

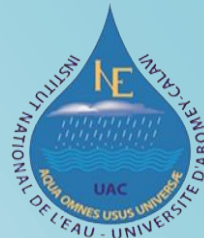


UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

NOUTAI DJEMESSI RODOLPHE

Pour l'obtention du diplôme de

Master Professionnel en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

CARACTERISATION ET MODELISATION DE LA
PROPAGATION DES CRUES EN AVAL DU BARRAGE
HYDRO-ELECTRIQUE DE NANGBETO

=====

Soutenu le : 27/12/2023

Mention : TRES BIEN

Membre du Jury :

Président : Prof. Agnidé Emmanuel LAWIN

Membres : 1- Dr Arnaud Yémalin ZANNOU

2- Dr Audace DOSSOU OLORY

3- Dr Rita HOUNGUE

Sous la supervision du :

Professeur Agnidé Emmanuel LAWIN

Enseignant-chercheur à l'INE/UAC

Professeur Titulaire des Universités du CAMES

Sous l'encadrement du :

Docteur Arnaud Yémalin ZANNOU

Enseignant-chercheur à l'Université
d'Abomey-Calavi

Maître de stage :

Docteur Rita HOUNGUE

Enseignante-Chercheure à l'INE/UAC



Certification

Nous certifions que le présent mémoire a été réalisé et soutenu par l'auteur le mercredi 27 décembre 2023, devant un jury composé de : Prof. Agnidé Emmanuel LAWIN (président du jury) ; Dr. Arnaud Yémalin ZANNOU (examineur) ; Dr. Audace DOSSOU OLORY (examineur) ; et Dr. Rita HOUNGUE (rapporteuse). Toutes les corrections exigées pour améliorer la qualité scientifique de cette étude portant sur le thème « **Caractérisation et modélisation de la propagation des crues en aval du barrage hydro-électrique de Nangbéto sur le fleuve Mono** » ont été prises en compte.

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

Signatures :

Président du jury :

Professeur Agnidé Emmanuel LAWIN
Enseignant-chercheur à l'INE/UAC
Professeur Titulaire des Universités du CAMES

Examineur 1 :

Docteur Arnaud Yémalin ZANNOU
Enseignant-chercheur à l'Université
d'Abomey-Calavi

Examineur 2 :

Docteur Audace DOSSOU OLORY
Enseignant-chercheur à l'Université
d'Abomey-Calavi

Rapporteuse :

Docteur Rita HOUNGUE
Enseignante-Chercheuse à l'Université d'Abomey-Calavi

Dédicace

A ma très chère mère FASSINOUE Philomène

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance envers Dieu, le Créateur tout-puissant, source de toute connaissance et maître de toute intelligence. Je remercie le Seigneur de l'univers visible et invisible qui m'a accordé le souffle de vie.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude au Professeur Agnidé Emmanuel LAWIN, enseignant-chercheur à l'Université d'Abomey-Calavi, pour avoir généreusement accepté de superviser ce mémoire, malgré ses multiples engagements professionnels. Son soutien dévoué aux étudiants de l'INE, en particulier ceux spécialisés en hydrologie quantitative, témoigne de son engagement exceptionnel envers l'avancement académique et professionnel de ses étudiants.

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude au Docteur Arnaud Yémalin ZANNOU, enseignant à l'Université d'Abomey-Calavi, hydrologue et expert senior GIRE. Sa bienveillance à accepter de me guider dans l'élaboration de ce mémoire, malgré ses multiples engagements, témoigne de son dévouement exceptionnel envers le développement et l'enseignement. Je le remercie sincèrement pour l'attention accordée et le temps précieux qu'il a consacré à ce projet de recherche.

Je souhaite exprimer un sincère remerciement au Docteur Rita HOUNGUE, enseignante-chercheuse à l'Université d'Abomey-Calavi, pour son encadrement attentif tout au long de la rédaction de ce mémoire. Sa disponibilité, son apport technique, son soutien financier et ses conseils précieux ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. Je la remercie sincèrement pour son engagement et sa contribution significative à mon parcours académique.

Mes remerciements vont également au Dr Jean HOUNKPE, au Dr Jonas N'tcha M'PO, Dr Audace DOSSOU OLORY, pour l'inspiration dont j'ai bénéficié. Je remercie également Monsieur Tchakpala Essossinam Matonzibiyou ALFA et Monsieur Razack ZINGUI pour leur appui technique.

Un remerciement spécial à mon cher ami David GNAVE pour sa présence pendant les moments les plus difficiles de cette rédaction. Merci infiniment pour ton amitié. J'oublie pas mes camarades de master et tous les étudiants de l'Institut National de l'Eau (INE) pour leur attention et les moments de partage.

À ma chère maman, Philomène FASSINO, à mes frères particulièrement, qui a mis tout en œuvre afin de favoriser mon ascension intellectuelle.

A toutes les personnes qui ont eu confiance en moi et m'ont soutenu moralement et financièrement pendant cette période de formation.

Résumé

Les inondations récurrentes en aval du barrage de Nangbéto représentent un défi économique majeur pour les deux nations partageant le bassin, en particulier le Bénin. L'objectif de cette étude est de caractériser et modéliser la propagation des crues en aval du barrage de Nangbéto afin de proposer un schéma simple de prévision des crues. En utilisant des données de débits journaliers et topographiques (SRTM), la méthodologie intègre une analyse dynamique des crues à l'aide d'algorithmes Python et la création d'un modèle hydraulique HEC-RAS. Les résultats mettent en évidence une sous-performance du barrage lors des crues extrêmes. Le modèle développé démontre une performance qualitative et quantitative remarquable avec des critères de performance acceptables, bien que des sous-estimations des valeurs extrêmes soient observées. La modélisation des écoulements identifie deux grandes zones à risques de débordements, essentielles pour la prise de décision stratégique et la mise en place de mesures d'atténuation. Les zones touchées comprennent notamment les communes de Djakotomey, Dogbo et Athiémé du côté du Bénin, ainsi que la commune Yoto du côté du Togo. Ces résultats mettent en lumière des données importantes pour une gestion proactive des inondations dans la basse vallée du Mono, soulignant l'importance du développement d'outils numériques innovants pour la planification et la gestion du barrage de Nangbéto, ainsi que l'atténuation des risques liés aux changements climatiques dans la région. Les résultats ont permis de proposer un Plan de Prévision des Risques d'Inondation (PPRI) qui permet de prédire en temps réel les crues à Athiémé et de cartographier les inondations dans la vallée du Mono. Il est souhaitable d'approfondir la recherche sur les meilleures pratiques pour l'optimisation des opérations de lâcher d'eau du barrage. Explorer les méthodes pour équilibrer la rétention d'eau pour la production d'énergie tout en minimisant les risques d'inondation en aval. D'autres actions d'aménagement peuvent être entreprises pour renforcer la résilience de la région face à ces défis hydrologiques récurrents.

Mots-clés : Barrage ; Inondation ; Changements Climatiques ; HEC-RAS ; Modélisation hydraulique

Abstract

The recurrent floods downstream of the Nangbéto dam pose a major economic challenge for the two nations sharing the basin, particularly Benin. The aim of this study is to characterize and model flood propagation downstream of the Nangbéto dam to propose a simple flood forecasting scheme. Utilizing daily flow data and topographical data (SRTM), the methodology integrates dynamic flood analysis using Python algorithms and the development of an HEC-RAS hydraulic model. Results highlight underperformance of the dam during extreme floods. The developed model demonstrates remarkable qualitative and quantitative performance with acceptable performance criteria, although underestimations of extreme values are observed. Flow modeling identifies two major overflow risk zones, crucial for strategic decision-making and implementation of mitigation measures. Affected areas include the Djakotomey, Dogbo, and Athiémé communes on the Benin side, as well as the Yoto commune on the Togo side. These findings underscore significant data for proactive flood management in the lower Mono valley, emphasizing the importance of developing innovative digital tools for Nangbéto dam planning and management, as well as climate change risk mitigation in the region. The results have led to the proposal of a Flood Risk Forecasting Plan (FRFP) to predict real-time floods in Athiémé and map floods in the Mono valley. Further research into best practices for optimizing dam water release operations is desirable. Exploring methods to balance water retention for energy production while minimizing downstream flood risks is crucial. Additional development actions can be taken to enhance the region's resilience against these recurrent hydrological challenges.

Keywords: Dam; Flood; Climate Change; HEC-RAS; Modeling

Sommaire

Dédicace	3
Remerciements	4
Résumé	5
Abstract	6
Sommaire	7
Liste des sigles et acronymes	9
Liste des tableaux	10
Liste des figures	11
Liste des photos	12
1. Introduction générale	14
1.1. Contexte et justification de l'étude	14
1.2. Revue de littérature	15
1.3. But de la recherche	25
1.4. Problème et questions de recherche	25
1.5. Objectifs du mémoire	26
1.6. Hypothèses de recherche	26
1.7. Limites de l'étude	26
1.8. Résultats attendus de l'étude et cibles	26
1.9. Intérêt de l'étude	27
1.10. Grandes divisions du mémoire	27
2. Chapitre 1 : Présentation du milieu d'étude	29
2.1. Introduction	29
2.2. Situation géographique du milieu d'étude	29
2.3. Hydrologie du bassin versant du Mono	30
2.4. Hydrogéologie du bassin de Mono	32
2.5. Les reliefs du bassin versant du Mono	33
2.6. Sols	34
2.7. Les différents types de végétation en aval du barrage de Nangbéto	34
2.8. Hydrographie	35
Conclusion partielle	37

3.	Chapitre 2 : Données, outils et méthodes.....	39
3.1.	Introduction.....	39
3.2.	Données utilisées	39
3.3.	Méthodologie de traitement des données	39
3.4.	Conclusion partielle.....	48
4.	Chapitre 3 : Résultats et discussion.....	50
4.1.	Introduction.....	50
4.2.	Caractérisation de la variabilité des événements hydro-climatiques en aval du barrage de Nangbéto	50
4.3.	Modélisation de la propagation des crues	55
4.4.	Proposition d'un PPRI.....	62
5.	Discussion	66
6.	Conclusion générale et perspectives	68
7.	Table des matières.....	69
8.	Références bibliographiques	72
9.	Annexes.....	76
9.1.	Annexes I : Code python pour l'analyse des données.....	76
9.2.	Annexe II : Modelisation.....	77

Liste des sigles et acronymes

ABM	:	Autorité du Bassin du Mono
AP	:	Aire Protégée
CEB	:	Communauté d'électricité Béninoise
DGEau	:	Direction Générale de l'Eau
FEM	:	Fonds pour l'Environnement Mondial
GEV	:	Generalized Extreme Value
GIEC	:	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIRE	:	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
HEC-RAS	:	Hydrologic Engineering Center-River Analysis System
IGN	:	Institut National de la Géographie
INE	:	Institut National de l'Eau
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
PNUD	:	Programme des Nations Unies pour le Développement
PPRI	:	Plan de Prévention des Risques d'Inondation
SAP	:	Système d'Alerte Précoce
TIN	:	Triangulated Irregular Network

Liste des tableaux

Tableau 1 : Séquence d'érodibilité mécanique des roches d'après leurs propriétés physiques dans le bassin du Mono.....	32
Tableau 2 : Caractéristiques physiographiques du bassin versant du Mono	36
Tableau 3 : Critères de performances en calage	57
Tableau 4 : Critères de performances en calage des cotes	58
Tableau 5 : Critères de performances en validation	59
Tableau 6 : Critères de performances en validation des cotes	60
Tableau 7 : Les niveaux d'alerte suivant le fleuve mono à Athiémé	63

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique des lits mineur, moyen et majeur en pleine alluviale.....	16
Figure 2 : Schématisation de processus de genèse des crues	17
Figure 3 : Illustration du concept d'un risque.....	19
Figure 4 : Localisation de la zone d'étude et de l'emplacement du barrage de Nangbéto	29
Figure 5 : Carte des grandes zones climatiques du Bassin du Mono	31
Figure 6 : Bilan hydrique mensuel dans le bassin	32
Figure 7 : Carte des grands ensembles géologiques du Mono	33
Figure 8 : Carte des sols du bassin versant du Mono	34
Figure 9 : Carte des grands ensembles de paysage du Bassin du Mono	35
Figure 10 : Carte du réseau hydrographique du fleuve Mono	36
Figure 11 : Vue de face d'un écoulement.....	41
Figure 12 : Les années de grande inondation	48
Figure 13 : Variation des intra-annuels des débits maximaux avant et après l'installation du barrage de Nangbéto à la station d'Athiémé	50
Figure 14 : Variation des débits moyens journaliers à Athiémé.....	51
Figure 15 : Variation des débits maximaux journaliers à Athiémé	52
Figure 16 : Pourcentage du volume annuel des apports dans le barrage de Nangbéto	53
Figure 17 : Comparaison des débits entrants et des débits sortants du barrage de Nangbéto	53
Figure 18 : Comparaison des débits maximaux sortant du barrage et des débits maximaux à Athiémé	54
Figure 19 : Disponibilité des données sur les différentes stations.....	55
Figure 20 : Visualisation des débits observés et simulés en calage à Nangbéto	55
Figure 21 : Visualisation des débits observés et simulés en calage à Tététou.....	56
Figure 22 : Visualisation des débits observés et Simulés en calage à Athiémé	56
Figure 23 : Visualisation des cotes en calage à Athiémé.....	57
Figure 24 : Visualisation des débits observés et simulés en validation à Nangbéto ..	58
Figure 25 : Visualisation des débits observés et Simulés en validation à Tététou	59
Figure 26 : Visualisation des débits observés et simulés en validation à Athiémé ...	59
Figure 27 : Visualisation des cotes en validation à Athiémé.....	60
Figure 28 : Cartes des zones à risques de débordement considérant les évènements de 2010 et 2019	61
Figure 29 : Graphique des courbes de propagation des débits entre Nangbéto et Athiémé.....	63
Figure 30 : Description du schéma de prévision	64

Liste des photos

Photo 1 : Images des inondations au Bénin	20
Photo 2 : Images des inondations dans la ville de Cotonou.....	21
Photo 3 : Images des biens et infrastructures touchés à Athiémé et Grand-Popo	22
Photo 4 : Capture d'écran du maillage de la zone d'étude.	44

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction générale

1.1. Contexte et justification de l'étude

En Afrique, les catastrophes climatiques sont indéniables alors que les stratégies d'adaptation sont peu développées. Des centaines voire des milliers de victimes sont annoncées chaque année durant la saison des pluies pour ce qui est des inondations. Ces dernières sont des catastrophes naturelles auxquelles l'humanité est confrontée de nos jours et qui touchent plusieurs régions avec des dommages considérables.¹ En Afrique de l'Ouest, les inondations sont prédominantes en raison des changements climatiques mondiaux et de l'utilisation des terres.² Au Bénin comme dans la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest, l'ampleur, la fréquence et les dégâts occasionnés par les inondations ces dernières années, entraînent des effets de plus en plus dévastateurs.³ Les pertes encourues par ces dommages sont énormes et représentent un défi majeur pour les économies.

Au Bénin comme au Togo, les cours d'eau sont particulièrement attractifs pour les populations du fait de la diversité des activités économiques qu'ils favorisent.⁴ Dans le bassin du Mono, partagé par les deux pays et drainé par le fleuve Mono, les riverains développent plusieurs activités économiques locales dont la production agricole, l'irrigation, la pêche, la saliculture, la pisciculture, l'élevage, les transports et le tourisme. Afin de mieux gérer et tirer meilleurs profits des ressources naturelles, les deux nations frontalières ont décidé de construire un barrage hydroélectrique sur le fleuve. L'objectif de cet ouvrage est de fournir de l'énergie électrique aux populations, d'irriguer 43 000 hectares de terres agricoles et de réguler le débit du fleuve Mono dans la basse vallée du bassin versant.⁵

Après la mise en exploitation du barrage en septembre 1987, les populations sont de plus en plus exposées aux événements de précipitations extrêmes induisant des inondations de plus en plus récurrentes dans un environnement où on assiste à une croissance démographique galopante.⁶ La récurrence d'anomalies extrêmes des précipitations entraînant des inondations est une composante normale de la variabilité naturelle du climat.⁷ En effet, le barrage hydroélectrique de Nangbéto, construit initialement pour produire de l'électricité, est devenu source des catastrophes d'inondation avec des dégâts de grande ampleur. La construction du barrage a des répercussions complexes et cruciales sur le débit, impactant ainsi la gestion des ressources en eau dans le bassin du Mono.⁸

Au vu de ces événements désastreux enregistrés presque chaque année en aval du barrage de Nangbéto dans un contexte des changements climatiques, il est impérieux de trouver un plan de gestion et d'adaptation pour garantir l'avenir et la sécurité de la population riveraine. Pour ce faire, il importe de mieux comprendre l'occurrence des

crues à l'aval du barrage et les effets l'influençant, le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Mono afin de réduire les impacts sur les populations.

C'est pourquoi le présent mémoire porte sur le thème : « **Caractérisation et modélisation de la propagation de crues à l'aval du barrage hydro-électrique de Nangbéto** ». Il vise à améliorer la gestion de barrage hydroélectrique et à renforcer la résilience des communautés vivant en aval du barrage en fournissant un outil d'évaluation et de prévision en temps réel des crues exceptionnelles. L'utilisation d'un modèle mathématique d'écoulement en régime transitoire est l'une des meilleures approches scientifiques d'évaluation des différents scénarios d'écoulement en régime non permanent. En utilisant des outils et des modèles hydrologiques avancés, ce travail permettra de mieux gérer les inondations et de minimiser les impacts négatifs sur les populations vivant en aval du barrage, les activités qui s'y déroulent et les infrastructures qui s'y trouvent.

1.2. Revue de littérature

1.2.1. Généralités sur les inondations

Considérée comme l'un des principaux risques naturels mondiaux, l'inondation est une submersion temporaire, qu'elle soit d'origine naturelle ou artificielle, d'un espace par de l'eau liquide. On recense divers types d'inondations, à savoir :

- Inondations de plaine : elles sont caractérisées par le débordement progressif de la rivière hors de son lit mineur, pouvant entraîner une inondation prolongée de la plaine.
- Inondations par remontée de nappe : elles sont observées lorsqu'une série d'années humides provoque une élévation continue du niveau d'étiage de la nappe. La recharge annuelle de la nappe par les pluies excède sa vidange naturelle, conduisant à une montée du niveau de la nappe et à une inondation lente, persistante sur plusieurs mois.
- Inondations par crue torrentielle : survenant lors de fortes précipitations, telles que des orages, provoquant un ruissellement rapide et concentré dans le cours d'eau, entraînant des crues soudaines et violentes.
- Inondations par ruissellement : l'urbanisation et certaines pratiques agricoles réduisent l'infiltration des sols, favorisant le ruissellement. En milieu urbain ou péri-urbain, cela peut entraîner le débordement des réseaux d'assainissement des eaux pluviales, tandis qu'en zone rurale, le risque de coulées boueuses est accru.

L'inondation se présente comme un événement ponctuel susceptible d'immerger d'importantes portions du lit majeur ou de la plaine, conséquence directe d'une crue exceptionnellement significative et du débordement des eaux.

1.2.1.1. La crue

La crue se manifeste par une augmentation significative du débit et de la hauteur d'eau dans le cours d'un fleuve, d'une rivière ou d'un cours d'eau. Cet événement exceptionnel peut survenir à tout moment, et on distingue divers types de crues, telles que saisonnières, annuelles, décennales, centennales, etc. Généralement déclenchée par des pluies intenses en amont du bassin versant ou, de manière exceptionnelle, par la libération de nappes phréatiques suite à une fracture terrestre profonde, la crue est étroitement liée aux caractéristiques météorologiques et géomorphologiques spécifiques à chaque site.

Les crues sont un phénomène naturel historiquement suivi, et des mesures hydrauliques curatives ou préventives sont mises en place pour lutter contre leurs effets. De manière pratique, une rivière est considérée en crue lorsqu'elle déborde de son lit mineur, C'est un phénomène périodique naturel devenant exceptionnel lorsque les débits atteignent des niveaux considérables par rapport à son module, conduisant à une crue critique susceptible de causer des inondations dans la plaine alluviale.

Le terme "plaine alluviale" fait référence généralement aux zones de fond de vallée, présentant un faible dénivelé et formées par les dépôts d'alluvions lors des crues du cours d'eau. Sur le plan de l'écoulement, la plaine alluviale est souvent subdivisée en trois zones distinctes : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur de la rivière (Figure 1). Le lit mineur représente la zone d'écoulement du cours d'eau en dehors des périodes de débordement. Le lit moyen correspond à la zone d'écoulement lors de crues d'occurrences relativement modestes. Quant au lit majeur, il englobe toutes les parties de la plaine dans lesquelles le cours d'eau peut s'écouler et déborder.⁹

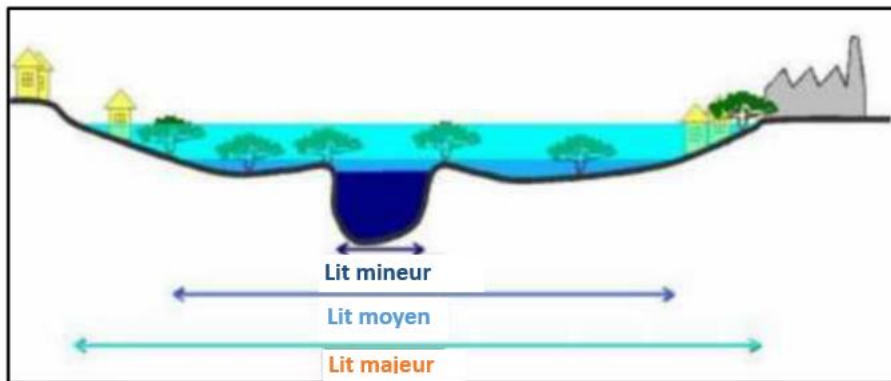


Figure 1 : Représentation schématisée des lits mineur, moyen et majeur en plaine alluviale

Source ¹⁰

La discipline scientifique chargée de l'étude des phénomènes de crue est l'hydrologie. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale, on qualifie un cours d'eau de "crue" dès que son "niveau critique de crue" est atteint en un point quelconque du tronçon amont.¹¹ Ce seuil peut être déterminé au moyen d'un limnimètre fixe. La pointe de crue se caractérise par la hauteur maximale d'eau, correspondant au débit maximal en

période de crue. Ce pic de hauteur d'eau se déplace en direction de l'aval du cours d'eau sous la forme d'une "onde de crue".¹²

La décrue est la diminution du niveau d'eau jusqu'au rétablissement de l'écoulement dans le lit mineur du cours d'eau.¹³ Lorsque ce processus débute de manière très progressive (plusieurs heures au moment de la hauteur d'eau maximale ou à proximité immédiate), on peut parler d'un "plateau de crue" plutôt que d'une pointe de crue. En hydrologie, l'ensemble du phénomène crue-décrue peut être caractérisé en un point spécifique (une section de contrôle) par un hydrogramme, où les pentes reflètent la rapidité ou la lenteur des variations. Souvent, la pointe de crue est associée à une période de retour de la crue.

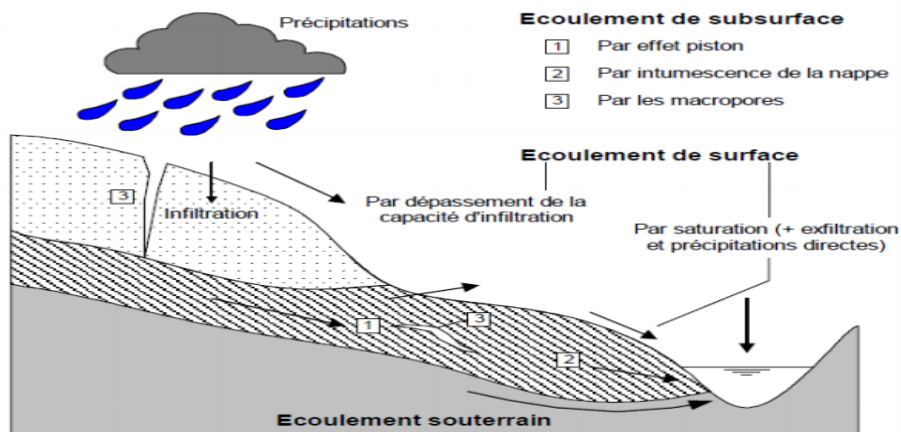


Figure 2 : Schématisation de processus de genèse des crues
Source ¹⁴

1.2.1.2. Précipitations

Dans toutes les rivières, le débit de l'eau est sujet à des fluctuations. Lors de pluies torrentielles, plusieurs paramètres influent sur le ruissellement qui atteint une rivière : la quantité, l'intensité, la durée, l'aire couverte et le trajet de la pluie. D'une part, le volume, l'intensité et la durée des précipitations affectent la capacité du sol à absorber l'eau, ce qui a un impact direct sur le ruissellement. D'autre part, l'étendue de la région couverte par la tempête et sa trajectoire déterminent la zone qui recevra la pluie, contribuant ainsi au ruissellement. Enfin, la superficie couverte et le débit du ruissellement influent sur le volume d'eau qui atteindra un point spécifique en aval de la rivière ou du cours d'eau.

1.2.1.3. Bassins versants

Un bassin versant, également appelé bassin hydrologique ou bassin versant hydrologique, est une zone géographique délimitée par des crêtes topographiques où toutes les eaux de ruissellement convergent vers un seul point appelé exutoire. C'est une unité naturelle qui recueille, stocke et transporte l'eau de pluie et de fonte des neiges vers un exutoire commun. Les limites d'un bassin versant sont déterminées par

la topographie du terrain, formant une sorte de « bassin » où les eaux de pluie s'écoulent vers un point bas.

Par ailleurs, la forme, la superficie, le type de sol et la topographie du bassin versant jouent également un rôle crucial dans la quantité d'eau qui atteint une rivière. Ces caractéristiques sont généralement constantes, mais le degré d'absorption ou de dispersion de l'eau par le sol peut varier en fonction de la couverture végétale, de la saison et de l'intensité des pluies précédentes. Le reboisement et la régénération de la végétation peuvent ralentir l'écoulement de l'eau de surface vers l'exutoire principal du bassin, prolongeant ainsi la durée du ruissellement. De plus, l'écoulement est plus lent dans les bassins qui comprennent des zones naturelles de stockage de l'eau, telles que les lacs et les marécages, ou des zones artificielles de stockage. Dans ces bassins, les crues sont généralement moins importantes que dans les bassins dépourvus de ces influences modératrices. Un exemple notable en Amérique du Nord est le fleuve Saint-Laurent, dont les eaux amont proviennent des Grands Lacs, illustrant une forte capacité de stockage naturelle.

1.2.1.4. Climat

Le climat est une caractéristique essentielle de la Terre, influençant les écosystèmes, les activités humaines et la répartition géographique des différentes espèces. Il exerce une influence significative sur la corrélation entre les précipitations et le ruissellement. Le climat englobe divers éléments atmosphériques tels que la température, l'humidité, la pression atmosphérique, les précipitations, la vitesse et la direction du vent, ainsi que d'autres caractéristiques météorologiques.

Différents types de climats existent à travers le monde, et on les classe souvent en fonction de facteurs tels que la latitude, l'altitude, la proximité des océans, et la distribution des masses continentales. Parmi les principaux types de climats, on trouve les climats équatoriaux, tropicaux, subtropicaux, tempérés, subarctiques et arctiques.

Les scientifiques utilisent des données climatiques historiques pour comprendre les tendances à long terme, prévoir les changements futurs du climat, et évaluer les impacts potentiels sur l'environnement, l'agriculture, et d'autres secteurs. Les activités humaines, en particulier les émissions de gaz à effet de serre, ont également un impact significatif sur le climat, conduisant à des préoccupations croissantes liées au changement climatique.

1.2.1.5. Notion du risque d'inondation

Le concept de risque lié aux inondations est intrinsèquement complexe, car il ne peut être défini qu'en prenant en compte simultanément un phénomène physique, en l'occurrence la présence d'eau, et une utilisation sociale de cet espace qui est affecté

par cette présence d'eau. Le risque est défini comme le résultat de deux facteurs considérés comme indépendants, à savoir l'aléa et la vulnérabilité.¹⁵

Les types de risques auxquels chacun de nous peut être exposé sont regroupés en cinq familles (risques naturels, risques technologiques, risques de transports collectifs, risques de la vie quotidienne, risques liés aux conflits). Les risques d'inondation font partie de la famille des risques naturels, considérés comme des risques majeurs. Ceux-ci peuvent être définis comme une menace sur l'homme, son environnement direct, ses installations, une menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre.

Les inondations constituent un risque majeur dans le monde contemporain, figurant au premier rang des catastrophes naturelles et causant environ 20 000 victimes par an.¹⁶ Dans la région méditerranéenne, les précipitations dépassent souvent 200 millimètres en 24 heures, parfois en moins de six heures.¹⁷

Le risque d'inondation est la « co-occurrence d'un aléa hydrographique et d'une vulnérabilité en un point géographique donné ».¹⁸ Le risque doit être analysé comme le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité (Figure 3). Dans la gestion des risques, les probabilités d'occurrence des phénomènes naturels sont appelées des aléas. Étudier les aléas consiste à caractériser ces phénomènes en fonction de leur fréquence de survenance, de leur intensité destructrice et de leur étendue. En matière d'inondation, leur intensité s'exprime principalement pour un endroit donné par la hauteur et la durée de submersion, ainsi que la vitesse du courant.

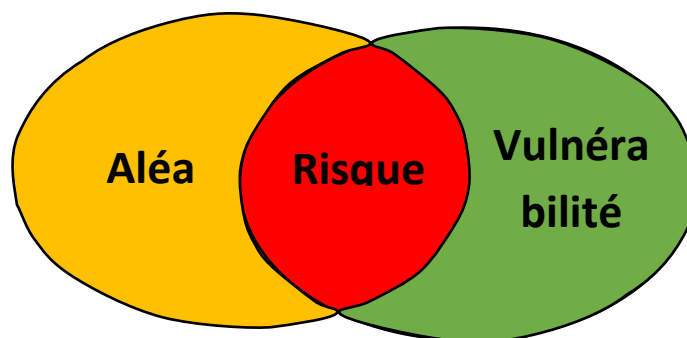


Figure 3 : Illustration du concept d'un risque

1.2.2. Inondations et enjeux socioéconomiques, humains et environnementaux

1.2.2.1. Inondation à l'échelle nationale au Bénin

Au Bénin, les inondations sont un problème récurrent qui touchent différentes régions du pays, mettant en péril la vie quotidienne des populations ainsi que les activités économiques. Les débordements des cours d'eau majeurs, tels que le fleuve Niger au nord, l'Okpara au centre et le lac Nokoué au sud, sont des facteurs majeurs contribuant à ces catastrophes.

Dans la partie septentrionale du Bénin, les fortes pluies ont provoqué la montée des eaux du fleuve Niger. Ce débordement a entraîné des inondations dans plusieurs localités, impactant directement la vie des habitants de régions telles que Karimama et Malanville. Ces inondations peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur les communautés locales, détruisant des infrastructures, endommageant les cultures et perturbant les moyens de subsistance.

Au centre du pays, la crue de l'Okpara a également généré des inondations, affectant des communes, dont la commune de Tchaourou. Ces régions sont confrontées à des risques accrus de catastrophes naturelles, nécessitant une vigilance constante et des mesures d'urgence pour protéger la population et les biens.

La basse vallée de l'Ouémé au sud du Bénin est sujette aux inondations, principalement en raison de sa topographie et de la proximité du fleuve Ouémé. Plusieurs communes de cette région sont régulièrement touchées par ces inondations, ce qui a des conséquences importantes sur les activités économiques et la vie quotidienne des populations.



Photo 1 : Images des inondations au Bénin

Source ¹⁹

1.2.2.2. Inondation au sud du Bénin

Au sud du Bénin, la ville de Cotonou est particulièrement vulnérable aux inondations en raison de divers facteurs tels que la montée de la nappe phréatique et les débordements de cours d'eau (Lac Nokoué). La montée de la nappe phréatique, liée à l'urbanisation et à la modification des sols, contribue également aux inondations. Les

pluies constantes et le manque d'évacuation adéquate des eaux pluviales accentuent ce problème.



Photo 2 : Images des inondations dans la ville de Cotonou

Source ¹⁹

1.2.2.3. Inondation en aval du barrage de Nangbéto

La basse vallée du Mono, au Bénin, fait face à des inondations fréquentes, notamment dans les communes d'Athiémé et de Grand Popo. Ces inondations résultent principalement des fortes pluies, des crues des cours d'eau locaux et parfois des lâchers de barrages. Les deux communes, en raison de leur proximité avec le lac Ahémé et le fleuve Mono, sont particulièrement vulnérables aux débordements.

Les conséquences des inondations sont variées, allant de la submersion des terres agricoles ; des lieux publics, des habitations, à la perte de vies humaines (photo 3). Depuis 2000, la région enregistre des catastrophes d'inondation avec des dégâts importants. En 2019, Athiémé et Grand Popo étaient les communes les plus touchées au niveau national, avec des proportions de sinistrés de 84,20% et 73,20% respectivement. Les statistiques de ce même rapport indiquent que tous les villages d'Athiémé étaient inondés, avec un décès confirmé dans chaque localité.¹⁹ En 2022, la situation restait grave dans ces communes.

Le risque d'inondation dans la vallée du Mono est désormais évident et nécessite une attention particulière. La sensibilisation des communautés aux mesures préventives est cruciale, tout comme la coordination des efforts entre autorités locales et nationales. Face à ce défi récurrent, des actions concertées sont nécessaires pour assurer la sécurité et le bien-être des habitants de la basse vallée du Mono, en protégeant leurs activités économiques et en renforçant leur résilience face aux inondations.



Photo 3 : Images des biens et infrastructures touchés à Athiémé et Grand-Popo
Source

1.2.3. Le SAP-BENIN

Depuis 2010, le Bénin a entrepris des initiatives majeures pour renforcer sa capacité de prévention et de gestion des risques et catastrophes, en collaboration avec le Système des Nations Unies et d'autres partenaires techniques et financiers. Parmi ces initiatives, le Système d'Alerte Précoce du Bénin (SAP-Bénin) a été élaboré avec le soutien du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et du Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM). Le SAP-Bénin se concentre sur le renforcement des capacités de surveillance météorologique, climatique et hydrologique, ainsi que sur le développement de systèmes d'alerte précoce pour faire face aux conditions météorologiques extrêmes et planifier l'adaptation au changement climatique.

Le SAP-Bénin cible divers risques, notamment les inondations, les sécheresses, l'élévation du niveau de la mer, les vents forts et l'érosion côtière. Il repose sur des systèmes d'informations climatiques et d'alerte précoce multirisques. Un aspect clé de ce système est la simulation des événements hydrométéorologiques extrêmes, tels que les inondations et la sécheresse, ainsi que l'évaluation de leur impact sur les ressources en eau. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet de mémoire, contribuant activement au fonctionnement du SAP-Bénin.

Le travail de mémoire envisagé consiste par ailleurs, en la réalisation de scénarios de simulation conformes aux niveaux d'alerte du SAP-Bénin. Ces simulations visent à identifier avec précision les zones menacées le long de la rivière Mono, permettant ainsi une meilleure anticipation et planification des mesures d'atténuation. En

contribuant à la collecte et à l'analyse de données pour ces simulations, le projet de mémoire apporte une valeur ajoutée essentielle au SAP-Bénin, renforçant ainsi la capacité du pays à anticiper, prévenir et répondre efficacement aux risques liés aux événements hydrométéorologiques extrêmes.

1.2.4. Etudes antérieures sur le bassin du Mono

L'exploitation d'un barrage ou d'une usine hydroélectrique peut présenter des risques pour les personnes fréquentant la vallée à l'aval, ainsi que pour les biens qui y sont situés.¹³ C'est le cas au sud du Bénin et du Togo en aval du barrage de Nangbéto. Il est révélé à travers plusieurs études et rapports, qu'en aval de cet ouvrage hydraulique, des inondations répétées sont observées depuis l'année 2000, avec des dégâts matériels importants, des pertes économiques et parfois des pertes en vies humaines.⁷

Houngue a évalué en 2023 l'impact du changement climatique et de l'affectation des terres sur les risques d'inondation en aval du barrage de Nangbéto. Cette étude a révélé que l'ampleur des crues extrêmes dans les scénarios futurs de changement climatique et d'utilisation des terres augmentera de sorte que les événements de périodes de retour de 10 ans entre 1987 et 2010 pourraient devenir des événements de période de retour de 2 ans. Ils recommandent en effet que des mesures d'adaptation ainsi que des options durables d'utilisation des terres et de gestion des barrages doivent être identifiées, afin d'atténuer les impacts des changements prévus.

Amoussou a modélisé en 2014 les crues dans le bassin du Mono à l'aide du modèle GR4J (modèle Génie Rural journalier à quatre paramètres). Il ressort de cette étude que l'utilisation de ce modèle pour évaluer les risques futurs de crues serait hasardeuse et il est nécessaire d'envisager d'autres types d'approches. Dans cette même année, Amoussou et al ont analysé l'évolution des précipitations extrêmes dans le bassin Mono. Les résultats montrent que la loi GEV de type Weibull est bien adaptée pour la simulation des événements pluvieux extrêmes, avec des périodes de retour très marquées entre deux et dix ans dans les données observées et entre deux et vingt ans dans les données simulées.

Quelles sont les principales causes qui seraient à l'origine des inondations de plus en plus récurrentes en aval du barrage hydroélectrique de Nangbéto ? Cette interrogation fait l'objet de polémique sur le bassin versant du Mono depuis plusieurs années. À en croire la population, le barrage de Nangbéto est à l'origine des inondations répétées dans la vallée. Travaillant sur l'étude de la modélisation bidimensionnelle des transports solides et de la dynamique fluviale dans un cours d'eau (cas du fleuve Mono) pour l'obtention de son diplôme d'ingénieur de conception en Génie Civil, les recherches de Tchikpoto (2014) ont permis de déceler qu'en dehors des précipitations, l'exhaussement du lit du cours d'eau amplifie aussi l'érosion et l'inondation dans la basse vallée du Mono.²⁰

En 2019, Amoussou a évalué les superficies de comblement et de creusement des lits et les apports solides au complexe fluvio-lagunaire à partir des charges turbides avant et après la mise en eau du barrage de Nangbéto. Les résultats de cette étude ont montré que les transports des charges solides de l'amont vers l'aval s'intensifient après la mise en eau du barrage et les dépôts s'opèrent prioritairement dans la partie aval, favorisés par la réduction de la profondeur du système lagunaire.

Amoussou a appliqué un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin versant en milieu tropical humide (cas du fleuve Mono). Les résultats obtenus ont montré qu'il y a eu une augmentation des maxima annuels journaliers de pluie, et que les débits d'entrée et de sortie du barrage de Nangbéto lors des crues sont presque équivalents.

Amoussou a étudié la variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo, afin de mettre en évidence la relation climat/bilan hydrologique.

Presque toutes les études sur l'analyse des inondations et de modélisation des crues dans le bassin du Mono ont été réalisées par des méthodes statistiques et déterministes. Aucune de ces études n'a abordé la cartographie des zones à risque d'inondation sur le cours d'eau, ni l'ampleur des crues dans les tronçons à risque lors des crues extrêmes. Or, la prévision de l'ampleur des crues dans les tronçons non jaugés est une tâche importante dans la conception de l'ingénierie fluviale et des structures hydrauliques, et reste un défi fondamental pour les hydrologues. Les enjeux hydrologiques modernes, de prévisions ou liés aux changements climatiques, obligent l'exploration de nouvelles approches en modélisation afin de combler les lacunes actuelles et d'améliorer l'évaluation des incertitudes.²¹ Cette évaluation nécessite une compréhension approfondie de la géomorphologie du bassin versant, de la dynamique des cours d'eau et des caractéristiques hydrauliques du barrage lui-même.

Dans cette étude, nous avons choisi l'utilisation de l'outil HEC-RAS qui est un modèle hydraulique unidimensionnel et bidimensionnel (1D-2D) ayant prouvé son efficacité dans les calculs hydrauliques. L'utilisation d'un modèle hydrodynamique peut non seulement aider les gestionnaires dans leurs tâches, les planificateurs d'urgence à prendre des décisions précises, mais aussi pour sensibiliser la communauté afin d'atténuer l'impact des inondations.²

1.2.5. La construction du barrage de Nangbéto

Situé sur le Mono, à environ 150 km de la côte atlantique, le barrage de Nangbéto est le seul aménagement hydraulique d'envergure dans le bassin versant. D'une superficie de 180 km² et d'une profondeur de 38 mètres, le lac artificiel de Nangbéto existait avant la construction du barrage. Celui-ci a été érigé sur le fleuve Mono à partir de 1985,

mais son exploitation industrielle n'a débuté qu'en septembre 1987, reflétant la volonté d'atteindre l'indépendance énergétique du Bénin et du Togo. Sa capacité de stockage d'eau s'élève à 1 715 millions de mètres cubes.

Les objectifs principaux du barrage, conformément au cahier des charges de l'ouvrage (SOFRELEC, 1966 ; CEB, 1985), sont les suivants :

- la production d'énergie électrique pour les deux pays;
- la régularisation partielle, soit 30 % du cours du fleuve Mono ;
- l'irrigation d'environ 40 000 hectares de terres dans la basse vallée ;
- la promotion de la pêche pour soutenir les efforts des communautés rurales.

Le barrage fournit en moyenne 65000 kWh/an, ce qui a amélioré les conditions et le développement des cités urbaines, notamment grâce à l'électrification des villes. Il a également permis la construction de quarante nouveaux villages comptant chacun plus de cinq mille habitants pour loger les personnes déplacées.²² Le barrage a contribué à atténuer les effets des sécheresses dans la basse vallée en soutenant les étiages et en régulant les niveaux de fluctuation hydraulique de l'aquifère. Aujourd'hui, cet ouvrage hydraulique représente un outil essentiel de régulation du fleuve Mono, assurant le contrôle des crues dans sa partie aval.⁴

Cependant, les lâchers d'eau du barrage, en l'absence de sédiments à transporter, provoquent l'érosion des berges et le déracinement des arbres en aval. Ce phénomène prend de l'ampleur, entraînant la destruction d'habitations à Athiémé, incluant la disparition de l'ancienne résidence du gouverneur du Dahomey. La gestion des lâchers d'eau doit donc être soigneusement étudiée pour minimiser ces effets néfastes sur l'environnement et les habitations riveraines.

1.3. But de la recherche

Ce mémoire contribue à améliorer la gestion de barrage hydroélectrique et à renforcer la résilience des communautés vivant en aval du barrage. En fournissant un outil d'évaluation et de prévision en temps réel, nous pourrions réduire les impacts des inondations et assurer une utilisation durable des ressources en eau, tout en continuant à bénéficier des avantages énergétiques du barrage hydroélectrique.

1.4. Problème et questions de recherche

Pour cela, nous avançons quelques questions de recherche que sont entre autres :

- ✓ Quel est l'impact du barrage de Nangbéto sur le régime hydrologique de la basse vallée du Mono ?
- ✓ Quelle mesure d'adaptation durable faut-il mettre en place pour minimiser le risque d'inondation aval du barrage de Nangbéto ?

1.5. Objectifs du mémoire

1.5.1. Objectif général

L'objectif général du présent mémoire est de caractériser et de modéliser la propagation des crues en aval du barrage Nangbéto, afin d'identifier les zones de débordement et de proposer un PPRI pour minimiser les risques d'inondation.

1.5.2. Objectifs spécifiques

Spécifiquement, il s'agit de :

- ✓ Caractériser les crues fluviales à l'aval du barrage ;
- ✓ Modéliser la propagation des crues à l'aval du barrage à l'aide du modèle hydraulique HEC-RAS ;
- ✓ Proposer un Plan de Prévision des risques d'Inondation (PPRI).

1.6. Hypothèses de recherche

- ✓ En période de crues extrêmes, le barrage de Nangbéto ne joue plus pleinement son rôle de régulateur en aval ;
- ✓ Le débordement du fleuve Mono s'observe uniquement dans la commune d'Athiémé ;
- ✓ La prévision des crues à Athiémé quelques jours en avance peut permettre de réduire les risques d'inondation dans la basse vallée du mono.

1.7. Limites de l'étude

En raison de manque de données sur les stations de Grand-Popo et à l'embouchure de la rivière (Bouche du Roi), cette étude n'a pas pris en compte toute la partie aval du bassin versant. Seulement le tronçon situé entre le barrage et la station d'Athiémé a été considéré. Il faut noter que le modèle numérique de terrain (MNT) exploité dans le cadre de cette étude est de résolution 30 X 30, ce qui n'a pas permis de prendre en compte certains détails dans la modélisation. Par manque de données de bathymétrie de la rivière, le modèle hydraulique 2D développé est basé sur une bathymétrie théorique, ce qui ne permet pas de mieux représenter le lit du cours d'eau.

1.8. Résultats attendus de l'étude et cibles

- ✓ La dynamique de la propagation des inondations à l'aval du barrage de Nangbéto est caractérisée ;
- ✓ Un modèle hydraulique permettant de simuler la propagation des crues à l'aval du barrage de Nangbéto est réalisé ;
- ✓ Les zones inondables sont cartographiées et un PPRI adapté est proposé.

Ce projet vise à fournir aux gouvernements Béninois et Togolais à travers l'Autorité du Bassin du Mono (ABM) un PPRI adéquat pour sécuriser les populations riveraines du bassin du Mono. Les résultats de ce travail permettront aussi aux gestionnaires du barrage de Nangbéto de mieux exploiter l'ouvrage pour minimiser les risques d'inondation en aval.

1.9. Intérêt de l'étude

La plupart des études abordant la question des inondations dans le bassin du Mono ont exploitées des modèles hydrologiques pluie-débit. En se basant sur un modèle hydraulique, notre étude permettra de disposer des hauteurs et débits en chaque point du bassin en aval du barrage et de faciliter des alertes précoces aux inondations dans cette région. Il donne également l'avantage de simuler à l'avance des lâchés exceptionnels, d'évaluer leur propagation donc leurs impacts sur l'aval du barrage. Un PPRI est proposé permettant de prévoir et réduire les dégâts liés les inondations qui précédemment surprenaient les populations chaque année.

1.10. Grandes divisions du mémoire

Ce mémoire est organisé en cinq sections, comprenant l'introduction, la conclusion, et trois chapitres distincts. Le premier chapitre se consacre à l'analyse du milieu d'étude, tandis que le second explore les ressources matérielles et la méthodologie adoptée pour réaliser les objectifs de l'étude. Enfin, le troisième chapitre expose les résultats obtenus, accompagnés d'une discussion approfondie.

Chapitre 1 :

Présentation du milieu d'étude

2. Chapitre 1 : Présentation du milieu d'étude

2.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les caractéristiques physiographiques du bassin versant à savoir les sols, la végétation, la géologie, climat, le relief, etc, afin d'accéder à une connaissance générale du bassin versant. Ces éléments jouent un rôle essentiel dans les phénomènes de transfert d'eau en se combinant selon leur influence pour déterminer les modalités de l'écoulement. Il s'agira donc d'une description détail de la zone d'Etude.

2.2. Situation géographique du milieu d'étude

Le bassin versant du fleuve Mono, un précieux patrimoine partagé entre le Bénin et le Togo, est niché dans la région du golfe de Guinée. Principalement situé sur le territoire togolais, il englobe une étendue d'environ 27 870 km²,⁶ s'étendant entre les latitudes 6°10' et 9°00' Nord, ainsi que les longitudes 0°30' et 2°00' Est. Malgré sa localisation prédominante au Togo, le fleuve Mono prend sa source dans les monts Koura, région de Bassila, au Nord-Ouest du Bénin, et se déverse dans la mer au sud du Bénin, à l'embouchure du Bouche du Roi. Ce cours d'eau, d'une longueur de 530 kilomètres, agit comme une frontière naturelle entre le Togo et le Bénin sur une distance de 148 kilomètres.

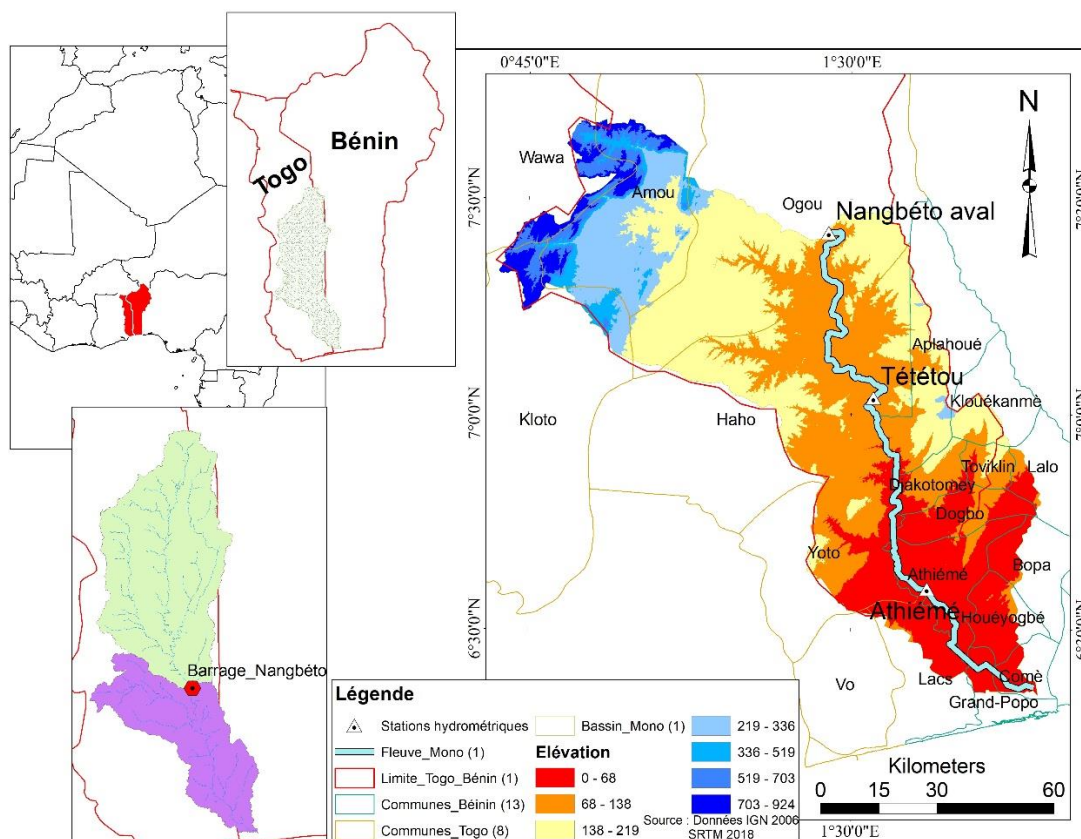


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude et de l'emplacement du barrage de Nangbéto

Le barrage de Nangbéto, un point de repère majeur situé aux coordonnées 7°45 N et 1°42 E, contrôle une superficie significative de 15 500 km², soit 62% de la superficie totale du bassin²³. L'aval du barrage, partagé entre le Bénin et le Togo, s'étend sur environ 148 km, comme indiqué par Cette zone peut être subdivisée en deux sections distinctes : une vallée encaissée s'étendant sur près de 100 km à partir de l'aménagement, suivie d'une zone de plaine qui s'étend jusqu'à la mer sur une centaine de kilomètres. Cette description géographique est tirée des écrits de Tchikpoto (2014).

2.3. Hydrologie du bassin versant du Mono

2.3.1. Climat du bassin du Mono

Le bassin du fleuve Mono, du nord au sud, se divise en trois zones climatiques distinctes, (Figure 5). La première zone connaît des pluies débutant vers fin avril, atteignant leur point culminant en août, puis diminuant progressivement jusqu'à mi-novembre. Les mois les plus pluvieux sont juillet, août et septembre, avec des totaux pluviométriques pouvant atteindre 1380 mm. La saison sèche s'étend de mi-novembre à fin avril, avec une température moyenne d'environ 27,0 °C.

La deuxième zone, fortement influencée par l'orographie, est très pluvieuse, avec des totaux pluviométriques dépassant souvent 1500 mm. Les précipitations sont continues, d'avril à mi-novembre, avec une légère hausse en juin et juillet. Dans la troisième zone, le régime pluviométrique présente deux pics, le plus important en juin et le moins important en septembre, avec une moyenne annuelle dépassant largement 1000 mm. Cette zone connaît une anomalie climatique marquée par un climat relativement sec, avec un cumul annuel moyen de pluies oscillant entre 800 et 850 mm, et des pics pluviométriques enregistrés en juin et octobre.

L'humidité relative dans la basse vallée du Mono est élevée, variant de 65 à 95%. Elle présente peu de variation au cours de la journée (89% à 6h TU, 73% à 12h TU et 81% à 18h TU)²⁰. Le vent à Nangbéto est relativement stable tout au long de l'année, dominé par des vents sud-ouest et nord-est, avec une vitesse moyenne de 4 m/s à Nangbéto, pouvant atteindre 15 à 20 m/s pendant les orages dans la basse vallée.

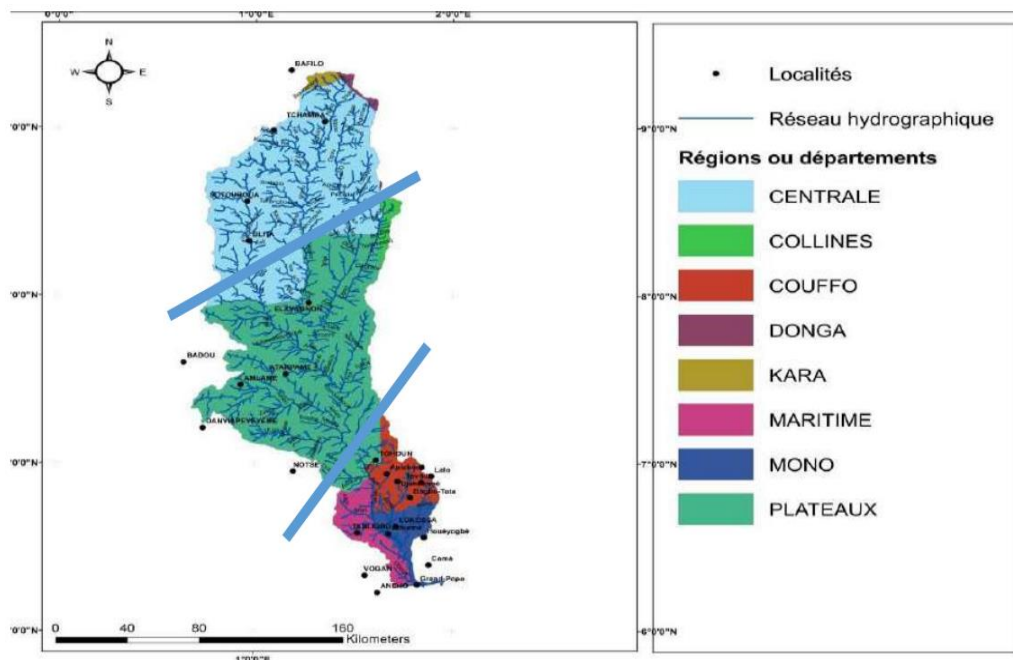


Figure 5 : Carte des grandes zones climatiques du Bassin du Mono
Sources ²⁰

2.3.2. Régime pluviométrique

Les précipitations au Togo et au Bénin sont influencées par l'organisation de la circulation atmosphérique ouest-africaine, tant dans les basses couches que dans les couches moyennes et hautes de l'atmosphère⁴. À l'échelle du bassin, ces précipitations sont étroitement liées aux effets dynamiques résultant des contrastes entre la plaine côtière et le golfe de Guinée, ainsi qu'entre les reliefs du Nord-Ouest (culminant vers 700 à 800 m d'altitude) et les zones plus basses du bassin. La répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles (1961-2000) indique que le Nord et le Centre-Ouest enregistrent les plus fortes pluies, influençant la dynamique de l'écoulement dans le bassin²⁴.

L'écoulement dans le bassin du Mono présente une grande variabilité. La partie Nord du Togo connaît un climat tropical de transition avec une saison sèche de novembre à avril et une saison humide de mai à octobre. Dans le Sud, le Togo est soumis à un climat équatorial caractérisé par une saison sèche de mi-novembre à mars et deux saisons humides de mars à mi-novembre, avec une petite saison sèche en août et septembre. Les crues du Mono débutent généralement en mars et s'étendent sur cinq à six mois en moyenne.

Les précipitations les plus abondantes dans le bassin sont enregistrées d'avril à octobre, mais leur répartition est inégale. Le Sud reçoit des pluies importantes en juin, tandis que la partie Nord enregistre les précipitations les plus abondantes de juillet à septembre. Cette disparité peut s'expliquer par l'effet combiné de la mousson et du relief. Ainsi, les précipitations débutent légèrement plus tôt au sud qu'au nord du

bassin. Les faibles coefficients d'écoulement et la faible corrélation entre écoulement et recharge indiquent que la précipitation n'est pas le seul paramètre expliquant le fonctionnement hydrologique du bassin, mais que le substratum géologique et les états de surface jouent également un rôle. Ces derniers déterminent la capacité des sols à l'infiltration, au ruissellement et à l'érosion²⁴.

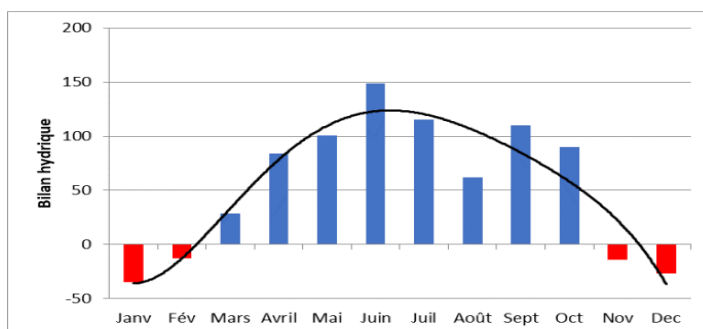


Figure 6 : Bilan hydrique mensuel dans le bassin
Source ²⁵

2.4. Hydrogéologie du bassin de Mono

Le bassin hydrologique du Mono se compose de deux importantes formations géologiques (figure 7) : les formations sédimentaires et de Terre de barre au sud, et le socle cristallin au nord. Les formations de socle prédominent, couvrant plus des deux tiers du bassin-versant, et exercent une influence sur les dépôts alluvionnaires. La susceptibilité à l'érosion varie entre ces différentes formations géologiques, comme illustré dans le tableau 1.

Tableau 1 : Séquence d'érodibilité mécanique des roches d'après leurs propriétés physiques dans le bassin du Mono

Sensibilité à l'érosion	Roches	Complexes lithologiques
	- Sédimentaires meubles - Sédimentaires poreuses et friables - Métamorphiques peu transformées - Sédimentaires imperméables - Sédimentaires consolidées - Métamorphiques très transformées - Plutoniques (granite, quartz, micaschistes)	- Sableux - Marneux/carbonatés - Schistes - Argileux - Calcaires ou grès - Gneiss - Cristallin

Source ²⁴

L'infiltration dans le bassin n'est pas homogène. Dans les zones du socle cristallin, composé de roches métamorphiques et éruptives de l'Atacorien et du Dahoméen, l'infiltration est lente, favorisant un ruissellement rapide. En revanche, les secteurs recouverts par les formations sédimentaires, constituées de faciès argilo-sableux et marneux, présentent une meilleure infiltration. Dans ce dernier cas, la réaction du bassin aux précipitations est plus lente. Ces formations, saturées d'eau, la restituent aux

rivières pendant la période d'étiage, expliquant ainsi la continuité de l'écoulement dans le bassin sédimentaire côtier, par exemple.

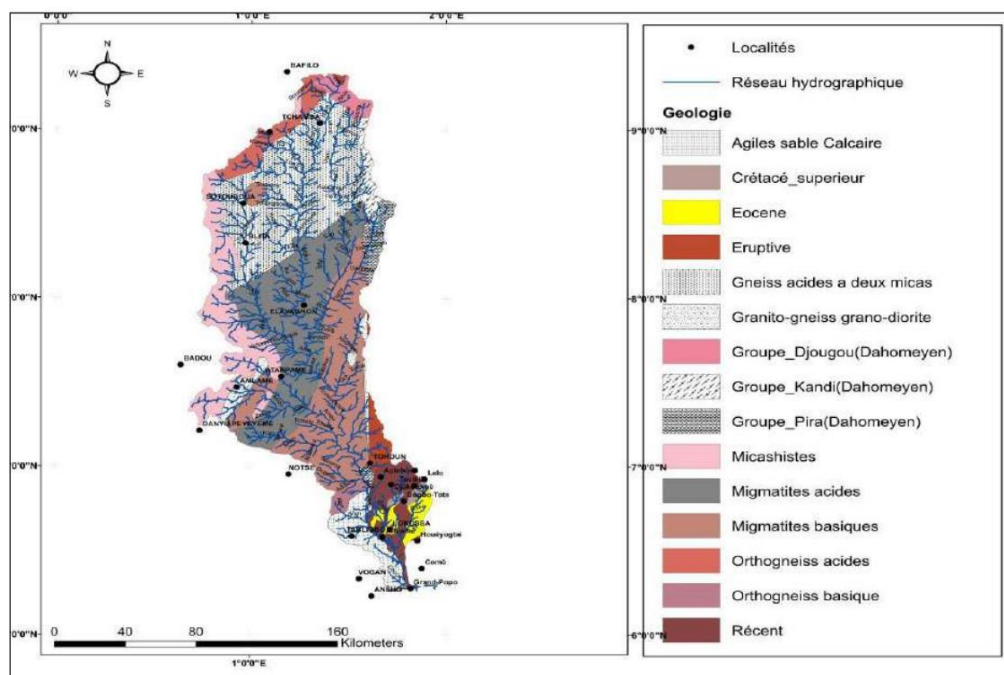


Figure 7 : Carte des grands ensembles géologiques du Mono
Sources ²⁰

2.5. Les reliefs du bassin versant du Mono

Le bassin-versant se divise en deux parties distinctes : un bassin sédimentaire côtier au sud, caractérisé par des plaines littorales et des plateaux, et des reliefs plus élevés au nord, comprenant les monts Atacora et les monts du Togo. Ces reliefs, formés en plusieurs massifs avec des crêtes orientées SSW-NNE, atteignent des altitudes allant de 600 à 941 m à Atilakoutsé, constituant une importante source d'approvisionnement en eau. Cette région alimente plusieurs cours d'eau s'écoulant du sud au nord ²².

La majeure partie du bassin-versant est à basse altitude, variant de 30 à 250 m. Le bassin inférieur, recouvert partiellement par des alluvions sablo-argileuses, présente des paliers marquant des niveaux d'érosion successifs. Malgré ses altitudes modérées, le bassin inférieur influence la vitesse d'écoulement, le rapport débit/charge, la géométrie du bassin et la quantité de matériaux charriés. Les points les plus élevés au nord-ouest dépassent les 300 m, atteignant même les 400 m pour le Mono. Le sous-bassin Couffo est caractérisé par une chaîne de montagnes entre Sokodé et Atakpamé au Togo, avec des altitudes variantes entre 300 et 400 m plus élevées au nord. Dans la partie sud du sous-bassin, l'altitude est inférieure à 200 m. Ces altitudes modérées expliquent les faibles pentes du bassin (figure 8).

2.6. Sols

Le bassin versant du Mono présente une diversité de types de sols, dont les Luvisols, qui prédominent avec une couverture de 61,58%. Les Luvisols se distinguent par une teneur en argile plus élevée en sous-sol qu'en surface. La région ouest du bassin versant, caractérisée par des zones d'altitude, est constituée en grande partie de Lithosols, couvrant 17,06% de la superficie.

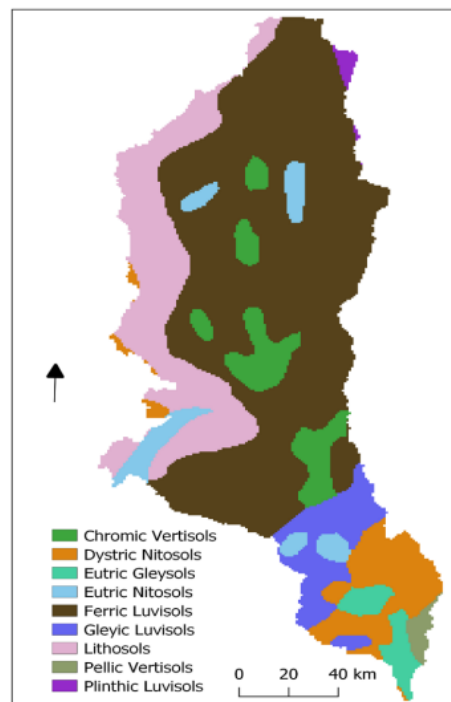


Figure 8 : Carte des sols du bassin versant du Mono
Source ²

Les Lithosols se trouvent généralement dans les régions montagneuses et se caractérisent par des sols caillouteux. Le reste du bassin versant est composé de Nitisols (11,26%), de Vertisols (7,44%), et de Gleysols eutriques (2,47%). Les Vertisols ont une texture argileuse, tandis que les Nitisols et les Gleysols eutriques sont principalement constitués de limon. Cette diversité de sols dans le bassin versant du Mono joue un rôle crucial dans les processus hydrologiques et écologiques de la région.

2.7. Les différents types de végétation en aval du barrage de Nangbéto

En se basant sur les définitions et la classification de la végétation, le bassin du Mono en aval du barrage hydroélectrique est couvert de forêts galeries, de forêts arbustives ou d'exploitations forestières et des savanes herbeuses (Figure 9). Dégradé, le domaine des savanes herbeuses est le plus étendu suivi de forêts arbustives. La distribution des espaces marécageux, outre l'Aire Protégée (AP) de Togodo située presque à mi-

parcours de la basse vallée, la partie sud du bassin est parsemée de marécages de tailles variant d'environ 10 à 150 m². La dégradation du couvert végétal est en partie liée aux besoins fonciers pour l'agriculture, l'habitation, la recherche du bois de chauffe, du gravier et le prélèvement de sédiments dans les terrasses alluviales.

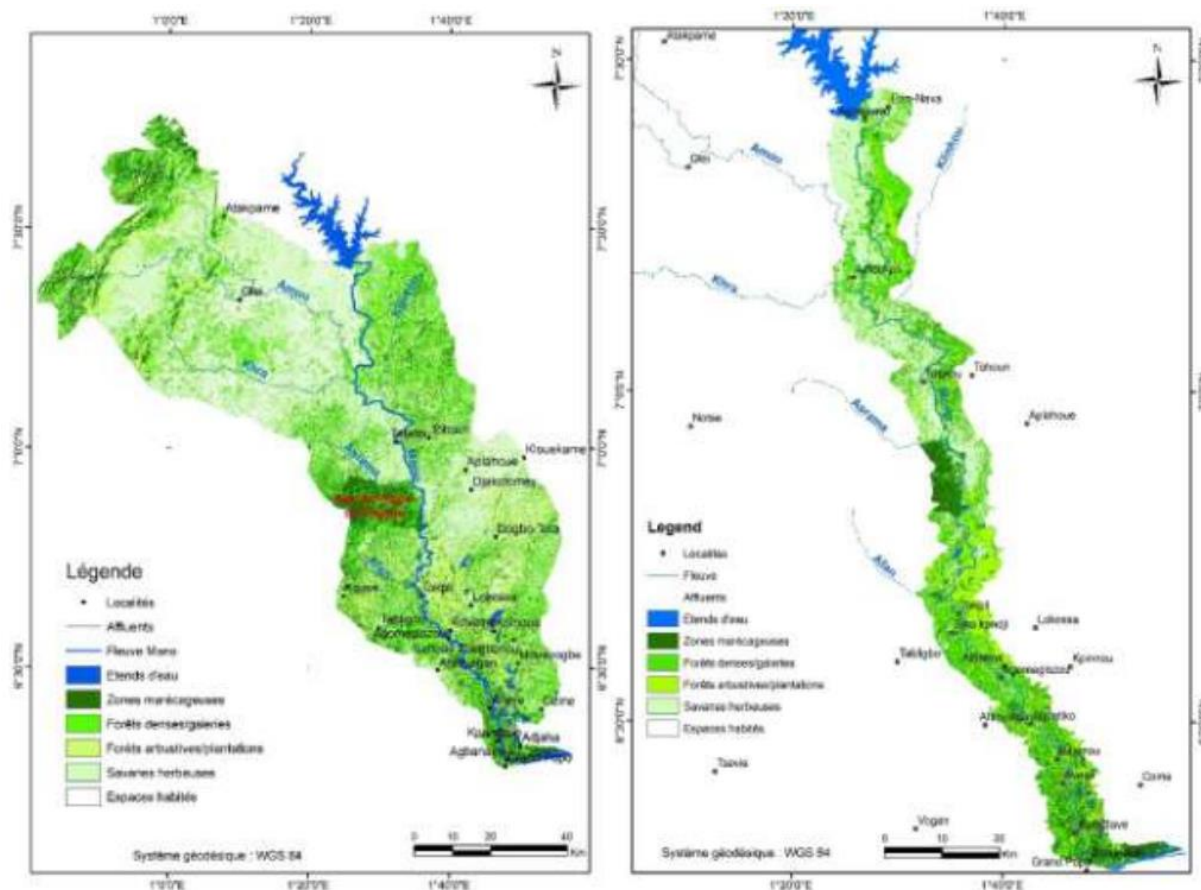


Figure 9 : Carte des grands ensembles de paysage du Bassin du Mono

Source : ²⁶

2.8. Hydrographie

Le bassin versant du fleuve Mono, étudié par Amoussou en 2010, couvre une superficie de 24 057 km² et s'étend sur une longueur de 527 km. L'orientation du fleuve évolue du nord au sud, changeant en direction WNW-ESE entre Agbanankin et Gbèkon, puis adoptant un parcours W-E parallèle à la côte (Figure 10). Amoussou (2010) souligne la présence de nombreux rapides le long du cours, notamment les rapides de Bélia, Katong, Bègba, Adjarala (site d'un futur barrage en aval de Nangbéto), Arandoulé, Agbako, et Drékpon.

Les affluents majeurs du fleuve Mono incluent l'Ogou (210 km) et l'Anié (161 km), prenant leur source respectivement dans le massif de Tchaoudjo au Togo et sur le mont Fazao. Les affluents Amou (114 km) et Amoutchou (62 km) proviennent du plateau Akposso, tandis que l'affluent Kra (69 km) prend sa source au mont Haïto. Dans la basse vallée, un réseau hydrographique dense se forme, avec la présence notable de

mares et de lacs en périphérie. En plus du Mono, un autre axe de drainage, celui de la Sazué (63 km) avec une faible pente, recueille les rivières Dévédo (22 km) et Savédo (40 km) sur la rive gauche du Mono.

Cette description détaillée de l'hydrographie du bassin versant du Mono est extraite des travaux d'Amoussou (2010).

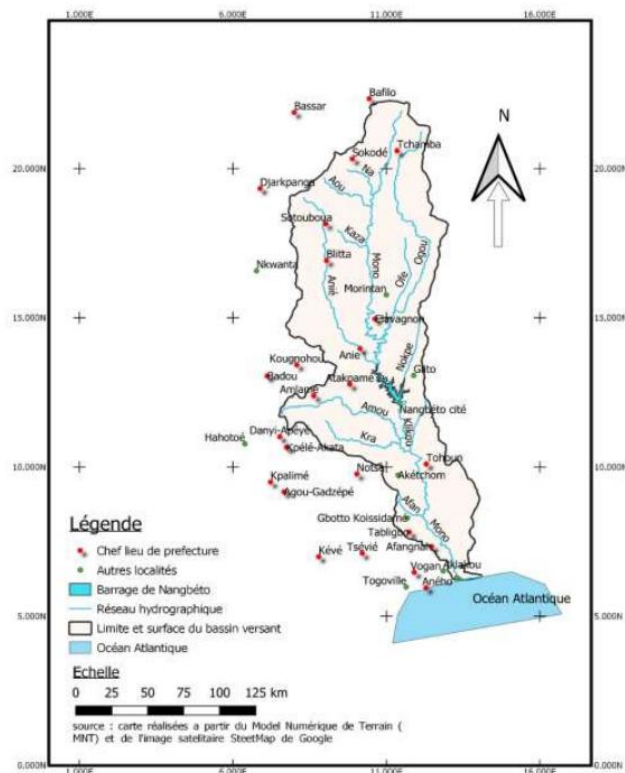


Figure 10 : Carte du réseau hydrographique du fleuve Mono

Source ²⁶

Tableau 2 : Caractéristiques physiographiques du bassin versant du Mono

N°	Paramètres physiographiques du fleuve Mono	Valeurs
1	Périmètre du bassin versant (km)	1017,25
2	Superficie du bassin versant (km ²)	24006,52
3 ⁷	Longueur du rectangle équivalent du bassin (km)	338,36
	Largeur du rectangle équivalent du bassin (km)	138
	Largeur moyenne du rectangle équivalent du bassin (km)	73,3
4	Indice de compacité de Gravelius (K _c)	1,83
5	Dénivelée (D5% - D95%) m	281,4
6	Indice global de pente (I _g) m/km	27,66
9	Dénivelée spécifique (m)	41,83
10 ⁸	Pente maxi du cours principal du Mono (%)	6,06
	Pente moyenne du cours principal du Mono (%)	1,3
	Pente mini du cours principal du Mono (%)	0,04
13	Densité de drainage (km/km ²)	0,054
14	Rang de classification ⁹ du Mono	3

Source ²⁶

Conclusion partielle

La zone d'étude, partagé par le Bénin et le Togo, se dévoile comme une entité géographique fascinante, influencée par une diversité de paramètres. Le climat tropical de transition, caractérisé par une saison sèche et une saison humide, combine avec des précipitations régionales influencées par la circulation atmosphérique ouest-africaine. Les sols, dominés par les Luvisols au sud et les Lithosols à l'ouest, révèlent une hétérogénéité importante influant sur l'infiltration et le ruissellement. Le barrage de Nangbéto, pivot du bassin, contrôle les flux sur 62% de sa superficie, impactant la vallée encaissée et la plaine en aval. Dans cette mosaïque géographique, le bassin du Mono se pose comme un milieu complexe où le climat, le relief, et la diversité pédologique s'entrelacent, offrant un terrain d'étude riche et multidimensionnel.

Chapitre 2 :

Données et méthodes

3. Chapitre 2 : Données, outils et méthodes

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les données utilisées et aussi tous les outils ainsi que la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs fixés.

3.2. Données utilisées

Le modèle hydraulique HEC-RAS utilise principalement deux types de données : hydrométriques et les données topographiques.

Les données de débits moyens journaliers ont été collectées pour la période de 1960 à 2022 sur la station d'Athiémé à la Direction Générale de l'Eau du Bénin (DGEau-Bénin), et sur les stations de Tététo de 1960 à 2017 et de Nangbéto aval de 1987 à 2020. Les données des stations de Nangbéto et de Tététo ont été obtenues à la Direction des Ressources en Eau du Togo. Ces débits comportent beaucoup de lacunes, souvent sur une à plusieurs années, surtout au niveau de la station de Tététo.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation virtuelle en 2D ou 3D de ce que peut être la réalité terrain d'une surface topographique, ou de toute autre représentation cartographique d'iso-valeurs, cet ensemble étant géoréférencé dans un système de projection bien précis.¹ Dans le cadre de cette étude, nous avons exploité la base de données topographiques disponibles sur le site américain de l'administration nationale de l'aéronautique et de l'espace « NASA » (National Aeronautic and Space Administration) sous la collection de l'institut d'études géologiques des Etats-Unis « USGS » (United States Geological Survey) via le lien <https://earthexplorer.usgs.gov/> à partir des limites géographiques de la zone d'étude. La résolution est de 30 m de côté.

3.3. Méthodologie de traitement des données

Dans la perspective d'atteindre les objectifs spécifiques formulés, une méthodologie de recherche a été adoptée. A chaque objectif spécifique correspond une méthodologie de recherche qui lui est propre.

3.3.1. Caractérisation de la variabilité des événements hydro-climatiques en aval du barrage de Nangbéto

La caractérisation des événements hydro-climatiques permet de mettre en évidence, les propriétés fondamentales des propagations des crues, en cherchant les courbes caractéristiques, c'est à dire les courbes où il existe une relation entre le temps et débits. Les riverains de la basse vallée du Mono sont souvent inondés suite au débordement du cours d'eau hors de son lit ou soit avec une pluviométrie extrême. Dans cette étude de modélisation, nous nous sommes intéressés au comportement du sous bassin versant en aval du barrage face aux crues fluviales. En effet, il est question dans cette première partie de faire une étude statistique des données observée de la station d'Athiémé et de

Nangbéto situées sur fleuve Mono. Le langage de programmation python a été utilisé pour effectuer l'analyse des données de débits à l'aide des algorithmes (Annexe 1).

3.3.1.1. Prétraitement des Données

Dans la phase préliminaire du traitement des données hydrologiques, une première étape consiste à convertir les dates en format DateTime, offrant ainsi une facilité dans la manipulation temporelle des informations. Par la suite, des colonnes distinctes pour l'année, le mois et le jour ont été ajoutés, offrant ainsi une facilité dans le traitement des informations temporelle plus détaillée. Enfin, pour une organisation systématique des données, une table pivot est créée, structurant les informations en fonction des paramètres temporels précédemment établis, à savoir le mois, le jour et l'année. Ce processus garantit une préparation rigoureuse des données en vue des analyses subséquentes.

3.3.1.2. Analyses Hydrologiques

L'analyse de la variation des débits est réalisée avec les données des stations d'Athiémé et de Nangbéto. Tout d'abord, à la station d'Athiémé, l'évolution des débits maximaux interannuels est évalué, distinguant deux périodes significatives : avant et après la construction du barrage. De la même manière, les débits moyens et les débits maximaux intra-annuel sont analysés. A Nangbéto, une analyse des débits maximaux, tant entrants que sortants du barrage de Nangbéto, est effectuée. Dans le but d'établir une corrélation entre les débits maximaux à Athiémé et ceux émanant du barrage, une étude de ces données est entreprise.

Python a été l'outil d'analyse statistique pour cette étude en raison de sa polyvalence, de sa communauté active. Avec ses bibliothèques scientifiques et de visualisation, cet outil offre une approche flexible et puissante pour l'analyse des données hydrologiques. Nous avons utilisé principalement Pandas pour manipuler les données, NumPy pour les calculs numériques et Matplotlib pour la visualisation.

3.3.2. Modélisation de la propagation des crues

Cette modélisation à base du logiciel HEC-RAS consiste construire un modèle hydraulique pour simuler la propagation des crues le long du tronçon barrage de Nangbéto-Athiémé et d'identifier les zones de débordement à l'issue d'une crue exceptionnelle. Elle consiste en une deuxième partie à proposer un plan d'adaptation pour minimiser les risques d'inondation en aval du barrage. Cette simulation hydraulique est principalement fonction des valeurs de débits sortants du barrage, de la physiographie de la zone concernée en occurrence les cours d'eau ainsi que des conditions aux limites du modèle.

3.3.3. Description du logiciel HEC-RAS

Le système de modélisation HEC-RAS est développé comme des logiciels des études hydrauliques qui permettent de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center de l'U.S Army Corps of Engineers à travers le projet NextGen.²⁷ Ce projet englobe plusieurs aspects hydrologiques et hydrauliques : Analyse du ruissellement des précipitations, Hydraulique fluviale, Simulation des systèmes des réservoirs, Analyse des dommages d'inondation, prévision des crues pour la conception des réservoirs.

Il s'agit d'un logiciel libre et disponible sur le site officiel de HEC-RAS. Pour cette étude, nous avons utilisé la version HEC-RAS 6.4.1 équipée d'une fenêtre RAS-MAPER facilitant la conception de divers fichiers de la géométrie 1D-2D. En outre, ce logiciel est conçu à base des différentes équations de la physique telle que les équations de Bernoulli, de Manning Strickler, tout comme celle de Saint-Venant pour faire la simulation.

3.3.4. Calcul de la propagation des crues en régime d'écoulement non permanent

Les lois physiques qui régissent l'écoulement de l'eau dans un canal sont : le principe de la conservation de la masse (continuité), et le principe de la conservation de la quantité de mouvement. Ces lois sont exprimées mathématiquement sous forme d'équations différentielles partielles (EDP).

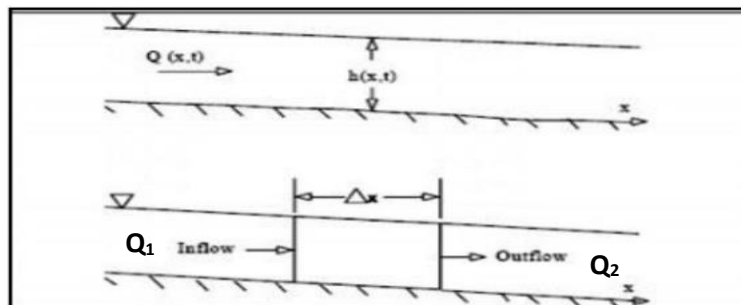


Figure 11 : Vue de face d'un écoulement

Source ¹⁶

2.3.2.3. Equation de continuité

Cette équation traduit la conservation de la masse d'un fluide. En d'autres termes, cette dernière stipule que le débit entrant (I) diminué du débit sortant (O) doit être égal à la variation de stock ω pendant un intervalle de temps dt .

$$\text{Soit : } (I - O) = \frac{d\omega}{dt} \quad (01)$$

Sachant que : $I - O = Q_1 - Q_2 + qdx$ et $d\omega = dSdx$, l'équation (01) devient :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad (02)$$

S : surface de la section mouillée

Q : le débit (m³/s)

q : apport latéral ou perte latérale

Le débit étant fonction du volume (Q=SV), le développement de l'équation (02) donne une équation différentielle sous la forme :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(SV)}{\partial x} = q(x,t) \quad (03)$$

L'équation devient donc :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V \frac{\partial S}{\partial x} + S \frac{\partial V}{\partial x} = q(x,t) \quad (04)$$

2.3.2.4. Equation de quantité de mouvement

Tenant compte des forces par unité de volumes telles que :

- Les forces de volumes : $\rho \vec{F}$, avec $\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}(gh)$
- Les forces de pressions : $-\overrightarrow{\text{grad}}P$, avec $P = \rho gz$
- Les forces de tension d'origine visqueuse : $\mu \Delta \vec{V} + (\mu + \eta) \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div} \vec{V})$
- Les forces de frottement due aux pertes de charges linéaires J dans la section du cours d'eau : $\vec{f}$, avec $\vec{f} = -\rho g J$

Elle est déterminée à partir de l'équation de Navier Stock :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\Delta}) \cdot \vec{V} \right) = \sum \vec{F} : \frac{\partial V}{\partial t} + Vx \frac{\partial Vx}{\partial x} + g \frac{\partial hx}{\partial x} = g(I - J) \quad (05)$$

Où V : vitesse ; h : côte ; I : pente de fond ; J : pente de la surface libre.

$$\text{On obtient : } \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad (06)$$

En mécanique des fluides, celle-ci regroupe les principales forces entrant en jeu pour évaluer le comportement hydraulique du fluide d'un point à un autre dans l'espace-temps. Les forces de frottement et de tension d'origine visqueuse ; permettent de considérer les pertes de charges linéaires dans la section du cours d'eau ou dans une cellule ; les forces de pressions, pour la variation hydrostatique de l'eau et les forces de volumes pour la variation de la colonne d'eau d'un point à un autre. L'ensemble de ces deux types d'équations forment l'algorithme de base de la conception du logiciel HEC-RAS, définit sous le nom des équations de Saint-Venant en écoulement à surface libre.

2.3.2.5. Equation d'onde diffusante

$$\text{On a : } \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J)$$

Pour les crues en rivières, on a observé que les deux premiers termes sont négligés devant les autres termes de l'équation (04) d'où :

$$\frac{\partial h}{\partial x} = I - J \quad (07)$$

En réécrivant l'équation de continuité avec H plutôt qu'avec S ($S=B.H$), en supposant que $q = 0$ et que B est indépendant du temps, on a :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(H.V)}{\partial x} = 0 \quad (08)$$

On néglige le terme de la pente de la surface libre I de l'équation (05), on a :

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -J \quad (09)$$

On obtient ainsi l'équation de crues diffusante sous le modèle d'Hayami:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(H.V)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} = -J \end{cases} \quad (10)$$

V peut être exprimée en fonction de la perte de charge (Formule de Chézy) :

$$V = C_0 \sqrt{R_H J} \quad \text{où} \quad \begin{cases} V: \text{la vitesse} \\ C_0: \text{coefficient de Chézy,} \\ R_H: \text{rayon hydraulique,} \\ J: \text{perte charge} \end{cases} \quad (11)$$

2.3.2.6. Elaboration de fichier de la géométrie

L'évolution du logiciel HEC-RAS a permis une amélioration et des apports significatifs tant dans la performance que dans la facilité d'utilisation de ce dernier. En conséquence, l'intégration de la nouvelle fenêtre RAS MAPPER permet une aisance pour la conception de la géométrie 1D et 2D.

La transformation du fichier MNT en TIN s'effectue directement par le logiciel, pour faciliter la computation pour une analyse par élément fini. A partir des outils du RAS MAPPER, il est possible de concevoir des fichiers de géométrie pour la modélisation. Dans le cadre de ce travail, la conception du chenal du cours d'eau est réalisé à l'aide de l'outil « **r.carve** » dans **Qgis**.

Ensuite, la conception des surfaces d'écoulement (flow areas) s'est fait, grâce à des outils incorporés dans RAS MAPPER en occurrence le 2D flow areas. Il permet de

générer une surface sur laquelle s'effectuera la simulation. Sur cette surface sera appliquée une grille de maille de 200*200, dans le but d'engendrer des cellules nécessaires pour le calcul (Photo 4). Cette surface est un polygone et est défini par le contour du secteur d'étude. Dans le chenal du fleuve, un maillage de 50m X 50m est appliqué.

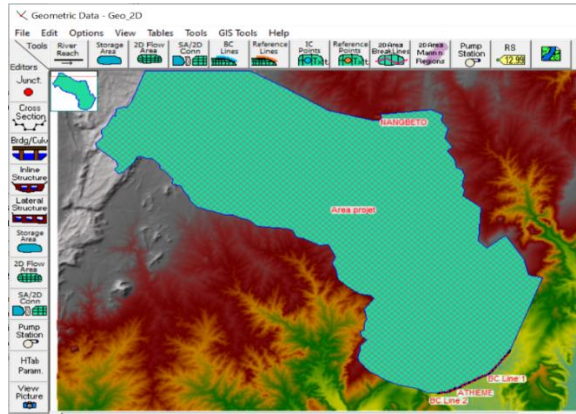


Photo 4 : Capture d'écran du maillage de la zone d'étude.
Source : ModelisationHEC-RAS 6.1.4

2.3.2.7. Elaboration des fichiers d'écoulements

Comme exprimés dans les équations, les algorithmes exploités par HEC-RAS requièrent un certain nombre de paramètres hydrauliques importants pour la simulation. Les plus essentiels sont les valeurs de rugosité de Manning-Strickler, le coefficient d'expansion et de contraction, du débit, de la précipitation, etc. Les valeurs de rugosité n de Manning est indiqué pour la rive gauche, le canal principal et la rive droite. Elles permettent de prendre en considération l'aspect rugueux du lit du cours d'eau et celui des berges.

2.3.3. Calage et validation du modèle

La calibration (calage) du modèle peut être considérée comme un processus d'ajustement des paramètres d'entrée pour obtenir des valeurs simulées suffisamment proches des valeurs observées. L'objectif attendu dans le calage d'un modèle est qu'il soit le plus robuste et le plus fiable possible. Une fois les paramètres estimés sur une période, dite période de calage, on doit ensuite valider le modèle en s'assurant de ses "bonnes" estimations.

La validation est une étape de contrôle, qui consiste à évaluer les performances du modèle avec les paramètres trouvés lors du calage sur une autre période. On obtient alors la performance du modèle en contrôle. On évalue ainsi la robustesse et la fiabilité du modèle.

2.3.3.1. Identification des périodes de calage et de validation

Conformément aux précédentes indications, les données ont été recueillies à partir de trois stations (Nangbéto, Tététou et Athiémé) le long du fleuve. Les stations de

Nangbéto et d'Athiémé, positionnées respectivement en amont et en aval du périmètre d'étude, ont été déterminantes pour définir les conditions limites du modèle. Afin d'assurer la fiabilité du modèle, la station de Tététou a été sélectionnée comme station témoin. Une analyse des données recueillies a permis d'identifier les années appropriées pour le calibrage et la validation, en se basant sur la construction d'un graphique de disponibilité des données et le calcul du taux de lacunes annuel et mensuel.

2.3.3.2. Indicateurs de performance du modèle en calage et en validation

Le principe général de l'analyse des performances est de comparer les débits calculés aux débits observés. La performance des simulations hydrologiques effectuées en calage ainsi qu'en validation peut être évaluée suivant deux approches :

- ✓ **L'approche qualitative (adéquation visuelle) :** Cette approche consiste simplement à représenter graphiquement les valeurs observées et les valeurs simulées, et, à partir d'une évaluation visuelle, à émettre un jugement sur la qualité de la simulation. Il est évident qu'un tel jugement manque d'objectivité, surtout quand on traite de séries chronologiques relativement longues.
- ✓ **L'approche quantitative :** plus rigoureuse, cette approche permet une évaluation et une comparaison raisonnablement objective des performances des modèles. Le critère doit donc être relatif, car il est très subjectif de dire qu'un modèle est bon ou mauvais de manière absolue. Par ailleurs, dans des objectifs de comparaison, il est beaucoup plus objectif de dire qu'un modèle est meilleur ou moins bon qu'un autre modèle.

Afin d'évaluer la robustesse prédictive de notre modèle, nous avons adopté ces deux approches. Des lignes de profil ont été tracées au niveau des trois stations pour recueillir les débits simulés. Le prétraitement de ces données a abouti à la création d'un fichier Excel intégrant les données observées et simulées par station. Les représentations graphiques ainsi que le calcul des critères de performance ont été réalisés à l'aide d'un algorithme Python.

Trois critères de performance différents ont été choisis : le critère de Nash-Sutcliffe, l'efficacité de Kling-Gupta (KGE) et le Critère de BIAIS. Dans les équations suivantes, Q_{obs} , Q_{sim} et n représentent respectivement les débits journaliers observés, les débits journaliers simulés au jour i et le nombre total de jours.

➤ Critère de Nash-Sutcliffe :

Ayant l'avantage d'être facilement interprété, le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe est indicateur de performance largement utilisé en hydrologie. Il exprime la proportion de la variance résiduelle entre les valeurs simulées et les valeurs observées

par rapport à la variance expliquée des valeurs observées. La variance résiduelle doit donc être le plus petit possible pour que le rapport soit minimal. Ce critère varie dans l'intervalle $[-\infty ; 1]$ et a. Si la valeur du critère est 1 le modèle est parfait par contre si la valeur est inférieure à zéro ça veut dire que le modèle n'explique pas mieux le comportement du bassin. Ce critère est largement utilisé en hydrologie à cause de sa simplicité. Il est défini par l'équation :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=N} (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=N} (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (12)$$

Néanmoins, le NSE très sensible aux valeurs extrêmes à cause du fait que les différences sont prises aux carrés²⁸. En effet, des versions modifiées du NSE ont été proposées pour le rendre moins sensible aux valeurs élevées, même si elles ont été très peu utilisées dans la littérature²⁸.

➤ Critère de BIAIS

Le biais assure que le volume total d'eau est préservé sur la période de calage, sans distinction de la manière dont l'eau est répartie dans l'hydrogramme. Plus le biais est proche de zéro, meilleure est la performance du système. Il mesure la propension du modèle à sous-estimer ou surestimer les débits observés et doit être réduit au minimum. Souvent, le critère de biais est normalisé par le débit moyen observé, ce qui permet d'obtenir l'erreur relative sur les volumes simulés par rapport à ceux observés à l'exutoire du bassin sur la période de simulation. Plus il est proche de 0, plus le modèle est parfait. Il se définit par :

$$BIAIS = \frac{\sum_{n=1}^N (Q_{obs,n}^2 - Q_{sim,n}^2)}{\sum_{n=1}^N Q_{obs,n}^2} \quad (12)$$

Ce critère est généralement utilisé pour ajuster les paramètres du modèle afin d'obtenir un bilan hydrologique simulé proche de celui estimé à partir des observations.

➤ Coefficient de performance KGE

Le Coefficient de Performance (KGE), ou Kling-Gupta Efficiency, est un indice de performance utilisé pour évaluer la précision d'un modèle hydrologique. Le KGE varie de moins l'infini à 1, avec une valeur de 1 indiquant une correspondance parfaite entre les simulations et les observations. Un KGE plus élevé suggère une meilleure performance du modèle. Il combine la corrélation, l'écart-type et le biais des simulations par rapport aux observations et se définit par l'équation suivante :

$$KGE = 1 - 2 \sqrt{(r - 1)^2 + (s - 1)^2 + (m - 1)^2} \quad (13)$$

s est le rapport des écarts-types des débits simulés et observés. Il mesure la variabilité relative des débits simulés et observés ;

r est le coefficient de corrélation entre les débits observés et les débits simulés ;

m est le rapport des moyennes des débits simulés et observés.

Ainsi, le critère permet de donner les mêmes poids aux trois composantes s , r et m . Gupta et al. (2009) estiment que le NSE ignore le poids relatif de chaque composante et que ce dernier dépend de la période de calage.

2.3.3.3. Objectif du choix des critères

Les modèles hydrologiques sont utilisés pour plusieurs applications parmi lesquelles la simulation et la prévision des débits en rivière²⁹. La calibration ou le calage du modèle hydrologique est un processus qui consiste à ajuster les paramètres du modèle itérativement de manière à faire correspondre la simulation de ce modèle aux observations, dans le cas présent les débits à l'exutoire du bassin versant. Il s'agit donc d'un problème d'optimisation. En général, un critère d'optimisation est défini pour effectuer le calage du modèle. Mais au fil des ans, plusieurs critères également appelé fonctions objectives ont été proposée et utilisée en modélisation hydrologique.

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que les critères de performance présentent tous des forces et des faiblesses. La performance des modèles est influencée par le choix du critère de calage. Ainsi, le choix des critères de performances dans le cadre de ce travail ont été effectué en tenant compte de l'hydrologie d'un bassin versant et des objectifs de l'étude, tout en se basant sur les conclusions tirées de la littérature.

HEC-RAS est un logiciel qui permet d'effectuer des calculs de débit stable et instable d'une rivière, capacité de transport de sédiments, calculs d'écoulement uniforme. L'élaboration d'un modèle hydraulique HEC-RAS nécessite une représentation exacte des données de terrain et les apports hydrologiques utilisés comme conditions aux limites. Ce logiciel est capable de modéliser des ouvrages hydrauliques qui se trouvent dans un tronçon du cours d'eau. Il permet de réaliser des sections transversales avec un coefficient de Manning variable, de différencier les zones actives et non actives dans un canal et de créer des sections transversales interpolées.

2.3.4. Cartographie des zones inondables

Les inondations entraînent l'immersion de nombreuses régions, submergeant des quartiers résidentiels, des terres agricoles et des infrastructures. Le débordement des rivières, notamment le fleuve Mono, provoquent également d'importants dégâts. Les événements de 2010 et 2019 ont marqué les mémoires, causant d'énormes dommages

dans le sud du Bénin. Les populations considèrent 2010 et 2019 comme étant les années pendant lesquelles il y a eu plus d'inondations durant les 20 dernières années ³⁰. Ces deux années servent de référence pour la modélisation des écoulements dans la basse vallée du Mono, afin de cartographier des zones à risques de débordement.

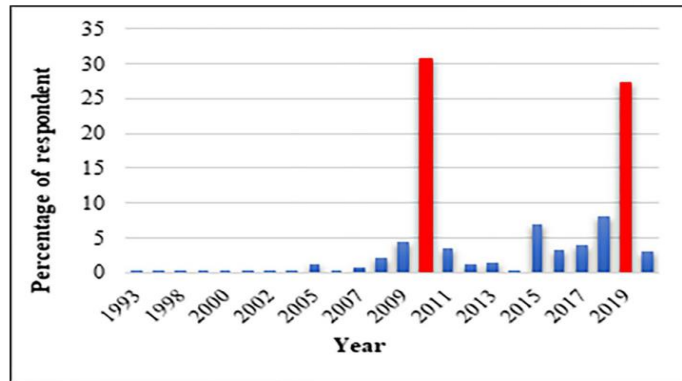


Figure 12 : Les années de grande inondation

³⁰

La cartographie des zones de débordement, issue de la modélisation HEC-RAS, implique une analyse minutieuse des résultats obtenus. En intégrant les données géographiques et topographiques, cette étape vise à définir les zones susceptibles d'être affectées lors de crues extrêmes. L'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) facilite la représentation spatiale des zones à risques.

3.4. Conclusion partielle

La méthodologie adoptée pour caractériser et modéliser les crues en aval du barrage de Nangbéto consiste d'abord en une analyse statistique des données de débits des stations d'Athiémé et de Nangbéto via le langage Python. Ensuite, la propagation des crues a été modélisée avec HEC-RAS, intégrant les paramètres hydrologiques et topographiques. Le modèle a été calibré et validé, utilisant des critères de performance comme le Nash-Sutcliffe, le BIAIS et le KGE. Cette approche rigoureuse a permis de cartographier les zones à risques de débordement, aboutissant à la proposition d'un Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) pour la vallée du Mono partagée entre le Bénin et le Togo.

Chapitre 3 :

Résultats et Discussions

4. Chapitre 3 : Résultats et discussion

4.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, les résultats prééminents, issus de l'application de la méthodologie élaborée antérieurement, sont présentés au moyen de graphiques, de cartes explicites et de tableaux, accompagnés d'une description détaillée. Ces résultats seront suivis d'une discussion approfondie visant à corroborer ou réfuter les hypothèses énoncées initialement dans le cadre de cette étude. De plus, des suggestions d'amélioration pour les méthodologies mises en œuvre seront avancées, accompagnées de recommandations pratiques visant à atténuer l'impact de ces inondations.

4.2. Caractérisation de la variabilité des événements hydro-climatiques en aval du barrage de Nangbéto

4.2.1. Analyse de la variation des débits à la station de Athiémé

L'objet de cette analyse est d'étudier de la variation des débits à la station d'Athiémé, visant à caractériser les phénomènes de crues à cet emplacement.

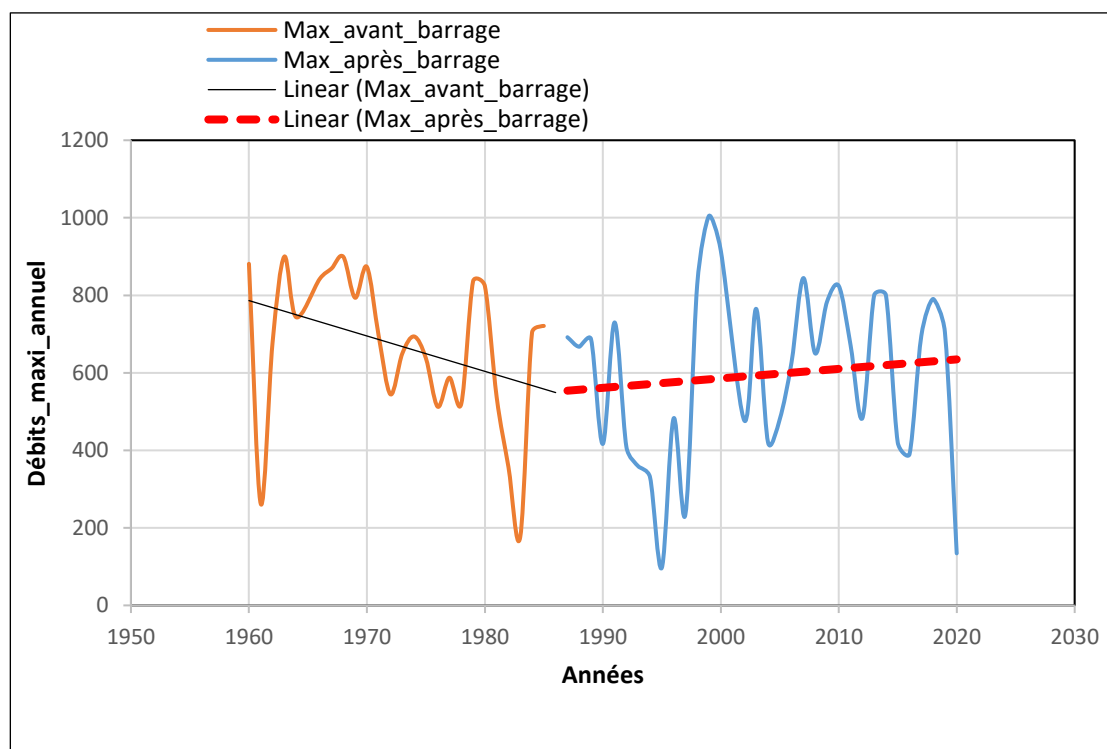


Figure 13 : Variation des intra-annuels des débits maximaux avant et après l'installation du barrage de Nangbéto à la station d'Athiémé

La figure 13 présente l'évolution des débits extrêmes annuels à la station d'Athiémé sur deux périodes distinctes : de 1960 à 1985, avant l'installation du barrage de Nangbéto, et de 1987 à 2020, après cette mise en place. L'objectif est d'évaluer l'influence du barrage sur les crues exceptionnelles à Athiémé. On constate une diminution progressive des débits extrêmes avant le barrage, indiquée par la courbe de tendance.

Cependant, la courbe linéaire sur l'ensemble de la période (Figure 13) montre une tendance à la hausse constante des valeurs extrêmes.

Notamment, pendant la première décennie suivant la mise en service du barrage (1988-1998), une régulation significative à la baisse des débits à Athiémé est observée. Cela suggère que le barrage a exercé un rôle de régulateur notable au cours de cette période initiale. Cependant, la tendance à la hausse ultérieure remet en question la durabilité de cette régulation dans le temps.

Ainsi, en considérant le constat initial d'une régulation positive du barrage au cours de la première décennie, suivi d'une augmentation des débits extrêmes, il est possible de conclure que l'efficacité régulatrice du barrage de Nangbéto semble être temporellement limitée. Cette observation souligne la nécessité d'une gestion dynamique et adaptative des ressources hydriques, tenant compte des évolutions à long terme pour assurer une régulation efficace des crues. Cette évaluation annuelle offre une perspective de la contribution du barrage à la régulation des débits à Athiémé.

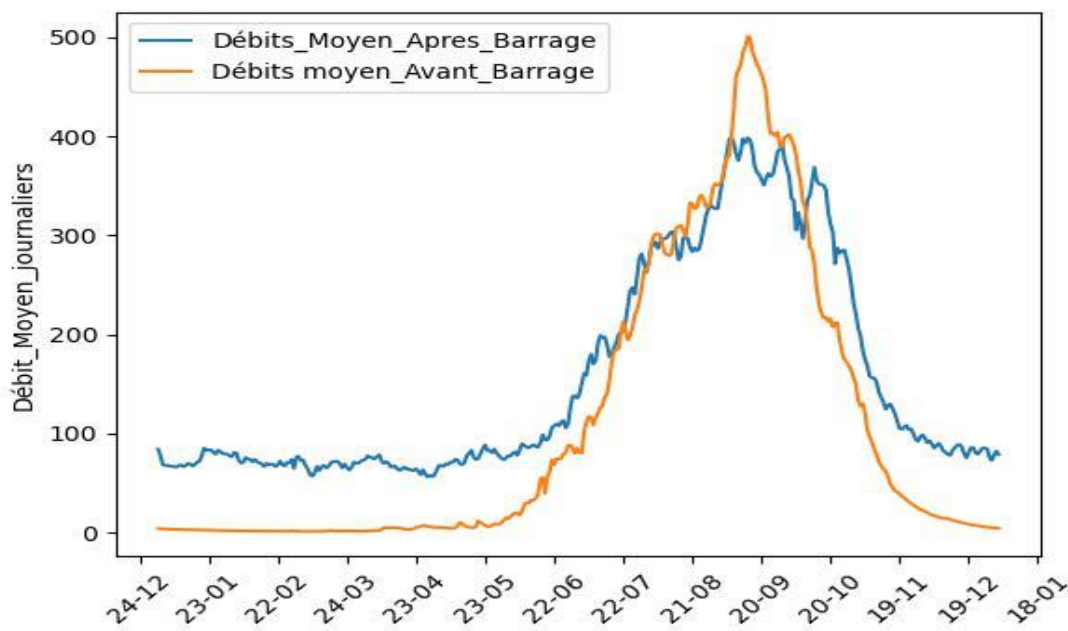


Figure 14 : Variation des débits moyens journaliers à Athiémé

L'observation de la figure 14 révèle qu'avant la mise en exploitation du barrage, les débits présentaient une variation moyenne de 0 m³/s à 35 m³/s pendant la saison de janvier à juin. Après cette période, on note une fluctuation des débits de 35 m³/s à environ 200 m³/s entre mi-juin et août. En revanche, postérieurement à l'installation du barrage, les débits moyens pendant la période d'étiage avoisinent les 100 m³/s, ce qui correspond au débit minimal du robinet prévu au niveau du barrage pour assurer le débit à l'aval. Cependant, durant la saison de crue, entre août et novembre, les débits moyens atteignaient environ 500 m³/s avant le barrage, tandis qu'après son installation,

ils sont régulés à 400 m³/s. Ces observations suggèrent que le barrage contribue à assurer une disponibilité d'eau en saison sèche et à atténuer moyennement les débits du fleuve mono à Athiémé en période de crues. Pour évaluer plus spécifiquement la capacité de régulation des débits du barrage, une analyse des valeurs extrêmes a été entreprise (Figure 15).

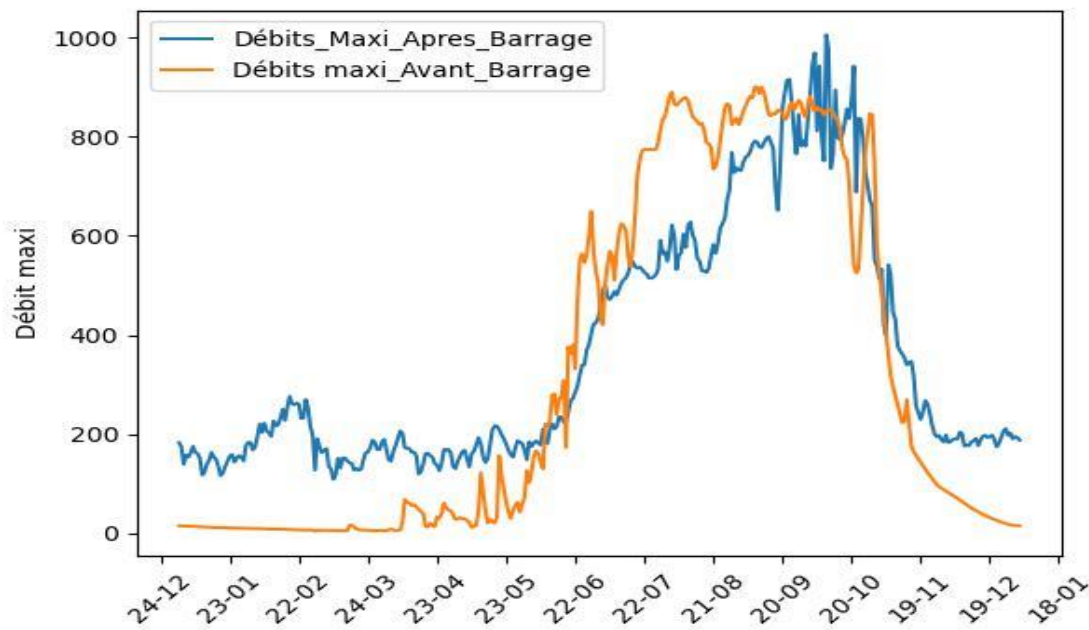


Figure 15 : Variation des débits maximaux journaliers à Athiémé

Avant la mise en exploitation du barrage, des fluctuations des débits inondables à Athiémé étaient enregistrées à partir du mois d'août jusqu'au mois de novembre. Toutefois, suite à l'installation du barrage, les débits inondables ne sont enregistrés qu'à partir de la fin du mois de septembre ou du début d'octobre. Il en découle que le barrage parvient à contrôler les débits extrêmes à Athiémé, bien que, une fois sa capacité de rétention atteinte, l'ouvrage ne puisse plus pleinement assurer son rôle de régulateur.

4.2.2. Analyse de la variation des débits entrants et sortants du barrage de Nangbéto

Dans le dessein d'identifier les facteurs déterminants des crues en aval du barrage de Nangbéto, une étude approfondie de la gestion des apports et des opérations de déversement d'eau est entreprise. Dans ce sens, l'analyse du volume annuel des apports revêt une importance capitale pour appréhender la répartition saisonnière de ces apports (Figure 16). Parallèlement, l'examen des débits entrants et sortants du barrage offre une perspective éclairante sur la gestion des ressources hydriques à cet emplacement (Figure 17). En guise de conclusion, la confrontation entre les débits extrêmes émanant du barrage et les débits extrêmes enregistrés à Athiémé met en exergue les conséquences des déversements d'eau en aval du barrage (Figure 18). Cette

démarche analytique vise à une appréhension approfondie des dynamiques hydrologiques dans la région d'étude.

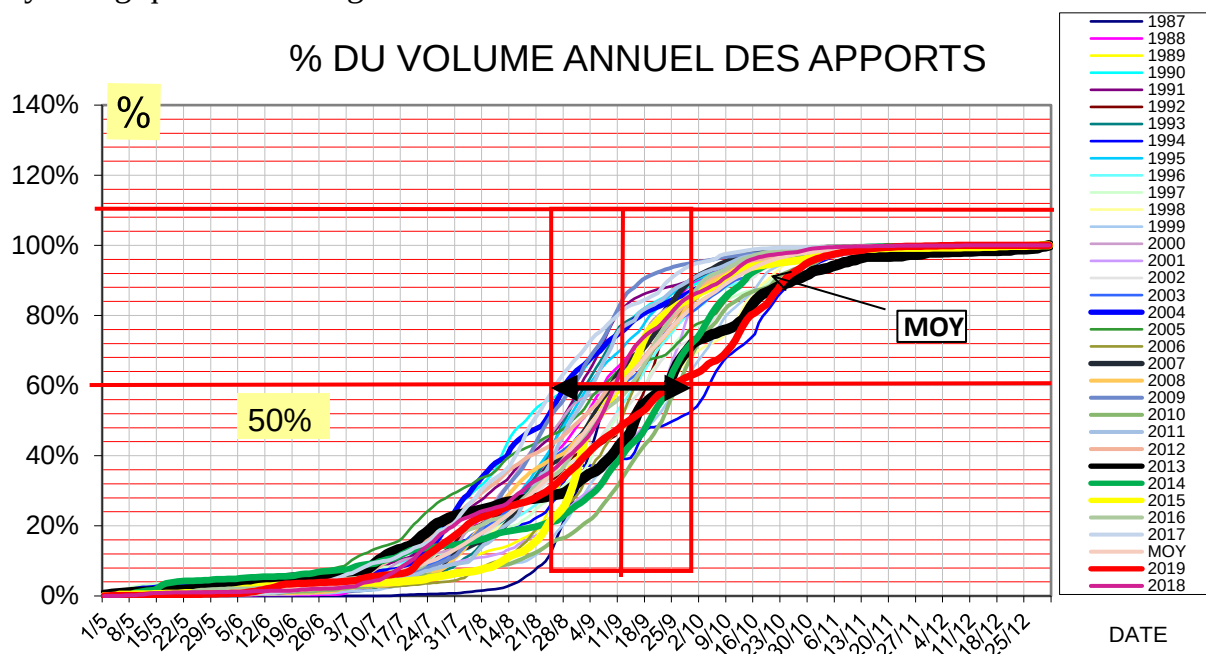


Figure 16 : Pourcentage du volume annuel des apports dans le barrage de Nangbéto

Les graphiques de la Figure 16 montrent la variation en pourcentage du volume total des apports mensuels par rapport à l'ensemble de l'année. Ces représentations graphiques mettent en évidence une croissance constante, oscillant de 0% à 100%, traduisant ainsi une augmentation continue du volume des apports tout au long de l'année. L'observation attentive de la figure révèle que le mois de septembre concentre environ 50% du volume annuel total des apports. Cette constatation souligne la nature critique de ce mois particulier. Il en découle la nécessité d'une vigilance accrue dans la planification de la gestion des ressources en eau pour le mois de septembre.

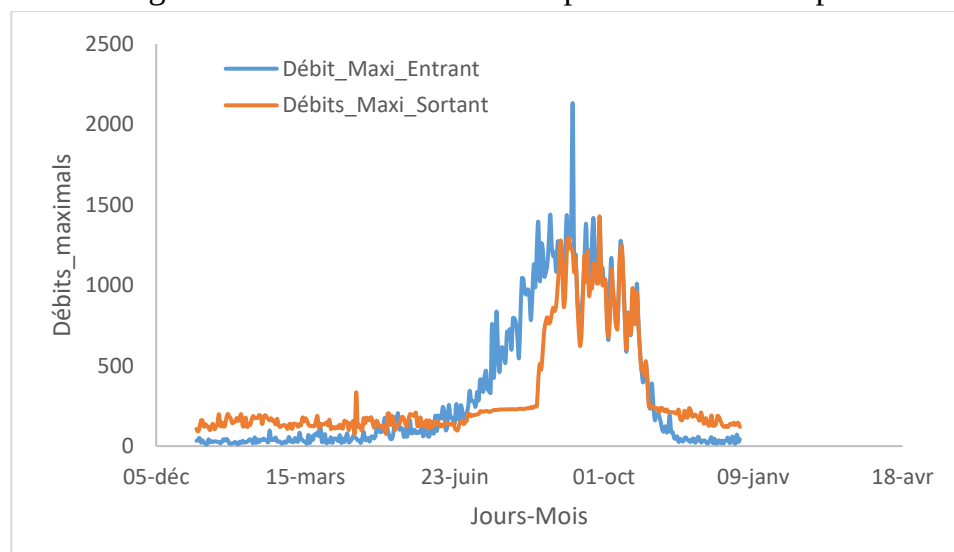


Figure 17 : Comparaison des débits entrants et des débits sortants du barrage de Nangbéto

L'analyse des deux graphiques relatifs aux débits entrants et sortants du barrage met en évidence une stabilité apparente du débit sortant, maintenu dans l'intervalle de 100 m³/s à 250 m³/s, correspondant à la période de basse eau. Entre juillet et mi-août, une augmentation soudaine des apports est observée, tandis que le débit sortant demeure quasiment constant. Ensuite, une brusque élévation des débits sortants, passant de 250 m³/s à 1200 m³/s en l'espace de quatre jours, correspondant à une opération d'ouverture des vannes.

Cette remarque indique que les lâchers pour évacuer le trop-plein débutent uniquement lorsque le volume maximal de rétention du barrage est atteint. Il semblerait en effet qu'il n'existe aucune politique formalisée de gestion des opérations d'ouverture des vannes par les responsables du barrage de Nangbéto. Les graphiques de la Figure 18 démontrent clairement que les débits sortants extrêmes (période des lâchers d'eau) de Nangbéto s'alignent de manière remarquable avec les débits de crues (période des débits inondables) à Athiémé.

Cette corrélation confirme la première hypothèse de cette étude qui stipule qu'en période de crues extrêmes, le barrage de Nangbéto ne joue plus pleinement son rôle de régulateur en aval. Cette remarque met en évidence la nécessité d'une approche plus planifiée et coordonnée dans la gestion des lâchers du barrage, afin d'atténuer les conséquences des crues en aval.

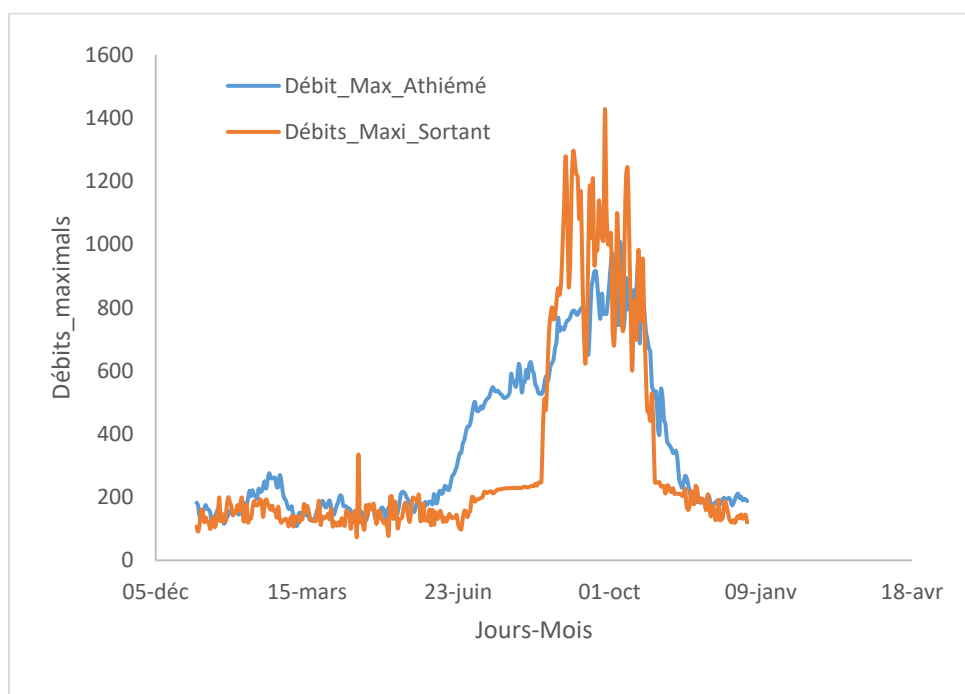


Figure 18 : Comparaison des débits maximaux sortant du barrage et des débits maximaux à Athiémé

4.3. Modélisation de la propagation des crues

La caractérisation des crues en aval du barrage de Nangbéto révèle de manière générale, que la période de crue fluviale sur le mono s'étend de la fin du mois d'août jusqu'à la fin du mois d'octobre, avec un pic observé au cours du mois de septembre. Depuis la construction du barrage de Nangbéto, diverses configurations d'hydrogrammes ont été observées à Athiémé, présentant des distinctions marquées les unes par rapport aux autres. Néanmoins, dans la plupart des cas, l'analyse des hydrogrammes des pics de débits journaliers met en évidence une fluctuation persistante, parfois étendue sur plusieurs jours voire des semaines.

Afin de calibrer et valider le modèle, certaines années spécifiques ont été identifiées pour servir de référence dans cette étude.

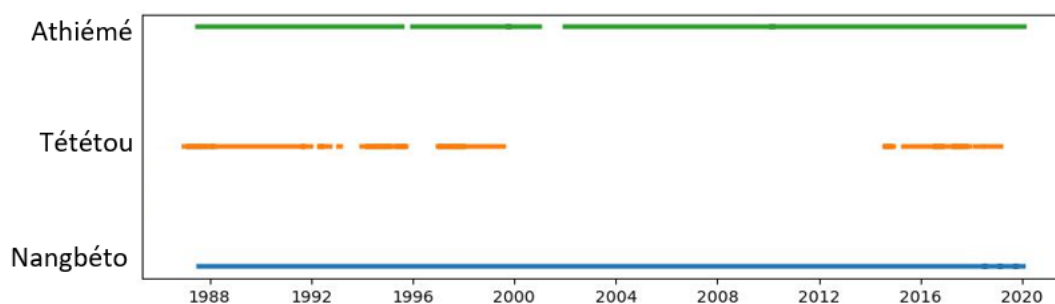


Figure 19 : Disponibilité des données sur les différentes stations

Suite à l'analyse des données recueillies sur les diverses stations, les années 2016, 2017 et 2018 ont été identifiées comme la période propice au calibrage. En parallèle, les années 1997 ; 1998 et 2015 ont été consacrées comme la période dédiée à la validation.

4.3.1. Calage et validation du modèle

Le calibrage du modèle hydraulique HEC-RAS s'effectue par le biais de multiples simulations, en ajustant notamment le coefficient de Manning-Strickler ainsi que d'autres paramètres impactant le modèle. Les résultats de ces simulations sont présentés graphiquement (fig. 20, 21, 22).

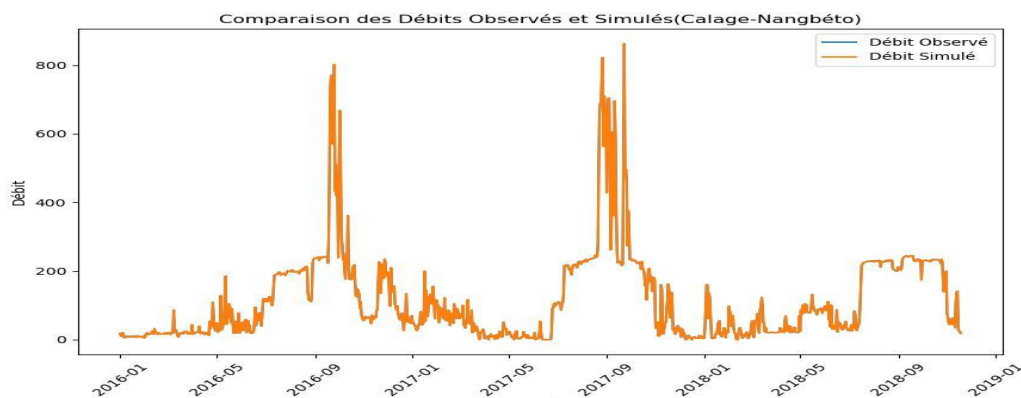


Figure 20 : Visualisation des débits observés et simulés en calage à Nangbéto

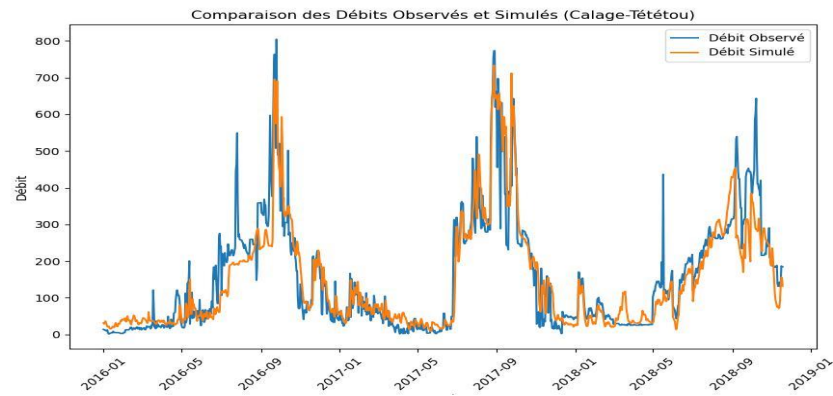


Figure 21 : Visualisation des débits observés et simulés en calage à Tététou

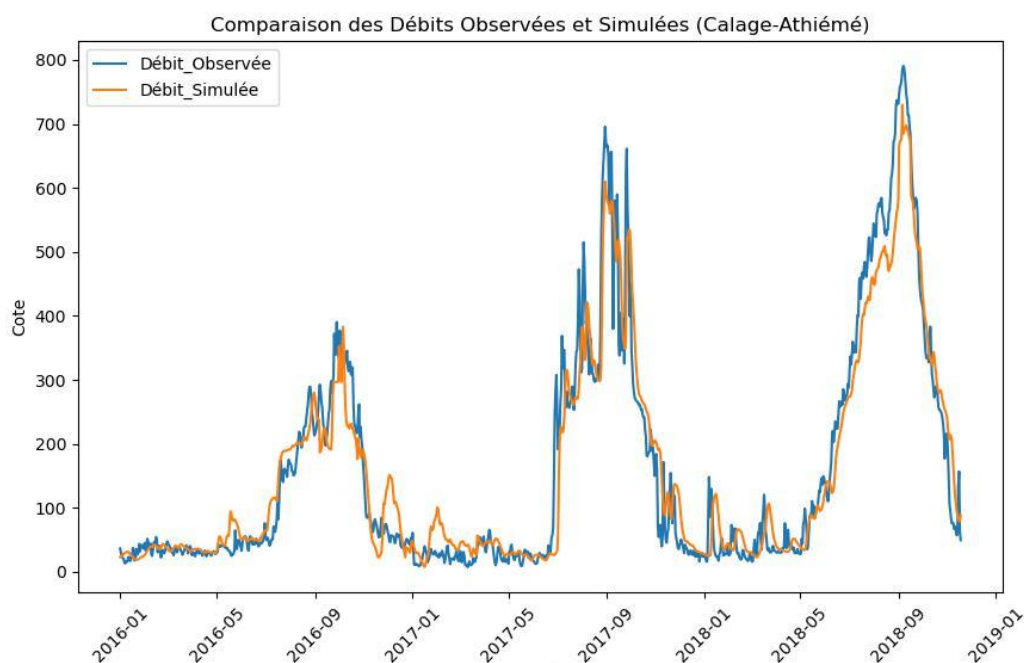


Figure 22 : Visualisation des débits observés et Simulés en calage à Athiémé

L'observation des graphiques comparatifs des débits observés et simulés aux stations de Nangbéto, Tététou et Athiémé, en utilisant les données d'entrée provenant de la station de Nangbéto, montre des résultats significatifs. En premier lieu, la figure 20 démontre que le modèle reproduit fidèlement les débits observés à Nangbéto, ce qui est cohérent étant donné que ces données ont été utilisées comme entrée du modèle à ce niveau. Cela confirme la capacité du modèle à bien ajuster ses résultats en fonction des données fournies.

En ce qui concerne les stations témoins de Tététou et Athiémé, l'analyse des graphiques des figures 21 et 22, met en évidence une proximité marquée entre les débits simulés et les observations réelles. Cette concordance suggère une performance satisfaisante du modèle hydraulique construit pour reproduire les conditions hydrologiques à ces emplacements. Ces résultats témoignent de la capacité du modèle à reproduire le

comportement hydrologique du sous-bassin versant en réponse des données d'entrées par Nangbéto.

En se basant sur cette approche qualitative, on peut conclure que le calage du modèle hydraulique semble être robuste, avec une adéquation aux observations à Nangbéto et une capacité acceptable à reproduire les débits aux stations témoins. Cependant, l'approche quantitative utilisée permet de réévaluer mathématiquement la fiabilité du modèle (Tableau 3).

Tableau 3 : Critères de performances en calage

	NSE	KGE	BIAS
Nangbéto	0,99	0,99	0,02
Tététou	0,81	0,86	-7.08
Athiémé	0,92	0,88	-1.85

Les critères de performance utilisés pour évaluer la qualité du modèle hydraulique offrent une perspective quantitative sur sa fiabilité. À la station de Nangbéto, les résultats sont remarquables avec un coefficient de Nash de 0,99, indiquant une concordance exceptionnelle entre les débits observés et simulés. De plus, le coefficient de performance KGE de 0,99 confirme la capacité du modèle à reproduire les variations temporelles, tandis que le faible coefficient de biais de 0,02 souligne la précision des prédictions.

À la station de Tététou, bien que les valeurs de Nash (0,81) et de KGE (0,86) demeurent élevées, le coefficient de biais de -7,08 suggère une tendance du modèle à sous-estimer les débits. À Athiémé, bien que les résultats restent solides avec Nash à 0,92 et KGE à 0,88, le coefficient de biais de -1,85 souligne une légère sous-estimation, beaucoup moins prononcée que celle observée à Tététou.

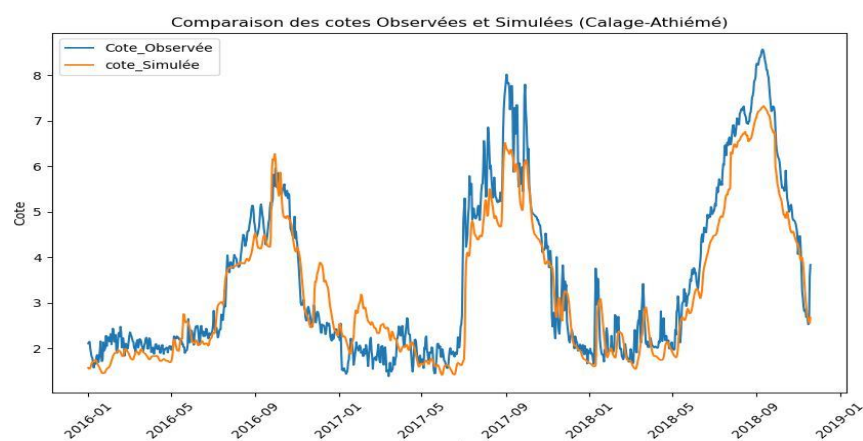


Figure 23 : Visualisation des cotes en calage à Athiémé

Tableau 4 : Critères de performances en calage des cotes

Critères	NSE	KGE	BIAS
Athiémé	0,88	0,84	-0,21

L'évaluation des côtes du fleuve à la station d'Athiémé offre une perspective complémentaire sur la performance du modèle, en particulier pour la représentation de la géométrie du cours d'eau. Les similitudes marquées dans les formes des courbes entre les cotes observées et simulées indiquent une adéquation générale du modèle à reproduire les variations de niveau d'eau. Néanmoins, la légère sous-estimation des cotes extrêmes suggère une possible marge d'amélioration pour une reproduction plus précise des événements exceptionnels.

En termes de critères de performance, les résultats sont globalement acceptables. Un coefficient de Nash de 0,88 indique une correspondance satisfaisante entre les cotes observées et simulées, reflétant la qualité du calage. Le coefficient de performance KGE de 0,84 confirme la capacité du modèle à reproduire les variations temporelles, bien que légèrement en deçà de l'idéal. Le faible biais de -0,21 indique une tendance marginale à sous-estimer les côtes, tout en demeurant dans des limites acceptables.

Ces résultats suggèrent que le modèle conserve une bonne capacité de généralisation, bien que des variations dans les performances soient observées entre les différentes stations. Cependant, une validation plus approfondie, à l'aide de données indépendantes, permettra de consolider la fiabilité du modèle dans des conditions diverses et confirmer sa capacité à fournir des résultats précis sur l'ensemble de la région d'étude (Figure 24, 25, 26 et le tableau 5).

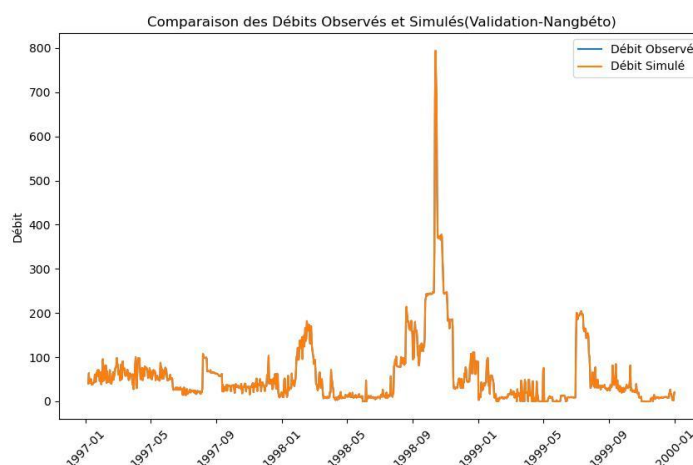


Figure 24 : Visualisation des débits observés et simulés en validation à Nangbéto

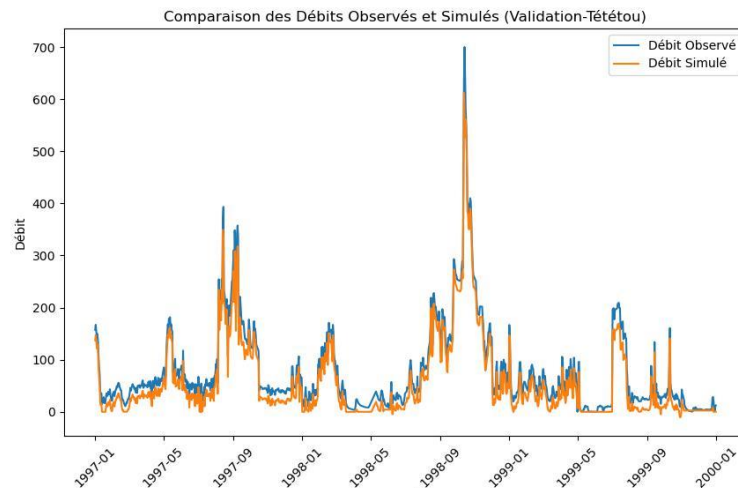


Figure 25 : Visualisation des débits observés et Simulés en validation à Tététou

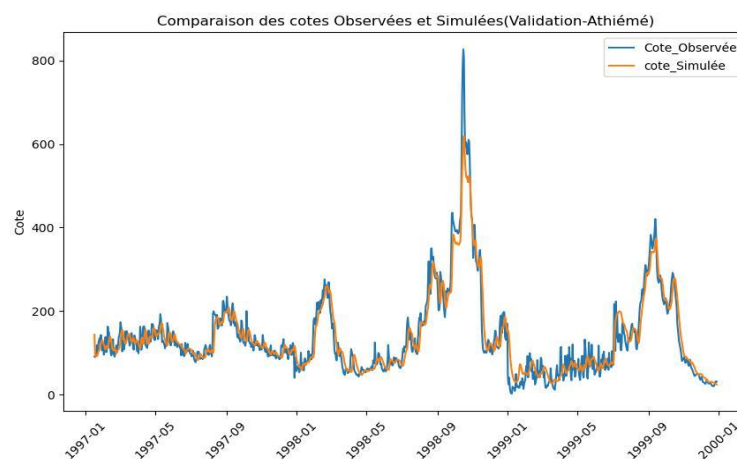


Figure 26 : Visualisation des débits observés et simulés en validation à Athiémé

Tableau 5 : Critères de performances en validation

Critères	NSE	KGE	BIAS
Nangbéto	0,99	0,97	0,02
Tététou	0,92	0,74	-19,01
Athiémé	0,88	0,84	-0,35

Les résultats observés lors de la validation, tant au niveau des graphiques que des critères de performance, confirment la robustesse du modèle hydraulique dans la reproduction des débits. La cohérence entre les débits simulés et observés, illustrée graphiquement, renforce la crédibilité du modèle dans des conditions indépendantes.

Les critères de performance, qui demeurent acceptables au cours de la validation, témoignent de la capacité du modèle à maintenir une bonne adéquation avec les

données observées même en dehors du contexte du calage initial. Cette constance dans les performances, associée à des résultats graphiques probants, renforce la confiance dans la capacité du modèle à fournir des prédictions fiables pour les débits dans la région étudiée.

La combinaison des résultats graphiques et des critères de performance acceptables pendant la validation confirme la performance globale du modèle hydraulique. Cela suggère que le modèle est bien ajusté et démontre une capacité prédictive robuste pour les débits dans des conditions hydrologiques variées.

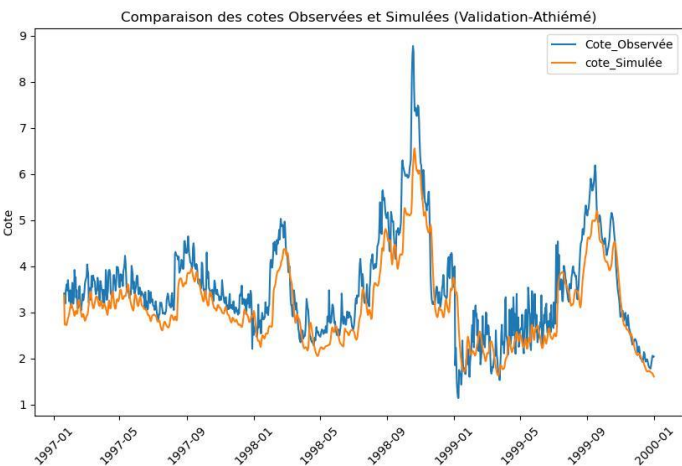


Figure 27 : Visualisation des cotes en validation à Athiémé

Tableau 6 : Critères de performances en validation des cotes

Critères	NSE	KGE	BIAS
Athiémé	0,71	0,76	-0,35

Les résultats de la validation renforcent la fiabilité du modèle, avec des critères de performance également jugés acceptables. Un coefficient de Nash de 0,71 suggère une concordance satisfaisante entre les cotes observées et simulées, confirmant la capacité du modèle à généraliser au-delà des données d'entraînement. Le coefficient de performance KGE de 0,76 témoigne d'une reproduction adéquate des variations temporelles, tandis que le biais de -0,35, bien que légèrement négatif, demeure dans des limites tolérables.

Cette cohérence entre les résultats de calibration et de validation confirme la capacité du modèle à maintenir sa performance au-delà du jeu de données initial, renforçant ainsi sa crédibilité dans la modélisation des variations de cote du fleuve à la station d'Athiémé. Les légères nuances dans les critères de performance offrent des pistes pour des ajustements potentiels, permettant d'affiner davantage la précision du modèle dans des conditions diverses.

4.3.2. Cartographie des zones à risque de débordement

Les résultats de la modélisation des scénarios de 2010 et de 2019 à l'aide du modèle calé et validé, révèle les potentiels débordement du fleuve Mono dans la basse vallée lors d'événements extrêmes (Figure 28). Il est notable que les débordements enregistrés avec le scénario de 2010, sont plus importants par rapport à ceux enregistrés avec l'évènement de 2019, bien que ce dernier ne soit pas négligeable. Toutefois, les zones de débordement demeurent presque identiques lors de ces deux événements exceptionnels.

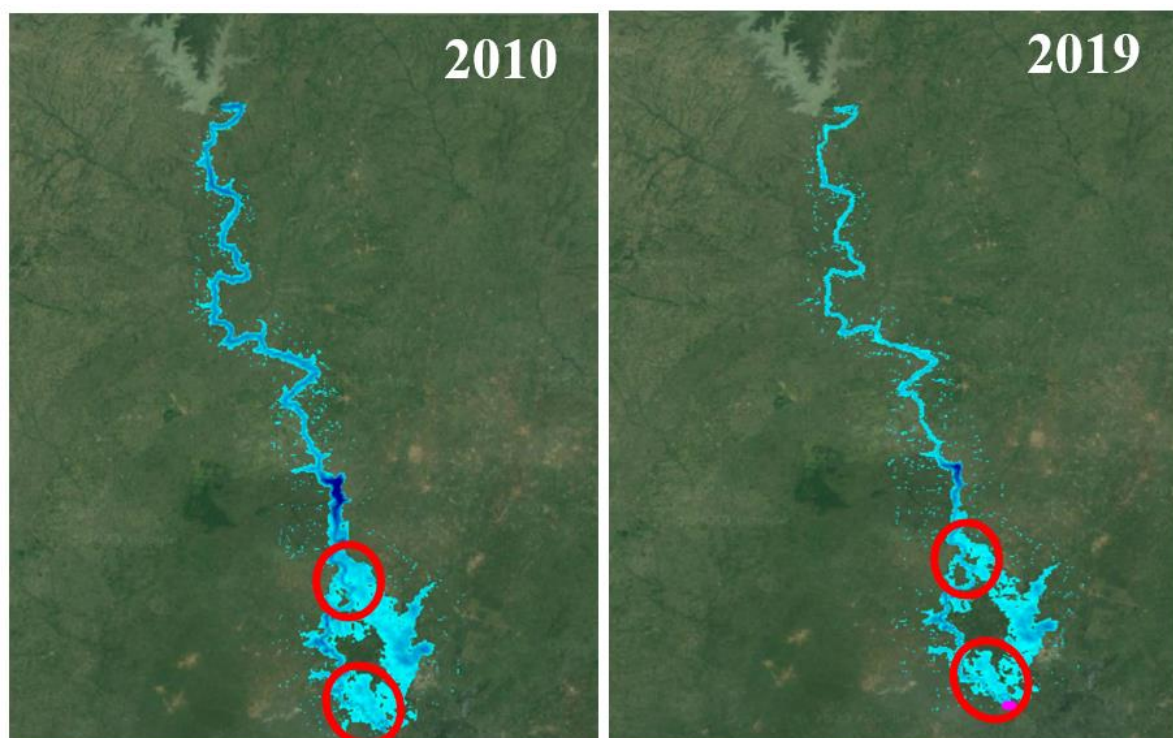


Figure 28 : Cartes des zones à risques de débordement considérant les événements de 2010 et 2019

Cette cartographie dévoile qu'il existe un risque élevé de débordement du fleuve Mono dans la basse vallée lors d'événements extrêmes. Ces débordements sont observés des deux côtés du fleuve, mais plus considérables du côté du Bénin. Dans la section considérée, les communes de Djakotomey, Dogbo et Athiémé sont les plus exposées du côté du Bénin. Du côté du Togo, la région de Yoto est la zone exposée au débordement du fleuve. La deuxième hypothèse de recherche est donc infirmée. Toutefois, il importe de noter que les débordements sont plus importants dans la commune d'Athiémé que les autres communes de la vallée.

Ces conclusions indiquent clairement que l'impact du barrage se manifeste dans les deux pays partageant le cours d'eau, et ce, souligne l'importance d'une collaboration étroite entre le Togo et le Bénin pour la lutte contre les inondations dans ces régions spécifiques.

Ce résultat offre une vision claire des zones à risque, permettant une meilleure compréhension des secteurs exposés aux débordements du fleuve Mono. Ces informations peuvent servir de base pour le développement de stratégies de gestion des risques et d'atténuation, ainsi que pour la planification des interventions d'urgence dans ces zones spécifiques.

4.4. Proposition d'un PPRI

La gestion des installations hydrauliques, particulièrement celle du barrage de Nangbéto sur le fleuve Mono, se révèle être une tâche complexe en raison de l'évolution du bassin hydrographique. Très souvent, les responsables de ces installations font face à des dilemmes entre des impératifs économiques et sociaux. La modélisation numérique des écoulements fluviaux est devenue une approche courante pour étudier les effets des événements hydrologiques et les conséquences des aménagements spécifiques.³¹

Les résultats obtenus de cette étude de modélisation, soulignent que les opérations d'ouverture des vannes du barrage de Nangbéto semblent être déclenchées uniquement lorsque le barrage atteint sa capacité maximale. Ce constat suscite des inquiétudes quant à la planification des opérations d'ouverture des vannes. Par ailleurs, il est également observé que les lâchers du barrage coïncident avec la période des crues extrêmes à Athiémé. Ce résultat souligne la non maîtrise des opérations de déversement du barrage.

À la lumière de ces résultats, l'importance d'une approche plus planifiée et coordonnée dans la gestion du barrage s'avère impératif. C'est pourquoi, dans cette étude, au-delà de la modélisation hydrologique, il est proposé un schéma simple de prévision des crues en aval du barrage de Nangbéto et présenté de façon non rigoureuse. Ce plan repose principalement sur :

- ✓ La maîtrise des apports dans le barrage pour mieux planifier les scénarios de turbinage ;
- ✓ La prédiction des débits et hauteurs d'eau en tout point du fleuve dans la basse vallée du Mono ;
- ✓ La maîtrise du temps de propagation des crues entre le barrage et la station d'Athiémé pour l'amélioration du Système d'Alerte Précoce en temps réels dans la basse vallée.

L'évaluation du temps de propagation des crues le long du fleuve entre les stations de Nangbéto et Athiémé est essentielle pour comprendre et anticiper les inondations, ainsi que pour mettre en place des mesures efficaces de gestion des risques. L'analyse des hydrogrammes de crue simulée pour le scénario de 2019 révèle des écarts significatifs dans le timing des pics de crue entre les deux stations (Figure 29).

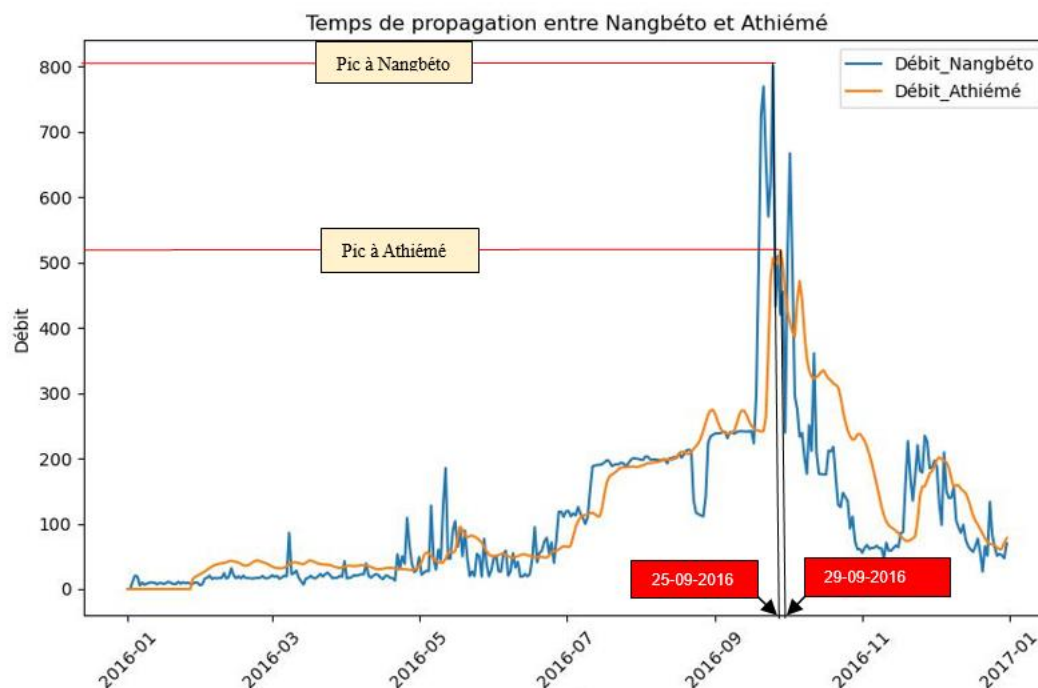


Figure 29 : Graphique des courbes de propagation des débits entre Nangbéto et Athiémé

Le pic de crue est enregistré le 25 septembre à la station de Nangbéto, tandis qu'il est observé le 29 septembre à Athiémé. Cette différence de quatre jours entre les deux pics de crue indique un délai de propagation de la crue le long du fleuve. Ce laps de temps est crucial pour prévoir les inondations et mettre en place des mesures préventives dans les zones aval.

Cette évaluation souligne l'importance de surveiller de près les variations des niveaux d'eau le long du fleuve et de disposer d'un schéma simple de prévision prenant en compte le temps de propagation et les niveaux d'alerte du SAP sur le fleuve Mono (Tableau 7) pour prévenir les inondations et réduire les dommages potentiels aux populations et aux infrastructures situées en aval.

Tableau 7 : Les niveaux d'alerte suivant le fleuve mono à Athiémé

Niveau d'alerte	Ouémé à Savè	Ouémé à Zagnanad	Ouémé à	Niveau à Malanvill	Mono à
Verte (cm)	0- 600	0 - 625	0 - 550	0 - 675	0 - 575
Jaune (cm)	600-775	625-750	550 - 700	675 - 775	575 - 700
Orange (cm)	775-900	750 -850	700 - 800	775 - 850	700 - 800
Rouge (cm)	900 et +	850 et +	800 et +	850 et +	800 et +

Source ³²

Le modèle numérique développé fournit des prévisions sur le niveau de l'eau, les vitesses et les débits à Athiémé. En intégrant le temps de propagation des crues entre la station de Nangbéto et celui d'Athiémé, le modèle développé permet en effet de prédire 3 jours à l'avance les hauteurs d'eau à Athiémé. En se basant sur les niveaux d'alerte du SAP, les prévisions du modèle peuvent permettre de déclencher très tôt, soit 3 jours d'avance, ce qui donne le temps aux autorités locales de prendre les mesures nécessaires pour réduire les risques d'inondation.

Le développement des outils numériques de prévision a pour principale mission de rendre conviviale l'utilisation des modèles, fournissant les informations, contrôles et commandes nécessaires pour atteindre les objectifs de gestion quotidienne³³. En anticipant le comportement hydrologique du cours d'eau entre le barrage et la station d'Athiémé, le PPRI vise à accroître la sécurité des riverains en aval de l'ouvrage, notamment lors d'événements climatiques intenses de courte durée. Ainsi, le schéma de prévision proposé (Figure 30), permet au gestionnaire de maîtriser les risques d'inondation dans la vallée du Mono.

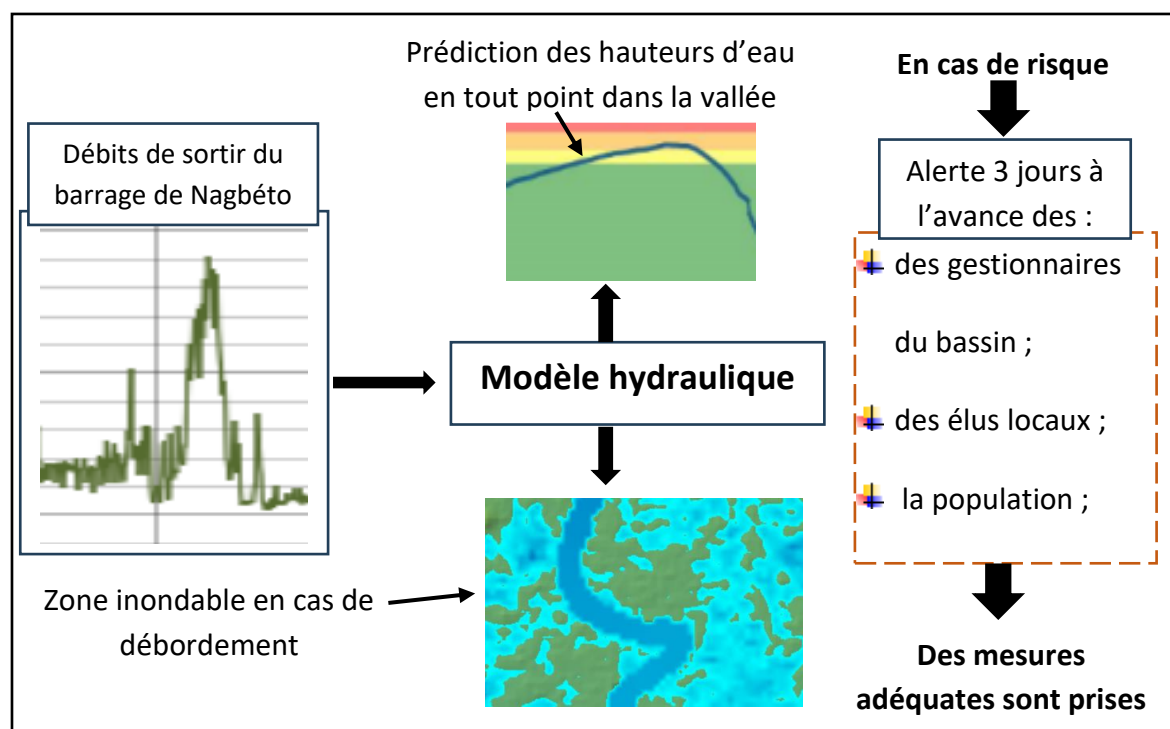


Figure 30 : Schéma simple de prévision de crues en temps réel dans la basse vallée du Mono

5. Discussion

L'analyse de la variation des débits maximaux à Athiémé et celle des extrêmes entrants et sortants à Nangbéto a permis de mettre en évidence le lien entre l'exploitation de l'ouvrage hydraulique et les événements d'inondation récurrente dans la basse vallée du bassin versant. Les résultats de l'étude à l'exutoire d'Athiémé révèlent que l'installation du barrage n'a pas eu d'effet significatif sur les crues extrêmes dans la vallée à long terme. Ce résultat confirme celui de Ago *et al* (2005), qui ont conclu que le fonctionnement du barrage n'a pas modifié de manière significative la variation interannuelle des débits annuels à l'aval, dans une étude portant sur l'analyse des inondations en aval du barrage de Nangbéto sur le fleuve Mono.

L'étude de la tendance de l'évolution des crues extrêmes à Athiémé a permis d'affirmer que les débits maximums à Athiémé sont en augmentation progressive. Ce résultat concorde avec les résultats de Houngue *et al* (2023), qui indiquent que les événements de périodes de retour de 10 ans entre 1987 et 2010 devraient devenir des événements de période de retour de 2 ans dans les scénarios de changement climatique.

La comparaison des débits entrant et sortant du barrage a montré qu'entre septembre et novembre, les débits entrants sont sensiblement équivalents aux débits sortants. Cette observation corrobore les résultats de Amoussou *et al* (2015), qui ont démontré que les débits d'entrée dans le barrage de Nangbéto sont presque équivalents aux débits de sortie du barrage, surtout lors des crues.

Ensuite, l'analyse simultanée des débits maximaux sortant du barrage et ceux de la station d'Athiémé a permis de comprendre l'opinion des populations estimant que le barrage est la cause principale des inondations dans la vallée du Mono. Cette étude comparative a montré que la période pendant laquelle les débits inondables sont enregistrés à Athiémé concorde parfaitement avec l'intervalle des gros débits sortant du barrage, qui n'est rien d'autre que les lâchers d'eau.

Travaillant sur le sujet "Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin)", (Amoussou *et al*, 2014) ont souligné que l'utilisation du modèle GR4J pour la modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto serait hasardeuse. Dans le cadre de cette étude, l'application du modèle HEC-RAS au sous-bassin en aval du barrage de Nangbéto a donné des résultats satisfaisants, avec des valeurs acceptables des critères de performance lors du calibrage et de la validation. Le modèle parvient à reproduire la forme de l'hydrogramme en respectant le début et la fin, avec une légère sous-estimation des débits de pointe, expliquée par les fluctuations fréquentes observées sur les hauteurs d'eau. Ces résultats confirment la pertinence de la recommandation de Amoussou *et al* (2014).

La modélisation des écoulements avec les scénarios de 2010 et de 2019, identifiés comme des événements ayant eu une grande ampleur dans la vallée du Mono, a montré que le relief très plat de la zone ainsi que sa faible pente jouent un rôle essentiel dans le débordement du cours d'eau. C'est donc à juste titre que Klassou et al (2020) affirment qu'outre les perturbations du régime pluviométrique dont dépend celui hydrologique, les caractéristiques physiographiques du bassin du Mono sont en partie des facteurs déterminants dans la vulnérabilité des communautés riveraines aux inondations. Ce constat, effectué suite aux résultats de la simulation de la propagation des crues en aval du barrage de Nangbéto, rejoint également celui de Gbaguidi (2011), qui a montré que le relief relativement plat de la ville de Cotonou n'est pas favorable à un drainage naturel.

Les résultats de la propagation des crues de 2010 et celles de 2019 ont révélé que l'événement de 2010 reste celui qui a eu le plus d'ampleur. Ce résultat est également en conformité avec celui de Dossoumou et al (2023).³⁰ Il serait donc judicieux de mettre en place des ouvrages d'assainissement pour orienter l'écoulement de l'eau dans les zones à risque de débordement. C'est d'ailleurs ce qui justifie les différents projets proposés dans le PPRI. Les deux pays partageant le bassin se doivent de s'impliquer dans ces actions pour une bonne mise en œuvre.

Recommandation

6. Conclusion générale et perspectives

L'étude menée sur la caractérisation et la modélisation de la propagation des crues à l'aval du barrage hydro-électrique de Nangbéto a fourni une compréhension approfondie des mécanismes hydrologiques dans le bassin du Mono. L'objectif principal est de construire un modèle hydraulique, permettant de mieux simuler la propagation des crues dans la zone et d'identifier les zones de débordements, afin de proposer des mesures d'adaptation durable pour minimiser les risques d'inondation.

La modélisation hydrodynamique, réalisée avec le modèle HEC-RAS, a permis de cartographier les zones à risque de débordement. Les résultats de la validation attestent de la robustesse du modèle dans la reproduction des hauteurs et débits, renforçant ainsi la confiance dans sa capacité à fournir des prédictions fiables, même dans des conditions indépendantes du calage initial. Les portions à risque de débordement identifiées se localise dans les communes de Djakotomey, Dogbo, et Athiémé. La proposition d'un Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) représente une contribution majeure de cette étude. Le PPRI offre une approche particulière pour améliorer la gestion et la prise de décision pendant les périodes de hautes eaux. Sa mise en œuvre, nécessitant la collaboration active des parties prenantes béninoises et togolaises, souligne l'importance cruciale de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans la région.

Cette étude fournit des solutions concrètes pour la gestion optimale du barrage de Nangbéto et des ressources en eau en aval du bassin du Mono. Les recommandations formulées à travers le PPRI offrent des pistes tangibles pour une gestion durable et adaptative des risques d'inondation. Les résultats obtenus, appuyés par une méthodologie rigoureuse, constituent une base de connaissances scientifiques nécessaires pour guider les futures recherches et les décisions politiques visant à assurer la résilience des écosystèmes aquatiques et des communautés locales dans cette région complexe et dynamique.

Pour compléter ce travail, il est envisageable :

- De poursuivre la recherche sur les tendances du changement climatique dans la région du bassin du Mono, afin d'analyser les projections futures des paramètres climatiques tels que les précipitations, les températures et les extrêmes climatiques pour évaluer leur impact potentiel sur le régime hydrologique ;
- D'approfondir la recherche sur les meilleures pratiques pour l'optimisation des opérations de lâcher d'eau du barrage. Explorer les méthodes pour équilibrer la rétention d'eau pour la production d'énergie tout en minimisant les risques d'inondation en aval ;
- Evaluer l'impact économique du PPRI ;
- Mettre à jour ce modèle hydraulique chaque 5ans en fonction des changements climatique.

7. Table des matières

Dédicace	3
Remerciements	4
Résumé	5
Abstract	6
Sommaire	7
Liste des sigles et acronymes	9
Liste des tableaux	10
Liste des figures	11
Liste des photos	12
1. Introduction générale	14
1.1. Contexte et justification de l'étude.....	14
1.2. Revue de littérature	15
1.2.1. Généralités sur les inondations.....	15
1.2.2. Inondations et enjeux socioéconomiques, humains et environnementaux.....	19
1.2.3. Le SAP-BENIN.....	22
1.2.4. Etudes antérieures sur le bassin du Mono.....	23
1.2.5. La construction du barrage de Nangbéto.....	24
1.3. But de la recherche	25
1.4. Problème et questions de recherche	25
1.5. Objectifs du mémoire.....	26
1.5.1. Objectif général	26
1.5.2. Objectifs spécifiques	26
1.6. Hypothèses de recherche.....	26
1.7. Limites de l'étude	26
1.8. Résultats attendus de l'étude et cibles	26
1.9. Intérêt de l'étude	27
1.10. Grandes divisions du mémoire.....	27

2. Chapitre 1 : Présentation du milieu d'étude	29
2.1. Introduction.....	29
2.2. Situation géographique du milieu d'étude.....	29
2.3. Hydrologie du bassin versant du Mono	30
2.3.1. Climat du bassin du Mono.....	30
2.3.2. Régime pluviométrique	31
2.4. Hydrogéologie du bassin de Mono.....	32
2.5. Les reliefs du bassin versant du Mono	33
2.6. Sols	34
2.7. Les différents types de végétation en aval du barrage de Nangbéto	34
2.8. Hydrographie.....	35
Conclusion partielle.....	37
3. Chapitre 2 : Données, outils et méthodes.....	39
3.1. Introduction.....	39
3.2. Données utilisées	39
3.3. Méthodologie de traitement des données	39
3.3.1. Caractérisation de la variabilité des évènements hydro-climatiques en aval du barrage de Nangbéto	39
3.3.2. Modélisation de la propagation des crues	40
3.3.3. Description du logiciel HEC-RAS	41
3.3.4. Calcul de la propagation des crues en régime d'écoulement non permanent	41
2.3.3. Calage et validation du modèle.....	44
2.3.4. Cartographie des zones inondables	47
3.4. Conclusion partielle.....	48
4. Chapitre 3 : Résultats et discussion.....	50
4.1. Introduction.....	50
4.2. Caractérisation de la variabilité des évènements hydro-climatiques en aval du barrage de Nangbéto	50
4.2.1. Analyse de la variation des débits à la station de Athiémé.....	50
4.2.2. Analyse de la variation des débits entrants et sortants du barrage de Nangbéto.....	52
4.3. Modélisation de la propagation des crues	55

4.3.1. Calage et validation du modèle.....	55
4.3.2. Cartographie des zones à risque de débordement	61
4.4. Proposition d'un PPRI.....	62
5. Discussion	66
6. Conclusion générale et perspectives	68
7. Table des matières.....	69
8. Références bibliographiques	72
9. Annexes.....	76
9.1. Annexes I : Code python pour l'analyse des données.....	76
9.2. Annexe II : Modelisation.....	77

8. Références bibliographiques

1. Gbaguidi TB. SYSTEME D'INFORMATIONS ET REPRESENTATIONS CARTOGRAPHIQUES POUR LA GESTION DES INONDATIONS A COTONOU. Published online 2011.
2. Houngue NR, Almoradie ADS, Thiam S, et al. Climate and Land-Use Change Impacts on Flood Hazards in the Mono River Catchment of Benin and Togo. *Sustainability*. 2023;15(7):5862. doi:10.3390/su15075862
3. Dimon F, Dovonou F, Adjahossou N, et al. Caractérisation physico-chimique du lac Ahémé (Sud Bénin) et mise en relief de la pollution des sédiments par le plomb, le zinc et l'arsenic. *J Soc Ouest-Afr Chim*. 2014;37:36-42.
4. Amoussou E. *Variabilité Pluviométrique et Dynamique Hydro-Sédimentaire Du Bassin Versant Du Complexe Fluvio-Lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'ouest)*. PhD Thesis. Université de Bourgogne; 2010. Accessed December 19, 2023. <https://theses.hal.science/tel-00493898/>
5. Ago EE, Petit F, Ozer P. Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono (Togo et au Bénin). *Geo-Eco-Trop Rev Int Géologie Géographie DÉcologie Trop*. 2005;29. Accessed December 19, 2023. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/17768>
6. Amoussou E, Tramblay Y, Totin HSV. Full article: Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin). Published 2014. Accessed December 19, 2023. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2013.871015>
7. Amoussou, Totin Vodounon SH, Houessou S, et al. Application d'un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin-versant en milieu tropical humide : cas du fleuve Mono- fdi:010069909-Horizon. Published 2015. Accessed December 19, 2023. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010069909>
8. Koubodana HD, Adoukpe JG, Atchonouglo K, Djaman K, Larbi I. Modelling of streamflow before and after dam construction in the Mono River Basin in Togo-Benin, West Africa: International Journal of River Basin Management: Vol 21, No 2. Published 2021. Accessed December 19, 2023. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15715124.2021.1969943>
9. Georlette D, Damien B, Blaise V, et al. Structural and Functional Adaptations to Extreme Temperatures in Psychrophilic, Mesophilic, and Thermophilic DNA Ligases *. *J Biol Chem*. 2003;278(39):37015-37023. doi:10.1074/jbc.M305142200
10. Bendjeda C. Analyse du risque des inondations du bassin versant de l'oued Moudjar par le couplage du modèle hydraulique HEC-RAS et le SIG. Published online 2021.

11. OMM. LE CLIMAT DANS LE MONDE 2001-2010-UNE DÉCENNIE D'EXTRÊMES CLIMATIQUES–RAPPORT DE SYNTHÈSE. *World Meteorol Organ WMO Geneva Switz*. 2013;1119:15.
12. Obled C, Zin I, Hingray B. Choix des pas de temps et d'espace pour des modélisations parcimonieuses en hydrologie des crues. *Houille Blanche*. 2009;(5):81-87. doi:10.1051/lhb/2009059
13. BADER JC, LAMAGAT JP, GUIGUEN N. Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal: analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Hydrol Sci J*. 2003;48(4):525-538. doi:10.1623/hysj.48.4.525.51415
14. DAI. CONCEPTS DE BASE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE ; APPORTS ET PRINCIPES D'UTILISATION DES OUTILS HEC,HEC-HMS ET HEC-RAS, PLATEFORME D'INTEGRATION WMS ET OUTIL RIBASIM. Published online 2013. [Http://www.mecprogram.ma](http://www.mecprogram.ma)
15. Royet P. Barrages et risques. *Ingénieries Eau-Agric-Territ*. 2004;(38 supplément):p-11.
16. Peyras L, Boissier D, Carvajal C, et al. Analyse de risque et fiabilité des barrages - Application aux barrages-poids en béton. Published online 2010. Accessed December 19, 2023. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/6474720f79cbb2c2c1b22915>
17. Provitolo D. Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique. *Ann Géographie*. 2007;653(1):23-40. doi:10.3917/ag.653.0023
18. BOURRELIER PH, DENEUFBOURG G, GRASSIN J, HUET P, DE VANSAY B, VAZELLE JD. *La Prévention Des Risques Naturels. Rapport de l'instance d'évaluation*. La Documentation Française; 1997.
19. Ministère de l'intérieur et de la sécurité publique. Rapport de la mission conjointe d'évaluation rapide des dégâts des inondations de 2019 au Bénin.
20. Tchikpoto A. ETUDE DE LA MODELISATION BIDIMENSIONNELLE DES TRANSPORTS SOLIDES ET DE L'OA DYNAMIQUE FLUVIALE DANS UN COURS D'EAU : Cas du fleuve Mono. Published online 2014.
21. Malenfant L Julie. Experimentation of mitigation techniques to reduce the effects of permafrost degradation on transportation infrastructures at Beaver Creek experimental road site, Alaska Highway, Yukon. Published 2022. Accessed December 19, 2023. <https://library-archives.canada.ca/eng/services/services-libraries/theses/Pages/item.aspx?idNumber=1132024308>
22. Klassou KS. theses.fr – Komi Selom Klassou , Evolution climato-hydrologique récente et conséquence sur l'environnement : l'exemple du bassin versant du

- fleuve Mono (Togo-Bénin). Published 1996. Accessed December 19, 2023. <https://www.theses.fr/1996BOR30063>
23. Rossi G, Blivi AB. Les conséquences des aménagements hydrauliques de la vallée du Mono (Togo-Bénin). Saura-t-on gérer l'avenir ? Published 1995. Accessed December 19, 2023. <https://aquadocs.org/handle/1834/1232>
24. Amoussou E. *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'ouest)*. phdthesis. Université de Bourgogne; 2010. Accessed December 19, 2023. <https://theses.hal.science/tel-00493898>
25. OGOUWALE R. VULNÉRABILITÉ DES CULTURES FACE AUX PHÉNOMÈNES HYDROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN DU MONO AU BÉNIN. Published online 2021.
26. KLASSOU SK, AKIBODE NSA, KOZOLINE E, KOKOU K. FLEUVE MONO ET VULNERABILITE DES COMMUNAUTES RIVERAINES EN AVAL DU BARRAGE HYDROELECTRIQUE DE NANGBETO. *Rev Ivoirienne Géographie Savanes Numéro 9 Déc 2020 ISSN 2521-2125*. Published online 2020.
27. User's Manual. HEC-RAS River Analysis System ; US Army Corps of Engineers ; Hydrologic Engineering Center. Published online 2016. <http://www.hec.usace.army.mil/>
28. Moriasi, Daniel, Jeffrey Arnold, Michael Van Liew, Ronald Bingner, Daren Harmel et Tamie Veith. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no 3. 2007:885-900.
29. BAJAMGNIGNI GS. ANALYSE DES GRILLES DE PRÉCIPITATION À HAUTE RÉOLUTION ET DES CRITÈRES DE CALAGE POUR LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE AU QUÉBEC. *MONTRÉAL, LE 9 NOVEMBRE 2016*. 2016.
30. Dossoumou NIP, Gnazou MDT, Villamor GB, Agbossou EK. Comparing households' perception of flood hazard with historical climate and hydrological data in the Lower Mono River catchment (West Africa), Benin and Togo | PLOS Climate. Published 2023. Accessed December 19, 2023. <https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.0000123>
31. Daniel L, Claude M, Francis T. Un simulateur d'écoulement en temps réel comme aide à la prévision et à la gestion des rivières.1998.
32. Ministère de l'énergie, des recherches pétrolières et minières, de l'eau et du développement des énergies renouvelables. *Conception de Modèles Simplifiés de*

Prévision et La Détermination Des Seuils et Niveaux d'alerte Relatifs Aux Inondations Au Bénin.; 2014.

33. Sikorski W, Krajewski K. Computer aided management of water resources systems. In: *Computer Methods and Water Resources. International Conference. 1.* ; 1988:225-232. Accessed December 19, 2023. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=7786346>

9. Annexes

9.1. Annexes I : Code python pour l'analyse des données

```
jupyter Analyse_débits_1 Last Checkpoint: 28/11/2023 (autosaved)
File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Not Trusted Python 3 (ipykernel)
In [2]: # Importation des bibliothèques
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Importation des données
Athiémé = pd.read_excel("E:/Rodolphe/Rodolphe/Mémoire/Données/Athiémé_Discharge.xlsx")
Athiémé

Out[2]:
```

	Dates	Discharge(m3/s)
0	1960-01-01	2.977000
1	1960-01-02	2.783000
2	1960-01-03	2.755000
3	1960-01-04	2.727000

```
Out[2]:
In [4]: # Subdivision des données en deux périodes
pivot1 = pivot[pivot['Month'] >= 1] # Période de 1987 à 2020
pivot2 = pivot[pivot['Month'] < 1] # Période de 1970 à 1986

# Correction de la subdivision des données
pivot2['Month'] = pivot2['Month'] + 12 # Ajustement des mois pour la deuxième période

# Calcul des moyennes sur chaque jour pour les deux périodes
m_pivot1 = pivot1.groupby(['Month', 'Day']).mean().reset_index()['Discharge(m3/s)']
m_pivot2 = pivot2.groupby(['Month', 'Day']).mean().reset_index()['Discharge(m3/s)']

# Tracé des graphiques superposés
plt.plot(m_pivot1, label='1987-2020')
plt.plot(m_pivot2, label='1970-1986')

# Ajout de légendes et de titres
plt.legend()
plt.title('Moyenne des débits journaliers pour chaque mois et jour')
plt.xlabel('Jour dans le mois')
plt.ylabel('Débit moyen (m3/s)')

# Affichage du graphique
plt.show()
```

9.2. Annexe II : Modelisation

Calage et validation du modèle

```
jupyter Calage_modèle Last Checkpoint: 29/11/2023 (autosaved) Python 3 (ipykernel)

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Trusted Python 3 (ipykernel)

In [47]: import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Charger Les données depuis Le fichier Excel
data = pd.read_excel("E:/Rodolphe/Rodolphe/Mémoire/Données/Tetetou.xlsx")

# Supprimer Les lignes avec des valeurs manquantes
data = data.dropna(subset=['Année', 'Obs', 'Sim'])

# Extraire les colonnes "Année", "Obs" et "Sim"
annee = data['Année']
obs = data['Obs']
sim = data['Sim']

# Tracer Le graphique
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(annee, obs, label='Débit Observé')
plt.plot(annee, sim, label='Débit Simulé')

# Afficher Les étiquettes des dates en rotation pour une meilleure lisibilité
plt.xticks(rotation=45)

# Ajouter des étiquettes et une légende
plt.xlabel('Année')
plt.ylabel('Débit')
plt.title('Comparaison des Débits Observés et Simulés (Validation-Tététou)')
plt.legend()

# Enregistrer La figure au format JPG dans un dossier spécifié
plt.savefig("E:/Rodolphe/Rodolphe/Mémoire/Données/Validation_Tététou.jpg")

# Afficher Le graphique
plt.show()
```

1. Evaluation des cotes

```
jupyter Calage_modèle Last Checkpoint: 29/11/2023 (autosaved) Python 3 (ipykernel)

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Trusted Python 3 (ipykernel)

In [117]: import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Charger Les données depuis Le fichier Excel
data1 = pd.read_excel("E:/Rodolphe/Rodolphe/Mémoire/Données/Athieme.xlsx")

# Supprimer Les lignes avec des valeurs manquantes
data1 = data1.dropna(subset=['Année', 'Obs', 'Sim'])

# Extraire Les colonnes "Année", "Obs" et "Sim"
annee = data1['Année']
obs = data1['Obs']
sim = data1['Sim']

# Tracer Le graphique
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(annee, obs, label='Cote Observée')
plt.plot(annee, sim, label='cote Simulée')

# Afficher Les étiquettes des dates en rotation pour une meilleure lisibilité
plt.xticks(rotation=45)

# Ajouter des étiquettes et une légende
plt.xlabel('Année')
plt.ylabel('Cote')
plt.title('Comparaison des cotes Observées et Simulées(Calage-Athiémé)')
plt.legend()

# Enregistrer La figure au format JPG dans un dossier spécifié
plt.savefig("E:/Rodolphe/Rodolphe/Mémoire/Données/CV_Athiémé.jpg")

# Afficher Le graphique
plt.show()
```