



Analyse du fonctionnement et modélisation hydrologique à l'aide des modèles GR2M et SMAP du bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso.

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES
OPTION : EAUX SOUTERRAINES

...

Présenté et soutenu publiquement le 08 novembre 2016 par

Julius Boopahbé BANANEH JUNIOR

Travaux dirigés par : Dr Lawani MOUNIROU

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Amadou KEITA

Membres et correcteurs : Dr Malicki ZOROM
Roland YONABA

Promotion [2014/2015]

Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin d'étude affectueusement à :

L'Eternel, qui a fait les cieux et la terre. Lui dont le nom est l'Eternel des armées, le tout puissant et fort dans le combat pour avoir toujours été à mes côtés durant tout mon cursus scolaire.

Mon père BANANEH Ehnenki et Ma mère SOUFENE Ageline qui ont toujours été là pour m'apporter leurs soutiens.

Ma chérie Aline pour son soutien et son affection.

Mes frères et sœurs pour leurs encouragements.

A toutes ces personnes je voudrais que le Seigneur leur rende au-delà de ce qu'ils ont pu faire pour moi.

Remerciements

Je voudrais témoigner toute ma reconnaissance à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail de mémoire.

- ✚ Je tiens à remercier sincèrement du fond de cœur mes encadreurs Dr Lawani MOUNIROU et Dr Dial NIANG enseignants-chercheurs à 2iE qui ont proposé ce thème et qui ont bien voulu suivre mon travail. Leurs ardeurs au travail et leurs rigueurs m'ont été d'un apport inestimable.
- ✚ Je voudrais également remercier tous les enseignants du 2iE pour la qualité de la formation reçue au cours de mon cursus scolaire,
- ✚ J'adresse toute ma reconnaissance à tous mes camarades pour leur soutien et le bon cadre de vie qu'ils m'ont donné durant ma formation à 2iE.
- ✚ Je terminerai enfin sur mes parents qui ont su me donner ce qu'il me fallait. Mon père Bananeh Ehnenki et Ma mère pour leurs soutiens financiers, moraux et spirituels. Vous avez été tout pour moi et je voudrais ici vous en remercier. Ma pensée va à l'endroit de mes soeurs, Anastassie, Geraldine, Farida, Zaouditou, Mireille et Constance qui m'ont toujours soutenu, un grand merci à vous tous.

RESUME

L'importance des problèmes liés à l'utilisation de l'eau dans la zone sahélienne a entraîné, depuis une trentaine d'années, le développement des études sur des problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à l'exutoire des petits, moyens et grands bassins versants. Le bassin versant de Tougou situé au Nord du Burkina Faso localisé dans la zone sahélienne connaît le même problème tel que la disponibilité en eau, la variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource en eau, sur la qualité, les contraintes liées à la gestion de la ressource. Pour répondre à ses problèmes, la maîtrise du fonctionnement hydrologique du bassin versant suite à une excitation pluviométrique est donc nécessaire. Pour ce fait, un modèle hydrologique est nécessaire et devient un outil incontournable dans la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant et dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau ainsi que dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues.

Pour une maîtrise du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Tougou, cette étude aborde d'abord le bilan hydrologique du bassin versant, puis la modélisation pluie-débit à partir des modèles GR2M version Mouehli et SMAP, et enfin à partir des scénarii climatiques, la simulation des écoulements jusqu'à l'horizon 2050.

Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier le critère d'optimisation le mieux adapté permettant de reproduire au mieux les débits observés, puis nous avons identifié le modèle le plus performant sur le bassin versant. Les premiers résultats révèlent que le modèle SMAP répond au mieux au fonctionnement hydrologique avec une valeur de NASH de 95.38 % obtenue avec le critère NASH sur racine carré des débits. L'analyse de sensibilité des paramètres de chaque modèle a permis d'identifier les paramètres les plus sensibles et comment ces derniers agissent sur chaque modèle. Enfin, la simulation des écoulements sur le bassin versant de Tougou à partir des scénarii climatiques montre que les écoulements ne seront pas déficitaires par rapport à la décennie actuelle.

Mots clés

Processus hydrologique, modélisation hydrologique, GR2M, SMAP, Tougou, Sahel, Burkina Faso

ABSTRACT

The importance of the use of water problems in the Sahel has led, for thirty years, the development of studies on qualitative and quantitative problems of flow at the outlet of small, medium and large Watershed.

Watershed Tougou located in northern Burkina Faso located in the Sahel region knows the same problem as water availability, variability in time and space of the water resource, the quality, the constraints management resource. To address its problems, control of hydrological catchment basin following a rainfall excitement is necessary. The hydrological model is essential tool in understanding the hydrological behavior of the watershed, in the rational use of water resources and watershed in the fight against flood-related natural disasters.

For control of the hydrological functioning of Tougou basin, this study began with a water balance of the catchment area and the rainfall-runoff modeling from models GR2M Mouehli version SMAP, and finally from the climate scenarios, simulation flows until 2050.

First, we sought to identify the optimization criterion best suited to reproduce at best the observed flow rates, and we identified the most efficient model of the watershed. Initial results indicate that the SMAP model best meets the hydrological NASH with a value of 95.38% obtained with the standard with the square root of the flow. The sensitivity analysis of the parameters of each model has identified the most sensitive parameters and how they affect each model. Finally, the simulation of flows in the watershed Tougou from climatic scenarios shows that runoff will not be loss-making over the current decade.

Keywords

Hydrological process; hydrological modeling; Tougou, Sahel, Burkina Faso

SYMBOLES

Eclt : Ecoulement

Cap : Capacité d'un réservoir du modèle

ETP : Evapotranspiration (mm)

P : La Pluie (mm)

Q : Débit (m³/s)

S : Réservoir

SIGLES

GR : Génie Rural

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

SMAP : Soil Moisture Accounting Procédure

Sommaire

Dédicace	1
Remerciements	2
RESUME	3
SYMBOLES ET ABREVIATIONS	5
Sommaire	6
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux	10
A – Introduction générale.....	11
A – 1 Contexte général de l’étude	11
A – 2 Problématique.....	11
B – Objectif principal	11
B – 1 Objectifs spécifiques.....	11
C – Démarche générale adoptée	12
C – 1 Méthodologie adoptée	12
Chapitre I: MODELISATION HYDROLOGIQUE ET MODELE PLUIE – DEBIT : PRESENTATION DES MODELES GR2M ET SMAP ET LEUR APPLICATION.....	13
Introduction	14
I – Relation pluie – débit	14
I – 1 Bilan hydrologique d’un bassin versant.....	14
I – 2 Fonction de production	14
I – 3 Fonction de transfert	15
II – Modélisation pluie – débit	17
II – 1.1 Définitions	17
II – 1.2 Etat de l’art de la modélisation hydrologique	17
II – 2 Présentation des modèles GR2M et SMAP	18
II – 2.1 Présentation du modèle GR2M version de Mouelhi 2002.....	19
II – 2.2 Présentation du modèle SMAP	21
II – 3 Simulation et optimisation des modèles	24
II – 3.1 Echantillon de calage et de validation	24
II – 3.2 Critère d’optimisation et critères de qualité du modèle	24
II – 3.3 Méthode numérique d’optimisation.....	25
Conclusion partielle.....	26

Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE, DES DONNEES ET CARACTERISATION DU REGIME D'ECOULEMENT	27
Introduction	28
I – Localisation du bassin versant de Tougou	28
I – 1 Climat et réseau hydrographie	28
I – 1.1 Climat.....	28
I – 1.2 Réseau hydrographie.....	29
I – 2 Sols, végétation et états de surface du bassin versant	29
I – 3 Contexte humain	31
I – 4 Bref aperçu sur le dispositif de mesure	32
II – Présentation des données de l'étude	33
II – 1 Origine des données pluviométriques, d'évapotranspiration et hydrométriques	33
II – 2 Analyse et traitement des données.....	33
II – 2.1 Calcul des pluies et débits mensuels à partir des données journalières	33
II – 3 Quelques valeurs caractéristiques des données.....	34
II – 3.1 Pluies mensuelles et annuelles.....	34
II – 3.2 Ecoulements mensuels et annuels.....	35
Conclusion partielle.....	35
Chapitre III : OPTIMISATION DES ECOULEMENTS ACTUELS ET SIMULATION DES ECOULEMENTS FUTURS DU BASSIN DE TOUGOU A L'AIDE DU MODELE GR2M ET SMAP	36
Introduction	37
I – Approche méthodologique	37
II – Application du modèle GR2M.....	38
II – 1 Résultats du calage avec NASH sur les débits.....	39
II – 2 Résultats du calage avec NASH sur la racine carrée des débits	40
II – 3 Analyse de sensibilité des paramètres.....	41
III – Application du modèle SMAP.....	43
III – 1 Résultats du calage avec NASH sur les débits	43
III – 2 Résultats du calage avec NASH sur la racine carrée des débits	45
III – 3 Analyse de sensibilité des paramètres	46
IV – Comparaison et choix du modèle le plus performant.....	48
V – Simulation des écoulements futurs du bassin versant.....	49
Conclusion partielle.....	51
D – Conclusion générale et recommandations	52
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53

ANNEXES 54

Liste des figures

Figure 1 : Fonction de production	15
Figure 2 : Fonction de transfert	15
Figure 3 : Bilan hydrologique d'un bassin (Extrait de rapport de Mounirou, 2005).....	16
Figure 4 : Architecture du modèle GR2M (Version de Mouelhi, 2002)	21
Figure 5 : Principe de fonctionnement du modèle SMAP.....	23
Figure 6 : Localisation du bassin versant de Tougou. (Extrait de la thèse de Mounirou, 2012)	28
Figure 7 : Couverture pédologique du bassin versant de Tougou (extrait de rapport de Koussoubé, 2007).....	30
Figure 8 : Exemple du paysage du bassin illustrant les différents types de végétation et de sols (extrait de la thèse de MOUNIROU, 2012).	31
Figure 9 : graphique de calage avec NASH sur les débits (GR2M).....	39
Figure 10 : graphique de calage avec NASH sur la racine carré des débits (GR2M)	41
Figure 11 : graphique de calage avec NASH sur les débits (SMAP).....	44
Figure 12 : graphique de calage avec NASH sur la racine carré des débits (SMAP).....	45
Figure 13 : simulation des écoulements futurs 2015-2024.....	49
Figure 14 : simulation des écoulements futurs 2025-2034.....	49
Figure 15 : simulation des écoulements futurs 2035-2050.....	50

Liste des tableaux

Tableau 1 : les caractéristiques de la pluviométrie pour l'année 2005.....	34
Tableau 2 : les caractéristiques de la pluviométrie pour 2006	34
Tableau 3 : les volumes mensuels écoulés pour l'année 2005	35
Tableau 4 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur les débits (GR2M)	39
Tableau 5 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur les débits (GR2M)	39
Tableau 6 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur la racine carrée des débits (GR2M).....	40
Tableau 7 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur la racine carrée des débits (GR2M)	40
Tableau 8 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur les débits (SMAP)	44
Tableau 9 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur les débits (SMAP)	44
Tableau 10 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur la racine carrée des débits (SMAP).....	45
Tableau 11 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur la racine carrée des débits (SMAP).....	45
Tableau 12 : Comparaison et choix du modèle le plus performant	48

A – Introduction générale

A – 1 Contexte général de l'étude

L'économie des pays en développement dépend fortement de la ressource en eau. Pour mieux la planifier et mieux la gérer, il faut mieux la connaître dans sa dimension spatiale et dans sa dimension temporelle. C'est ainsi que la connaissance et la maîtrise de cette ressource sont aujourd'hui des éléments fondamentaux. Pour y parvenir, l'utilisation d'un modèle pluie-débit est particulièrement intéressante puisqu'il peut permettre d'estimer la ressource disponible en vue d'un aménagement mais aussi prévoir l'évolution de cette ressource dans les années ou décennies à venir en le combinant avec des scénarii climatiques.

A – 2 Problématique

Le problème de la disponibilité de l'eau se pose en zone sahélienne du Burkina Faso avec bien plus d'acuité que dans d'autres régions du pays. Il n'en demeure pas moins que la variabilité dans le temps de la ressource en eau, sur la qualité, la demande toujours croissante et les contraintes liées à l'ensemble des usages impliquent une gestion de plus en plus rigoureuse. En partant du principe que l'on gère un risque d'autant mieux que l'on s'y est préparé, il est nécessaire, pour prévenir toute situation de crise, de connaître au mieux la disponibilité de celle-ci renouvelable, mais aléatoire. Ainsi, une des approches pour l'évaluation des débits d'un bassin versant est l'ajustement d'un modèle hydrologique. Les modèles de transformation pluie – débit sont de puissants outils mathématiques utilisés pour la prévision et la prédétermination des débits de crue ou d'étiage, la simulation des débits pour le comblement ou la reconstitution des débits dans les séries hydrométriques. Ainsi, le bassin versant de Tougou sur lequel porte cette étude est un site idéal car il comporte un barrage à son aval. L'agriculture irriguée rendue possible à la faveur de ce barrage se trouve tributaire des apports annuels. L'estimation des apports annuels du barrage peut constituer un outil d'aide à la décision au droit des aménageurs.

B – Objectif principal

L'objectif principal de cette étude est d'estimer raisonnablement les écoulements à l'exutoire du bassin versant de Tougou à l'aide des modèles GR2M (Version Mouelhi, 2002) et SMAP à partir des scénarii climatiques.

B – 1 Objectifs spécifiques

Comme objectifs spécifiques, il s'agit de :

- Bien comprendre le fonctionnement des modèles GR2M et SMAP sur le bassin de Tougou ;
- Identifier clairement le critère d'optimisation le mieux adapté permettant de reproduire au mieux les débits observés ;
- Identifier le modèle le plus performant sur le bassin versant ;
- Faire une analyse de sensibilité des paramètres de ce modèle ;
- A partir des scénarii climatiques, faire une simulation des écoulements jusqu'à l'horizon 2050

C – Démarche générale adoptée

C – 1 Méthodologie adoptée

Le travail réalisé est organisé de la façon suivante :

- a) Synthèse de l'ensemble des travaux réalisés sur le bassin versant de Tougou ;
- b) Bref aperçu sur la modélisation hydrologique et présentation des modèles GR2M et SMAP ;
- c) Présentation de la zone d'étude et constitution d'une base de données de pluie, d'ETP et de débits observés ;
- d) Calage et validation de chaque modèle sur le bassin versant de Tougou ;
- e) Choix du modèle le plus performant et simulation des écoulements jusqu'à horizon 2050.

Le présent rapport est structuré en trois (03) chapitres. Le premier chapitre est destiné à situer la démarche de modélisation pluie – débit dans le contexte de l'hydrologie et à donner un aperçu général du fonctionnement des modèles GR2M (Mouelhi, 2002) et SMAP. Dans le second chapitre, nous présenterons le bassin versant de Tougou et ainsi que les caractéristiques du régime d'écoulement. Dans le troisième chapitre, on procédera à l'optimisation des écoulements actuels à l'aide des modèles GR2M et SMAP puis on simulera les écoulements futurs à l'aide du modèle le plus performant.

Chapitre I : MODELISATION HYDROLOGIQUE ET MODELE PLUIE – DEBIT : PRESENTATION DES MODELES GR2M ET SMAP ET LEUR APPLICATION

Introduction

La modélisation hydrologique est un outil qui permet de générer à partir des données de pluie, d'ETP et des caractéristiques du bassin versant, les débits les plus proches possibles de ceux réellement ou potentiellement observables sur ce bassin versant ; un modèle pluie-débit est censé représenter la transformation de la pluie tombée sur le bassin versant en débit à son exutoire au cours d'un pas de temps désiré : journalier, mensuel, annuel, pluriannuel. Il permet également de disposer d'une séquence continue de débits généralement plus longue que la série observée et pouvant être utilisée pour analyser les risques de défaillance d'un ouvrage. L'intérêt de l'utilisation d'un modèle hydrologique pour évaluer les écoulements à partir des précipitations est de confronter le modèle à la 'réalité hydrologique' c'est donc, tout simplement le mettre en œuvre pour le caler et tester sa performance.

I – Relation pluie – débit

I – 1 Bilan hydrologique d'un bassin versant

Le bassin versant, ou bassin de drainage, d'une rivière considérée en un point donné de son cours, est défini comme l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel la pluie tombée se dirige vers ce point de la rivière. Toute l'eau qui ruisselle à l'intérieur de ce contour transite donc par la section en ce point appelée exutoire (Mounirou, 2005).

L'eau précipitée à l'échelle du bassin versant se répartit en eau interceptée, retenue à la surface du sol, infiltrée et ruisselée. La totalité de l'eau interceptée et retenue à la surface du sol et une partie de l'eau infiltrée est perdue par évaporation et évapotranspiration. La hauteur d'eau ruisselée en surface ou pluie nette se transforme en ruissellement direct et constitue l'essentiel de l'écoulement vers l'exutoire. Les autres composantes de l'écoulement à l'exutoire sont l'écoulement retardé et le débit de base qui proviennent respectivement de l'eau infiltrée en zone saturée et de l'eau des nappes souterraines.

I – 2 Fonction de production

Dans les modèles pluie – débit, on cherche en premier lieu à connaître la quantité d'eau pouvant contribuer au ruissellement en considérant comme pertes : l'infiltration, l'évaporation et l'évapotranspiration. En d'autres termes, on recherche l'opérateur mathématique qui permet de transformer la pluviosité en pluie nette disponible pour le ruissellement. Cet opérateur variable d'un modèle à un autre, est appelé fonction de production (fig-1).

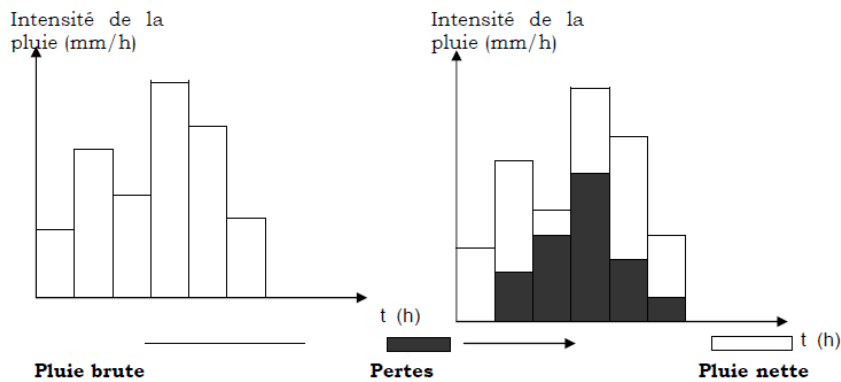


Figure 1 : Fonction de production

Les principaux paramètres de la pluie (pluviosité, intensité et fréquence de pluie) peuvent être déterminés à partir des mesures sur le terrain à l'aide des appareils et instruments spécifiques. Par contre, les pertes par l'évaporation ou par l'infiltration sont difficiles à évaluer. Ces pertes sont fonction de différents facteurs qui dépendent entre autres du types du sol (textures, structure) du couvert végétal (nature, densité), des conditions climatiques (température, humidités vent) et de l'état initial d'humidité du sol.

I – 3 Fonction de transfert

Après l'obtention de la quantité d'eau de pluie disponible pour l'écoulement, il est intéressant de connaître la façon dont elle est acheminée dans le réseau. Ainsi, l'opérateur mathématique permettant de transformer la pluie nette en hydrogramme de ruissellement est appelé fonction de transfert. On y retrouve généralement trois compartiments à savoir : le ruissellement direct, le ruissellement retardé et le ruissellement de base.

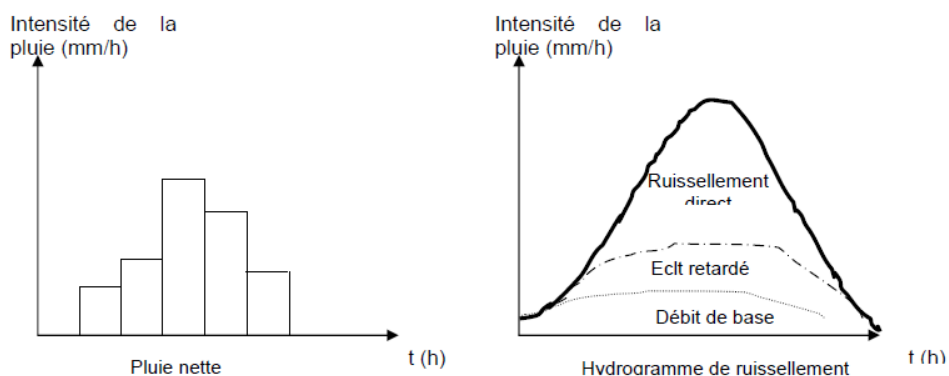


Figure 2 : Fonction de transfert

Tout comme il est difficile d'évaluer les pertes par évaporation et par infiltration au niveau de la fonction de production, de même, les ruissellements retardé et de base sont également difficiles à estimer au niveau de la fonction de transfert.

La figure 3 illustre le processus de transformation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant.

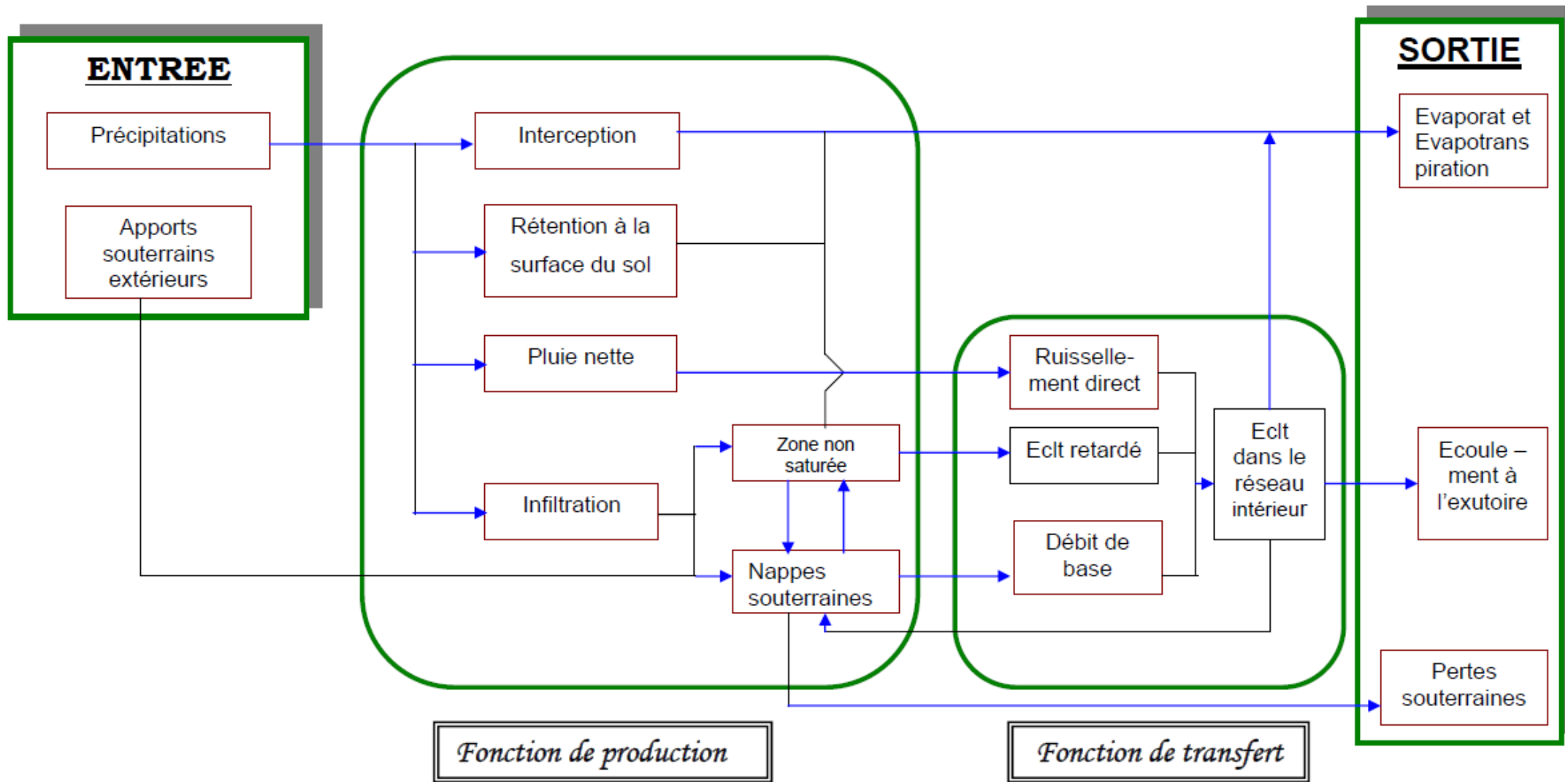
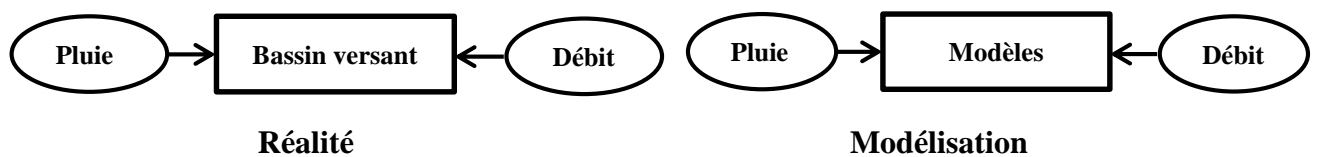


Figure 3 : Bilan hydrologique d'un bassin (Extrait de rapport de Mounirou, 2005)

II – Modélisation pluie – débit

II – 1.1 Définitions

Dans la plupart des cas, il y a insuffisance de données de débits tandis que la disponibilité des données pluviométriques sont généralement en abondance. Il est nécessaire, en vue d'une bonne gestion des ressources en eau par une connaissance plus précise des quantités d'eau disponible, de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où la nécessité de la modélisation pluie – débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.



En Général, un modèle est constitué d'une architecture, des spécifications et d'une structure.

- ❖ L'architecture est la façon dont sont assemblés les différents opérateurs du modèle ;
- ❖ Les spécifications désignent les formes mathématiques données à ces opérateurs ;
- ❖ La structure du modèle est l'ensemble des paramètres introduits dans les expressions mathématiques.

Un modèle est défini comme la représentation simplifiée d'un phénomène naturel complexe permettant la simulation d'un processus physique. En particulier, un modèle de transformation pluie – débit est un outil mathématique qui permet de construire à partir des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle, les débits les plus proches possibles de ceux réellement ou potentiellement observables sur un bassin versant.

II – 1.2 Etat de l'art de la modélisation hydrologique

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologiques. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débits et en particulier les processus liées à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est censée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrage hydrauliques, de protection contre crues ou pour la gestion hydrologique du bassin versant étudié.

Il existe des nombreux modèles hydrologiques de bassin versant ayant chacun leurs spécificités et leur domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa

capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations. C'est une étape très délicate.

Les modèles hydrologiques peuvent être classés suivant leur degré d'idéalisation dans la représentation des processus physiques. On distingue :

- Les modèles physiques qui sont des modèles réduits ;
- Les modèles analogiques obtenus par analogie électrique ;
- Les modèles mathématiques qui peuvent être soit statiques, soit dynamiques. Ils décrivent le comportement du système à l'aide d'un certain nombre de relations mathématiques.

Les modèles mathématiques (dynamiques) sont classifiés à leur tour en un certain nombre d'approches mutuellement exclusives. Nous pouvons distinguer :

- ❖ Modèles globaux et à discrétisation spatiale ou distribué
- ❖ Modèles déterministes et stochastiques (ou probabilistes) ou mixte
- ❖ Modèles physiques, empiriques et conceptuels

Les modèles hydrologiques globaux permettent de simuler la transformation de la pluie en débit sur des bassins naturels, pour de nombreuses applications pratiques dans le domaine de la gestion de la ressource en eau (notamment pour la prévision de débits, la gestion d'ouvrages de retenue, le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, etc.). De nombreuses recherches se sont donc attachées, depuis plus d'un siècle, à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le fonctionnement du bassin versant, entité hydrologique de production et de concentration des écoulements.

Dans le cadre de cette étude, le choix des modèles GR2M et SMAP se justifie par l'objectif fixé et des données disponibles sur le bassin versant de Tougou. Les deux modèles sont basés sur la modélisation pluie –débit à l'échelle mensuelle sur le bassin versant, dont les paramètres d'entrées sont les précipitations et l'ETP et les paramètres de sortie sont constitués par les lames d'eau écoulées. Les deux modèles prennent en compte les différents échanges (atmosphère et souterrains) ainsi les capacités des réservoirs.

II – 2 Présentation des modèles GR2M et SMAP

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. Michel en 1983 qui proposa un modèle conceptuel global, aussi simple que possible, pour reconstituer les débits journaliers d'un

bassin à partir des pluies et l'ETP. Le développement du modèle GR (Génie Rural) s'est ensuite poursuivi, conduisant à différentes versions plus récentes et complexes. Le chiffre indique le nombre de paramètres du modèle ; la dernière lettre, le pas de temps : journalier, M, pour mensuel. Ainsi, le modèle GR2M est un modèle à deux paramètres et fonctionnant au pas de temps mensuel.

Quant à modèle SMAP c'est-à-dire « Soit Moisture Accounting Procédure » il a été présenté par Lopez et *al.* 1981 pendant les travaux du Symposium National d'Hydrologie au Brésil. Il est couramment utilisé dans la modélisation des écoulements mensuels (Braga et Conejo, 1985 ; Promon, 1987).

Les modèles GR2M et SMAP utilisés dans cette étude peuvent être considérés comme des modèles **globaux** (*le bassin versant est considéré comme une seule entité ayant une seule fonction de production et une seule fonction de transfert*) et **conceptuels** (*fonctionnement du modèle basé sur l'utilisation des réservoirs*).

Nous présentons ci – dessous les modèles GR2M (Mouelhi, 2002) et SMAP.

II – 2.1 Présentation du modèle GR2M version de Mouelhi 2002

Il est caractérisé par deux réservoirs jouant le rôle de fonctions de production et de transfert :

- ❖ La fonction de production articule autour du réservoir 'Sol' de capacité maximale X_2 , paramètre à caler. Une percolation du réservoir Sol vers le transfert est assurée par une fonction dépendant de l'état du stock 'H', l'exposant est de 1,5 et la capacité correspondante est de 3.5 fois la valeur de X_2 (Mouelhi, 2002).
- ❖ La fonction de transfert représentée par un réservoir à vidange quadratique de capacité fixée à 50 mm. Ce réservoir est modifié par un échange souterrain, dont le coefficient X_1 est le deuxième paramètre à optimiser.

C'est un modèle à deux paramètres seulement : le premier X_1 , est le coefficient d'échange souterrain et le deuxième X_2 est la capacité maximale du réservoir 'Sol'. La capacité du réservoir de vidange quadratique a été fixée à 50 mm.

Les calculs se présentent comme suit :

Posant $V = \tanh \frac{P}{X_2}$, le niveau H du réservoir sol au début du mois m devient H_1 sous l'effet

de la pluie brute P (Opération 1) tel que :

$$H_1 = \frac{H + V + X_2}{1 + \frac{H}{X_2} \times V}$$

Il s'ensuit une contribution à l'écoulement P_e (Opération 2) donnée par la formule suivante :

$$P_e = P - (H_1 - H)$$

Posant $W = \text{Tanh} \frac{P}{X_2}$, le niveau H_1 devient H_2 sous l'action de l'ETP (Opération 3) :

$$H_2 = \frac{H_1 \times (1 - W)}{1 + W \left(1 - \frac{H_1}{X_2} \right)}$$

Par percolation H_2 devient H_m à la fin du mois m (Opération 4). H_m est donnée par la formule suivante :

$$H_m = \frac{H_2}{\left[1 + \left(\frac{H_2}{X_2} \right)^{2,5} \right]^{0,4}} \quad \text{et} \quad P_s = H_2 - H_m$$

Le réservoir S dont le niveau en début du mois est S devient S_1 (Opération 5) donné par la formule suivante :

$$S_1 = S + P_e + P_s$$

Sous l'effet de la vidange propre et des échanges souterrains S_1 devient S_2 donné par la formule :

$S_1 = S + P_e + P_s$; S_2 devient le niveau du réservoir en début du mois suivant.

L'échange, F (Opération 6) qui agit sur le réservoir R est donné par la formule suivante :

$$F = 50 \times (1 - X_1) \text{Ln} \left(1 + \frac{S_2}{X_1 + 50} \right)$$

Le débit écoulé à la fin du mois m est donné par la formule suivante :

$$Q = (S_1 - S_2) + F$$

L'architecture du modèle GR2M version de Mouelhi (2002) est représentée sur la figure suivante :

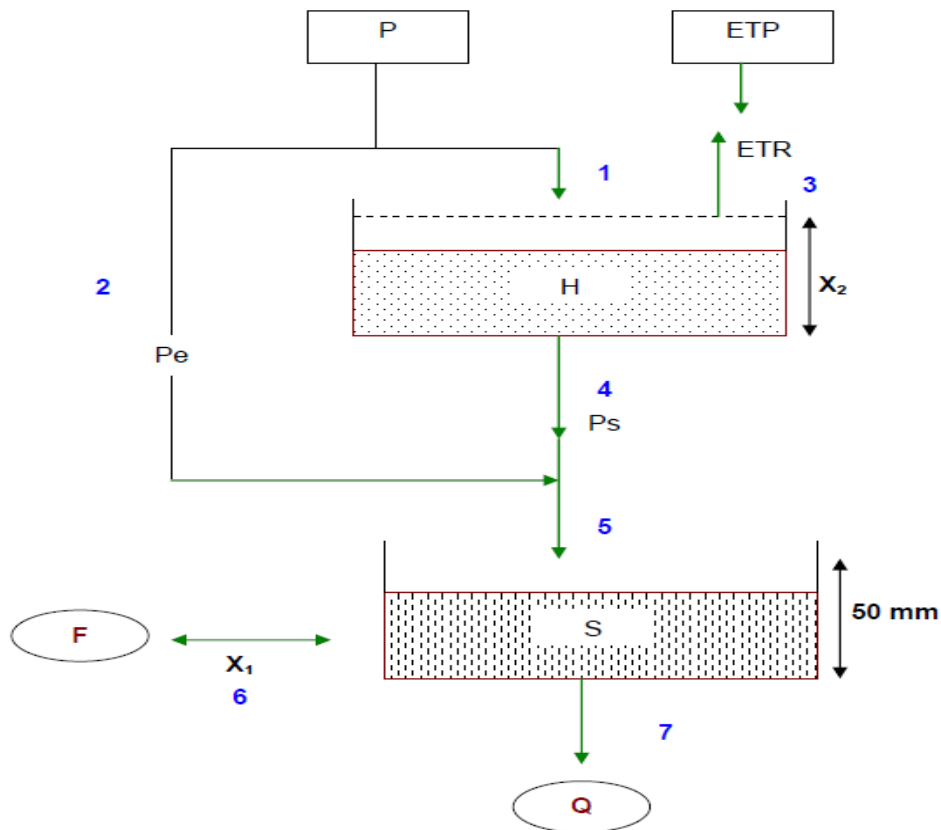


Figure 4 : Architecture du modèle GR2M (Version de Mouelhi, 2002)

II – 2.2 Présentation du modèle SMAP

Le modèle SMAP comporte deux réservoirs linéaires reliés entre eux et simulent les phénomènes essentiels de retenue et de transfert des eaux de pluie. Le premier réservoir représente le sol du bassin versant (Rsol) et le second la nappe phréatique (Rsub). Ce modèle est caractérisé par la détermination de ses cinq paramètres sur chaque bassin versant:

C'est un modèle hydrologique à réservoirs simplifiés qui permet la transformation des précipitations en débits à partir des caractéristiques physiographiques du bassin. Il a été introduit à la D.G.1.R.H en 1999 par le programme Gestion Intégrée des Ressources en Eau (G.1.R.E) et a contribué à l'estimation de la disponibilité en eau du Burkina.

R'sat	Capacité de saturation du sol (mm)
E1	Coefficient de contrôle de l'ETP
E2	Coefficient de contrôle de l'écoulement
CK	Constante de récession du bassin
CREC	Coefficient de recharge de la nappe

Réservoir-sol

Le taux de la teneur en eau du sol a été défini, à chaque instant par le rapport :

$$TU = \frac{R_{sol}}{R'_{sat}} ;$$

Où **Rsol** est le niveau du réservoir en mm et **R'sat** est la capacité de saturation du sol en mm. Une fraction de la pluie est transférée directement comme écoulement superficiel (ES). La partie restantes, alimente le réservoir- sol : cette dernier fraction ES est égale à :

$$ES = P \times TU^{E2}$$

Où **P** est la pluie et **E2** Paramètre qui contrôle l'écoulement superficiel.

Dans le réservoir-sol, une partie de l'eau est extraite par l'évaporation potentielle selon l'équation :

$$ER = EP \times TU^{E1}$$

Où **EP** est l'évaporation potentielle et **E1** Paramètre qui contrôle l'évaporation du sol.

Réservoir-souterrain

La recharge du réservoir-souterrain est calculée en fonction du niveau de la teneur en eau du réservoir-sol par l'équation suivante :

$$REC = R_{sol} \times CREC \times TU^4 ;$$

Où **REC** est la recharge de la nappe en mm et **CREC** coefficient de la recharge de la nappe.

Dans le second réservoir linéaire, le niveau de l'eau est abaissé à un taux constant qui correspond à l'écoulement de base. L'expression suivante est utilisée :

$$EB = R_{sub} (1 - ck) ;$$

Où **Rsub** est le niveau du réservoir souterrain en mm et **CK** est la constante de récession hydraulique du réservoir.

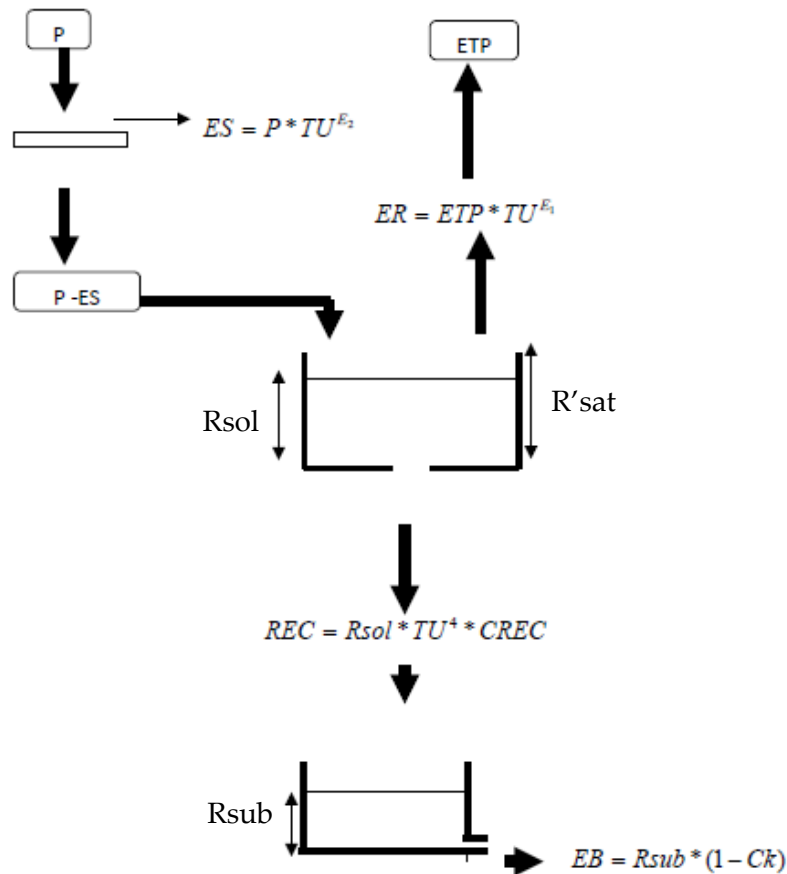


Figure 5 : Principe de fonctionnement du modèle SMAP

Les équations suivantes définissent à chaque pas de temps le bilan de masse de chaque réservoir :

$$R_{sol}(i+1) = R_{sol}_i + (P - Es) - ER - REC$$

$$R_{sub}(i+1) = R_{sub}_i + recharge(mm) + Eb$$

Où i et $i+1$ l'indiquent la période considérée et R_{sol} et R_{sub} les niveaux dans chaque réservoir. Le débit au point de contrôle du bassin versant est déterminé par sommation des écoulements superficiels (ES) et de base de l'écoulement (EB) ce qui permet d'écrire :

$$Q(mm) = ES + EB$$

Des études antérieures (Chabi-gonni, 2003 ; Mounirou *et al.* 2005) ont montré que les valeurs des paramètres CK et CREC sont nulles en régime sahélien. Le calage du modèle SMAP se résume alors à l'optimisation des trois autres paramètres.

Le niveau de chaque réservoir est actualisé à chaque pas de temps en fonction de l'écoulement superficiel, de l'évapotranspiration, de la recharge de la nappe phréatique et de l'écoulement de base par les algorithmes présentés ci-dessus.

II – 3 Simulation et optimisation des modèles

II – 3.1 Echantillon de calage et de validation

Pour un bassin versant donné, les séries de données sont divisées en deux sous séries plus ou moins égales sur l'ensemble de la période d'observation considérée. Les valeurs numériques des paramètres seront calées sur la première sous série puis validées sur la seconde. On considérera comme période de mise en route du modèle la première année de la période de calage. Autant que possible, cette période de calage doit correspondre à des situations climatiques assez différentes de celles de la période de validation afin de mieux faire apparaître les qualités et les défauts du modèle.

En effet, le calage des paramètres du modèle GR2M et SMAP étudiés a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, la similitude des comportements étant quantifiée par un critère (fonction objectif) servant à l'optimisation des paramètres en mesurant ce degré de similitude. Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage (Sorooshian et Gupta, 1985). Cette phase de calage contribue involontairement à compenser les erreurs internes ou imprécisions du modèle et les erreurs généralement contenues dans les données d'entrée.

La qualité du modèle sera mesurée autant à la valeur absolue de la fonction critère qu'à la différence entre la valeur prise par la fonction sur la période de calage et celle prise sur la période de validation disjointe de la précédente. Cet écart donne une idée quant à l'adaptabilité et la robustesse du modèle.

II – 3.2 Critère d'optimisation et critères de qualité du modèle

Il existe différentes formes de fonction critères d'optimisation d'un modèle. La fonction critère la plus utilisée est la formulation de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970). Elle permet de mesurer la qualité de l'ajustement et facilite la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements correspondent à des ordres de grandeur différents. Dans cette étude, nous avons retenu deux formulations du critère de NASH à savoir : la formulation sur les débits et la formulation sur la racine carrée des débits. La formulation sur les débits s'écrit :

$$NASH(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - Q_{cal}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - Q_{moy}^i)^2}$$

Avec Q_{obs}^i et Q_{cal}^i désignant les débits respectivement observés et calculés ; Q_{moy} est la moyenne des débits observés sur l'ensemble de la période de calage ou validation sans lacune. Le modèle ajusté est d'autant plus meilleur que le critère de NASH est proche de 100 %. En effectuant la transformation choisie (racine carrée de débit), le critère de Nash s'écrit comme suit :

$$NASH(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{cal}^i})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs}^i} - \overline{\sqrt{Q_{obs}^i}})^2}$$

$\overline{\sqrt{Q_{obs}^i}}$ est la moyenne de la racine carrée des n débits observés.

Le modèle est d'autant plus performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est à dire, quand *NASH* est proche de 100%.

Le choix des deux formulations de NASH se justifie par le fait que le cours d'eau du bassin versant de Tougou est intermittent à régime sahélien avec des crues sporadiques donnant lieu à une durée totale d'écoulement faible. Il est intéressant de mesurer le poids des forts débits par rapport aux débits moyens.

A ces deux indices d'appréciation du modèle, nous avons retenu l'erreur relative absolue moyenne sur le volume annuel. En effet, indépendamment de l'écart entre les débits moyens mensuels observés et calculés par le modèle, il est intéressant d'évaluer l'erreur absolue sur le volume annuel. Cet indice est fourni par la formule suivante :

$$Er_Moy = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \left[\frac{V_{obs}^i - V_{cal}^i}{V_{obs}^i} \right] \right|$$

Une bonne calibration (ou validation) doit donc se traduire par une valeur élevée du critère de Nash et une faible erreur relative en volume.

II – 3.3 Méthode numérique d'optimisation

La méthode d'optimisation utilisée est le **Solveur** sous Excel. Il permet de rechercher la valeur optimale d'une formule dans une cellule, appelée **cellule cible**, de la feuille de calcul. Il

fonctionne avec un groupe de cellules associées, soit directement, soit indirectement, à la formule de la cellule cible. Il adapte les valeurs des cellules que nous souhaitons modifier, appelées **cellules variables**, pour fournir le résultat spécifié à partir de la formule de la cellule cible. Les contraintes pour limiter les valeurs susceptibles d'être utilisées comme modèles par le Solveur sont posées, et ces contraintes font référence à d'autres cellules qui ont une incidence sur la formule de la cellule cible.

❖ **Cellule cible à définir**

Spécifie la cellule cible à laquelle nous souhaitons attribuer une valeur maximale du critère de NASH. Cette cellule contient la formule du critère de NASH.

❖ **Cellules variables**

Spécifie les cellules susceptibles d'être modifiées jusqu'à ce que les contraintes du modèle soient satisfaites et que la cellule indiquée dans la zone **Cellule cible à définir** atteigne sa cible. Les cellules variables doivent être liées directement ou indirectement à la cellule cible.

Conclusion partielle

Le modèle d'hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant. En effet, les modèles GR2M et SMAP sont bien appliqués à plusieurs bassins versants français, et s'adaptent également au contexte africain pour des bassins versants de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de km². Leur particularité réside dans la simplicité ainsi que dans le nombre relativement faible de leurs paramètres. Ils permettent la reconstitution à partir des données pluviométriques, d'évapotranspiration et des chroniques de débits les plus proches de ceux observés mensuellement à l'exutoire d'un bassin versant.

Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE, DES DONNEES ET CARACTERISATION DU REGIME D'ECOULEMENT

Introduction

L'hydrologie du bassin versant de Tougou est continuellement en cycle d'évolution selon la variabilité climatique et les caractéristiques de surface au niveau du bassin. Il est important de connaître la caractérisation du régime d'écoulement. Les facteurs prépondérants qui influencent les écoulements sont les activités humaines, la variabilité climatique et les états des surfaces.

I – Localisation du bassin versant de Tougou

Le bassin versant de Tougou est situé au nord du Burkina Faso, en zone sahélienne dans la partie Est de la province du Yatenga. Il est environ 23 km d'Ouahigouya sur l'axe routier Ouahigouya-Titao. Il fait partie du grand bassin du Nakambé et répond aux coordonnées géographiques 13°11'N et 13°26'N ; 2°6'E et 2°24'E. Il a une superficie de 37 km² et est limité au nord par le village de Rapougma, au sud se trouve la commune rurale de Namissiguima, à l'Est par le barrage routier de Tougou et le village de Sologom.

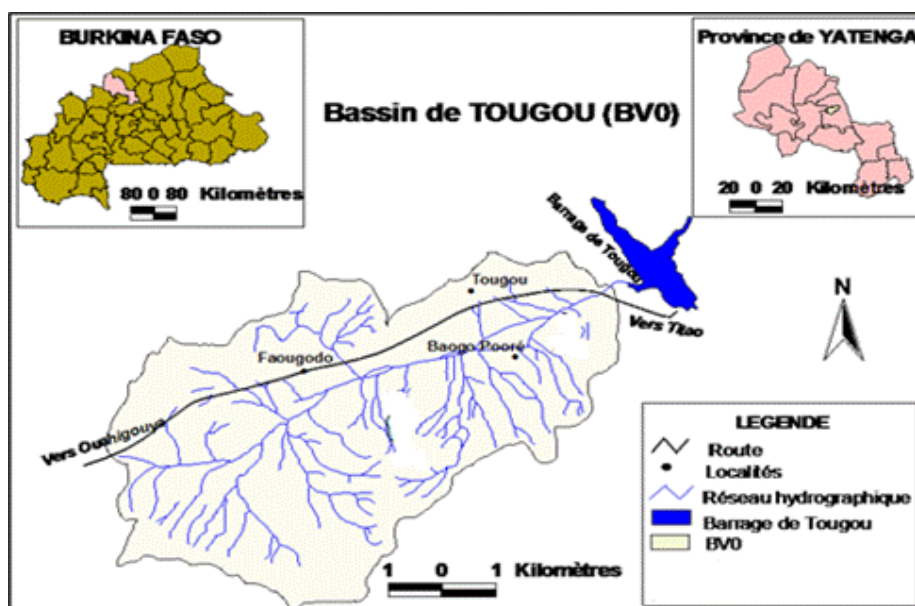


Figure 6 : Localisation du bassin versant de Tougou. (Extrait de la thèse de Mounirou, 2012)

I – 1 Climat et réseau hydrographie

I – 1.1 Climat

Il est caractérisé par un régime pluviométrique unimodal avec une saison des pluies de juin à octobre, appelée hivernage, et une saison sèche de novembre à mai (Diello et al. 2005). La pluviométrie moyenne annuelle à Ouahigouya est de 616 mm sur la période 1961-2010. Les précipitations sont irrégulières dans le temps et dans l'espace. Cette variabilité agit

énormément sur la production agricole et sur l'élevage. La saison sèche connaît tout comme la saison pluvieuse, une relative variabilité dans le temps. Elle se subdivise en 2 périodes : une période froide de novembre à février et une période chaude de mars à mai. Les températures moyennes mensuelles à Ouahigouya varient de 18°C (minima) à 42°C (maxima). L'ETP moyenne annuelle pour la période 1961-2010 y est de 2090 mm. Deux types de vent dominant le régime éolien au niveau de la zone d'étude avec des variations au cours de la saison.

Pendant la saison sèche, les vents frais et secs de direction NE et SW soufflent de novembre à avril ; ce sont les alizés continentaux chauds ou harmattan. Ces vents atteignent une vitesse maximale de 7.4 km/h.

Pendant l'hivernage, ce sont les alizés maritimes ou pseudo-mousson, vents frais et humides qui dominant notamment entre les mois de mai et d'octobre. La vitesse moyenne observée dans la zone est de 2.5 km/h. Il est plus humide que le premier et peut atteindre des vitesses de plus de 10.8 km/h surtout quand il est précédé d'orage en début de saison (juin, juillet).

I – 1.2 Réseau hydrographie

Le bassin versant de Tougou est marqué par la faiblesse du réseau hydrographique. Les cours d'eau sont essentiellement constitués de ruisseaux, de rigoles et de ravines qui canalisent les eaux vers le cours d'eau principal qui est une rivière. Le cours d'eau principal du nom de Bilampouanga et long d'environ 8.5 km et se jette dans le barrage de Tougou, dont la mise en eau a été faite en 1962. C'est un des premiers réservoirs construits dans la région. La profondeur du lit mineur des cours d'eau varie entre 1 m et 2 m et leur fond plat se raccorde à des berges plus ou moins redressées ce qui confère aux lits une forme généralement en « U ». La rivière principale est un cours d'eau temporaire dont le drainage n'excède pas le mois d'Octobre c'est-à-dire juste peu de temps après la fin de la saison humide.

I – 2 Sols, végétation et états de surface du bassin versant

Sur le substratum géologique varié se sont formées en rapport avec les autres éléments du milieu physique tels la topographie, le couvert végétal, et l'humidité, plusieurs catégories de sols. Trois grandes familles de sols peuvent être identifiées dans le bassin versant de Tougou.

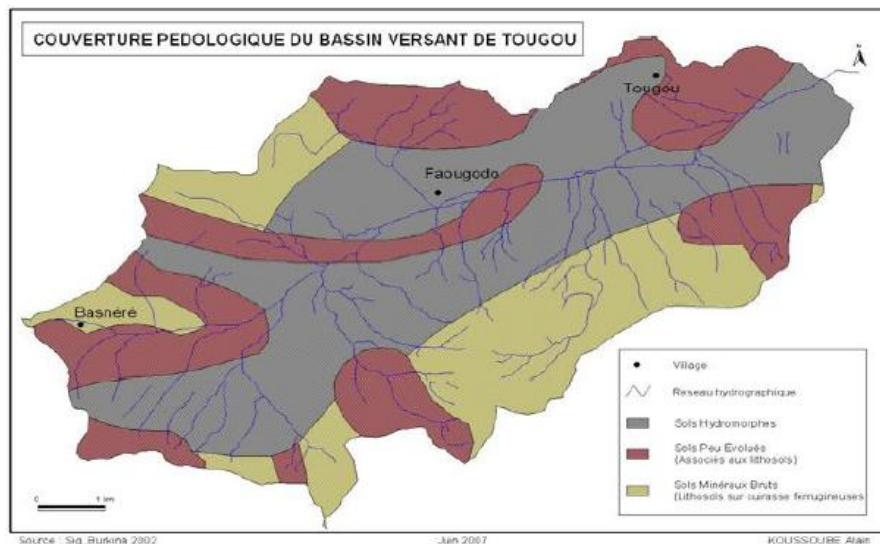


Figure 7 : Couverture pédologique du bassin versant de Tougo (extrait de rapport de Koussoubé, 2007).

- ❖ Les sols peu évolués se rencontrent généralement sur les pentes moyennes et inférieures et dans les zones de plaine. Ils présentent des états de surface sablo-argileux, sablo-argilo-limoneux, sableux, sablo-gravillonnaire ;
- ❖ Les sols minéraux bruts occupent les sommets et les versants raides des buttes, les collines. Ce sont des sols d'érosion non climatiques généralement très gravillonnaires.
- ❖ Les sols hydromorphes sont localisés dans les plaines alluviales, les terrasses et dans les dépressions périphériques. Ils sont par conséquent très argileux avec souvent des proportions de limon assez élevées. (BUNASOLS 2004)

Le découpage phytogéographique du Burkina Faso situe la province du Yatenga à cheval sur le secteur nord soudanien et celui du sud sahélien. Le bassin versant de Tougo constitue une zone de transition entre deux domaines phytogéographiques. C'est ainsi qu'on peut retrouver sur le bassin versant de Tougo deux grandes catégories de formations végétales avec pour chacune, des variantes :

- ❖ Les steppes arbustives sont des formations végétales clairsemées et recouvrant très peu le sol. Elles semblent être plus importantes en terme de superficie et se rencontrent généralement sur les versants des buttes, des collines et sur les vieilles jachères.
- ❖ Les steppes arborées occupent surtout les bas glacis, certains points bas dégradés ;
- ❖ Les savanes sont des couverts végétaux plus ou moins denses et présentant des taux de couverture assez élevés. Elles occupent en général les bas-fonds et les bordures des cours d'eau (formations ripicoles). La formation savanicole la plus représentative des végétations naturelles est une relique, le bois sacré de Tougo.



Figure 8 : Exemple du paysage du bassin illustrant les différents types de végétation et de sols (extrait de la thèse de MOUNIROU, 2012).

En termes d'occupation des sols, le bassin versant est constitué des sols cultivés (79%) et des sols dégradés (21%). Le taux d'occupation des sols dégradés montre qu'il s'agit d'un bassin versant anthropisé.

I – 3 Contexte humain

Le bassin versant de Tougou est situé dans la région du Nord dont le chef-lieu est Ouahigouya, on distinct que trois principaux villages dans le bassin versant de Tougou : Basnéré – Faogodo – Tougou. De multiples hameaux de cultures considérés comme des quartiers et rattachés à ces villages complètent l'unité d'exploitation des terres du bassin. Il est majoritairement peuplé de Mossi et les Peuhls avec une prédominance des Mossé. L'habitat de type groupé et/ou en hameau concentre les descendants d'une même famille dans une seule concession. Les limites du bassin ne coïncidant pas avec celles des unités administratives, il est difficile d'estimer avec une marge raisonnable la population exacte sur le bassin de Tougou. Cependant, selon les résultats définitifs du Recensement Général de la Population et de l'Habitat, la densité de la commune de Namisiguima dans laquelle se situe le bassin versant est estimé à 112 hbts/km².

L'activité principale menée par des habitants du terroir de Tougou est l'agriculture. Les principales cultures sont le mil et le sorgho qui constituent l'alimentation de base de la population. Elles occupent près de 95% des exploitations et 9/10^è des superficies cultivées (Ripama & Sawadogo, 2009). Les variétés les plus utilisées sont les variétés sahéliennes qui arrivent à maturité en 3 ou 4 mois. Les autres cultures céréalières sont le riz et le maïs. Elles

sont cultivées dans les bas-fonds. Cette activité mobilise une bonne partie de la population pendant et après la saison des pluies à travers deux types d'agriculture :

- ❖ L'agriculture pluviale : Elle est la plus pratiquée et concerne toutes les couches sociales. Cette agriculture est caractérisée par l'utilisation de moyens simples d'exploitation et est soumise à de conditions édaphiques et pluviométriques peu propices. Elle est essentiellement orientée vers l'autoconsommation. Cependant, certaines cultures comme le fonio sont souvent commercialisées.
- ❖ L'agriculture irriguée : Rendue possible à la faveur du barrage situé à l'exutoire du bassin, elle est pratiquée en saison sèche quelque temps après les récoltes des cultures pluviales. Cette fois-ci, c'est la population jeune du terroir qui se mobilise autour d'un périmètre irrigué géré par une association professionnelle des maraîchers de Tougou. L'agriculture irriguée est pratiquée dans une plaine aménagée et aussi traditionnellement sur des superficies non aménagées. Les principaux produits cultivés sont la pomme de terre et l'oignon. D'autres produits tels que la carotte, la tomate et l'aubergine qui y sont cultivés, sont destinés à la vente dont une partie des retombées économiques servent à préparer les campagnes agricoles (pluviale et irriguée) suivantes par l'achat d'outils de travail, de semences pour les pépinières.

L'élevage est considéré comme la deuxième activité des populations du bassin versant de Tougou à l'exception de la population Peuhl qui en fait sa principale activité. L'élevage est pratiqué de manière extensive et concerne essentiellement les bovins, les ovins, les caprins et la volaille.

I – 4 Bref aperçu sur le dispositif de mesure

Il a été mis en place comme équipements de mesure sur le bassin depuis 2004 :

- Une station météorologique
- Cinq pluviographes repartis sur le bassin versant
- Trois stations de jaugeage équipées de thalimèdes
- En 2008, le radier submersible qui a pendant longtemps servi de section de contrôle de l'exutoire du bassin a été remplacé par un dalot. Ce dalot a modifié le niveau zéro du début des écoulements. Des jaugeages de contrôle ont été effectués depuis lors pour actualiser la courbe de tarage mais le nombre de points disponibles ne permet pas encore une mise à jour complète de la courbe.

II – Présentation des données de l'étude

II – 1 Origine des données pluviométriques, d'évapotranspiration et hydrométriques

Les données utilisées dans cette étude ont été collectées à l'échelle événementielle par les différents équipements de mesure. Les observations sur le bassin versant de Tougou ayant débuté courant 2004, les données pluviométriques et hydrométriques sont disponibles depuis lors jusqu'en 2014. Les données d'ETP sont celles de la ville de Ouahigouya. Pour les données de pluie et d'ETP de 2015 à 2050, il s'agit des données corrigées des sorties de modèles régionaux.

II – 2 Analyse et traitement des données

II – 2.1 Calcul des pluies et débits mensuels à partir des données journalières

Un réseau de cinq pluviographes permet de mesurer pour chaque pluie tombée la distribution spatio-temporelle de la pluie. Ainsi, la pluie moyenne pour chaque événement pluvieux est calculée par la méthode des polygones de Thiessen. A partir des pluies moyennes journalières, la pluie moyenne mensuelle est calculée en faisant la somme des quantités de pluie des épisodes pluvieux de chaque mois. La pluviométrie annuelle se déduit alors comme étant la somme des pluies moyennes mensuelles.

Pour chaque épisode de pluie ayant occasionné un écoulement, Le thalimède installé à l'exutoire du bassin mesure la hauteur d'eau à chaque minute. Chaque hauteur d'eau est transformée en débit à l'aide de la courbe de tarage (courbe hauteur-débit). Ainsi le volume total écoulé pour cet événement est calculé par la méthode des trapèzes :

$$V_T = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right) \times \Delta T \quad \text{Avec } \Delta T = 60 \text{ [s]}$$

Si le thalimède est non fonctionnel, le volume total écoulé est estimé à partir d'une régression multiple tenant compte de la quantité et de l'intensité de pluie et du taux d'humidité du sol. Le volume total mensuel écoulé est égal à la somme des volumes écoulés dans le mois. Le débit moyen mensuel est fourni par la formule suivante :

$$Q_{obs}^i = \frac{\sum_{j=1}^n V_T^j}{86400 * \text{Nombre de jours du mois}} \quad \text{Avec } j = \text{nombre de pluies ayant ruisselées}$$

II – 3 Quelques valeurs caractéristiques des données

L'étude hydrologique du bassin réalisée a été faite avec les données 2003 –2014. Cela est dû à la période de disponibilité des données.

II – 3.1 Pluies mensuelles et annuelles

Les tableaux ci-dessous illustrent les caractéristiques de la pluviométrie pour les années 2005 et 2006.

Année 2005	Pluviosité			Fréquence		
	Pluie journalière maximale moyenne	Pluie moyenne mensuelle	% mensuel	Nombre moyen de jrs pluvieux	Nombre moyen de jrs entre 2 pluies	Nombre moyen maxi de jr sans pluie
<i>Avril</i>	15.1	15.1	3%	1	-	-
<i>Mai</i>	25.2	35.2	7%	2		-
<i>Juin</i>	49	85.6	16%	4	4	11
<i>Juillet</i>	37	124	23%	9.0	3	8
<i>Août</i>	31	154	29%	10.0	3	6
<i>Sept</i>	41	97	18%	6.0	5	9
<i>Octobre</i>	20	20	4%	4	8	9

Tableau 1 : les caractéristiques de la pluviométrie pour l'année 2005

Année 2006	Pluviosité			Fréquence		
	Pluie journalière maximale moyenne	Pluie moyenne mensuelle [mm]	% mensuel	Nombre moyen de jrs pluvieux	Nombre moyen de jrs entre 2 pluies	Nombre moyen maxi de jr sans pluie
<i>Avril</i>	12.6	12.6	2%	1	-	-
<i>Mai</i>	19	29.4	4%	2		-
<i>Juin</i>	45	81.5	11 %	7.0	4	9
<i>Juillet</i>	30	145	19%	11.0	3	5
<i>Août</i>	128	341	46%	12.0	3	4
<i>Sept</i>	26	101	13%	9.0	3	4
<i>Octobre</i>	21	37	5%	3.0	10	12

Tableau 2 : les caractéristiques de la pluviométrie pour 2006

À l'échelle mensuelle, les Tableau 1 et 2 présentent les valeurs moyennes des principaux paramètres de la pluviométrie du bassin au cours de la période 2005 et 2006. La pluviosité des mois de juillet, août et septembre constitue près de 75 % de la pluviométrie annuelle. On observe en moyenne respectivement 10, 11 et 8 pour les deux années. Cela traduit en moyenne un épisode pluvieux tous les 3 jours.

II – 3.2 Ecoulements mensuels et annuels

Après les précipitations, les écoulements de surface se positionnent comme le deuxième terme important dans le bilan hydrologique d'un bassin versant. Cependant, sa valeur est très variable et est fonction de la pluviométrie et de sa répartition pour un même bassin versant. La connaissance de leurs valeurs annuelles et leur distribution statistique est une solution délicate pour le dimensionnement des réservoirs dans les régions sahéliennes. Il est donc intéressant d'établir des bilans d'écoulement mensuels et annuels puisque c'est l'échelle de gestion de ces ouvrages. Le tableau suivant donne les volumes mensuels écoulés pour l'année 2005.

<i>Année 2005</i>	<i>Écoulement</i>			<i>Débit</i>	
	<i>Volume événementiel maximal du mois [m³]</i>	<i>Volume Mensuel [m³]</i>	<i>% mensuel</i>	<i>Débit moyen maximal événementiel [m³/s]</i>	<i>Débit moyen mensuel [m³/s]</i>
<i>Avril</i>	181 440	180 506	4%	13.1	0.07
<i>Mai</i>	428 544	435 221	10%	18.5	0.16
<i>Juin</i>	385 185	681 901	15%	23.3	0.26
<i>Juillet</i>	400 668	1 077 585	24%	9.7	0.40
<i>Août</i>	263 942	1 202 841	26%	5.4	0.45
<i>Sept</i>	538 953	812 970	18%	3.25	0.31
<i>Octobre</i>	82 682	161 234	4%	1.65	0.06

Tableau 3 : les volumes mensuels écoulés pour l'année 2005

À l'échelle mensuelle, le Tableau 3 représente les volumes écoulés du bassin versant au cours de la période 2005. Les volumes mensuels des mois de juillet, d'août et de septembre constituent près de 70 % du volume total pour l'année 2005. On notera que les forts écoulements s'observent lors des premières pluies du début de saison et pendant les mois d'août et de septembre.

Conclusion partielle

Les écoulements à l'exutoire du bassin versant de Tougou dépendent fortement de la pluviosité totale annuelle. Cependant, la quantité totale de pluie annuelle ne peut à elle seule expliquer les écoulements ; d'autres paramètres telles que l'intensité des épisodes pluvieux et leur fréquence sont également des facteurs déterminants des écoulements. La réponse du bassin versant suite à une excitation pluviométrique montre le caractère du régime sahélien du bassin versant.

**Chapitre III : OPTIMISATION DES ECOULEMENTS ACTUELS ET
SIMULATION DES ECOULEMENTS FUTURS DU BASSIN DE
TOUGOU A L'AIDE DU MODELE GR2M ET SMAP**

Introduction

Connaître le comportement hydrologique d'un bassin versant devient très important dans la gestion des ressources en eau, et surtout dans la mise en évidence de l'impact de la variabilité sur ces ressources en eau. Pour une bonne gestion et une prévision future de la gestion des ressources en eau, la nécessité de l'utilisation des modèles mathématiques est évidente.

En effet les modèles GR2M (Mouehli 2002) et SMAP sont des modèles permettant d'évaluer les écoulements à partir des précipitations. Ces modèles ne nécessitent pas une description fine du bassin versant. Les variables d'entrée sont limitées aux séries des pluies, d'ETP et des débits pour le calage. Le nombre des paramètres est limité à deux pour le GR2M version Mouelhli 2002 et à cinq pour le SMAP. Cependant, en régime sahélien, le nombre de paramètres du modèle SMAP peut se résumer à trois. L'optimisation des paramètres des deux modèles permettent de mesurer la qualité de l'ajustement sur le bassin. Nous ferons une application de ces modèles sur le bassin versant de Tougou.

I – Approche méthodologique

L'approche méthodologique repose sur l'utilisation d'un ensemble des séries précipitations et évapotranspirations (ETP) de longue durée relevées au niveau de la station pour reconstituer des séries d'écoulement de durée équivalent. Les modèles retenus sont des modèles globaux (bassin versant considéré comme une seule entité ayant une seule fonction de production et une seule fonction de transfert) et conceptuels (fonctionnement du bassin versant basé sur l'utilisation des réservoirs) et fonctionnant au pas de temps mensuel. Cette approche présente les avantages suivants :

- ❖ L'utilisation optimale des informations fournies par l'ensemble du réseau pluviométrique qui est à la fois plus dense et dispose de données plus longues.
- ❖ Une extension dans le temps et dans l'espace des séries par la modélisation pluie-débit.

La méthodologie adoptée est basée sur l'utilisation des données mensuelles. Elle est structurée de la manière suivante :

- **Collecte, saisie et mise en forme des données de base** : les données de base sont des données événementielles ou journalières. Notre première tâche a été de calculer les données mensuelles de pluie, d'ETP et de débits.

- **Calage et validation de chaque modèle** : Ces opérations ont permis d'identifier les paramètres optimaux de chaque modèle et la meilleure fonction de critère d'optimisation.
- **Analyse de sensibilité des paramètres de chaque modèle** : cela a permis de voir comment la variation de la valeur optimale de chaque paramètre influe sur la valeur de la fonction critère. Pour cela, nous avons retenu que le paramètre devient sensible s'il y a une perte de 2 points du critère de NASH.
- **Simulation future des écoulements** : A partir des scénarii climatiques, on a simulé les écoulements futurs et comparer aux écoulements actuels. Cela a permis de voir s'il y a déficit ou excédent d'écoulements par rapport aux écoulements actuels.

En effet, les données de pluies, d'ETP et de débits sont disponibles de 2003 à 2014. La première année est considérée comme année de mise en route du modèle. Ainsi, on a divisé en deux sous-périodes les données d'observation. Le calage du modèle a été fait sur la période 2004 à 2010. La validation du modèle a concerné la période 2011 à 2014. Les simulations futures ont été faites pour la période 2015 à 2050.

Période d'observation		Mise en route du modèle	Période de calage		Période de Validation		Simulation écoulements futurs	
Début	Fin	Année	Début	Fin	Début	Fin	Début	fin
2 003	2 014	2003	2 004	2 010	2 011	2 014	2015	2050

II – Application du modèle GR2M

L'application du modèle se fera à l'aide du fichier Excel dénommé « Modèle GR2M_version Mouehli ». C'est un classeur Excel qui comporte trois feuilles.

- ❖ La 1ère feuille dénommée « **Modèle** » comporte l'architecture du modèle et toutes les spécifications (formules mathématiques), les paramètres et variables du modèle ;
- ❖ La 2ème feuille nommée « **Données** » contient :
 - ✓ Le nom du bassin versant, le nom de l'exutoire ou de la station de mesure (Tougou) ;
 - ✓ Les valeurs des caractéristiques du bassin à modéliser (superficie, capacité de rétention maximale du sol) ;
 - ✓ Les valeurs mensuelles des variables entrantes du modèle (P, ETP, Qobs) et leur période d'observation (date de début, date de fin) ;
 - ✓ Le pourcentage de lacunes sur la chronique des débits observés.

NB : pour un mois *i* quelconque, si la valeur de débit observé n'est pas disponible (non mesuré) alors elle est considérée comme une lacune et est représentée par la valeur **-9999**.

- a) La 3ème feuille nommée « **Résultats** » est la feuille de mise en œuvre du modèle. Elle contient :
- ✓ Les paramètres X1 et X2 du modèle (**Cellules A8 et B8**), les valeurs des critères d'appréciation pour la période du calage et de validation (**plage des cellules I8:K8 et L8:N8**), etc.
 - ✓ Les dates d'observation (année, mois, nombre de jours) et les données mensuelles de (P, ETP, Qobs) dans chaque colonne et à partir de la ligne N°15

II – 1 Résultats du calage avec NASH sur les débits

Les tableaux 4 et 5 présentent les résultats du calage et de la validation du modèle GR2M. Ces tableaux illustrent les valeurs des paramètres optimisés ainsi que les valeurs des trois critères d'appréciation du modèle. Les seuls critères d'appréciation ne sont pas toutefois suffisants. Pour cela, nous avons illustré les débits observés et ceux calculés par le modèle à travers un graphique.

Paramètres du modèle			Valeurs des critères d'appréciation Période de Calage		
X ₁	X ₂	Cap	NASH	Erreur relative sur le volume total	Erreur moyenne sur le volume annuel
92.98	305.48	50	86.065 %	22%	24.3%

Tableau 4 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur les débits (GR2M)

Valeurs des critères d'appréciation Période de validation		
NASH	Erreur relative sur le volume total écoulé	Erreur moyenne sur le volume annuel
70.7%	36.5%	36.2%

Tableau 5 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur les débits (GR2M)

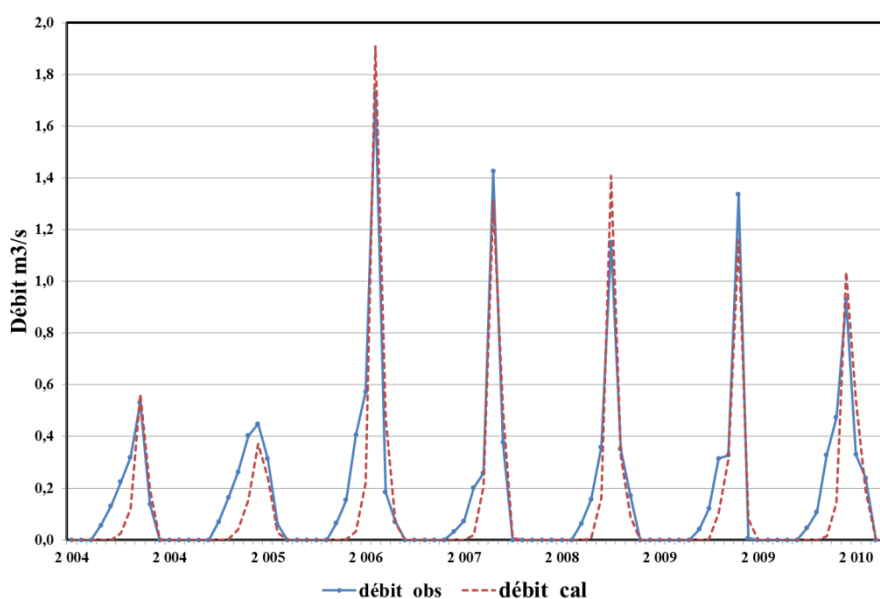


Figure 9 : graphique de calage avec NASH sur les débits (GR2M)

Avec une valeur **86.065 %** de Nash sur les débits nous pouvons affirmer une bonne qualité de critère de Nash mais en ajoutant les deux autres critères, erreur relative sur le volume total de **22%** et annuel de **24.3%**, nous constatons une erreur relative élevée sur le volume total et sur volume total en annuel. En observant le graphique de calage, nous remarquons un écart au point bas entre les courbes des débits simulés et celles débits observés et aussi un faible d'un écart aux niveaux des pics. En période de basses eaux, le modèle sous-estime les écoulements et les surestiment en période de hautes eaux. On peut conclure que l'ajustement du modèle GR2M avec le critère de NASH sur les débits est peu satisfaisant.

II – 2 Résultats du calage avec NASH sur la racine carrée des débits

Les tableaux 6 et 7 présentent les résultats du calage et de la validation du modèle GR2M. Les critères d'appréciations du modèle sont les mêmes sauf que le critère de Nash est sur la racine carrée des débits.

Paramètres du modèle			Valeurs des critères d'appréciation Période de Calage		
X ₁	X ₂	Cap	NASH	Erreur relative sur le volume total	Erreur moyenne sur le volume annuel
20.00	192.51	50	77.10 %	0.4%	10.9%

Tableau 6 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur la racine carrée des débits (GR2M)

Valeurs des critères d'appréciation Période de validation		
NASH	Erreur relative sur le volume total écoulé	Erreur moyenne sur le volume annuel
72.6%	17.3%	16.2%

Tableau 7 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur la racine carrée des débits (GR2M)

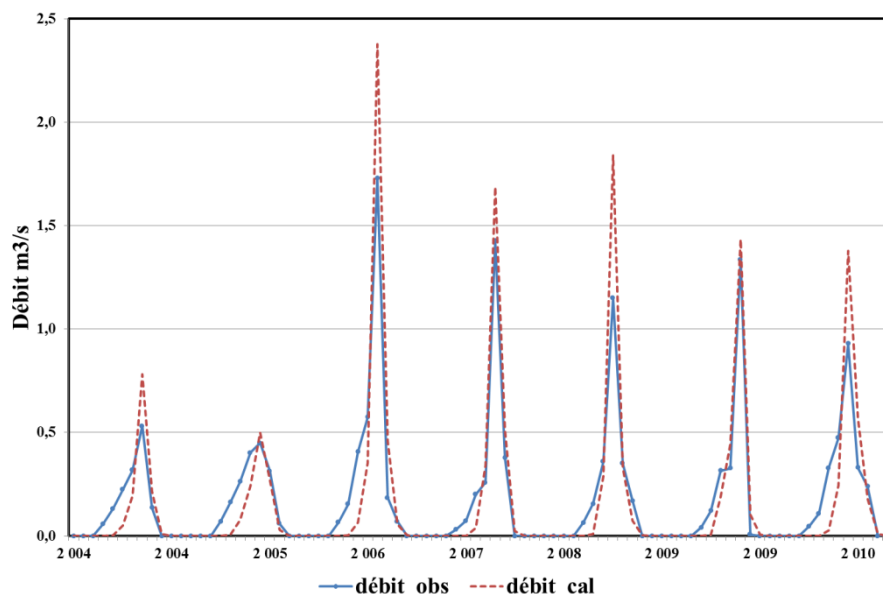


Figure 10 : graphique de calage avec NASH sur la racine carré des débits (GR2M)

La valeur de Nash sur la racine carrée des débits est de **77.10 %**. C'est une valeur acceptable de la qualité de critère de Nash, avec une faible erreur relative de volume total de **0.4%** et une erreur relative sur volume total annuel de **10.9%**. Pour le graphique de calage, on observe un écart entre les courbes des débits simulés et celle des débits observés est grand aux niveaux des pics, et est moyen aux niveaux des points bas. En période de basses eaux, le modèle surestime les écoulements et les surestime en période de hautes eaux. On peut conclure que l'ajustement du modèle GR2M avec le critère de NASH sur la racine carrée des débits est satisfaisant.

Au vu des résultats du calage du modèle GR2M avec les deux fonctions de NASH à savoir NASH sur les débits et sur la racine carrée de débits, on en conclut que la fonction critère la plus optimale est le NASH sur les débits. Ainsi, l'analyse de la sensibilité est faite sur les paramètres fournis par le critère le plus performant.

II – 3 Analyse de sensibilité des paramètres

L'analyse de la sensibilité de modèle GR2M (Mouehli 2002) consiste à évaluer l'impact de la variation des paramètres X1 (le coefficient d'échange souterrain) et X2 (la capacité maximale du réservoir 'Sol') sur la valeur de NASH. Dans notre cas, le test de sensibilité sur le modèle GR2M (Mouehli 2002) consiste à faire varier l'un des paramètres du modèle et à fixer l'autre jusqu'à observer une perte de 2 points par rapport à la valeur de NASH optimale. Après une perte de 2 points, on en conclut que le paramètre n'est plus dans la zone optimale.

a) L'analyse de sensibilité des paramètres avec NASH sur les débits

Premier cas : fixation de la valeur optimale de X2 et variation de X1

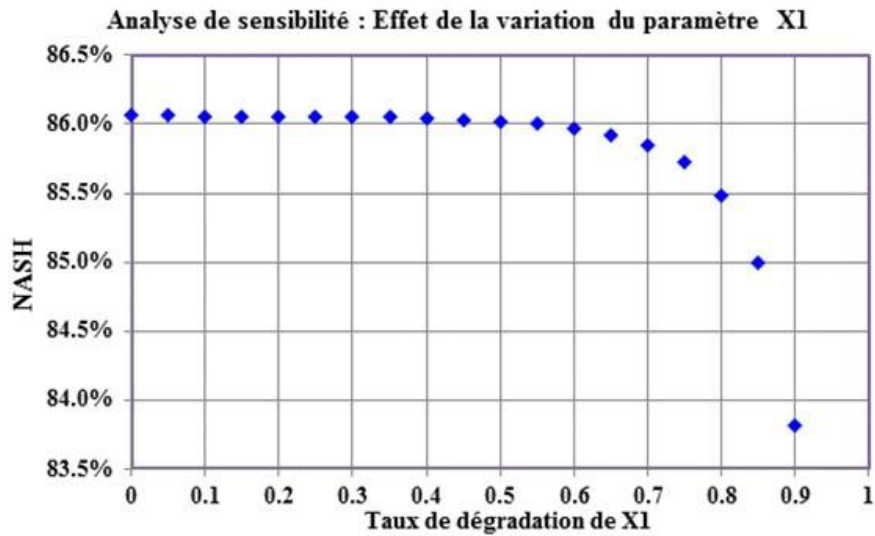
Le paramètre X2 est fixé à **305,48** et X1 est le paramètre variable avec une valeur initiale de **92,96** et une valeur maximum de NASH de : **86,065%**

%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
X1	88,33	83,68	79,03	74,38	69,73	65,08	60,43	55,79
NASH	86,07%	86,06%	86,06%	86,06%	86,06%	86,06%	86,05%	86,04%

%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%
X1	51,14	46,49	41,84	37,19	32,54	27,89	23,24	18,60
NASH	86,03%	86,02%	86,00%	85,97%	85,92%	85,85%	85,72%	85,48%

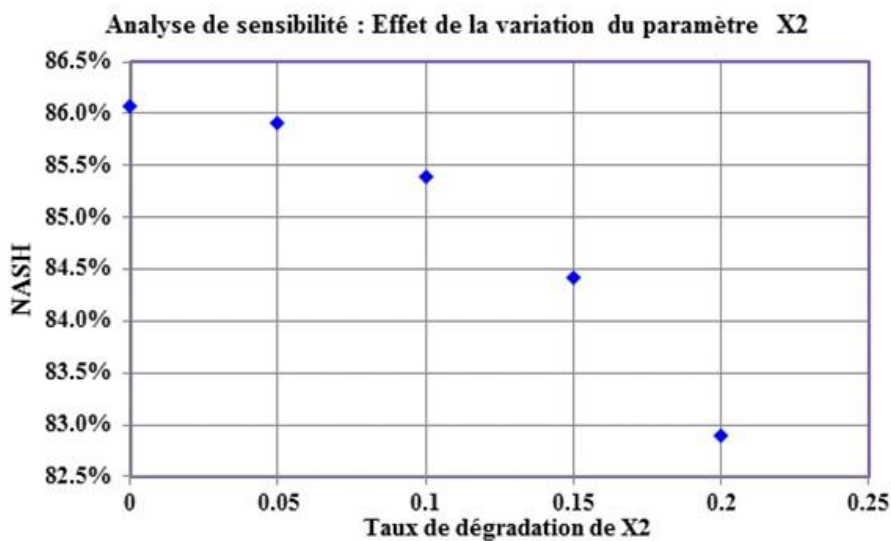
%	85%	90%
X1	13,95	9,30

NASH	85,00%	83,81%
------	--------	---------------



Deuxième cas : fixation de la valeur optimale de X1 et variation de X2

%	5%	10%	15%	20%
X2	290,21	274,93	259,66	244,38
NASH	85,91%	85,39%	84,42%	82,89%



On constate que dans le premier cas, le paramètre X1 devient sensible pour le modèle à 90% de la valeur initiale avec une valeur de 9,30 et le critère de NASH sur les débits entre dans une zone sensible à **83,81%**.

Le second cas, le paramètre X2 devient sensible à **20%** avec une valeur de 244,3 et le critère de NASH entre dans une zone sensible à **82,89%**.

On en conclut donc que le paramètre X2 est plus sensible pour le modèle. Cela montre également la limite de l'optimisation avec le Solveur d'Excel qui pour un gain de moins de 1% les paramètres peuvent varier de plus de 50%.

III – Application du modèle SMAP

L'application du modèle se fera à l'aide du fichier Excel dénommé « Modèle GR2M_SMAP ». C'est un classeur Excel qui comporte trois feuilles.

- b) La 1^{ère} feuille dénommée « **Modèle** » comporte l'architecture du modèle et toutes les spécifications (formules mathématiques), les paramètres et variables du modèle ;
- c) La 2^{ème} feuille nommée « **Données** » contient :
 - ✓ Le nom du bassin versant, le nom de l'exutoire ou de la station de mesure ;
 - ✓ Les valeurs des caractéristiques du bassin à modéliser (superficie, capacité de rétention maximale du sol ;
 - ✓ Les valeurs mensuelles des variables entrantes du modèle (P, ETP, Qobs) et leur période d'observation (date de début, date de fin) ;
 - ✓ Le pourcentage de lacunes sur la chronique des débits observés.

NB : pour un mois *i* quelconque, si la valeur de débit observé n'est pas disponible (non mesuré) alors elle est considérée comme une lacune et est représentée par la valeur **-9999**.

- ❖ La 3^{ème} feuille nommée « **Résultats** » est la feuille de mise en oeuvre du modèle. Elle contient :
 - ✓ Les paramètres **R'sat, E1, E2, CK** et **CREC** du modèle (**Cellules A8 : E8**), les valeurs des critères d'appréciation pour la période du calage et de validation (**plage des cellules I8:K8 et L8:N8**), etc.
 - ✓ Les dates d'observation (année, mois, nombre de jours) et les données mensuelles de (P, ETP, Qobs) dans chaque colonne et à partir de la ligne N°15

III – 1 Résultats du calage avec NASH sur les débits

Les tableaux 8 et 9 présentent les résultats du calage et de la validation du modèle SMAP. Ces tableaux illustrent les valeurs des paramètres optimisés ainsi que les valeurs des trois critères d'appréciation du modèle. Nous avons également illustré les résultats par un graphique.

Paramètres du modèle	Valeurs des critères d'appréciation Période de Calage
----------------------	---

R'sat : capacité de saturation du sol (mm) (Modifiée)	E1 : Coefficient de contrôle de l'ETP	E2 : Coefficient de contrôle de l'écoulement	CK : Constante de récession du bassin	CREC : Coefficient de recharge de la nappe	NASH	Erreur relative sur le volume total	Erreur moyenne sur le volume annuel
9,41	0.62	0.09	0.00	0.00	90,25%	-8,75%	13,8%

Tableau 8 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur les débits (SMAP)

Valeurs des critères d'appréciation Période de validation		
NASH	Erreur relative sur le volume total écoulé	Erreur moyenne sur le volume annuel
89,5%	-17,45%	24,18%

Tableau 9 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur les débits (SMAP)

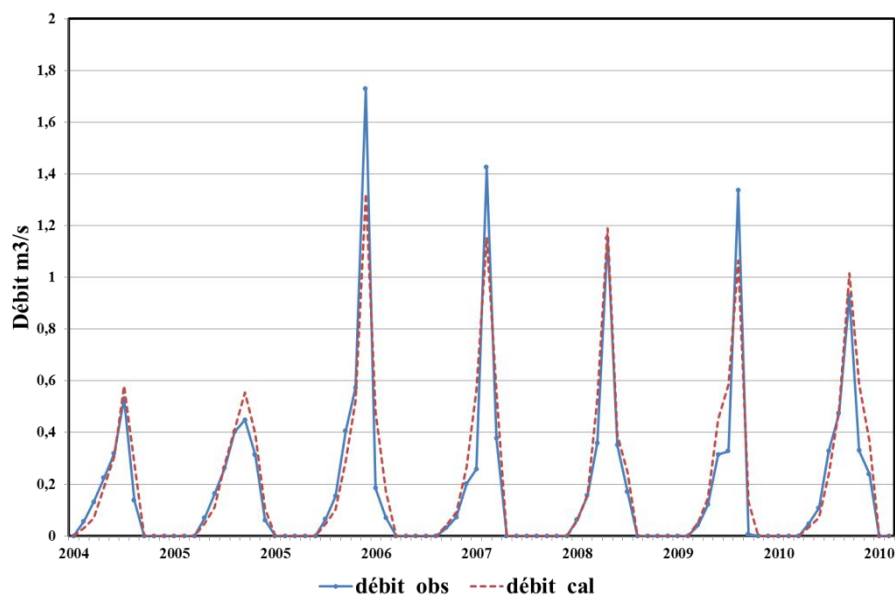


Figure 11 : graphique de calage avec NASH sur les débits (SMAP)

Avec une valeur 90.25 % de Nash sur les débits nous pouvons dire qu'on a une bonne appréciation de critère de Nash. En ajoutant les deux autres critères, erreur relative sur le volume total de -8,75% et annuel de 13.8%, nous constatons une erreur relative faible sur le volume total et élevé sur volume total en annuel. En observant le graphique de calage nous remarquons une bonne représentation au point bas entre les courbes des débits simulés et les débits observés et aussi un faible écart au niveau des pics. En période de basses eaux, le modèle sous-estime les écoulements et les surestime en période de hautes eaux. On peut conclure que l'ajustement du modèle SMAP avec le critère de NASH sur la racine carrée des débits est satisfaisant.

III – 2 Résultats du calage avec NASH sur la racine carrée des débits

Les tableaux 10 et 11 présentent les résultats du calage et de la validation du modèle SMAP. Les critères d'appréciations du modèle sont les mêmes sauf que le critère de Nash est sur la racine carrée des débits.

Paramètres du modèle					Valeurs des critères d'appréciation Période de Calage		
R'sat : capacité de saturation du sol (mm) (Modifiée)	E1 : Coefficient de contrôle de l'ETP	E2 : Coefficient de contrôle de l'écoulement	CK : Constante de récession du bassin	CREC : Coefficient de recharge de la nappe	NASH	Erreur relative sur le volume total	Erreur moyenne sur le volume annuel
10,53	1,17	0,08	0,00	0,00	95,38%	2,74%	6,45%

Tableau 10 : Valeurs des critères d'appréciation période de calage avec NASH sur la racine carrée des débits (SMAP)

Valeurs des critères d'appréciation Période de validation		
NASH	Erreur relative sur le volume total écoulé	Erreur moyenne sur le volume annuel
94,5%	-3,90%	22,74%

Tableau 11 : Valeurs des critères d'appréciation Période de Validation avec NASH sur la racine carrée des débits (SMAP)

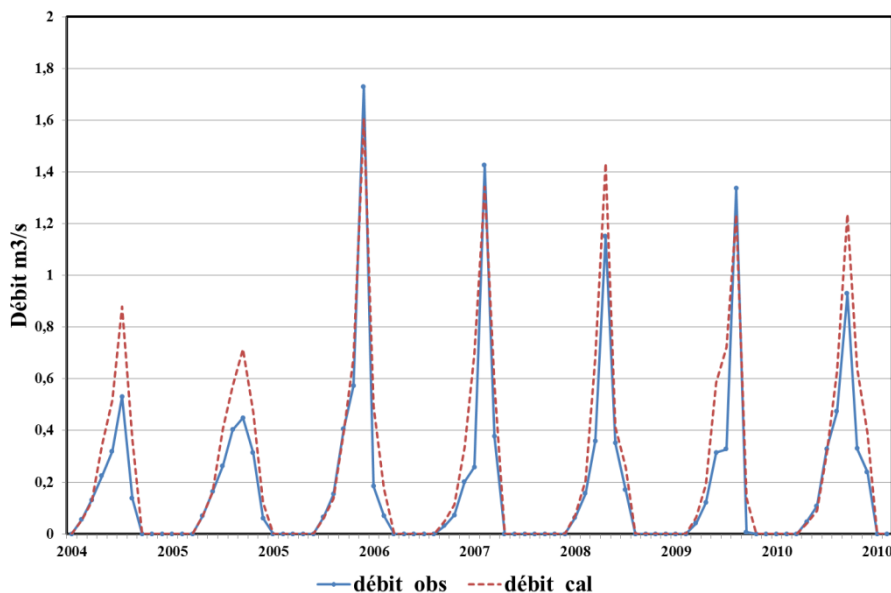


Figure 12 : graphique de calage avec NASH sur la racine carrée des débits (SMAP)

La valeur de Nash sur la racine carrée des débits est de 95.38 %. C'est une très bonne valeur du critère de Nash, avec une faible erreur relative de volume total de 2.74% et sur volume total annuel de 6.45%. Pour le graphique de calage, on observe au point bas une bonne

représentation entre les courbes des débits simulés et celles des débits observés tandis qu'on observe au niveau des pics un grand d'écart entre les courbes. En période de basses eaux, le modèle surestime les écoulements et les sous-estime en période de hautes eaux. On peut conclure que l'ajustement du modèle SMAP avec le critère de NASH sur la racine carrée des débits est très satisfaisant.

Au vu des résultats du calage du modèle SMAP avec les deux fonctions de NASH à savoir NASH sur les débits et sur la racine carrée de débits, on en conclut que la fonction critère la plus optimale est le NASH avec la racine carrée des débits. Ainsi, l'analyse de la sensibilité est faite sur les paramètres fournis par le critère le plus performant.

III – 3 Analyse de sensibilité des paramètres

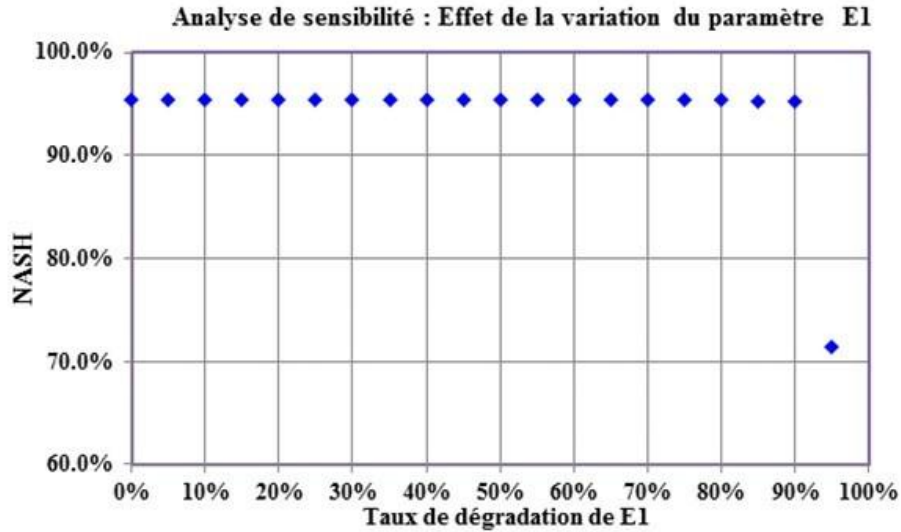
Notre test de l'analyse de la sensibilité de modèle SMAP se fera sur le paramètre E1 (coefficient de contrôle de l'ETP) et sur le paramètre E2 (coefficient de contrôle de l'écoulement). Dans notre cas, le test de sensibilité sur le modèle SMAP consiste à faire varier l'un des paramètres du modèle et à fixer l'autre jusqu'à observer une perte de 2 points par rapport à la valeur de NASH optimale. Après une perte de 2 points, on en conclure que le paramètre est n'est plus dans la zone optimale.

a.) L'analyse de sensibilité des paramètres avec NASH sur la racine carrée des Q

Dans le premier cas, les paramètres fixés sont E2 : 0,08143 et R'sat : 10,53 et le paramètre variable est E1 : 1.16

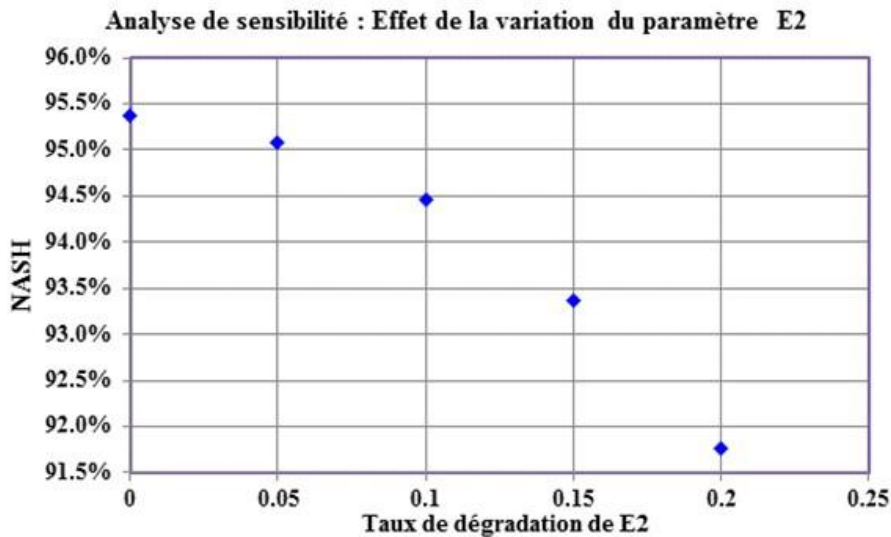
%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
E1	1,11	1,05	0,93	0,88	0,82	0,76	0,70	0,64
NASH	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%

%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%
E1	0,58	0,53	0,47	0,41	0,35	0,29	0,23	0,18
NASH	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,38%	95,34%



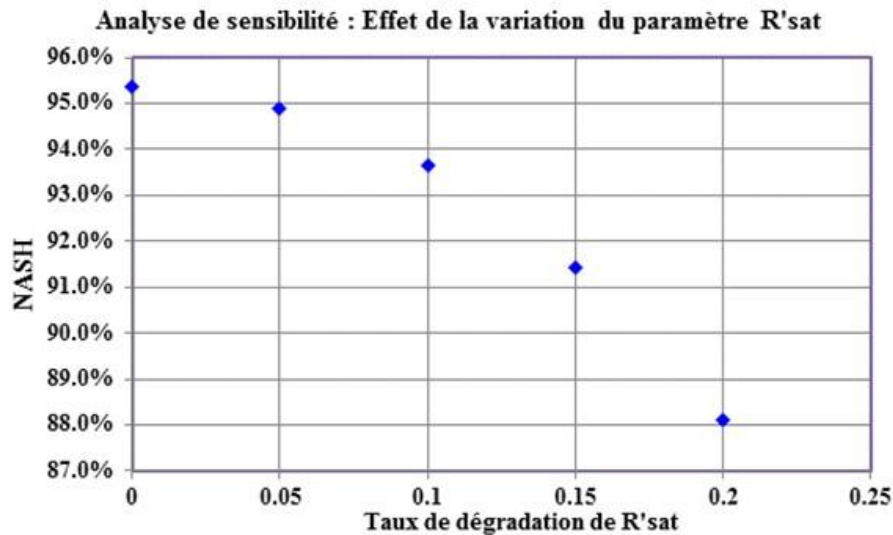
Le second cas, E2 devient le paramètre variable, E1 et R'sat sont les paramètres fixés.

%	5%	10%	15%
E2	0,08	0,07	0,07
NASH	95,21%	94,66%	92,29%



Le troisième cas, R'sat devient le paramètre variable, E1 et E2 sont des paramètres fixés

%	5%	10%	15%
R'sat	10,00	9,47	8,42
NASH	95,02%	93,89%	89,09%



Nous remarquons, dans le premier cas, la sensibilité au niveau de paramètre E1 est très faible et les sensibilités aux niveaux des paramètres E2 et R'sat sont à **15%** avec des valeurs respectives à **92,29% et 89,09%**. On en conclut donc que les paramètres E2 et R'sat sont les plus sensibles pour le modèle.

IV – Comparaison et choix du modèle le plus performant

La comparaison et choix du modèle le plus performant sont portés sur plusieurs critères.

- ❖ Un bon calage doit donc se traduire par une valeur élevée du critère de Nash et une faible erreur relative sur le volume total et sur le volume en annuel.
- ❖ On doit avoir une bonne représentation de graphique calage entre les courbes des débits simulés et celle des débits calculés, c'est-à-dire l'écart entre les courbes des débits simulés et celles des débits calculés doivent être minimisé.

Modèles	Critères d'appréciations	
	NASH sur les débits	NASH sur la racine carrée des débits
GR2M(Mouehli2002)	86,065%	77,10%
SMAP	90,25%	95,38%

Tableau 12 : Comparaison et choix du modèle le plus performant

La simulation la plus performante est obtenue par le modèle SMAP avec NASH sur la racine carrée des débits.

V – Simulation des écoulements futurs du bassin versant

A partir des scénarii climatiques, on a simulé les écoulements futurs du bassin versant de Tougou de l'année 2015 à 2034, 2025-2034 et 2035 à 2050. Les résultats obtenus sont illustrés par les graphiques ci-dessous.

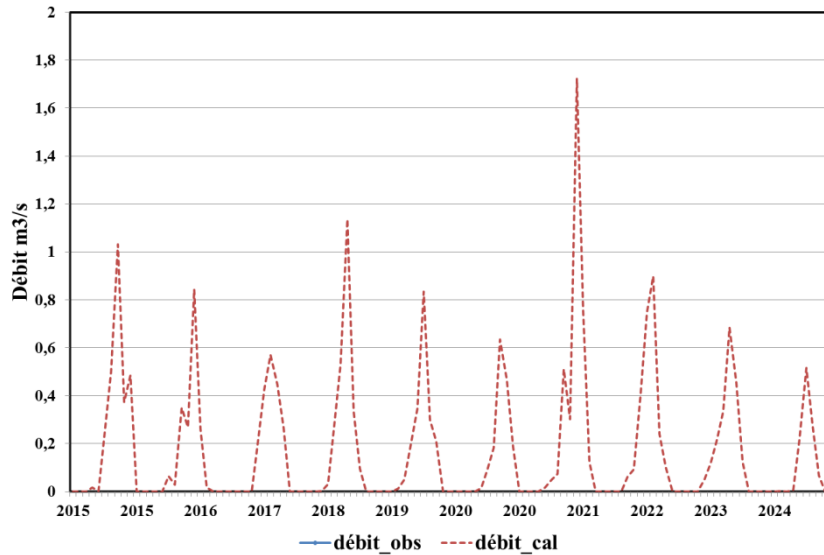


Figure 13 : simulation des écoulements futurs 2015-2024

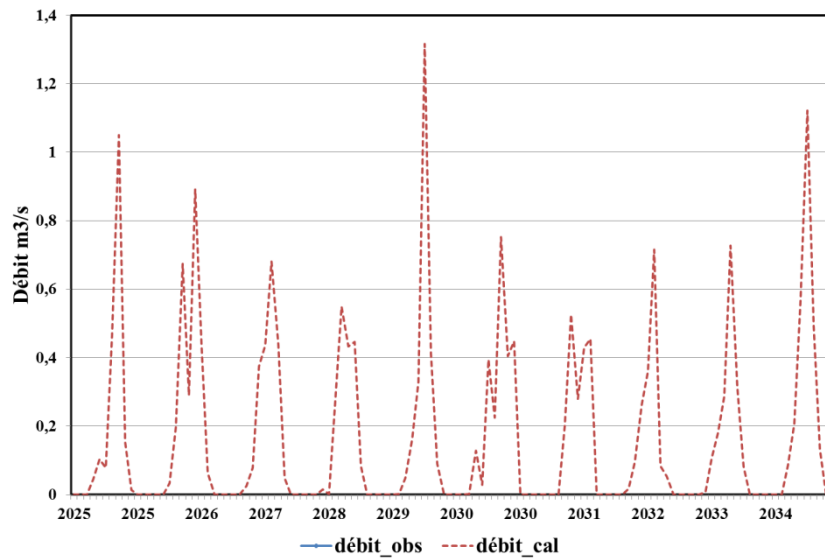


Figure 14 : simulation des écoulements futurs 2025-2034

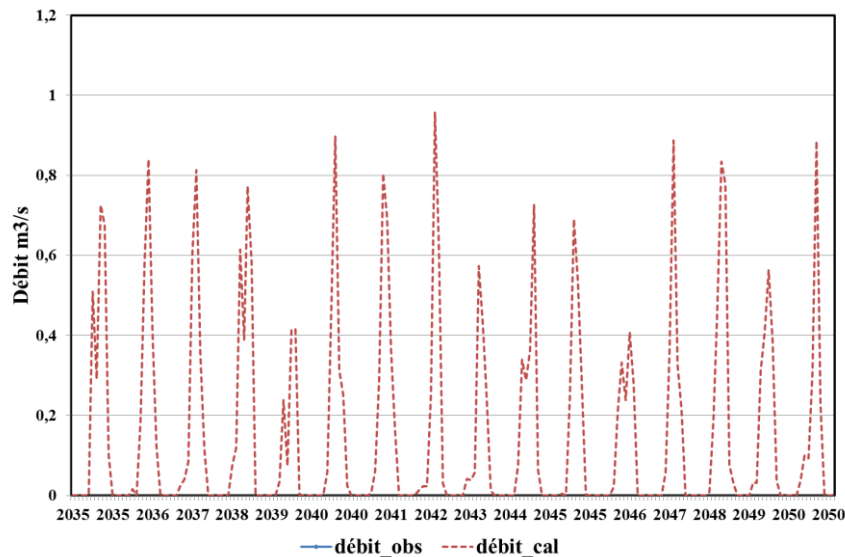


Figure 15 : simulation des écoulements futurs 2035-2050

Les trois graphiques montrent que les écoulements sont fortement dépendants des précipitations annuelles. Toutefois, il est intéressant de situer dans le contexte actuel la valeur moyenne des écoulements pendant chaque décennie. Ainsi le tableau 13 présente les valeurs moyennes de la pluviométrie et des écoulements annuels pour chaque période de simulation.

Période	2004-2014	2015-2024	2025-2034	2035-2050
Pluie interannuelle [mm]	606	604	545	480
Débit moyen annuel [m^3/s]	0.1816	0.1762	0.1741	0.1598
Écoulement interannuel [m^3]	5 730 860	5 559 282	5 494 981	5 041 348

Tableau 13 : Comparaison des pluies et écoulements interannuels des 2004 à 2050 sur le bassin de Tougou

Le tableau montre que la pluviométrie moyenne interannuelle de la période 2015-2024 est presque identique à celle de la décennie 2004 à 2014. Aussi, les écoulements interannuels sont également presque identiques. La faible différence observée peut s'expliquer par la dynamique et la fréquence des événements pluvieux ou encore par les incertitudes de mesures. Cependant, il y aura une baisse de la pluviométrie moyenne interannuelle durant la période 2025 à 2034 par rapport à la décennie 2015 – 2024. Cette baisse est estimée à près de – 9.8 %. Cependant, la baisse des écoulements est faible et vaut -1.16 %. On peut donc supposer que bien qu'il ait une baisse de la pluviométrie, les pluies pouvant produire des écoulements ne connaîtront pas cette baisse. Les pluies et écoulements dans la période 2035-2050 connaîtront une baisse respectivement de -12% et – 8.25 %. On peut donc conclure qu'il y aura un déficit pluviométrique et hydrométrique sur le bassin versant de Tougou durant les périodes 2025-2034 et 2035-2050 par rapport à la période 2004-2014.

Conclusion partielle

Les résultats obtenus montrent que le modèle SMAP s'adapte bien au fonctionnement hydrologique du bassin versant de Tougou. Les valeurs des critères d'optimisation sont satisfaisantes. En se référant aux erreurs des volumes, on peut dire que les volumes écoulés simulés par le modèle sont proches de ceux observés même si il y a dans le temps un décalage. On peut donc dire que le modèle compense dans le temps les erreurs (sous-estimation des forts écoulements et surestimations des faibles écoulements). Les simulations futures ont montré qu'il y aura une baisse de la pluviométrie qui engendrera une baisse plus prononcée des écoulements. Des mesures doivent être prises pour faire face à cette situation.

D – Conclusion générale et recommandations

L'ensemble des travaux réalisés s'inscrivent dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude. Le travail est structuré en trois parties. La première partie a permis de faire un bref aperçu sur la modélisation hydrologique et à présenter les modèles GR2M et SMAP. Dans la deuxième partie, on a effectué une présentation de la zone d'étude et présenté les données d'étude. La troisième partie illustre l'optimisation des deux modèles sur le bassin versant et la simulation des écoulements futurs.

Les travaux effectués ont permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Tougou. Sa réponse hydrologique est typique à celle des bassins versants sahéliens. La modélisation effectuée au moyen des modèles GR2M et SMAP ont conduit à l'obtention des paramètres optimaux. Les résultats ont montré que le modèle SMAP est très performant sur le bassin versant et permet d'estimer avec une marge raisonnable les écoulements annuels. Le modèle estime aussi bien les faibles débits que les forts débits. Les simulations futures ont montré qu'il y aura une baisse de la pluviométrie qui engendrera une baisse plus prononcée des écoulements. Des mesures doivent être prises pour faire face à cette situation. Telles que la construction des forages et des réservoirs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alain CASENAVE et Christion VALENTIN. (2005). Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. Edition de l'Orstom. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en coopération.

Bruno Ambroise. (1998). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, Facteurs, Modèles.

Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 54. Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues et apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche. Ont contribué à la préparation de ce bulletin CIEH/ORSTOM/LCT.

CHABI-GONNI Gnanman Félicité. (2003). Mémoire de fin d'études : Synthèse hydrologique sur la vallée du kou. Mise en place d'un système de suivi d'évaluation de la ressource. EIER2003

DJELLOULI F., BOUANANI A., BABA-HAMED K. (2015). Caractérisation hydrologiques du bassin doued louza à l'aide d'un modèle pluie- débit global.

Harouna KARAMBIRI. (2008). Hydrologie des bassins versants version 2008.

Lawani A.MOUNIROU. (2012). Thèse de doctorat : Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données. L'université Montpellier II et 2iE.

Lawani A.MOUNIROU. (2004). Présentation des modèles GR2M et GR3M.

Messaouda KABOUYA. (1990). Thèse de doctorat : Modélisation Pluie-Débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Université Paris sud laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique orsay.

Safouane MOUEHI. (2002). Thèse de doctorat : Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débits conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier

ANNEXES

ANNEXE1: Les simulations des écoulements actuels pendant la période 2004-2014

	Année 2004												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,06	0,13	0,22	0,32	0,53	0,14	0,00	0,00	0,00	0,12

	Année 2005												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,07	0,16	0,26	0,40	0,45	0,31	0,06	0,00	0,00	0,14

	Année 2006												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,07	0,15	0,41	0,57	1,73	0,18	0,07	0,00	0,00	0,27

	Année 2007												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	0,20	0,26	1,43	0,38	0,00	0,00	0,00	0,20

	Année 2008												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,16	0,36	1,15	0,35	0,17	0,00	0,00	0,19

	Année 2009												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,12	0,31	0,33	1,34	0,01	0,00	0,00	0,18

	Année 2010												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,05	0,11	0,33	0,47	0,93	0,33	0,24	0,00	0,00	0,20

	Année 2011												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	0,27	0,36	0,55	0,03	0,00	0,00	0,00	0,11

	Année 2012												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,09	0,22	0,51	0,60	1,21	0,28	0,00	0,00	0,00	0,24

	Année 2013												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	0,20	0,44	0,49	0,23	0,01	0,00	0,00	0,13

	Année 2014												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,05	0,11	0,32	0,31	0,75	0,84	0,32	0,00	0,00	0,22

ANNEXE2: Les simulations des écoulements futurs du bassin versant.

Année 2015													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,25	0,50	1,03	0,37	0,49	0,00	0,00	0,22

Année 2016													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,06	0,03	0,35	0,27	0,84	0,26	0,02	0,00	0,00	0,15

Année 2017													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,42	0,57	0,45	0,27	0,00	0,00	0,16

Année 2018													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,28	0,53	1,14	0,33	0,09	0,00	0,00	0,20

Année 2019													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,21	0,35	0,83	0,30	0,21	0,00	0,00	0,16

Année 2020													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,18	0,63	0,47	0,18	0,00	0,00	0,13

Année 2021													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,02	0,05	0,07	0,51	0,30	1,72	0,75	0,12	0,00	0,00	0,30

Année 2022													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,06	0,09	0,41	0,75	0,90	0,24	0,10	0,00	0,00	0,21

Année 2023													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,05	0,12	0,22	0,33	0,68	0,45	0,12	0,00	0,00	0,17

Année 2024													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,22	0,52	0,27	0,07	0,00	0,00	0,09

Année 2025													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,10	0,08	0,47	1,05	0,15	0,01	0,00	0,00	0,16

Année 2026													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,03	0,20	0,67	0,29	0,89	0,44	0,06	0,00	0,00	0,22

Année 2027													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,37	0,44	0,68	0,44	0,05	0,00	0,00	0,17

Année 2028													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,27	0,55	0,43	0,45	0,08	0,00	0,00	0,15

Année 2029													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,16	0,33	1,32	0,41	0,09	0,00	0,00	0,20

Année 2030													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,13	0,03	0,39	0,22	0,75	0,40	0,45	0,00	0,00	0,20

Année 2031													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,53	0,28	0,43	0,45	0,00	0,00	0,16

Année 2032													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,26	0,36	0,72	0,08	0,05	0,00	0,00	0,13

Année 2033													Débits moyen
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	

													(m3/s)
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,11	0,18	0,29	0,73	0,31	0,08	0,00	0,00	0,14

	Année 2034												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,21	0,57	1,12	0,49	0,13	0,00	0,00	0,22

	Année 2035												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0,29	0,73	0,68	0,10	0,00	0,00	0,19

	Année 2036												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,19	0,58	0,84	0,41	0,12	0,00	0,00	0,18

	Année 2037												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,08	0,60	0,81	0,35	0,12	0,00	0,00	0,17

	Année 2038												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,12	0,61	0,39	0,77	0,58	0,00	0,00	0,21

	Année 2039												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,24	0,07	0,41	0,42	0,00	0,00	0,00	0,10

	Année 2040												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,47	0,90	0,31	0,25	0,02	0,00	0,00	0,17

	Année 2041												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	0,29	0,80	0,69	0,36	0,16	0,00	0,00	0,20

	Année 2042												Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	

Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,25	0,96	0,62	0,03	0,00	0,00	0,16
---------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Année 2043													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,06	0,57	0,43	0,24	0,01	0,00	0,00	0,12

Année 2044													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,34	0,29	0,36	0,73	0,06	0,00	0,00	0,15

Année 2045													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,69	0,53	0,28	0,00	0,00	0,00	0,15

Année 2046													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,21	0,33	0,24	0,41	0,28	0,00	0,00	0,12

Année 2047													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,36	0,89	0,33	0,21	0,00	0,00	0,15

Année 2048													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,19	0,47	0,83	0,78	0,08	0,00	0,03	0,20

Année 2049													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,31	0,41	0,56	0,38	0,04	0,00	0,00	0,15

Année 2050													Débits moyen (m3/s)
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
Débits (m3/s)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,10	0,09	0,31	0,89	0,23	0,00	0,00	0,00	0,14