REPUBLIQUE DU BENIN

========

UNIVERSITE D'ABOMEY- CALAVI

========

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

========

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

==========

DYNAMIQUE DE LA VARIATION DU STOCK D'EAU DU BASSIN DU FLEUVE MONO

==========

Réalisé par :

Yannel Emmanuel Anfani OGOUNCHI

Sous la supervision de :

Dr Aymar BOSSA

Enseignant-Chercheur à l'INE/UAC

Maître-Assistant des Universités du CAMES

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

PROMOTION : 2021-2022

DEDICACE

Je dédie ce travail :

A mes parents, qui ont été toujours là pour moi, m'ont toujours encouragé dans mes études et grâce à qui j'ai grandi dans un milieu épanouissant.

Cela m'a permis de franchir ce pas qui mène assurément vers la réussite et le professionnalisme.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas pu se réaliser sans le concours très constructif d'un certain nombre de personnes. Je tiens donc à adresser ma profonde gratitude pour l'orientation, le temps, la confiance, la patience de toutes ces personnes sans lesquelles ce mémoire n'aurait pas pu être mené à bon port.

Mes remerciements vont notamment à l'endroit de :

- Dr. Aymar BOSSA, Enseignant-Chercheur à l'INE/UAC, Maître-Assistant des Universités du CAMES, mon Directeur de mémoire, pour m'avoir proposé ce thème passionnant, pour sa disponibilité et pour toute l'inspiration dont j'ai bénéficié tout au long de ce travail ;
- Pr. Dr. Ir Euloge AGBOSSOU, professeur Emérite à l'Institut National de l'Eau et président du conseil d'administration du Partenariat National de l'Eau pour avoir donné des directives à ce travail ;
- Dr. Charlène GABA pour m'avoir accompagné et aidé ;
- Mon mentor Mr. Apollinaire Messan HADONOU pour avoir partagé son expérience dans le domaine de la GIRE ;
- Enseignants de la Licence Professionnelle en Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau à l'Institut National de l'Eau, dont les efforts n'ont pas été vains ;
- Honorables membres du Jury qui ont apprécié ce modeste travail et qui ont pu accorder du temps au détriment de leurs occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- Camarades de promotion pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnées tout au long de notre formation ;
- Certains ainés pour leur soutien, spécialement à ZANNOU Maellys.

RESUME

Cette étude a été réalisée dans le bassin versant du fleuve MONO, partagé entre le BENIN et le TOGO, et qui couvre une superficie de 22 014 km2 à l'exutoire d'Athiémé. Ce bassin subit les effets du changement climatique, la modification des relations pluie/débit et du régime hydrologique en réponse aux constructions de barrages (dont celui de Nangbeto et Adjarala) et aux sollicitations croissantes de l'eau pour l'irrigation. C'est donc dans un contexte de quête de connaissances sur l'état des ressources en eau dans le bassin que cette étude a été initiée afin de déterminer la dynamique de la variation de stock d'eau dans le bassin versant du MONO sur différentes échelles temporelles à partir d'observation satellitaires et in situ en se basant sur un modèle hydrologique pluie-débit. En effet, le modèle pluie-débit GR4J a été calibré puis validé sur différentes périodes allant de 1969 à 2021 avec les données in situ et satellitaires du portail en libre accès sur la productivité de l'eau de la FAO (WaPOR). Ainsi des séries temporelles continues de débits à l'exutoire d'Athiémé ont été générés et utilisés pour la détermination des composantes du bilan hydrologique, puis le calcul spécifique de l'évolution de la variation de stock d'eau dans le bassin. Les résultats de ce modèle selon les critères du Nash et du coefficient de détermination sont acceptables mais très discutables en ce sens qu'ils varient entre 50% 66,7% sur les différentes périodes considérées. Ainsi, il est obtenu sur l'ensemble des années simulées un stock négatif à l'exception des années 2016, 2018 et 2021 où elle est positive conférant au bassin un statut de consommateur et générateur d'eau, respectivement. On note en général une augmentation de l'évapotranspiration alors qu'on assiste à une baisse des précipitations, ce qui pourrait se traduire par une forte influence de la mise en place d'infrastructures de rétention d'eau, favorable potentiellement à l'expansion de cultures irriguées.

MOTS CLES : Bassin versant, MONO, GR4J, Variation du stock d'eau, Données satellitaires

ABSTRACT

This study was carried out in the MONO River watershed, shared between BENIN and TOGO, and covering an area of 22,014 km2 at the outlet of Athieme. This basin is undergoing the effects of climate change, the modification of rainfall/flow relationships and the hydrological regime in response to the construction of dams (including Nangbeto and Adjarala dams) and the increasing demands for water for irrigation. It is thus in a context of quest for knowledge on the state of water resources in the basin that this study was initiated in order to determine the dynamics of water stock variation in the MONO watershed on different temporal scales from satellite and in situ observations based on a rainfall-runoff hydrological model. Indeed, the GR4J rainfall-runoff model has been calibrated and validated over different periods from 1969 to 2021 with in situ and satellite data from the FAO's Water Productivity Open Access Portal (WaPOR). Thus, continuous time series of flows at the Athieme outlet were generated and used for the determination of the components of the water balance, then the specific calculation of the evolution of the water stock variation in the basin. The results of this model according to the Nash criteria and the coefficient of determination are acceptable but very debatable in that they vary between 50% and 66.7% over the different periods considered. Thus, it is obtained on all the simulated years a negative stock with the exception of the years 2016, 2018 and 2021 where it is positive conferring on the basin a status of consumer and generator of water, respectively. In general, an increase in evapotranspiration is noted while a decrease in precipitation is observed, which could translate into a strong influence of the implementation of water retention infrastructures, potentially favorable to the expansion of irrigated crops.

KEYWORDS: Watershed, MONO, GR4J, Water stock variation, Satellite data

SIGLES ET ACRONYMES

ABM	Autorité du Bassin du Mono
AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
ANAEPMR	Agence National de l'Approvisionnement en Eau Potable
DG-Eau	Direction Générale de l'eau
FEM	Fonds pour l'Environnement Mondial
GR4J	Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier
IFEN	Institut Français de l'Environnement
INE	Institut National de l'eau
IREE-Mono	Initiative Régionale pour l'Eau et l'Environnement dans le bassin transfrontalier du fleuve Mono
PCCP	Potential Conflict to Cooperation Potential
WaPOR	The FAO portal to monitor Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data (Portail en libre accès sur la productivité de l'eau de la FAO)

TABLE DES MATIERES

DEDICACE 1

REMERCIEMENTS 2

RESUME 3

ABSTRACT 4

SIGLES ET ACRONYMES 5

TABLE DES MATIERES 6

INTRODUCTION GENERALE 9

I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE 9

II. REVUE DE LITTERATURE 11

III. QUESTIONS DE RECHERCHE 14

IV. OBJECTIFS DE RECHERCHE 15

V. HYPOTHESES DE RECHERCHE 15

VI. STRUCTURE DU MEMOIRE 15

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE et APPROCHE METHODOLOGIQUE 16

1.1. Localisation et description 16

1.2. Climat 17

1.3. Sol et Végétation 17

1.3.1. Sol 17

1.3.2. Végétation 19

1.4. Faune 20

1.5. Reliefs, géologie et géomorphologie 20

1.6. Activités socio- économiques 20

1.7. Réseau hydrographique du fleuve Mono 22

1.8. Pratiques courantes de gestion des ressources en eau du bassin du MONO..... 23

1.9. Matériel 25

1.10. Méthode d'étude 25

1.10.1. Simulation des débits avec le modèle GR4J 25

1.10.2. Critères d'évaluation du modèle GR4J 30

1.10.3. Calcul de la variation de stock 32

1.10.4. Comparaison de l'évolution de l'évapotranspiration et des précipitations avec la dynamique de la variation de stock 33

1.11. Paramétrage des données et mise en œuvre du modèle 34

1.11.1. Données climatiques 34

1.11.2. Données hydrométriques 37

1.11.3. Données WaPOR..... 37

CHAPITRE 2 : RESULTAT ET DISCUSSION 40

2.1 Simulation des débits avec GR4J..... 40

2.2 Calculer la variation annuelle du stock d'eau du bassin du MONO en utilisant les données in situ et de WaPOR; 43

2.2.1 Données In Situ 44

2.2.1.1 Variation du stock d'eau en année moyenne..... 44

2.2.1.2 Variation du stock d'eau inter annuelle..... 45

2.2.2 Données de WaPOR..... 47

2.3 Comparaison de l'évolution de l'évapotranspiration et des précipitations avec la variation de stock 48

2.3.1 Evolution de la précipitation et de la variation de stock 48

2.3.2 Evolution de l'évapotranspiration réelle et de la variation de stock 49

DISCUSSION 50

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 51

I. CONCLUSION GENERALE 51

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 53

ANNEXE 58

INTRODUCTION GENERALE

I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

❖ CONTEXTE

La terre est recouverte en majorité d'eau qui suit un cycle permanent et indispensable au fonctionnement des écosystèmes. Ce cycle de l'eau favorise le maintien des différents cours d'eau présents sur la planète bleue. Le ruissellement, composante du cycle, permet aux différents cours d'eau et à leurs affluents d'être drainés dans des zones géographiques appelées bassin versant. Selon Ambroise (1998), le bassin versant est dans l'étude du cycle de l'eau et de tous les flux associés (sédiments, énergie…), l'unité fonctionnelle fondamentale. De même, d'un point de vue organisationnel et administratif, il représente l'unité de base pour la gestion et la protection des ressources en eau à usage domestique ou industriel. Maitriser cette unité de base représente un défi crucial pour les territoires présentant de forts enjeux et pour les secteurs économiques sensibles au climat et aux conditions hydrométéorologiques des bassins versants, et, parmi les méthodes utilisées, figure la modélisation hydrologique.

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique) pour faciliter l'établissement du bilan hydrologique sur lequel se base de nombreux projets pour avoir une idée de la ressource en eau disponible, en vue de la mieux planifier/gérer et ainsi accroitre autant agricole qu'énergétique.

Au Bénin, plusieurs projets sont mis en place pour la gestion des ressources en eau. On peut citer, entre autres, le projet IREE-Mono, qui nécessite une meilleure connaissance du bassin versant du Mono. Aussi les Etats ayant en partage le bassin versant du Mono (la République du Bénin et la république du Togo) ont tout récemment travaillé à mettre en place l'Autorité du Bassin du Mono (ABM) a besoin d'être accompagné dans ses activités de production de la connaissance sur l'état du bassin versant. C'est dans ce contexte que nous avons choisi comme thème : « Dynamique de la variation du stock d'eau du bassin du fleuve Mono », dans le but d'apporter notre aide à l'évaluation des connaissances sur ce bassin et plus précisément sur les composantes du bilan hydrologique. Ce travail a toute sa pertinence dans le fait qu'au regard de la forte poussée démographique se traduisant par une demande croissante de la ressource en eau, il y a nécessité à mettre en place des systèmes d'observation et d'évaluation permanente

de la ressource en vue de définir des mécanismes de gestion durable. Pour y parvenir, nous allons adopter un plan à trois chapitres. Le premier chapitre, présente le bassin versant du Mono à l'exutoire d'Athiémé. Le second chapitre, quant à lui, décrit l'approche méthodologique. Le troisième et dernier chapitre, expose enfin nos résultats et discussion.

❖ PROBEMATIQUE

L'importance de l'eau n'est plus à démontrer. En effet, l'eau est indispensable non seulement pour la santé de l'homme mais également pour diverses activités telles que l'agriculture, l'énergie, le transport, etc… Fort de son importance, l'humanité se retrouve confrontée à de nombreuses difficultés liées à l'augmentation de la demande et la variabilité de l'offre. Par ailleurs, la pollution généralisée sans oublier les catastrophes liées à l'eau sont autant de facteurs qui rendent difficile sa gestion. L'étude et la mise en place des politiques environnementales liées à l'eau se basent donc sur un référentiel spatial approprié, dans le but d'assurer sur le long terme, la gestion et la protection de cette ressource dans un contexte de bassin versant. Cependant, le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant est sous la dépendance d'un bon nombre d'éléments que sont : le climat, la lithologie, le relief, l'occupation du sol, etc...

Les changements climatiques, les changements d'occupation du sol ainsi que l'aménagement hydraulique, modifient les cycles hydrologiques, en rendant l'eau plus imprévisible. De plus, ils augmentent la fréquence et l'intensité des sécheresses et des inondations qui sont de plus en plus dévastatrices, devenant ainsi un véritable fléau ces dernières années pour les biens matériels et économiques, mais surtout pour les populations touchées. IFEN (2008) stipule que dans le monde, les inondations causent plus de 50% des catastrophes naturelles avec, en moyenne, 20 000 morts/an. Il faut également noter que les changements climatiques entrainent la variabilité de la quantité d'eau c'est à dire son augmentation et sa baisse qui déstabilisent le régime hydrologique des bassins versants.

Le Benin, à l'instar d'autres pays, dispose de nombreux bassins versants parmi lesquels figure le bassin du fleuve MONO, très anthropisé. Ce bassin fait constamment face à une variation des relations pluie/débit et du régime hydrologique suite à la construction du barrage de Nangbeto qui a modifié d'une façon non négligeable l'écosystème des lagunes de l'embouchure en réduisant les fluctuations saisonnières du fleuve. Par ailleurs, les changements climatiques (la hausse et la baisse des précipitations) ainsi que l'évapotranspiration due à une sollicitation croissante de l'eau pour l'irrigation influence également le stock d'eau.

Le suivi de la dynamique de la variation du stock d'eau dans ce bassin est, à cet effet, un besoin dont l'importance augmente au fil du temps au regard de la forte utilisation de l'eau par la population. Ce suivi permettra d'apprécier la durabilité des usages d'eau dans le bassin. Et c'est dans cette optique que le projet « Initiative Régionale pour l'Eau et l'Environnement dans le bassin transfrontalier du fleuve Mono (IREE-Mono) » (ID FEM : 10779) a été instaurée afin de permettre la régénération du bassin par la protection des berges et la reforestation. L'un des objectifs spécifiques de ce projet est de permettre le suivi et l'évaluation des connaissances quantitatives sur ce bassin. Afin de participer à ce projet et plus précisément à l'atteinte de cet objectif spécifique, nous nous sommes donc intéressés à la variation du stock d'eau dans le bassin du fleuve Mono.

II. REVUE DE LITTERATURE

❖ CLARIFICATION CONCEPTUELLE

Le bassin versant est la cible de toute technologie visant la protection des sols et la régulation des eaux (Bravard et Petit, 2000). La connaissance du bassin versant est fondamentale dans toute étude hydrologique et de risque ou de vulnérabilité de la ressource en eau. Il est le cadre général des études hydrauliques urbaines (Musy et Higy, 2004). Par exemple, il est primordial entre autres de penser à estimer la potentialité et le comportement hydrologique d'un bassin avant la mise en place de futurs aménagements au profit des populations environnantes.

Pour Nzanzu (2011), l'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant s'effectue le plus souvent par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin face à une sollicitation (précipitation). Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du bassin versant. C'est pour cela que, en mars 2018, dans un article intitulé « estimation des débits et du volume d'eau d'un bassin versant à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques dans la partie sud de la région du bélier (cote d'ivoire) », ATTEY et al… estime que connaitre le débit maximal, le débit moyen et le volume d'eau permet de prévoir la réaction du bassin face un évènement pluvieux et face à l'aménagement du bassin pour le bien-être de la population. Maitriser ses différents paramètres revient à déterminer le bilan hydrologique au niveau du bassin versant qui est en constante variation suite aux changements climatiques et aux modifications apportées par l'homme.

En effet, le phénomène de crue due à l'avènement du changement climatique, engendre des évènements catastrophiques un peu partout dans le monde et surtout en Afrique de l'ouest cette dernière décennie. Dans ce contexte, afin de répondre à la question sur l'évolution future de la fréquence ou de l'intensité de ces événements, AMOUSSOU (2014), publie un article sur l'évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du mono (Bénin-Togo) en contexte de variabilité / changement climatique et conclut que les fortes précipitations pourraient être à l'origine des fortes crues et des inondations enregistrées dans le bassin. Toujours dans le même contexte, il va plus tard en juillet 2015, faire une étude sur l'analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du mono en Afrique de l'ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit. Il a eu à travailler sur la dynamique hydrométéorologique du bassin et la distribution des crues entrantes au barrage de Nangbeto pour apprécier les risques d'inondation dans la basse vallée du fleuve. Le modèle GR4J a servi à la modélisation des crues en amont et en aval du barrage de 1988 à 2010 pour apprécier les effets du barrage et il a constaté que le modèle reproduit bien les débits de crues sur l'ensemble de la période en calibration mais qu'on note une dégradation sur le rendue des débits de crues lorsqu'on s'éloigne de la période de calage.

L'apport des prévisions saisonnières pour faire face aux phénomènes liés aux changements climatiques n'est plus à démontrer puisqu'il a été illustré dans de nombreux domaines. Ces prévisions permettent, entre autres, non seulement de mieux quantifier la disponibilité de la ressource eau et d'adapter les pratiques agricoles, mais elles peuvent également servir dans les démarches de protection pour l'alerte aux crues. RANDRIANASOLO (2009) avait d'ailleurs présenté un travail où elle évaluait la qualité de l'utilisation des données de prévision météorologique d'ensemble dans la modélisation hydrologique des crues. Pour mener à bien son travail, elle a effectué une analyse comparative entre deux sorties de débits issus de deux modèles hydrologiques différents que sont le modèle GRPE, modèle global du Cemagref (GR3P), adapté à la prévision d'ensemble, et le modèle distribué SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) développé à Météo-France. L'étude consistait donc à produire un outil de vérification permettant d'évaluer la qualité des prévisions d'ensemble issues de ces deux modèles. Il a donc été constaté, que GRPE a de meilleurs scores et qu'il prévoit mieux que le modèle distribué de Météo-France due à l'assimilation dans le modèle de la dernière observation de débit.

En ce qui concerne les modifications des bassins par l'homme, la construction par exemple de grands barrages hydroélectriques sur les fleuves, provoque des changements de régime hydrologique et sédimentologie susceptibles d'entraîner des modifications des équilibres du

milieu et d'avoir des impacts négatifs sur la vie des populations et l'économie des régions concernées. C'est ainsi que, selon AMOUSSOU (2012) dans son article sur l'impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbeto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'ouest) » trouve qu'avec la mise en eau du barrage Nangbeto, le régime hydrologique du fleuve Mono a été modifié. Pour lui, les débits d'étiage sont abondants et soutenus par les lâchers d'eau et les crues sont en légère baisse, avec pour conséquence l'augmentation du coefficient d'écoulement de 1988 à 2000. Par ailleurs, ROSSI (2018) va conclure, dans son article intitulé « Impact des barrages de la vallée du mono (Togo Benin) : la gestion de l'incertitude », que l'exploitation conjointe des barrages de Nangbeto et d'Adjarala va entraîner plusieurs types de phénomènes étalés dans le temps.

❖ SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

La modélisation est censée décrire de manières fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Elle permet de tester la représentation des processus du bilan hydrologique aux différentes échelles. A l'échelle des bassins, seule la modélisation permettra d'estimer les termes spatialisés du bilan hydrologique (GALLE et al, 2005). Cependant, en Afrique de l'ouest, les informations disponibles ne permettent pas en général de faire une bonne utilisation des modèles pluies/débits. Le choix d'un modèle hydrologique est donc assez difficile et dépend des objectifs et des données disponibles selon Oudin (2004). Toutefois, il existe une multitude de modèles hydrologiques et il revient aux chercheurs de choisir le plus adéquat.

Au Bénin, plusieurs études ont été faites avec le modèle GR. En effet, Le Lay (2006) dans le cadre du programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), a modélisé le fonctionnement hydrologique de la Haute Vallée de l'Ouémé au Bénin. Il a eu à réaliser une première estimation des bilans hydrologiques et à contribuer au développement d'outils capables de simuler les impacts climatiques et anthropiques sur la ressource en eau. Pour ce faire, il a utilisé deux modèles qui sont le modèle GR4J, structure empirique et générique, et le modèle TOPAMMA, formalisme dérivé de TOPMODEL et développer au cours de son travail. Lors de l'évaluation des modèles à travers deux bassins que sont l'OUEME et la DONGA, il a pu conclure que le modèle GR4J, comme le modèle TOPAMMA, permet de reproduire très convenablement et de façon robuste les débits journaliers à l'exutoire des deux bassins.

Par ailleurs, des études récentes sur le bassin du fleuve Mono se sont concentrées sur la modélisation de la dynamique des crues à la station Nangbéto en utilisant le modèle groupé

GR4J calé sur plusieurs périodes afin d'apprécier la variabilité temporelle de ses paramètres et ainsi son applicabilité pour des périodes futures (Amoussou et al., 2014). Ces études visaient l'analyse de la dynamique des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto en évaluant l'influence du barrage, par le biais de méthodes statistiques. Ces analyses sont axées sur la variabilité temporelle des précipitations dans certaines stations de débit de jauges particulières (Rossi, 1996 ; Houessou, 2016). Le modèle GR4J reproduit bien les débits de crues en période calage, mais ces critères de performance se dégradent lorsque l'on s'en éloigne. Ajoutons à cela que ZANOU (2021), a établi un système de modélisation de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin du mono en modélisant le fonctionnement hydrologique du bassin du Mono à l'exutoire d'Athiémé avec les modèles GR4J et GR2M. La validation a donné un résultat moyen pour le pas de temps mensuel confirmant un calage acceptable du modèle. Cependant, pour le modèle journalier, les résultats du calage sont bons, en revanche ce n'est pas le cas pour la validation. Ceci peut être dû probablement aux données.

III. QUESTIONS DE RECHERCHE

❖ Question principale

Le bassin versant du Mono se comporte-t-il comme un générateur ou consommateur d'eau au regard du développement des infrastructures d'eau, l'augmentation des usages multiples et le changement climatique ?

❖ Questions spécifiques

- Comment évolue la variation de stock d'eau du bassin du fleuve MONO à différente échelle temporelle ?
- La sollicitation croissante de l'eau pour l'irrigation, c'est-à-dire la construction de réservoirs de stockage, affecte-t-elle la dynamique de la variation du stock d'eau du bassin?

IV. OBJECTIFS DE RECHERCHE

❖ OBJECTIF GENERAL

L'objectif de cette étude est d'établir la dynamique de la variation de stock d'eau dans le bassin versant du MONO sur différentes échelles temporelles à partir d'observation satellitaires et in situ en se basant sur un modèle hydrologique pluie-débit.

❖ OBJECTIFS SPECIFIQUES

- Caler et valider (phase de traitement) le modèle GR4J à partir des données hydrométéorologiques in situ ;
- Calculer la variation annuelle du stock d'eau du bassin du MONO en utilisant les données in situ et de WaPOR ;
- Comparer l'évolution de l'évapotranspiration et des précipitations avec la dynamique de la variation du stock.

V. HYPOTHESES DE RECHERCHE

La variation du stock d'eau du bassin versant du Mono reste négative sur les années d'observation.

VI. STRUCTURE DU MEMOIRE

Le présent mémoire commence d'abord par une introduction générale présentant le contexte et la justification de notre thème d'étude, la revue de littérature, les questions de recherche, les objectifs du travail ainsi que les hypothèses. La suite du mémoire s'articule autour de deux grands chapitres à savoir :

- Le premier chapitre donne un aperçu de la zone d'étude et présente les données utilisées ainsi que la méthodologie adoptée ;
- Le deuxième chapitre présente les résultats obtenus ainsi que la discussion.

Au terme de ce mémoire, on trouve une conclusion générale accompagnée de quelques perspectives.

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE et APPROCHE METHODOLOGIQUE

Le chapitre 1 de notre travail présente dans une première partie le milieu d'étude pour faciliter la compréhension de l'étude et l'interprétation les résultats de l'étude et d'établir les liens des relations de cause à effet. Dans la seconde partie, il présente l'ensemble des données utilisées, les matériels exploités ainsi que la méthodologie de travail suivie.

1.1. Localisation et description

Situé en bordure méridionale de l'Afrique de l'Ouest, dans la région intertropicale, le bassin versant transfrontalier du Mono est partagé entre le Bénin et le Togo. Il s'étend sur 560 km du Nord au Sud et plus précisément entre 06°16' et 09°20'N et 0°42' et 2°25'E (Amoussou, 2010, Amoussou *et al*., 2012).

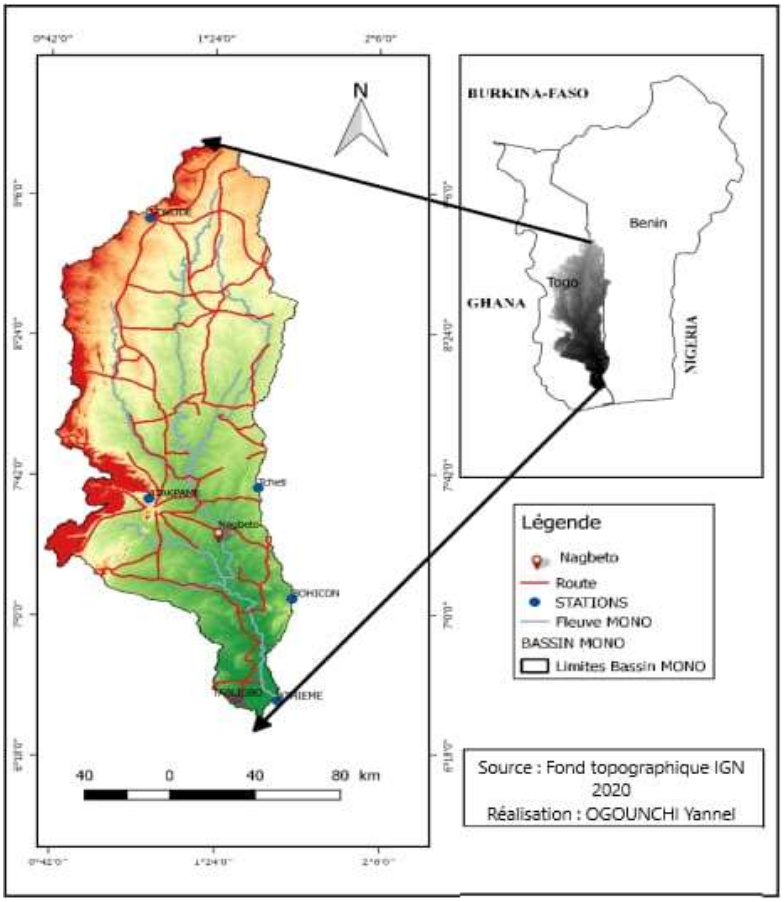


Figure 1 : Localisation du bassin versant du fleuve MONO

1.2. Climat

Le bassin versant du Mono est caractérisé par deux climats : un climat subéquatorial au sud et un climat tropical humide au Nord. Il est caractérisé par une alternance annuelle de saisons sèches et de saisons pluvieuses. Les niveaux annuelles moyens de précipitations varient entre 1160 mm au Nord et 850 mm au Sud.

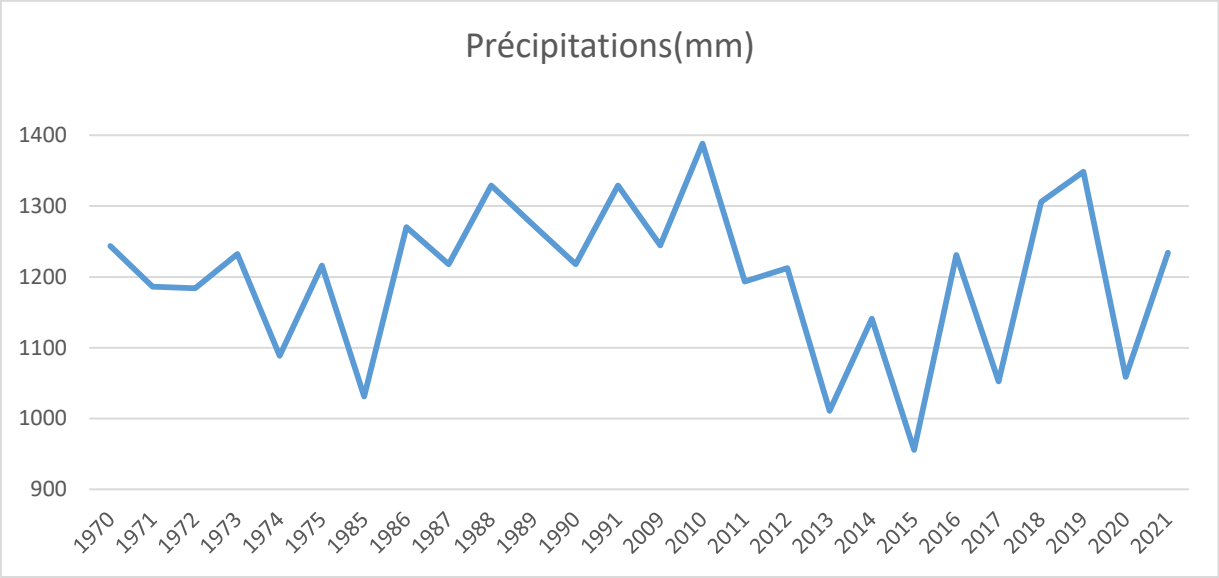


Figure 2 : Courbes des précipitations annuelles dans le bassin du Mono

1.3. Sol et Végétation

1.3.1. Sol

On peut distinguer dans le département du Mono, cinq (05) types de sols qui sont déterminants pour les exploitations agricoles et la végétation à savoir :

- ✓ Les sols ferrugineux tropicaux de texture limono-sableuse et d'aptitude culturale limitée ;
- ✓ Les terres de barre des plateaux dont les caractéristiques physico-chimiques en font des zones de prédilection pour les cultures vivrières ;
- ✓ Les vertissols de la dépression des Tchi communément appelés terres noires assez difficiles à mettre en culture en dépit de leur fertilité à cause de leur texture argileuse lourde et peu perméable à l'eau ;
- ✓ Les sols alluviaux et colluviaux des vallées du fleuve Mono, très riches, de temps et temps exposés aux flux et aux déflux du fleuve, terrains de prédilection des cultures maraîchères;
- ✓ Les sols sablonneux du cordon littoral peu fertiles, propices aux plantations de cocotiers.

Le bassin versant du Mono a une grande diversité de sols à savoir : les sols modaux dans les milieux marins littoraux, les sols à pseudogley, les vertisols, les sols ferralitiques, les sols ferrugineux et les lithosols (Volkoff, 1965 ; Volkoff et Willaime, 1976 ; Poss et Rossi, 1987 ; Azontondé, 1988). Ils jouent un rôle sur l'évapotranspiration via la végétation. Ces sols ont des propriétés physiques et hydrauliques différentes et jouent un rôle important dans la répartition de la pluie. Ils servent de moyen de transport et de stockage de l'eau.

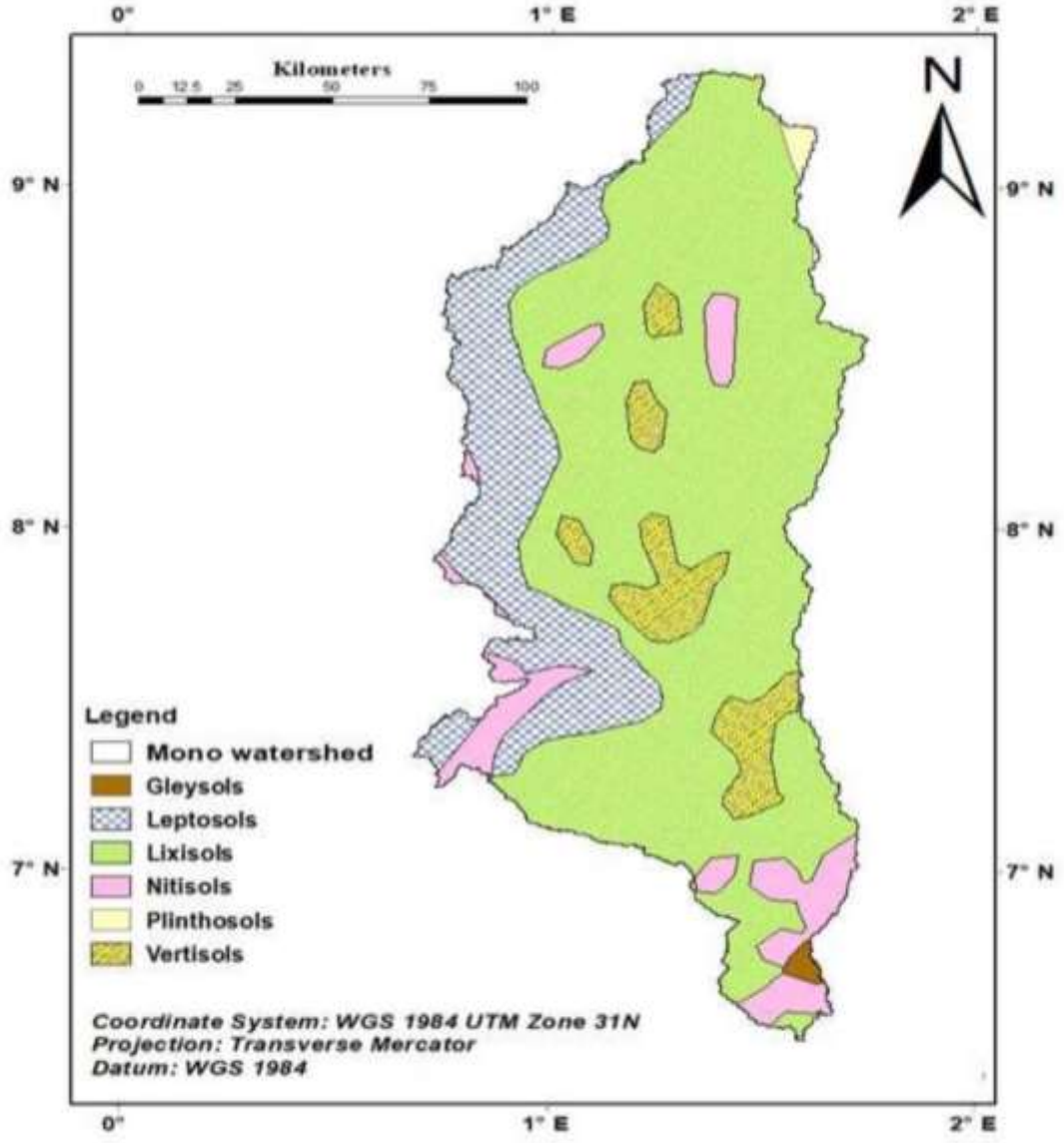


Figure 3 : Carte des types de sols dans le bassin versant du Mono (KOUBODANA, 2020)

1.3.2. Végétation

La végétation dominante est le fourré arbustif dense et la palmeraie vignoble. Il existe une forêt classée à Houéyogbé et des forêts galeries le long des cours d'eau et des forêts claires avec quelques ceiba SPP, preuve de la dégradation de la forêt naturelle.

Les formations végétales jouent un grand rôle dans le bilan hydrique et la répartition issue des précipitations, mais dans le bassin elles sont en croissante dégradation du fait de la croissance démographique et d'une forte pression humaine qui menace certaines espèces. La végétation est principalement constituée des savanes et se compose des forêts classées et galeries et diverses herbes de prairie. Il existe quelques réserves forestières dans le bassin du Mono : la forêt d'Aboudoulaye, forêt de Naglanou, la forêt d'Akissa et la forêt de Togodo (Amoussou et al. 2017). Ainsi, dans la région côtière du bassin on observe souvent la mangrove constituée des espèces comme Avicennia africana (palétuvier blanc) , Rhizophora racemosa (palétuvier rouge) ; des espèces halophiles comme : Paspalum vaginatum, Mimosa pigra, Phyllantus reticulatus, Ficus asperifolia, Pterocarpus santalinoïdes, (Mondjannagni, 1969 et 1977 ; Rossi, 1984 ; Akoègninou, 1984 et 2001), Andropogon gayanus (Amoussou, 2003) , Elaeis guineensis (dont on voit les plantations de plus en plus, en remplacement de la végétation dense d'origine qui tend à disparaitre) , de la Raphia , des Cocos nucifera et des espèces ligneuses comme Ceiba pentandra, Antiaris toxicaria, Diospyros sp, 20 Borassus aethiopum, Detarium senegalensis (Banque Mondiale, 1992). Dans la région de Agomè-Seva, Afangnan, AttiTogon, Agbanakin, on retrouve des savanes arborées constituées d'espèces soudano-guinéennes comme Anogeissus leiocarpus, Vitellaria paradoxa, Isoberlinia doka, Entada abyssinia, Parinaris farinos (Tchamié, 1988 ; Akpagana, 1989) et des savanes boisées (Parkia biglobosa, Bombax buenoposense). Entre le centre et le nord du bassin, on peut rencontrer des sommets hauts comme le mont Togo et les collines de Tchetti, de Sokodé et d'Atakpamè qui ont des formations ligneuses avec des forêts-galeries. Cependant, le domaine est surtout occupé par une formation de savane arborée constituée d'espèces soudano-guinéennes comme Albizia spp, Anogeissus leiocarpus, Vitellaria paradoxa, Isoberlinia doka, Kaya senegalensis, Entada abyssinia, Parkia biglobosa et Parinaris farinosa (Gayibor, 1986 ; Tchamié, 1988 ; Akpagana, 1989 ; Banque Mondiale, 1992). Dans la partie septentrionale, on rencontre également des espèces savanicoles comme Anogeissus leiocarpus, Isoberlinia doka et à Vitelaria paradoxa. Sur les monts Togo/Atacora, se développent des formations herbeuses à graminées comme Hyparrhenia barbetti, Loudetia Togoensis, L. scaëtae, Andropogon pseudapricus.

1.4. Faune

Comme faune, nous avons assez souvent des mammifères comme les buffles, phacochères, singes, hippopotames (Hippotamus amphibius), l'antilope des marais ou sitatunga, Guilb harnaché ou antilope des galeries forestières, les céphalopodes, les potamochères, les aulacodes, les cerfs, les rats de Gambie. Les reptiles rencontrés sont les varans, crocodiles, serpents, tortues. On note aussi la présence des gastéropodes comme le crabe géant comestible et d'autres espèces de crabes et crevettes. Il y a des îles protégées parce qu'abritant des espèces d'oiseaux en voie de disparition. Les espèces les plus rencontrées sont les hérons, les canards d'eau, les éperviers et des francolins. (Amoussou 2010; Klassou, 1996).

1.5. Reliefs, géologie et géomorphologie

Le bassin du Mono se caractérise, dans son ensemble, par un relief peu accidenté. Le bassin versant comporte un bassin sédimentaire côtier au sud, modelé en plaine littorale et plateaux et des plus hauts reliefs au nord comprenant les monts Atacora et leurs prolongements méridionaux, les monts du Togo. La topographie est généralement composée du littoral de plaine inondable côtière au sud, d'un plateau sédimentaire et haute montagne au nord-ouest et au centre-ouest du bassin, (Klassou, 1996 ; PCCP, 2008 ; Amoussou, 2010) à l'exception des massifs de l'Est et du Nord-Est. La partie inférieure, du bassin, très étroite se trouve dans le sédimentaire côtier, souvent recouvert d'alluvions gisements à Athiémé. L'altitude dans le bassin du Mono est comprise entre 11 m et 948 m avec la plus élevée à Atilakoutse (Amoussou, 2010).

1.6. Activités socio- économiques

L'économie du département du Mono repose essentiellement sur les activités du secteur primaire. Les principales activités socio-économiques sont l'agriculture, la pêche, la saliculture et l'élevage.

✓ L'agriculture

La principale source de revenus des populations du département du Mono reste l'agriculture qui occupe plus de 37% de la population active. L'agriculture pratiquée est de type traditionnel, avec des instruments rudimentaires et une spécialisation dans les cultures vivrières, notamment le maïs. Le régime foncier constitue un handicap sérieux à l'exploitation des terres. L'exploitation moyenne par paysan dans le département couvre deux (02) hectares non compris les friches, les jachères et les palmeraies. Le mode d'exploitation des terres est basé sur la

culture itinérante sur brûlis avec une jachère de moins en moins longue en raison de la forte pression démographique.

✓ L'élevage

L'élevage est une activité secondaire dans le département du Mono. Les rares paysans éleveurs ne possèdent que de la volaille et quelques têtes d'ovins, caprins et porcins de race locale. L'élevage des bovins est marginal.

✓ La pêche

La pêche qui occupe plus de 50.000 personnes devient de moins en moins attractive, de moins en moins rémunératrice parce qu'elle subit d'une part, les contre coups de la surexploitation des plans d'eau continentaux et, en mer, ceux d'une concurrence déloyale des chalutiers utilisant des techniques de pointe et d'autre part parce que le phénomène d'ensablement et d'envasement des plans d'eau est très accentué.

✓ La saliculture

La saliculture est une activité traditionnelle rémunératrice contrôlée par les femmes de la région côtière. La saliculture traditionnelle est la principale activité des femmes dans la région côtière du complexe, avec le commerce. Elle consiste en la lixiviation de la terre salée raclée, dont la saumure obtenue est chauffée pour cristalliser le chlorure de sodium (NaCl). L'activité occupe les villages périlagunaires, surtout ceux situés au nord de la lagune Loti, Kogbodji, Yinhoutinmè. Depuis la construction et la mise en eau du barrage de Nangbéto en 1987, l'inondation quasi-permanente des marais salants par les eaux douces lâchées a réduit considérablement cette activité à l'ouest de l'embouchure du Mono, notamment dans les villages de Avlo, Gbéffa, Olongo, Kpovidji, Hêvè, Hounsoukoè, avec déplacements des femmes vers l'est Houakpè, Djègbadji, Kpèco, Aïdo, Djègbamey, Covidji.

✓ Réseaux Electrique et Hydraulique :

Tous les chefs-lieux des Communes du département du Mono sont électrifiés ainsi que plusieurs gros villages.

En ce qui concerne l'eau potable, à côté du réseau d'adduction d'eau de la Société Nationale des Eaux du Bénin qui alimente déjà tous les chefs-lieux des Communes et quelques grosses agglomérations, différents projets d'hydrauliques permettent de fournir progressivement l'eau potable à la population. Le taux de desserte actuelle dans le département du Mono est de 51%.

1.7. Réseau hydrographique du fleuve Mono

Le fleuve Mono est le principal cours d'eau que le Togo a en partage avec le Bénin. Il est situé entre 06 ° 16 'et 9 ° 20' de latitude nord et entre 0 ° 42 'et 1 ° 40' de longitude est. Il tire son origine dans les montagnes d'Alédjo au nord Bénin et coule dans sa partie supérieure au Togo avant de constituer dans sa partie inférieure la frontière naturelle entre le Bénin et le Togo à partir d'Aplahoué (Amoussou, 2010). Le Mono se jette dans l'océan atlantique par le système lagunaire (lagune de grand popo) qui lui sert de relai par un large delta appelé "Bouche du Roy" à partir du village d'Agbanankin. Les principaux affluents de l'amont en aval sont : l'Anié, l'Ogou qui prennent respectivement leur source dans le massif de Tchaoudjo (au Togo). Plus en aval, les affluents Amou et Amoutchou proviennent du plateau Akposso (Klassou, 1996). L'affluent Kra prend sa source au mont Haïto. Le Sazué au Bénin, qui reçoit les rivières Dévédo et Savédo sur la rive gauche du Mono, Agogo, Adanwadonmè, dont la navigabilité dépend en partie du régime du Mono. La basse vallée présente un réseau hydrographique très développé, avec présence de mares et de lacs (Amoussou, 2010). Athiémé est le débouché où le fleuve est rejoint par ses principaux affluents.

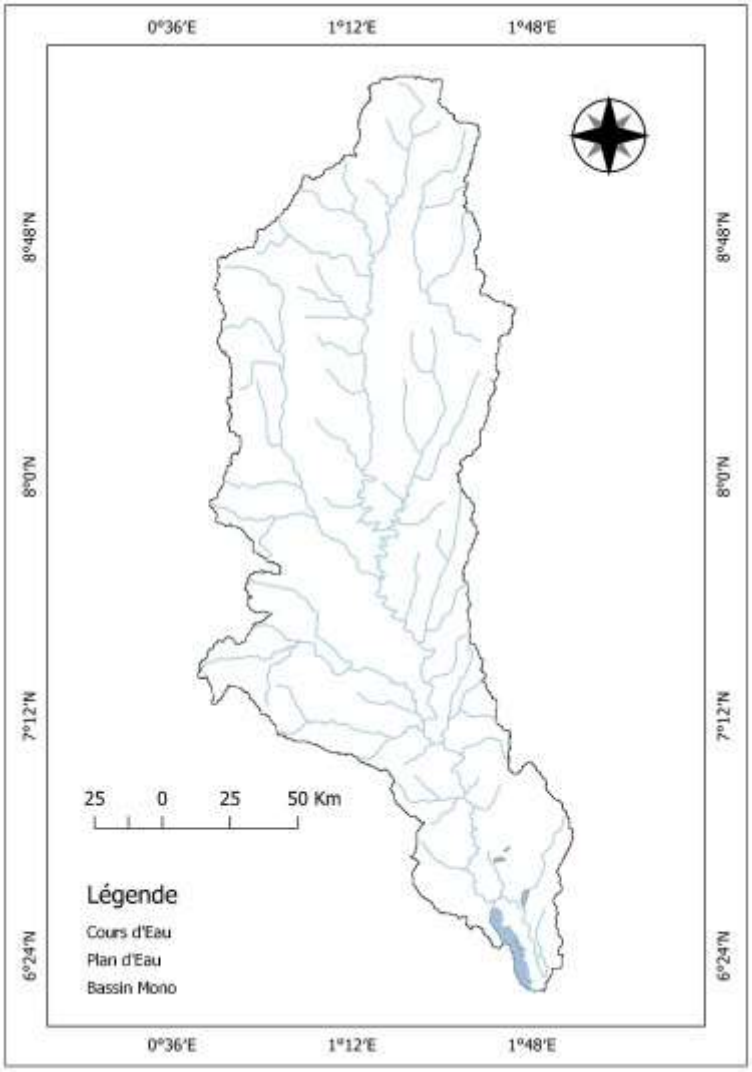


Figure 4 : Réseaux hydrographique du bassin du fleuve MONO

1.8. Pratiques courantes de gestion des ressources en eau du bassin du MONO

❖ **Aménagement du barrage de Nangbéto et les autres projets de barrage**

Situé sur le fleuve Mono à environ 150 km de la côte atlantique, le barrage de Nangbéto est d'une superficie de 180 km² et profond de 38 m. Il a été construit sur le fleuve Mono à partir de 1985 ; mais son exploitation industrielle n'a commencé qu'en septembre 1987, témoignant de la volonté d'indépendance énergétique du Bénin et du Togo. Sa capacité de stockage d'eau est de 1 715 Mm^3 (Millions de mètre cube). Le cahier des charges de l'ouvrage, définissait quatre principaux objectifs : la production d'énergie électrique ; la régularisation partielle (30 %) du

cours du fleuve Mono ; l'irrigation des terres (d'environ 40 000 hectares de terres dans la basse vallée) et la promotion de la pêche pour soutenir les efforts des communautés rurales (CEB, 2014 ; Houessou, 2016).

Il constitue ainsi un facteur de dégradation des écosystèmes dans la basse vallée. En revanche, sur le plan énergétique, il fournit en moyenne 65 000 Kwh.an-1, ce qui a amélioré les conditions et le développement des cités urbaines (électrification des villes). Il a permis aussi la construction de quarante nouveaux villages de plus de cinq mille habitants pour loger les déplacés (Klassou, 1996). Il a réduit les effets des sécheresses dans la basse vallée en soutenant les étiages et les niveaux de fluctuation hydraulique de l'aquifère. Le barrage de Nangbéto représente aujourd'hui un outil de régulation du fleuve Mono avec un contrôle des crues dans la partie aval (Koubodana, 2020). Un autre barrage est en construction à Adjarala et celui de Tététou est encore à la phase de document.

- **Moderniser et développer l'exploitation responsable des ressources hydrologiques**

Conduit par le Fonds National de l'Eau ce projet a pour objectif de promouvoir la gestion intégrée des ressources en eau au niveau des bassins (Ouémé, Volta, Niger, Mono-Couffo) hydrographiques et construire des infrastructures hydrauliques multifonctions pour poursuivre la mise en place du cadre juridique et réglementaire relatif aux ressources en eau.

- **Installation de la Direction Exécutive de l'Autorité du Bassin du Mono (ABM)**

Pour la réalisation de l'analyse diagnostique transfrontalière du Bassin, l'élaboration du schéma directeur et d'aménagement des eaux sans oublier l'élaboration de projets structurants intégrés et durables du Bassin, la Direction Exécutive de l'ABM a été installée en juillet 2014.

- **Initiative Régionale pour l'Eau et l'Environnement dans le Bassin du Mono (IREE-Mono)**

Conduit par l'Autorité du Bassin du Mono avec pour principal objectif, de régénérer le bassin par la protection des berges et la reforestation. Le projet devrait également permettre l'évaluation et la planification du développement du bassin, le renforcement des capacités institutionnelles et techniques, la gestion, le suivi et l'évaluation des connaissances sur le bassin.

1.9. Matériel

Dans le cadre de cette étude, les principaux outils utilisés sont :

- ✓ Excel
- ✓ Microsoft Word
- ✓ Modèle GR4J
- ✓ Logiciel Arcgis
- ✓ Logiciel SWAT
- ✓ WaPOR

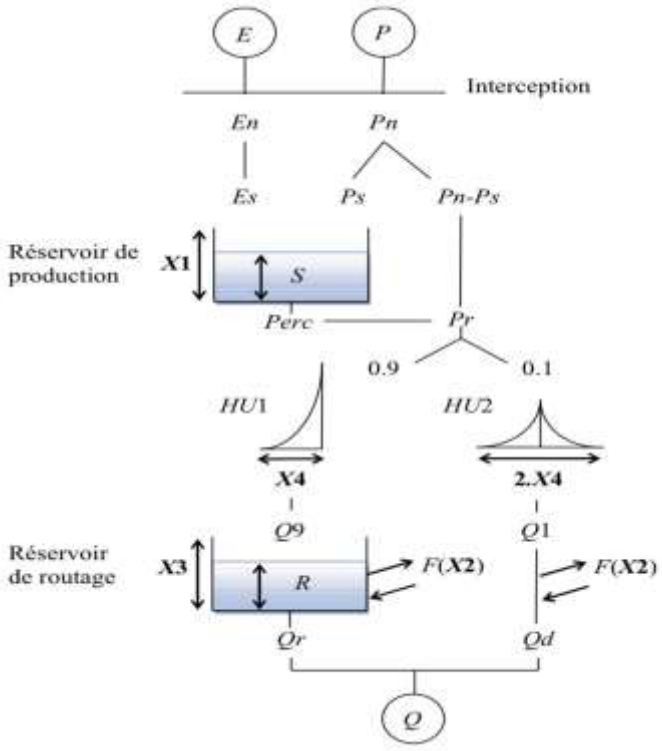
1.10. Méthode d'étude

1.10.1. Simulation des débits avec le modèle GR4J

Le GR4J est un modèle conceptuel global pluie-débit robuste dont les quatre paramètres disposent d'un degré de liberté assez important. Il est composé de deux compartiments reliés. L'un est le centre de pilotage du module non linéaire de production avec un magasin d'humidité de sol et l'autre est responsable du cheminement quadratique des précipitations excessives, couplé à deux hydrogrammes unitaires pour l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain (voir figure). Son objectif est de mettre au point un modèle de simulation pluie débit robuste et fiable en vue d'utilisation pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie. Ce modèle a connu plusieurs versions proposées successivement par Nascimento (1995), Edijatno et *al.*, (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin et *al.*, (2003). La version qui sera appliquée dans ce travail est celle de Perrin et *al.*, (2003) . Pour utiliser le GR4J sur un bassin donné, les informations suivantes sont nécessaires pour les calculs :

- ✓ la superficie du bassin en kilomètres carrés ;
- ✓ les chroniques journalières de pluie (P) sur le bassin (Champ de pluie) en millimètres;
- ✓ les chroniques journalières d'évapotranspiration potentielle (ETP) en millimètres ;
- ✓ les valeurs initiales des taux de remplissage des deux réservoirs : production (X1) et transfert (X3). Les données de « sortie » du modèle sont l'écoulement retardé (Qr), l'écoulement direct (Qd) et l'écoulement à la sortie de l'exutoire (Q).

La figure ci-dessous, illustre le schéma conceptuel du modèle GR4J et les quatre paramètres calés.



Légende :
P : la pluie
E : évapotranspiration potentielle
Pn : pluie nette
***E*n :** évaporation notée
Ps : Pn > 0
S : le niveau du réservoir de production
Es : une quantité d'évaporation
Perc : percolation
HU1 et HU2 : hydrogramme unitaire
Pr : quantité d'eau
j : un entier
I : Pas de temps
Q9, Q1, Qr : les sorties
F : Un échange souterrain en eau (perte ou gain)
R : niveau dans le réservoir de routage
Qd : composante d'écoulement
Q : débit total
X1 : Capacité du réservoir de production
X2 : Coefficient d'échanges souterrains
X3 : Capacité à un jour du réservoir de routage
X4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire

Figure 5 : Schéma représentant les processus hydrologique conceptualisés dans le modèle GR4J ((Perrin *et al.*, 2003)

On distingue : la fonction de production, qui permet de calculer la pluie efficace à partir des données journalières de pluie et d'évapotranspiration potentielle grâce à un premier réservoir, et la fonction de transfert qui permet de transformer la pluie efficace en débit. Cette fonction de transfert est composée de deux branches qui se vidangent de manière différente : l'une permet de représenter les écoulements rapides (branche directe), et l'autre qui est à vidange lente puisqu'elle transite par un réservoir linéaire (Perrin et al., 2003).

Ce modèle est basé sur une structure qui associe une fonction de production et une fonction de routage. Il intègre notamment des hydrogrammes unitaires et d'autres fonctions permettant de simuler le comportement hydrologique du bassin. L'expression mathématique de différentes fonctions sous GR4j est résumée ci-dessous. :

Deux variables sont utilisées en entrée du modèle : la pluie P et l'évapotranspiration potentielle E. Cette étape est basée sur la détermination de la pluie nette notée Pn et l'évaporation notée En. Dans un premier temps, le modèle opère la neutralisation de la pluie Pn par l'évapotranspiration potentielle En. Ceci permet de traduire le phénomène de reprise directe par l'atmosphère de l'eau de pluie tombée sur le sol ou sur la végétation. Il produit, en cas de non

consommation totale de la pluie, une pluie nette qui alimentera les autres parties du modèle. La neutralisation est assimilable à une fonction d'interception avec un réservoir de capacité nulle :

$$\boldsymbol{Si\ P\ \geq E\ alors\ Pn = P - E\ et\ En = 0} \quad \textbf{(1)}$$

$$\boldsymbol{Si\ P \leq E\ alors\ En = E - P\ et\ Pn = 0} \quad \textbf{(2)}$$

Dans le cas où Pn est différente de zéro, une partie Ps de Pn alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$\boldsymbol{Ps = \frac{X1\left[\left(1-\left(\frac{S}{X1}\right)\right)^2\right] tan\,h\left(\frac{Pn}{X1}\right)}{\left(1+\frac{S}{X1}\right) tan\,h\left(\frac{Pn}{X1}\right)}} \quad \textbf{(3)}$$

Où *X*1 (mm) et S sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production.

Dans le cas contraire, lorsque *En* est différent de zéro, une quantité d'évaporation *Es* est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

i. $$\boldsymbol{Es = \frac{S\left(2-\frac{S}{X1}\right) tan\,h\left(\frac{En}{X1}\right)}{1+\left(1-\frac{S}{X1}\right) tan\,h\left(\frac{En}{X1}\right)}} \quad \textbf{(4)}$$

Le contenu du réservoir est mis à jour par :

$$\boldsymbol{S = S - Es + Ps} \quad \textbf{(5)}$$

Une percolation Perc issue du réservoir de production est alors calculée :

$$\boldsymbol{Perc = \left\{1 - \left[1 + \left(\left(\frac{4}{9}\right) * \left(\frac{S}{X1}\right)\right)^4\right]^{\frac{1}{4}}\right\}} \quad \textbf{(6)}$$

Le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par :

$$\boldsymbol{S = S - Perc} \quad \textbf{(7)}$$

La quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est :

$$\boldsymbol{Pr = Perc + (Pn - Ps)} \quad \textbf{(8)}$$

Pr est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un unique hydrogramme unitaire HU2.

HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X4, temps de base de HU1 exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S (cumul de la proportion de la pluie unitaire traitée par l'hydrogramme en fonction du temps) notées respectivement SH1 et SH2.

- SH1 est définie en fonction du temps par :

$$\begin{cases} \textbf{Pour t} = \textbf{0} \; ; \; \textbf{SH1 (t)} = \textbf{0} \\ \textbf{Pour 0} < \textbf{t} < \textbf{X4} \; ; \; \textbf{SH1 (t)} = \left(\frac{\textbf{t}}{\textbf{X4}}\right)^{\frac{5}{2}} \\ \textbf{Pour t} > \textbf{X4} \; ; \; \textbf{SH1 (t)} = \textbf{1} \end{cases} \quad \textbf{(9)}$$

- SH2 est définie en fonction du temps par :

$$\begin{cases} \textbf{Pour t} = 0 \; ; \; \textbf{SH2 (t)} = 0 \\ \textbf{Pour } 0 < \textbf{t} < \textbf{X4} \; ; \; \textbf{SH2 (t)} = \frac{1}{2}\left(\frac{\textbf{t}}{\textbf{X4}}\right)^{\frac{5}{2}} \\ \textbf{Pour X4} < \textbf{t} < \textbf{2X4} \; ; \; \textbf{SH2 (t)} = 1 - \frac{1}{2}\left(2 - \frac{\textbf{t}}{\textbf{X4}}\right)^{\frac{5}{2}} \\ \textbf{Pour t} > \textbf{2X4} \; ; \; \textbf{SH2 (t)} = 1 \end{cases} \quad \textbf{(10)}$$

- Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$\begin{cases} \textbf{HU1 (j)} = \textbf{SH1 (j)} - \textbf{SH1 (j} - \textbf{1)} \\ \textbf{HU2 (j)} = \textbf{SH2 (j)} - \textbf{SH2 (j} - \textbf{1)} \end{cases} \quad \textbf{(11)}$$

où « j » est un entier.

A chaque pas de temps i, les sorties Q9 et Q1 des deux hydrogrammes sont calculés par :

$$\boldsymbol{Q9(i) = 0.9 \sum_{k=1}^{l} HU1(k) * Pr(i-k+1)} \quad \textbf{(12)}$$

$$\boldsymbol{Q1(i) = 0.1 \sum_{k=1}^{m} HU2(k) * Pr(i-k+1)} \quad \textbf{(13)}$$

Où l = int(X4) +1 et m = int (2.X4) +1, avec int(.) désignant la partie entière.

Un échange souterrain en eau (perte ou gain) est calculé par :

$$\boldsymbol{F = X2\left(\frac{R}{X3}\right)^{\left(\frac{7}{2}\right)}}, \quad \textbf{(14)}$$

où *R* est le niveau dans le réservoir, X3 la capacité à un jour du réservoir et X2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour en ajoutant la sortie *Q*9 de L'hydrogramme *HU*1 et *F* :

$$\boldsymbol{R = max\,(0\,;\, R + Q9 + F)} \quad \textbf{(15)}$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Qr = R\left\{1 - \left[1 + \left(1 + \left(\frac{R}{X3}\right)^4\right)^4\right]^{-\left(\frac{1}{4}\right)}\right\} \quad (16)$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R = R - Qr \quad (17)$$

La sortie Q1 de l'hydrogramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd :

$$Qd = max\,(0\,;\, Q1 + F) \quad (18)$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q = Qr + Qd \quad (19)$$

Le modèle GR4J comporte quatre paramètres :

X1 : Capacité du réservoir de production (mm) ;

X2 : Coefficient d'échanges souterrains (-) ;

X3 : Capacité à un jour du réservoir de routage (mm) ;

X4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)

Pour caler et valider le modèle GR4J, il a été retenu les sous-périodes de calage et de validation. En effet, selon la disponibilité des données que nous avons eues, nous avons retenu 1 an(1969) pour la période de mise en route puis 6ans (1970-1975) pour la période de calage et 7 ans pour la période de validation (1985-1991)

1.10.2. Critères d'évaluation du modèle GR4J

Pour caler et valider le modèle GR4J, il a été retenu les sous-périodes de calage et de validation.

- La période de calage P1 est de 6 ans (1970-1975) avec une période de mise en route de 1 an(1969)
- La période de validation P2 est de 7ans (1985-1991).

L'optimisation des paramètres du modèle et la mesure de ses performances à simuler les débits sont faits grâce à certains critères. Il s'agit des critères ci-après :

✓ Critère de Nash (NSE) :

Le critère de Nash est un indicateur de la qualité des simulations du modèle et traduit l'écart entre les débits simulés et les débits observés. Il se calcule par la formule suivante :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Qobsi - Qsimi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qobsi - \overline{Qobsi})^2} \qquad (20)$$

Où $Qo\,(t)$ et $Qc\,(t)$ sont, respectivement, le débit observé et le débit calculé (simulé) au pas de temps t, et $\overline{Qo}$ est le débit moyen observé. N est la taille de la série de débits.

Cette formule traduit un certain rendement du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression. Nash renseigne sur la manière dont les pics de débit sont simulés.

Variation du Nash	**Interprétation**
Nash > 0,8	le modèle est bon sur la période
0,7 < Nash ≤ 0,8	le modèle est satisfaisant
0,6 < Nash ≤ 0,7	le modèle est acceptable
0,5 < Nash ≤ 0,6	le modèle est peu acceptable
Nash ≤ 0,5	le modèle est mauvais

✓ Le coefficient de détermination R^2 :

$$r^2 = \frac{\{\sum_{i=1}^{n}(Qobsi-\overline{Qobi})(Qsimi-\overline{Qsimi})\}^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qobsi-\overline{Qobi})^2 \sum_{i=1}^{n}(Qsimi-\overline{Qsimi})^2} \quad (21)$$

La valeur de R^2 décrit la proportion de la variance des flux observés par rapport aux flux simulés. Des auteurs tels que Moriasi et *al.,* (2007) suggèrent que toute valeur R^2 supérieure à 0,5 pour les comparaisons de débit journalier est un seuil acceptable en simulation hydrologique. R^2 renseigne sur la qualité de la dynamique du débit simulé par rapport au débit observé.

1.10.3. Calcul de la variation de stock

A travers le tableur Excel nous allons calculer la variation de stock annuelle d'eau sur les périodes P1 et P2 des données in situ respectivement 1970 à 1976 et 1985 à 1991 et la période P3 des données satellitaires de WaPOR de 2009 à 2021.

En effet, il s'agit de déterminer la variation en année moyenne d'une part et inter annuelle d'autre part.

Le bilan hydrologique s'écrit :

$$P = Q + E + \Delta R \quad (22)$$

Alors,

$$\Delta R = P - Q - ETR \quad (23)$$

Avec :

- P : hauteur d'eau tombée
- Q : débit
- ETR : évapotranspiration réelle
- ΔR : la variation de stock

$$\boldsymbol{ETR = ES + ETX} \quad \textbf{(24)}$$

avec (ES : évaporation dans le réservoir de production et ETX évaporation dans le réservoir de routage)

- A l'aide de la base de données WaPOR nous avons eu à télécharger les données de précipitations et d'évapotranspiration de référence journalières sur la période P3 allant de 2009 à 2021.Nous avons utilisé le modèle GR4J avec les paramètres utilisés pour les périodes P1 et P2 pour déterminer le bilan hydrologique et tiré la variation de stock sur cette période en année moyenne puis inter annuelle.

1.10.4. Comparaison de l'évolution de l'évapotranspiration et des précipitations avec la dynamique de la variation de stock

1.10.4.1. Comparaison de l'évolution de l'évapotranspiration avec la dynamique de la variation de stock

Calcul du coefficient de corrélation (r) entre la variation de stock et l'évapotranspiration puis présentation et analyse du graphe montrant l'évolution simultanée des deux variables

La formule du coefficient de corrélation est donnée par:

$$r = \frac{\sum(xi - xm)(yi - ym)}{\sqrt{\sum(xi - xm)^2 \sum(yi - ym)^2}}$$

Où:

- **X** - Points de données dans l'ensemble de données X (évapotranspiration)
- **Y** - Points de données dans l'ensemble de données Y (variation de stock)
- $\mathbf{X_m}$ - Moyenne de l'ensemble de données X (évapotranspiration)
- $\mathbf{Y_m}$ - Moyenne de l'ensemble de données Y (variation de stock)

Lorsque r > 0 ; l'évapotranspiration et la variation de stock évoluent dans le même sens

Lorsque r < 0 ; l'évapotranspiration et la variation de stock d'eau évoluent dans des sens contraires

1.10.4.2. Comparaison de l'évolution des précipitations avec la dynamique de la variation de stock

Calcul du coefficient de corrélation (r) entre la variation de stock et la précipitation puis présentation et analyse du graphe montrant l'évolution simultanée des deux variables.

La formule du coefficient de corrélation est donnée par:

$$r = \frac{\sum(xi - xm)(yi - ym)}{\sqrt{\sum(xi - xm)^2 \sum(yi - ym)^2}} \quad \textbf{(26)}$$

Où:

- **X** - Points de données dans l'ensemble de données X (précipitations)
- **Y** - Points de données dans l'ensemble de données Y (variation de stock)
- $\mathbf{X_m}$ - Moyenne de l'ensemble de données X (précipitations)
- $\mathbf{Y_m}$ - Moyenne de l'ensemble de données Y (variation de stock)

Lorsque r > 0 ; la précipitation et la variation de stock évoluent dans le même sens

Lorsque r < 0 ; la précipitation et la variation de stock d'eau évoluent dans des sens contraires

1.11. Paramétrage des données et mise en œuvre du modèle

1.11.1. Données climatiques

Les données climatiques ont été collectées auprès de la Direction Générale de Météorologie Nationale du Togo (DGMN-Togo) et de l'Agence nationale de météorologie du Bénin (METEO-Bénin). Les données climatiques utilisées dans le cadre de cette étude sont des séries de données journalières de précipitation et les intensités de pluie, l'humidité, les températures maximales et minimales, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. En effet, pour des raisons de lacunes il a été choisi au total, six stations de mesure, dont cinq stations de mesures

pluviométriques (Athiémé, Tabligbo, Atakpamè, Tchètti et Sokodé) et une station synoptique, en l'occurrence celle de Bohicon. En effet, la comparaison des ETP mensuelles des stations synoptiques de Sokodé (amont) et de Bohicon (aval) a permis de constater qu'il n'y a pratiquement pas de différence significative entre les données (Amoussou, 2014).

Le tableau suivant nous montre les stations climatiques et périodes de données utilisées pour notre étude.

Tableau 1 : Stations climatiques et périodes de données utilisées

Station	Longitude (°décimal)	Latitude (°décimal)	Elévation (En m)	Période des paramètres de pluie	Période : données de soleil, température et humidité, vent
Athiémé	1,67	6,57	11	1969-1991	-
Tabligbo	1,51	6,59	51	1969-1991	-
Atakpame	1,12	7,58	400	1969-1991	-
Sokodé	1,12	8,98	400	1969-1991	-
Tchetti	1,72	7,63	353	1969-1991	-
Bohicon	2,06	7,16	166	-	1969-1991

En ce qui concerne l'intégration des données pluviométriques au modèle GR4J, les données des différentes stations ci-dessus mentionnées ont été utilisées pour créer une série temporelle unique en se basant sur la méthode de Thiessen (spatialisation des données de pluie). Pour ce

faire, des polygones de Thiessen ont été réalisés dans le logiciel ArcGIS tels que présentés dans la Figure 5.



Figure 6: Polygone de Thiessen du Mono à l'exutoire de Athiémé

La station de Bohicon a été considérée pour l'intégration des données d'évapotranspiration potentielle (ETP) qui ont été estimées par la méthode de Hargreaves (Hargreaves et Samani, 1982) qui ne nécessitent qu'un minimum et un maximum de température (Tabari et al., 2012 ; Xie et al., 2012). L'équation utilisée pour le calcul est :

$$\boldsymbol{\lambda E_0 = 0.0023 \times H_0 \times \ [\![(T_max - T_min)]\!]\ \hat{}0.5 \times (T^{-}_av + 17.8)} \quad \textbf{(27)}$$

Où λ est la chaleur latente de vaporisation en MJ / kg ; E0 est l'évapotranspiration potentielle en mm ; H0 est le rayonnement extraterrestre en MJ / m2, ; Tmax est la température maximale de l'air en ° C ; Tmin est la température minimale de l'air en ° C, et Tmax est la température moyenne de l'air en ° C (Neitsch et al., 2011.)

1.11.2. Données hydrométriques

Les débits de cours d'eau du bassin à l'exutoire d'Athiémé ont été obtenus auprès de METEO-Bénin et de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau).

1.11.3. Données WaPOR

Ces données proviennent principalement de satellites de télédétection disponibles gratuitement. La version bêta de WaPOR a été lancée le 20 avril 2017. Sur la base du processus de révision de la méthodologie, une nouvelle la version WaPOR 1.0 est devenue disponible en juin 2018 et après un nouvel examen par des experts, WaPOR 2.0 a été lancé en juin 2019. Nous allons décrire la méthodologie appliquée pour produire la base de données aux niveaux 1 (250 m), 2 (100 m) et 3 (30 m), disponibles via la version 2.0 de WaPOR. Chaque jeu de données (également appelé « niveau ») est défini par une région d'intérêt unique et une résolution spatiale spécifique.

Tableau 2: Résolution spatiale et régions d'intérêt des différents jeux de données (niveaux)

Base de données	Résolution	Région d'intérêt
Niveau 1	~250m (0.00223°)	Afrique et Proche-Orient (boîte englobante 30W, 40N, 65E, 40S)
Niveau 2	~100m (0.000992°)	Pays : Maroc, Tunisie, Egypte, Ghana, Kenya, Niger, Soudan, Sud-Soudan, Mali, Bénin, Éthiopie, Rwanda, Burundi, Mozambique, Ouganda, Irak, Cisjordanie et Bande de Gaza, Yémen, Jordanie, République arabe syrienne et Liban. Bassins fluviaux : Niger, Nil, Awash et Jordan et Litani.

Niveau 3	~30m (0.000268°)	Périmètres irrigués et périmètres pluviaux en Egypte, Ethiopie (2 périmètres), Mali, Liban, Kenya, Mozambique et Soudan.

Les résolutions en pixels (en m) indiquées dans le tableau 1 sont des valeurs approximatives. Les données sont livrées dans une coordonnée géographique système qui mesure les coordonnées en latitude et longitude. La taille des pixels, lorsqu'elle est exprimée en mètres, varient donc avec la latitude. La résolution reste la même lorsqu'elle est exprimée en degrés, quelle que soit la latitude.

Tableau 3 : Aperçu des composants de données WaPOR, par niveau, avec des résolutions temporelles et spatiales spécifiées

Composants de données	**Niveau 1 (~250m)**	**Niveau 2 (~100m)**	**Niveau 3 (~30m)**	**Remarques**
Productivité de l'eau (WP)	Annuelle	Décennale/ Saisonnier	Décennale/ Saisonnier	Spécifique au niveau calculs
Evaporation (E)	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	
Transpiration (T)	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	
Interception (I)	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	
Évapotranspiration réelle et interception (ETIA)	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	Décennale/ Annuelle	

Production primaire nette (PPN)	Décennale	Décennale	Décennale	
Production totale de biomasse (TBP)	Annuelle	Saisonnier	Saisonnier	
Phénologie		Saisonnier	Saisonnier	
Indice de récolte (HI)			Saisonnier	
Évapotranspiration de référence (RET)	Journalier/ Décennale/ Annuelle			Résolution différente : 20km
Précipitation	Journalier/ Décennale/ Annuelle			Résolution différente : 5km
Classification de la couverture terrestre	Annuelle	Annuelle	Décennale	Classes spécifiques au niveau

Les composants de données qui sont produits pour la base de données WaPOR sont répertoriés dans le tableau 2. Productivité de l'eau, évaporation, transpiration, interception, productivité primaire nette, production totale de biomasse et classifications de la couverture terrestre sont produits aux trois niveaux. La phénologie est délivrée pour les niveaux 2 et 3 et l'indice de récolte pour le niveau 3 uniquement (permettant ainsi le calcul du rendement en combinaison avec d'autres paramètres de culture), l'évapotranspiration de référence et les précipitations ne sont produites qu'au niveau 1 et il convient de noter que ces deux composantes de données ont une résolution spatiale beaucoup plus faible que les autres composantes de données de niveau 1 et qu'elles sont toutes deux produites du quotidien.

CHAPITRE 2 : RESULTAT ET DISCUSSION

2.1 Simulation des débits avec GR4J

Tableau 4 : Paramètres et résultats GR4J

Le tableau ci-dessous expose les différents paramètres ainsi que le résultat des critères de performance utilisés sur les périodes de calage et de validation. Les valeurs mises en parenthèses au niveau de l'efficience de Nash et le coefficient de détermination concernent la période de validation.

Paramètres				Critères d'efficience de Nash			R2
X1	X2	X3	X4	Nash-Sutcliffe (Q)	Nash-Sutcliffe (√Q)	Nash-Sutcliffe (Ln Q)	
6,50	0,83	3,33	-0,27	66,7(40,7)	66,0(45,3)	35,0(41,4)	63,33(45)

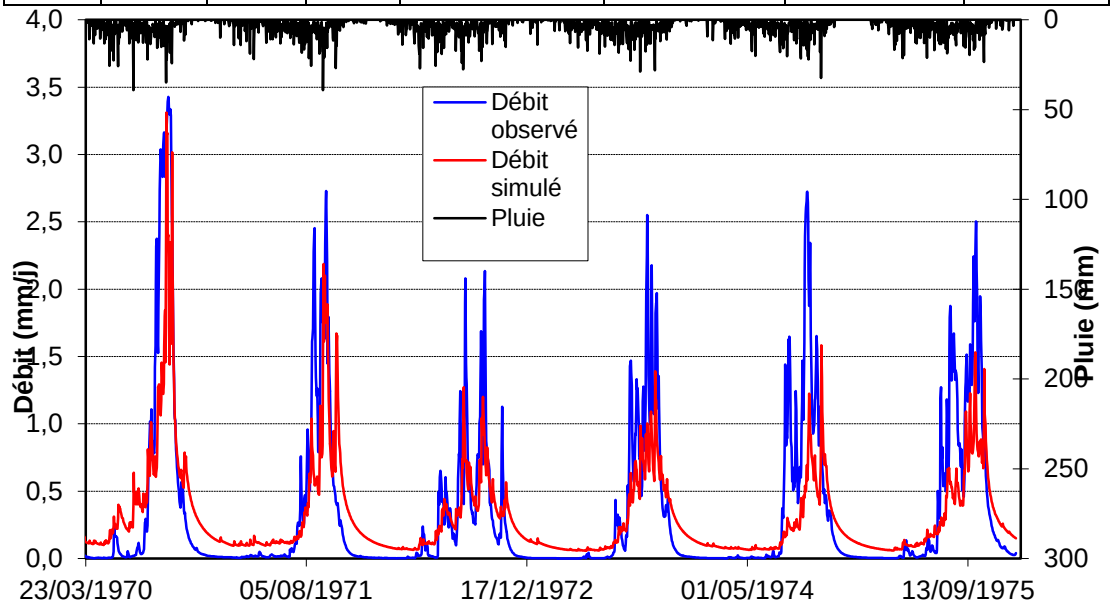


Figure 7 : Chroniques des débits observés et simulés sur la période P1 de calage (1970-1975)

La figure 7 présente les débits simulés et observés superposés afin de faciliter la comparaison et ainsi pour une meilleure comparaison sur la période de calage.

L'hydrogramme des débits observés et des débits simulés au niveau de la période de calage montre que les débits de pointe simulés sont fortement inférieurs aux débits de pointe observés entre l'an 1971 et 1972 jusqu'à l'an 1975 tandis qu'ils étaient très approximatifs entre 1970 et 1971. De même, on constate que les débits d'étiage (faible débits) simulés ont été légèrement surestimés à ceux observés.

Dans l'ensemble, la simulation entraîne tantôt une surestimation, tantôt une sous-estimation du débit. Il n'y a donc pas, globalement, de biais systématique.

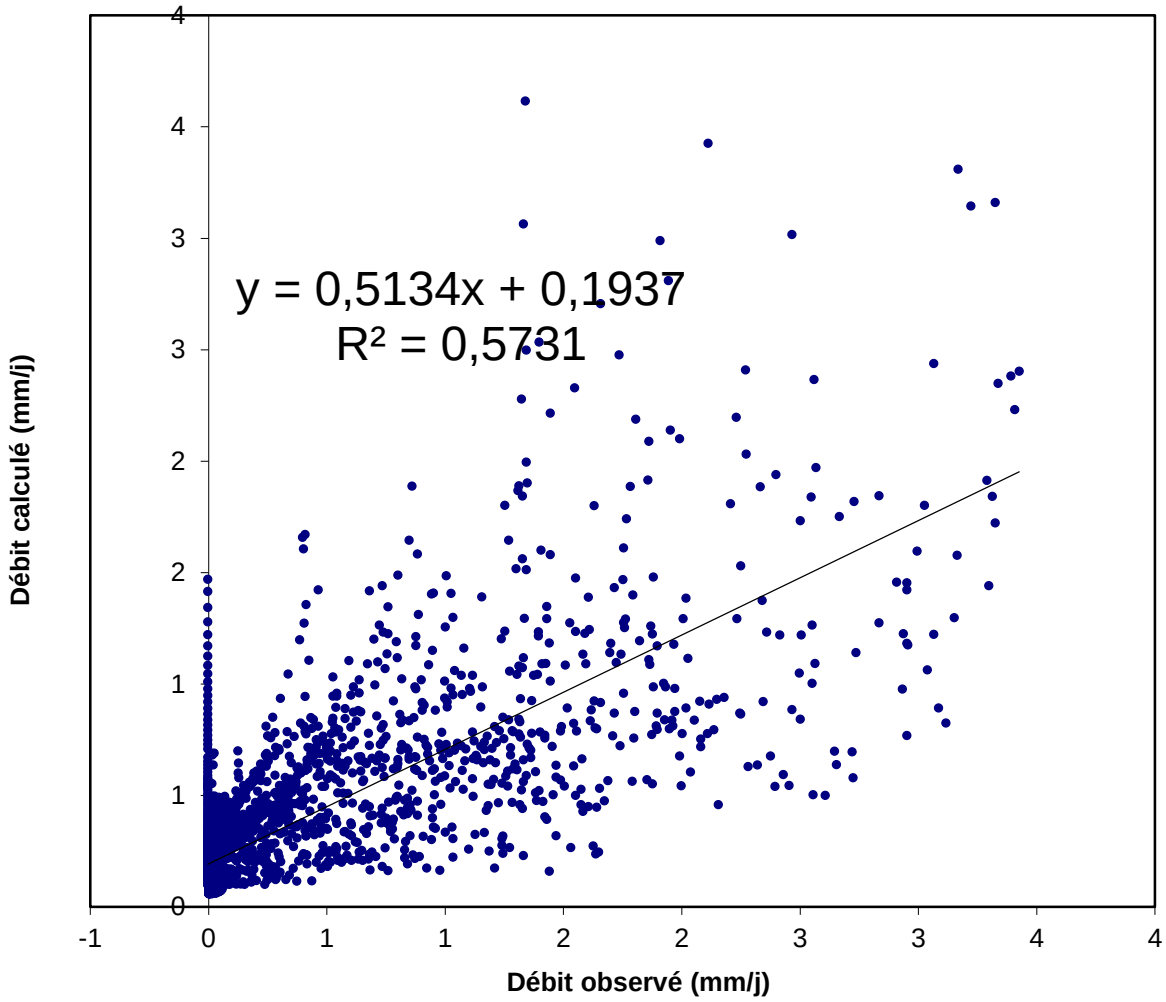


Figure 8 : Comparaison des débits simulés aux débits croisés sur la période P1 de calage (1970-1975)

La figure 8 illustre la validation croisée entre le débit observé et le débit simulé sur la période de calage. On y remarque une dispersion minime des valeurs qui rend le diagramme quasi-linéaire. Une droite de régression linéaire pourrait évidemment être estimée à partir de ces nuages de points (la ligne noire). C'est-à-dire que les résultats de débit simulé donnent une

allure visuelle acceptable pour une simulation hydrologique. De plus, le coefficient de détermination étant supérieur à 0.5 (0.6> 0.5) et L'efficience de Nash dépassant 50% et indiquant un niveau de calibration acceptable, on peut dire que la modélisation hydrologique a un seuil acceptable sur la période de calage. La qualité des simulations sur la période de calage est donc bonne.

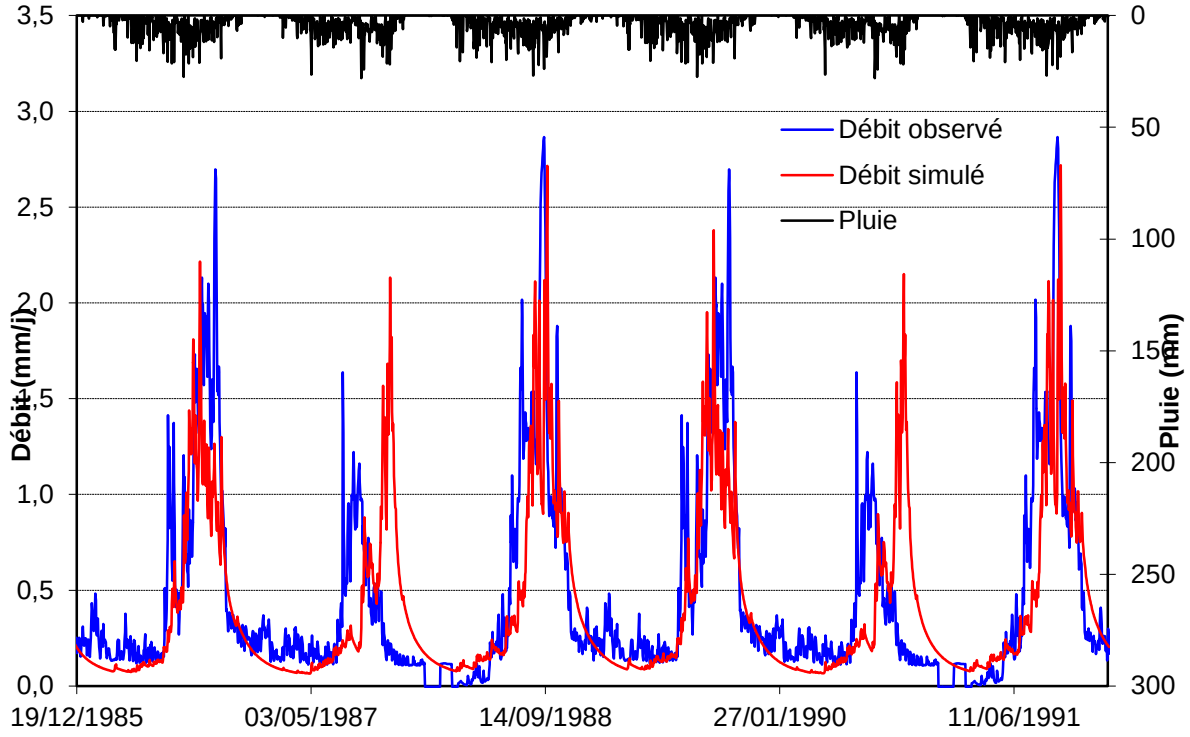


Figure 9 : Chroniques des débits observés et simulés sur la période P2 de validation (1985-1991)

La figure 9 présente les débits simulés et observés superposés afin de faciliter la comparaison et ainsi pour une meilleure comparaison sur la période de validation. On note une surestimation du modèle pour les débits d'étiages tout le long de la simulation ce qui engendrerait des inondations plus fréquente ce qui affectent la stabilité de l'écosystème du bassin du Mono le bien-être des populations et un décalage des débits de pointes (de 1987 à 1988 et de 1990 à 1991) en raison d'une anthropisation de l'écoulement due aux lâchers d'eau pour des raisons de turbinage au niveau de la centrale hydroélectrique de Nangbéto d'une part ; et la qualité médiocre des données historiques sur la période d'après barrage d'autre part.

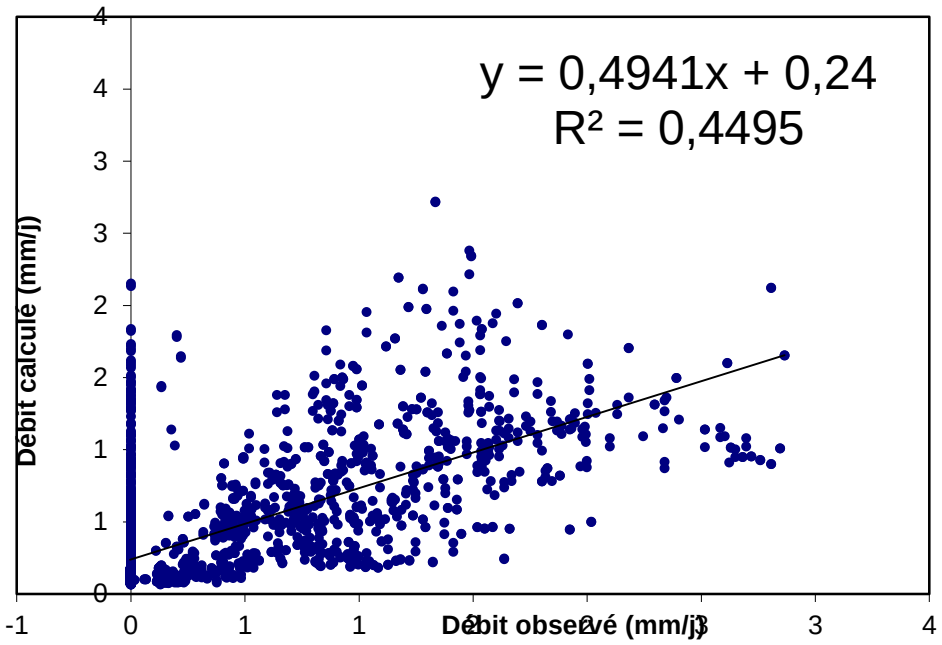


Figure 10 : Comparaison des débits simulés aux débits croisés sur la période P2 de validation (1985-1991)

La figure 10 illustre la validation croisée entre le débit observé et le débit simulé sur la période de validation. Ainsi, une forte dispersion des valeurs de part et d'autre de la droite de régression est observée. Ce qui justifie les différences remarquées lors de la superposition des débits simulés a ceux observés.

De plus le coefficient de détermination étant inférieur à 0.5 (0.4 < 0.5) et l'efficience du Nash n'atteignant pas les 50%, cela traduit une difficulté du modèle à simuler les débits journaliers sur cette période de validation.

2.2 Calculer la variation annuelle du stock d'eau du bassin du MONO en utilisant les données in situ et de WaPOR;

Nous avons eu à calculer la variation de stock en année moyenne et inter annuelle sur chaque période concernant les données in situ P1 et P2 respectivement de calage et de validation puis sur une période P3 avec les données de WaPOR

Rappelons que la période P1 est de 1970-1975 (06 ans), la période P2 est de 1985-1991 (07 ans) et la période P3 de 2009-2021 (13ans).

Les périodes P1 et P2 concernent les données in situ et la période P3 les données de WaPOR

2.2.1 Données In Situ

2.2.1.1 Variation du stock d'eau en année moyenne

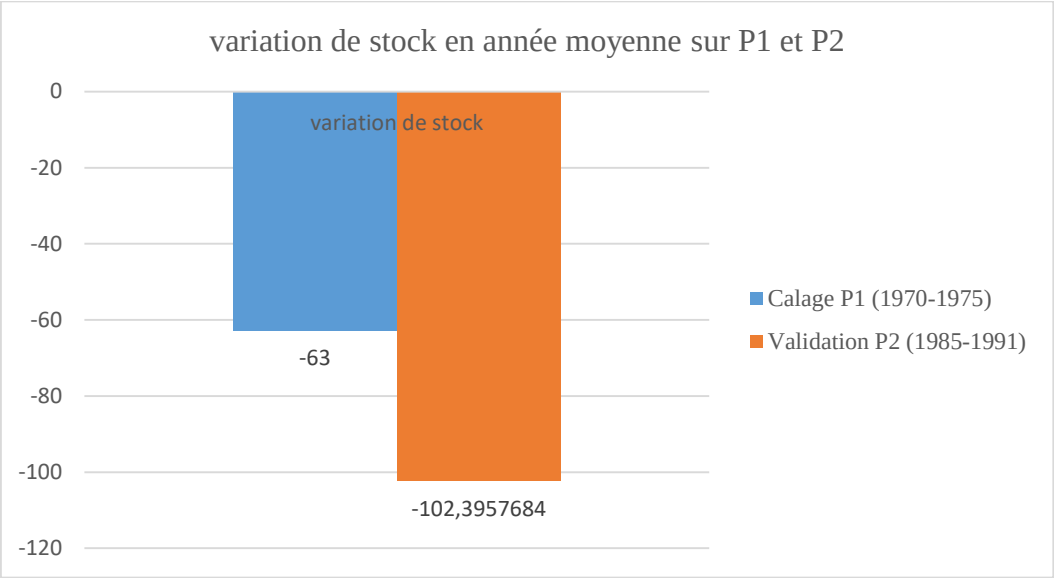


Figure 11 : Variation du stock d'eau en année moyenne sur les périodes de calage et validation

La figure ci-dessus montre la variation du stock d'eau en année moyenne de 1970 à 1975 P1 en bleu et de 1985 à 1991 P2 en orange. En année moyenne c'est à dire sur les périodes P1 de calage et P2 de validation, on obtient une variation du stock d'eau négative sur les deux périodes respectives qui est de -63mm et -102.39mm. En effet, AMOUSSOU (2010) à montrer que les déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 ont multiplié par 4 les déficits de l'écoulement, avec pour conséquence un déficit de la recharge. De plus, le bassin a connu des sécheresses sensibles surtout (1982 à 1987) suite à la baisse des précipitations de 1970 puis début 1980 ce qui justifie une variation de stock négative (beaucoup plus remarquable sur P2 que P1) sur ces périodes du fait du stress hydrique due à la sècheresse. Ainsi, sur les périodes P1 et P2 respectifs la précipitation moyenne annuelle est de 1189mm et 1239mm, ce qui justifie la différence de variation de stock en année moyenne sur les deux périodes (voir figure 11)

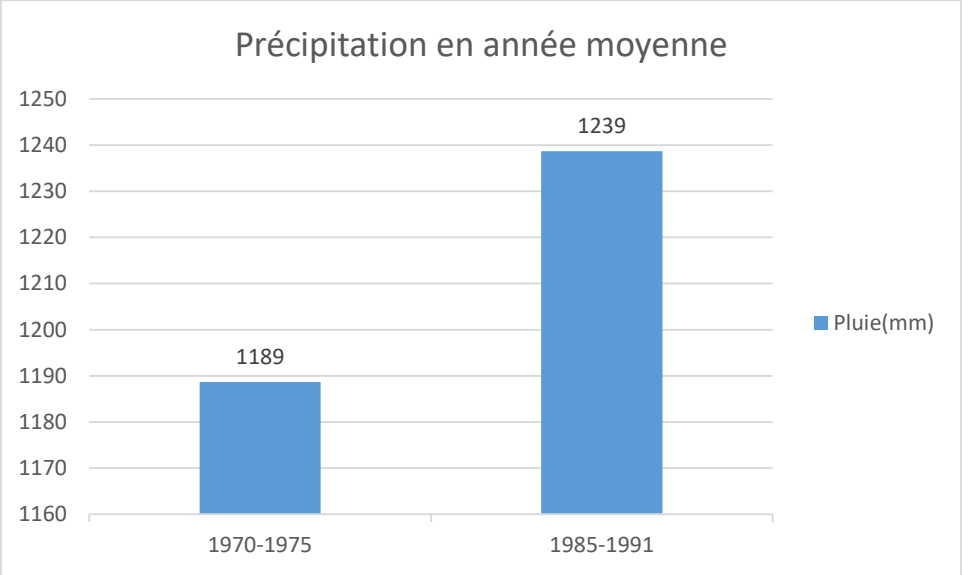


Figure 12 : Précipitation moyenne annuelle sur les périodes de calage et de validation

2.2.1.2 Variation du stock d'eau inter annuelle

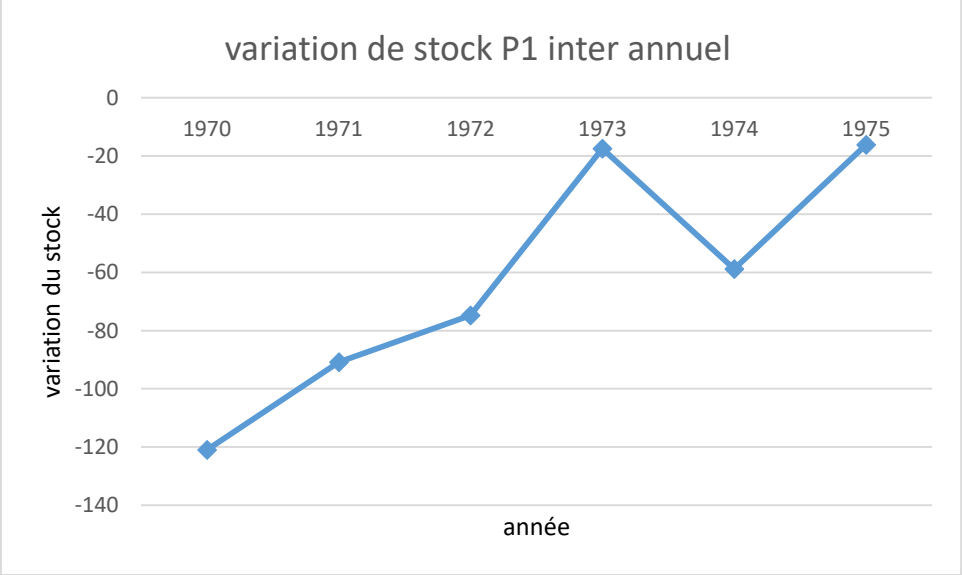


Figure 13 : Variation de stock d'eau inter annuelle dans le bassin du fleuve MONO sur la période P1 de 1970 à 1975

La figure 13 présente l'évolution de variation de stock d'eau inter annuelle sur la période P1 de calage.

Il ressort de l'analyse de la figure, que la variation de stock sur chaque année de la période P2 est négative essentiellement au niveau de l'année 1970 où on atteint jusqu'à -121 mm. L'année 1975 représente sur cette période l'année où la variation connait la plus petite valeur (-16 mm).

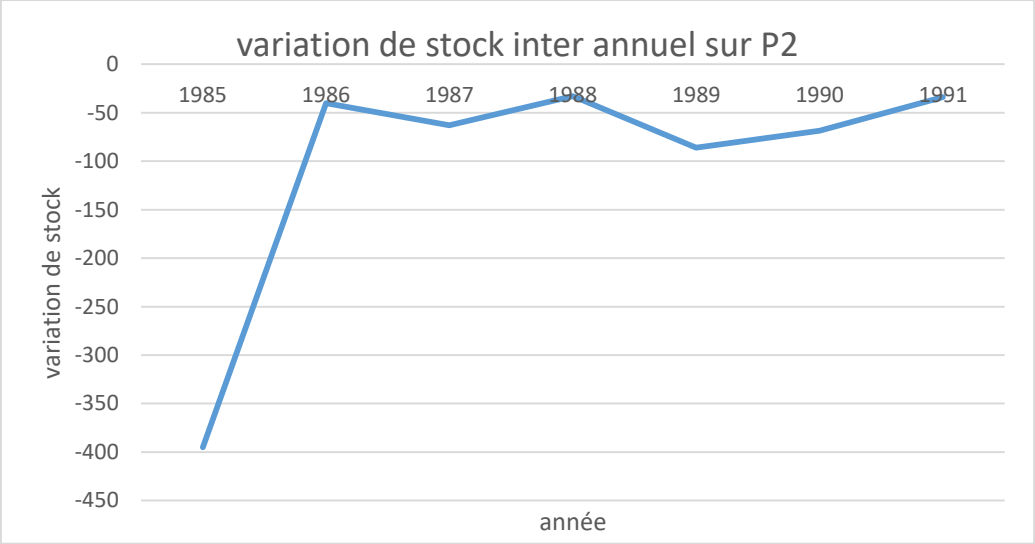


Figure 14 : Variation de stock d'eau inter annuelle dans le bassin du fleuve MONO sur la période P2 de 1985 à 1991

La figure 14 présente l'évolution de variation de stock d'eau inter annuelle sur la période P2 de validation.

Il ressort de l'analyse de la figure, que la variation de stock sur chaque année de la période P2 est négative surtout au niveau de l'année 1985 où on atteint jusqu'à -395mm. L'année 1988 représente sur cette période l'année où la variation est la plus petite (-33 mm) ce qui pourrait se justifier par l'installation du barrage de Nangbeto en 1987 sur le fleuve qui avec les lâchers d'eau modifie la réponse hydrologique.

2.2.2 Données de WaPOR

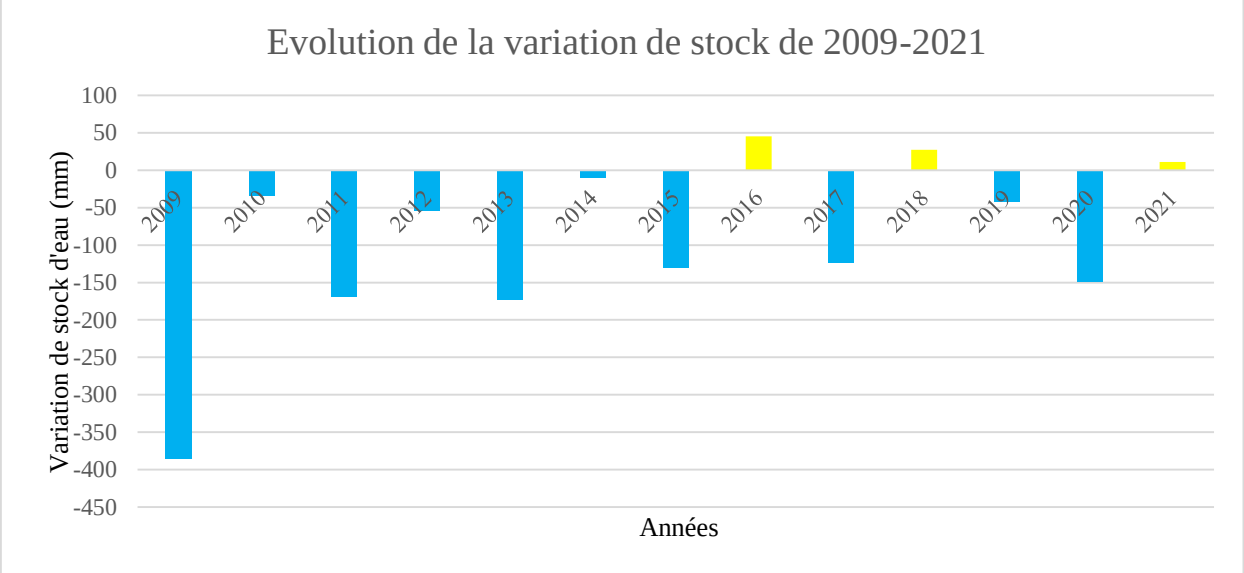


Figure 15 : Variation de stock d'eau à l'aide des données de WaPOR sur P3

La figure 15 présente l'évolution de la variation de stock d'eau inter annuelle de 2009 à 2021.

De l'analyse de ce graphe on remarque que sur l'ensemble de la période choisie la variation de stock est négative à l'exception de trois années 2016(45.25mm), 2018(26.99mm) et 2021(10.98mm) ou elle est positive. En année moyenne la variation reste cependant négatif (-92mm.)

2.3 Comparaison de l'évolution de l'évapotranspiration et des précipitations avec la variation de stock

2.3.1 Evolution de la précipitation et de la variation de stock

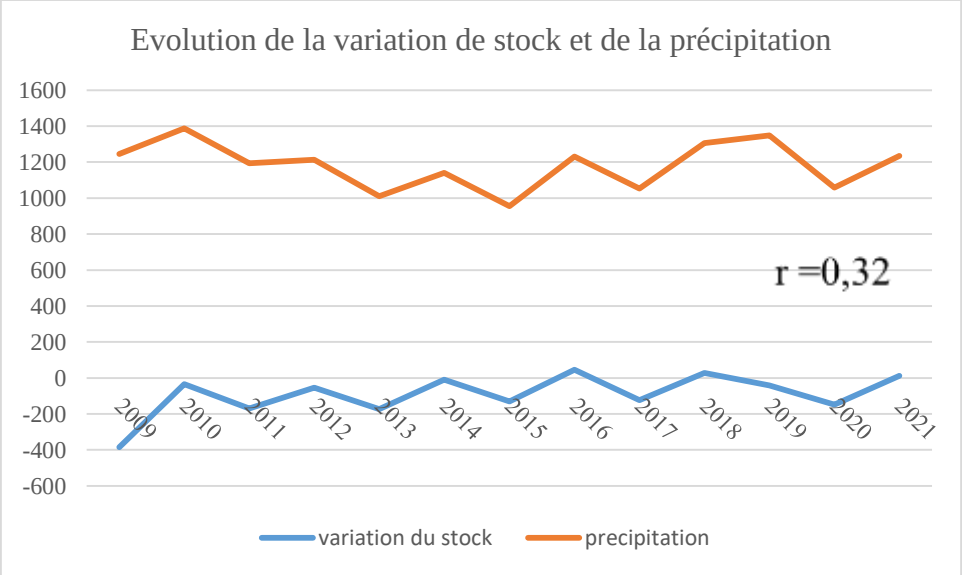


Figure 16 : Evolution de la précipitation et de la variation de stock

L'analyse de la figure ci dessus montre que lorsque la précipitation augmente la variation de stock a tendance à augmenter aussi. Autrement dit, la variation de stock est proportionnelle à la précipitation. De plus, le coefficient de corrélation étant égale à 0.32 donc positif alors ceci justifie que la variation de stock varie proportionnellement en fonction de la précipitation.

2.3.2 Evolution de l'évapotranspiration réelle et de la variation de stock

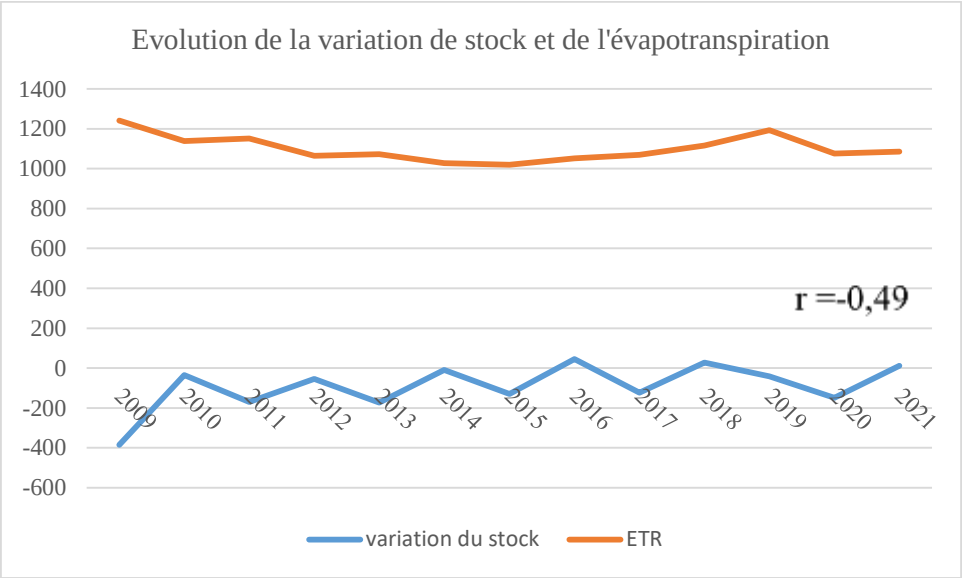


Figure 17 : Evolution de la variation de stock et de l'évapotranspiration réelle

L'analyse de la figure ci-dessus montre que lorsque la courbe de variation de stock diminue, la courbe représentant l'évapotranspiration réelle augmente. De plus, le calcul du coefficient de corrélation donne une valeur négative étant égale à -0.49. Ceci justifie une évolution inverse entre la variation de stock et l'évapotranspiration réelle.

DISCUSSION

A la fin de l'étude, on constate que la première hypothèse qui avançait que la variation de stock sur l'ensemble des périodes observées serait négative est justifiée. En effet, sur l'ensemble des différentes périodes P1, P2 et P3 étudiées, les résultats approximatifs du calcul de la variation de stock d'eau ont été respectivement de -63mm, -102mm et -92mm.

De ce fait, à la question de savoir comment évolue la variation du stock d'eau dans le MONO dans le temps on peut répondre qu'elle évolue négativement au point de rendre le bassin comme un bassin consommateur d'eau de façon général. Effectivement, le bassin du MONO durant les dernières décennies à subit un impact anthropique justifiant son statut de bassin consommateur et non celui de générateur si la variation de stock avait été positive. Nous pouvons citer comme exemple l'aménagement du barrage de Nangbeto, mis en eau en septembre 1987, et dont les lâchers d'eau en saison sèche ont transformé le régime hydrologique à la station d'Athiémé en un « régime artificiel » qui constitue une retenue d'eau et une source d'exploitation dans différents secteurs pour satisfaire les besoins humains en eau (AMOUSSOU, 2010). Cependant, il faut rappeler que sur certaines années prises individuellement (2016, 2018 et 2021) le bassin a eu un statut de bassin générateur d'eau du fait d'une variation de stock d'eau positive.

Par ailleurs, selon AMOUSSOU (2010), un lac de retenue devrait entraîner une augmentation de l'évaporation. A cet effet, on peut donc dire qu'effectivement la sollicitation croissante de l'eau pour l'irrigation à travers le barrage de Nangbeto affecte la variation du stock d'eau. En effet, il existe une corrélation négative entre la variation de stock d'eau et l'évaporation qui implique que l'évolution de la variation de stock d'eau est proportionnellement inverse à celle de l'évapotranspiration réelle. Aussi, selon AMOUSSOU et al. (2012) les décennies 70 et 80 sont des périodes dites de sécheresse du fait d'une succession de décennies déficitaires de pluie. Cette sécheresse a induit, avec une amplification, des déficits des écoulements de surface et de recharge. Nos résultats justifient alors ses conclusions du fait d'une variation de stockage négative durant les années 70 et 80 sur le bassin versant du MONO. De plus, l'hypothèse de corrélation entre précipitations et variation du stock étant elle aussi justifiée (corrélation positive traduisant l'évolution proportionnelle de la variation de stock d'eau par rapport aux précipitations), implique que la détermination d'une variation de stock négative donnant au bassin un statut de consommateur d'eau est aussi en fonction de la baisse des précipitations sur le bassin.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

I. CONCLUSION GENERALE

Le bassin du fleuve MONO, très anthropisé fait constamment face à une variation des relations pluie/débit et du régime hydrologique suite à la construction du barrage de Nangbeto et aux changements climatiques (la hausse et la baisse des précipitations) ainsi qu'à l'évapotranspiration due à une sollicitation croissante de l'eau pour l'irrigation ce qui influence la gestion de la ressource. La connaissance de la variation du stock fournit une évaluation quantitative de la ressource, et contribue de ce fait à une bonne gestion des ressources en eau. Etablir la dynamique de la variation de stock d'eau dans le bassin versant du MONO a permis d'évaluer les composantes du bilan hydrologique spécifiquement la variation du stock d'eau sur différentes échelles temporelles à partir d'observation satellitaires et in situ en se basant sur le modèle hydrologique pluie-débit GR4J et ainsi de participer au projet « (IREE-Mono) » qui vise la régénération du bassin par le suivi et l'évaluation des connaissances quantitatives sur ce bassin.. La détermination de la variation du stock s'est basée d'abord sur le calage (P1 de 1970 à 1975 avec l'année 1969 de mise en route) puis la validation (P2 de 1985 à 1991) du modèle GR4J avec les données in situ et sur la simulation suivant les mêmes paramètres avec les données satellitaires de WaPOR (P3 de 2009 à 2021). Ensuite, une comparaison des débits simulés et ceux observés pour la validation du modèle selon les différents critères Nash et R^2 d'une part et l'établissement du bilan hydrologique sur les différentes périodes en année moyenne puis inter annuelle d'autre part. Enfin la vérification d'une corrélation entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle par rapport à la variation du stock d'eau. L'analyse des résultats montre que le modèle GR4J est acceptable et permet d'établir un bilan hydrologique représentatif. Suite au calcul inter annuelle de la variation de stock d'eau sur le MONO, on obtient trois années (2016, 2018 et 2021) où la variation est positive conférant au bassin un statut de bassin générateur d'eau. Cependant, en année moyenne, la variation de stock d'eau sur les périodes P1, P2 et P3 reste négatif faisant du bassin un bassin consommateur due à l'augmentation de l'évapotranspiration (avec corrélation négative) et à la diminution de la précipitation (avec une corrélation positive) qui justifie l'obtention de la variation de stock négative.

De nombreuses perspectives se dégagent de ces travaux.

La modélisation et l'établissement du bilan hydrologique à l'échelle temporelle à partir d'observation satellitaires et in situ ont été faite avec le modèle GR4J. Il serait donc intéressant d'appliquer cette méthode en utilisant d'autres modèles hydrologiques tels que le GR2M ou encore le HBV ou d'autres modèles.

Aussi, il serait intéressant d'étudier la variation spatiale du stock d'eau dans ce même bassin tout en tenant en compte de l'influence exercée par les caractéristiques des sols et de la végétation présente.

De plus, il serait pertinent d'étendre cette étude à d'autres bassins versants du Bénin ou même à des régions similaires dans d'autres pays. Cela permettrait de comparer les résultats et de mieux comprendre les facteurs communs et spécifiques à chaque bassin versant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Akoègninou A. E., (1984). Contribution à l'étude botanique des îlots de forêts denses semi-décidues en République Populaire du Bénin. Thèse de Doctorat de 3ème cycle d'Ecologie tropicale. Université de Bordeaux III, France, 250 p ;

Akoegninou A., (2001). De l'étude des formations végétales des sites constitutifs de réserves biologiques dans les zones humides du Sud Bénin. MAB/CBRST. 22p + annexes;

Akpagana K., (1989). Recherche sur les forêts denses humides du Togo. Thèse de Doctorat, Bibliographie - 289 - UFR Aménag. et Res. Nat., Université de Bordeaux III, 181 p + annexes ;

Ambroise, Bruno, (1998) "La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - processus, facteurs, modèles," GéoProdig, portail d'information géographique, http://geoprodig.cnrs.fr/items/show/31018;

Amoussou E., (2003). Dynamique hydro-sédimentaire et mutations des écosystèmes du ''lac'' Ahémé. Mémoire de maîtrise, DGAT/ FLASH/ UAC, 103 p;

Amoussou E., (2003). Dynamique hydro-sédimentaire et mutations des écosystèmes du ''lac'' Ahémé. Mémoire de maîtrise, DGAT/ FLASH/ UAC, 103 p;

Amoussou E., Camberlin P. et Mahé G, (2012). Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest) ; Hydrological Sciences Journal ; 57 (4), 805–817 ;

Amoussou E., Camberlin P. et Mahé G., (2012) : Impact de la variabilité climatique et du barrage de Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo au Bénin. In « Hydrological Sciences Journal », Vol.57, Issue 4, pp 805-817;

Amoussou E., Camberlin P., Totin Vodounon S.H., Tramblay Yves, Houndenou C., Mahé Gil, Paturel Jean-Emmanuel, Boko M. (2014). Evolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du Mono (Bénin-Togo) en contexte de variabilité/changement Climat : système et interactions ;

Amoussou E., TOTIN H., Vissin E. W., MAHE G., Houndénou M., (2015). Modélisation pluie débit pour la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) de surface dans le bassin-versant de la volta au Bénin. Revue de géographie du laboratoire Leîdi 13, 282-296;

Amoussou E., Tramblay Y., Totin V. S. H., Mahé G. et Camberlin P.,(2014). Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono (Togo/Bénin). Hydrological Sciences Journal, DOI :1080/02626667.2013.871015. II;

Amoussou E., Tramblay Yves, Totin H. S. V., Mahé Gil; Camberlin P. (2014) ; Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Benin) ;

Amoussou, E. (2010) : Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat unique, Université de Bourgogne, Dijon, France, CRC-CNRS UMR5210, 313 p ;

Amoussou, E. (2015). Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie- débit. Fondation Maison Des Sciences de l'homme, FMSH-WP-20, 1–27. Retrieved from http://www.fmsh.fr;

Banque Mondiale, (1992). Rapport sur le développement dans le monde. Le développement et l'environnement. Indicateurs du développement dans le monde. Colloque Banque internationale pour la reconstitution et le développement. Washington, 299 p ;

Bravard J.P et Petit F., Les cours d'eau : dynamique du système fluvial, 2e éd, (2000), 192 P ;

Djan'na Koubodana Houteta, (2020).Modeling The Impacts Of Climate Change, Land Use And Dam Management On Water Resources In Waest Africa: Case Of The Mono River Basin, Togo-Benin Sgrp/Ccwr/Ine/Wascal;
Edijatno Nascimento N. O., Yang X., Makhlouf Z. & Michel C., (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2), 263-277;
Ernest Amoussou,(2015). ; Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit ;
Evi Guy-Roland Attey, Naga Coulibaly, Ismaïla Ouattara, Issiaka Savané ; Estimation des débits et du volume d'eau d'un Bassin Versant à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques dans la partie sud de la Région Du Bélier (Côte d'Ivoire) ;
FAO. (2020). WaPOR database methodology: Version 2 release, April 2020. Rome;
Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1982). Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Div. 108, 225–230.https://doi.org/10.3406/morfo.1996.878;
Klassou S. K. D., (1996). Evolution climato-hydrologique récente et conséquences sur l'environnement : l'exemple du bassin versant du fleuve Mono (Togo-Bénin). Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III, 472 p;
Le Lay Matthieu,(2006). Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique : une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin ; INPG ;
Leiriao, S., He, X., Christiansen, L., Andersen, O. B., & Bauer-Gottwein, P. (2009). Calculation of the temporal gravity variation from spatially variable water storage change in soils and aquifers. Journal of Hydrology;
Maellis ZANOU,(2021). Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Mono, Mémoire de Master, Université d'Abomey Calavi/Institut National de l'Eau (UAC-INE) ;

Mondjannagni A.,(1969). Contribution à l'étude des paysages végétaux du Bas-Dahomey. Annales de l'université d'Abidjan - Série G - Tome I Fascicule;
Mondjannagni C. A., (1977). Campagnes et villes au sud de la R.P.B. Thèse, édition Mouton Bibliographie - 302 - Paris 614 p ;
Musy A et Higy C, (2004). Hydrologie, une science de la nature, PPUR, 314 P.
Nascimento, N. O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de doctorat, CERGRENE/ENPC. Paris : 550 p;
Nzanzu Reagan R. M., (2011). Caractéristisation et évaluation de la dynamique érosive du bassin versant de Vihuli en RDC, Université Catholique du Graben RDC, Science agroéconomique.
PCCP, 2008. PROGRAMME PCCP -From Potential Conflict to Cooperation Potential: cas du basin du Mono (Togo-Bénin). Lomé-Togo;
Perrin C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG, Grénoble, France, 530 p;
Perrin, C. (2000). Vers un modèle global d'écoulement de pluie amélioré. Hydrologie Institut National Polytechnique de Grenoble - France, 28p;
Perrin, C., Michel, C. and Andreassian, V., (2003).. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology279:275–289;
Pierre Chevallier.(1991). La dynamique de l'eau • January Article ;
Rindra Annie Randrianasolo.(2009) ; Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues ; Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie ;
Rossi G., (1984). L'évolution bioclimatique actuelle de la région des plateaux (Sud-Ouest du Togo). Rev. Géom. Dyn. T. XXXIII, n° 2, pp 57-72;

Rossi George.(1996). L'impact des barrages de la vallée du Mono (Togo-Benin), la gestion de l'incertitude, Géomorphologie : relief, processus, environnement ;; 2 (2), 55–68. ;
Tchamié K. T., (1988). Contribution à l'étude des savanes du Togo central (zone écologique II). Thèse de Doctorat. Inst. De Géog. Et d'Etudes Régionales, Univ. de Bordeaux II, 297 p.

ANNEXE

Tableau 5 : Bilan hydrologique à base des données in situ

Années	Précipitations (mm)	ETR	Variation du stock d'eau	Débit
1970	1243,768431	1198,0882	-120,990282	166,670513
1971	1186,238891	1156,33836	-90,78153606	120,682067
1972	1184,003876	1158,10029	-74,75285612	100,656438
1973	1232,531016	1152,82724	-17,42238402	97,1261625
1974	1088,738704	1065,44268	-58,80085687	82,0968788
1975	1216,185064	1121,50626	-16,07497258	110,753777
1985	1031,140282	1250,9555	-394,976	175,160782
1986	1270,298106	1160,9422	-40,1165	149,472492
1987	1217,822384	1162,2215	-62,829	118,430129
1988	1328,929485	1188,8317	-32,96	173,060746
1989	1273,117195	1195,79838	-86,1	163,421103
1990	1217,822384	1166,55277	-68,7	119,977435
1991	1328,929485	1189,41825	-33,836	173,347384

Tableau 6 : Bilan hydrologique à base des données WaPOR

Années	Précipitations (mm)	ETR(mm)	Variation du stock d'eau(mm)	Débit(mm)
2009	1244,566667	1240,93435	-384,8125663	388,444883
2010	1388,15	1138,48024	-34,88811324	284,55787
2011	1193,433333	1150,90612	-169,5751706	212,102387
2012	1212,383333	1064,00869	-54,69317631	203,067819
2013	1010,816667	1072,9459	-173,8129435	111,683706
2014	1140,883333	1028,25181	-9,527919989	122,159444
2015	955,6666667	1019,74097	-130,3911834	66,3168829
2016	1231,116667	1051,38697	45,25035603	134,479342
2017	1052,616667	1068,88192	-123,2719703	107,006717
2018	1306,033333	1115,91664	27	163,125078
2019	1348,65	1192,5478	-42,03873627	198,140932
2020	1058,683333	1076,30964	-149,2226099	131,596302
2021	1233,983333	1085,44162	10,98380364	137,55791