par rapport à la situation réelle. En hydrologie, les deux concepts de modélisation principalement utilisés sont :

- la représentation de la géométrie des surfaces d'écoulement par des plans rectangulaires de pentes constantes
- la représentation de l'écoulement par des réservoirs fictifs.

2.2.6 Les modèles mécanistes (ou à base physique)

Ils résolvent des systèmes d'équations de quantité de mouvement et de continuité liés au transport d'eau, de substance ou d'énergie. Ils décrivent mathématiquement les phénomènes rencontrés. A titre d'exemple, l'équation de Barré St-Venant pour les écoulements en surface libre ou de Darcy-Richards pour les écoulements souterrains. De tels modèles nécessitent une description détaillée du bassin versant, des schémas numériques robustes et la détermination de paramètres physiques (paramètre de friction, conductivité hydraulique, etc.), ces derniers pouvant être mesurés in situ. Cependant, l'utilisation rigoureuse des paramètres réels ne permet pas d'éviter des distorsions des modèles. En effet, des simplifications inévitables impliquent que certains processus ne sont pas simulés correctement. Ainsi, les paramètres réels du modèle doivent intégrer une erreur, une information sur les paramètres non pris en compte, si le modèle est calé. Il en découle qu'un modèle à base physique donne des réponses très proches des observations avec des paramètres physiques différents de ceux mesurés.

Les inconvénients de ces modèles sont la mise en œuvre fastidieuse, la détermination des paramètres et leur coût.

2.3 Processus de modélisation

La modélisation hydrologique étudie principalement la réaction d'un ou un ensemble de bassins versants et d'un réseau à un événement pluviométrique. Ses buts sont divers et permettent soit d'évaluer l'état d'un système ou de procéder à des calculs de dimensionnement, soit d'étudier les perspectives de développement ou de correction du système. Pour ce faire, il faut plus que la seule connaissance du débit de pointe obtenu par la méthode rationnelle pour déterminer les volumes d'eau de ruissellement. Il est utile de connaître les hydrogrammes de ruissellement aux différents points névralgiques des réseaux et bassins de drainage.

Les processus pris en compte varient suivant les modèles. Mais pour être les plus représentatifs de la réalité, les phénomènes suivants doivent être intégrés. Ils peuvent être séparés dans trois catégories différentes : la modélisation hydrologique, la modélisation hydraulique, la modélisation polluative.

2.3.1 Modélisation hydrologique

Elle est relative aux processus que l'on retrouve dans le cycle de l'eau. Parmi ces mécanismes, nous citerons :

2.3.1.1 L'évapotranspiration

Ce terme englobe l'évaporation et la transpiration des végétaux. Il s'agit de la transformation de la phase vapeur à la phase physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de ce phénomène. Ils dépendent essentiellement de deux facteurs, la quantité de chaleur à disposition et la capacité de l'air à stocker pour la transpiration. Le premier facteur provient de l'énergie fournie par le soleil et varie essentiellement selon le gradient de la latitude et de l'altitude. Le second facteur peut s'exprimer par la notion d'humidité relative qui est le rapport de la quantité d'eau contenue dans une masse d'air et la quantité maximale d'eau que peut contenir cette masse d'air. Alors que la transpiration est surtout conditionnée par les conditions climatiques, les conditions liées aux sols et le type de végétation.

2.3.1.2 L'interception et le stockage dans les dépressions

L'interception se définit comme la fraction d'eau qui est interceptée par le couvert végétal mais aussi les surfaces plus ou moins perméables comme les constructions ou les routes (surfaces à ne pas négliger en hydrologie urbaine). Ce phénomène étant étroitement relié à l'évapotranspiration, ce sont surtout les facteurs météorologiques (notamment la durée et l'intensité de la pluie) et le type de couverture du sol qui vont influencer la quantité d'eau interceptée.

Le stockage dans les dépressions comprend l'eau emmagasinée dans les creux jusqu'à leur déversement.

2.3.1.3 L'infiltration

L'estimation de l'importance des processus d'infiltration va permettre d'estimer quelle fraction va alimenter l'écoulement souterrain et l'écoulement de surface. L'infiltration se définit comme le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol lorsque celui-ci reçoit des précipitations. Tout d'abord, l'eau d'infiltration remplit les interstices en surface du sol puis pénètre dans celui-ci sous l'effet des forces de gravitation et des forces de succion.

Elle est influencée par les facteurs suivant : le type de sol, la compaction de la surface du sol, la couverture du sol, la topographie, la morphologie, le débit d'alimentation et la teneur en eau initiale du sol. Différentes relations mathématiques expriment le flux d'eau que le sol est

capable d'absorber à travers le temps. Cette notion est déterminée par la « capacité d'infiltration » d'un sol. Deux approches permettent de la déterminer. Une approche à base physique qui s'appuie sur la loi de Darcy et que définit le modèle de Green et Ampt. Une approche empirique qui est définie par la formule de Horton.

2.3.2 Les écoulements

De par la diversité de ses formes les hydrologues distinguent plusieurs types d'écoulement. Quatre chemins principaux vont guider la goutte d'eau jusqu'à la rivière ou l'exutoire du bassin versant.

2.3.2.1 Précipitation directe

Fraction de pluie qui tombe directement à la surface libre du cours d'eau pour atteindre l'exutoire du bassin versant. Cette contribution est peu influente dans les phénomènes de crues puisque la surface des cours d'eau est faible en rapport des surfaces des bassins versants.

2.3.2.2 Écoulements de surface ou ruissellement

Fraction de l'eau qui s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols pendant les précipitations. Il existe deux causes à l'origine de ce processus. Le ruissellement se produit lorsque la capacité d'infiltration est dépassée ou lorsqu'elle se produit sur un sol déjà saturé en eau.

2.3.2.3 Écoulements de subsurface (ou hypodermique)

Il comprend la contribution des horizons de surface totalement ou partiellement saturés en eau. Ces écoulements sont plus lents que le ruissellement mais plus rapide que les écoulements souterrains. On peut également les traduire par « écoulement rapide interne ».

Les hydrologues distinguent quatre causes à ces écoulements : l'effet piston, l'écoulement par macropores, intumescence de nappe et l'écoulement de retour. Signalons que pour que ce type d'écoulement apparaisse, il est nécessaire que la conductivité hydraulique latérale soit nettement supérieure à la conductivité verticale.

2.3.2.4 Écoulements souterrains

Il représente la part d'eau infiltrée qui transite lentement vers l'exutoire à travers l'aquifère. Les vitesses d'écoulement varient de quelques millimètres à quelques mètres par jour. Ce type d'écoulement joue un rôle essentiel dans les débits de base des cours d'eau.

2.3.3 Modélisation hydraulique - propagation des écoulements

La propagation des hydrogrammes dans les conduites est d'une importance considérable dans un réseau. La variabilité des types d'écoulements est due à quatre causes principales : le réseau qui est caractérisé par de très nombreux changements de pentes, de type de section et par une grande quantité de tronçons ; de la forme des sections ; des débits qui sont la conséquence des événements pluviométriques ; et enfin du type d'écoulement qui peut être en charge ou à surface libre, et varié très vite de l'un à l'autre. La propagation d'un écoulement dans une conduite est un phénomène physique. Elle peut être décrite par des équations de la mécanique des fluides connues sous le nom des équations de Saint-Venant. Elles constituent en fait un système d'équations fondées sur l'équation de continuité et l'équation de la conservation d'énergie. En formulant certaines hypothèses, il est possible de classer les types de solutions des équations de Saint-Venant en différents types d'ondes. On parle d'onde dynamique pour un écoulement non uniforme et non permanent, et d'onde cinématique pour un écoulement uniforme et permanent. Cette dernière constitue l'expression la plus simple des équations de Saint-Venant.

2.3.4 Modélisation polluative

La modélisation de l'aspect qualitatif des réseaux d'assainissement doit intervenir dans la conception des réseaux et dans la gestion des ouvrages en place. En général, les modèles intégrant la gestion qualitative, sont des modèles classiques auxquels un bloc de calcul de la pollution a été ajouté. Les phénomènes de fluctuation de la qualité des eaux qui sont intégrés dans ces blocs sont :

- L'accumulation de la pollution dans le réseau et sur le sol au cours du temps ;
- Le lessivage de cette pollution par la pluie ;
- Le transport des polluants dans le réseau et cours d'eau.

Les approches permettant la représentation de ces phénomènes peuvent être d'origine statistique, conceptuelle ou déterministe. Cette dernière approche tente d'établir des relations univoques entre les variables d'entrée qui caractérisent les apports de polluants et les variables

de sortie traduisent l'accumulation des polluants dans les réseaux d'assainissement. Elle tend à décrire les équations de la mécanique, de l'hydraulique, de la biologie et de la chimie, soit l'ensemble des phénomènes qui sont liés aux polluants. Ainsi, ces modèles contiennent les fonctions d'accumulation et de mobilisation des polluants et le transport en réseau est représenté par une fonction de transfert des polluants.

2.3.5 Modèle d'accumulation

Il permet de déterminer la masse de polluants présente sur la surface drainée et qui pourra être disponible et entraînée par la lame ruisselante. L'accumulation est généralement modélisée dans les logiciels par une fonction linéaire, exponentielle ou de Michaelis-Menten.

2.3.6 Modèle de lessivage

L'entraînement de la masse accumulée au cours d'un événement varie en fonction des caractéristiques de l'événement pluviométrique, de la topographie du bassin versant (surface, pente, etc...) ainsi que les caractéristiques des sédiments.

2.3.7 Spécificités de l'hydrologie urbaine

L'hydrologie urbaine a pour objet d'étude l'eau et les relations de l'eau avec les différentes activités humaines en zone urbaine. Elle traite tout particulièrement des relations entre la gestion des eaux de surface et l'aménagement de l'espace en milieu urbain.

L'urbanisation affecte profondément le cycle naturel de l'eau. Ainsi l'infiltration de l'eau dans les sols, le fonctionnement de nappes, le ruissellement des eaux en surface, les écoulements dans les cours d'eau ou les conduites souterraines sont profondément touchés par l'urbanisation. Inversement, l'eau peut perturber les zones urbaines de par les risques d'inondations qui présentent des enjeux financiers, environnementaux et sociaux importants.

Les particularités des bassins en milieu urbains sont :

- La faible dimension des bassins versants
- La forte imperméabilisation des sols qui modifient le ruissellement tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif
- Le réseau hydrographique est artificialisé, le ruissellement naturel est forcé d'emprunter le réseau d'évacuation
- L'évolution rapide en fonction de l'accroissement urbain
- Ils sont sujet au risque d'inondation

2.3.8 Synthèse des études hydrologique et hydrogéologiques menées dans la zone

L'établissement du bilan hydrologie découle d'études hydrogéologique et hydrogéologique. Ainsi plusieurs études hydrologique et hydrogéologique ont été menées dans la zone d'étude. En ce concerne les études hydrogéologique, les études antérieurs faite ressortir quatre formations géologique aquifère de la zone constituent un a(Sauret, 2013) à savoir : l'aquifère des Grès Fins Glauconieux (GFG), l'aquifère des Grès à Granules de Quartz (GGQ), l'aquière des Siltites Argilites et carbonates (SAC1) et l'acquifère des Grès Fins Roses (GFR)

Par leurs études Derouane (2008) et Sauret (2013) font ressortir le caractère drainant des cours d'eau du Kou. Ils démontrent à cet effet que les lignes d'écoulement convergent vers la zone des sources de Nasso/ Guinguette. De par sa modélisation hydrogéologique, Elie Sauret a assimilé la plaine alluviale comme un grand réservoir capacitif avec la fonction stockage et drainage ; ainsi d'après lui, l'eau est stockée en amont pour être ensuite drainée à l'aval pour la réalimentation du cours d'eau du Kou soit directement soit indirectement à travers les sources. Cela serait dû à la géologie de la plaine alluviale qui est constituée de dépôts argilo-latéritiques et du bedrock qui est altéré et déconsolidé, ce contexte géologique est donc favorable à l'emmagasinement et à la mobilisation d'importants volumes d'eau souterraine (Sauret, 2013). Grâce à l'étude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe à l'aide de sa modélisation hydrogéologique, Justine Tirogo nous permet d'avoir une idée sur les quantités des flux transitant dans la nappe au niveau de la plaine alluviale du Kou. En effet sa modélisation lui a permis de faire ressortir que la recharge représente près de la moitié (49 %) des apports en eau de l'aquifère. Le reste des apports provient des flux latéraux soit 20 % du sud, 22 % du sud-ouest (Mouhoun) et 9 % du nord. Les flux entrants par la rivière du Kou sont faibles (moins de 1 %). Les principaux points de décharge de l'eau souterraine sont les sources (13 % des flux sortants) et la rivière du Kou et ses principaux affluents (11 %). Les pompages ne représentent que 2 % du total des flux sortants. Le reste des flux sort à l'ouest (le Mouhoun) (51 %) et au nord (22 %) du bassin versant (Tirogo, 2016). Vu que ces résultats

concernent un bassin hydrogéologique plus vaste que le bassin versant du Kou, Tirogo a dû restreindre les résultats à la vallée du Kou. Elle montre que les flux entrants dans la nappe restreinte au niveau de la vallée du Kou proviennent principalement de la recharge (38 %), de la limite sud (20 %) et de la limite ouest (23 %) et la frontière nord (15 %) et que les flux sortants sont : les sources qui en représentent 19 %, la rivière et les autres drains 10 % et les pompages 2 % ; le reste des flux passe par les frontières ouest (49 %) et nord (17 %), et les frontières sud et est qui sont très faibles soit respectivement 1 % et 2 % (Tirogo, 2016)

Des études hydrologiques ont également été effectuées sur ce site en vue d'établir le bilan d'eau. La plupart des études réalisées pour le bassin versant du Kou aboutissent à un résultat négatif au niveau du bilan qui traduit un déficit au niveau du bilan faisant ressortir la présence d'un excès d'eau. Une étude effectuée par le modèle hydrologique HYSIM pour l'année 2000, a fait ressortir que 77 % des apports en eau dans le bassin versant sont perdus par évapotranspiration, 13 % participent au ruissellement et 10 % s'infiltrent (Wellens et al., 2008). Tandis que, pour une période plus grande (1961-2014) (Tirogo, 2016) trouve des pourcentages qui diffèrent légèrement à raison de 81 % pour l'évapotranspiration, 7 % pour le ruissellement et 12 % pour l'infiltration. Le pourcentage trouvé pour le ruissellement est expliqué par elle comme étant dû au fait qu'environ 80 % de la surface du bassin du Kou est recouvert de sol ayant une bonne capacité de rétention. Par leurs études (Wellens et al., 2008 ; Niamian, 2008) ont trouvé pour le bilan en eau de -56 mm qui présente la part de la contribution souterraine et une infiltration égale à 112.4 mm tandis que (Tirogo 2016) l'estime à environ 123 mm et que (Dakoure, 2003) estime la recharge variante entre 0 et 127 mm. L'étude de Justine permet de relever une croissance de l'évapotranspiration qui passe de 68 % en 1961 à 87 % en 2014 et une décroissance de l'infiltration profonde qui passe de 22 % en 1961 à 7 % 2014, cela est une conséquence de la variation climatique connue ces dernières décennies. Bien que cette zone ait fait l'objet de plusieurs études, mémoires de master, thèses et projets étatiques en vue de mieux comprendre l'hydrodynamisme de la zone, elle n'a pas été sujette à un grand nombre d'études se penchant principalement sur la modélisation hydrologique. (Chapline, 2019)

Résumé des différentes études menées sur la zone

Type d'étude	Références	Zone d'étude	Superficie	Outils utilisés	Période
--------------	------------	--------------	------------	-----------------	---------

			(Km2)		de l'étude	
Étude et modélisation hydrogéologique	Sogreah Ingénierie, 1994	Bassin du Kou Nappe Gfg-Ggq-SAC	861	MONA (Régime permanent) et ESTRA (régime transitoire)	1990-1993	
		Bassin du Kou Nappe GKS	810		/	
	(Dakoure, 2003)	Bassin de Taoudéni (1/3 au Burkina Faso + 2/3 au Mali)	180000			
		Sous-modèle Burkina (Régime permanent)				
		+ Sous-modèle dans la zone des sources de Nasso (régime transitoire)			Processing-MODFLOW	1995-1999
		Bassin du Kou étendu jusqu'à la rivière du Mouhoun	3000			
		Bassin sédimentaire du Taoudéni au sud-ouest du Burkina	4000			
Bassin du Kou étendu jusqu'à la confluence Niamé-Baoulé	1860					

		Bassin du Kou	1820		
		Bassin du Kou	1823		
		Bassin du Kou	1823		
		Bassin du Kou étendu jusqu'à la confluence Niamé-Baoulé	1860		

2.4 Choix du modèle

La grande diversité des modèles hydrologiques complique le choix des scientifiques et ingénieurs pour une application donnée. Afin d'éviter certaines erreurs et de réduire certains inconvénients, il est nécessaire d'effectuer le choix en fonction des objectifs de l'étude. Cependant, il n'est pas toujours évident de satisfaire à cette règle. Des problèmes de coûts, licence d'utilisation, matériel nécessaire pour le fonctionnement ou d'habitude de travail ont tendance à prendre le dessus sur le critère rationnel qui tend à chercher la meilleure adéquation entre le modèle et la problématique à étudier.

Il peut alors être intéressant de se fixer quelques critères afin de se faciliter le choix :

- La possibilité de déterminer les paramètres ;
- Les possibilités de simulation : Il est fréquent de devoir faire des analyses de sensibilité sur des paramètres. Cela nécessite une utilisation répétée du modèle. Certains modèles offrent alors la possibilité de fonctionner automatiquement de façon itérative ;
- La facilité d'utilisation : Certains modèles ont des interfaces peu conviviales, nécessitent une préparation fastidieuse des données ou on a des fichiers de sorties difficiles à exploiter. Il est donc conseillé d'utiliser des programmes récents qui facilitent l'utilisation et la compréhension des phénomènes. Il ne faudrait pas utiliser des modèles dont les modules ne sont pas entièrement compris et maîtrisés ;
- Le coût du modèle et l'équipement qu'il nécessite peut également influencer le choix de l'utilisateur. Il doit être comparé en fonction du coût de l'étude à réaliser.

En complément à ces critères il convient d'intégrer la notion de simplicité. Il est important d'envisager le modèle le plus simple possible pour une étude, sans tomber dans les excès de

simplicité non plus. Einstein avait formulé ce critère de la façon suivante : « **Un modèle doit être aussi simple que possible, mais pas plus simple.** »

Tous ces critères ne sont pas exhaustifs, mais doivent nous rendre attentif au fait qu'il n'est pas aisé de choisir un modèle.

2.5 Mise en œuvre d'un modèle

La mise en place d'un modèle nécessite un travail complexe qui peut être séparé en quatre étapes : la recherche et préparation des données, l'estimation des paramètres (étape également nommée calage ou calibration), la validation et enfin l'exploitation du modèle.

2.6 Recherche et préparation des données

Cette étape nécessite de bien connaître le fonctionnement du logiciel de modélisation afin de déterminer toutes les données qui seront nécessaires à l'élaboration du modèle. Il est possible de se procurer les données de différentes manières. Il est parfois nécessaire d'effectuer des campagnes de mesures sur le terrain. Ce procédé requiert des moyens conséquents. Outre le fait de posséder une certaine quantité d'appareils performants et souvent coûteux, il faut disposer d'une main-d'œuvre qualifiée pour la mise en place d'une telle campagne. Pour certaines variables la durée des mesures qui peut atteindre plusieurs mois peut engendrer des problèmes dans le respect des délais. Il y a aussi la possibilité de s'adresser aux autorités qui disposent de données d'études antérieures. Mais elles ne seront pas forcément toujours à jour. Une fois les données obtenues, elles nécessiteront parfois un traitement primaire afin d'en extraire les variables qui sont spécifiquement utilisées par le modèle ainsi que pour éliminer toutes les erreurs (erreur de mesure, erreur de saisie, erreur d'acquisition, etc.) qui ont pu être effectuées durant la détermination des valeurs des paramètres.

2.7 L'estimation des paramètres (calibration)

Le calage d'un modèle consiste à estimer ses paramètres inconnus de façon à obtenir des réponses qui soient aussi proches que possible des observations. En générale, cette étape permet de modifier les paramètres hydrologiques, les paramètres hydrauliques étant estimés avec plus de certitude, sachant que les informations sur les réseaux sont plus détaillées. Les valeurs ainsi estimées permettent par la suite de simuler des événements qui n'ont pas servis au calage ou des événements hypothétiques futurs.

Les théories des méthodes d'estimation des paramètres sont nombreuses et relèvent surtout d'un aspect particulier des mathématiques à savoir la statistique.

2.8 Validation du modèle

Cette étape a pour objectifs de déterminer l'adéquation du modèle avec des événements connus et l'estimation de l'erreur à craindre en simulation. La validation du modèle nécessite donc des simulations avec des événements qui n'ont pas servis au calage.

2.9 Exploitation et interprétation

Les étapes précédentes occupent une grande partie du travail des scientifiques. Si elles ont pu être réalisées, il reste aux utilisateurs d'exploiter le modèle pour les études désirées. La principale difficulté restant avant l'exploitation du modèle réside dans le choix des valeurs d'entrée, conditions initiales et conditions aux limites. Les simulations effectuées, il faut alors se garder de ne pas tirer des extrapolations trop importantes des résultats, de ne pas oublier d'intégrer les erreurs calculées lors de la validation aux valeurs obtenues et dans la mesure du possible comparer les résultats avec d'autres études.

III. Présentation du modèle semi-distribué (HEC-HMS)

Le modèle HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) fait partie des modèles semi-distribués ou semi-spatialisés. Il s'agit d'un système complet de modélisation des bassins versants et permet de simuler les processus pluie-débit. Il a été développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Ce modèle permet de calculer les hydrogrammes de crue et leur impact sur les études de drainage urbain, la prévision des crues, la conception de réservoirs, la réduction des effets de l'inondation. Ce programme dispose d'une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion. Ce modèle simule à la fois les différentes données suivantes : les précipitations, les pertes (infiltration, retenue ou évaporation), les ruissellements directs, l'hydrologie fluviale.

3.1 Schématisation du bassin par HEC-GEOHMS

La schématisation du bassin versant en sous bassin et leurs paramètres est réalisée à l'aide du logiciel HEC-GEOHMS. C'est une extension d'Arc View et Spatial Analyste qui a été développé comme un outil hydrologique géospatial pour les ingénieurs et hydrologue (HEC-GeoHMS, 2003). Ce logiciel produit un certain nombre d'inputs qui sont directement employés par HEC-HMS. Il assiste l'utilisateur pour l'évaluation des paramètres hydrologiques en fournissant des tables des caractéristiques physiques des

cours d'eau et des lignes de partage. Elle permet en outre aux utilisateurs de visualiser l'information spatiale, d'exécuter le « Spatial Analyst », et de délimiter les bassins et les ruisseaux. Dans le GEOHMS, la méthode est choisie et la combinaison des données est établie. Ces données établies sont importées vers Le HEC-HMS. Dans le HEC-HMS, on introduite les

Données climatiques pour lancer la simulation. La relation entre le SIG, le HEC-GeoHMS et le HEC-HMS est illustrée par la figure 1 (HEC-GeoHMS, 2003)

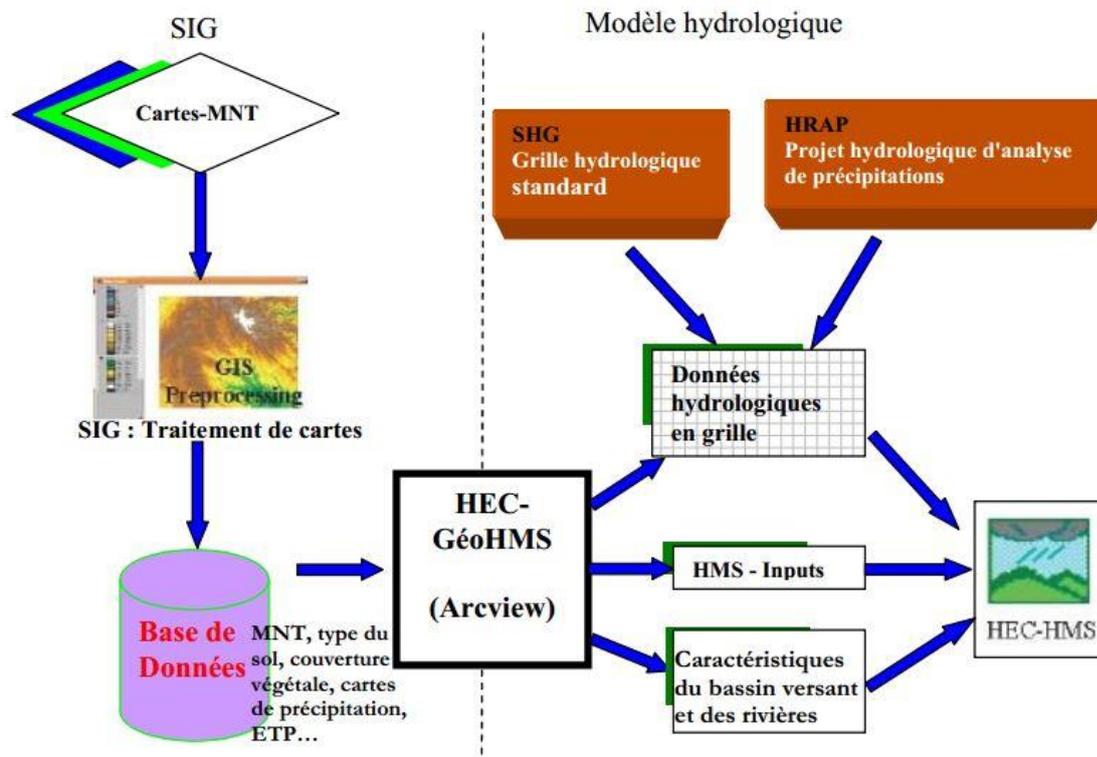


Figure 1: Relation entre le SIG, HEC-GeoHMS et HEC-HMS

HEC-GEOHMS offre la possibilité de calculer les caractéristiques topographiques des cours d'eau et des sous-bassins. Ces caractéristiques sont : les longueurs des cours d'eau, les pentes, les centroides des bassins, longueur du plus grand chemin d'écoulement et les centres des cours d'eau. Une fois le traitement des données fini, on importe les données sous HEC-HMS pour la calibration et la validation.

3.2 Simulation avec HEC-HMS.

Après importation des données sur HEC-HMS, on procède au choix des combinaisons des modules, l'entrée des données climatiques. Ensuite on passe à la calibration du modèle en

ayant en esprit les différents critères de performance et par la suite on passe à la validation. Les détails de ces données sont consignés à l'annexe du document. Vu les multiples modules de notre modèle, nous avons eu à faire les combinaisons des modules pour éliminer ceux qui donnent des performances non satisfaisant. En outre on procède aussi à une simulation automatique. Cette simulation automatique qui nous donne des valeurs non satisfaisantes de ce fait nous avons à une calibration manuelle.

3.2.1 Pour le module de transfert

L'hydrogramme unitaire de la SCS a retenu notre attention. C'est un module qui donne une relation empirique entre de précipitations et le ruissellement direct. Ce module vise à déterminer l'hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire d'un bassin versant à partir du hydrogramme de l'averse correspondant reçu par ce même bassin. Elle donne le début de ruissellement par unité de hauteur d'eau tombée sur le bassin versant. Ce module repose sur donc principalement sur l'hypothèse de linéarité entre l'excès de précipitation et le ruissellement. On a donc l'équation de convolution suivante :

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1}$$

Avec Q_n est le débit de ruissellement au temps $n \cdot \Delta t$,

P_m est l'excès de précipitation entre $m \cdot \Delta t$, et $(m+1) \Delta t$ (en hauteur d'eau)

U_{n-m+1} est la valeur de l'hydrogramme unité au temps $(n-m+1) \Delta t$

3.2.2 Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting)

Le modèle SMA est un modèle qui permet d'étudier de longues périodes avec alternance de la pluie et du temps sèche. À partir des données de précipitations, d'évapotranspiration, le modèle calcule le ruissellement de surface, les infiltrations et les pertes dues à l'évaporation et les percolations profondes. Le modèle SMA représente le bassin versant avec une série de couches de stockage interconnectées entre elles. Chacune est représentée par un taux d'apport, de sortie et de sa capacité de stockage qui commande la quantité d'eau perdue. Les différentes séries de couches de stockage.

Stockage par interception végétale : elle (couche) représente l'eau retenue par la végétation et qui n'atteint donc pas le sol

Surface par interception de surface : les apports de cette couche proviennent des eaux non par la végétation

Stockage de subsurface : il représente l'eau retenue dans le sol à faible profondeur et susceptible d'être soumise à l'évapotranspiration.

Stockage souterrain : les couches souterraines représentent le processus des écoulements horizontaux. L'eau stockée dans ces couches est obtenue par percolation

3.2.3 Le module de production

Pour le module de production : SCS Curve Number Loss : cette méthode relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente. La méthode nécessite trois paramètres, la perte initiale, le numéro de courbe et le pourcentage de surface imperméable. Ces deux derniers éléments ont été calculés à partir des données d'utilisation du sol et du type de sol dans le système d'information géographique. Chaque numéro de courbe est associé à une utilisation du sol différente. Plus le numéro de courbe est élevé, plus le ruissèlement est moins important. Ces trois paramètres sont obtenus par la calibration. Ce modèle estime l'excès de précipitations comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivant :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

On a par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne I_a en fonction de S .

$$I_a = 0.2S$$

Le potentiel de rétention maximum, S , et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre de CN par

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

3.2.4 Le module météorologique

Pour le module météorologique : nous avons utilisé la méthode basée sur les coefficients de pondération (GAGE WEIGHTS). En effet c'est la seule méthode qui permet d'avoir une bonne performance avec la combinaison des autres modules. Cette méthode utilise principalement deux formules telles que les précipitations moyennes et la répartition temporelle.

Les précipitations moyennes : À partir des relevés pluviométrie mesurée sur le bassin versant (ou à proximité), on calcule la moyenne la moyenne surfacique des précipitations arithmétique des précipitations (P_{moy})

$$P_{moy} = \frac{\sum_i (w_i \sum(p_i(t)))}{\sum_i w_i}$$

Ou w_i est le coefficient de pondération affecté au pluviomètre i et $p_i(t)$ est la hauteur des précipitations mesurée au pluviomètre i au temps t . le coefficient de pondération est calculé peut être calculés par de considération surfacique ou le poids affecté à un pluviomètre est d'autant plus grand qu'il est représentatif d'une grande surface. On peut choisir pour cela, soit la méthode des polygones de Thiessen, soit celle du tracé des isohyètes. À défaut on pourra affecter des coefficients égaux pour tous les pluviomètres :

($w_i = 1/(\text{nombre de pluviometre})$) Pour la détermination du coefficient de pondération, les méthodes suivantes sont élaborées : la moyenne arithmétique, les polygones de Thiessen, la méthode des isohyètes. La méthode arithmétique fut utilisée sa formule est la suivante

La méthode arithmétique :

$$w_i = \frac{1}{N} \text{ avec } N \text{ est égal à au nombre de station pluviométrique}$$

- La répartition temporaire

Une fois la moyenne totale des précipitations est calculée, il faut ensuite donner la répartition temporaire des précipitations à partir de la répartition typique de l'évènement pluvieux $P_{type}(t)$

$$P_{type}(t) = \left(\frac{P_{typ}(t)}{\sum_i P_{typ}(t)} \right) * P_{moy} \text{ ou } P_{typ}(t) = \frac{\sum_j w_j P_j(t)}{\sum_j w_j}$$

w_j est le coefficient de pondération affectée au pluviomètre j .

3.2.5 Module de base

Comme module de base nous avons utilisé la méthode de constante mensuelle. Les écoulements souterrains sont considérés par cette méthode comme étant fixe pendant des durées d'un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes.

3.2.6 Muskingum

La méthode Muskingum est classée parmi les modèles hydrologiques de propagation des crues basés sur l'équation de continuité g.

$$\frac{ds}{dt} = I - O$$

$$S = X.S_i + (1 - X).S_0 = K.O + K.X(I - O)$$

K est associé au temps de déplacement de l'onde e crue à travers les biefs. Lorsque K augmente, la pointe de la crue en aval devient plus tardive. Le coefficient X est un coefficient de pondération ou un facteur de pondération entre le débit entrant et le débit sortant. Une diminution de la valeur de X signifie une atténuation plus forte de la pinte de la crue. La valeur de X et de K ont été déterminé par calage du modèle.

IV. Matériel et méthodes

La représentation des processus hydrologiques est hautement dépendante de l'échelle spatiale des propriétés du sol et d'autres facteurs physiographiques (Moor et al., 1993, Grayson et Blöschl, 2000, Beven, 2001). La connaissance de ces paramètres est très capitale pour une bonne modélisation. De ce fait, nous présenterons les caractéristiques du bassin, et l'analyse des données climatiques.

4.1 Localisation de la zone d'étude

Le bassin du Mouhoun est un affluent du fleuve Volta partagé entre le Burkina Faso, le Mali, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo et le Bénin (Tableau 1 et figure 2). Sa superficie à est de l'ordre de 400 000 km² dont 42% sont situées au Burkina Faso. Sur le territoire burkinabè, le bassin de la Volta se décompose en deux sous-bassins hydrographiques : le bassin du Mouhoun et le bassin du Nakanbé (MCA-BF-AD9-VD-27-01-2012).

Tableau 1: Répartition du bassin de la Volta entre les six pays riverains (source The Volta River Barry (2005))

Pays	Superficie (km ²)	% du bassin	% du pays dans le bassin
Burkina Faso	172 968	41.9	63.0
Mali	15 392	3.7	1.2
Côte d'Ivoire	12 500	3.0	3.9
Ghana	167 692	40.7	70.0
Togo	26 700	6.5	47.3
Bénin	17 098	4.1	15.2
Total	412 350	100.0	

Le bassin versant du Mouhoun présente un réseau hydrographique dense (figure 1), caractérisé par la pérennité de la plupart de ses affluents. Les conditions naturelles dans la zone d'étude sont caractérisées par une pluviosité moyenne annuelle variant entre moins de 500 mm au nord de la zone et plus de 1100 mm au sud. Nous remarquons que des fluctuations importantes de ces valeurs moyennes se manifestant dans des variations interannuelles extrêmes avec des périodes humides dans les années 60 et sèches à très sèches dans les années 80. Ces variations interannuelles de la pluviosité se traduisent par des variations considérables des écoulements naturels. Au sein du Mouhoun plusieurs stations sont installées dont celle de Banzon. Il s'agit d'une localité appartenant à la province du Kéné Dougou. Les coordonnées géographiques de ce bassin versant sont à 11°20' Nord et 5°52' Est. Il est à une cinquantaine de kilomètres (50 Km) de Orodara et à soixante-cinq kilomètres (65 km) de Bobo Dioulasso. Il est limité au Nord par le village de Sikorola, au Sud par celui de Djigouéra, à l'Est par Samorogouan et l'Ouest par Kounséni (confère la carte en annexe). Plusieurs activités sont menées dans cette zone.

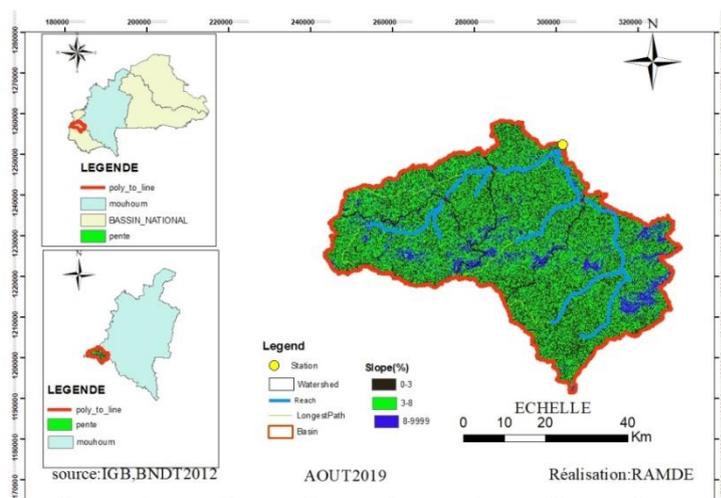


Figure 2: Bassin versant de Banzon (pente)

4.1.1 Géologie, sol et végétation

Le principal cours d'eau du Burkina, le Mouhoun, a profondément marqué la topographie de cette région. En effet, Banzon fait partie du bassin versant du Mouhoun qui est constitué sur le plan lithologie (figure 3) :

- de grès roses : grès compacts, durs et homogènes
- de schistes de Toun : schistes verdâtres et violacés, alternés avec des grès fins monacés. On y

trouve des intercalaires dolomitiques silicifiées et de lits de cherts, des intrusions de dolérite à altercations en boules visibles dans les éboulis des escarpements. Ces formations constituent des massifs coiffés d'épaisses cuirasses ferrugineuses.

- grès à galets de Quartz
- dolerites
- étage schistogreso-dolomitique

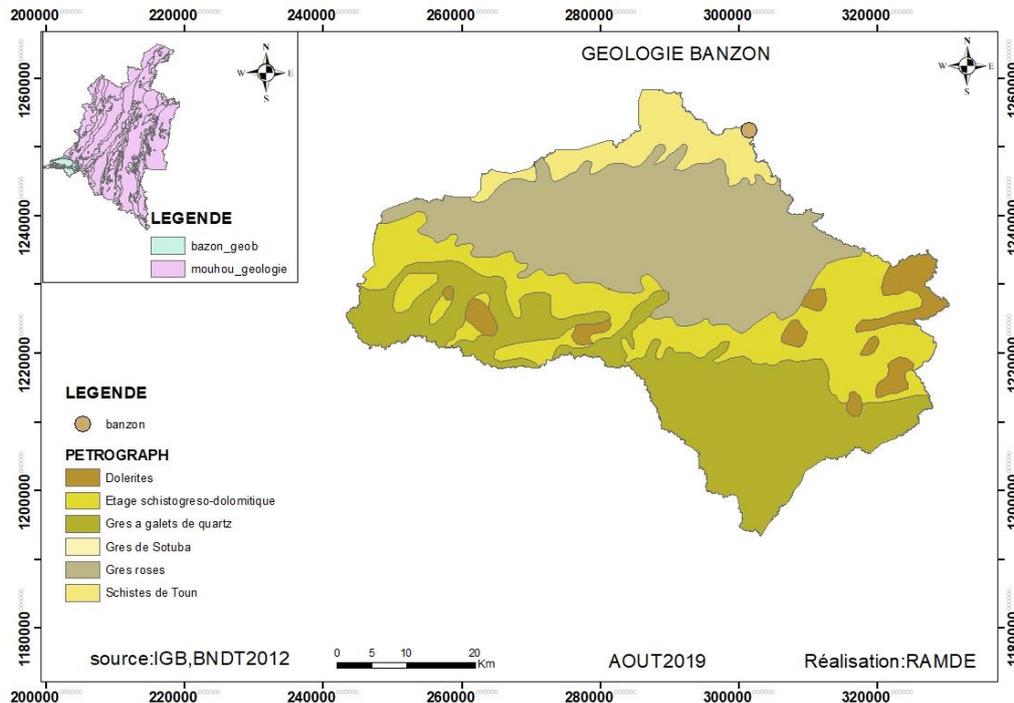


Figure 3: Géologie du bassin versant de Banzon

Les différents types de sol rencontrés (figure 4) dans cette zone sont ;

- des sols hydromorphes : on les rencontre dans les mares, le marais quasi-permanent, le long du glacis cuirassé. Ces sols sont caractérisés par un excès d'eau temporaire ou permanent. On relève plusieurs textures dont les sols à structures sablonneuses, les sols limoneux, et les sols argileux. Ces sols ont des potentialités chimiques moyennes assez favorables à l'agriculture. Cependant, leurs propriétés physiques (compacité et imperméabilité) sont défavorables.
- des sols ferralitiques : ce sont des sols ferrugineux tropicaux lessivés ou appauvris, hydromorphes sur matériau sablo-argileux à argileux issus de grès. Sous l'action de la chaleur et de l'humidité ils s'hydrolysent.
- des sols mull: Ils sont représentés par les sols bruns eutrophes tropicaux. Ils disposent d'un humus doux, bien lié à la matière minérale, un complexe absorbant bien saturé en bases

alcalino-terreuses. Le drainage externe est généralement moyen et le drainage interne moyen à médiocre. Ce sont des sols à potentialité de fertilité élevée.

- des sols peu évolués: ce sont des lithosols et les sols argilo-sableux. Les lithosols regroupent les cuirasses ferrugineuses indurées qui entourent les zones inondables. Ce sont ces formations qui limitent les cuvettes de Sikorola. Ces surfaces cuirassées sont incultes car recouvertes de cailloutis, de pierrailles et de gravillons. mais disposent d'un bon drainage. Ils se développent sur les levées alluviales du Mouhoum entre Sikorola et Banzon. Ils sont peu profonds, mais aptes à l'agriculture.
- des sols hydroxydes et matière organique bien décomposés : ils sont constitués de sols ferrugineux tropicaux à PH acide. Du fait de la pluviométrie élevée, ces sols sont lessivés. L'épaisseur d'humus est peu importante. Dans la zone d'étude, ces sols sont sablo-argileux avec des teneurs en calcium et phosphore basses. Ces sols sont sensibles à l'érosion, cependant leur profondeur leur confère une aptitude de rétention d'eau. Seules des techniques d'exploitation appropriées permettent d'obtenir de bons rendements. Ces sols sont propices pour la culture du sorgho.
- Les sols minéraux bruts : on les rencontre au nord de Banzon et de Sikorola et en bordure de la mare nord-est. Ces formations sont rencontrées également entre le Mouhoum et la mare sud-est et dans la vallée du Plandi. Ils sont constitués d'affleurements gréseux, de cuirasses ferrugineuses et d'éléments divers. Ces sols ont une épaisseur très faible, et sont pauvres en élément organique ce qui leur donne une valeur agronomique nulle.

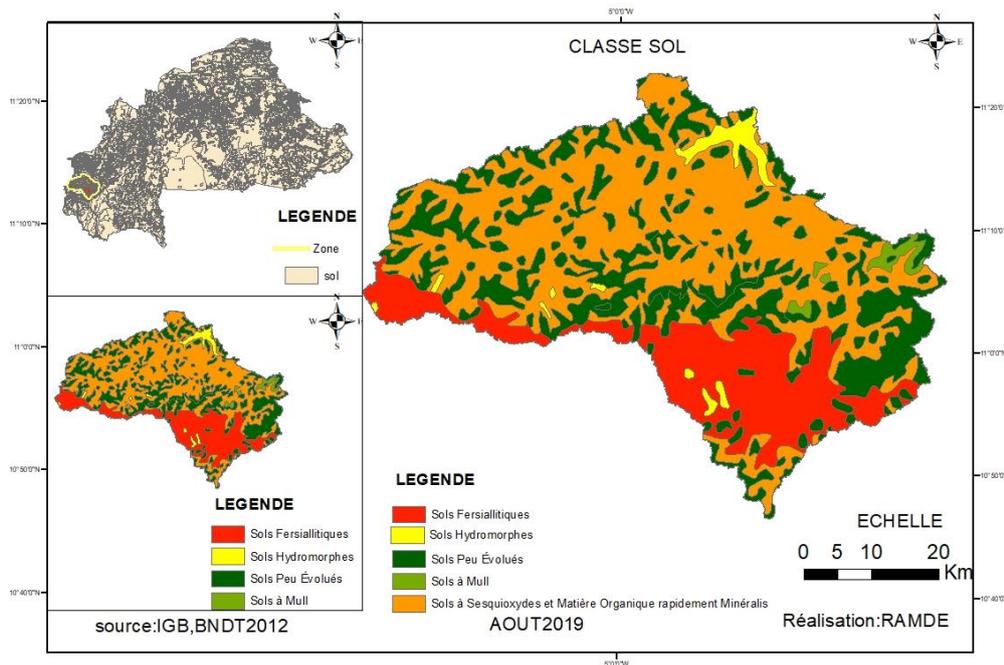


Figure 4: Différents types de sols du bassin versant de Banzon

La zone de Banzon est constituée par la savane de type *Butyrospermum parki* à la savane arborée constitué de *Parkia biglobosa*. Il faut noter que la végétation évolue en fonction du degré d'hydromorphie des sols (figure 5):

- Les zones non inondables comme les levées de berges sont très boisées avec *Khaya senegalensis*, *Bergian auriculata*, *Diospyros mespiliformis*, *Daniella olivieri*. On y trouve aussi des cultures de mil, de maïs et parfois du coton ;
- Les vastes zones basses inondables disposent d'une végétation essentiellement herbacée à base d'*Andronogonees* avec quelques arbustes surtout *Myragynas inermis*. Une bonne partie de ces zones a été aménagée pour la riziculture ;
- Les zones marécageuses sont bordées d'espèces ligneuses : *Ficus congensis*, *Raphia Vinifera*, *Phoenix reclinata*.
- La surface en eau libre est le domaine des cypéracés (L'ORSTOM, 1956)

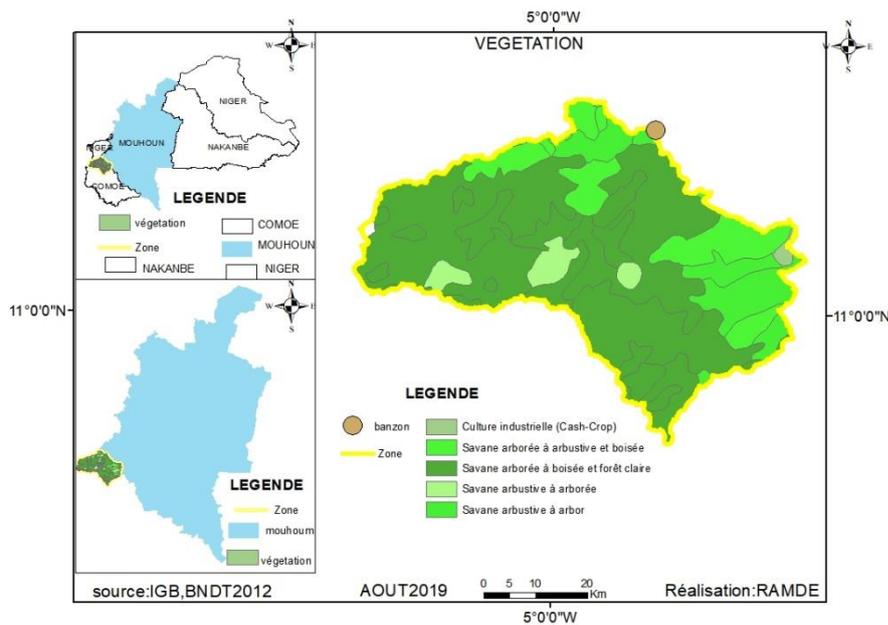


Figure 5: Végétation du bassin versant de Banzon

4.1.2 Activités socio-économiques

Selon les résultats du recensement, de 1985, l'agriculture occupe plus de 92.3% de la population active et l'élevage reste une activité secondaire et il est de type traditionnel et concerne essentiellement les petits ruminants.

L'agriculture : l'agriculture à Banzon est essentiellement une agriculture de subsistance. Dans cette zone nous pouvons distinguer plusieurs types de cultures : le haricot est cultivé en association avec les céréales, l'arachide et les poids de terre sont également des plantes associatives. En agriculture pluviale le coton et la riziculture sont cultivés par une grande partie des exploitants avec des rendements de l'ordre de 0.4 ha par exploitant pour le riz.

Comme autre activité nous pouvons retenir l'artisanat pratiqué pendant la saison sèche, le commerce, et la pêche.

4.1.3 Plaine aménagée de Banzon

La plaine aménagée de Banzon apparait comme un moyen de sécuriser une partie de la production nationale du riz dans le cadre de la lutte pour l'autosuffisance alimentaire. Elle couvre une superficie de 585 ha (hectare) dont 454 ha exploitables en riziculture irriguée. Pendant la saison pluvieuse, la superficie exploitée est de 400 ha, car tous les sols ne sont pas favorables pour la riziculture. En saison sèche cette superficie est réduite à 325 ha en raison des pénuries d'eau (Koné, 1992). Sur cette plaine, l'eau constitue le facteur limitant à la

production notamment pendant la saison sèche. L'hydromorphie de certains sols et la percolation notamment des sols périphériques de la plaine posent un problème de distribution de l'eau. En effet les sols hydro morphe se trouvent saturés pendant que les sols perméables n'ont pas satisfait leurs besoins en eau.

4.1.4 Hydrographie du bassin versant de Banzon

L'étude des caractéristiques morphologiques d'un bassin versant est très importante. Cette étude aide à mieux comprendre le comportement hydrologie du bassin. Ces caractéristiques influencent la réponse hydrologique et notamment le régime des écoulements en période d'étiage.

4.2 Matériel

Les données nécessaires pour cette modélisation sont de plusieurs ordres

4.2.1 Données topographiques

Le modèle numérique de terrains (MNT) est du type ASTER GDEM de résolution 30 m (figure 6)il est obtenu sur le site de USGS (United States Geological Survey), <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Dans la zone, les altitudes varient entre 300 m et 700 m

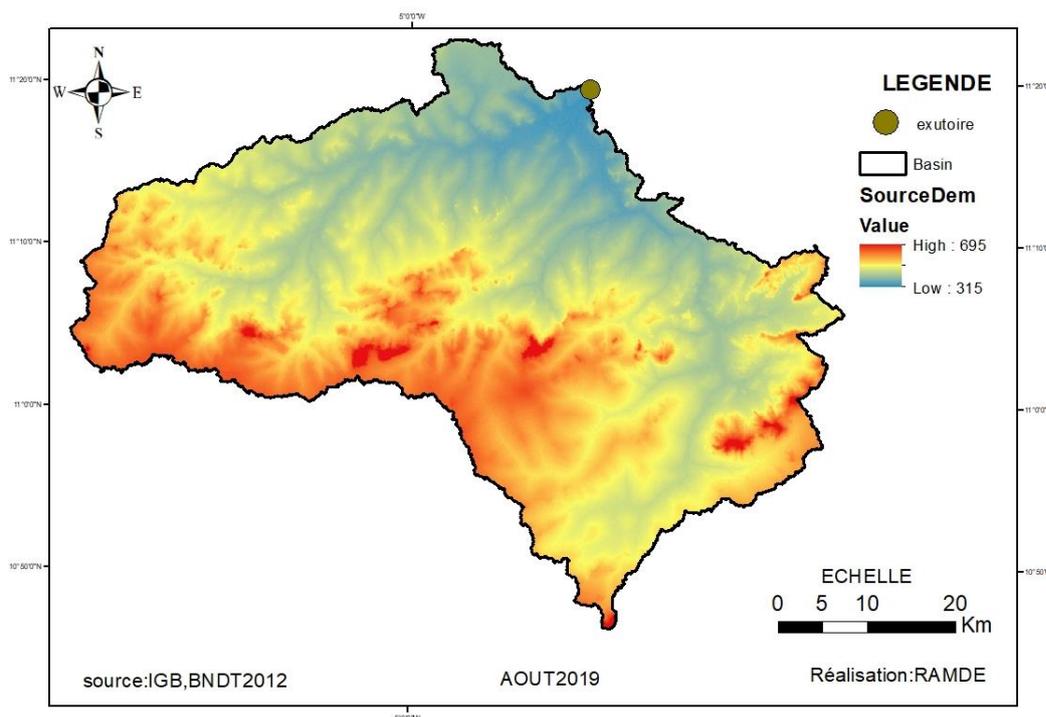


Figure 6: Topographie du bassin versant de Banzon

4.2.2 Données hydrométriques

Les débits observés utilisés comme données d'entrée ont été collectés à la station hydrométrique de Banzon.

4.2.3 Pédologie et type de sols

Pour les types du sol, les données proviennent de la base des sols de FAO avec une échelle de 1 :5000000° (figure 7)

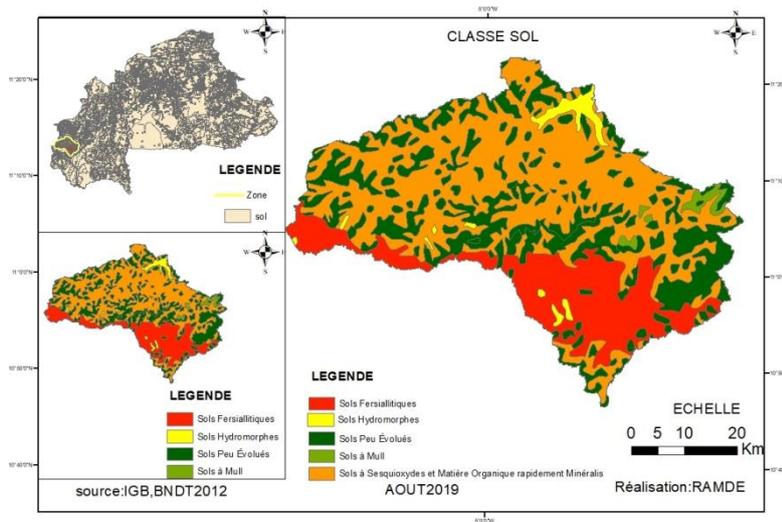


Figure 7: Classe des sols de la FAO

4.2.4 Occupations des sols

Pour l’occupation des terres, les données proviennent de la base de données d’occupation des terres de 2002 (figure 8) de l’Institut Géographique du Burkina (IGB)

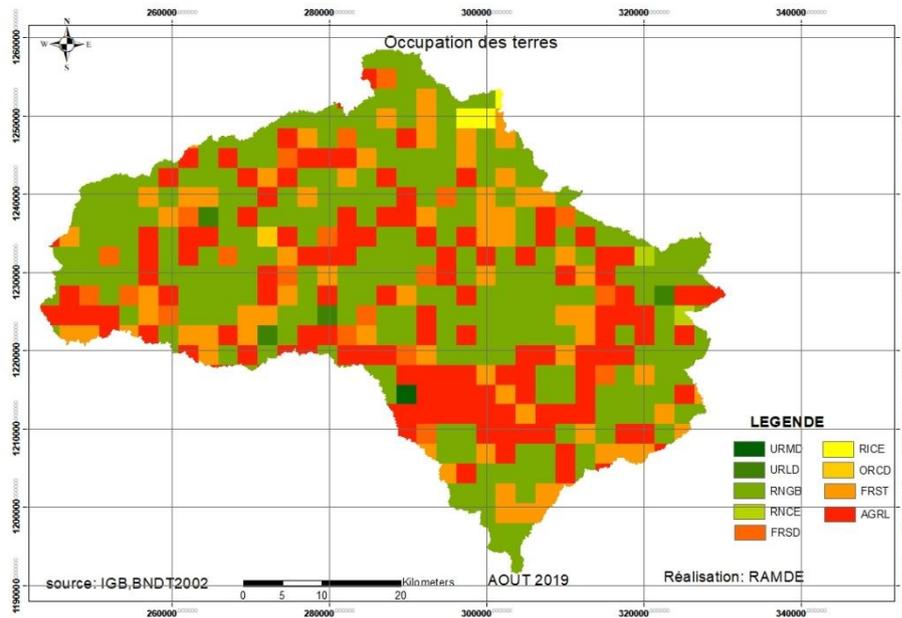


Figure 8: Carte d'occupation des sols

Les données météorologiques utilisées sont celles de la station synoptique de Bobo-Dioulasso.

4.2.5 Analyse critique des données

Les données climatiques proviennent de la station synoptique de bobo Dioulasso. Cette station est plus proche de notre zone d'étude et c'est une station de référence au Burkina Faso. Une analyse des données climatiques a prouvé leur qualité, les différents tests effectués ont permis de déterminer les périodes de ruptures. En appliquant l'indice standardisé des précipitations, les périodes sèche, humide et d'alternance ont été détectés. Les débits proviennent de la station de Banzon. En faisant l'analyse des débits, il y a des lacunes. Les lacunes ont été par interpolation et par la méthode de régression linéaire en utilisant trois, deux stations en amont et une station à l'aval (confère schema)

4.3 Méthodes

4.3.1 Caractéristiques du bassin versant de Banzon

Les caractéristiques du bassin versant de Banzon sont :

Le périmètre (P) et la surface (S) du bassin versant. Ces deux paramètres ont été obtenus à partir des logiciels Global Mapper et Autocard.

➤ **L'indice de compacité de Gravelius :** C'est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même superficie, il permet de comparer les bassins de superficie identique. Ce coefficient est exprimé à partir de la relation 1 :

$KG = 0,28 * P * S^{-0.5} \quad (1)$	<p>S = superficie du bassin versant (km²)</p> <p>P = périmètre (Km)</p> <p>KG =Indice de compacité (m)</p>
--------------------------------------	--

➤ **La longueur de chemin hydraulique (LH)**

Le plus long cheminement hydraulique dans un bassin versant correspond au trajet le plus important que va mettre une goutte d'eau pour arriver à l'exutoire. Il est utilisé pour la détermination du temps de concentration. Pour cette recherche, sa détermination s'est faite en mesurant la longueur la plus longue en utilisant le logiciel AutoCAD.

➤ **La pente moyenne(I)**

La pente moyenne I a été déterminée au moyen de la relation 2 :

$I = \Delta Z / L \quad (2)$	<p>ΔZ : la dénivelée entre la courbe de niveau la plus élevée</p> <p>L : la longueur de chemin hydraulique en</p>
------------------------------	---

	m.
--	-----------

➤ **Le rectangle équivalent** : C'est le rectangle ayant la même surface et le même périmètre que le bassin versant. Ses dimensions (longueur et largeur) ont été déterminées via les relations 3 et 4.

$l_{\text{éq}} = \frac{P^2 - \sqrt{P^2 + 16S}}{4} \quad (3)$	<p>S = superficie du bassin versant (km²)</p> <p>P = périmètre (Km)</p> <p>leq = largeur du rectangle équivalent (Km)</p> <p>Leq = Longueur du rectangle équivalent (Km)</p>
$L_{\text{éq}} = \frac{P^2 + \sqrt{P^2 + 16S}}{4} \quad (4)$	

➤ **L'Indice global de pente Ig.** Il est l'indice qui caractérise le relief du bassin et est défini par la relation 5 :

$I_g = 0.026\sqrt{S} \times 1000 \quad (5)$	<p>S=superficie du bassin versant (km²)</p> <p>Ig=Indice global de pente (m/km)</p>
---	--

4.3.2 Modélisation par HEC-HMS

4.3.2.1 Données d'entrées

Chaque modèle a ses données d'entrées. Pour le modèle HEC-HMS, les données d'entrées sont reportées au tableau 4

Tableau 2: Données d'entrées du modèle

Paramètre	Source
Données climatiques	données de la station synoptique de Bobo Dioulasso (1960-2010)
Occupation des sols	base de données de l'occupation des terres (BDOT, IGB 2000)
Relief et pente	Modèle numérique de terrain
Débit mesuré	station hydrométrique de Banzon
Sols	base des données sol FAO au 1/500 000

4.3.2.2 Étude des performances des modèles

Pour faire une étude performance il faut faire en premier le calage du modèle ensuite procéder à la validation.

➤ **La calibration d'un modèle**

Le calage d'un modèle consiste à l'ajustement des valeurs numériques attribuées à la valeur du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée. Il peut être fait manuellement ou de façon automatique par la procédure d'optimisation ou mixte c'est-à-dire en combinant les deux procédures.

Les objectifs de la procédure de calage des modèles vont être de :

- Reconstitué 'correctement' de la forme générale de l'hydrogramme observé
- Arriver à un 'bon' accord entre les débits de pointe calculés et observés
- Obtenir un bilan 'convenable' sur les volumes.

➤ **La validation d'un modèle**

La calibration du modèle étant achevée, il reste à évaluer la capacité du modèle à simuler dans le présent ou dans le futur. C'est la validation. Le principe de cette étape consiste à tester le modèle sur une série de données non utilisées dans la phase de calage.

➤ **Les incertitudes liées aux différents modèles**

Le calage des modèles hydrologique est associé au calcul des incertitudes. Ainsi des scientifiques comme Melching (1995), Refsgaard, et Storm (1996) ont identifié quatre types d'incertitude dans l'application des modèles hydrologique :

L'incertitude liée à la nature, les incertitudes liées aux données, les incertitudes liées à la structure du modèle.

- L'incertitude liée à la nature : c'est une conséquence de la variabilité spatio-temporelle du processus dans la nature des données (précipitations, température)
- L'incertitude liée aux données : la plupart des auteurs s'accordent sur le constat qu'il est impossible d'identifier la variabilité et la complexité locale des données à travers quelques points mesure. Donc la variabilité présentée dans les données du modèle est une limite pour présenter dans les données d'entrée du modèle est une limite pour représenter la variabilité naturelle introduisant ainsi l'incertitude dans les données. Refsgaard et Storm (1996) soulignent l'existence d'incertitude aléatoire ou systématique au niveau des techniques d'acquisition des données et des méthodes d'interpolation utilisées.

- L'incertitude liée aux paramètres du modèle : ce type d'incertitude est influencé par l'incertitude liée aux données à cause des caractéristiques d'optimisation du modèle pendant le processus du calage.
- L'incertitude liée à la structure du modèle : L'incapacité du modèle de représenter les processus physiques réels de ruissellement est à l'origine de ce type d'incertitude

Les valeurs minimales et maximales des modèles acceptées par HEC-HMS (tableau 2)

➤ **Tableau des valeurs**

Les valeurs minimales et maximales des modèles acceptées par HEC-HMS

Modèle	Paramètre	Minimum	Maximum
Perte initiale et à taux constant	Perte initiale	0mm	500mm
	Taux de perte constante	0mm/h	300mm/h
Modèle de perte SCS	Rétention initiale	0mm	500mm
	Curve Number (CN)	1	100
Modèle de perte de GREEN et AMPT	Déficit hydrique	0	1
	Conductivité hydraulique	0 mm/h	250mm/h
	Wetting front suction	0 mm	1000 mm
Hydrographe unitaire de CLARK	Temps de concentration	h	500 h
	Coefficient de stockage	0 h	150 h
Hydrographe unitaire de SNYDER	Décalage	0.1 h	500 h
	Cp	0.1	1.0
Hydrographe unitaire du SCS	Décalage	0.1 min	30 000min
Onde cinématique	Coefficient de Manning (n)	0	1
Écoulement souterrain	Écoulement souterrain initial	0 m ³ /s	100 000m ³ /s
	Facteur de récession	0.000011	-
	Rapport débit/pic max	0	1
Modèle de Muskingum	K	0.1 h	150h
	X	0	0.5
Onde cinématique	Nombre de pas	1	100

pour les écoulements fluviaux	Facteur N	0.01	10
Décalage	Décalage	0 min	30 000 min

Tableau 3: Valeur des paramètres du modèle HEC-HMS

➤ **La fonction d'optimisation automatique :**

Elle sert à rechercher, sans intervention de l'utilisateur, le jeu de paramètre optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. Pour l faire cette tâche, HEC-HMS propose 2 méthodes :

- « Univariate Gradient » : le gradient uni-varié, ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres paramètres
- « Nelder et Mead » cette fonction utilise une approche consistante à optimiser tous les paramètres simultanément.

Les deux méthodes ont en commun certain paramètres comme la tolérance qui détermine la valeur de changement de la fonction objective en dessous de laquelle l'optimisation des paramètres s'arrête et le maximum qui détermine le nombre maximal de jeux à essayer avant l'arrête de l'optimisation.

L'optimisation s'arrête une fois que l'une de ces conditions est remplie :

- La valeur de la fonction objective est nulle ;
- Le nombre d'itérations est atteint, et ceci, quel que soit la valeur de la fonction objective
- La valeur de variation de la fonction objective est inférieure à la tolérance

En conclusion, on peut dire que la diversité des formalismes dont dispose HEC-HMS, le positionne parmi par les plus robustes dans la simulation des ruissellements au sein du bassin, les plus complets dans l'intégration des différentes composantes d'écoulement et les moins exigeants de point de vue donné d'entrée. En outre, départ sa diversité en matière de combinaison modulaire possible, il laisse à son utilisateur la capacité de l'adapter à ses données ses objectifs, ses besoins, mais surtout à son expérience.

➤ **Choix sur les différents modules**

Faire le choix sur les différents modules n'est un travail assez aisé. Il nécessite de faire la combinaison des différents modules de manière à aboutir sur une bonne performance du

modèle. Après plusieurs combinaisons, les différents modules suivants ont retenu notre attention. Le choix des modules a été aussi guidé en fonction des données mises à notre disposition et en fonction des objectifs poursuivis.

- Pour le module de transfère : l'hydrogramme unitaire de la SCS à retenue notre attention.
- Pour le module de production : SCS Curve Number Loss : cette méthode relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente.
- Pour le module météorologique : nous avons utilisé la méthode basée sur les coefficients de pondération (GAGE WEIGHTS). En effet c'est la seule méthode qui permet d'avoir une bonne performance avec la combinaison des autres modules.
- Le module de base : nous avons la méthode de constante mensuelle. Les écoulements souterrains sont considérés par cette méthode comme étant fixe perdant des durées d'un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes.

Force et limite de HEC-HMS

➤ **Force**

- La diversité dans les formalismes proposés : En fonction de ses moyens, de ses finalités et de son expérience de l'utilisateur, le modèle lui offre une variété des méthodes de calcul
- Diversité de combinaison modulaire possible : HEC-HMS offre plusieurs combinaisons, car il offre de multiples sous modèles
- Aptitude de calibration et nature des résultats : pour plusieurs modèles la calibration est effectuée par un autre programme, d'autres peuvent même la faire, mais avec un choix limité de fonction objective et d'optimisation. En plus, ces modèles ne peuvent afficher à la fin que des résultats calibrés, l'hydrogramme simulé et observé et la variation de la fonction objective. En revanche HEC-HMS avec ses deux fonctions d'optimisation, ses sept fonctions objective sans oublier ses graphes explicatifs et analytiques, avec tout ceci, il accorde à la calibration une précision inédite et à la modélisation une exploitation au bout des choses.

Ce modèle est bien performant par ailleurs n'oublions qu'il a des limites

➤ **Les limites de HEC-HMS**

- La représentation de la structure du bassin : représentées dans HEC-HMS, par un arbre ramifié qui rend son assimilation difficile. Un élément ne peut avoir qu'une seule sortie de débit, l'élément de diversion ne peut pas piquer le débit d'un endroit à un autre. Toutes ces limites de représentation sont gênantes, mais cette étude, les données ont été traitées dans le GEOHMS qui accouplé à Argic, ensuite les données ici de ce traitement exporté dans HEC-HMS pour les simulations.

➤ **Les critères d'évaluation**

L'étude de la performance de ce modèle se fait à travers l'évaluation d'un certain nombre de critères.

- **Le critère de NASH**

C'est un critère qui qualifie la précision des simulations. Ce critère mesure le degré d'ajustement entre les valeurs observées et celle simulée. Ce critère varie (l'infini négatif à 1) on considère que le modèle est bon si le coefficient vers 1 en étant positif

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{moyen})^2}$$

Q_{obsi} : débit observé à pas de temps i

Q_{simi} : débit simulé à pas de temps i

Q_{moyen} : débit moyen

Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe sont comprises entre un et moins l'infini (non borné inférieurement). Un NASH négatif signifie que la qualité de la simulation est mauvaise.

Les scientifiques ont établi des critères en fonction de la valeur des coefficients de Nash-Sutcliffe :

- ✓ Pour une très bonne performance $0.75 < NSE \leq 1.0$
- ✓ Pour une bonne performance $0.65 < NSE \leq 75$
- ✓ Pour une performance satisfaisante $0.5 < NSE \leq 65$

- **Le coefficient de corrélation**

Le coefficient de corrélation est exprimé à travers la formule suivante :

Ce critère mesure la co-fluctuation des séries simulées et observées (Pangalou, 2003) si ce coefficient est égal à 1 on a une corrélation parfaite entre les variables étudiées des

Séries simulées et observées (Pangalou, 2003).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{obs_moy})(Q_{simi} - Q_{sim_moy})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{obs_moy})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{simi} - Q_{sim_moy})^2}}$$

- **PBIAS**

Le PBIAS ou l'erreur moyenne (Gupta et al.1999 ; Dawson et al.2007), exprime de pourcentage de BIAS moyen existant entre la série de données observée et la série de données simulées. Il est compris entre ± 100 . Une valeur négative indique une sous-estimation du débit, une valeur positive indique une surestimation du débit une valeur nulle indique une parfaite description de l'observation.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obsi}}$$

Selon les conditions de Moriasi (Moriasi et al.2007), le calage est supposé satisfaisant dans le cas des simulations des débits liquides si nous avons :

$$Nash \geq 0.5 ; R^2 \geq 0.5 \text{ et PBIAS compris entre } \pm 25\%$$

- **Erreur quadratique (RMSE)**

Pour ce qui est de cette (RMSE), les faibles valeurs expriment respectivement les faibles écarts entre les simules et les observés.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}$$

- **L'erreur sur la lame d'eau (error in volume)**

L'erreur sur la lame mesure la différence entre la lame d'eau observée et la lame d'eau simulée. Plus la valeur est proche de 0 meilleur est la simulation.

$$V = \frac{V_{obs} - V_{sim}}{V_{obs}}$$

- **Erreur sur le débit de pointe (error in peak)**

C'est la différence entre le débit de point observé et le débit de pointe simulé. Plus l'erreur est petite plus la valeur des débits de pointe sont similaires ce qui indique une bonne performance entre le débit simulé et observe.

$$Q_{peak} = \frac{Q_{peak_obs} - Q_{peak_cal}}{Q_{peak_obs}}$$

Les différents critères cités sont appliqués au modèle. De ce fait une bonne connaissance du modèle du modèle est indispensable.

- **Le critère KGE**

En 2009, Gupta et al. (2009) ont proposé une modification du critère de Nash qui améliore la performance des modèles pluie-débit en simulation, ce nouveau critère est nommé KGE. Il est basé sur le PBIAS, le coefficient de corrélation linéaire, entre les variables simulées et observées, la variabilité relative représentée par le quotient des écarts-types sur les variables simulées.

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

Avec :

$$r = \frac{\sum((Q_{sim} - Q_{sim_moy}) * (Q_{obs} - Q_{obs_moy}))}{\sqrt{\sum(Q_{sim} - Q_{sim_moy})^2} * \sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{obs_moy})^2}}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sum(Q_{sim} - Q_{sim_moy})^2}}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{obs_moy})^2}}$$

$$\beta = \frac{Q_{sim_moy}}{Q_{obs_moy}}$$

V. Résultats et discussion

5.1 Résultats

5.1.1 Caractéristiques hydrologiques du bassin versant de Banzon

Les caractéristiques hydrologiques du bassin versant de Banzon sont reportées au tableau 2.

Tableau 4: Caractéristiques hydrologiques du bassin versant de Banzon

Désignation	Unité	Valeur
Superficie	km ²	2788
Périmètre	km	387
Largeur	km	21
Longueur	km	133
Altitude moyenne	m	540
Altitude médiane	m	561
Pente moyenne	m/km	3.4
IG	-	1.95
Dénivelé spécifique	km	79

Il s'agit d'un grand bassin versant ($S > 2000 \text{ km}^2$) présentant un réseau hydrographique très dense se caractérisant par un cours d'eau principal alimenté par de très nombreux affluents (figure 9).

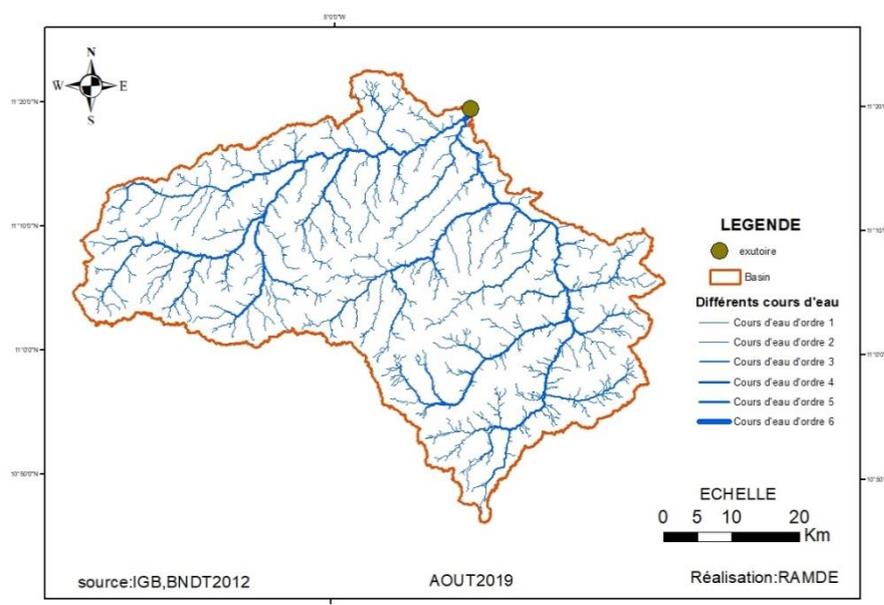


Figure 9: Réseau hydrographique du bassin versant de Banzon

5.1.2 Etude des données climatiques

5.1.2.1 Pluviométrie

Les études antérieures montrent une importante variabilité climatique en Afrique de l'Ouest avec une succession de périodes humides, périodes sèches et une période d'alternance (Nicholson, 1978, 2000 ; Paturel et al 1998, 2010), une rupture marquée par une baisse considérable de la pluviométrie des années 1970 (Le Barbé & lebel, 1997 ; Conway et al, 2009). Des années 1990 à nos jours, on assiste à une reprise des précipitations observées par plusieurs auteurs (lebel & Ali, 2009 ; Mhé & Paturel). Retenons que les pluies annuelles après 1990 demeurent déficitaires par rapport à celles de la période avant 1970 (L'Hôte et Al, 2002 ; Lebel & Ali, 2009).

En analysant la pluviométrie de notre zone d'étude représentée par celle de la station synoptique de Bobo Dioulasso (figure 10), nous remarquons une baisse à partir des années 1970. Après les années 70, nous remarquons une chute brutale de la pluviométrie avec une migration vers le sud des isohyètes 1200 à [700-1000]. Ensuite à partir des années 1984 on assiste à une montée légère de la pluviométrie mais toujours inférieure à la tendance des années 1970.

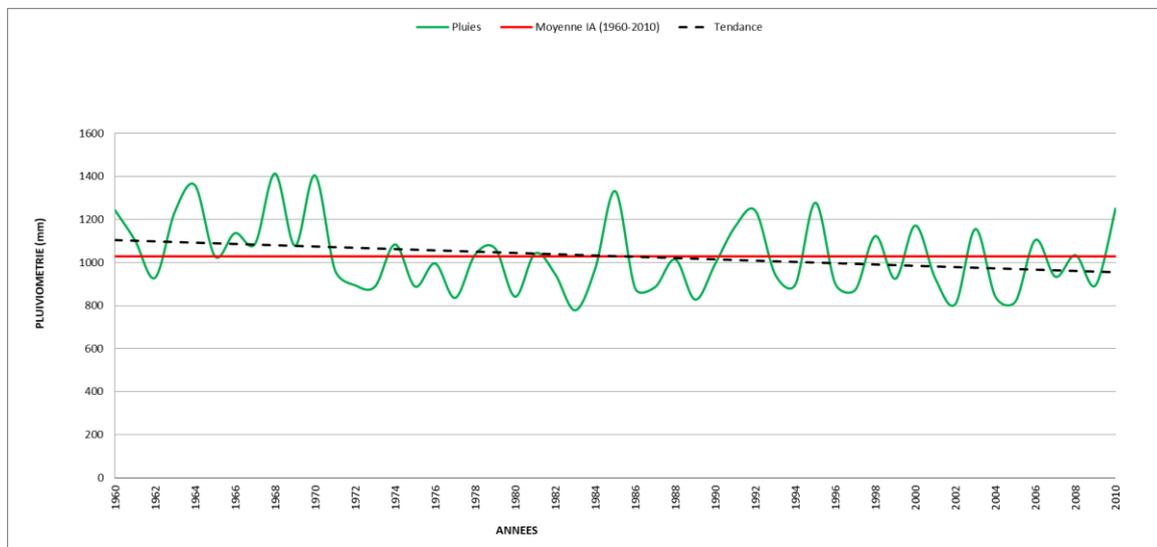


Figure 10: Évolution de la pluviométrie de la station de Bobo de 1900 à 2010

En vue de détecter d'éventuelles ruptures sur la série des données pluviométriques de la station de Bobo, certains tests statistiques comme la méthode de Pettit et la méthode de segmentation d'Hubert ont été utilisés et les résultats obtenus sont reportés au tableau 5.

Tableau 5: Ruptures de la série avec la méthode de PETTIT et de Hubert

Méthode de Pettit		Méthode de Hubert	
Année de rupture	Seuil de confiance (%)	Année de rupture	Déficit ou excédent (%)
1970	90	1970	19.91

Ces deux tests montrent une rupture avec une moyenne de 1181.8 mm avant 1970 et une autre rupture en 1985. En plus de l'analyse de la pluviométrie en utilisant le cumule annuel et les tests statistiques, on a utilisé l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) crée par Mckee et al (1993). Il répond à la formule suivante : $SPI = (X_i - X_m) / S_i$.

X_i est le cumule de la pluie pour une année i ;

X_m est la moyenne des pluies annuelles pour la pluie observée pour une série donnée ;

S_i est l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée ;

Cet indice définit la sévérité de la sècheresse en différence classe (Bergaoui et ALOUINI, 2001 ; ARDOIN-BARDIN et al. 2003 ; ARDOIN-BARIN, 2004). Les valeurs annuelles négatives indiquent une sècheresse par rapport à la période de référence choisie et les positive une situation humide. Cet indice a été employé par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe nous pouvons retenir entre autres (GIDDINGS et al. 2005 ; H.WU et al. 2001 ; BODIAN, 2014)

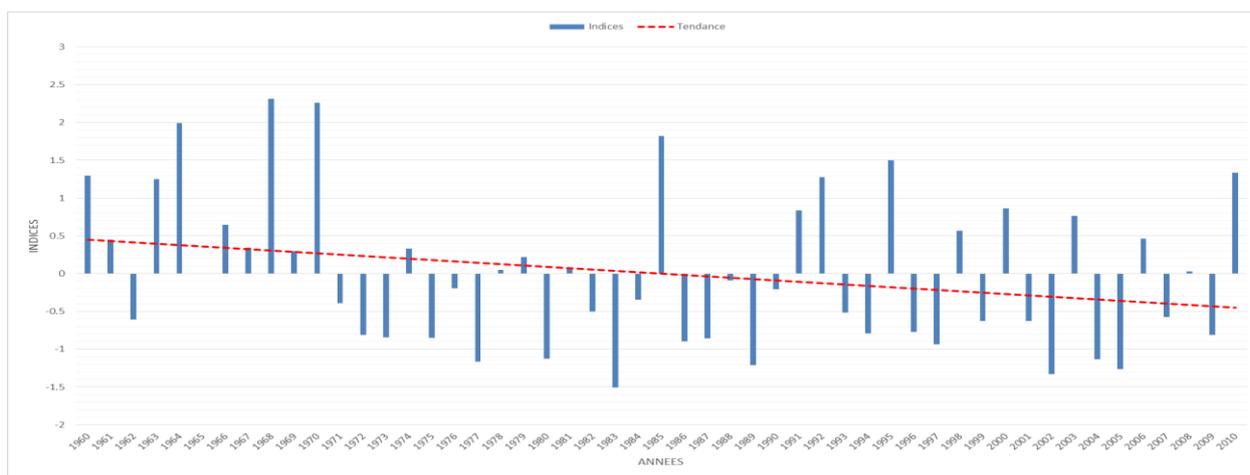


Figure 11: Indice standardisé des précipitations (SPI)

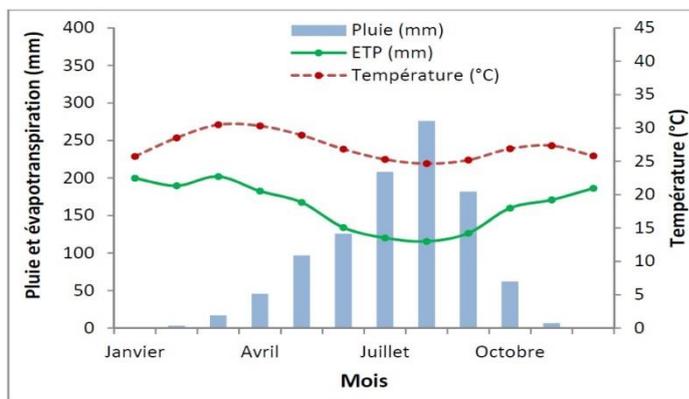
En se référant au SPI, on constate une période humide des années 1960 à 1970 avec un SPI qui tend vers 2.5 dans les 1968. Dans cet intervalle, il y a une prédominance des années

humides. À partir des 1970 cet indice quitte de 2.5 à -0.47 en 1971. De 1971 à 1978, il y a une prédominance des années sèches. Et de 1999 à notre jour, nous assistons une alternance entre les années humides et sèches.

5.1.2.2 Température

Les températures varient en fonction des saisons. Une saison sèche qui dure environ 8 mois (octobre à mai) et une saison pluvieuse qui dure environ 4 mois (juin à septembre).

Durant la saison pluvieuse, il fait moins chaud. Dans le mois de novembre à janvier nous assistons à des baisses de températures et du mois de février à mai, nous assistons à des températures très élevées.



- À travers l'analyse de ce graphique, la température varie entre 25°C et 30°C.
- L'évapotranspiration potentielle est maximale durant le mois de mars (202 mm) et minimale durant le mois d'août (116 mm). (Tirogo, 2016)
- Les mois les plus chauds sont entre Mars et Mai et les mois qui ont les plus faibles températures sont décembre et Janvier.

5.1.3 Étude des débits de 1960 à 2016

L'analyse des débits laisse voir des changements de vaste envergure.

Le module interannuel de la série 1959 à 2016 est de 8.28 m³/s. Les moyennes annuelles se caractérisent par une grande variabilité au tour du module interannuel. En début de la série, les moyennes annuelles sont légèrement supérieures au module interannuel. Sur une longue période (1982-1991) les moyennes annuelles restent inférieures au module interannuel. Elles s'alternent au tour du module interannuel de 1992 à 2012 avant d'être supérieures au module.

L'évolution des indices de débits au cours de la période nous confirme d'avantage cette variation avec une courbe de tendance à pente positive ce qui signifie une évolution des débits moyens annuels. Selon que l'indice de débits de l'année soit négatif ou positif, on pourra considérer que cette dernière est une année sèche ou humide durant la période.

- La période 1979-1980 est caractérisée presque totalement par une hydraulicité positive ($Id > 0$). Ce qui confère à cette période la qualification de période humide.
- Une longue période (1982-1991) fortement marquée par un déficit d'écoulement par rapport à la précédente, est caractérisée principalement par des indices négatifs ($Id < 0$) et par conséquent qualifiée de période sèche.
- Une période (1992-2012) est caractérisée par des alternances d'indices positifs et négatifs. Donc une alternance de saison sèche et humide.
- La période de 2012-2016 est marquée par une reprise des écoulements importants avec des hydraulicités positives et qualifiées de période humide.

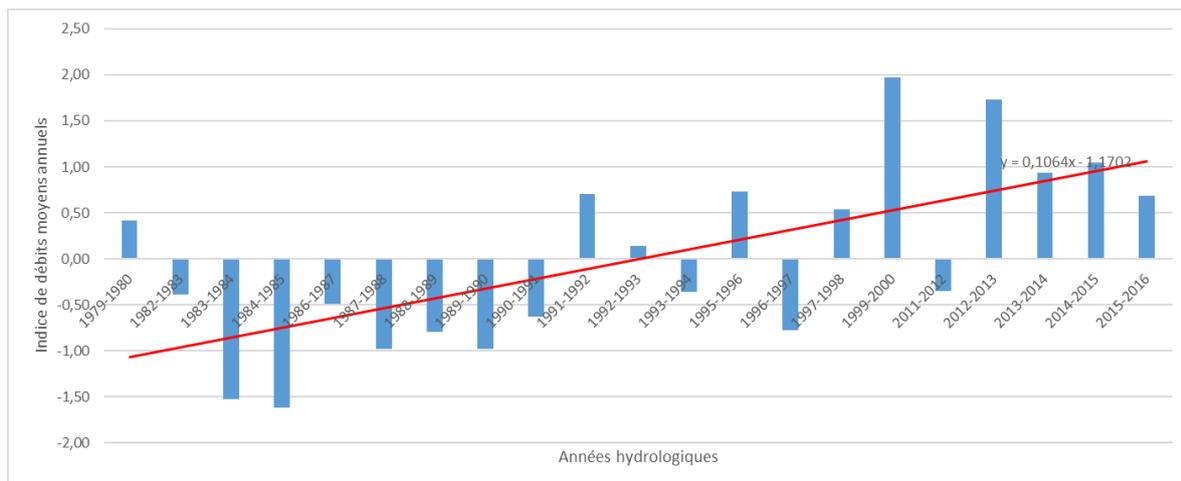


Figure 13: Indice des débits moyens annuels

5.1.4 Périodes de calage

Nous avons cinq séries de calage.

- Deux calages en période sèche 1982-1983 et 1987-1989 valider respectivement à 1985-1986 (période sèche) et 1990 (période sèche) ;
- Un calage en période 1985-1991(période sèche) et la validation sur la période de 1998-2000 (période d'alternance) ;
- Un calage sur la période de 1995-1999 (période alternance) et valider sur la période (2000-2001 (période d'alternance) ;

- Un calage sur la période de 1981-2008 et validé sur la période de 1985-1991(période sèche) et sur la période de 1994-2005 (période d’alternance).

Les simulations pour les périodes sèches et des périodes alternatives (sèche-humide) sont présentées au tableau 6.

Tableau 6: Résultats de la calibration-validation

Période de calage	performance de la calibration		période de validation	performance de la validation	
1985-1991	NASH	0.57	1998-2001	NASH	0.75
	R ²	0.79		R ²	0.85
	RMSE	8.77		RMSE	5.8
	PBIAS	-20%		PBIAS	1%
	Qpeak error	0.29		Qpeak error	0.43
	Volume error	0.28		Volume error	0.093
	KGE	0.54		KGE	0.73
1981-1982	NASH	0.643	1985-1986	NASH	0.794
	R ²	0.84		R ²	0.89
	RMSE	4.8		RMSE	4.3
	BIAS	-7.95%		BIAS	-7.67%
	Qpeak error	0.427		Qpeak error	0.148
	Volume error	0.00892		Volume error	0.000068
	KGE	0.78		KGE	0.87
1987-1989	NASH	0.61	1990	NASH	0.83
	R ²	0.80		R ²	0.91
	RMSE	4.9		RMSE	3.3
	BIAS	-10.07%		BIAS	-1.55%
	Qpeak error	0.27		Qpeak error	0.21
	Volume error	-0.1		Volume error	-0.0188
	KGE	0.76		KGE	0.89
1995-1999	NASH	0.613	2000-2001	NASH	0.71

	R ²	0.79		R ²	0.85
	RMSE	5.9		RMSE	7.9
	BIAS	-11%		BIAS	4.01%
	Qpeak error	0.174		Qpeak error	0.39
	Volume error	-0.11		Volume error	0.04
	KGE	0.76		KGE	0.76
1981-2009	NASH	0.54	1985-1991	NASH	0.64
	R ²	0.73		R ²	0.80
	RMSE	6.21		RMSE	6.40
	BIAS	-4.45		BIAS	-6.35
	Qpeak error	0.33		Qpeak error	0.32
	Volume error	0.045		Volume error	0.063
	KGE	0.6		KGE	0.65
	NASH	0.54	1994-2006	NASH	0.55
	R ²	0.73		R ²	0.76
	RMSE	6.21		RMSE	6.08
	BIAS	-4.45		BIAS	13.3
	Qpeak error	0.33		Qpeak error	0.45
	Volume error	0.045		Volume error	0.13
	KGE	0.6		KGE	0.53

Les valeurs des paramètres ajustés sont considérées comme satisfaisante lorsque les valeurs de $NASH \geq 0.5$ $R^2 \geq 0.5$; $PBIAS = \pm 0.25$ pour une simulation des débits liquides (Moriasi et al, 2007). Les résultats présentés respectent ces conditions. De ce fait nous pouvons dire que le modèle est performant sur tout l'ensemble du calage et validation et très performant pour la période de validation de l'année 1987-1989 et 1990. En effet ces années ont les coefficients suivant sur pour 1987-1989 ($NASH=0.78$; $R^2=0.89$, $RMSE=9.34$, $BIAS=-7.67\%$) pour l'année 1990 ($NASH=0.83$; $R^2=0.91$, $BIASI=-1.55\%$) notons ces années sont des années sèches. Ensuite le modèle a été calé sur une période sèche et validation s'est faite une période d'alternance respectivement les 1985-1995 pour le calage et 1998-2001 pour la validation.

Pour la calibration on obtient : NASH=0.52, $R^2=0.78$, RMSE=8.77, BIAS=-20%, pour validation ; NASH=0.72, $R^2=0.85$, RMSE=8.15, BIAS=1%. Ces données montrent que le modèle est performant. La calibration a été effectuée sur les années où nous remarquons une alternance d'années sèches et humides. L'erreur sur la lame d'eau écoulée tend vers zéro durant la phase calibrage-validation, l'erreur sur le débit de pic tend vers $0.4\text{m}^3/\text{s}$.

5.1.4.1 Calibration-validation sur les années alternance

Sur la période de 1995-1999 pour le calage les coefficients obtenus montrent une bonne performance du modèle (NASH=0.61, $R^2=0.79$, RMSE=5.9, PBIAS=-11%, Qpeak error=0.174, Verror=-0.11), quant à la période de validation 2000-2001 les coefficients obtenus sont meilleurs que ceux de la période de calibrage. (NASH=0.75, $R^2=0.85$, RMSE=5.8, PBIAS=1%, Qpeak error=0.43, Verror=0.093). Ensuite le modèle a été calé sur une période sur une période sèche et la validation s'est faite sur une période d'alternance période sèche et humide (figures 14 et 15).

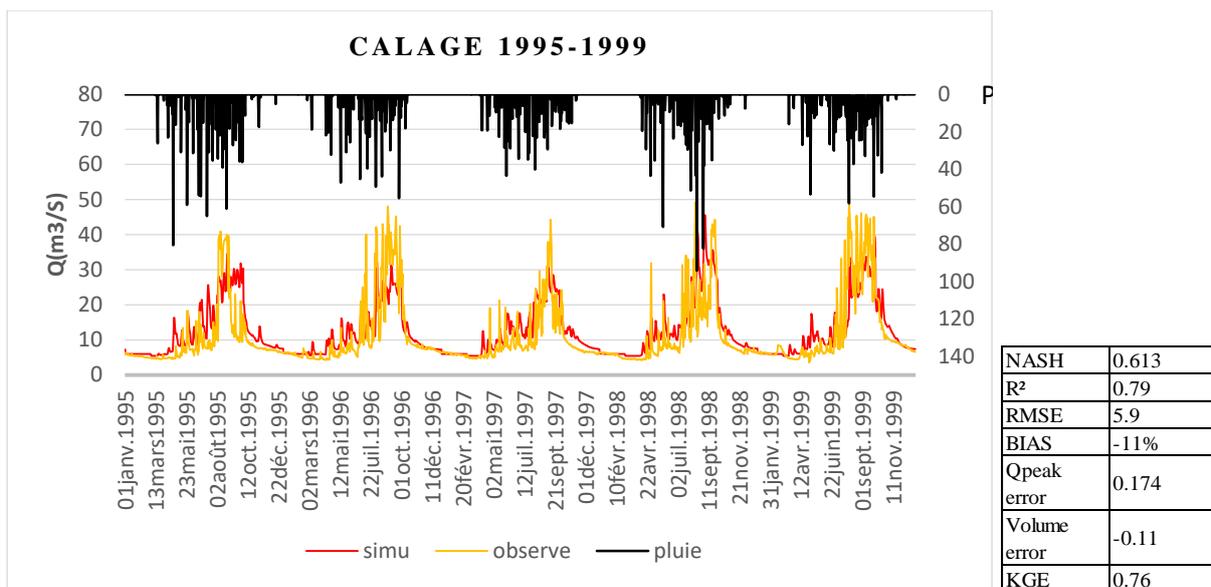


Figure 14: Phase de calage 1995-1999

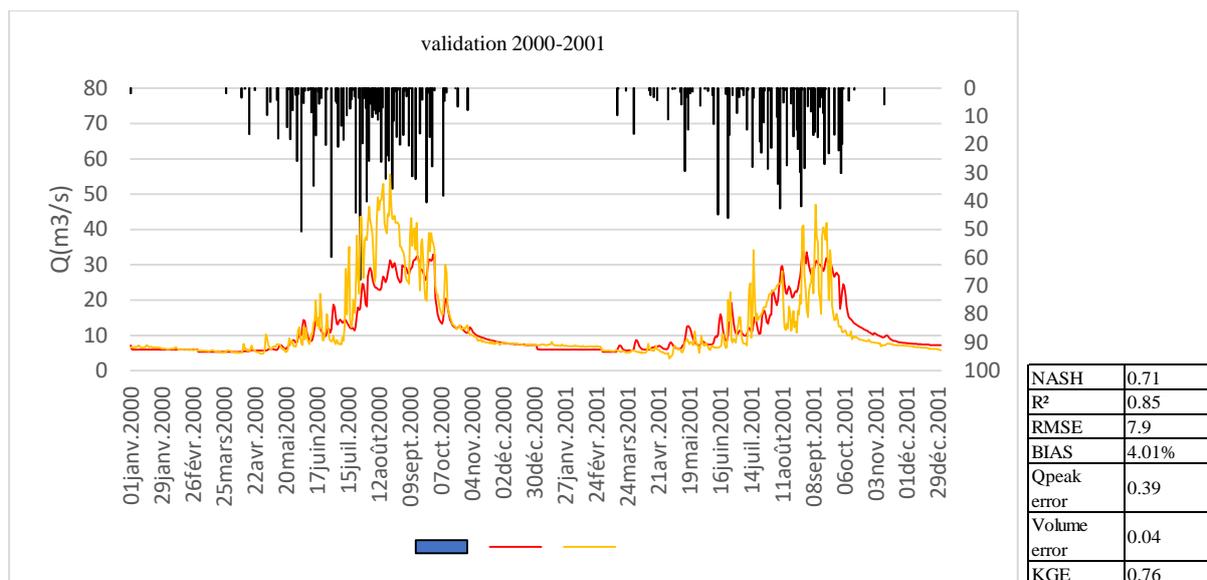


Figure 15: Phase de validation 2000-2001

5.1.4.2 Calibrage sur une période sèche et validation sur une période d'alternance

Sur la période de calibrage de 1985-1991 les conditions de Moriasi sont respectées modèle satisfaisant (NASH=0.52, $R^2=0.78$, RMSE=8.77, BIAS=-20%, Qpeakerror=0.29, Verror=0.28). Pour la période de validation d1998-2001 les valeurs des différents coefficients montrent (NASH=0.74, $R^2=0.85$, RMSE=8.15, BIAS=1%, Qpeakerror=0.43, Verror=0.0938) un modèle très performant (figures 16 et 17).

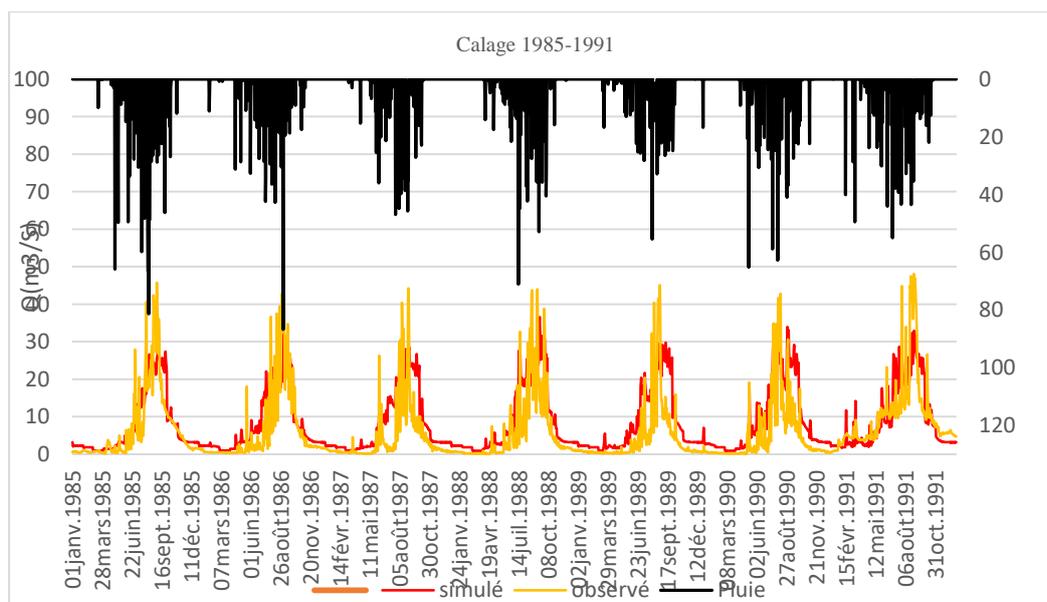


Figure 16: Phase de calibrage 1985-1991

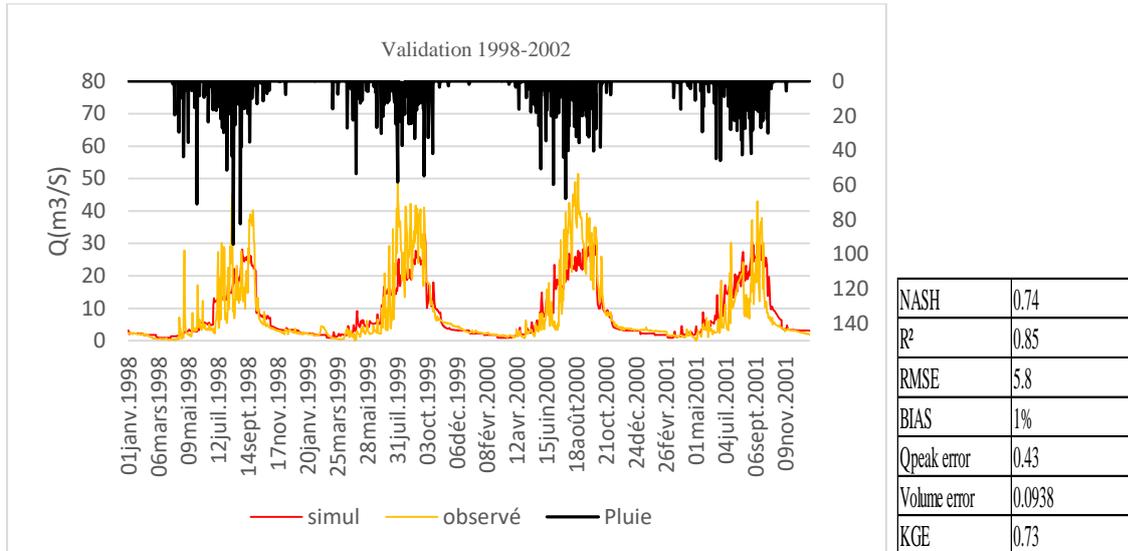
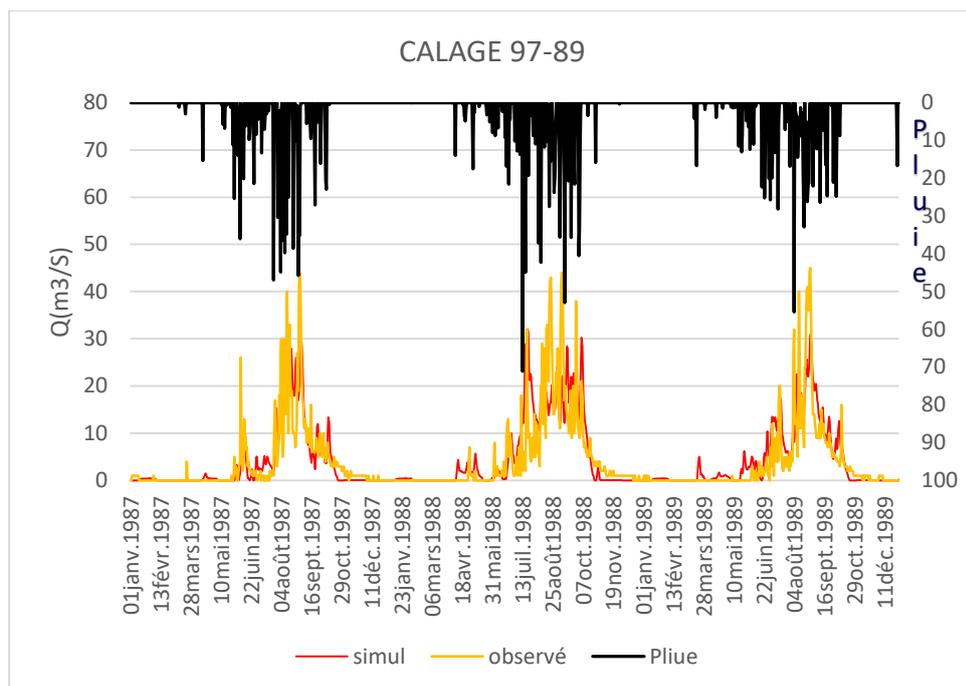


Figure 17: Phase de validation 1998-2002

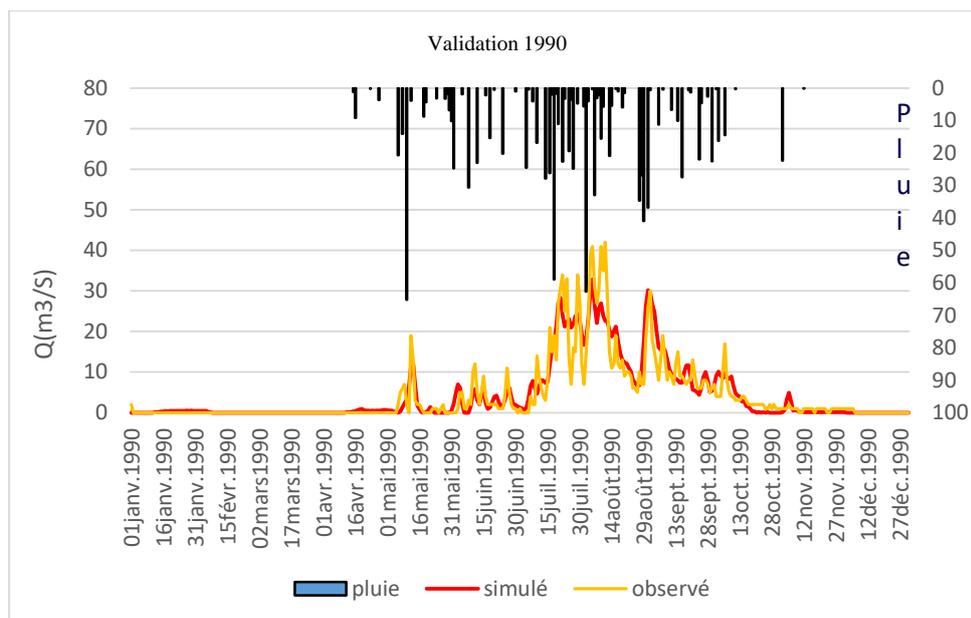
5.1.4.3 Calage validation sur une période sèche

Durant les périodes de calage 1981-1982, 1987-1989, les coefficients obtenus montrent une bonne performance avec l'erreur sur la lame d'eau qui tend vers zéro un coefficient de corrélation d'environ 0.8. Sur la période de la validation respectivement 1985-1986, 1970 les coefficients obtenus montrent que le modèle est très performant avec un coefficient de Nash de l'ordre de 0.8 et un coefficient de corrélation de 0.90 (figures 18 à 21).



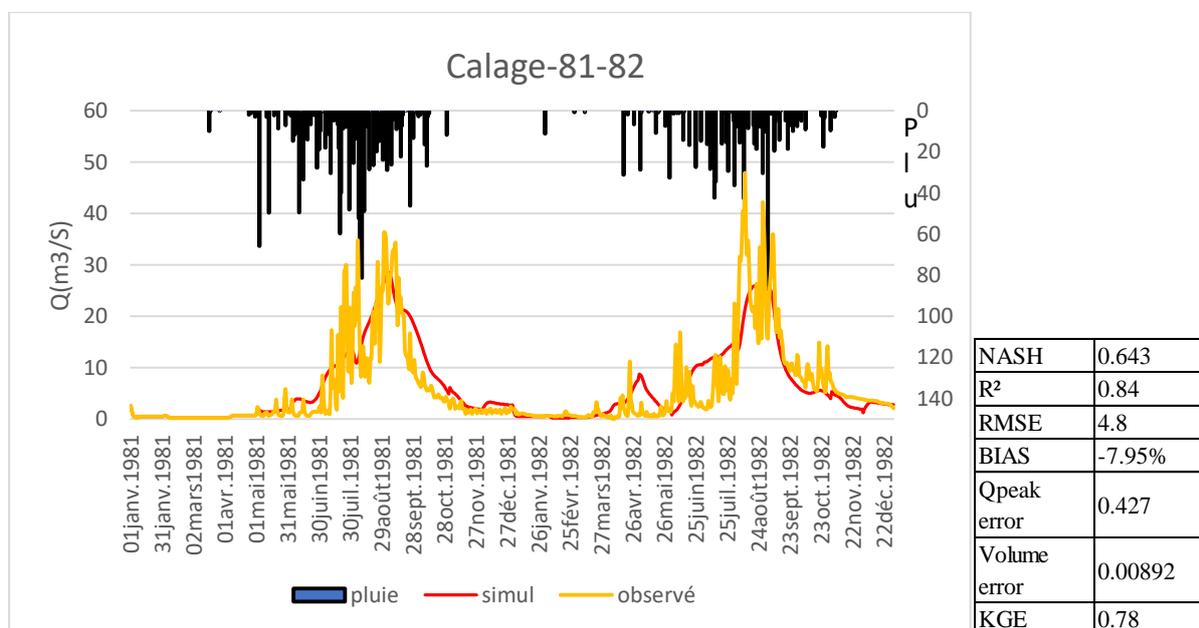
NASH	0.61
R ²	0.8
RMSE	4.9
BIAS	-10.07%
Qpeak error	0.27
Volume error	-0.1
KGE	0.76

Figure 18: Phase de calage 1987-1989



NASH	0.83
R ²	0.91
RMSE	3.3
BIAS	-1.55%
Qpeak error	0.21
Volume error	-0.0188
KGE	0.89

Figure 19: Phase de validation 1990



NASH	0.643
R ²	0.84
RMSE	4.8
BIAS	-7.95%
Qpeak error	0.427
Volume error	0.00892
KGE	0.78

Figure 20: Phase de calage 1981-1982

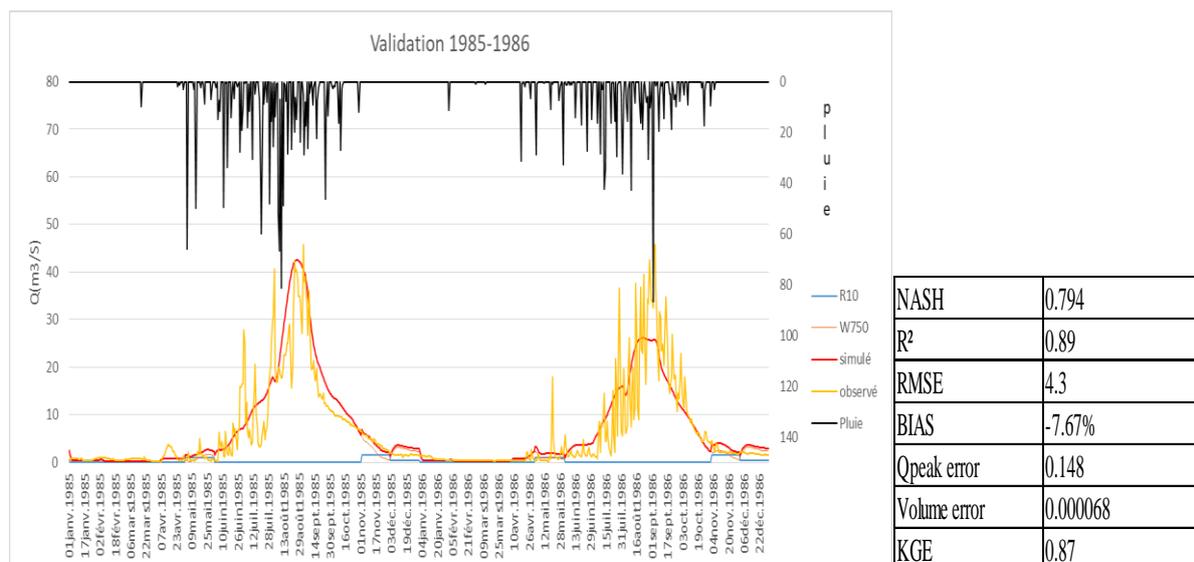


Figure 21: Phase de validation 1985-1986

5.1.4.4 Calage validation sur 28 ans

Sur la période de calage de 1981-2008 (figures 22 à 24) les conditions de Moriasi sont respectées et le modèle est satisfaisant. Sur cette période l'erreur sur la lame d'eau écoulée est de 0.045 et l'erreur sur le débit de point est de 0.33. Pour les périodes validations, 1985-1991 et 1994-2005, les conditions de Moriasi sont respectées cce qui signifie que le modèle est performant. L'erreur sur le débit pic est de 0.45 pour 1994-2005 et 0.31 pour 1985-1991, l'erreur sur la lame est de 0.13 pour 1995-2005 et 0.0653 pour la période de 1985-1990.

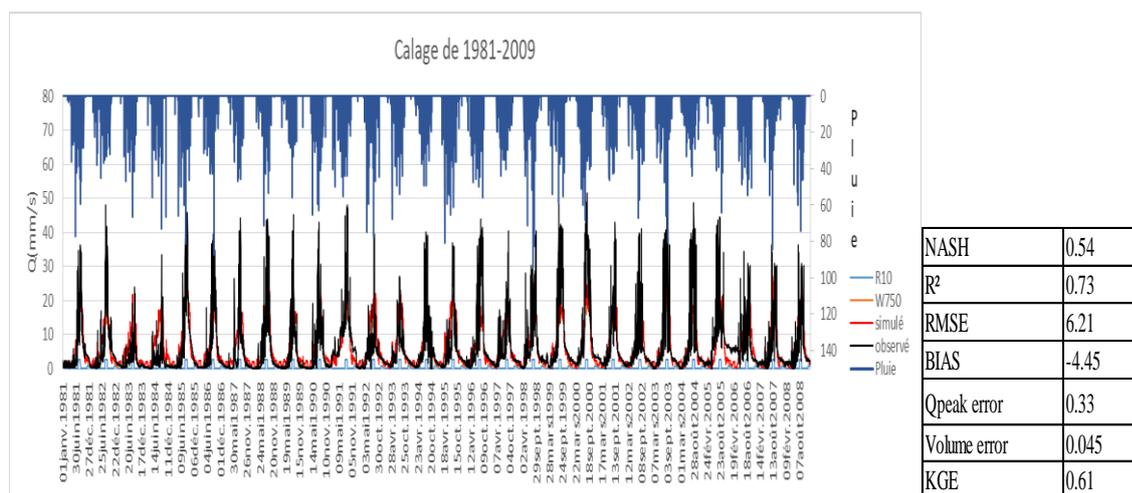


Figure 22: Phase de calage 1981-2009

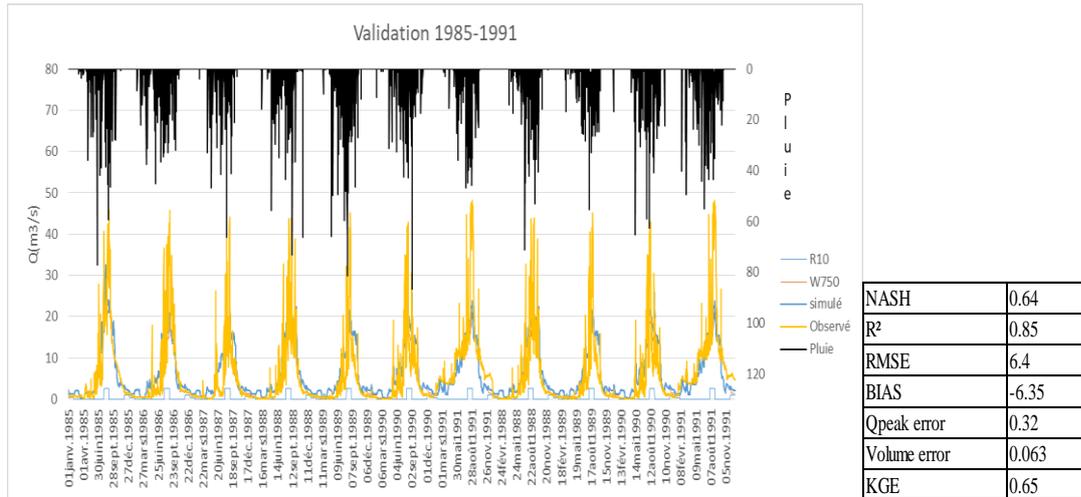


Figure 23: Phase de validation 1985-1991

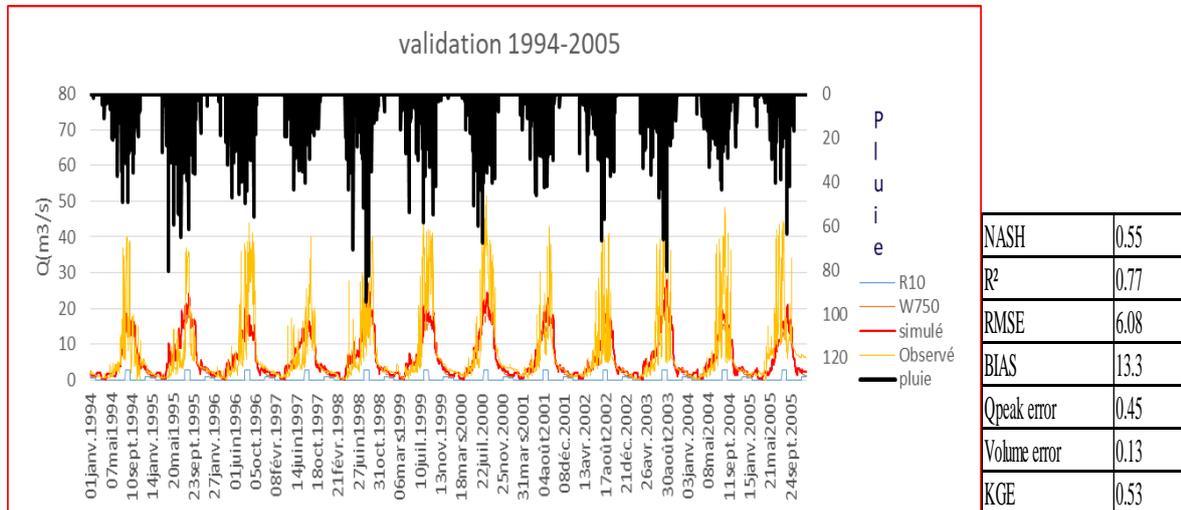


Figure 24: Phase de validation 1994-2005

5.1.5 Estimation du bilan hydrique

Le bilan hydrique d'un système repose sur le principe de la loi de conservation de la masse. Il résulte de l'intégration de l'équation de continuité sur un certain volume de sol et sur une certaine durée. Le bilan comprend les précipitations qui se partagent entre l'évaporation, le ruissellement, l'infiltration. L'eau qui s'infiltré dans le sol se partage entre l'écoulement hypodermique, écoulement horizontal des couches supérieures du sol jusqu'à la nappe (Tirogo, 2016). La pluie efficace constitue la part des précipitations totales qui n'est pas évaporée et qui va contribuer aux écoulements et la recharge (Wheater et al., 2008 ; Beven, 2012) cité dans (Tirogo, 2016). Le bilan hydrique a été simulé (tableau 6) en utilisant une

année présentant une bonne performance (1985 ; 1987 ; 1988 ;1989 ;1990 ; 1991 ; 1999 ; 2000)

Tableau 6: Simulation du bilan hydrique pour les années de bonne performance

Années	Pluie	ETR	RECHARGE	RUISSELLEMENT	Δs
1985	1331.5	997.16	277.5	50	6.84
1987	866.3	608.99	215.60	44.46	-2.75
1988	1014.5	740.97	215.57	59.99	-2.02
1989	827.5	525.98	254	47.27	0.25
1990	994.9	685.87	232.82	74.62	1.59
1991	1149.98	800.26	270	77.22	2.5
1999	1068	681.48	275.60	110.93	5.27
2000	1171.7	717.16	318.93	133.4	2.21
module interannuel	1053.05	719.73	257.50	74.74	1.74
proportion par rapport à la précipitation	100	68.35	24.45	7.10	0.16

L'examen de ce tableau révèle que l'évaporation est la composante la plus élevée. Quant à l'eau de surface destinée pour les besoins de l'irrigation, elle varie entre 700 et 900 mm. Ces valeurs sont conformes à celles obtenues par d'autres auteurs. En effet, Tirogo (2016) a obtenu une ETR d'environ 812mm pour une pluie de 1010mm dans la vallée du Kou et Kouanda (2019) l'estime à 735mm pour une pluie de 813. Entre 1990 et 2000, Lemoalle & Devaraj (2009), estiment que la part de l'évapotranspiration réelle sur le bassin de la Volta varie entre 78% et 87% des pluies. De ce fait l'évaporation représente la plus importante des composantes du bilan et elle est en hausse depuis les années 1960. Combiné à une diminution de la pluviométrie, elle contribue à réduire la part d'eau disponible pour les écoulements et la recharge de la nappe dans cette région (Tirogo, 2016). Cette recharge de la nappe représente est le deuxième terme le plus important du bilan. En les comparants aux études antérieures les valeurs sont approximatives.

5.2 Discussion

Cette étude nous a permis de tester la performance du modèle HEC-HMS sur plusieurs années et d'établir le bilan hydrologique. Sur l'ensemble des différents calages effectués, les conditions de Moriasi sont respectées, témoignant de la performance du modèle. Pour les différentes validations, nous arrivons au même constat pour ce qui concerne les conditions de Moriasi traduisant d'une très bonne simulation. Le modèle HEC-HMS arrive à reproduire la forme de l'hydrogramme en respectant le début et la fin. Cependant, les débits de pointe sont sous-estimés et ceci provient certainement des fluctuations fréquentes observées sur les hauteurs d'eau. Cette instabilité sur la limnimétrie remarquée sur cette station hydrométrique de Banzon provient de l'existence d'une zone aménagée de plus de 400 ha où la gestion de l'eau n'est pas optimale, surtout en face des aléas climatiques. Durant les différentes périodes de calage et de validation, les différents coefficients obtenus témoignent d'une robustesse du modèle. Quant au bilan hydrique, nous remarquons que l'évapotranspiration réelle et la recharge de la nappe représentent respectivement la première et la deuxième composante en termes d'importance. Quant au ruissellement, il représente la composante du bilan hydrique la plus faible. Ces résultats sont en parfaite harmonie avec ceux trouvés par Koanda (2019) qui a montré pour le cas du bassin versant de Samendeni, situé à l'aval de notre zone d'étude, la recharge interannuelle tourne autour de 170 mm sur le Mohoum supérieur à Nwokuy et les autres composantes sont respectivement $P (100\%) = \text{Ruissèlement} (4.3\%) + \text{recharge} (12.9\%) + \text{ETR} (84.8\%) + \text{Variation de stock} (-1\%)$. Au regard de ces différentes analyses, les résultats obtenus avec le modèle HEC-HMS sont en parfait accord avec les résultats obtenus par plusieurs études antérieures.

VI. Conclusion

La modélisation hydrologique est d'une importance capitale pour une meilleure connaissance des écoulements des cours d'eau. L'utilisation du modèle HEC-HMS pour simuler les écoulements des eaux du bassin versant de Banzon a permis de reproduire la forme des hydrogrammes sans décalage, avec soit une sous-estimation ou soit une sur-estimation des débits de pointe. Nous remarquons qu'en fonction des années de calage et de validation, le modèle se comporte de manière acceptable dans la simulation des écoulements de ce bassin versant. Sur les critères d'évaluation, les valeurs obtenues témoignent d'une bonne performance. En effet, ces valeurs durant la phase de calibration ($\text{NASH}=0.7$, $\text{R}^2=0.83$, $\text{RMSE}=7.27$, $\text{BIAS}=-7.95$) et ($\text{NASH}=0.61$, $\text{R}^2=0.79$, $\text{RMSE}=7.67$, $\text{BIAS}=-10.07$) sont

largement supérieures à celles recommandées pour l'acceptation d'une simulation de même pour la phase de validation (NASH=0.78, $R^2=0.89$, RMSE=9.34, BIAS=-7.64) , (NASH=0.83, $R^2=0.97$, RMSE=7.42, BIAS=-1.55%). Malgré la difficulté du modèle à simuler correctement les débits de pointe, nous remarquons que nos résultats sont proches de ceux obtenus lors d'études antérieures effectuées sur cette zone. Quant au bilan hydrique effectué sur 8 ans, nous remarquons une de l'ETR avec une valeur moyenne interannuelle de l'ordre de 739.mm, une Recharge de 277.mm, un Ruissellement d'environ 77 mm et un Ds de l'ordre de 1mm. La répartition de ces différentes composantes du bilan montre que l'ETR et la Recharge représentent les composantes les plus importantes avec des valeurs avoisinantes respectivement 68% et 25% de la pluie. Ces résultats sont proches de ceux obtenus dans la même zone par plusieurs auteurs En effet, les valeurs issues des études de Sogreah Ingenierie (1994) donne les valeurs suivantes : Pluie (100%)=ETR (65%) + R (12%) + I (23%). L'estimation des composantes du bilan par Kouamé (2019) sur la zone de Badara montre la répartition : Pluie (100%)=ETR (68%) + R (5%) + I (28%).

Au regard de tous ces constats, nous pouvons dire que le modèle HEC-HMS simule normalement les écoulements du bassin versant de Banzon localisé dans la partie supérieure du Mouhoun au Burkina Faso.

VII. Références bibliographiques

- Ahbari, A. (2013) «Le bassin versant de Rhéraya : Modélisation pluie-débit et prédilection du comportement hydrologique.
- Amadou Lamine Mar, Philippe Gineste, Hamattan Mohamed, Ludovic Tapsoba, & Pierre Javelle: «Modélisation débit-durée-fréquence appliquée aux grands bassins versants du Burkina Faso».
- Bechroune, A. (2009, 2010): «Élaboration d'une base de données hydrologique du Bassin Versant de la Soummam via le modèle hydrologique HEC-HMS».
- D. Roy, S. Begam, S. Ghosh, & S. Jana. (2013) «Calibration and validation of HEC-HMS model for a river basin in eastern india». Consulté à l'adresse ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences
- Dakoure, D. (2003). « Étude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de taoudeni (Burkina Faso - mali) - essai de modélisation ». Thèse de doctorat, Université Paris VI: Université Paris VI - Pierre et Marie Curie.
- Derouane, J. (2008). « Étude hydrogéologique et modélisation mathématique du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudenni au Burkina Faso ». Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest (VREO).
- Henine, H. (s. d.) «Interface entre un modèle hydrologique / modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous Web inclut les SIG».
- I. Khaddor, M. Achab, & A. Hafidi Alaoui. (s. d.) «Hydrological simulation (Rainfall-Runoff) of Kalaya watershed (Tangier, Morocco) using Geo-spatial tools». Consulté à l'adresse journal of Water Sciences & Environment Technologies ISSN: 2508-9250
- Klein, J.-C., & Herbaud, J. (1984) «Étude du régime hydrologique de la volta noir en amont confluent du sourou».
- KONE, A. (1992) «Disparités géographiques du paludisme dans la plaine aménagée de Banzon.
- Kouanda, B. (2019). « Modélisation intégrée du Complexe Mouhoun supérieur-Sourou dans

- le contexte des changements climatiques ». Docteur en science et technologie de l'eau, de l'énergie et de l'environnement, Laboratoire Eaux Hydro-systèmes et Agriculture (LEHSA): Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- MAREUIL, A. (2005) «Impacts des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : cas de la rivière châteauguay».
- Mokhtari, c. (2015, 2016) «Modélisation pluie-débit par le logiciel « hec-hms » de sous-bassin versant l'oued sahel».
- NKA, N. B. (2016): «Contribution à l'actualisation des normes hydrologiques en relation avec les changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest».
- Sauret, E. (2008). « Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou (Burkina Faso) ».
- Sogreah. (1994). « Étude des ressources en eaux souterraines de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources halieutiques ». Direction des Études et de la Planification - Direction Régionale de l'Eau des Hauts-Bassins: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Tientore, I. (2017): «Analyse de la variabilité hydrologique du Mouhoun et impact sur la gestion du réservoir de lery au Burkina Faso en saison sèche à l'horizon 2030».
- Tirogo, J. Y. (2016). « Étude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso ». Thèse en cotutelle, Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH, 2iE) / Laboratoire Milieux environnementaux, Transferts et Interactions dans les Hydrosystèmes et les Sols (METIS, UPMC): Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) / Université Pierre et Marie Curie (UPMC). Réf : 2ie/2016-08.
- Tramblay, Y. (2012): «Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine, Maroc».
- Venkatesh, M. (2019a): «Creating SCS Curve Number Grid using Land Cover and Soil Data».
- Venkatesh, M. (2019b): «HMS-Model Development using GeoHMS».
- Zineb, M., Jaloun, A., Farah, E. H., Lahrach, A., & Abdel-ali, C. (2017): «Étude comparative du modèle semi-distribue HEC HMS avec le modèle global GR4J appliqué au bassin versant d'innaouene (Maroc) »Consulté à l'adresse American Journal of Innovative Research and Applied Sciences. ISSN 2429-5396 I www.american-jiras.com

Annexes

Annexes

Annexe 1: les valeurs utilisées pour la calibration de 1981-1983 xiii
Annexe 2: les valeurs utilisées pour la calibration 1985-1992..... xiv
Annexe 3: Les valeurs utilisées pour la calibration 1987-1989 xv
Annexe 4: Les valeurs utilisées pour la calibration 1995-2000 xvi
Annexe 5: Les valeurs utilisées pour la calibration 1981-2008 xvii
Annexe 6: les années utilisées pour le bilan hydrique xix

Annexe 1: les valeurs utilisées pour la calibration de 1981-1983

1981-1983				
W750			W940	
loss	Initiale Abstraction	200	Initiale Abstraction	20
	Curve Nuber	30	Curve Nuber	10
	Impervios (%)	30	Impervios (%)	20
tranform	Standart lag (HR)	300	Standart lag (HR)	200
	Peaking coefficient	0.5	Peaking coefficient	0.5
baseflow	javnier	0	javnier	60
	fervrier	0	fervrier	30
	Mars	0	Mars	20
	Avril	0	Avril	60
	Mai	0	Mai	0
	Juin	0	Juin	0
	Juillet	0	Juillet	0
	Août	250	Août	0
	Septembre	0	Septembre	0
	Octobre	0	Octobre	0
	Novembre	0	Novembre	0
	Decemnbre	0	Decemnbre	0
W560			690	
loss	Initiale Abstraction	0	Initiale Abstraction	1
	Curve Nuber	30	Curve Nuber	80
	Impervios (%)	10	Impervios (%)	10
tranform	Standart lag (HR)	200	Standart lag (HR)	300
	Peaking coefficient	0.5	Peaking coefficient	0.5
baseflow	javnier	0	javnier	0
	fervrier	0	fervrier	10
	Mars	0	Mars	10
	Avril	0	Avril	10
	Mai	20	Mai	0
	Juin	0	Juin	40
	Juillet	0	Juillet	60
	Août	0	Août	0
	Septembre	20	Septembre	30
	Octobre	0	Octobre	0
	Novembre	30	Novembre	10
	Decemnbre	10	Decemnbre	60

Annexe 2: les valeurs utilisées pour la calibration 1985-1992

1985-1992				
W750			W940	
loss	Initiale Abstraction	0	Initiale Abstraction	0
	Curve Nuber	5	Curve Nuber	58
	Impervios (%)	0	Impervios (%)	0
transform	lag Time (min)	56	lag Time (min)	3000
baseflow	janvier	0	janvier	30
	février	0	février	30
	Mars	0	Mars	20
	Avril	0	Avril	60
	Mai	0	Mai	0
	Juin	0	Juin	0
	Juillet	80	Juillet	0
	Août	60	Août	100
	Septembre	20	Septembre	40
	Octobre	50	Octobre	0
	Novembre	10	Novembre	40
	Décembre	30	Décembre	20
W560			690	
loss	Initiale Abstraction	0	Initiale Abstraction	1
	Curve Nuber	78	Curve Nuber	80
	Impervios (%)	0	Impervios (%)	10
transform	Standart lag (HR)	3000	lag Time (min)	300
baseflow	janvier	20	janvier	10
	février	20	février	10
	Mars	10	Mars	10
	Avril	20	Avril	10
	Mai	30	Mai	10
	Juin	80	Juin	10
	Juillet	150	Juillet	10
	Août	150	Août	10
	Septembre	250	Septembre	10
	Octobre	60	Octobre	10
	Novembre	10	Novembre	10
	Décembre	10	Décembre	10

Annexe 3: Les valeurs utilisées pour la calibration 1987-1989

1987-1989				
W750			W940	
loss	Initiale Abstraction	200	Initiale Abstraction	20
	Curve Nuber	90	Curve Nuber	10
	Impervios (%)	0	Impervios (%)	20
transform	lag Time (min)	500	lag Time (min)	2
baseflow	javnier	40	javnier	0
	fevrier	30	fevrier	0
	Mars	5	Mars	0
	Avril	40	Avril	0
	Mai	10	Mai	0
	Juin	0.5	Juin	0
	Juillet	30	Juillet	0
	Août	20	Août	10
	Septembre	5	Septembre	0
	Octobre	0.5	Octobre	0
	Novembre	0	Novembre	0
	Decemnbre	0	Decemnbre	0
W560			690	
loss	Initiale Abstraction	0	Initiale Abstraction	1
	Curve Nuber	30	Curve Nuber	80
	Impervios (%)	10	Impervios (%)	10
transform	lag Time (min)	100	lag Time (min)	3000
baseflow	javnier	0	javnier	0
	fevrier	0	fevrier	0
	Mars	0	Mars	0
	Avril	0	Avril	0
	Mai	0	Mai	0
	Juin	0	Juin	0
	Juillet	0	Juillet	0
	Août	20	Août	0
	Septembre	0	Septembre	0
	Octobre	0	Octobre	0
	Novembre	1	Novembre	0
	Decemnbre	0	Decemnbre	0

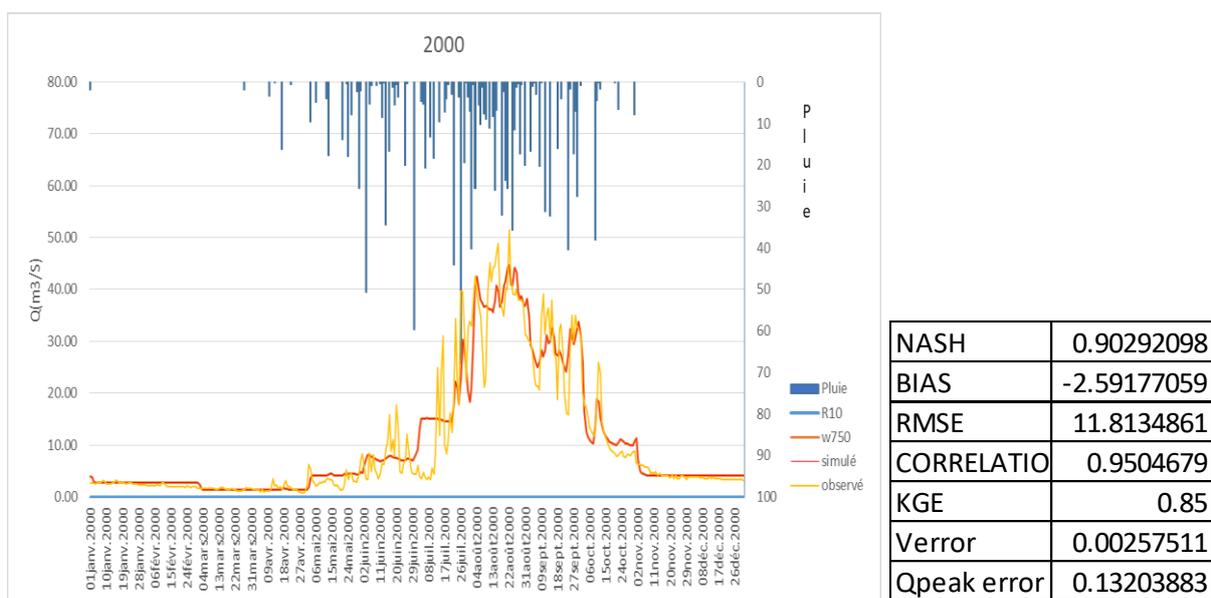
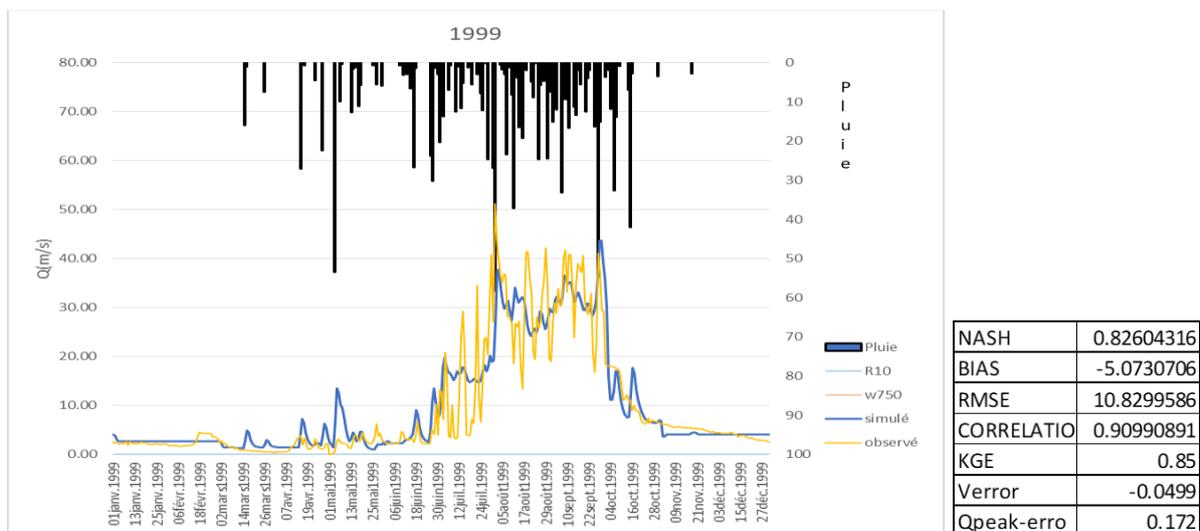
Annexe 4: Les valeurs utilisées pour la calibration 1995-2000

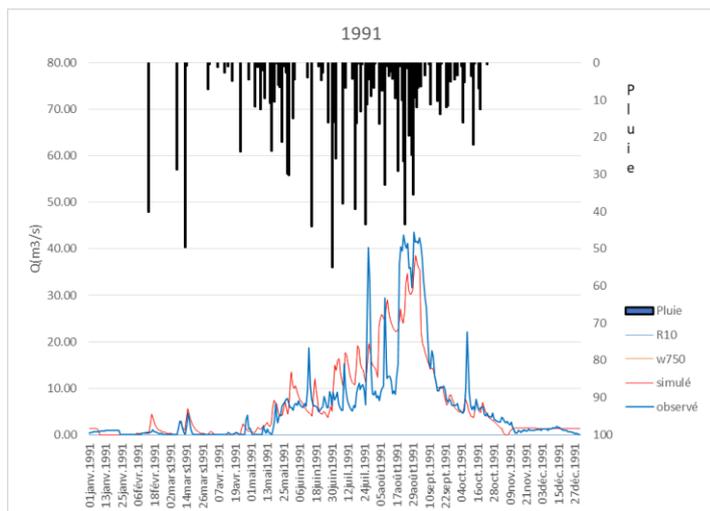
1995-2000				
W750			W940	
loss	Initiale Abstraction	0	Initiale Abstraction	0
	Curve Nuber	10	Curve Nuber	58
	Impervios (%)	50	Impervios (%)	0
transform	lag Time (min)	30000	lag Time (min)	56
baseflow	janvier	20	janvier	20
	février	20	février	20
	Mars	20	Mars	20
	Avril	20	Avril	20
	Mai	20	Mai	20
	Juin	20	Juin	20
	Juillet	20	Juillet	20
	Août	20	Août	20
	Septembre	20	Septembre	20
	Octobre	20	Octobre	20
	Novembre	20	Novembre	20
	Décembre	20	Décembre	20
W560			690	
loss	Initiale Abstraction	0	Initiale Abstraction	0
	Curve Nuber	78	Curve Nuber	56.877
	Impervios (%)	0	Impervios (%)	0
transform	lag Time (min)	34	lag Time (min)	4000
baseflow	janvier	40	janvier	20
	février	40	février	20
	Mars	30	Mars	20
	Avril	30	Avril	20
	Mai	30	Mai	20
	Juin	30	Juin	20
	Juillet	30	Juillet	20
	Août	140	Août	20
	Septembre	220	Septembre	20
	Octobre	50	Octobre	20
	Novembre	60	Novembre	20
	Décembre	60	Décembre	20

Annexe 5: Les valeurs utilisées pour la calibration 1981-2008

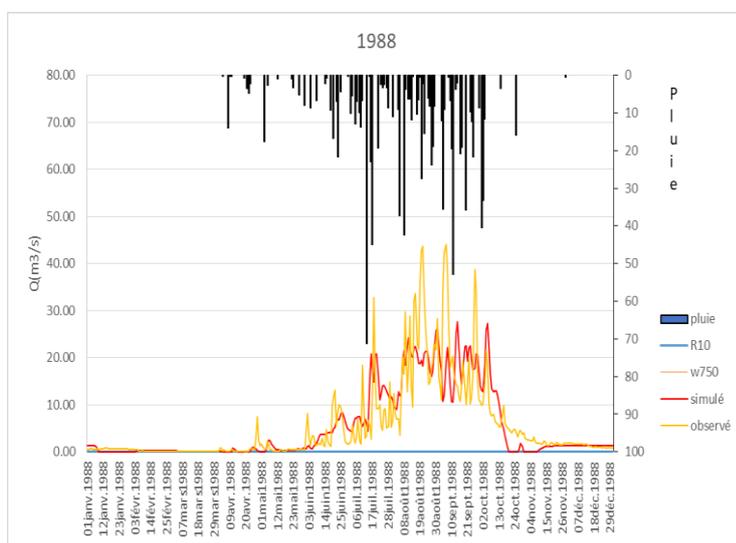
1981-2009				
W750			W940	
loss	Initiale Abstraction	1	Initiale Abstraction	0
	Curve Nuber	60	Curve Nuber	1
	Impervios (%)	0	Impervios (%)	100
tranform	Standart lag (HR)	500	Standart lag (HR)	200
	Peaking coefficient	0.5	Peaking coefficient	0.5
baseflow	javnier	30	javnier	20
	fervrier	10	fervrier	0
	Mars	0	Mars	0
	Avril	20	Avril	10
	Mai	0	Mai	20
	Juin	0	Juin	20
	Juillet	50	Juillet	0
	Août	150	Août	0
	Septembre	0	Septembre	0
	Octobre	0	Octobre	0
	Novembre	0	Novembre	10
	Decemnbre	0	Decemnbre	40
W560			690	
loss	Initiale Abstraction	500	Initiale Abstraction	50
	Curve Nuber	50	Curve Nuber	80
	Impervios (%)	10	Impervios (%)	30
tranform	Standart lag (HR)	200	Standart lag (HR)	200
	Peaking coefficient	0.5	Peaking coefficient	1
baseflow	javnier	10	javnier	0
	fervrier	0	fervrier	20
	Mars	0	Mars	10
	Avril	0	Avril	0
	Mai	0	Mai	0
	Juin	0	Juin	0
	Juillet	0	Juillet	0
	Août	50	Août	0
	Septembre	20	Septembre	0
	Octobre	0	Octobre	0
	Novembre	20	Novembre	0
	Decemnbre	10	Decemnbre	0

Annexe 6: les années utilisées pour le bilan hydrique

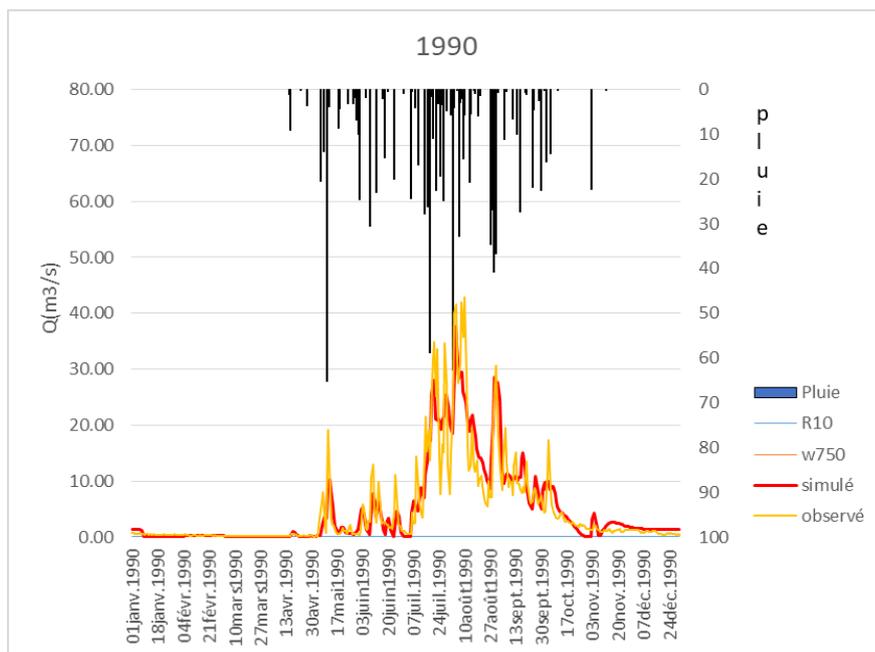




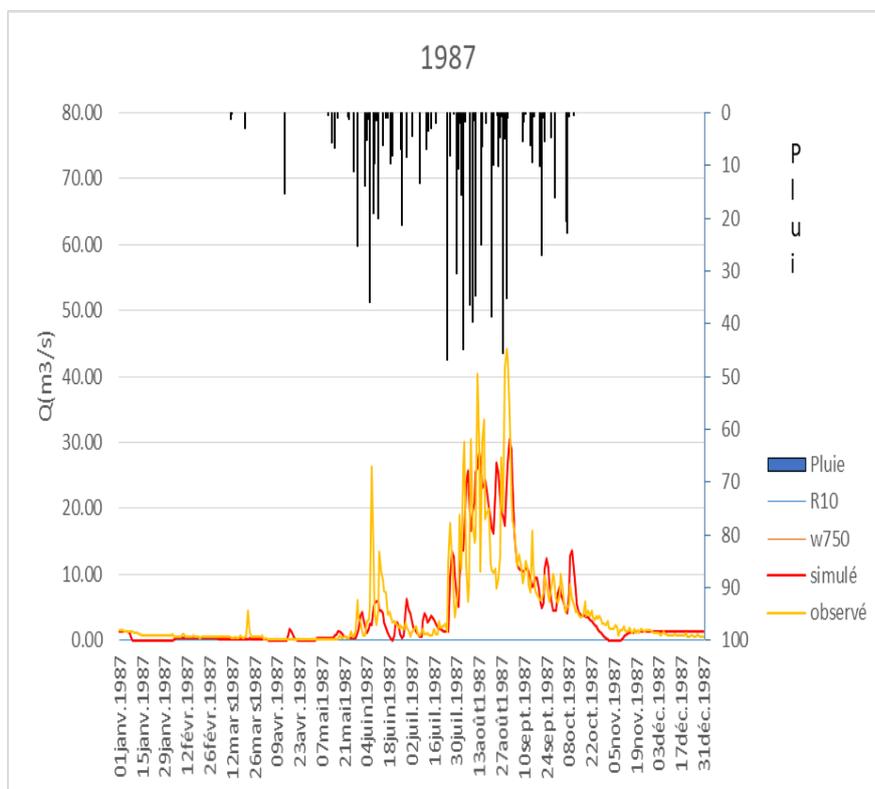
NASH	0.7474374
BIAS	-4.73115015
RMSE	8.34692649
CORRELATIO	0.86515685
Verror	-0.04763999
Qpeak-error	0.11697248
KGE	0.88



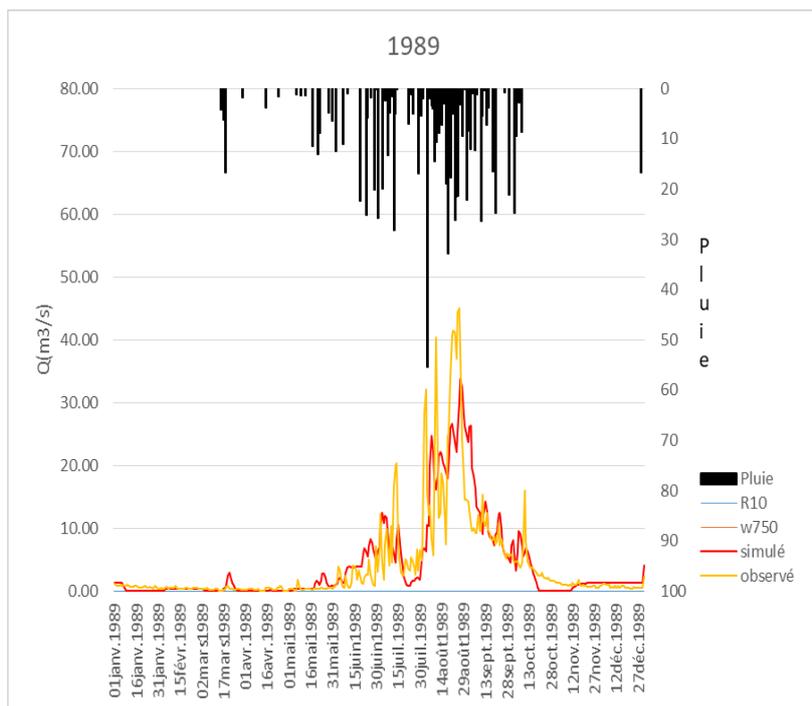
NASH	0.63846866
BIAS	3.103014
RMSE	7.5942555
CORRELATION	0.80283401
KGE	0.8
Verror	0.0327
Qpeak error	0.3669



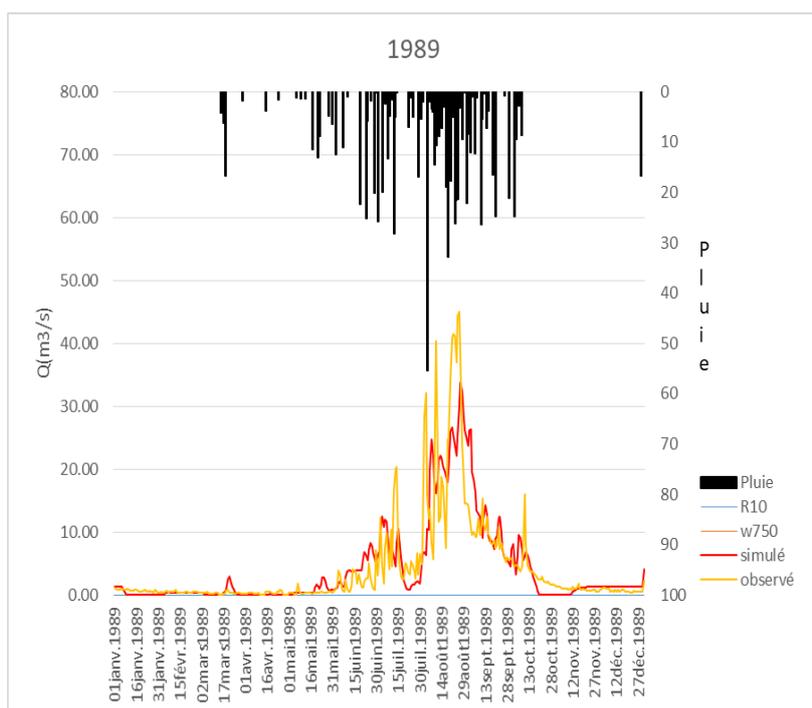
NASH	0.84246162
BIAS	-3.12101162
RMSE	7.49399308
CORRELATION	0.91819322
KGE	0.91
Verror	-0.029
Qpeak error	0.121



NASH	0.65903606
BIAS	5.74789763
RMSE	6.61095759
CORRELATIO	0.81904553
Verror	0.0574
Qpeak error	0.312
KGE	0.94



NASH	0.66084676
BIAS	-0.53516451
RMSE	6.78279915
CORRELATIO	0.81622077
KGE	0.97
Verror	-0.0051
Qpeak error	0.252



NASH	0.66084676
BIAS	-0.53516451
RMSE	6.78279915
CORRELATIO	0.81622077
KGE	0.97
Verror	-0.0051
Qpeak error	0.252