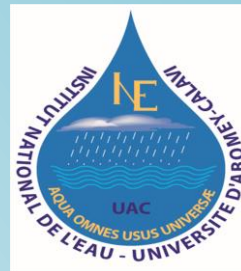




UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

BOKOSSA Houéfa Gwladys Hermionne

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

**IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE
SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN
VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE
D'ATCHERIGBE**

=====

Maître de Mémoire

Dr Maurice AHOUANSOU

Maître de Stage

M. Jonas AHOMLANTO



ANNEE ACADEMIQUE : 2023-2024



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU
=====



**DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES
RESSOURCES EN EAU**

**Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme
de Licence Professionnelle en Hydrologie**

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

**IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE
SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN
VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE
D'ATCHERIGBE**

Présenté par :

Hermionne BOKOSSA

Mention : Très bien

Jury :

Président : Dr. Audace A. V. DOSSOU-OLORY

Membres : Dr. S. Ernesto BONGOU

Dr. D. M. Maurice AHOUANSOU

ANNEE ACADEMIQUE : 2023-2024

CERTIFICATION

Nous soussignés :

- **Président du Jury** : Dr. Audace A. V. DOSSOU-OLORY
- **Examineur** : Dr. S. Ernesto BONGOU
- **Rapporteur** : Dr. D. M. Maurice AHOUANSOU

Jury chargé de juger le mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme de Licence Professionnelle en Hydrologie Quantitative de l'Etudiante H. G. Hermionne BOKOSSA, certifie que les différents apports, contributions et corrections énoncés au cours de sa soutenance dont le thème est « **Impact de la variabilité climatique sur les écoulements du sous-bassin versant du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé** », tenue le 13 Décembre 2024 de 14h45 à 16h, ont été intégrés au mémoire pour l'amélioration de la qualité scientifique et esthétique de ce dernier.

En foi de quoi, le présent certificat lui est délivré pour servir et valoir ce que de droit.

Président du Jury

Dr. Audace A. V. DOSSOU-OLORY

Membres du Jury

Dr. S. Ernesto BONGOU

Dr. D. M. Maurice AHOUANSOU

DEDICACE

A mes jeunes frères et sœurs, que ce travail soit source de
motivation pour eux et les inspire à mieux faire.

REMERCIEMENTS

Action de grâce à Dieu qui est Père, Fils et Esprit Saint, pour le souffle de vie et l'avalanche de grâces qu'il m'accorde. J'aimerais adresser mes remerciements, ma reconnaissance et ma gratitude envers certaines personnes, notamment :

- Mon maître de mémoire, le Docteur Maurice AHOUANSON, Maître de Conférences des universités CAMES, Enseignant Chercheur à la FSA, pour son appui et sa disponibilité tout au long du travail ;
- Dr. Jean HOUNKPE, Coordonnateur de l'Hydrologie Quantitative ;
- Tous les enseignants du Département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau (HGREA) ;
- Tout le personnel administratif et de soutien de l'INE ;
- M. Jonas AHOMLANTO, Directeur de CANAL-EAU, pour m'avoir accueillie au sein de sa structure ;
- M. Abel AHOMLANTO, Assistant du directeur de CANAL-EAU et M. Charles DOSSA, Contrôleur Technique à CANAL-EAU, pour le soutien, le suivi et les encouragements ;
- Tout le personnel de CANAL-EAU ;
- Ma mère Nathalie GANDAHOU et mon père Laurent BOKOSSA, qui m'ont donné la vie, encouragée et soutenue durant ces années d'études ;
- Mes tantes Reine GANDAHOU & Simone GANDADO et mes oncles Arnaud MIDJROKAN & Sévérin GANDONOU, pour leurs conseils, soutien et appui ;
- Mon frère, mes sœurs et tous les membres de ma famille, notamment M. Anicet SOTONDJI pour leur amour et leur présence ;
- Mes aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie, particulièrement Toussaint HOUNKPE, Amos ASSOGBA, Fructueux EHOUMINSOU et Samilou SALIFOU, pour leur aide précieuse ;
- Tous mes camarades de la Licence Professionnelle en Hydrologie, promotion 2021-2022, spécialement Cyrano ADOKO, Ziad DJINADO, Fabrice AGADJI, Josaphat DAYOU, Dieudonné GNONLONFOU, Celia NOUAGOMI, Godfys NAKPON, Amaury AHOMLANTO et David CODJEGBE pour ces années passées ensemble, dans l'amitié, la solidarité, l'apprentissage et les encouragements ;
- Les honorables membres du jury, pour avoir accepté d'apprécier le travail, en vue de son amélioration ;
- Tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce document.

RESUME

La présente étude d'impact de la variabilité climatique sur les écoulements a été menée sur le sous-bassin versant du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé qui couvre environ 6770 km² au centre du Bénin. L'objectif visé est de contribuer à une meilleure connaissance du comportement hydrologique du bassin. Ainsi, il a été question d'analyser les tendances climatiques dans les précipitations de la zone d'étude, sur la période de référence (1991-2022), grâce au test de tendance de Mann Kendall et à la méthode de l'Indice Standardisé de Précipitations de Lamb, puis d'identifier la rupture dans les données de pluie, afin de déterminer deux périodes pour la modélisation hydrologique avec HBV-light. Le test de student a été appliqué aux données de débits observés et simulés, d'évapotranspiration potentielle et réelle, de température et de précipitations, en vue de comparer leurs moyennes sur les deux sous-périodes pour déterminer l'existence ou non d'une différence significative. Les tests ont confirmé l'effectivité de la variabilité climatique, et révélé une tendance globale à la baisse sur le bassin versant. Cependant, les précipitations ont légèrement augmenté de 2012 à 2022 par rapport à la période de 1991 à 2011. De même l'évapotranspiration réelle de 2012 à 2022 est inférieure à la demande en eau de l'atmosphère (ETP), ce qui a entraîné une augmentation des écoulements sur cette période.

Mots clés : bassin versant ; impact, variabilité climatique ; tendance ; rupture ; modélisation hydrologique.

ABSTRACT

The present study of the impact of climate variability on flows was conducted on the Zou sub-watershed at the Atcherigbe outlet, which covers approximately 6,770 km² in central Benin. The objective was to contribute to a better understanding of the hydrological behavior of the basin. Thus, the study aimed to analyze climate trends in the precipitation data of the study area over de reference period (1991-2022), using the Mann Kendall trend test and the Lamb Standardized Precipitation Index method, then identify any breakpoints in the rainfall data to determine two periods for hydrological modeling with the HBV-light model. The Student's t-test was applied to orbserve and simulated flow data, potential and actual evapotranspiration, temperature and precipitation to compare their averages over the two sub-periods to determine if there is any significant difference. The tests confirmed the presence of climate variability and revealed an overall decreasing trend in the watershed. However, precipitation slightly increased from 2012 to 2022 compared to the 1991-2011 période. Likewise, actual evapotranspiration from 2012 to 2022 was lower than the atmospheric water demand (ETP), which led to an increase in flows during this period.

Keywords : watershed ; impact ; climate variability ; trend ; breakpoint ; hydrological modeling.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

CCDR : Rapport National sur le Climat et le Développement

DG-Eau : Direction Générale de l'Eau

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

HBV : Hydrologiska Byrans Vattenbalansvdelning

KGE : Kling-Gupta Efficiency

METEO-BENIN : Agence Nationale de Météorologie du Bénin

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

SPI : Indice Standardisé de Précipitations

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 1</u> : Coordonnées des stations	15
<u>Tableau 2</u> : Aires de surface et coefficients des stations pluviométriques	25
<u>Tableau 3</u> : Résultats du test de tendance de Mann Kendall	28
<u>Tableau 4</u> : Bilan de modélisation sur la première partie	37
<u>Tableau 5</u> : Bilan de modélisation sur la deuxième partie.....	37
<u>Tableau 6</u> : Bilan de modélisation de 1991 à 2011 (Simulation)	38
<u>Tableau 7</u> : Bilan de modélisation de 2012 à 2022 (Simulation)	39
<u>Tableau 8</u> : Résultats du test de Student	40
<u>Tableau 9</u> : Cumuls annuels des paramètres climatiques et moyennes annuelles des débits ...	49

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 1</u> : Organigramme CANAL-EAU	10
<u>Figure 2</u> : Carte de localisation du sous-bassin versant du Zou	11
<u>Figure 3</u> : Carte du réseau hydrographique du sous-bassin versant du Zou.....	12
<u>Figure 4</u> : Carte de répartition spatiale des stations pluviométriques du sous-bassin versant du Zou	13
<u>Figure 5</u> : Influence des stations pluviométriques sur le sous-bassin versant.....	24
<u>Figure 6</u> : Cumul annuel des précipitations sur chaque station, de 1991 à 2022	26
<u>Figure 7</u> : Evolution temporelle de la pluie moyenne spatiale annuelle sur le sous-bassin du Zou	27
<u>Figure 8</u> : Test de rupture de Pettitt sur la pluie moyenne spatiale annuelle, de 1991 à 2022 .	29
<u>Figure 9</u> : Indices standardisés de précipitations sur chaque station de 1991 à 2022	30
<u>Figure 10</u> : Indices standardisés de précipitations sur la pluie moyenne spatiale annuelle de 1991 à 2022	31
<u>Figure 11</u> : Moyenne annuelle des débits à l'exutoire d'Atchérigbé de 1991 à 2022	32
<u>Figure 12</u> : Variation annuelle des précipitations et des débits	33
<u>Figure 13</u> : Calage 1992-2004.....	34
<u>Figure 14</u> : Validation 2005-2011	35
<u>Figure 15</u> : Calage 2013-2018	36
<u>Figure 16</u> : Validation 2019-2022.....	36
<u>Figure 17</u> : Simulation 1991-2011.....	39
<u>Figure 18</u> : Simulation 2012-2022	40

Figure 19 : Structure et paramètres du modèle HBV-light..... 50

Figure 20 : Paramètres respectifs des modèles sur la première et la deuxième sous périodes 51

SOMMAIRE

CERTIFICATION	ii
DEDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RESUME.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES.....	viii
Chapitre 1 : Généralités.....	2
Chapitre 2 : Données, Matériels et Méthodologie.....	9
Chapitre 3 : Résultats et Discussion.....	24
DISCUSSION	44
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	45
CONCLUSION	45
PERSPECTIVES.....	46
Références bibliographiques	47
ANNEXES	49

CHAPITRE I : GENERALITES

Chapitre 1 : Généralités

1.1. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel, la question du changement climatique est plus que préoccupante. La modification du climat est devenue l'une des préoccupations majeures actuelles des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde. Les changements climatiques sont donc considérés comme l'une des menaces les plus graves opposées au développement durable, avec des effets défavorables attendus sur entre autres : la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, les ressources en eau et les autres ressources naturelles. Certes, le climat de la planète a des variations naturelles, mais les scientifiques s'accordent pour dire que les concentrations accrues de rejets anthropiques de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont en train de causer des changements dans le climat. L'importance de l'eau sur l'environnement et la vie de notre planète a été soulignée par de nombreux scientifiques. Dans un pays comme le Bénin l'eau est un élément stratégique de développement durable, de sécurité alimentaire et de lutte contre la pauvreté. Aussi, sa mobilisation, sa gestion et son utilisation doivent faire l'objet d'un cadre réglementaire rationnel et rigoureux.

Les cours d'eau sont victimes des variations du climat, depuis bon nombre d'années. L'Afrique de l'Ouest n'a pas été épargnée par les vicissitudes climatiques. Cela sévit depuis plus de trente ans en Afrique de l'Ouest en général, dans les pays sahéliens et dans les pays du Golfe de Guinée. Plusieurs travaux scientifiques ont permis de confirmer le lien entre le climat et la disponibilité des ressources en eau. Certaines recherches laissent voir une diminution des précipitations en Afrique de l'ouest. En Afrique subsaharienne, les dernières décennies de la fin du deuxième millénaire ont été marquées par une évolution rapide des climats (Ogouwalé, 2006). Au Burkina Faso, la baisse de la pluviométrie constatée ces dernières années affecte le remplissage et le stockage de l'eau dans les barrages. La problématique de la disponibilité des ressources en eau sur le bassin du Nakambé est une réalité (Ibrahim, 2012). Goula et al., en 2006, ont montré que le bassin versant du N'Zi à Dimbokro a subi une baisse des précipitations de 13 % de 1969 à 2000 et celui du N'Zo à Kahin, une baisse de 14 % entre 1967 et 1993 ; Dipama et al. (2019), ont fait des études sur la variabilité climatique et la gestion efficiente de l'eau dans le bassin versant du Sourou. En Côte d'Ivoire, Brahima Koné et al. (2019), ont montré l'effet de la variabilité pluviométrique sur les écoulements de surface dans le bassin versant de l'Agnéby. De même, toujours en Côte d'Ivoire, FOSSOU et al. (2019), ont étudié la variabilité de l'hydrométrie en Afrique de l'Ouest et plus précisément, le cas du N'zi à

N'zianouan dans le département de Tiassalé. Le Bénin fait également partie des pays touchés, et selon le Rapport National sur le Climat et le Développement au Bénin (CCDR), le pays se classe au 152^e rang sur 181 pays en termes de vulnérabilité aux événements climatiques extrêmes. Cette vulnérabilité est exacerbée par sa situation géographique et ses caractéristiques environnementales. Dans le bassin versant de l'Okpara, au Bénin, les études réalisées par Ogouwalé (2009) mettent en lumière, une baisse des hauteurs de pluie et une augmentation des températures minimales et maximales, ce qui implique une diminution de la disponibilité des ressources en eau en général dans le bassin versant et spécifiquement, celles qui sont mobilisées au niveau de la retenue d'eau de l'Okpara. Obada et al. (2016), dans l'optique de contribuer à mettre en place un cadre adéquat de gestion de la ressource en eau dans le bassin du Mékrou, ont testé neuf modèles hydrologiques pluie-débit globaux afin de reproduire les écoulements à l'exutoire de Kompongou : GR4J, AWBM, TANK, Sacramento, HBV, SMAR, IHACRES, SimHyd et ModHyPMA. Atchade et al. (Liège 2015), ont travaillé sur la dynamique de l'occupation des terres et ressource en eau du bassin versant de la rivière du Zou à l'exutoire de Domè. Adetona et al. (2022), ont évalué la disponibilité en eau souterraine du bassin versant du Zou grâce à la télédétection. Pour compléter les travaux de ces chercheurs et scientifiques, nous voulons travailler à montrer les périodes excédentaires et déficitaires du sous-bassin versant du Zou, ainsi que sa sensibilité à l'inondation et/ou à la sécheresse, face aux vicissitudes du climat. D'où le thème : **IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE**. La fiabilité d'un travail scientifique nécessite une série de données longues et homogènes, afin d'avoir de résultats pertinents (Sambou & Nimy, 2006). Notre travail porte donc sur l'analyse des caractéristiques des données hydrométriques et hydrologiques de trente-deux (32) années, allant de 1991 à 2022, des stations du sous-bassin versant du Zou, et a pour but, de retracer la variabilité climatique et son impact sur les écoulements et le régime hydrologique dudit bassin, plus précisément à l'exutoire d'Atchérigbé et de déterminer sa vulnérabilité hydrologique, face au changement climatique.

1.2. Objectifs d'étude

Cette étude se fixe un objectif général visant à comprendre le comportement des écoulements du sous-bassin versant du Zou dans un contexte de variabilité climatique. Pour atteindre cet objectif, des orientations spécifiques ont été définies, permettant d'analyser en détail, les différents aspects de cette problématique.

1.2.1. Objectif général

Evaluer l'impact de la variabilité du climat sur les écoulements du sous-bassin versant du Zou, à l'exutoire d'Atchérigbé.

1.2.2. Objectifs spécifiques

- Analyser les tendances dans les précipitations du sous-bassin versant du Zou ;
- Identifier l'impact actuel du climat sur l'écoulement du sous-bassin versant du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé ;
- Proposer des techniques de conservation, pour une meilleure gestion des ressources en eau du bassin.

1.3. Hypothèses de travail

Les observations antérieures dans la région du sous-bassin versant du Zou et dans des régions similaires, révèlent des changements dans les écoulements, principalement influencés par les fluctuations climatiques. Ces modifications suscitent des questions quant à l'évolution future des écoulements dans cette zone, et soulèvent des hypothèses en ce qui concerne les impacts potentiels du climat actuel sur ces derniers.

H1 : Les écoulements dans le sous-bassin versant du Zou, à l'exutoire d'Atchérigbé ont une tendance à la baisse ;

H2 : Le climat actuel entraîne une augmentation des écoulements.

1.4. Structure du mémoire

Ce document est organisé en trois grandes parties. La première, est introductive et aborde les généralités (Chapitre 1), notamment une brève introduction qui décrit le contexte et justifie l'étude, les objectifs de l'étude, les hypothèses de travail et la revue de littérature. La deuxième (Chapitre 2), présente les données, le matériel, les méthodes utilisées, la zone d'étude et le lieu de stage. Les principaux résultats de l'étude et leur interprétation sont résumés dans la troisième partie (Chapitre 3), de même, nous y avons la discussion, les perspectives, les méthodes d'une bonne gestion des ressources en eau, et la conclusion.

1.5. Revue de littérature

1.5.1. Clarification conceptuelle

Bassin versant :

Un bassin versant ou bassin hydrographique est une aire géographique dans laquelle toutes les eaux de ruissellement s'écoulent à travers un réseau de cours d'eau et éventuellement, d'étendues d'eau vers un point de convergence appelé exutoire (Loi n°2010-44 portant gestion de l'eau en République du Bénin).

Exutoire :

L'exutoire est le point de sortie d'un bassin versant où toute l'eau de surface collectée converge et s'évacue vers un cours d'eau plus grand (lac, mer ou océan). Il est essentiel pour la mesure car il permet d'évaluer la quantité d'eau qui s'échappe et la réponse du bassin versant aux précipitations et aux divers apports d'eau (Moshin Abbas et *al*, 2022).

Variabilité climatique :

Elle décrit le défaut de permanence des valeurs saisonnières ou annuelles des paramètres climatiques par rapport aux différentes moyennes temporelles qui servent de référence. En général, ces paramètres sont : les précipitations, les débits, les températures, l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'écoulement surfacique et souterrain. La variabilité climatique peut se présenter sous forme d'abondance de pluies, de sécheresses, d'inondations, etc. Les variations des précipitations et des températures entraînent une modification du ruissellement et des ressources en eau (GIEC, 2007 ; Karambiri *et al.* 2016).

Période déficitaire :

Une période déficitaire en hydrologie désigne une période durant laquelle les précipitations ou les débits sont inférieur(e)s à la moyenne habituelle. Cela peut être dû à des sécheresses prolongées ou des variations saisonnières (Michel Greco et *al*, 2021).

Période excédentaire :

Dans le contexte hydrologique, une période excédentaire est une période pendant laquelle les précipitations ou les débits sont supérieur(e)s à la moyenne normale. Elle peut résulter de conditions climatiques favorables, comme les pluies intenses (Shao Dongdong et *al*, 2021).

Tendances climatiques :

Les tendances en général désignent une évolution, une orientation observée dans un domaine donné. Les tendances climatiques font référence aux changements que présentent les conditions climatiques. Ces tendances peuvent prendre en compte, les variations de température, les modifications dans les régimes de précipitations, la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes comme la sécheresse et les inondations (GIEC).

Test de tendance :

Un test de tendance est un test qui permet de dégager ou d'estimer par le biais de certaines méthodes, l'existence ou non d'une tendance dans une série chronologique avec un niveau de signification donné. Selon Kendall, un test de tendance est un outil statistique qui permet de déterminer si les valeurs d'une série temporelle augmentent ou diminuent de manière significative sur le temps, en utilisant les rangs pour éviter les hypothèses de normalité (Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Methods. Charles Griffin & Company).

Modélisation hydrologique :

La modélisation hydrologique est l'activité qui sert à passer des simulations climatiques aux simulations hydrologiques, il est nécessaire d'utiliser des modèles hydrologiques, c'est-à-dire des modèles numériques de représentation de la relation pluie-débit obtenue à l'échelle d'un bassin versant. Pour Singh et Woolhiser, la modélisation hydrologique est un ensemble d'outils et de méthodes qui permettent de quantifier et de prévoir le comportement hydrologique en s'appuyant sur des équations différentielles et des données d'entrée de mesures. Ils soulignent l'importance de la calibration et de la validation des modèles pour des résultats fiables (Singh, D.A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Engineering, ASCE).

1.5.2. Synthèse bibliographique

L'étude du changement climatique et de la variabilité climatique est d'une très grande importance pour la gestion et la planification des ressources en eau.

Rosine Marie N'guessan FOSSOU et *al* en 2014, ont travaillé sur la variabilité climatique et son incidence sur les ressources en eaux de surface et spécialement sur les stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire, en Afrique de l'Ouest. L'objectif a été d'examiner l'impact du changement climatique sur l'évolution du N'zi qui est le principal cours d'eau de la zone, en exploitant des séries chronologiques de pluies et de débits. L'application

des méthodes de Nicholson, de Maillet ainsi que des tests statistiques de détection de ruptures (test de Buishand, test de Hubert, test de Lee Heghinian et test de Pettitt), et de tendances (test de Mann-Kendall, test de Sen) ont permis d'identifier une variabilité climatique caractérisée par une alternance de périodes humides, normales et sèches, puis, de détecter des ruptures en 1968 pour Dimbokro et en 1975 pour M'bahiakro et Bocanda, ainsi qu'une tendance à la baisse de la pluviométrie (10 à 18 %) et des volumes mobilisés par les aquifères (30 à 51 %).

En 2012, KODJA D. Japhet et *al* ont étudié la sensibilité de l'écoulement au forçage pluviométrique dans le bassin versant du Zou à Atchérigbé au Bénin, en Afrique de l'Ouest. Il s'agissait d'analyser les modifications induites par la variabilité pluviométrique sur le comportement hydrologique dudit bassin sur la période 1951 à 2003, grâce aux données climatologiques (pluie, ETP) et hydrométriques (écoulements moyens). Ils ont fait recours au test de Pettitt, sur l'interface du logiciel Khronostat 1.01, afin d'identifier les ruptures dans les séries pluviométriques. Les différentes analyses effectuées ont montré que la variabilité pluviométrique a un impact beaucoup plus important sur l'écoulement que sur la recharge et l'évaporation. Cette situation confirme que les fluctuations hydrologiques sont sensibles au forçage pluviométrique au cours de ces dernières décennies, notamment en région du socle.

J.E. PATUREL et *al*, ont en 1996, étudié les procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques et la modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Ils avaient pour but, d'identifier une éventuelle rupture dans les séries chronologiques pluviométriques et hydrométriques. Leur analyse s'est faite sur les précipitations annuelles de quatre pays riverains du Golfe de Guinée, à savoir : le Bénin, la Côte d'Ivoire, le Ghana et le Togo. Ils se sont basés sur des méthodes statistiques de détection de ruptures telles que : le test de Pettitt (Pettitt, 1979), la méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee et al., 1977), le test statistique U de Buishand (Buishand, 1982, 1984) la segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989) et des représentations graphiques, pour identifier une chute brutale de la pluviométrie autour de l'année 1970. Les représentations cartographiques montrent le net glissement des isohyètes vers le Sud et rend bien compte de la dimension régionale du phénomène de baisse du régime pluviométrique déjà observé à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest sahélienne.

CHAPITRE II : Données, Matériels et Méthodologie

Chapitre 2 : Données, Matériels et Méthodologie

Dans ce chapitre, nous avons dans une première partie, décrit le lieu de stage (Canal-Eau) et la zone d'étude (Sous-bassin versant du Zou). Dans la seconde partie nous avons présenté les données utilisées pour les travaux, ainsi que les matériels utilisés et la méthodologie de travail adoptée.

2.1. Présentation de la structure d'accueil

2.1.1. Historique

CANAL-EAU SARL, créé le 25 février 1998 au capital social d'un million (1.000.000) de francs CFA, avec son siège à Cotonou Carré 1356 Parcelle 7 Houéyiho II en République du Bénin (transféré en 2009, à Abomey-Calavi) est une société Béninoise à responsabilité limitée.

Cette structure est créée pour palier un tant soit peu, à un vide constaté, dans le secteur privé dans les années 90, pour la fourniture des prestations de services et travaux dans les domaines de l'EAU, de l'Assainissement, de l'Environnement, du Génie Sanitaire et Civil, puis de Conditionnement de l'air - du Gaz - et de l'Eau (Froide et Chaude).

2.1.2. Missions

Les missions de CANAL-EAU sont nombreuses. Il s'agit de :

- Contribuer activement : à l'approvisionnement en eau potable des populations, à l'assainissement de leur cadre de vie, à la protection et à l'amélioration de leur environnement, quel que soit le pays, le continent d'appartenance pour améliorer leurs conditions de vie ;
- Créer l'auto-emploi aux actionnaires et des emplois aux personnes tierces ;
- Appuyer les communautés à l'auto développement ;
- Et enfin, contribuer aux actions humanitaires.

2.1.3. Organigramme de CANAL-EAU

Sous la direction de M. V. Jonas AHOMLANTO à l'exécutif, l'entreprise est composée des personnels ci-après

IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE

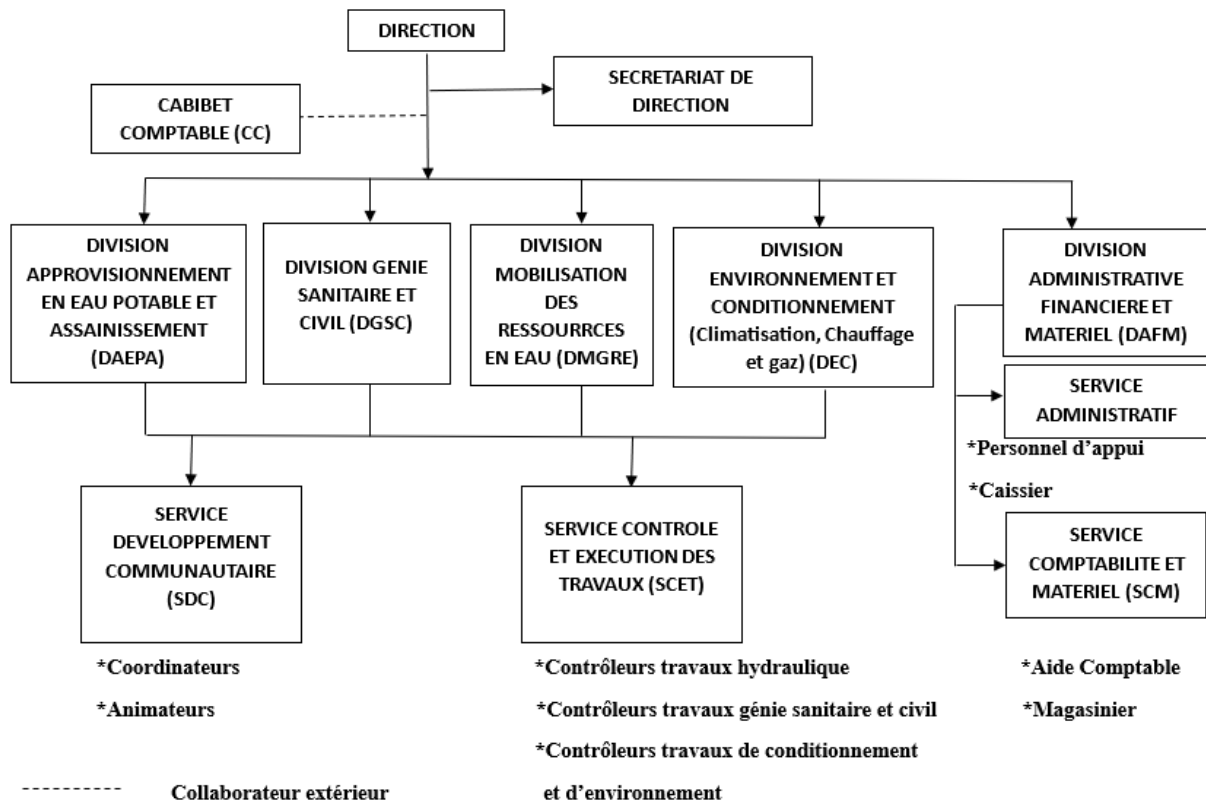


Figure 1 : Organigramme CANAL-EAU

Source : CANAL-EAU

2.2. Zone d'étude

Situé entre 01°37'23'' et 02°37'30'' de longitude, puis 06°54'48'' et 08°34'23'' de latitude nord, le bassin versant du Zou, sous-bassin versant de l'Ouémé qui est le plus grand fleuve du Bénin, couvre une superficie totale de 8495 km². A l'exutoire d'Atchérigbé, il s'étend sur environ 6770 km². Il est limité au Nord par la Haute vallée de l'Ouémé, au Sud par la basse et moyenne vallée de l'Ouémé, à l'Est par la Haute vallée de l'Ouémé et la basse et moyenne vallée de l'Ouémé, au Nord-Est, par le bassin versant du Mono et au Sud-Est, par les sous-bassins versants du Couffo et de Hlan. Du point de vue topographique, le bassin présente généralement un relief de type pénéplaine d'altitude variant entre 20 et 320 mètres avec une orientation globale Nord-Sud. Le bassin versant repose sur les roches très anciennes datant du précambrien (roches sédimentaires et du socle). Sur le plan lithologique, les roches sédimentaires anciennes déposées après les activités magmatiques, ont été reprises par le magma pour donner des roches très métamorphosées et déformées pendant plusieurs phases orogéniques. Le climat du sous-bassin versant du zou est intermédiaire entre soudano sahélien et subéquatorial. Il est situé dans la zone

IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE

du climat Guinéen, très humide et subit l'influence des vents de mousson soufflant depuis le Golfe de Guinée. Le mois le plus humide est septembre tandis que le mois le plus sec est janvier. La température moyenne maximale est observée durant le mois de mars et celle minimale durant le mois d'août.

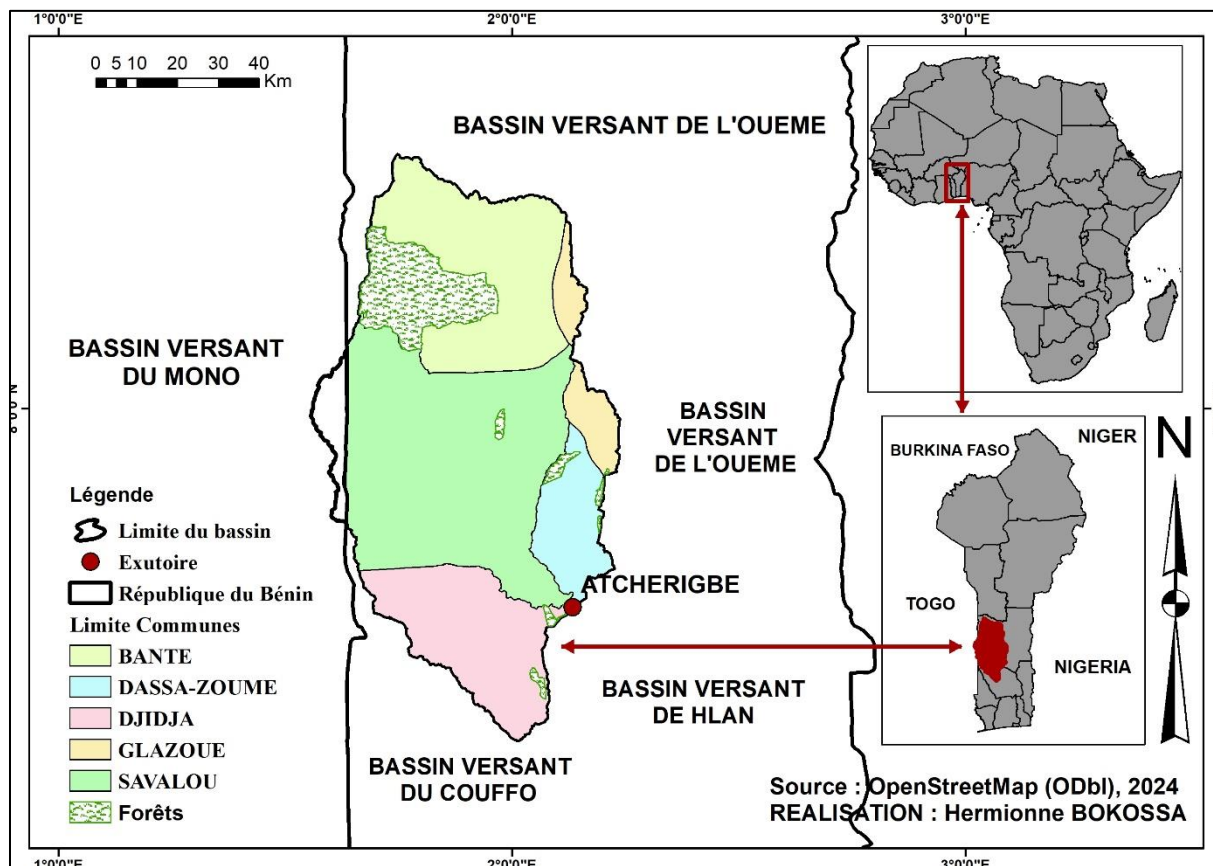


Figure 2 : Carte de localisation du sous-bassin versant du Zou

La Figure 3 ci-après montre le réseau hydrographique du sous-bassin versant du Zou. Les lignes bleues représentent les rivières et cours d'eau, indiquant les différents affluents qui se dirigent vers l'exutoire localisé à Atchérigbé (point rouge). Les bassins versants du Mono, du Couffo, de l'Ouémé et de Hlan, sont des zones limitrophes du sous-bassin du Zou. La carte donne donc une vue d'ensemble sur la structure des cours d'eau du sous-bassin et ses connexions aux bassins adjacents.

IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE

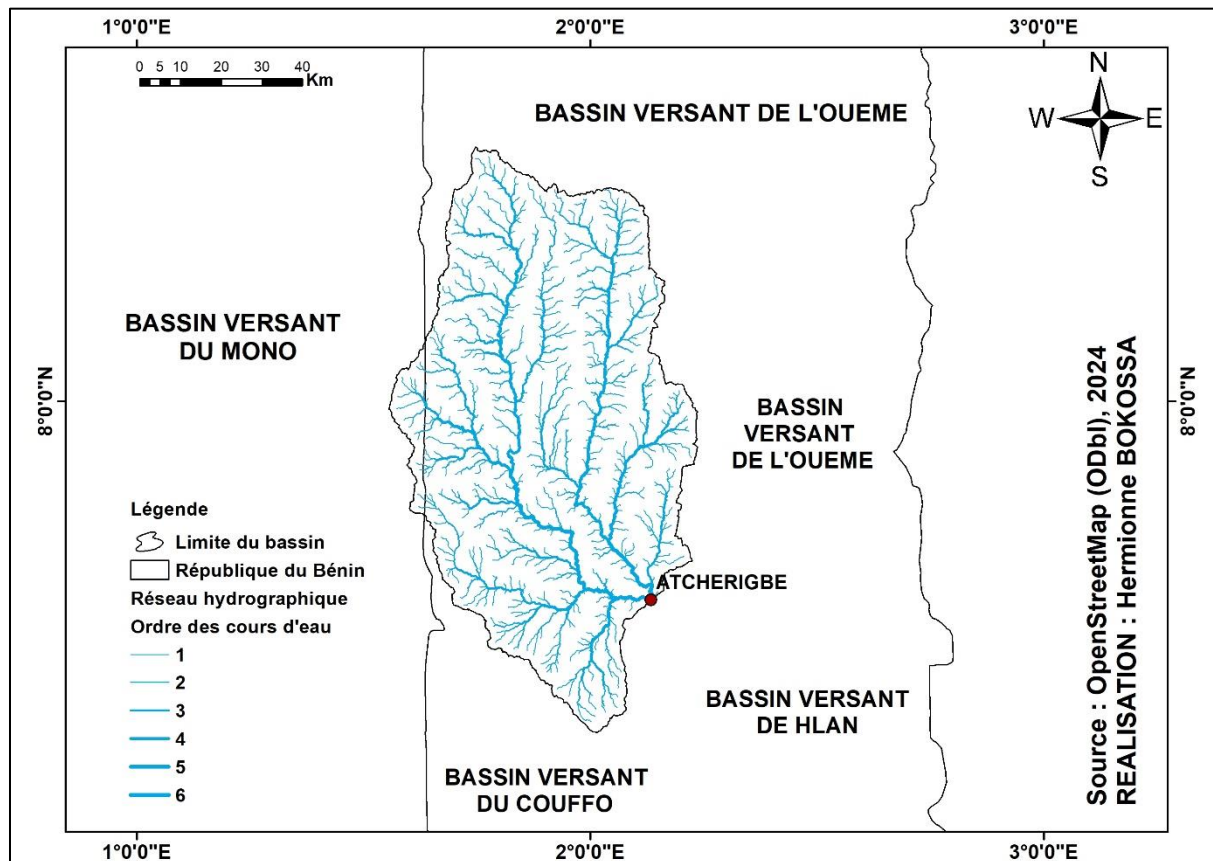


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du sous-bassin versant du Zou

La figure 4 ci-après représente la carte de répartition spatiale des stations pluviométriques sur le sous-bassin du Zou. Onze stations sont illustrées par des points rouges dispersés à divers endroits clés à l'intérieur du bassin, ainsi qu'à la périphérie. Les localités où se situent ces stations sont : Pira ; Bantè ; Gouka ; Savalou ; Tchetti ; Agouna ; Aklankpa ; Savè, Dassa-Zoumè ; Abomey et Bohicon.

**IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN
VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE**

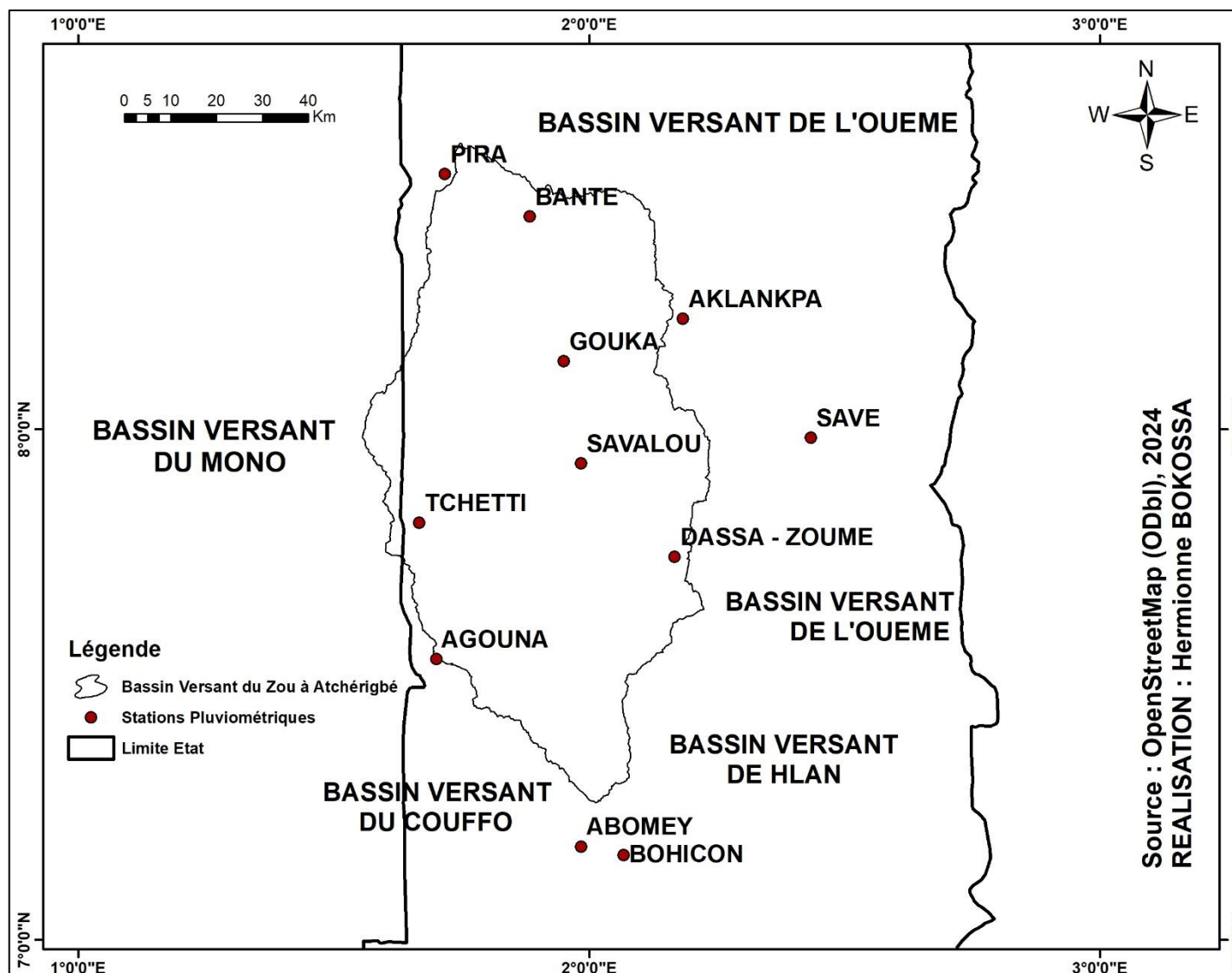


Figure 4 : Carte de répartition spatiale des stations pluviométriques du sous-bassin versant du Zou

2.3. Données

2.3.1. Acquisition des données

Les données qui ont fait objet de notre étude sont des données historiques journalières de précipitations, d'évapotranspiration potentielle, de température et de débits d'écoulement. Pour des études hydrologiques, afin de mieux observer les variations du climat, il est recommandé d'utiliser les données sur au moins trois décennies, c'est-à-dire trente (30) ans. Compte tenu de la disponibilité des données, nous avons axé notre travail sur une période d'étude de trente-deux (32) ans. La collecte de ces données se répartie de la manière suivante :

- les données de précipitations, de 1991 à 2022, des stations pluviométriques installées à AGOUNA, ABOMEY AKLANKPA, BANTE, BOHICON, DASSA-ZOUME, GOUKA, PIRA, SAVALOU et TCHETTI, à l'Agence Nationale de Météorologie du Bénin (METEO-BENIN) ;
- les données de précipitations, de 1991 à 2022, de la station synoptique de SAVE, à l'Agence Nationale de Météorologie du Bénin (METEO-BENIN) ;
- les données de température de la station synoptique de SAVE, de 1991 à 2022, à l'Agence Nationale de Météorologie du Bénin (METEO-BENIN) ;
- les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) de la station synoptique de SAVE, de 1991 à 2022, à l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin (METEO-BENIN) ;
- les données de débits, de 1991 à 2022, de la station hydrométrique d'Atchérigbé, à la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau).

Tableau 1 : Coordonnées des stations

STATIONS	X	Y
ATCHERIGBE	404330	835997
AKLANKPA	2,18	8,22
ABOMEY	1,98	7,18
AGOUNA	1,7	7,55
BANTE	1,88	8,42
BOHICON	2,07	7,17
DASSA - ZOUME	2,17	7,75
GOUKA	1,95	8,13
PIRA	1,72	8,5
SAVALOU	1,98	7,93
SAVE	2,43	7,98
TCHETTI	1,6667	7,8167

2.3.2. Traitement des données

La pertinence et la fiabilité des résultats reposent sur la qualité des données disponibles. De ce fait, les données pluviométriques ; hydrométriques (débits) ; de température et d'évapotranspiration potentielle, ont été traitées selon le format d'entrée de chaque logiciel utilisé. Les valeurs manquantes ont été remplacées par NA pour faciliter leur manipulation dans RStudio. Les lacunes dans les débits sont remplacées par -9999 pour l'utilisation dans le modèle HBV, et celles dans les précipitations ont été comblées grâce à la méthode des stations voisines et aux polygones de Thiessen. Les aberrations n'ont pas posé problème au point de déterminer le pourcentage de données manquantes pour supprimer des stations. La méthode de Thiessen a permis de combler les lacunes dans les séries de pluie.

2.4. Matériels

Le principal outil de travail qui a été utilisé pour la réalisation de cette recherche est un ordinateur portable, avec les logiciels ci-après :

- Word 2019 pour la rédaction du document ;
- Excel 2019 pour la réalisation de tableaux et le traitement de fichiers ;
- ArcGis 10.8 pour la réalisation des cartes ;
- RStudio pour la réalisation des graphes ;
- HBV-Light pour la modélisation.

2.5. Méthodologie

La méthode d'enquête utilisée dans le cadre de notre travail est la collecte et l'interprétation de documents de différentes natures, ayant permis de tirer de potentielles données et informations.

2.5.1. Appréciation des tendances et variabilités du régime pluviométrique

2.5.1.1. Test de tendance de Mann–Kendall modifié

Le test de Mann-Kendall modifié (ou test de Mann-Kendall avec correction pour autocorrélation), est une version ajustée du test non paramétrique de Mann-Kendall, qui prend en compte l'autocorrélation dans les séries temporelles, ce qui est essentiel dans l'analyse des tendances. Il ajuste la statistique S (Mann Kendall classique) pour refléter l'influence des dépendances temporelles. La statistique S est calculée comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

- S : la relation entre le nombre de paires d'observation ;
- x_j et x_i sont les valeurs observées à des moments j et i ;
- n est le nombre d'observations ;
- $\text{sgn}(x_j - x_i)$ est la fonction définie comme suit :

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} -1, & \text{si } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{si } (x_j - x_i) = 0 \\ 1, & \text{si } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Dans le test de Mann-Kendall modifié, la variance $\text{Var}(S)$ de la statistique S est corrigée pour tenir compte de l'autocorrélation. Sa formule est :

$$\text{Var}(S) = \text{Var}(S \text{ Classique}) \times f(n, \text{autocorrélation}) \quad (3)$$

Où f est une fonction tenant compte de l'autocorrélation et de la taille de l'échantillon.

Une fois la statistique S et la variance corrigée $\text{Var}(S)$ calculées, on détermine la statistique Z qui suit une loi normale standardisée, permettant d'évaluer la significativité de la tendance observée dans la série temporelle. Elle se calcule comme suit :

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Si $|Z| > Z_{\alpha/2}$, où $Z_{\alpha/2}$ est la valeur critique pour un niveau de confiance donné (par exemple, 1.9 pour un seuil de 95%), on rejette l'hypothèse nulle H_0 et on conclut qu'il existe une tendance significative (positive ou négative).

L'hypothèse nulle H_0 « absence de tendance » est acceptée si la P_{value} est supérieure à 5%. Le sens de la tendance est défini par le coefficient statistique de Mann-Kendall Z . Si Z est positif, la tendance est à la hausse, mais si Z est négatif, alors la tendance est à la baisse.

2.5.1.2. Indice Standardisé de Précipitations (SPI)

Le SPI est un indice de probabilité reposant uniquement sur les précipitations, et qui a été développé en 1993, par TB McKee et ses collaborateurs (NJ Doesken et J. Kleist) à l'université d'Etat du Colorado aux Etats-Unis. Il sert à mesurer la sécheresse, et donc à mieux visualiser les périodes déficitaires et excédentaires. L'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) a recommandé en 2009, d'utiliser principalement le SPI pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse météorologique (Hayes, 2011). Cet indice représente une variable centrée réduite et se traduit par la formule :

$$I_i = \frac{X_i - Xm}{\sigma} \quad (5)$$

Avec I_i : indice annuel des précipitations ;

X_i : module annuel des précipitations enregistrées au cours de l'année i ;

Xm : moyenne interannuelle des précipitations sur la période d'étude ;

σ : écart type des précipitations sur la période d'étude.

- SPI > 0 : plus de précipitations que la normale (plus humide) ;
- SPI < 0 : moins de précipitations que la normale (plus sec) ;

- $-0,99 < SPI < +0,99$: précipitations proches de la normale ;
- $SPI < -2,0$: extrêmement sec ;
- $SPI > 2,0$: extrêmement humide.

2.5.1.3. Test de Pettitt

Le test de Pettitt est utilisé pour détecter les ruptures dans les séries pluviométriques. Ce test par sa robustesse à détecter une rupture dans les séries chronologiques a été utilisé pour l'étude des fluctuations de variables hydrométéorologiques (DEMARÉE et NICOLIS, 1990 ; LUBÈS et al., 1994 ; SERVAT et al., 1999). L'hypothèse nulle H_0 traduit l'absence de rupture dans une série X_i de taille N . La mise en œuvre du test de Pettitt suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques x_i , $i=1,t$ et x_j , $j=t+1,N$ appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (6)$$

Où $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$, avec $\text{sgn}(x) = 1$, si $x > 0$, $\text{sgn}(x) = 0$, si $x = 0$ et $\text{sgn}(x) = -1$.

Par la théorie des rangs, Pettitt fait voir que si k désigne la valeur K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est exprimée approximativement par : $\text{Prob}(K_N > k \approx 2\exp(-6k^2/(N^3 + N^2)))$.

L'hypothèse H_0 est rejetée pour un risque α de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α . La série présente alors une rupture localisée lorsqu'on observe $\max |U_{t,N}|$ $t=1,N-1$.

2.5.1.4. Méthode des Polygones de Thiessen

La méthode de Thiessen permet de calculer la valeur moyenne d'une grandeur spatialisée, connue ponctuellement, sur un territoire. Elle utilise des propriétés de géométrie, afin de déterminer les régions d'influence et le poids de chaque station et consiste à décomposer la surface en polygones entourant les différents postes de mesure, de façon à attribuer à chacun des points de la surface une intensité égale à celle observée sur le poste de mesure le plus proche. La technique est de tracer des traits qui relient les stations deux à deux, pour découper la surface en triangles, dont les sommets sont les différents postes de mesure. On trace ensuite les lignes bissectrices et on les joint, pour former des polygones. Le poids de chacune des stations de

mesure équivaut au rapport entre l'air du polygone A_i (situé à l'intérieur du bassin versant) et l'aire totale du bassin A .

$$\bar{h} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^H A_i h_i \quad (7)$$

La méthode de Thiessen est peu efficace, lorsque la topographie est irrégulière, car la définition de chaque zone ne tient pas compte de ce paramètre.

2.5.2. Modélisation avec HBV-light

Il existe deux grands types de modèles hydrologiques : les modèles à base physique qui représentent les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus, et les modèles conceptuels, généralement constitués de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux diminuent et augmentent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques du bassin versant. Les modèles conceptuels cherchent à représenter les principaux processus hydrologiques sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés.

Le choix du modèle HBV s'est basé sur les travaux de certains chercheurs, qui ont démontré son efficacité dans la simulation des débits, et à reproduire les écoulements des bassins versants. En 2021, Biao I. et al ont calibré et validé le modèle, ils ont obtenu un KGE supérieur à 0,7, indiquant une bonne correspondance entre les débits observés et les débits simulés du bassin du Zou. Dossou M. et al en 2022, ont également obtenu un KGE supérieur à 0,7 en utilisant le modèle HBV pour simuler les écoulements du bassin versant de la Pendjari. Le modèle HBV a bien simulé les débits observés, avec un Nash de 0,75, pour les travaux sur le bassin versant du Mékrou, appliqués par Orou-Mamani L. et al, en 2023.

2.5.2.1. Présentation du modèle

Le modèle HBV a été élaboré par Bergstrom (1992, 1995) à l'Institut suédois de météorologie et d'hydrologie. Il est question d'un modèle conceptuel de bassin versant qui convertit les données de précipitations, de température de l'air et d'évapotranspiration potentielle en valeur de fonte nivale et en valeurs de l'écoulement fluvial et/ou du débit entrant dans les réservoirs.

Le modèle HBV décrit le bilan hydrologique général. Il peut être considéré comme un modèle semi-distribué permettant de diviser le bassin versant en sous-bassins et de créer des zones d'altitude. Il comprend des sous-programmes pour l'interpolation météorologique,

l'accumulation et la fonte de neige, l'évapotranspiration, le calcul de l'humidité du sol, la formation de l'écoulement et, la propagation par les cours d'eau et les lacs. Les bassins au relief très accidenté sont divisés en zones d'altitude, qui peuvent être réparties à leur tour en zones de végétation (zones boisées ou non boisées). Les données à introduire dans le modèle HBV sont les précipitations (hauteurs journalières), la température de l'air (moyennes journalières) et les estimations de l'évapotranspiration potentielle. Le modèle standard utilise les données mensuelles de l'évapotranspiration potentielle moyenne à longue échéance, basée généralement sur la formule de Penman et corrigée en fonction des anomalies de température (Lindström et Bergström, 1992). Il est également possible de calculer des valeurs quotidiennes proportionnelles à la température de l'air, mais avec des coefficients de proportionnalité mensuels. Les dernières versions du modèle HBV peuvent être exécutées avec des données de résolution temporelle plus fines (données horaires).

2.5.2.2. Critère de performance du modèle HBV

Le critère de Kling-Gupta (2009)

Le Kling-Gupta Efficiency (KGE) développé par Gupta, Kling, Yilmaz et Martinez est une combinaison du coefficient de corrélation de Pearson (r), du rapport entre les moyennes simulées et observées et du rapport entre les variances simulées et observées. C'est une métrique couramment utilisée en hydrologie pour évaluer la précision des simulations de débits.

Gupta et al. (2009) ont proposé un critère défini en fonction de la distance euclidienne (ED) entre les composantes et l'unité, qui est leur valeur maximale. La formule du KGE s'exprime de la manière suivante :

$$KGE = 1-DE, \text{ avec } DE = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (8)$$

r : le coefficient de corrélation de Pearson, qui mesure la force et la direction entre la simulation et l'observation ;

α : σ simulé / σ observé , le coefficient qui compare la variabilité (écart type) de la simulation par rapport à l'observation ;

β : μ simulé / μ observé, le rapport entre la moyenne de la simulation et la moyenne de l'observation

L'objectif est d'atteindre les valeurs optimales des composantes, la distance euclidienne doit tendre vers zéro et on cherche ainsi à maximiser le KGE.

Une valeur de KGE égale à 1, indique une correspondance parfaite entre le modèle et les observations, tandis que les valeurs plus proches de 0 ou négatives indiquent une performance plus faible du modèle.

$KGE > 0,75$: Excellent ;

$0,50 < KGE \leq 0,75$: Très bon ;

$0,25 < KGE \leq 0,50$: Bon ;

$KGE \leq 0,25$: Insuffisant.

2.6. Test statistique de signification de Student ou Test t

Le Test de Student est une méthode statistique utilisée pour comparer les moyennes de deux groupes et déterminer si elles sont significativement différentes, tout en tenant compte de la dispersion (variabilité) des données. Son but principal est de vérifier si deux échantillons sont différents l'un de l'autre. Il permet de tester l'hypothèse nulle H_0 , qui stipule qu'il n'y a pas de différence significative entre les moyennes de deux échantillons, contre une hypothèse alternative H_1 , qui affirme qu'il y a une différence. En ce qui concerne les types de test de Student, nous avons : le test de Student pour échantillons indépendants (two-tailed or independent test), qui compare les moyennes de deux groupes indépendants, pour voir s'il y a une différence significative, le test de Student pour échantillons appariés (one-tailed or dependent test), utilisé lorsque les mêmes échantillons sont testés deux fois, et le Test t pour un échantillon, qui compare la moyenne d'un échantillon à une valeur théorique connue ou attendue.

Pour des paires d'observations (x_i, y_i) , la statistique t pour un test apparié est :

$$t = \frac{d}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad (9)$$

Où : d est la différence moyenne entre les paires ; S_d est l'écart-type des différences et n , le nombre de paires.

Si on a deux échantillons indépendants, de tailles n_1 et n_2 , avec des moyennes $\bar{x}_1$ et $\bar{x}_2$ et des écarts-types s_1 et s_2 , la statistique t est calculée de la manière suivante :

$$t = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (10)$$

Pour un échantillon de taille n avec une moyenne $\bar{x}$ et un écart-type s , la statistique t se calcule comme suit :

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (11)$$

Où : $\bar{x}$ est la moyenne de l'échantillon ; μ_0 , la valeur théorique de la moyenne (ou la moyenne sous l'hypothèse nulle) ; s , l'écart type de l'échantillon et n , sa taille.

Les tests permettant de vérifier des hypothèses ont pour but de calculer la valeur p. La Pvalue (ou valeur p) dans le test de Student, est une mesure pour déterminer si les résultats observés sont statistiquement significatifs. Elle représente la probabilité d'obtenir une différence entre les moyennes aussi extrêmes que celle observée, ou plus extrême, sous l'hypothèse nulle (c'est-à-dire en supposant qu'il n'y a aucune différence entre les moyennes).

Si la Pvalue est petite (inférieure à un seuil de 0,05 ou 0,01), cela signifie qu'il est très peu probable d'observer une différence aussi grande par hasard seul. On rejette H_0 et on conclut que la différence entre les moyennes est statistiquement significative. Si la Pvalue est grande (supérieure au seuil), cela implique que la différence observée pourrait facilement être due au hasard. Dans ce cas, on ne rejette pas l'hypothèse nulle, puis on conclut qu'il n'y a pas suffisamment de preuves pour affirmer qu'il existe une différence significative.

Après avoir calculé la statistique t , on la compare à une valeur critique issue de la table de Student pour un certain niveau de confiance (95% ou 99%). Le degré de liberté pour ce test est $n-1$ pour un échantillon et $n_1 + n_2 - 2$, pour deux échantillons.

Si la statistique t calculée dépasse la valeur critique (en absolu), on rejette l'hypothèse nulle. Si elle est inférieure, on ne rejette pas l'hypothèse nulle.

Ce chapitre a couvert la description géographique du milieu étudié, les types de données que nous avons eu à exploiter, la base de la stratégie et les méthodes. La mise en harmonie de ces différents éléments nous permet de passer à la présentation des résultats dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III : Résultats et Discussion

Chapitre 3 : Résultats et Discussion

Dans ce chapitre, nous détaillons d'abord les résultats obtenus après traitement des données et application des méthodes auparavant citées dans le chapitre 2, puis nous proposons une discussion autour de ces derniers. Les analyses effectuées illustrent les variations temporelles et spatiales des précipitations et des débits.

3.1. Spatialisation

3.1.1. Détermination de l'influence des stations pluviométriques sur le BV du Zou

Les polygones de Thiessen permettent de visualiser l'étendue de l'influence de chacune des stations pluviométriques, sur le bassin, en fonction de la zone qu'elle couvre. On peut remarquer de grandes surfaces de captage à Bantè, Gouka, Savalou, Tchetti, Dassa-Zoumè et Aklankpa, indiquant une plus vaste répartition des précipitations collectées sur ces stations. Les stations de Pira, Aklankpa, Savè, Abomey et Bohicon ont de plus petits polygones, ce qui veut dire que leur impact global sur l'ensemble du bassin, est plus réduit.

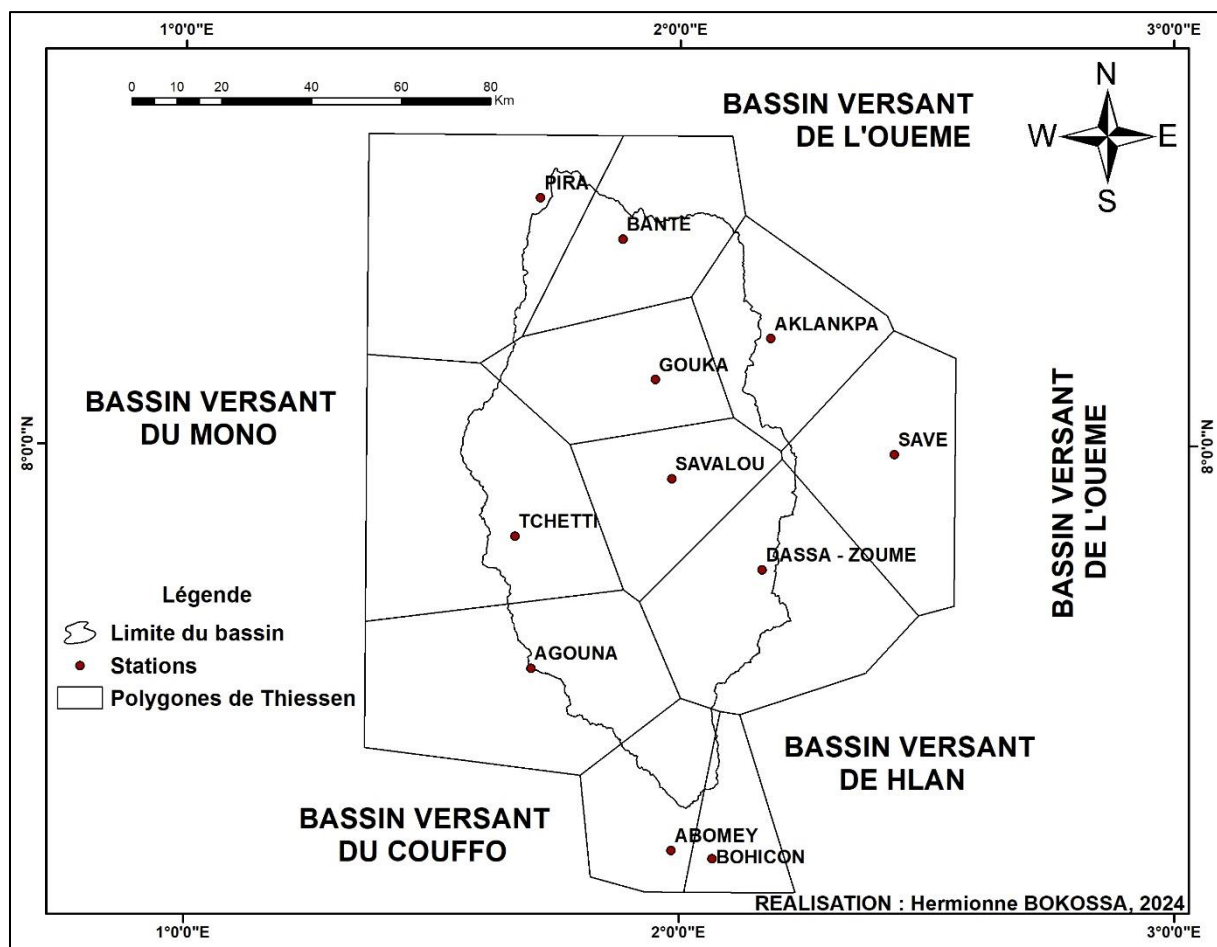


Figure 5 : Influence des stations pluviométriques sur le sous-bassin versant

3.1.2. Détermination de la pluie spatiale moyenne

Une fois la polygonation faite avec la méthode de Thiessen, les aires de surface des différentes zones d'influence et la surface totale du sous-bassin qui est de 6970 Km² ont été déterminées. La connaissance ces aires a permis de calculer les coefficients des différentes stations. Ces coefficients ont servi à la détermination de la pluie moyenne spatiale annuelle sur le sous-bassin versant.

Tableau 2 : Aires de surface et coefficients des stations pluviométriques

STATIONS	AIRE (km ²)	COEFFICIENTS
DASSA-ZOUME	978,42	0,14
AGOUNA	783,82	0,11
AKLANKPA	373,91	0,05
BANTE	798,60	0,12
PIRA	264,23	0,04
GOUKA	1136,24	0,17
ABOMEY	304,92	0,04
TCHETTI	1042,80	0,15
SAVALOU	1054,69	0,15
SAVE	12,27	0,002
BOHICON	19,67	0,003

3.2. Comportement des précipitations sur le sous-bassin versant

Afin de retracer l'évolution annuelle des précipitations sur le sous-bassin versant du Zou, il a été réalisé le cumul des pluies par année, sur chacune des onze (11) stations pluviométriques concernées : Abomey, Agouna, Aklankpa, Bantè, Bohicon, Dassa-Zoumè, Gouka, Pira, Savalou, Savè et Tchetti, sur la période de 1991 à 2022, soit 32 ans, comme annoncé plus tôt. Ce cumul annuel représente la somme des précipitations de référence de chaque année, pour chacune des stations. Les résultats obtenus présentent une très grande variation interannuelle pour toutes les stations. Compte tenu des données manquantes, les années où la précipitation est égale à zéro (0) mm ne sont pas prises en compte dans l'analyse des graphiques. La répartition spatiale de la pluviométrie est telle que : les précipitations maximales obtenues sur ces stations, sont respectivement autour de 1400 mm (en 1995) ; 1900 mm (en 2008) ; 1600 mm (en 1991) ; 1700 mm (en 2007) ; 1600 mm (en 1999) ; 1800 mm (en 2021 et 2022) ; 1750

IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE

mm (en 1998) ; 1700 mm (en 2007) ; 1600 mm (en 1991) ; 1500 mm (en 2003) et 2100 mm (en 2008). Quant aux valeurs minimales de précipitations observées sur ces stations, elles atteignent toujours dans le même ordre, approximativement 600 mm (en 2020) ; 750 mm (en 2022) ; 250 mm (en 1998) ; 500 mm (en 2022) ; 800 mm (en 2013) ; 150 mm (en 1996) ; 250 mm (en 2020) ; 500 mm (en 2022) ; 100 mm (en 2022) ; 500 mm (en 2016) et 100 mm (en 2022).

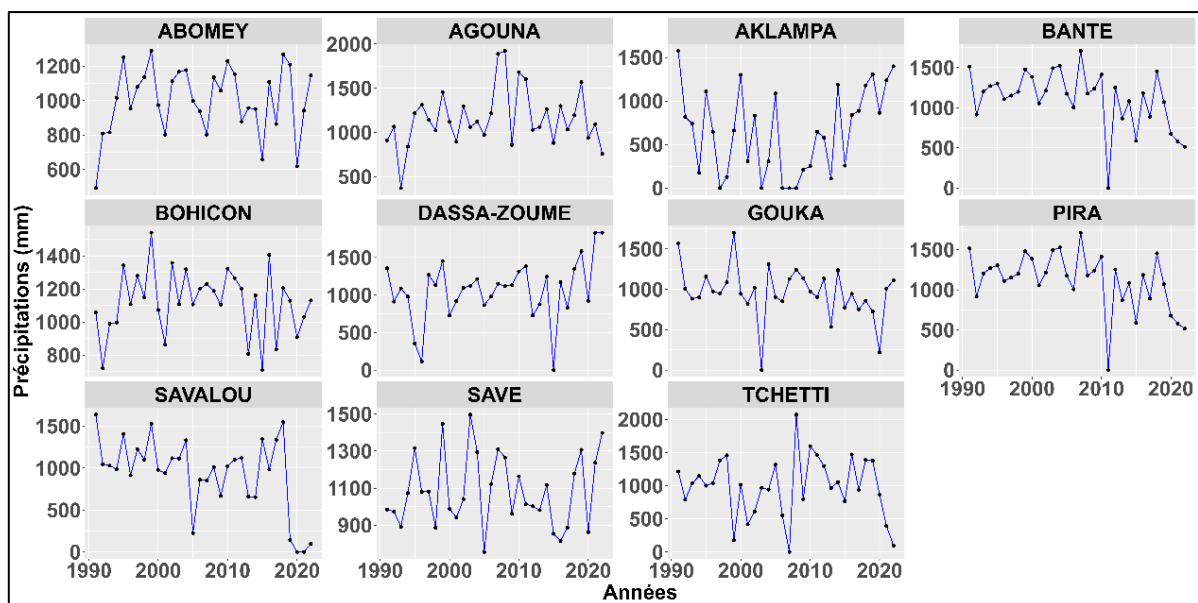


Figure 6 : Cumul annuel des précipitations sur chaque station, de 1991 à 2022

L'analyse de l'évolution temporelle des précipitations sur la pluie moyenne spatiale révèle que les précipitations varient fortement d'une année à une autre, avec des fluctuations marquées entre des années sèches, et des années humides. Des pics sont observés autour de 1995, 2004 et 2008, alors que des baisses importantes sont visibles vers 2006, 2013 et 2015. Certaines années semblent avoir des précipitations plus basses, tandis que d'autres années présentent des précipitations plus élevées. Entre baisse et hausse, les précipitations ont connu de grandes variations sur l'étendue du bassin, au fil des années.

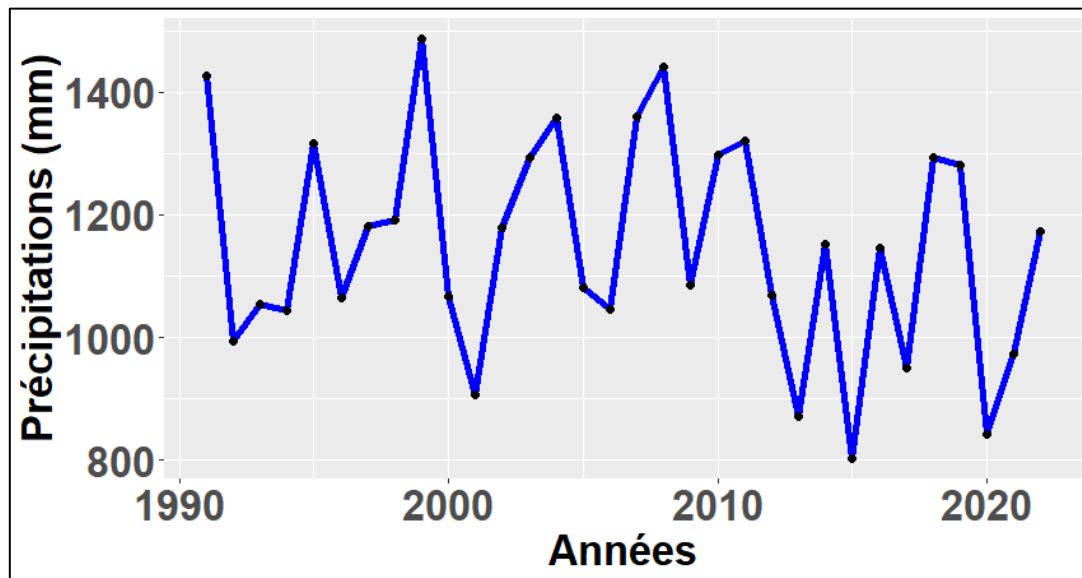


Figure 7 : Evolution temporelle de la pluie moyenne spatiale annuelle sur le sous-bassin du Zou

3.3. Analyse de tendances dans les précipitations

Les résultats du test de tendance de Mann-Kendall sont renseignés dans le tableau 3. Le coefficient tau est une mesure de la corrélation entre les séries temporelles, qui varie entre -1 et 1. Lorsqu'il est positif, il indique une tendance croissante dans les données, et lorsqu'il est négatif, cela implique une tendance décroissante. La pluviométrie à Abomey, Aklankpa, Agouna ; Dassa-Zoumè et Savè, présente une tendance à la hausse de la pluviométrie, tandis qu'à Bantè ; Bohicon ; Gouka ; Pira ; Savalou et Tchetti, nous pouvons observer une tendance à la baisse. Sur les onze (11) stations, on observe une tendance à la hausse sur cinq d'entre elles, pendant que sur les six autres, il y a tendance à la baisse. Habituellement, le seuil utilisé pour déterminer la signification statistique est de 0,05 (5%). Si la Pvalue est inférieure à 0,05 (tendance statistiquement significative, avec un niveau de confiance de 95%), l'hypothèse nulle selon laquelle il n'y a pas de tendance statistiquement significative est rejetée. Si elle est supérieure au seuil, l'hypothèse est acceptée (pas de tendance significative). Sur les 11 stations évaluées, seules celles de Bantè, Pira et Savalou présentent des tendances significatives, avec des Pvalues < 0,5. Pour la majorité des stations, les tendances observées ne sont pas suffisamment fortes pour être considérées comme statistiquement significatives. En général, le test de tendances de Mann Kendall, appliqué à la moyenne spatiale annuelle, révèle une tendance décroissante des précipitations sur l'ensemble du sous-bassin versant.

Tableau 3 : Résultats du test de tendance de Mann Kendall

Station	Tau	Pvalue	Score	Slope	Tendance
ABOMEY	0,05	0,72	0,36	2,07	Hausse
AGOUNA	0,06	0,61	0,50	2,86	Hausse
AKLANKPA	0,18	0,16	1,41	11,41	Hausse
BANTE	-0,29	0,01	-2,38	-15,26	Baisse
BOHICON	-0,006	0,97	-0,03	-0,15	Baisse
DASSA-ZOUME	0,22	0,08	1,73	12,91	Hausse
GOUKA	-0,19	0,11	-1,57	-7,80	Baisse
PIRA	-0,29	0,02	-2,38	-15,26	Baisse
SAVALOU	-0,29	0,02	-2,37	-19,25	Baisse
SAVE	0,02	0,86	0,17	1,12	Hausse
TCHETTI	-0,06	0,66	-0,48	-3,91	Baisse
MOYENNE					
SPATIALE	-0,10	0,41	-0,83	-2,91	Baisse

3.4. Rupture de stationnarité

Le test statistique de Pettitt est utilisé pour détecter les ruptures de stationnarité dans les séries temporelles. Dans le cas présent, le test est appliqué à la pluie moyenne spatiale sur le sous-bassin versant du Zou, sur la période de 1991 à 2022. Un point de rupture est identifié en 2011, comme l'indique la ligne pointillée rouge. L'année de rupture a permis ensuite d'identifier deux sous-périodes pour la modélisation hydrologique à savoir : 1991 à 2011 et 2012 à 2022.

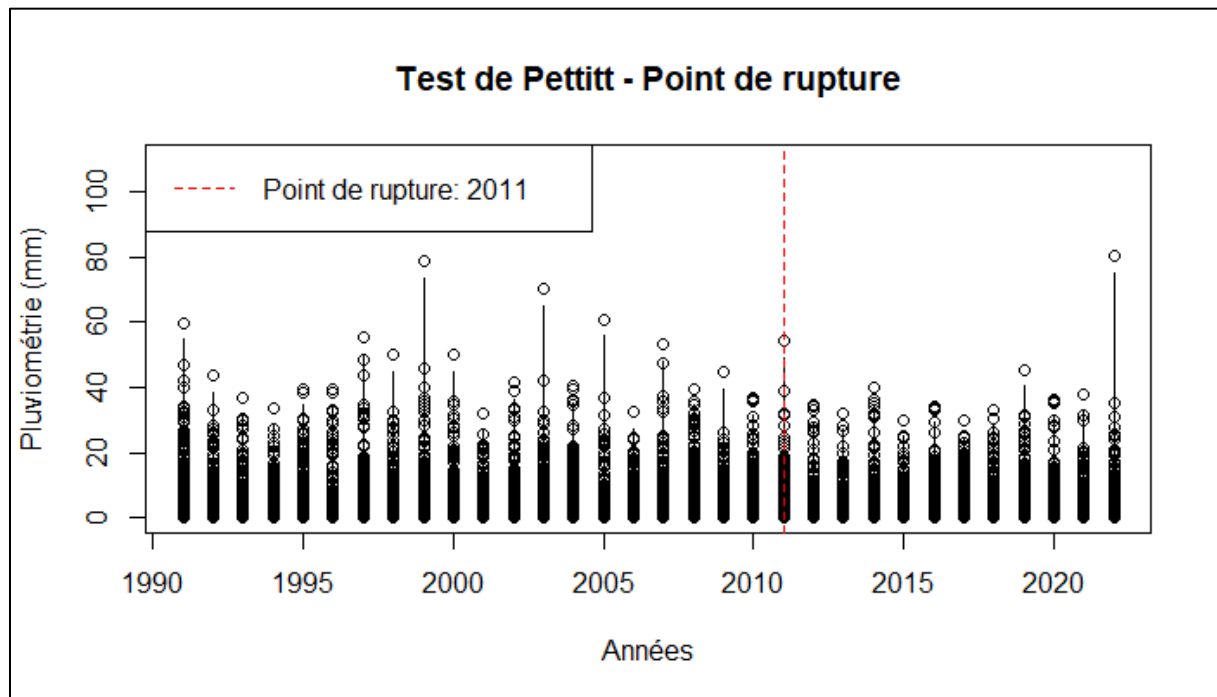


Figure 8 : Test de rupture de Pettitt sur la pluie moyenne spatiale annuelle, de 1991 à 2022

3.5. Indice Standardisé de Précipitations (SPI)

Cette méthode a été réalisée sur le cumul annuel des précipitations sur chacune des stations, ainsi que sur la moyenne spatiale annuelle du sous-bassin versant.

3.5.1. Application des SPI à la pluviométrie annuelle de chaque station

Les SPI de la pluviométrie ont été calculés pour les onze (11) stations sur la période de 1991 à 2022. La Figure 7 illustre l'évolution de ces indices. Elle montre qu'on peut délimiter l'évolution pluviométrique de la zone d'étude en périodes excédentaires (humides) et déficitaires (sèches). Les périodes excédentaires se définissent comme celles où les indices se répartissent au-dessus du niveau zéro (0) de l'axe des ordonnées, et sont matérialisées par des diagrammes en barres de couleur bleue. Les périodes déficitaires quant à elles, sont représentées par les diagrammes en barres rouges, en dessous du niveau zéro (0) de l'axe. A Agouna, de 1991 à 2005, on observe une période sèche, et de 2006 à 2022, une période humide. A Bantè, on remarque une période humide de 1991 à 2010 et une période sèche de 2011 à 2022. En ce qui concerne Dassa-Zoumè, bien qu'il y ait eu des années pluvieuses (2007 à 2011 ; 2018 à 2022 et 2021 à 2022 par exemple) et des années sèches (1993 à 1997 ; 2015), on n'arrive pas concrètement à identifier les périodes déficitaires et excédentaires. Il en est de même à Gouka où il n'y a pas de significativité entre périodes déficitaires et périodes excédentaires. Pour ce qui est de Savalou on a une période humide de 1991 à 2004, puis une autre, de 2010 à 2018, pendant que les autres années sont sèches. Savè a connu une période relativement humide entre

2003 et 2009, puis une seconde entre 2018 et 2022, tandis que les autres années ont été majoritairement sèches. Sur la station d'Abomey, la période de 1991 à 2010 a été excédentaire, avec plus d'indices positifs, mais après 2010, on assiste à des années de déficit pluviométrique. Aklankpa présente une tendance de précipitations déficitaires de 1991 à 2015, alors qu'il y a eu des excédents de pluie de 2016 à 2022. Bohicon a connu des précipitations excédentaires, de 1995 à 2013 pratiquement avec un nombre peu élevé d'années, comparativement à celles qui ont précédé et succédé cette période. Pira montre une période excédentaire, de 1991 à 2010, et une autre, déficitaire, de 2011 à 2022. En ce qui concerne Tchetti, malgré l'alternance entre déficits et excédents, nous pouvons dire que les précipitations de 2007 à 2019 ont été fortes, tandis que les autres années ont connu de faibles pluies. Dans l'ensemble, bien que l'amplitude et la fréquence des fluctuations, varient d'une station à l'autre, la cohérence dans la transition des précipitations laisse voir une régression générale des pluies, sur toute l'étendue du bassin.

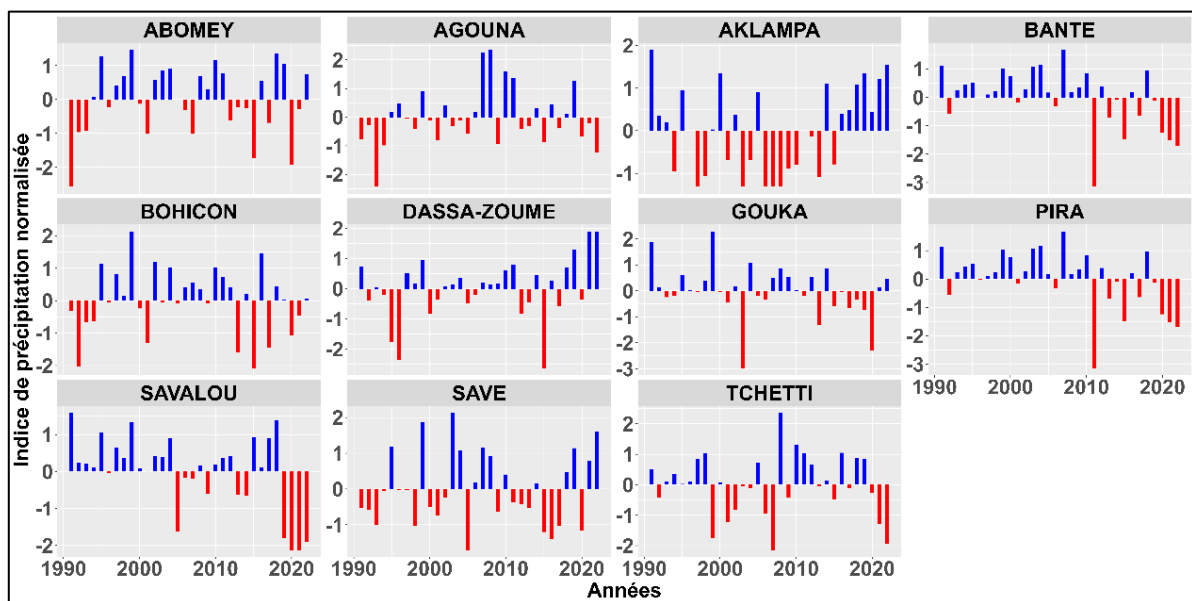


Figure 9 : Indices standardisés de précipitations sur chaque station de 1991 à 2022

3.5.2. Application des SPI à la pluie moyenne spatiale annuelle

Le graphique ci-après caractérisé par une forte variabilité des précipitations, reflète bien ce qui a été dit plus haut. La pluviométrie a connu une alternance entre années pluvieuses et années sèches. La période de 1991 à 2022 est marquée par de nombreuses années déficitaires, bien qu'elle ait également connu d'années excédentaires. On peut bien remarquer que la tendance pluviométrique est à la baisse sur tout le bassin.

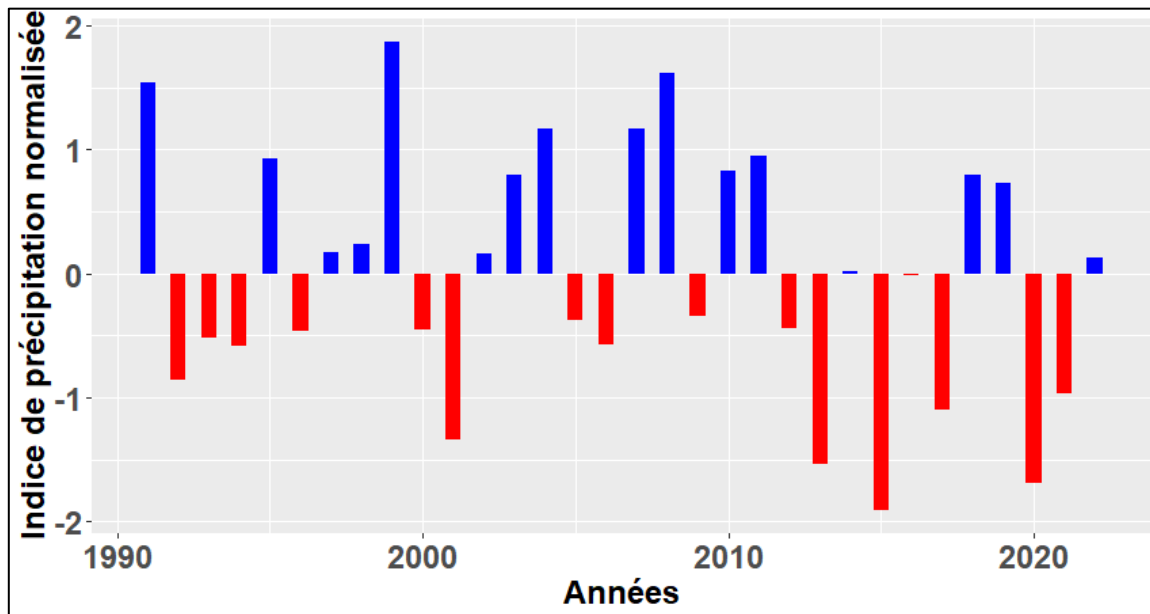


Figure 10 : Indices standardisés de précipitations sur la pluie moyenne spatiale annuelle de 1991 à 2022

3.6. Evolution annuelle des débits

Le graphique présente la moyenne annuelle des débits observés à l'exutoire d'Atchérigbé, de 1991 à 2022. Des variations importantes entre les années successives se laissent remarquer. Les moyennes annuelles les plus basses varient approximativement entre 5 et 15m³/s. Celles particulièrement élevées sont de 110 à 120m³/s environ. Cela serait dû à des événements extrêmes tels que des sécheresses ou des saisons de pluies intenses. La courbe présente une variabilité interannuelle marquée par des pics prononcés de débits autour de 1998 ; 2000 ; 2016 et 2018, avec une baisse considérable les autres années.

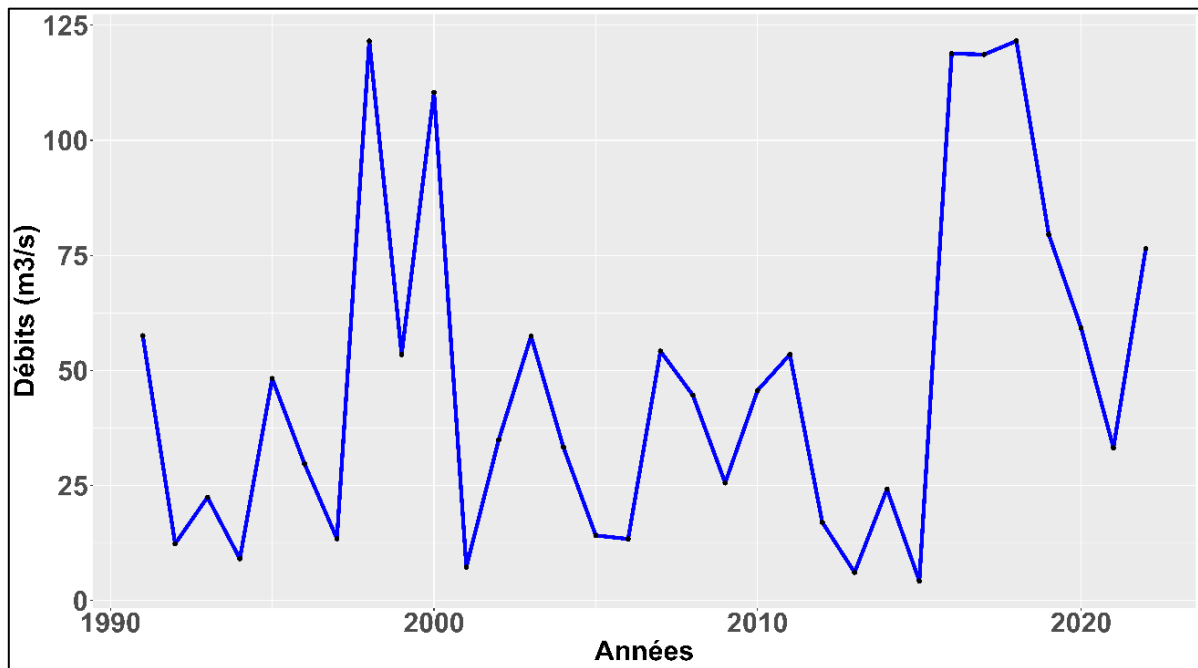


Figure 11 : Moyenne annuelle des débits à l'exutoire d'Atchérigbé de 1991 à 2022

La figure 12 ci-après illustre l'évolution annuelle des débits par rapport aux précipitations de 1991 à 2022. Les courbes montrent des tendances similaires pour certaines années, cependant il existe des périodes de léger décalage où les variations ne sont pas synchronisées. Il y a des années comme 1991 ; 1995 ; 2003 et 2014, où les précipitations et les débits augmentent simultanément et atteignent leurs pics. Nous avons également des périodes où les deux paramètres diminuent ensemble. En 1994 ; 2001 ; 2001 et 2013, on observe une baisse des précipitations qui coïncide avec une baisse des débits. Les ressemblances observées expliquent le lien direct qui existe entre les précipitations et les écoulements du sous-bassin versant. Les précipitations étant la principale source d'eau, leur augmentation entraîne généralement une augmentation des débits des cours d'eau.

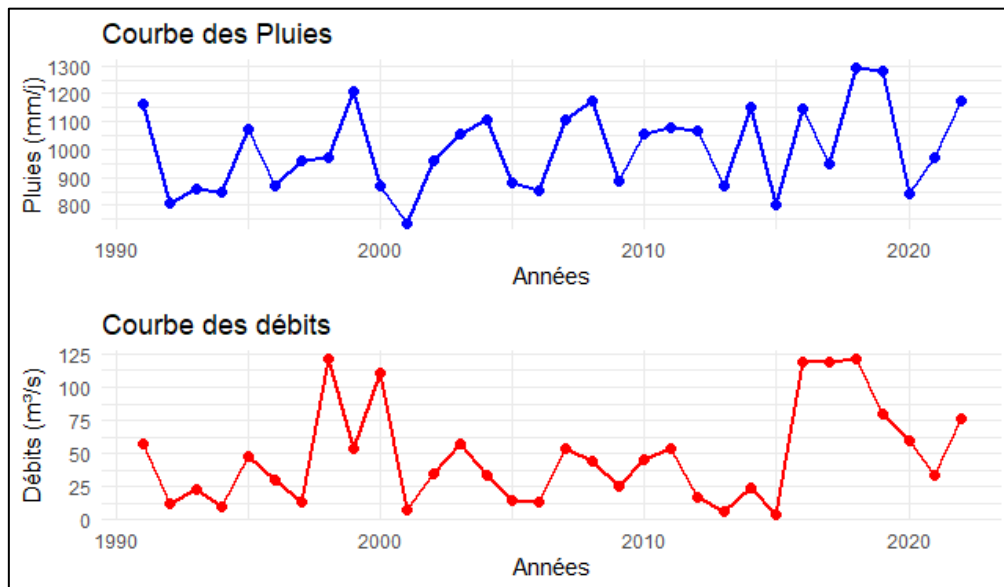


Figure 12 : Variation annuelle des précipitations et des débits

3.7. Modélisation hydrologique

Le calage du modèle en modélisation, consiste à ajuster les paramètres du modèle, de manière à ce que les simulations reproduisent le mieux possible, les observations. C'est une étape qui permet d'améliorer la précision du modèle, en comparant les résultats simulés avec des données historiques, et en modifiant les paramètres jusqu'à ce que les écarts entre valeurs simulées et valeurs observées, soient minimisés.

La validation du modèle est essentielle après la calibration, pour évaluer sa capacité à reproduire les conditions observées sur une période différente de celle du calage. Il s'agit d'appliquer les paramètres obtenus lors du calage à une période de temps non utilisée pendant cette phase, en vue de tester la robustesse et la fiabilité du modèle.

En raison de la rupture de stationnarité détectée en 2011 sur la période de référence (1991-2022), deux sous périodes ont été définies pour la modélisation : 1991 à 2011 et 2012 à 2022. Elle s'est déroulée de la manière suivante : d'abord, pour la première sous-période, le calage a été réalisé de 1992 à 2004 (correspondant aux 2/3 des données, sur cette partie), puis la validation a été effectuée de 2005 à 2011 (soit 1/3 des données), avec 1991 comme année de mise en route. Ensuite, pour la deuxième sous-période (2012 - 2022), le calage a été fait de 2013 à 2018, et la validation, de 2019 à 2022, avec 2012 comme année de mise en route.

3.7.1. Modélisation sur la première sous période de référence (1991-2011)

Le critère de performance fréquemment utilisé en hydrologie pour le calage des modèles, est le critère de Nash, mais pour notre travail, le KGE a donné les meilleurs critères en calage comme en validation. Après optimisation du KGE en calage (1992 à 2004), on obtient une valeur maximale de 0,68 et la différence entre débits observés et débits simulés, est de -7. Le KGE maximal obtenu en validation (2005 à 2011), est de 0,52, avec une différence de -56 entre débits observés et débits simulés. Les KGE étant compris entre 0,5 et 0,75, ils sont très bons. Les graphiques ci-après présentent les modèles obtenus en calage et validation sur cette première partie des données. La couleur bleue pure matérialise les précipitations, le bleu ciel représente les débits observés, et le rouge foncé, les débits simulés.

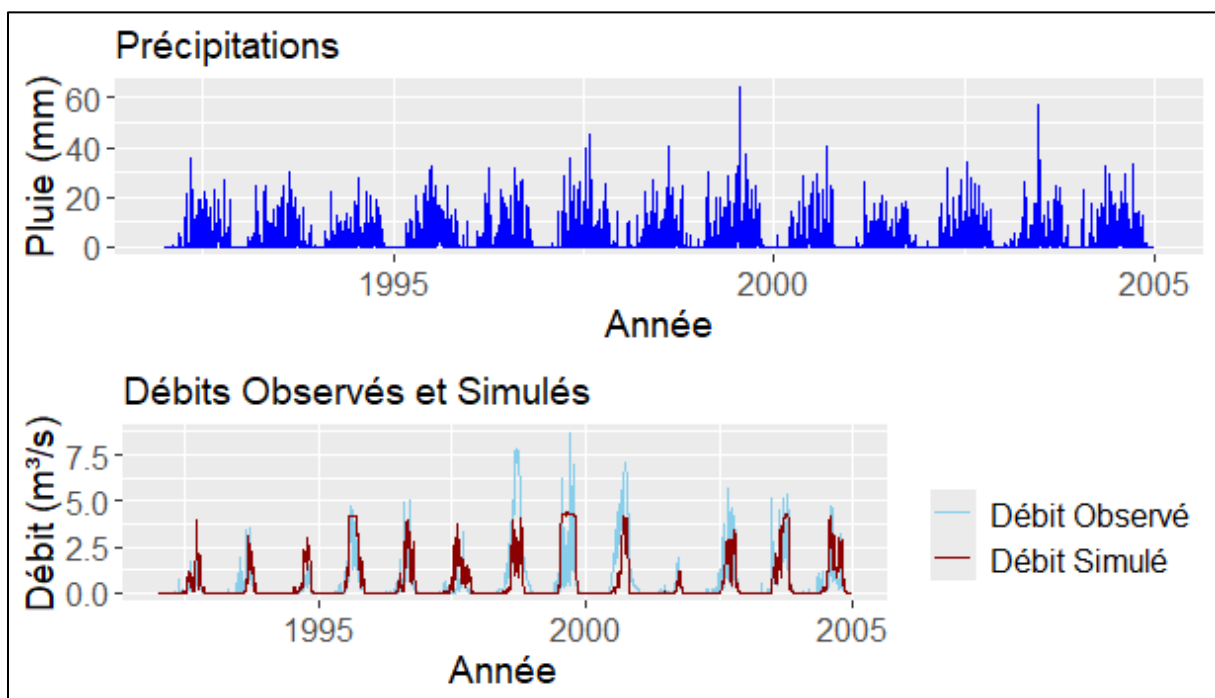


Figure 13 : Calage 1992-2004

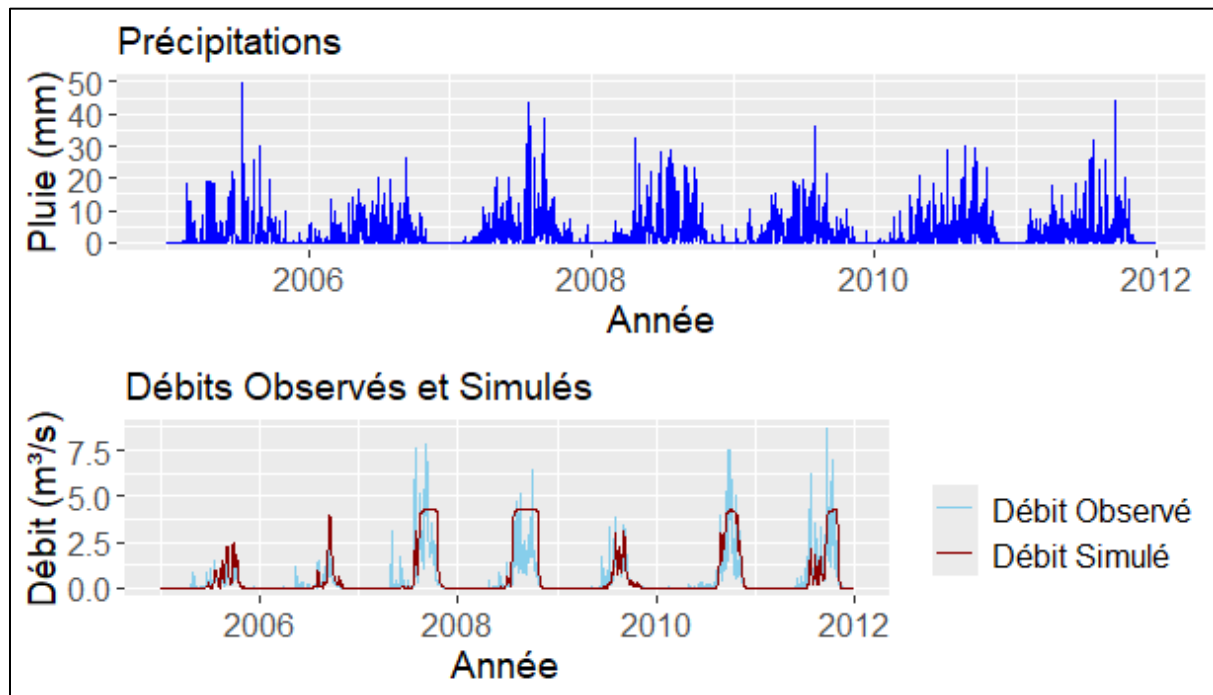


Figure 14 : Validation 2005-2011

3.7.2. Modélisation sur la deuxième sous période de référence (2012-2022)

Le KGE maximal obtenu en calage pour cette sous-période après optimisation est de 0,74, et la variation entre Q_{sim} et Q_{obs} est -2. En validation, le KGE est égal à 0,57 et la variation entre Q_{sim} et Q_{obs} est -65. Les KGE sont compris entre 0,5 et 0,75, donc ils sont très bons également sur la deuxième partie. Les graphiques ci-après présentent les modèles obtenus en calage et validation sur cette partie, le bleu correspond aux précipitations, le noir représente les débits observés, et le rouge matérialise les débits simulés.

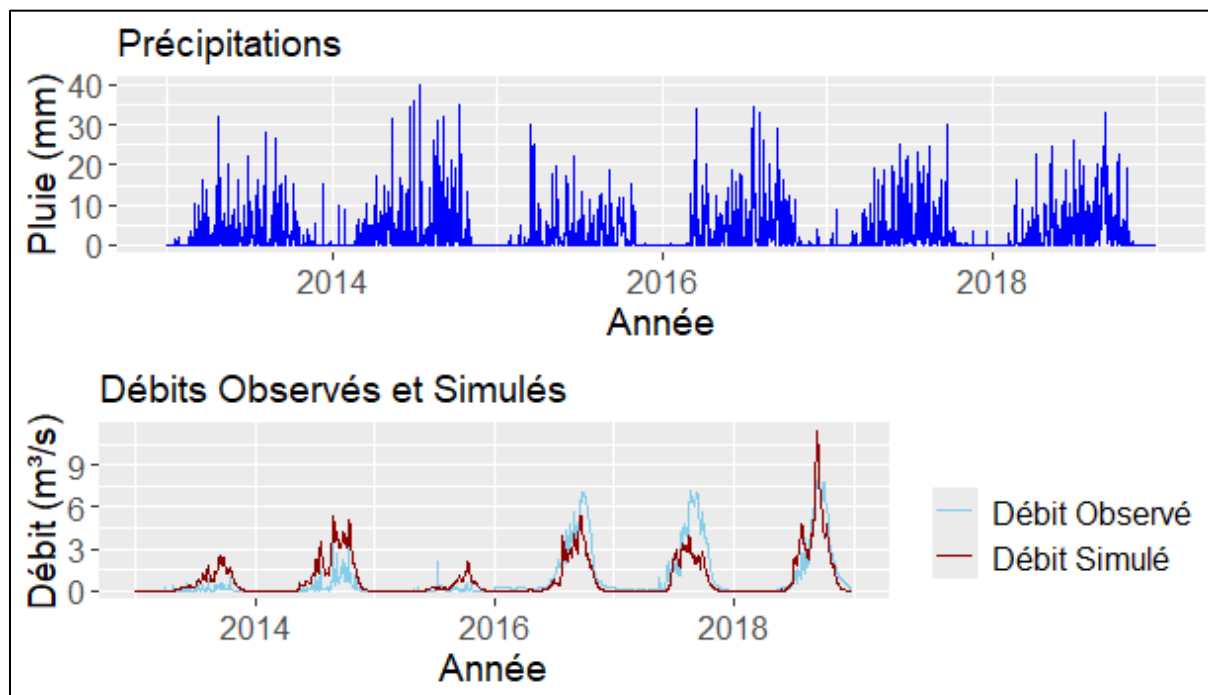


Figure 15 : Calage 2013-2018

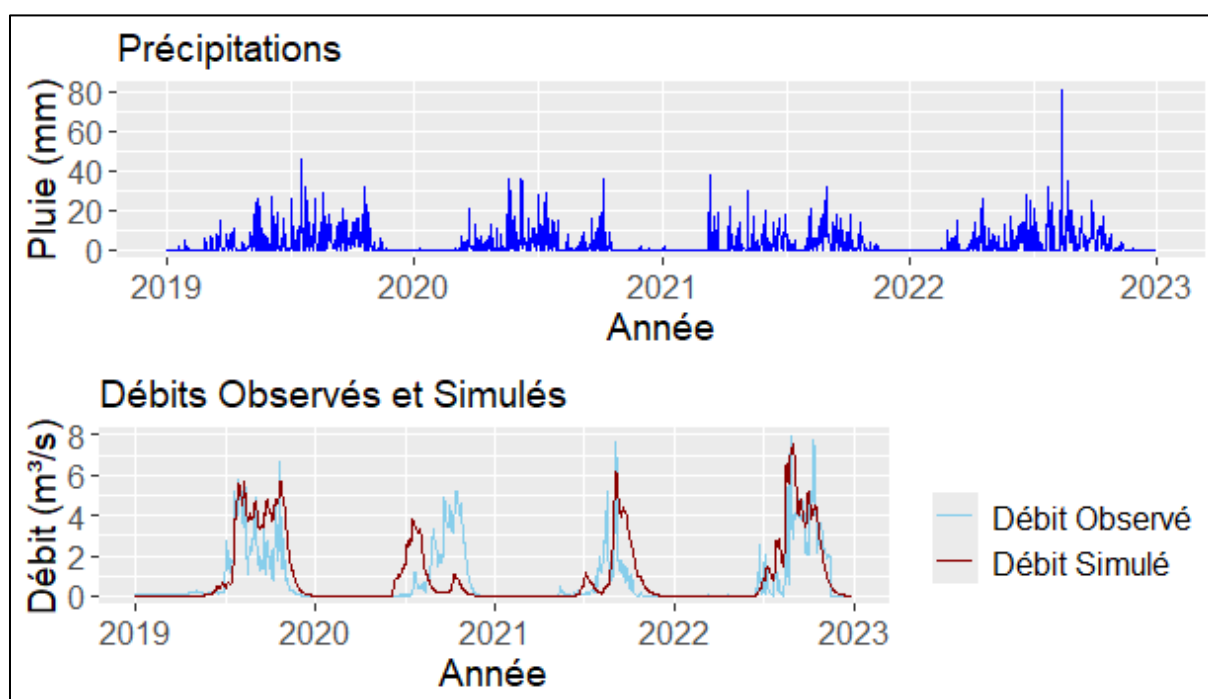


Figure 16 : Validation 2019-2022

3.7.3. Bilans de modélisation

Les bilans de modélisation sont présentés dans les tableaux ci-après. Ils montrent sur chaque période, en calage comme en validation, la moyenne des précipitations (pluie), la moyenne des débits simulés (Q_{sim}) et observés (Q_{obs}), la variation de stock (ΔS), l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR), et le critère de performance du modèle (KGE).

Tableau 4 : Bilan de modélisation sur la première partie

	Calage 1	Validation 1
Période	01/01/1992 au 31/12/2004	01/01/2005 au 31/12/2011
KGE	0,68	0,52
Q_{sim} (mm/j)	206	223
Q_{obs} (mm/j)	198	167
ETR (mm)	741	784
ΔS (mm)	216	226
ETP (mm)	1087	1200
Pluie (mm)	1163	1233

Tableau 5 : Bilan de modélisation sur la deuxième partie

	Calage 2	Validation 2
Période	01/01/2013 au 31/12/2018	01/01/2018 au 31/12/2022
KGE	0,74	0,57
Q_{sim} (mm/j)	308	35504
Q_{obs} (mm/j)	306	289,41
ETR (mm)	729	722,01
ΔS (mm)	258	-10,63
ETP (mm)	1295	1410,18
Pluie (mm)	1035	1066,42

3.7.4. Simulations des débits sur la totalité des deux sous-périodes

Les modèles ont été tournés sur toutes les deux périodes, suivant les paramètres du sous-bassin versant (1991-2011 & 2012-2022). Les débits ont donc été simulés sur l'entièreté de chaque période afin d'obtenir les bilans de modélisation et de comparer les moyennes des paramètres climatiques des deux sous-périodes entre elles, grâce au test de Student. Le KGE de la première sous période est 0,67. On obtient un KGE de 0,68 pour la deuxième sous-période. Les tableaux et graphiques ci-après rendent compte des résultats obtenus après simulation.

Tableau 6 : Bilan de modélisation de 1991 à 2011 (Simulation)

Modèle de la 1ère partie de rupture	
Période	1991 - 2011
KGE	0,67
Qsim (mm/j)	220,64
Qobs (mm/j)	191,35
ETR (mm)	761,29
ΔS (mm)	246,22
ETP (mm)	1124,62
Pluie (mm)	1198,87

Tableau 7 : Bilan de modélisation de 2012 à 2022 (Simulation)

Modèle de la 2ème partie de rupture	
Période	2012 - 2022
KGE	0,68
Qsim (mm/j)	325,59
Qobs (mm/j)	279
ETR (mm)	741,86
ΔS (mm)	28,34
ETP (mm)	1333,03
Pluie (mm)	1049,42

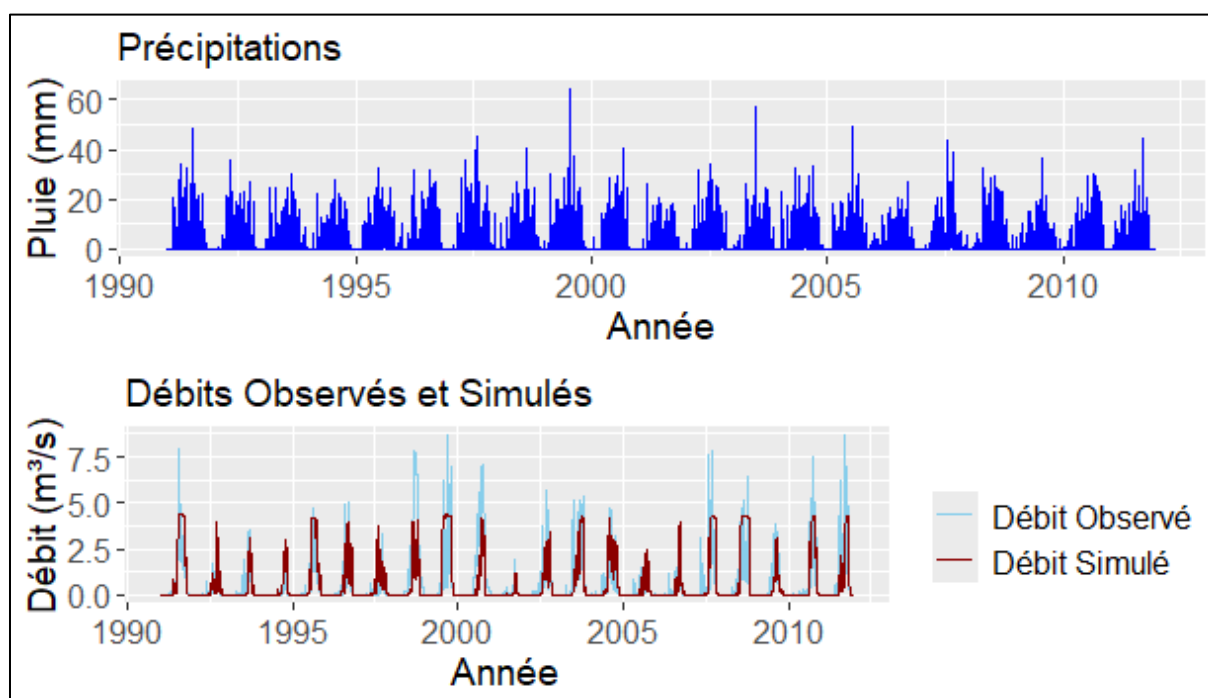


Figure 17 : Simulation 1991-2011

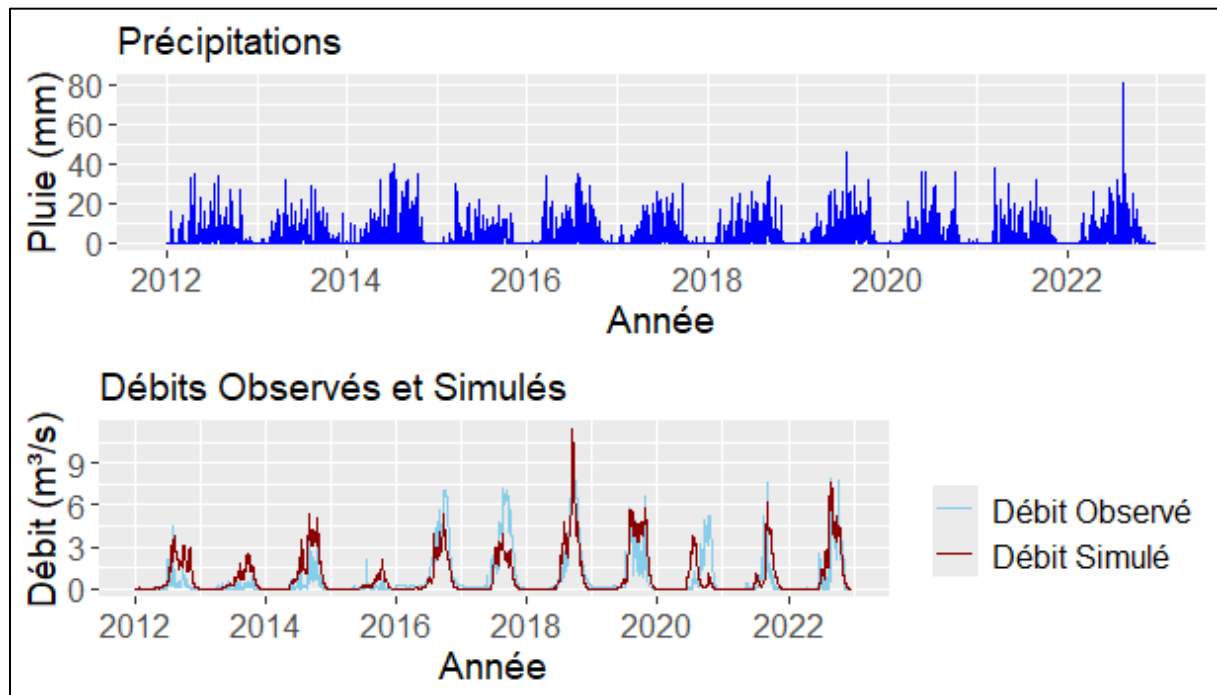


Figure 18 : Simulation 2012-2022

3.7.5. Application du test de signification de Student aux différents paramètres climatiques et aux débits.

Tableau 8 : Résultats du test de Student

Test de student sur les débits observés et simulés					
Variable et période	Moyenne de l'échantillon	t	df	Pvalue	Intervalle de confiance 95%
Qobs (1991 - 2011)	0,52 mm/j	-1,23	14,69	0,24	(-0,66) – (0,18)
Qobs (2012 - 2022)	0,76 mm/j				
Qsim (1991 - 2011)	0,60 mm/j	-1,99	17,19	0,06	(-0,59) - (0,02)
Qsim (2012 - 2022)	0,89 mm/j				
Test de student sur l'évapotranspiration potentielle					
Variable et période	Moyenne de l'échantillon	t	df	Pvalue	Intervalle de confiance 95%
ETP (1991 - 2011)	1125,03 mm	-4,89	16,90	0,0001	(-299,21) – (-118,77)
ETP (2012 - 2022)	1334,03 mm				
Test de student sur l'évapotranspiration réelle					
Variable et période	Moyenne de l'échantillon	t	df	Pvalue	Intervalle de confiance 95%
ETR (1991 - 2011)	761,77 mm	0,85	17,24	0,41	(-28,62) – (67,38)
ETR (2012 - 2022)	742,39 mm				
Test de student sur la température moyenne					
Variable et période	Moyenne de l'échantillon	t	df	Pvalue	Intervalle de confiance 95%

**IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN
VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE**

Température moyenne (1991 - 2011)	28,22°C	-3,37	21,74	0,002	(-0,80) – (-0,19)
Température moyenne (2012 - 2022)	28,71°C				
Test de student sur la pluie journalière					
Variable et période	Moyenne de l'échantillon	t	df	Pvalue	Intervalle de confiance 95%
Pluie moyenne annuelle (1991 - 2011)	977,27 mm	-1,21	16,59	0,24	(-199,29) – (53,86)
Pluie moyenne annuelle (2012 - 2022)	1049,99 mm				

Avec :

t : la statistique de test ;

df : le degré de liberté (nombre de valeurs libres pour varier dans les calculs de la statistique t) ;

Pvalue : la probabilité d'observer une valeur de t aussi extrême que celle calculée sous l'hypothèse nulle.

✓ **Débits observés**

D'après les résultats du test, la statistique de test t est négative, donc la moyenne des débits observés sur la première sous-période est inférieure à celle de la deuxième sous-période. La Pvalue est supérieure au seuil de 0,05, ce qui signifie que les résultats ne sont pas statistiquement significatifs, avec un intervalle de confiance à 95% incluant 0. Les moyennes montrent alors légère augmentation des débits observés au cours de la deuxième sous-période.

✓ **Débits simulés**

Les résultats du test montrent que la statistique de test t est négative, alors la moyenne des débits simulés sur la première sous-période est inférieure à celle de la deuxième sous-période. La Pvalue est plus grande que la valeur seuil, ce qui implique que les résultats ne sont pas très significatifs, avec un intervalle de confiance à 95% n'excluant pas 0. Les débits simulés ont donc augmenté dans la deuxième période par rapport à la première, même si la différence n'est pas très grande.

✓ **Evapotranspiration Potentielle (ETP)**

Selon les résultats, la statistique de test t est négative, indiquant que la moyenne de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de la première période est inférieure à celle de la deuxième période. La Pvalue est extrêmement petite, ce qui signifie que les résultats sont statistiquement significatifs, avec un intervalle de confiance à 95% ne contenant pas 0. Cela veut dire que l'évapotranspiration potentielle a significativement augmenté au cours de la deuxième période, par rapport à la première.

✓ **Evapotranspiration Réelle (ETR)**

Les résultats laissent voir que la statistique de test t est positive, ce qui indique que la moyenne de l'évapotranspiration réelle (ETR) de la première période est inférieure à celle de la deuxième période. La Pvalue est largement supérieure à 0,05, cela veut signifier que les résultats ne sont pas statistiquement significatifs, avec un intervalle de confiance à 95% contenant 0. Cela implique que l'évapotranspiration réelle est plus faible sur la deuxième période que sur la première.

✓ **Pluie moyenne annuelle**

D'après les résultats du test, la statistique de test t est négative, donc la moyenne de pluie journalière est plus petite sur la première sous-période que sur la deuxième sous-période. La Pvalue est supérieure au seuil (0,05), ce qui veut dire que les résultats ne sont pas statistiquement significatifs, avec un intervalle de confiance incluant 0. Les précipitations ont connu une légère augmentation dans la deuxième sous période, par rapport à la première.

✓ **Température**

Compte tenu des résultats, la statistique de test t est négative, donc la moyenne de la température de la première sous-période est inférieure à celle de la deuxième sous-période. La Pvalue est très petite, par conséquent, les résultats sont statistiquement significatifs, avec un intervalle de confiance à 95% excluant 0. La température a augmenté au cours de la deuxième sous-période, par rapport à la première.

3.8. Méthodes de gestion de l'eau en cas de variabilité climatique

Compte tenu des répercussions de la variabilité climatique sur les ressources en eau, il est nécessaire d'appliquer un mode de gestion efficiente de l'eau. Beaucoup d'eaux sont générées, dans le sous-bassin versant, mais ces dernières ne sont pas valorisées, alors qu'on pourrait mieux les gérer, au lieu de les laisser s'écouler. La GIRE serait la bonne option de gestion dans ce contexte. Une gestion intégrée du sous-bassin versant va aider à maintenir les fonctions des écosystèmes naturels, comme la recharge de la nappe et la réduction des inondations.

✓ Usage rationnel de l'eau et gestion de la demande en eau

Il faut des moyens ou des méthodes d'économie de l'eau pour éviter le gaspillage. L'utilisation des techniques efficaces d'irrigation comme les systèmes d'irrigation goutte à goutte ou à faible consommation, permettra de réduire la quantité d'eau nécessaire pour l'agriculture. Pour minimiser les fuites et les pertes d'eau dans les infrastructures, il faut moderniser les systèmes de distribution. Il faut également réaliser des barrages et infrastructures, pour réguler les flux d'eau.

✓ Prévision des risques liés à l'eau

La mise en place des systèmes d'alerte précoce (SAP) et de stratégies d'adaptation au changement climatique.

✓ Renforcement des capacités institutionnelles

Il serait judicieux de renforcer les capacités des institutions locales, régionales et nationales chargées de la gestion de l'eau.

✓ Qualité et précision des données

La prise de décision dans le cadre de la GIRE, doit se baser sur des données fiables, des recherches scientifiques et des outils de modélisation, afin de mieux évaluer l'impact des actions sur les ressources en eau et d'ajuster les politiques en conséquence.

✓ Gestion des conflits

La GIRE promeut une utilisation harmonieuse et durable des ressources en eau, elle encourage la participation de tous les acteurs concernés, y compris les gouvernements, les communautés locales, les industriels et les ONG.

DISCUSSION

Dans ce document, nous avons étudié l'impact des vicissitudes climatiques sur les écoulements du sous-bassin versant du Zou à Atchérigbé.

Il ressort de ces travaux, suite à la détermination des indices standardisés de précipitation, que le sous-bassin du Zou a subi la variabilité climatique à travers des années humides dont les indices sont positifs et des années de sécheresse, dont les indices sont négatifs. Les résultats du test de Mann Kendall révèlent de façon générale, une tendance à la baisse des précipitations sur le sous-bassin versant, suivant la période de 1991 à 2022. Ce qui est conforme aux résultats de Rosine FOSSOU et al (2022) qui ont d'abord utilisé les indices centrés réduits et pondérés de la pluviométrie, pour découper l'évolution pluviométrique à M'bahiakro et à Dimbokro en période humide, normale et sèche, puis le test de Mann Kendall pour identifier une tendance à la baisse de la pluviométrie sur la zone d'étude. Dans la suite de notre recherche, il a été détecté en appliquant le test de Pettitt, une rupture de stationnarité dans la pluviométrie en 2011, ce qui correspond à l'année à laquelle la variation de tendance s'est le plus fait remarquer. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de KODJA Japhet et al, dont les recherches sur le bassin du Zou à Atchérigbé Akognongbe (2008), ont permis d'identifier une rupture significative dans les précipitations au cours des années 1970, traduisant des hausses, des baisses et des reprises, avec une tendance générale à la baisse de la pluviométrie sur le bassin. Les résultats de la modélisation et du test de Student, ont révélé une baisse des précipitations et des écoulements sur le sous-bassin versant du Zou de 1991 à 2011, puis une augmentation peu significative de ces deux paramètres, sur la période de 2012 à 2022. Les résultats obtenus sont en concordance avec ceux de Liliana ZAHARIA et al (2022) qui ont de par leurs travaux sur les impacts du changement climatique sur les rivières en Roumanie, montré qu'il y a une augmentation des précipitations et des débits des rivières au nord du pays. Cependant, la relation entre débits et pluies n'est pas toujours linéaire, proportionnelle ou directe. Elle peut être influencée par plusieurs autres facteurs, tels que la température, l'occupation du sol, l'évapotranspiration, ce qui rend la réponse du débit aux précipitations complexe et variable. Comme méthode de conservation des ressources en eau, nous avons suggéré la GIRE comme meilleure, en nous basant sur ses avantages. Karambiri et al ont affirmé que la GIRE s'est révélée être le mode de gestion qui s'adapte le plus au contexte de variabilité climatique du bassin versant du Sourou.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

L'objectif général de notre travail a été d'évaluer l'impact de la variabilité du climat sur les écoulements du sous-bassin versant du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé. Les objectifs spécifiques, visaient à analyser les tendances dans les précipitations, puis identifier l'impact actuel du climat sur l'écoulement du sous-bassin et enfin, à proposer des techniques de conservation, pour une meilleure gestion des ressources en eau.

Les tests de tendance ont révélé que la pluviométrie du sous-bassin versant du Zou, a globalement connu une tendance à la baisse dans le temps, avec des excédents et des déficits pluviométriques alternés. Une rupture de stationnarité s'est laissée remarquer en 2011, aidant à identifier deux sous périodes pour la modélisation. Les résultats de la modélisation et du test de student ont révélé une baisse prononcée des précipitations sur le sous-bassin entre 1991 et 2011, qui impose son caractère à la tendance globale. En ce qui concerne les années de 2012 à 2022, on assiste à une légère augmentation des précipitations sur le sous-bassin versant. Concernant les autres paramètres climatiques, les valeurs de température et d'évapotranspiration potentielle de la période avant rupture sont plus faibles que celle de la période après rupture. L'évapotranspiration réelle quant à elle, est plus grande dans la première sous période, que sur la seconde. En effet, malgré l'élévation de la température, l'évapotranspiration réelle au cours de la deuxième sous-période n'a pas pu combler la demande en eau de l'atmosphère. Toutes ces variations ont permis de remarquer que les débits observés à l'exutoire d'Atchérigbé et les débits simulés, de 1991 à 2011, sont plus faibles que les débits enregistrés de 2012 à 2022. Même si les résultats ne sont pas très significatifs, le changement des paramètres climatiques a tout de même provoqué une augmentation des écoulements. Nous avons émis une hypothèse selon laquelle le climat actuel entrainerait une augmentation des écoulements, donc celle-ci est vérifiée. Pour mieux gérer les ressources en eau du bassin, nous proposons la GIRE, comme méthode adéquate.

PERSPECTIVES

Afin de prolonger et approfondir cette étude, plusieurs perspectives s'offrent, permettant d'élargir la compréhension de l'impact de la variabilité climatique et des facteurs environnementaux sur les écoulements des bassins versants.

- Identifier l'impact futur de la variabilité climatique sur les écoulements du sous-bassin versant du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé ;
- Etudier l'influence des états de surface sur les écoulements du sous-bassin versant du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé.

Références bibliographiques

1. Adetona Luc et al. *Evaluation de la disponibilité en eau souterraine du bassin versant du Zou à l'aide de la télédétection*. Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Ecole Doctorale des Sciences Agronomiques et de l'Eau (EDSAE) de l'Université de Parakou, 2022, pp.385-406.
2. Atchade A.A.G. et al. *Dynamique de l'occupation des terres et ressource en eau du bassin versant de la rivière du Zou à l'exutoire de Domè au Bénin*. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015, pp.301-306.
3. Brahim Koné et al. *Effet de la variabilité pluviométrique sur les écoulements de surface dans le bassin versant de l'Agnéby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire*. 2019, pp.283-401. Laboratoire Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire.
4. Cyriaque Rufin Nguimalet, *Dynamique de pluie et débit sur l'Oubangui à Mbaye, République Centrafricaine : Evidence de comportements hydrologiques variés du bassin*. Geo-Eco-Trop.2021, pp.311-330.
5. Dègla Hervé Koumassi. *Facteurs du tarissement des points d'eau en milieu de socle cristallin dans le département des Collines au Bénin*. Département de géographie et Aménagement du Territoire, Université d'Abomey-Calavi/Laboratoire Pierre Pagney "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" (LACEEDE/UAC), Abomey-Calavi, Bénin, 2017, pp.206-218.
6. Dr. Jean Hounkpè. *Support de cours de modélisation hydrologique*. Physicien Hydrologue Spécialiste en changements Climatiques et Ressources en eau, Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi (Benin), Email : jeanhounkpe@gmail.com, 25p.
7. IkbalOuchouia, Azzedine Chaouki. *De la variabilité climatique au changement de régime hydrologique dans le bassin de l'Oued Ouzoud/Haut Atlas Central/Maroc*. 2022. Hal-03581861.11p. <https://hal-03581861>
8. Jean Emmanuel Patruel. *Procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques - modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non*

- sahélienne. L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai 1995). IAHS Publ. no. 238. 1996, pp.99-110.
9. Karambiri Bienvenue et al. *Variabilité climatique et gestion efficiente de l'eau dans le bassin versant du Sourou au Burkina Faso*. Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou, N° 08, Volume 1, octobre 2019, pp.65-86.
 10. Kodja D. Japhet. *Sensibilité de l'écoulement au forçage pluviométrique dans le bassin versant du Zou à Atchérigbé au Bénin, Afrique de l'Ouest*. Revue de géographie du laboratoire Leïdi – ISSN0051 – 2515 –N°10, décembre 2012, pp.202-279.
 11. Laurence Fayet, *Impact du changement climatique sur la variabilité hydrologique des bassins versants en amont de l'estuaire de la Gironde*. Centre d'étude et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement – Direction Technique Eau, Mer et Fleuves, Août 2020, 25p.
 12. Liliana Zaharia et al. *Impact du changement climatique sur l'écoulement des rivières en Roumanie*. 35^{ème} colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie – AIC 2022, 7p.
 13. Obada Ezéchiél et al. *Evaluation des performances de neuf (09) Modèles Hydrologiques Pluie-débit Globaux sur le bassin versant de la Mékrou à l'exutoire de Kompongou (Bénin)*. Université d'Abomey-Calavi (UAC), Cotonou, Bénin, juillet 2016, pp.411-424.
 14. Ogouwale R. et al. *Changements climatiques et modélisation hydroclimatique dans le bassin versant de l'Okpara (Afrique de l'Ouest)*. XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015, pp.579-585.
 15. *Rapport National sur le Développement Climatique : Bénin*, 127p.
 16. Rosine Marie N'guessan Fossou et al. *Variabilité de l'hydrométrie en Afrique de l'Ouest : cas du N'zi à N'zianouan dans le Département de Tiassalé, Côte d'Ivoire*. *Afrique SCIENCE* (2022) pp. 146-158. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>

ANNEXES

Tableau 9 : Cumuls annuels des paramètres climatiques et moyennes annuelles des débits

N°	Année	Pluie annuelle	Cumul ETR	Cumul ETP	Débits (m3/s)
1	1991	1162,6	863,08	1079	57,55
2	1992	809	683,46	1102,7	12,36
3	1993	859,8	779,49	1203,12	22,47
4	1994	850,3	710,88	1061,72	9,10
5	1995	1072,5	715,93	1094,51	48,24
6	1996	867,7	703,01	962,68	29,69
7	1997	961,3	746,77	963,9	13,47
8	1998	969,8	761,52	1062,34	121,56
9	1999	1210	732,24	992,7	53,48
10	2000	869,3	676,77	915,05	110,41
11	2001	737,7	768,8	1195,49	7,31
12	2002	959,5	756,05	1195,49	34,93
13	2003	1053,5	760,16	1195,49	57,47
14	2004	1107,2	848,27	1199,67	33,32
15	2005	880,8	804,44	1195,49	14,16
16	2006	852,1	775,69	1195,49	13,39
17	2007	1107,8	765,79	1195,49	54,20
18	2008	1174,2	750,23	1199,67	44,64
19	2009	884,3	786,09	1195,49	25,59
20	2010	1057,6	734,15	1185,25	45,66
21	2011	1075,7	874,31	1235	53,48
22	2012	1067,6	901,93	1254,6	17,03
23	2013	870,9	688,75	1116,7	6,13
24	2014	1151,7	764,1	1170,7	24,21
25	2015	803	742,65	1350,3	4,29
26	2016	1145,6	803,95	1426,2	118,85
27	2017	951,2	678,65	1450,2	118,63
28	2018	1293	696,3	1261	121,56
29	2019	1280	756,85	1295,8	79,55
30	2020	841,4	699,59	1475,9	59,25
31	2021	974	720,23	1434,6	33,23
32	2022	1171,5	713,25	1438,3	76,49

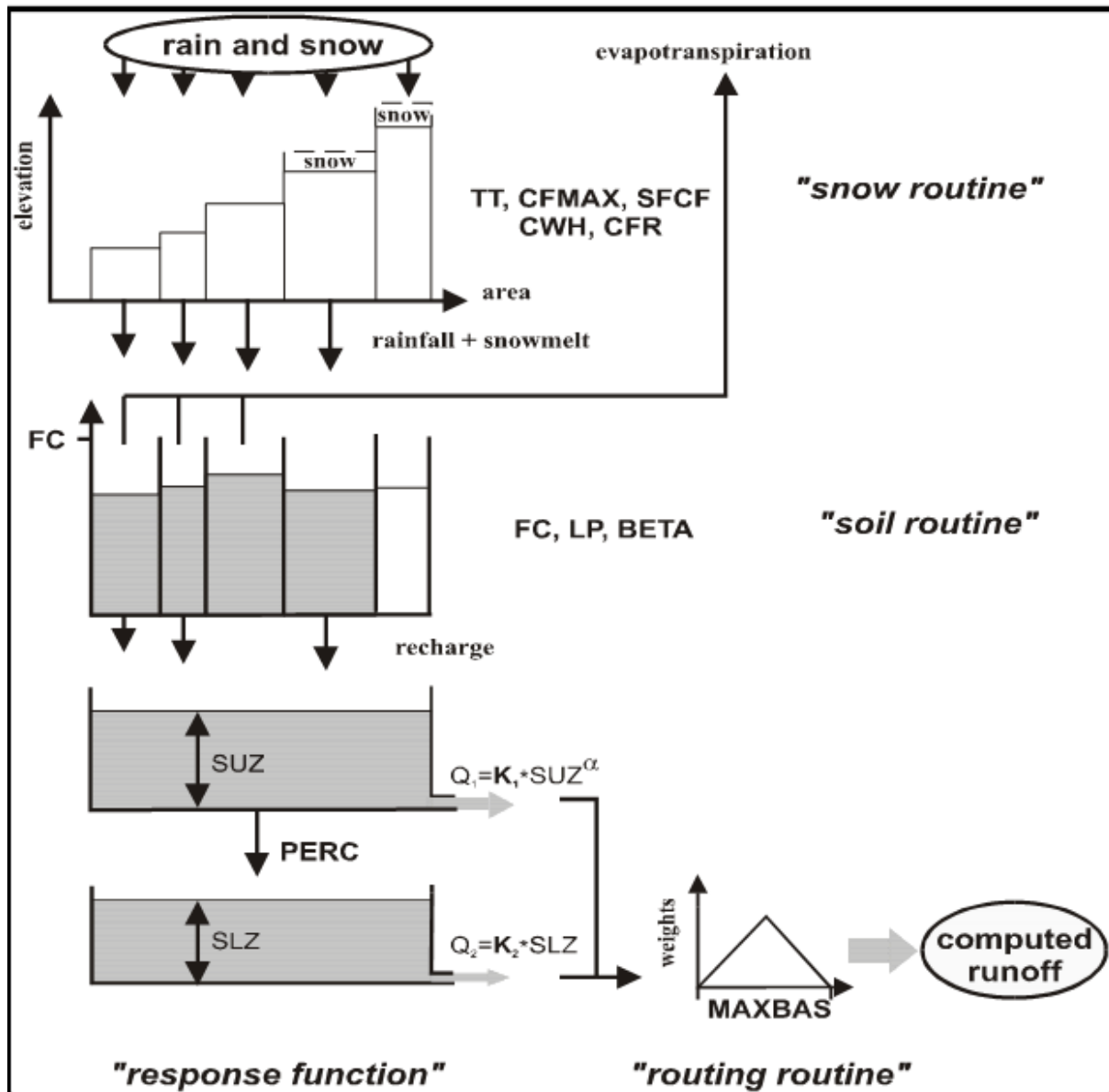


Figure 19 : Structure et paramètres du modèle HBV-light

**IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES ECOULEMENTS DU SOUS-BASSIN
VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE D'ATCHERIGBE**

Soil Moisture Routine Veg. zone 1 FC 306.302434574 ☐ LP 0.62657466132 ☐ BETA 9.99994428028 ☐	Soil Moisture Routine Veg. zone 1 FC 283.831433072 ☐ LP 0.99999975321 ☐ BETA 9.04805526864 ☐
Response Routine PERC 4.19393576993 ☐ UZL 110 ☐ K0 0.10044745540 ☐ K1 0.00175144567 ☐ K2 0.27231319903 ☐	Response Routine PERC 98.3743273080 ☐ UZL 59.9952656046 ☐ K0 0.12102706934 ☐ K1 0.02263734455 ☐ K2 0.08828319013 ☐
Routing Routine MAXBAS 4 ☐	Routing Routine MAXBAS 4.99994762643 ☐

Figure 20 : Paramètres respectifs des modèles sur la première et la deuxième sous périodes

TABLE DES MATIERES

CERTIFICATION	ii
DEDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RESUME.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES.....	viii
Chapitre 1 : Généralités.....	2
1.1. INTRODUCTION	2
1.2. Objectifs d'étude	3
1.2.1. Objectif général	4
1.2.2. Objectifs spécifiques.....	4
1.3. Hypothèses de travail	4
1.4. Structure du mémoire	4
1.5. Revue de littérature	5
1.5.1. Clarification conceptuelle.....	5
1.5.2. Synthèse bibliographique	6
Chapitre 2 : Données, Matériels et Méthodologie.....	9
2.1. Présentation de la structure d'accueil	9
2.1.1. Historique.....	9
2.1.2. Missions	9
2.1.3. Organigramme de CANAL-EAU	9
2.2. Zone d'étude	10
2.3. Données	14
2.3.1. Acquisition des données.....	14
2.3.2. Traitement des données.....	15
2.4. Matériels	15
2.5. Méthodologie.....	16

2.5.1. Appréciation des tendances et variabilités du régime pluviométrique.....	16
2.5.2. Modélisation avec HBV-light	19
2.6. Test statistique de signification de Student ou Test t	21
Chapitre 3 : Résultats et Discussion	24
3.1. Spatialisation	24
3.1.1. Détermination de l'influence des stations pluviométriques sur le BV du Zou	24
3.1.2. Détermination de la pluie spatiale moyenne	25
3.2. Comportement des précipitations sur le sous-bassin versant	25
3.3. Analyse de tendances dans les précipitations	27
3.4. Rupture de stationnarité.....	28
3.5. Indice Standardisé de Précipitations (SPI)	29
3.5.1. Application des SPI à la pluviométrie annuelle de chaque station	29
3.5.2. Application des SPI à la pluie moyenne spatiale annuelle.....	30
3.6. Evolution annuelle des débits	31
3.7. Modélisation hydrologique	33
3.7.1. Modélisation sur la première sous période de référence (1991-2011).....	34
3.7.2. Modélisation sur la deuxième sous période de référence (2012-2022)	35
3.7.3. Bilans de modélisation.....	37
3.7.4. Simulations des débits sur la totalité des deux sous-périodes	38
3.7.5. Application du test de signification de Student aux différents paramètres climatiques et aux débits.	40
3.8. Méthodes de gestion de l'eau en cas de variabilité climatique	43
DISCUSSION	44
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	45
CONCLUSION	45
PERSPECTIVES.....	46
Références bibliographiques	47
ANNEXES	49