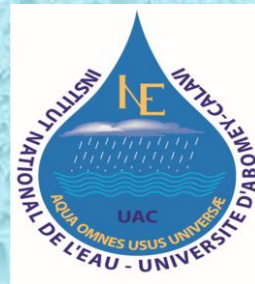




UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES
RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

DJINADOU Ziadi

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie quantitative

=====

**DIAGNOSTIQUE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE
DU BARRAGE DE ALAFIAROU**

=====

Maître de Mémoire

Dr. Jean HOUNKPE

Enseignant-Chercheur INE/UAC

Maître de Stage

Mr. Wilfried BOGNON

Ing, Hydro-barragiste à Setem-Bénin



PROMOTION : 2023 - 2024

DEDICACE

À mes parents IDRISSOU Rihanatou et DJINADOU Alassane

REMERCIEMENTS

Prioritairement, je remercie Dieu, qui a guidé mes pas, m'a inspiré et m'a protégé durant ce travail ;

Mes sincères remerciements vont particulièrement à l'endroit de :

- Ma mère **Rihanatou IDRISOU**, pour ses louables efforts ;
- Mon maitre de mémoire, **Dr. Jean HOUNKPE**, Enseignant-chercheur à l'Institut National de l'Eau (INE), pour son encadrement, sa patience et son soutien infaillibles tout au long de ce travail ;
- Toutes les autorités de l'Institut National de l'eau ;
- Mon maître de stage, **M. Wilfried BOGNON**, Ingénieur hydro-barragiste à SETEM-Bénin, pour son encadrement et sa patience tout au long de ce travail ;
- Tous les Honorables membres du Jury qui ont apprécié ce modeste travail ; merci pour le temps sacrifié au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- L'ensemble des enseignants du département d'Hydrologie et gestion des ressources en eau de l'Institut National de l'eau ;
- **M. Octave DJANGNI**, pour ses louables efforts et ses précieux conseils dans la réalisation du présent document ;
- L'ensemble de nos aînés du département d'hydrologie ;
- Tous mes promotionnaires en année de licence ;
- Toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ;
- Toute ma famille, pour le soutien.

RESUME

Le gouvernement béninois a réalisé avec l'appui financier des partenaires au développement de nombreuses infrastructures de mobilisation de l'eau en zones rurales, incluant des barrages. Ces barrages stockent l'eau en période de crue pour subvenir aux besoins en eau des populations durant la période sèche. Les gestionnaires de barrages sont parfois confrontés au dilemme de lâcher d'un débit écologique minimum pour les besoins écosystémiques et des populations vivant en aval avec la nécessité de fournir de la ressource en eau pour satisfaire les besoins des groupements de producteurs utilisant ces barrages. Dans le but de contribuer à l'optimisation de l'utilisation de la ressource en eau pour satisfaire les différents besoins, le projet Opti-wam a identifié deux barrages cibles d'étude de cas au Bénin dont celui de Alafiarou dans la commune de Tchaourou. Le barrage de Alafiarou a été construit en 2002 et réhabilité en 2022 dans le cadre du projet PAPVIRE-ABC. De nouvelles dégradations sont quand même survenues dans le chenal évacuateur du barrage après ces travaux de réhabilitation. La présente étude vise donc à faire une étude diagnostique hydrologique et hydraulique du barrage afin de comprendre son fonctionnement, d'identifier les causes des dégradations observées et de proposer des solutions pour une nouvelle réhabilitation permettant sa pérennité. Pour ce faire, une enquête de terrain exploratoire a été menée dans un premier temps pour prendre en compte les réalités du site. Ensuite, une simulation des débits par la méthode de régionalisation a été faite à travers la modélisation hydrologique avec le modèle GR6J sur le bassin versant alimentant le barrage. Enfin, ces débits simulés ont servi à l'estimation du volume d'apport moyen annuel d'eau sur le bassin versant. Les débits de crues correspondant à différents temps de retour susceptibles d'être générés à l'amont immédiat du barrage ont été estimés par deux méthodes : l'analyse fréquentielle des débits extrêmes simulés et des pluies extrêmes qui sont ensuite converties en quantiles de débits par la méthode rationnelle. Les résultats de cette analyse ont révélé que la période pluvieuse à Alafiarou s'étend d'avril à octobre, avec des crues importantes atteignant un pic en septembre. Ces crues entraînent une évacuation massive des eaux par le déversoir, tandis que le volume d'eau restant est utilisé pour répondre aux besoins en eau tout au long des mois de sécheresse. Les débits centennaux ($T=100$ ans) estimés par les méthodes rationnelles et de régionalisation sont de $25,02 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne et de $26,04 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement pour les deux méthodes. Ces quantiles de débits sont supérieurs à la crue maximale évacuable par le déversoir qui est de $24,70 \text{ m}^3/\text{s}$. Par ailleurs, les apports annuels d'eau sur le bassin versant alimentant le barrage sont de l'ordre de $10\,993\,720,186 \text{ m}^3/\text{an}$ et sont largement au-dessus de la capacité de rétention du barrage ($220\,565,33 \text{ m}^3$). Ces résultats concordants avec les travaux de terrain montrent que bien que le déversoir soit conçu pour évacuer les excès d'eau, les apports excédentaires, en particulier lors de crues exceptionnelles, exercent une pression sur l'infrastructure, contribuant à des dégradations sur le chenal évacuateur. Les dégradations observées sont donc liées à une surcharge hydraulique, et à des débits excédentaires, bien au-delà de la capacité de conception de l'évacuateur, entraînent une usure progressive des structures. Des options pour une nouvelle réhabilitation de manière durable sont proposés à l'issue de cette étude.

Mots clés : Barrages, débit de crue, régionalisation, modélisation hydrologique.

ABSTRACT:

With the financial support of its development partners, the Beninese government has built a number of water mobilization infrastructures in rural areas, including dams. These dams store water during flood periods to meet the population's water needs during the dry season. Dam managers are sometimes faced with the dilemma of releasing a minimum ecological flow to meet the needs of ecosystems and populations living downstream, and the need to supply water to meet the needs of producer groups using these dams. With the aim of helping to optimize the use of water resources to meet the various needs, the Opti-wam project has identified two dams as case study targets in Benin, including the Alafiarou dam in the commune of Tchaourou. The Alafiarou dam was built in 2002 and rehabilitated in 2022 as part of the PAPVIRE-ABC project. However, new damage has occurred in the dam's spillway channel following this rehabilitation work. The aim of the present study is therefore to carry out a hydrological and hydraulic diagnostic study of the dam in order to understand its operation, identify the causes of the observed degradations and propose solutions for a new rehabilitation to ensure its sustainability. To achieve this, an exploratory field survey was first carried out to take into account the realities of the site. Next, flows were simulated using the regionalization method, through hydrological modelling with the GR6J model on the watershed feeding the dam. Finally, these simulated flows were used to estimate the average annual water inflow to the watershed. Flood flows corresponding to different return times likely to be generated immediately upstream of the dam were estimated using two methods: frequency analysis of simulated extreme flows and extreme rainfall, which were then converted into flow quantiles using the rational method. The results of this analysis revealed that the rainy period at Alafiarou extends from April to October, with major floods peaking in September. These floods result in a massive evacuation of water through the weir, while the remaining volume of water is used to meet water needs throughout the dry months. The 100-year flows ($T=100$ years) estimated by the rational and regionalization methods average 25.02 m³/s and 26.04 m³/s respectively. These flow quantiles are higher than the maximum flood evacuable by the weir, which is 24.70 m³/s. In addition, the annual inflow of water into the watershed feeding the dam is of the order of 10,993,720.186 m³/year, well in excess of the dam's retention capacity (220,565.33 m³). These results, in line with field work, show that although the spillway is designed to evacuate excess water, excess inflows, particularly during exceptional floods, exert pressure on the infrastructure, contributing to damage to the spillway channel. The damage observed is therefore linked to hydraulic overloading and excess flows, well beyond the design capacity of the spillway, leading to progressive wear of the structures. Options for a new, sustainable rehabilitation are proposed as a result of this study.

Keywords: Dams, flood flow, regionalization, hydrological modelling

SIGLES ET ACRONYMES

AIC	: Akaike Information Criterion (Critère d'Information d'Akaike)
APD	: Avant-projet détaillé
AMMA-	: African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA)-Couplage de l'atmosphère
CATCH	Tropicale et du Cycle éco-Hydrologique (CATCH)
BAD	: Banque africaine de développement
BOAD	: Banque Ouest africaine de développement
BIC	: Bayésien Information Criterion (Critère d'Information Bayésien)
GAFSP	: Global agriculture and Food security program
GR4J	: Génie rural à quatre paramètres journaliers
GR6J	: Génie rural à six paramètres journaliers
HYFRAN	: Hydrological Frequency Analysis
IRD	: Institut de recherche pour le développement
INSAE	: Institut National de la statistique et de l'analyse économique
KGE	: Kling-Gupta Efficiency
MAEP	: Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche
NSE	: Nash-Sutcliffe Efficiency
ODD6	: Objectif de développement durable 6
OPTI-	: Optimizing water management for sustainable ecosystems
WAM	
PAPVIRE-	: Projet d'appui à la production vivrière et du renforcement de la résilience dans les
ABC	départements de l'Alibori, du Borgou et des collines
PSDSA	: Plan stratégique de développement du secteur Agricole
PSAIA	: Plan de de sécurité alimentaire par intensification de la production agricole
SETEM-	: Service des Etudes, Travaux, Équipement et Maintenance du Bénin
BENIN	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Arrondissements et nombres de villages de la commune de Tchaourou.....	4
Tableau 2 : Evolution de la population par arrondissement et répartition de la population par village/quartiers de ville	6
Tableau 3 : caractéristiques des données utilisées.....	10
Tableau 4 : Commentaires sur les critères de performance d'un modèle hydrologique	16
Tableau 5 : Fonction densité de probabilité et paramètres des lois choisies	18
Tableau 6 : Méthodologie pratique d'estimation du volume de stockage d'une retenue d'eau	20
Tableau 7 : Caractéristiques des composants du barrage de Alafiarou	23
Tableau 8 : Caractéristiques physiographiques des bassins versants	30
Tableau 9: Présentation des critères de performance obtenus en calage.....	34
Tableau 10 : Critères de performance en validation.....	35
Tableau 11 : Paramètres du bassin versant de Aguimo par le modèle GR6J	36
Tableau 12 : Performance des simulations sur le bassin versant alimentant le barrage	37
Tableau 13: Estimation des volumes d'apport annuels d'eau sur le bassin versant.....	37
Tableau 14 : Caractéristiques des valeurs de pluies extrêmes par stations	39
Tableau 15 : Résultat des tests statistiques d'hypothèse sur les pluies maximales annuelles par stations	39
Tableau 16: Critères de comparaison AIC et BIC pour les quatre distributions de probabilité appliquées sur les pluies maximales journalières annuelles des différentes stations	40
Tableau 17 : Paramètres des lois estimés	41
Tableau 18 : Quantiles de pluie estimés aux différentes stations.....	42
Tableau 19 : Paramètres pour l'estimation du coefficient de ruissellement moyen annuel par la formule de Turc	43
Tableau 20: Quantiles de débits estimés par la méthode rationnelle	43
Tableau 21 : Caractéristiques des valeurs de débits maximaux annuels	43
Tableau 22 : Résultat de la vérification des tests statistiques d'hypothèse sur les débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou	44
Tableau 23 : Résultat du calcul des critères AIC et BIC sur les débits maximaux annuels.....	44
Tableau 24 : Paramètres calculés de la loi GEV	45
Tableau 25 : Quantiles de débits estimés sur le bassin versant	45
Tableau 26 : Calcul du volume de stockage de la retenue.....	46
Tableau 27: Résultats des études hydrologiques et hydrauliques	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan de situation de SETEM-Bénin	2
Figure 2 : Organigramme de SETEM-Bénin.....	3
Figure 3 : Situation géographique de la commune de Tchaourou au Bénin.....	4
Figure 4 : Carte de situation du bassin versant du barrage de Alafiarou.....	8
Figure 5 : Méthodologie de simulation des débits à Alafiarou.....	12
Figure 6 : Structure du modèle GR4J (Source : https://www.inrae.fr/).....	14
Figure 7 : Bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou.....	29
Figure 8 : Bassins versant jaugés délimités	30
Figure 9 : Bassins versant de Alafiarou et de Aguimo.....	31
Figure 10: Variation de la pluie annuelle à Aguimo et Alafiarou	32
Figure 11: Résultat du calage du modèle pluie- débit à Aguimo sur la période de 2001 à 2004 par le modèle GR4J	33
Figure 12: Résultats du calage du modèle pluie-débit à Aguimo sur la période de 2001 à 2006 par le modèle GR6J	33
Figure 13: Résultat de la validation du modèle pluie-débit par le modèle GR4J.....	34
Figure 14 : Résultat de la validation du modèle pluie-débit par le modèle GR6J	35
Figure 15: Variation des débits simulés et des pluies à Alafiarou.....	36
Figure 16 : Ajustement de la loi de Gumbel aux pluies maximales annuelles des stations de Tchaourou et de Parakou et de la loi Lognormal à celles de la station de Bétérou	41
Figure 17 : Graphique d'ajustement des débits maximaux annuels par la loi Lognormal	45
Figure 18: Polygones de Thiessen du bassin versant de Alafiarou	54
Figure 19: Polygones de Thiessen du bassin versant de Aguimo.....	54

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Situation de la retenue d'eau de Alafiarou sur vue aérienne	7
Photo 2 : Epis du chenal dégradé.....	25
Photo 3 : Epis du chenal dégradé.....	25
Photo 4 : Bassin de dissipation dégradé	25
Photo 5: Etat actuel des lieux des différentes parties du barrage de Alafiarou	27
Photo 6: Barrage de grangent (Saint-Etienne/Chambles, 1957).....	48

Table des matières

DEDICACE	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT:	v
SIGLES ET ACRONYMES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES PHOTOS	viii
Chapitre I : Introduction générale.....	xii
1.1. Contexte et justification de l'étude	xii
1.2. Problème général et spécifiques.....	xiv
1.3. Objectifs du mémoire.....	xiv
1.3.1. Objectif général	xiv
1.3.2. Objectifs spécifiques.....	xiv
1.4. Clarification de concepts.....	xiv
1.5. Organisation du mémoire.....	xvii
Chapitre 2 : Présentation de la structure d'accueil et du milieu d'étude	2
2.1. Introduction.....	2
2.2. Présentation de la structure d'accueil	2
2.2.1. Plan de situation	2
2.2.2. Organigramme de SETEM-BENIN	3
2.3. Présentation du milieu d'étude.....	3
2.3.1. Situation géographique.....	3
2.3.2. Climat	5
2.3.3. Caractéristiques physiques et naturelles.....	5
2.3.4. Démographie	6
2.3.5. Activités socio-économiques.....	6
2.3.6. Présentation du site du barrage de Alafiarou	7
Chapitre 3 : Données, matériels et méthodes	10

3.1. Introduction	10
3.2. Données utilisées	10
3.3. Matériel utilisé	10
3.4. Méthodes	11
3.4.1. Enquête de terrain	11
3.4.2. Estimation des quantiles de débits	11
3.4.3. Estimation du volume d'apport moyen annuel	20
3.4.4. Calculs hydrauliques sur la retenue	20
Chapitre 4 : Résultats et discussions	23
4.1. Evaluation de l'état du barrage et son fonctionnement	23
4.1.1. Historique de la retenue d'eau de Alafiarou	23
4.1.2. Présentation des caractéristiques et description des composants de la retenue	23
4.1.3. Etat des lieux de la retenue d'eau de Alafiarou	25
4.1.4. Rapport d'enquête de terrain	27
4.2. Analyse des facteurs hydrologiques pouvant contribuer aux dégradations	28
4.2.1. Simulation des débits sur le bassin versant alimentant le barrage	28
4.2.2. Estimation du volume d'apport moyen annuel d'eau sur le bassin versant	37
4.2.3. Analyse fréquentielle des débits extrêmes de crue susceptibles d'être générés à l'amont immédiat du barrage	39
4.2.3.1. Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières annuelles	39
4.2.3.2. Estimation des quantiles de débits par la méthode rationnelle	42
4.2.3.3. Analyse fréquentielle des débits extrêmes sur le bassin versant qui alimente le barrage	43
4.3. Estimation de la capacité de stockage et la gestion des crues du barrage	46
4.4. Identification des causes des dégradations et proposition des options de réhabilitation durables	47
4.4.1. Identification des causes des dégradations	47
4.4.2. Proposition des options de réhabilitation durable.	48
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52
ANNEXES	54
1. Polygones de Thiessen des stations pluviométriques des bassins versants de Alafiarou et de Aguimo	54
2. Levé topographique de la cuvette du barrage de Alafiarou	54

CHAPITRE I
INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : Introduction générale

1.1. Contexte et justification de l'étude

La rareté de l'eau affecte plus de 40% de la population mondiale et les tensions puis les crises liées à l'eau sont au 3ème rang des dix principaux risques pour l'économie mondiale (Sakho et al. (2022)). Cette situation pose un grand défi à relever pour l'humanité. Ainsi, la sécurité de l'eau pour la paix et le développement est l'un des plus grands défis des temps modernes. L'Afrique, affectée durement par le réchauffement climatique mondial, fait face à un défi majeur d'accès à l'eau en raison des enjeux liés notamment au développement économique, aux conflits, aux migrations, aux réfugiés climatiques, à la coopération autour des bassins transfrontaliers, à la préservation des écosystèmes et à la conservation de la biodiversité (Sakho et al. (2022)).

Au Bénin, le secteur agricole est un levier majeur du développement économique. Il constitue la principale source des devises du pays, occupant 70% de la population active et contribuant pour près de 23% à la valeur du produit intérieur brut. Il fournit environ 75% des recettes d'exportation et 15% des recettes de l'Etat (INSAE, 2017). Malheureusement, le secteur agro-pastoral fait face à un certain nombre de contraintes qui limitent son développement et risquent de compromettre durablement son éclosion. La faible disponibilité des ressources en eau en zones rurales durant les longues périodes sèches occasionnée par l'amplification des effets des changements climatiques plus spécifiquement le décalage des saisons, constitue un facteur très contraignant.

Au regard des défis à relever dans le secteur agricole béninois, les acteurs ont adopté comme vision dans le plan stratégique de développement du secteur agricole (PSDSA) : « un secteur agricole béninois dynamique à l'horizon 2025, compétitif, attractif, résilient aux changements climatiques et créateur de richesse répondant de façon équitable aux besoins de sécurité alimentaire et nutritionnelle de la population béninoise et aux besoins de développement économique et social de toutes les couches de la population du pays (MAEP, 2019).

Dans ce contexte, les barrages en terre moins onéreux que les ouvrages en béton constituent l'une des meilleures alternatives envisageables. Ils permettent de résoudre une grande partie des problèmes agro-pastoraux grâce à une meilleure maîtrise et stockage de l'eau (Hountondji et al., 2020). Cependant, bien que ces barrages soient conçus pour être fiables et durables, ils subissent les effets des aléas climatiques et des intempéries. Le passage fréquent de diverses intempéries (averses exceptionnelles et crues exceptionnelles) et l'activité humaine n'épargnent pas ces infrastructures hydro-agricoles entraînant ainsi leurs dégradations. La stabilité de ces ouvrages est ainsi menacée et par conséquent

leur sécurité au fil des années si aucune disposition n'est prise. C'est ce qui justifie la nécessité des travaux d'entretien et de réparation ou de réhabilitation de ces barrages.

Dans ce cadre, le projet **PAPVIRE-ABC** a entrepris, grâce au financement du **Fonds GAFSP** via la Banque Africaine de Développement (**BAD**), une série de travaux de réhabilitation de barrages dans les départements de l'Alibori, du Borgou et des Collines, dont celui de Alafiarou dans la commune de Tchaourou, réhabilité en 2022. Cependant, malgré ces réhabilitations, des dégradations subsistent et continuent de se manifester, menaçant la durabilité de l'ouvrage si aucune action corrective n'est entreprise rapidement.

De plus, la gestion de l'eau dans les barrages, particulièrement en période de sécheresse, pose un dilemme complexe pour les gestionnaires : garantir un approvisionnement suffisant pour l'irrigation et les besoins des populations tout en préservant le débit écologique minimum nécessaire pour maintenir la biodiversité en aval. Dans ce contexte, le projet opti-wam envisage de contribuer à des pratiques agricoles écologiquement durables et à l'approvisionnement en eau du bassin fluvial pour les groupes marginalisés tout en promouvant le flux écologique qui est essentiel pour la biodiversité et la population vivant en aval des barrages et des rivières. Il réunit des partenaires (associations, communautés de base, professionnels et gestionnaires de l'eau et chercheurs) afin de travailler ensemble de manière participative, de développer conjointement des solutions à ces problèmes identifiés dans les zones d'étude de cas et de diffuser largement les résultats qui pourraient être utiles pour répondre aux besoins dans d'autres régions.

Les barrages cibles d'étude de cas identifiés en Afrique de l'Ouest sont ceux de Bagré au Burkina Faso puis ceux de l'Okpara et de Alafiarou au Bénin.

Face au problème qui se pose sur le barrage de Alafiarou et aux enjeux liés au projet opti-wam sur ce barrage, il est impératif d'approfondir la connaissance des dynamiques hydrologiques et hydrauliques du barrage de Alafiarou pour mieux comprendre les causes des dégradations observées, éviter des désagréments et de contribuer à améliorer la sécurité et la durabilité du barrage.

C'est dans cette optique que le présent mémoire se propose de mener une **étude diagnostique hydrologique et hydraulique du barrage de Alafiarou**, en vue de mieux comprendre son fonctionnement, d'analyser les facteurs contribuant à ses dégradations et de formuler des recommandations pour sa réhabilitation durable.

1.2. Problème général et spécifiques

Le problème général concerne la sécurité hydraulique du barrage de Alafiarou, mise en péril par des dégradations observées sur ses structures de protection, notamment dans le chenal évacuateur, après les travaux de réhabilitation effectués en 2022. Ces dégradations compromettent la capacité du barrage à assurer sa fonction de régulation des crues et de gestion de la retenue d'eau en toute sécurité.

Spécifiquement, les principales dégradations observées sur le barrage concernent entre autres :

- L'enlèvement partiel des enrochements sur le parement amont des épis de protection dans le chenal évacuateur ;
- L'érosion du sol compacté servant de résistance au niveau du parement amont des épis sans enrochements (renard hydraulique) ;
- Des dégradations par endroits dans les bassins de dissipation.

1.3. Objectifs du mémoire

1.3.1. Objectif général

L'objectif général de cette étude est de réaliser un diagnostic hydrologique et hydraulique du barrage de Alafiarou, afin de comprendre son fonctionnement, d'identifier les causes des dégradations observées, et de proposer des solutions de réhabilitation durable visant à renforcer sa sécurité et sa pérennité.

1.3.2. Objectifs spécifiques

- Évaluer l'état du barrage de Alafiarou et son fonctionnement ;
- Analyser les facteurs hydrologiques (débits extrêmes et apports annuels) pouvant contribuer aux dégradations ;
- Estimer la capacité de stockage et la gestion des crues du barrage ;
- Identifier les causes des dégradations du barrage et proposer des options de réhabilitation durables, visant à renforcer la sécurité et la résilience de l'ouvrage face aux risques hydrologiques.

1.4. Clarification de concepts

Barrages : Ce sont des ouvrages hydrauliques construits en travers d'un cours d'eau et destinés à réguler le débit du cours d'eau et à en stocker pour différents usages.

Crue : Une crue est un débit important d'eau douce, de courte durée, dans un cours d'eau, résultant d'un événement météorologique comme de fortes pluies ou la fonte rapide des neiges. Elle se caractérise par une montée rapide du niveau d'eau, suivie d'une baisse plus lente.

Débits écologiques :

Selon la déclaration de Brisbane proclamée au 10th International River symposium and International Environmental Flows Conference à Brisbane, les débits écologiques sont définis comme « la quantité, la saisonnalité et la qualité des débits nécessaires à la durabilité des écosystèmes d'eau douce et estuariens ainsi qu'aux besoins et au bien-être des hommes qui dépendent de ces écosystèmes ».

Etudes Hydrologique et hydraulique : Les études hydrologiques et hydrauliques sont des analyses approfondies visant à comprendre et à modéliser les comportements des systèmes hydrologiques et hydrauliques. Elles incluent :

Études Hydrologiques : ([Écogénie inc. \(ecogenie.ca\)](http://ecogenie.ca))

- Caractérisation des bassins versants : Analyse des précipitations, de l'évapotranspiration, et des écoulements de surface.
- Détermination des débits : Calcul des débits de pointe, des débits moyens, et des périodes de retour pour les événements extrêmes.
- Modélisation hydrologique : Utilisation de modèles pour simuler les processus hydrologiques et prévoir les réponses des bassins versants aux précipitations.

Études Hydrauliques : (cerema.fr)

Dimensionnement des ouvrages : Conception et dimensionnement des barrages, des digues, et des systèmes de protection contre les inondations.

Régionalisation : Selon Hingray et al., (2009), le terme de régionalisation désigne toute méthode visant à « étendre les informations disponibles en un nombre limité de points d'un domaine, à l'ensemble du domaine ». Dans le contexte de la modélisation non jaugée, le terme de « régionalisation » englobe donc toutes les méthodes visant à estimer une ou plusieurs signatures hydrologiques d'un bassin versant non jaugé cible à partir des informations disponibles sur des bassins jaugés appartenant à une même région homogène (Rouhier. L., 2020).

Modélisation hydrologique : Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et

de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits qui représentent la sortie du modèle hydrologique (Modèle hydrologique — Wikipédia (wikipedia.org)).

Bassin versant : Un bassin versant est un territoire qui draine l'ensemble de ses eaux vers un exutoire commun, cours d'eau ou mer. Le bassin versant est limité par des frontières naturelles : les lignes de crêtes ou lignes de partage des eaux. De part et d'autre de ces lignes, les eaux des précipitations et des sources, ainsi que tous les éléments dissous ou en suspension (sédiments, pollution...), s'écoulent vers des exutoires séparés (www.futura-sciences.com).

Analyse fréquentielle : Un des outils de base pour l'analyse de la survenue des extrêmes hydro-climatiques est l'analyse fréquentielle. Il s'agit d'une méthode statistique de prédiction consistant à étudier des événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), pour définir les probabilités d'apparition future (Meylan et al., 2008). Elle consiste à rechercher une loi de probabilité qui s'ajuste le mieux aux valeurs observées de la variable aléatoire "pluie maximale journalière" après comparaison de différentes lois de probabilités et méthodes d'estimation à l'aide de tests d'adéquation (Habibi et al., 2013).

Extrêmes : Ce sont des événements climatiques différents qui peuvent donner naissance à une modification (écart) très importante à la normale climatologique. Pour (Decamps, 2010), il s'agit d'un événement exceptionnel révélé par les valeurs inhabituelles atteintes par un ou plusieurs paramètres (débits, pluie, température,) sur un territoire donné.

Quantiles de pluie et de débit : Un quantile de pluie est la hauteur de pluie qui correspondent à des valeurs de probabilité ou de période de retour donnée. Le quantile de débit est par ricochet le débit correspondant à une période de retour donnée.

Période de retour : La période de retour, ou temps de retour, est la durée moyenne au cours de laquelle, statistiquement un événement d'une même intensité se reproduit. Ainsi une pluie de période de retour de 20 ans, qui a donc une probabilité de 5 % durant une année, peut se produire plusieurs fois dans une même année ou une fois durant un certain nombre d'années consécutives puis ne plus se produire durant 40 ans (Meylan. P. et al., (2008)).

Lois de valeurs extrêmes : En statistique, une loi de probabilité décrit le comportement aléatoire d'un phénomène dépendant du hasard. Il existe plusieurs lois de probabilité mais certaines en particulier permettent de représenter des phénomènes de valeurs extrêmes (minimum ou maximum). Ce sont les

lois de valeurs extrêmes. Voici quelques-unes utilisées en hydrologie : la famille des lois d'extrémum généralisée qui comprend la loi Gumbel, la loi de Fréchet et la loi de Weibull (respectivement lois d'extrémum de type I, II et III), la loi de Galton, la loi exponentielle, la loi Pearson et la loi log Pearson type III (Grimaldi et al., 2011).

Stabilité d'un barrage : La stabilité d'un barrage en remblai se réfère à sa capacité à résister aux forces internes et externes qui pourraient provoquer son effondrement ou sa déformation. Cela inclut la résistance aux pressions hydrostatiques, aux forces sismiques, et aux conditions météorologiques extrêmes. Selon (Carrière A. , 1994), Un barrage en remblai stable doit être conçu pour maintenir son intégrité structurelle sous diverses conditions de charge et d'environnement.

Sécurité d'un barrage : La sécurité d'un barrage est un ensemble de mesures et de pratiques visant à garantir l'intégrité structurelle du barrage et à protéger les personnes, les biens et l'environnement en aval.

1.5. Organisation du mémoire

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le premier Chapitre constitue l'introduction générale. Ensuite, le chapitre II présente la structure au sein de laquelle le stage s'est déroulé et le milieu d'étude. Par suite, le chapitre III aborde les données, le matériel et la méthodologie utilisés. Enfin, le chapitre IV présente les résultats obtenus et sera suivi de la conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE II

**PRESENTATION DE LA STRUCTURE
D'ACCUEIL ET DU MILIEU D'ETUDE**

Chapitre 2 : Présentation de la structure d'accueil et du milieu d'étude

2.1. Introduction

Le présent chapitre est dédié à la présentation de la structure au sein de laquelle notre stage a été réalisé, du milieu d'étude et du site du barrage lui-même. Ces informations sont indispensables à la bonne compréhension du cadre de l'étude.

2.2. Présentation de la structure d'accueil

Créé en 1995 par Monsieur Jean-Eudes OKOUNDE, SETEM-BENIN (Service des Etudes, Travaux, Équipement et Maintenance du Bénin) est l'un des bureaux d'études béninois spécialisés dans les domaines du BTP, du Génie Rural, de l'Hydraulique, la topographie, et de l'Environnement. Son siège social est situé à Arconville dans la commune d'Abomey-Calavi, département de l'Atlantique et localisable aux coordonnées 6°28'33'' N et 2°21'06''E. Il dispose de bureaux antennes dans les communes de Bohicon, Dassa-Zoumè, Parakou et Kandi. Il est constitué d'une équipe d'experts ayant à sa tête un administrateur délégué, Monsieur Vincent ATEGUI. Les ingénieurs soutenus par une équipe de techniciens de SETEM-BENIN ont un profil aussi varié que les domaines d'intervention de l'entreprise.

2.2.1. Plan de situation

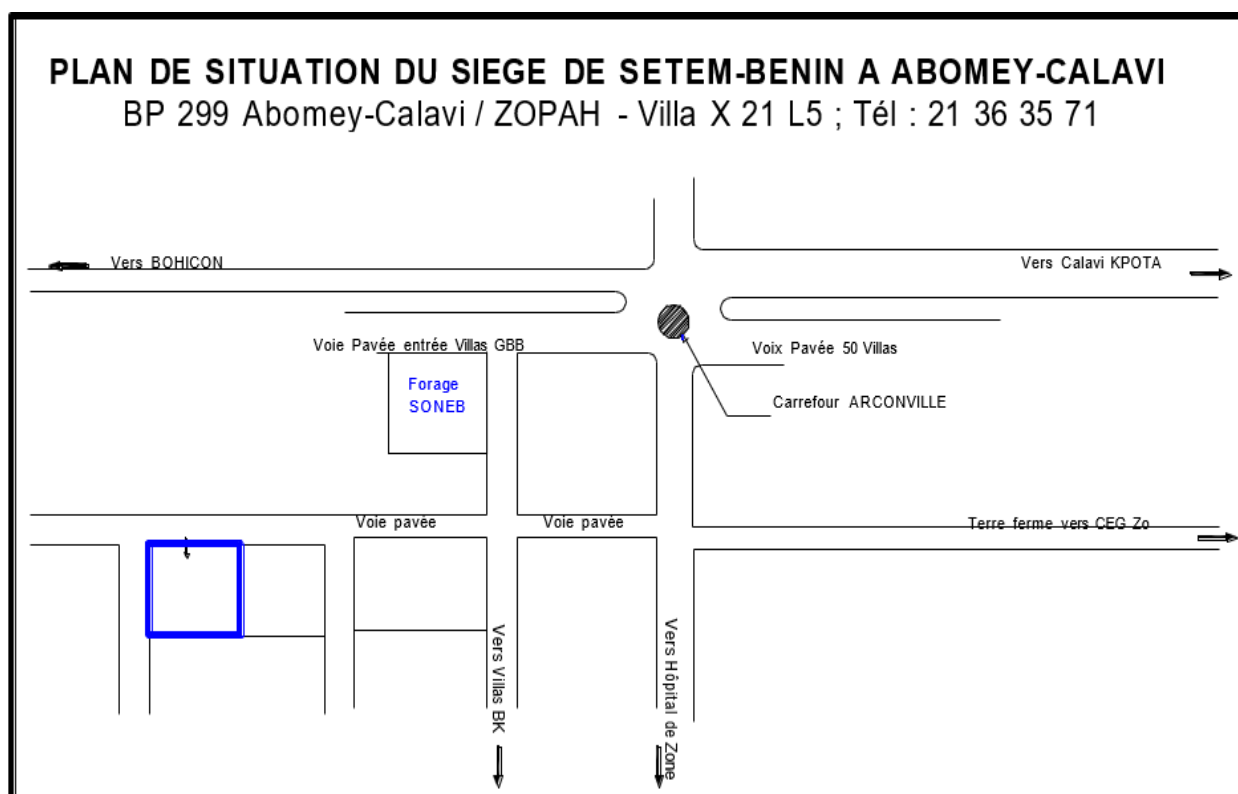


Figure 1 : Plan de situation de SETEM-Bénin

2.2.2. Organigramme de SETEM-BENIN

L'organigramme du bureau d'étude SETEM-BENIN se présente comme suit :

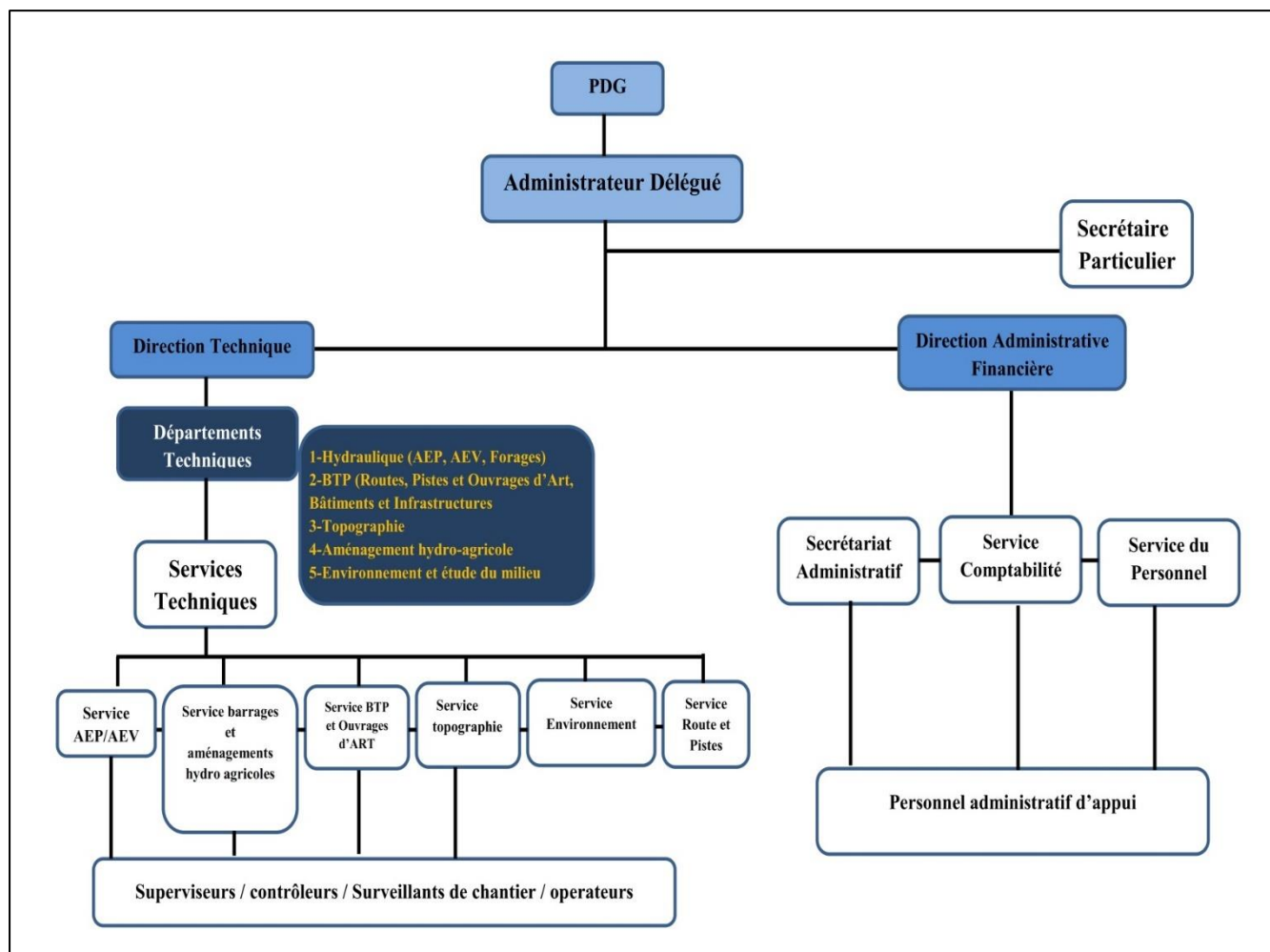


Figure 2 : Organigramme de SETEM-Bénin

2.3. Présentation du milieu d'étude

2.3.1. Situation géographique

La commune de Tchaourou est située entre 8°45' et 9°20' de latitude Nord et 2°10' et 3°40' de longitude Est (Kounoho, S. (2015)). Elle est l'une des 08 communes du département du Borgou et est située au Sud dudit département. La commune est limitée au Nord par les communes de N'dali, Pèrèrè et Parakou, au sud par la commune de ouèssè (Département des collines), à l'ouest par les communes de Djougou et Bassila (Département de la Donga) et à l'Est par la république fédérale du Nigéria.

D'une superficie de 7256 km² soit 28% de la superficie totale du département du Borgou et environ 6,5% du territoire national (Voir carte n°1 sur la situation de la Commune de Tchaourou), la commune compte

sept (07) arrondissements et quatre-vingt-dix (90) villages/quartiers de ville présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 1: Arrondissements et nombres de villages de la commune de Tchaourou

N°	Arrondissements	Nombre de villages
1	ALAFIAROU	08 Villages
2	BETEROU	12 villages
3	GORO	04 villages
4	KIKA	21 villages
5	SANSON	10 villages
6	TCHATCHOU	16 villages
7	TCHAOUROU	19 villages
	Total commune	90 villages

Source : PDC 3 de la commune de Tchaourou

La carte ci-dessous présente la situation géographique de la commune de Tchaourou au Bénin :

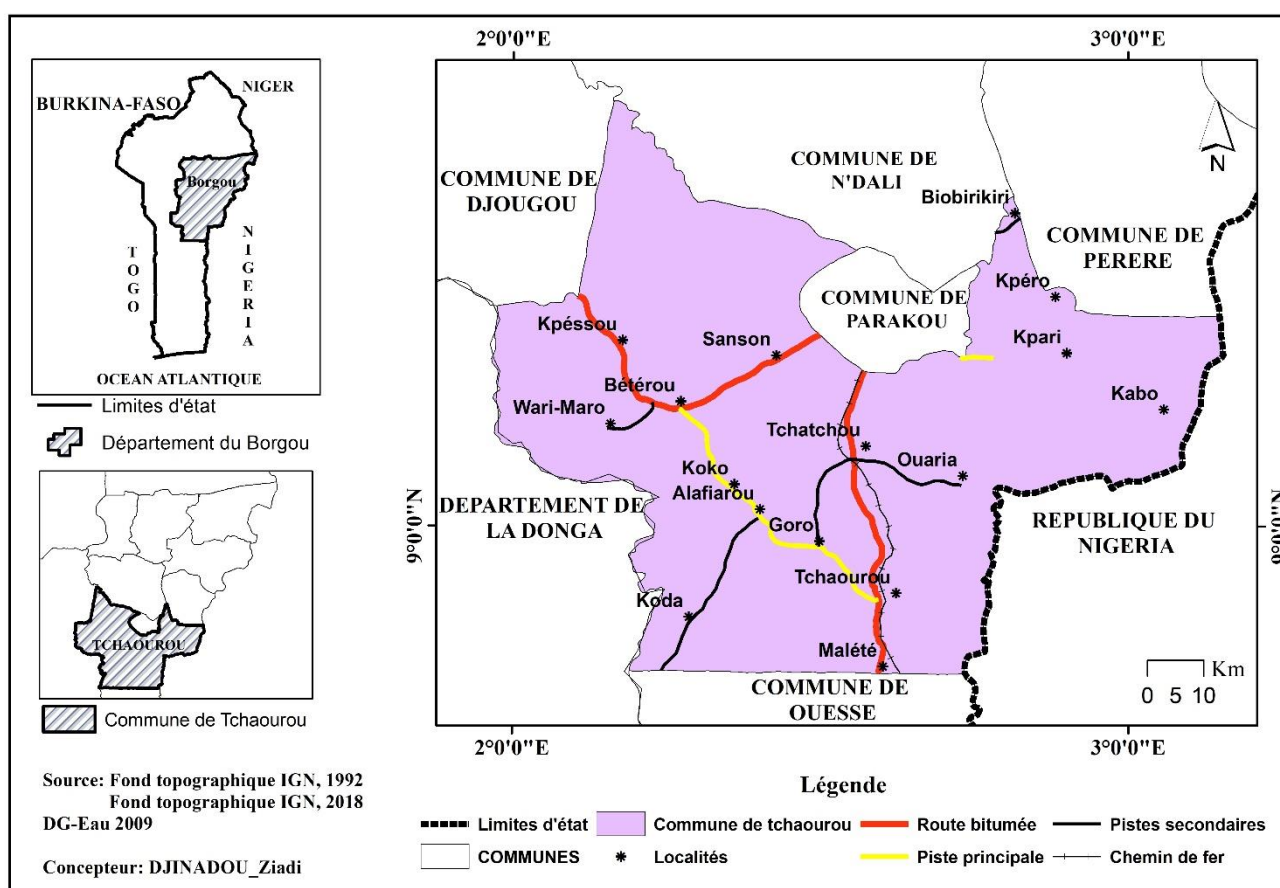


Figure 3 : Situation géographique de la commune de Tchaourou au Bénin

2.3.2. Climat

La Commune de Tchaourou est soumise à l'influence du climat sud-soudanien à l'instar des autres communes du département du Borgou. C'est un climat unimodal caractérisé par une saison sèche et une saison humide. A partir des données pluviométriques de la station de Tchaourou, sur la période de 1971 à 2016, les totaux pluviométriques annuels varient entre 809 et 1458 mm par an et compte entre six et sept mois humides dans l'année. La température moyenne annuelle est de 27,30°C. Les moyennes mensuelles des températures évaluées sur la période de 1971 à 2022 à partir des données de températures de la station synoptique de Parakou, collectées auprès de la Météo-Bénin, varient entre 25,01°C et 30,36°C. Il apparait que le mois le plus chaud est mars et août est celui le plus froid. Les mois de juillet, août et septembre enregistrent les ETP les plus faibles (variant entre 3,09 et 3,6 mm par jour). Cette période correspond à la pleine saison des pluies où la demande évaporatoire est peu importante, d'où la faible perte d'eau par évaporation des plans (phénomène physique) et par transpiration des végétaux (phénomène biologique). En revanche, d'octobre à mai, l'ETP varie entre 4,14 et 8,13mm. Cela correspond à la période de stress hydrique où la demande évaporatoire de l'atmosphère est très importante, d'où les fortes pertes par évapotranspiration sont observées (Données d'évapotranspiration potentielle à la station synoptique de Parakou (1971-2022)).

2.3.3. Caractéristiques physiques et naturelles

Relief : Le relief est constitué de plaines et de plateaux surmontés par endroit de monticules/collines culminant parfois à plus de 300 m d'altitudes (cas de massifs de Wari-Marou). Les collines expliquent la présence des carrières de graviers et de granites observées çà et là au niveau de la commune. Ces carrières constituent des sources potentielles de richesses pour la commune (PDC3 de Tchaourou, 2017-2022).

Sols : La structure du sol au niveau de la Commune de Tchaourou est de type ferrugineux tropical faiblement concrétionné. Ce sont des sols lessivés à engorgement de profondeur. Dans l'ensemble, la productivité est fortement influencée par le pourcentage de terre fine et par la médiocrité du drainage (PDC3 de Tchaourou, 2017-2022).

Végétation : La flore dans la commune de Tchaourou est composée de forêts artificielles ou anthropiques, de forêts naturelles et de forêts semi naturelles. Tchaourou partage avec d'autres communes les forêts classées des Monts Kouffè, de Wari-Marou et de l'Ouémé supérieur. On rencontre par ailleurs les forêts de Nano, de Tchatchou-Gokanna, de Tchaourou, d'Alafiarou-Bétérou et Boé-Tandou. (PDC 3 de Tchaourou, 2017-2022).

Réseau hydrographique : Le réseau hydrographique est dense et est essentiellement dominé par les affluents des fleuves Ouémé et Okpara dont Beffa, Téro, Toui, etc. Ces affluents arrosent la plupart des arrondissements et favorisent le développement des activités de pêche (PDC3 de Tchaourou, 2017-2021). En effet, on observe également par endroits des marécages et des marigots qui, malgré la brièveté de leur vie, jouent un rôle important dans l'abreuvement du bétail. La commune dispose de huit (08) retenues d'eau qui sont exploitées pour la culture maraichère et la pisciculture. Il s'agit des retenues d'eau d'Alafiarou, Kaki-koka, Boukousséra, Papanè, Gah-Baka, Winra, Sebou, Kpassa. (PDC3 de Tchaourou, 2017-2021).

2.3.4. Démographie

Selon le quatrième recensement général de la population et de l'habitation (RGPH4) au Bénin (INSAE, 2013), la commune de Tchaourou compte une population de 223 138 habitants dont 111 562 femmes.

Tableau 2 : Evolution de la population par arrondissement et répartition de la population par village/quartiers de ville

ARRONDISSEMENT	RGPH3 2002	RGPH4 2013	Projection 2016
ALAFIAROU	6592	15290	19117
BETEROU	15747	34905	43121
GORO	4500	6283	6866
KIKA	21886	54349	69189
SANSON	10784	20608	24475
TCHATCHOU	26505	47841	58975
TCHAOUROU	20838	43862	53447
TOTAL COMMUNE	106852	223138	272184

Source : RGPH 1, 2, 3 et 4, INSAE

2.3.5. Activités socio-économiques

L'économie de la commune de Tchaourou est basée sur le secteur agricole. On y retrouve également les activités telles que L'élevage, la transformation des produits et l'industrie, les services, la production halieutique, l'artisanat et le commerce.

Agriculture : Selon les données du recensement de la population de 2013, 70,5% des ménages de la commune sont occupés par les activités agricoles. Ainsi, dans la commune de Tchaourou, les principales spéculations rencontrées sont les céréales (maïs, sorgho, mil, riz), les tubercules et racines (igname, manioc), les légumineuses (soja, niébé), les cultures de rentes (coton, anacarde, karité).

Dans la commune, l'agriculture est de type traditionnel, extensif sur brûlis avec l'utilisation quelques fois des outils modernes (15 tracteurs et accessoires) de production grâce au programme de mécanisation agricole et à l'encadrement technique du SCDA (PDC 3 de Tchaourou, 2017-2022).

Elevage : La production animale constitue pour les populations de Tchaourou autres que les Peulhs une activité secondaire. Il est de type traditionnel et concerne les bovins, les caprins, les porcins, les ovins et la volaille. Il s'agit d'un élevage essentiellement extensif. Les animaux d'élevage sont destinés à la vente et aux cérémonies. En dehors de l'élevage du bovin qui constitue la principale activité des peulhs, les autres espèces sont laissées en divagation et sont de ce fait exposées aux épizooties et aux vols.

2.3.6. Présentation du site du barrage de Alafiarou

L'arrondissement de Alafiarou est l'un des sept arrondissements de la commune de Tchaourou dans le département du Borgou au Bénin. Situé au Nord-Est du Bénin à $9^{\circ} 53' 35''$ de latitude Nord et $3^{\circ} 25' 44''$ de longitude Est, il compte quatre villages que sont Agbassa, Alafiarou, Koda et Koko. Selon le recensement de la population de 2013 conduit par l'institut National de la statistique et de l'analyse économique (INSAE), Alafiarou compte 15 290 habitants.

Le site du barrage de Alafiarou est situé à l'ouest du village à 5 km environs du centre du village et à 35 Km environs de la Mairie de Tchaourou. Les coordonnées géographiques du site sont 9.008179° Nord et 2.386875° Est. Construit en 2002 et réhabilité en 2022, le barrage est alimenté par la rivière Tèmayé qui est un bras de Toui, un affluent de Ouémé supérieur.

La photo 1 qui suit présente une vue aérienne de la retenue d'eau de Alafiarou :

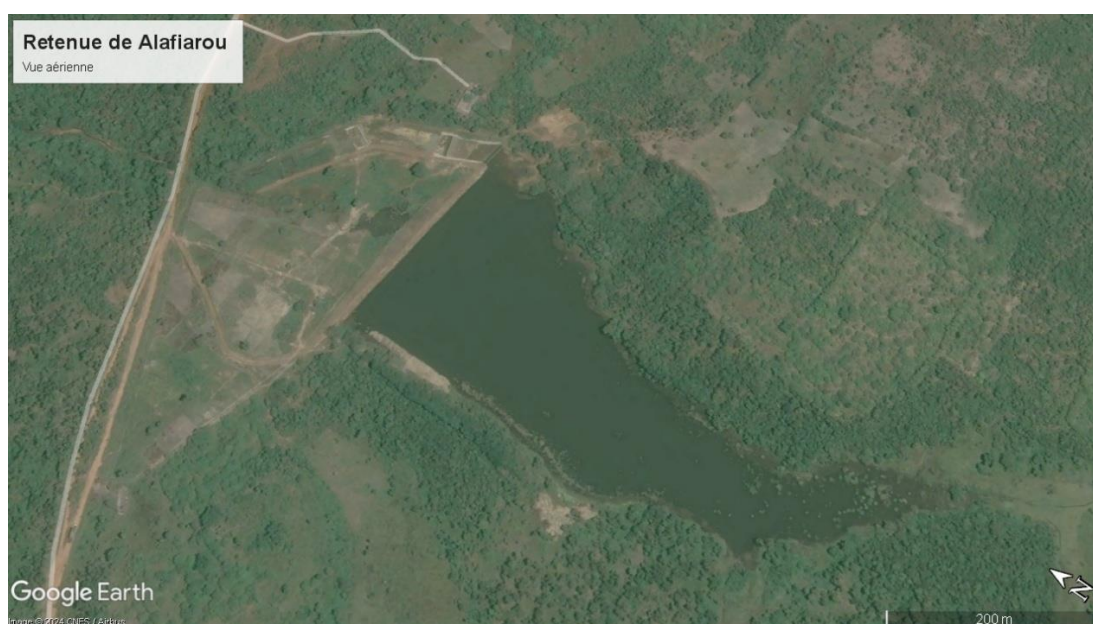


Photo 1: Situation de la retenue d'eau de Alafiarou sur vue aérienne

Source: Google earth, image Landsat, 2024

Date de prise de photo : 12/11/2020

La figure 4 présente la situation du bassin versant alimentant le barrage de Alafiarou.

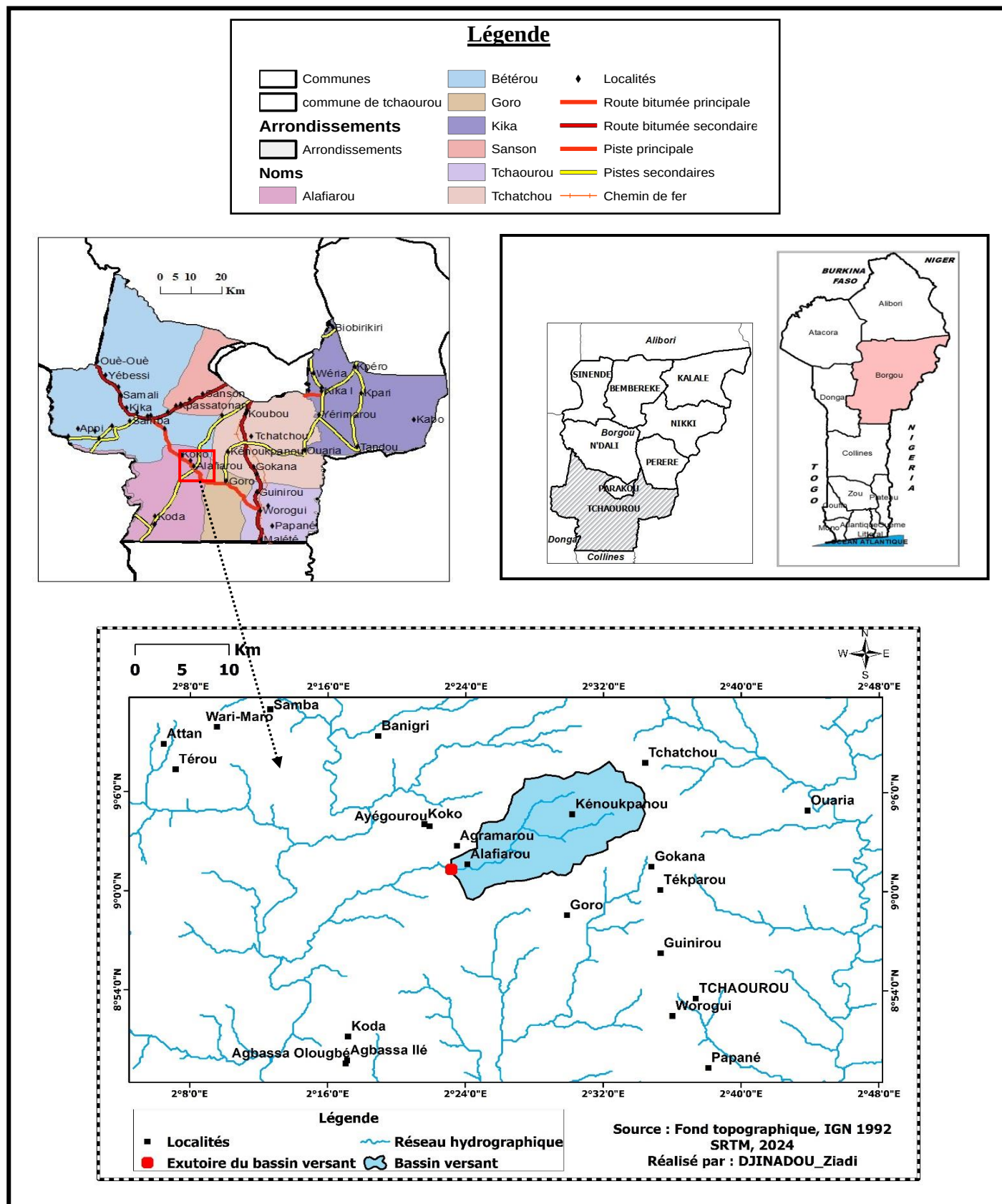


Figure 4 : Carte de situation du bassin versant du barrage de Alafiarou

CHAPITRE III

DONNEES, MATERIELS ET METHODES

Chapitre 3 : Données, matériels et méthodes

3.1. Introduction

Le chapitre 3 présente les différentes données utilisées durant cette étude, le matériel et son utilité puis la méthodologie détaillée des différents travaux réalisés.

3.2. Données utilisées

Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif des données utilisées. Il s'agit des données climatiques et hydrométriques collectées au niveau de la Météo-Bénin et de l'Observatoire AMMA-CATCH de l'IRD, dont les périodes de disponibilité sont variables.

Tableau 3 : Caractéristiques des données utilisées

Paramètres	Stations	Longitudes (°)	Latitudes (°)	Périodes	Sources
Pluie journalière (mm)	Parakou	2,6	9,35	1953 - 2022	Météo-Bénin
	Bétérou	2,2667	9,2	1953 - 2022	
	Tchaourou	2,6	8,8667	1953 - 2016	
	Dogue	1,939	9.103	1999 - 2022	Observatoire AMMA-CATCH de l'IRD
	Sarmanga	1.775	9.218		
	Wewe	2,117	9,384		
Températures maximale et minimale journalières (°C)	Parakou	2,6	9,35	1971 - 2022	Météo-Bénin
Evapotranspiration potentielle (mm/j)	Parakou	2,6	9,35	1971 - 2022	Météo-Bénin
Débits journaliers (m ³ /s)	Aguimo	2,023	9,128	1997 - 2010	Observatoire AMMA-CATCH de l'IRD

3.3. Matériel utilisé

Le présent travail a été effectué avec un ordinateur et les logiciels suivants :

- ✦ HYFRAN : Pour l'analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques et de débits ;
- ✦ ArcGIS 10.8.2 : Pour la réalisation des cartes ;
- ✦ Arc Hydro Tools : Pour la délimitation des bassins versants ;
- ✦ Microsoft Excel et Rstudio : Pour le traitement et la mise en forme des données ;
- ✦ Le package airGR de Rstudio : Pour la modélisation hydrologique avec les modèles GR4J et GR6J ;

- ✦ Microsoft Word : Pour la saisie de texte ;
- ✦ Autocad : Pour la détermination des surfaces partielles entre les courbes de niveau ;
- ✦ Zotero : Pour la gestion de références bibliographiques.

3.4. Méthodes

A l'entame de cette étude, une discussion approfondie a été menée avec le bureau d'étude ayant supervisé les travaux de réhabilitation de la retenue (SETEM-Bénin) à l'issue de laquelle le rapport d'avant-projet détaillé (APD) des travaux de réhabilitation du barrage a été obtenu. Par suite, une documentation a été effectuée sur le diagnostic des barrages en terres, l'estimation des débits de rivières en sites non jaugés et l'analyse fréquentielle des extrêmes hydrologiques (pluie et débits) constituant le guide dans l'élaboration de la méthodologie de notre étude.

3.4.1. Enquête de terrain

Une enquête de terrain exploratoire a été effectuée durant la période du 04 au 09 juillet 2024 afin de prendre en compte les réalités du site du barrage.

En effet, la méthodologie de cette enquête est composée d'une inspection du site à travers une visite détaillée des différentes parties de l'ouvrage, la prise de coordonnées GPS, la mesure des caractéristiques de la digue et ses protections au décimètre et des entretiens avec la population. Ces entretiens ont consisté à adresser un questionnaire d'enquête préétabli aux exploitants de la retenue et aux personnes ressources ayant plus d'une vingtaine d'années d'expérience dans le milieu et une bonne connaissance du site de l'ouvrage. La principale personne ressource étant la présidente de la coopérative des maraichers (Groupement-Ifètayo) qui a en charge la gestion du barrage depuis sa réalisation. Les réponses obtenues auprès des exploitants et de la personne ressource ont été donc croisées en vue de ressortir des réponses unanimes.

3.4.2. Estimation des quantiles de débits

3.4.2.1. Simulation des débits sur le bassin versant alimentant le barrage

L'analyse fréquentielle des données hydrologiques est une approche couramment utilisée pour obtenir de bonnes estimations quand l'information hydrologique est disponible au site d'intérêt et est de bonne qualité. Cependant, il n'est pas possible de disposer de stations de mesure dans tous les sites d'intérêt. On est souvent amené à estimer des événements extrêmes dans des sites où peu ou aucune information hydrologique n'est disponible. Dans ces cas, les hydrologues se basent sur des procédures d'estimation régionale qui permettent de transférer les données hydrologiques spatiales disponibles à d'autres bassins ayant un régime hydrologique similaire vers le site d'intérêt où l'estimation hydrologique est requise

(Taha, B.M.J., et al. (2008)). Selon Rindra (2012), en l'absence de données sur un site donné "cible" (bassin non jaugé), les approches le plus communément utilisées sont basées sur l'estimation des variables hydrologiques à partir des données provenant d'autres stations "donneurs" (bassins jaugés), jugées "similaires" ou appartenant à une même région climatiquement et/ou hydrologiquement homogène. A l'information locale, on substitue ainsi une information régionale : la "cible" reçoit les informations du (ou des) "donneur(s)" par un procédé de "régionalisation".

Par conséquent, la méthode de régionalisation avec la modélisation hydrologique a été utilisée dans cette étude pour simuler les débits sur le bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou.

La figure 5 présente les différentes étapes suivies pour simuler les débits à Alafiarou :

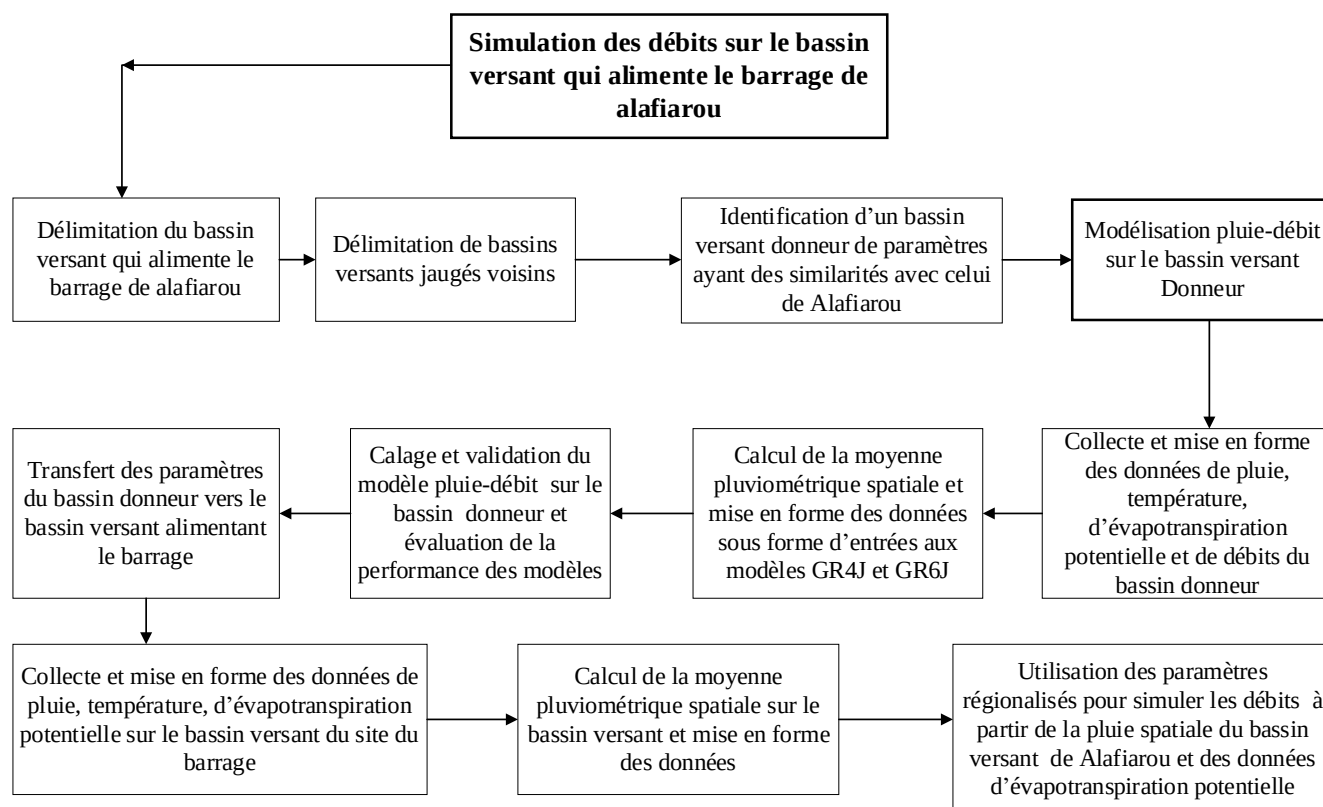


Figure 5 : Méthodologie de simulation des débits à Alafiarou

▲ Caractérisation des bassins versant

Après la délimitation des bassins versants, leurs caractéristiques physiographiques ont été calculées. Ce sont principalement les caractéristiques morphométriques (superficie, périmètre, indice de compacité, longueur, largeur du rectangle équivalent), hydrologiques (Longueur totale des cours d'eau) et du relief (pente moyenne)

Indice de compacité : Appelé également coefficient de forme, il correspond au rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même superficie

$$Ig = 0,282 \cdot P \cdot S^{(-\frac{1}{2})} \quad (1)$$

où, P est le périmètre du bassin en km ; S est la superficie du bassin, en Km².

Rectangle équivalent : C'est un rectangle qui a la même superficie, le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique que le bassin versant.

Sa longueur est donnée par l'expression :

$$L = S^{1/2} \left(\frac{Ig}{1,128} \right) \cdot \left[1 + \left(1 - \left(\frac{1,128}{Ig} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

Où, L est exprimée en km ; Ig est l'indice de compacité, sans dimension ; S est la superficie du bassin versant, exprimée en km².

Sa largeur est donnée par :

$$l = S^{1/2} \left(\frac{Ig}{1,128} \right) \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\frac{1,128}{Ig} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

▲ Brève présentation des modèles GR4J et GR6J

Le modèle GR4J (qui signifie modèle du Génie Rural à 4 paramètres journaliers) est un modèle journalier à quatre paramètres regroupés entre les précipitations et le ruissellement. Il appartient à la famille des modèles de comptabilité de l'humidité du sol. Le modèle GR4J est la dernière version modifiée du modèle GR3J proposé à l'origine par Edijatno et Michel (1989) puis successivement amélioré par Nascimento (1995) et Edijatno et al. (1999). Des versions plus récentes du modèle existent : à cinq paramètres (GR5J ; Le Moine, 2008) et à six paramètres (GR6J ; Pushpalatha, 2013).

▲ Structures et fonctionnement des modèles GR4J et GR6J

Le modèle GR4J a quatre paramètres à optimiser en calage :

X1 : capacité du réservoir de production (mm),

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm/jour),

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm),

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours).

On désigne par P (mm/jour) la hauteur de la pluie et par E (mm/jour) l'évapotranspiration potentielle (ETP). P est une moyenne spatiale sur le bassin versant, et E peut être issue d'une courbe d'ETP moyenne interannuelle.

Le modèle GR6J possède six paramètres optimisables. Il s'agit des quatre paramètres du modèle GR4J en plus des paramètres X_5 et X_6 qui représentent :

X_5 : Il s'agit du seuil de changement de signe de la fonction d'échanges souterrains, qui est adimensionnel. Ce paramètre additif au taux de remplissage du réservoir de routage est compris entre 0 et 1.

X_6 : X_6 est le paramètre de contrôle de la pente de la courbe de décrue, il s'exprime en mm. Ce paramètre est un niveau de base du réservoir exponentiel qui permet de reproduire le débit de base et de contrôler la dynamique des récessions de crues.

Les schémas de la figure 6 présentent respectivement les structures des modèles GR4J et GR6J :

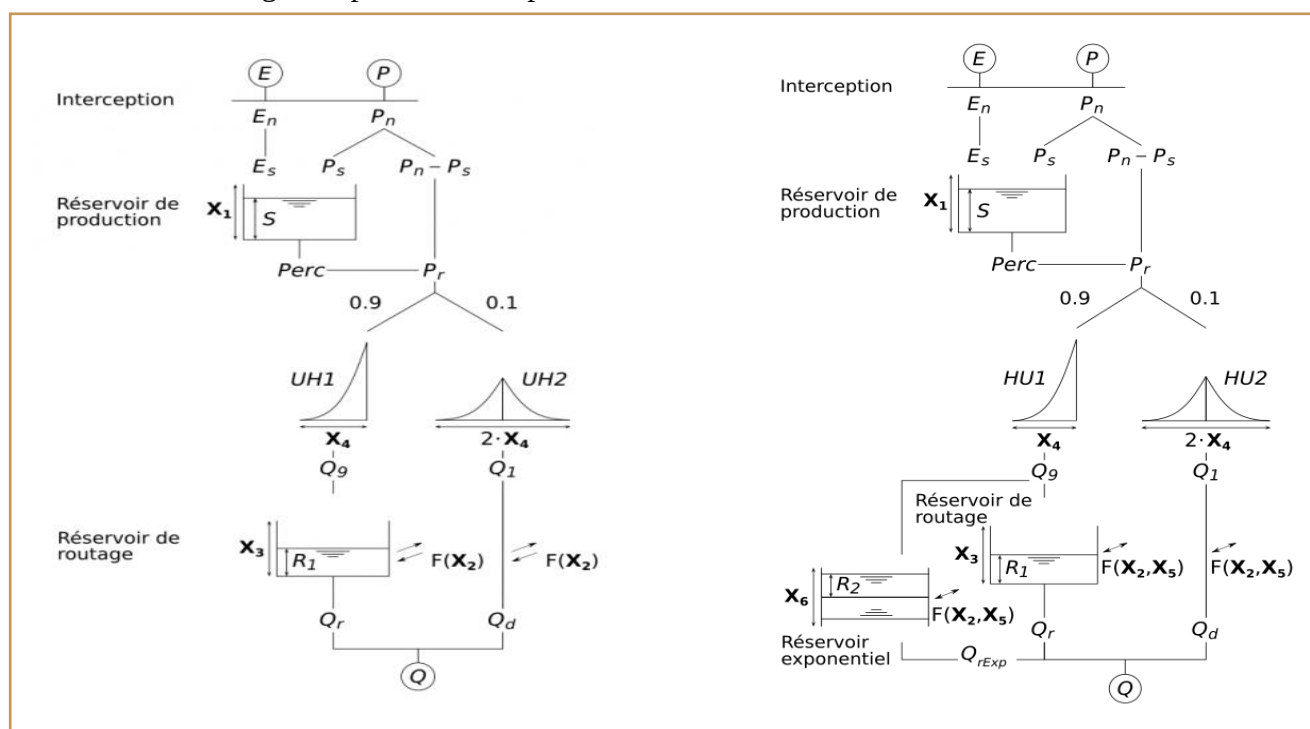


Figure 6 : Structures respectives des modèles GR4J et GR6J (Source : <https://www.inrae.fr/>)

Spatialisation des pluies par les polygones de Thiessen :

La méthode du polygone de Thiessen permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur locale. La précipitation moyenne

pondérée P_{moy} pour le bassin, se calcule alors en effectuant la somme des précipitations P_i de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire A_i), le tout divisé par la surface totale A du bassin. La précipitation moyenne sur le bassin s'écrit :

$$P_{moy} = \frac{\sum P_i A_i}{\sum A_i} \quad (4)$$

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin, A : aire totale du bassin ($A = \sum A_i$), P_i : précipitation enregistrée à la station i , A_i : superficie du polygone associée à la station i .

▲ Calage et validation du modèle pluie - débit

Deux modèles hydrologiques ont été utilisés pour caler et valider le modèle pluie débit sur le bassin donneur. Il s'agit des modèles GR4J, GR6J. Le meilleur modèle choisi a été celui qui offre les meilleurs critères en calage et en validation.

▲ Calcul des critères de performance

Après optimisation des paramètres des modèles, les critères de performance lors du calage et de la validation ont été évalués. Il s'agit des critères de Nash-sutcliffe (1970) désigné par **NSE**, de Kling-Gupta (2009) désigné par **KGE** et le pourcentage de Biais (**PBiais**).

- **Le critère de Kling-Gupta (KGE), formulé par Kling et Gupta (2009)**

Le Kling-Gupta Efficiency (KGE) développé par Gupta, Kling, Yilmaz et Martinez est une combinaison du coefficient de corrélation de Pearson (r), du rapport entre les moyennes simulées et observées et du rapport entre les variances simulées et observées.

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

$$KGE = 1 - DE \text{ avec } DE = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (5)$$

r : le coefficient de corrélation de Pearson entre la simulation et l'observation

α : σ simulé / σ observé : le coefficient qui caractérise la variabilité de la simulation par rapport à l'observation

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

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

- Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) - formulé par Nash et Sutcliffe (1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - \overline{Q_{obsi}})^2} \quad (6)$$

- Le Pourcentage de biais (Pbiais)

$$PBIAIS = \frac{\sum (Q_{sim(i)} - Q_{obs(i)})}{\sum Q_{obs(i)}} \times 100 \quad (7)$$

Le "PBIAS" (Pourcentage de Biais) est un critère d'évaluation utilisé pour mesurer le biais systématique d'un modèle de prévision ou de régression par rapport aux observations réelles. Il est souvent utilisé dans le domaine de l'hydrologie et de la modélisation hydrologique, mais peut également être appliqué à d'autres domaines où l'évaluation des biais est essentielle.

Le pbiais mesure la tendance moyenne des valeurs simulées à être plus grandes ou plus petites que celles observées. Le PBIAS exprime le biais moyen en pourcentage par rapport aux valeurs réelles. Un PBIAS de 0% indique que le modèle présente un biais nul, c'est-à-dire que les valeurs prédites sont en moyenne égales aux valeurs réelles. Un PBIAS positif indique un biais de surestimation, tandis qu'un PBIAS négatif indique un biais de sous-estimation.

Tableau 4 : Commentaires sur les critères de performance d'un modèle hydrologique

Critère de Performance	Intervalles de Valeurs	Commentaires
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)	NSE > 0.75 : Excellent 0.65 < NSE ≤ 0.75 : Très bon 0.50 < NSE ≤ 0.65 : Bon NSE ≤ 0.50 : Insuffisant	Un NSE proche de 1 indique une très bonne correspondance entre les valeurs observées et simulées
Pourcentage de Biais (Pbiais)	Plus la valeur est proche de 0, meilleure est la performance du modèle.	Mesure la tendance moyenne des valeurs simulées à être plus grandes ou plus petites que celles observées
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	KGE > 0.75 : Excellent 0.50 < KGE ≤ 0.75 : Très bon 0.25 < KGE ≤ 0.50 : Bon KGE ≤ 0.25 : Insuffisant	Combine la corrélation, le biais et la variabilité pour évaluer la performance globale du modèle

Source : <https://hydroclimat.com/fr/faq/modele-hydrologique>

3.4.2.2. Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes

L'approche méthodologique adoptée pour réaliser une analyse fréquentielle implique les étapes suivantes :

- **Échantillonnage :**

Il s'agit d'un processus consistant à extraire les valeurs maximales annuelles dans une série ou toutes les valeurs au-dessus d'un seuil donné. Dans le cas de cette étude, la valeur maximale annuelle a été extraite pour obtenir une série chronologique de taille égale au nombre d'années.

- **Test d'hypothèses :**

Après l'échantillonnage, la série des valeurs maximales obtenues est soumise à des tests d'hypothèses, condition nécessaire pour un bon ajustement. En pratique, des changements dans les conditions de mesure (relocalisation des stations, remplacement des instruments de mesure, modification des heures d'observation ou changement dans l'environnement immédiat de l'instrument de mesure) peuvent introduire des ruptures artificielles dans les données qui ne reflètent pas les variations climatiques réelles (Beaulieu et al., 2007). Il est donc essentiel de vérifier que les données collectées sont indépendantes (absence d'autocorrélation entre les observations), stationnaires (les caractéristiques statistiques ne varient pas dans le temps), et homogènes (issues de la même distribution). Ainsi, pour vérifier ces trois hypothèses, les tests de wald-wolfowitz, de Mann-Kendall et wilcoxon (Alamou, 2021 ; Koumasi et al, 2014 ; Ague et Afouda, 2015) ont été respectivement utilisés avant de procéder au Choix des distributions auxquelles la série des valeurs maximales est ajustée.

- **Choix de la distribution des valeurs extrêmes :**

Dans la littérature, la série des extrêmes hydroclimatiques peut être ajustée en utilisant plusieurs distributions de valeurs extrêmes : Exponentielle, Gamma, Lognormale, Fréchet, Pareto, Weibull, Gumbel, Pearson, etc. Trouver le modèle statistique qui s'ajuste le mieux à la série des valeurs maximales de la variable étudiée est donc crucial pour le succès de l'analyse fréquentielle. Plusieurs études ont montré la dominance de la distribution de Gumbel (Ague et Afouda, 2015). Une analyse de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) de 55 agences dans 28 pays révèle que 52% des agences utilisent la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV) comme référence principale. Cette distribution admet comme cas particuliers les distributions de Gumbel, Fréchet et Weibull, 31% utilisent soit une distribution Pearson III ou une distribution Log Pearson III, ou une distribution de type Pearson III (Brahim et al., 2013). Il existe plusieurs critères, y compris les critères d'information et les critères graphiques (Aziz, 2011), pour sélectionner la distribution appropriée pour un ensemble de valeurs

maximales. Les critères d'information sont les plus utilisés (Aziz, 2011 ; Lawin et al., 2000) et ont été considérés dans cette étude pour sélectionner les distributions qui s'ajustent le mieux à la série des valeurs maximales annuelles. Il comprend les critères d'information d'Akaike (AIC) proposés par Akaike (1974) et définis par :

$$AIC = -2 \log(L) + 2K \quad (8)$$

Selon ce critère, la déviance du modèle (-2log(L)) est pénalisée par 2 fois le nombre de paramètres k. L'AIC représente un compromis entre le biais, qui diminue avec le nombre de paramètres, et la parcimonie (le besoin de décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possible).

Le Critère d'Information de Bayes (BIC) : Proposé par Schwarz (1978), est défini par :

$$BIC = -2 \log(L) + 2K \log(N) \quad (9)$$

Dans les deux équations (AIC et BIC), L est la vraisemblance, K est le nombre de paramètres de la distribution et n est la taille de l'échantillon. Après la détermination des deux paramètres AIC et BIC, le choix du modèle ou de la distribution qui s'ajuste le mieux à la série de valeurs extrêmes a été effectué.

Le tableau 5 présente les distributions de probabilité utilisées dans cette étude et leur fonction de densité de probabilité :

Tableau 5 : Fonction densité de probabilité et paramètres des lois choisies

Loi	Fonction de densité de probabilité	Paramètres
GEV	$f(x) = \exp \left(- \left[1 + \frac{k}{\sigma} (x - \mu) \right]^{-\frac{1}{k}} \right), k \neq 0 \quad (10)$	μ, σ, k
	$f(x) = \exp \left(- \exp \left(- \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right] \right) \right), k = 0 \quad (11)$	
Gumbel	$f(x, \alpha, u) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- \frac{x - u}{\alpha} - \exp \left(- \frac{x - u}{\alpha} \right) \right] \quad (12)$	α, u
Lognormal	$f(x, \alpha, u) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{[\ln x - u]^2}{2\sigma^2} \right] \quad (13)$	u, σ
Pearson type 3	$f(X) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} e^{-\alpha(x-m)} (X - m)^{\lambda-1} \quad (14)$	α, λ, m

Avec m : le paramètre d'origine $m \leq X \leq \infty$; λ : est le paramètre de forme $\lambda > 0$; α : est le paramètre d'échelle $\alpha > 0$.

- Méthodes de détermination des paramètres des lois

La détermination des paramètres des lois retenues peut être faite par différentes méthodes. Il s'agit de la méthode graphique, de la méthode des moments, la méthode du maximum de vraisemblance, de la minimisation d'un test d'adéquation. Les méthodes d'estimation des paramètres les plus utilisées sont en pratique la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode des moments (Bobée et Perreault, 1992). Plusieurs auteurs ont opté pour l'utilisation de la méthode du maximum de vraisemblance (Ague et Afouda, 2015 ; Ague, 2015 ; Hounkpè et al., 2015, Hounkpè et al., 2021). De plus, cette méthode présente l'avantage d'être commune à toutes les lois choisies. Par conséquent, dans le cadre de cette étude, la méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée pour la détermination des paramètres des différentes lois.

Dans la présente étude, l'analyse fréquentielle des pluies maximales journalières annuelles et des débits maximaux a été faite avec le logiciel Hyfran-Plus.

Les polygones de Thiessen tracés sur le bassin versant alimentant le barrage de Alafiarou ont permis d'identifier les stations pluviométriques qui l'influencent. La période de 1953 à 2016 a été considérée sur toutes les stations pluviométriques identifiées puisqu'elle est la période en commun aux données de ces stations. Par ailleurs, le contrôle préalable de la qualité des données de pluie a été effectué en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes avant l'extraction des maximas annuels. Pour ce faire, les taux de lacunes par années dans les séries pluviométriques ont été calculés. Le régime de notre zone d'étude étant uni-modale, la saison pluvieuse s'étend d'avril à octobre en général et s'installe entre juin et octobre. L'étude des valeurs manquantes s'est donc focalisée sur cette période. Ainsi, pour chaque station et pour chaque année, nous avons évalué le rapport du nombre de valeurs manquantes entre les mois de juin et octobre par rapport au nombre total de jours pluvieux. Ensuite, nous avons procédé à l'élimination des années avec un taux de lacune supérieur ou égal à 25%.

3.4.2.3. Conversion des quantiles de pluie en quantiles de débits par la méthode rationnelle

Plusieurs méthodes existent pour déterminer les débits de retour d'un aménagement. En cas de disponibilité d'observation de débits sur une période plus ou moins longue (30 ans au moins), une analyse fréquentielle peut être effectuée pour déduire les quantiles correspondant à différentes périodes de retour (Hounkpè J et al, 2017). Par ailleurs, en cas de non-disponibilité de données de débits, le calcul des débits correspondant à différentes périodes de retour peut s'effectuer à partir de la formule rationnelle dont l'expression est donnée par l'équation 16 (Bernadotte, 2006) :

$$Q = C.I.A \quad (15)$$

Avec C le coefficient de ruissellement du bassin versant ; A sa superficie ; I l'intensité de la pluie de période de retour T et Q le débit de période de retour correspondant.

3.4.3. Estimation du volume d'apport moyen annuel

L'estimation du volume d'apport moyen annuel d'eau sur le bassin versant a été faite à partir des débits (en m³/s) simulés à Alafiarou. La méthodologie utilisée se présente comme suit :

- Calcul du nombre de jours que compte chaque année sur la période considérée
- Estimation du volume annuel sur chaque année en utilisant la formule :

$$Vi = \frac{\sum_{i=1}^n Qi}{Ni} * 24 * 60 * 60 * Ni \quad (16)$$

Où Qi : représente le débit journalier en m³/s ; Ni : Représente le nombre total de jour dans l'année considérée, le débit moyen annuel calculé étant toujours en m³/s.

- Calcul du volume d'apport moyen annuel d'eau sur le bassin versant : Après l'obtention des apports moyens annuels, une moyenne interannuelle a été calculée.

3.4.4. Calculs hydrauliques sur la retenue

★ Estimation de la capacité de stockage de la retenue d'eau de Alafiarou

La méthodologie pratique utilisée pour estimer la capacité de stockage de la retenue d'eau de Alafiarou à partir du levé en plan de la cuvette est présentée par le tableau 6 :

Tableau 6 : Méthodologie pratique d'estimation du volume de stockage d'une retenue d'eau

Côte	Surface (ha)	Surface moyenne (ha)	Hauteur (m)	Volume partiel (m ³)	Volume cumulé (m ³)
Fond	S _a	$\frac{S_0 + S_1}{2} = \frac{S_1}{2}$	d	$V_1 = \frac{S_1}{2} \cdot d$	V
Fond + d	S ₁	$\frac{S_1 + S_2}{2}$	h	$V_2 = \frac{S_1 + S_2}{2} h$	V1+V2
Fond + d + h	S ₂	$\frac{S_2 + S_3}{2}$	h	$V_3 = \frac{S_2 + S_3}{2} h$	V1 + V2 + V3
Fond + d + 2h	S ₃	$\frac{S_3 + S_4}{2}$	h	$V_4 = \frac{S_3 + S_4}{2} h$	V1 + V2 + V3 + V4
Fond + d + 3h	S ₄	$\frac{S_4 + S_i}{2}$	h		
Fond + d + (i - 1)h	S _i	$\frac{S_{n-1} + S_n}{2}$	h	V _n	
Fond + d + (n - 1)h	S _n	$\frac{S_{n-1} + S_{n+1}}{2}$	h	$V_{n+1} = \frac{S_n + S_{n+1}}{2} h$	V1 + V2 + V3 + ... + Vn+1

✦ Calculs sur l'évacuateur de crues

Les calculs sur l'évacuateur de crue portent sur la crue maximale que le déversoir peut évacuer. La formule suivante permet de calculer la crue maximale à évacuer connaissant la longueur du déversoir :

$$Q_{cm} = m * L * h^{\frac{3}{2}} * \sqrt{2g} \quad (17)$$

Avec Q_{cm} le débit de crue maximale ; m : coefficient de débit (m=0,4) ; L : Longueur de déversement (m) ; h : épaisseur de la lame déversoir (m)

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats issus de l'application de la méthodologie décrite ci-dessus.

4.1. Evaluation de l'état du barrage et son fonctionnement

4.1.1. Historique de la retenue d'eau de Alafiarou

Le site d'aménagement de la retenue était un bas-fond où logeait la rivière *Tèmayé* en langue Nago et les abords de la rivière exploités pour la culture maraichère. Tèmayé est une rivière temporaire (bras de Toui, un affluent de Ouémé supérieur) qui s'assèche durant la période sèche causant des difficultés d'accès à l'eau pour les activités de production des populations durant cette période. Par conséquent, à l'issu d'une assise des sages du village, des plaintes ont été donc convoyées vers les ATDA. Au fil du temps, le plan de sécurité alimentaire par intensification de la production agricole (PSAIA) a réalisé en 2002 à travers un financement de la BOAD les travaux de construction de la retenue d'eau de Alafiarou avec un aménagement maraicher de 02 ha en aval. Elle est gérée par une coopérative villageoise de maraichers (Groupement de femmes IFETAYO). Plus tard en 2019, le PAPVIRE-ABC a lancé grâce au financement de la banque africaine de développement (BAD) les travaux de réhabilitation de la retenue avec une extension du périmètre irrigué à 06,15 ha.

Le barrage est à vocation multiple : Il limite les effets de l'inondation des pistes rurales lors de la période de crues, et est utilisé pour l'agro-pastoralisme (irrigation des cultures et abreuvement du bétail) ainsi que pour les usages domestiques par les populations environnantes.

4.1.2. Présentation des caractéristiques et description des composants de la retenue

La retenue d'eau de Alafiarou est composée de la cuvette, de la digue, du déversoir, du chenal évacuateur et des mesures d'auscultation. En aval du barrage se trouve 06.15 ha de périmètre irrigué.

Tableau 7 : Caractéristiques des composants du barrage de Alafiarou

Parties d'ouvrage	Caractéristiques	Valeurs
La Digue	Longueur	270 m
	Largeur en crête	3,5 m
	Hauteur	1,80 m
	Cote de calage	108
	Pente des talus amont et aval	1/2.5
Le Déversoir	Longueur	30 m
	Largeur	0,30 m
	Hauteur	0,5 m

	Cote de calage	107.0
Bassin de dissipation à la suite du déversoir	Longueur et largeur	30m * 3m
Chutes d'eau dans le chenal	Hauteur	1m
	Longueur	30m

La cuvette : La cuvette de la retenue est peu encaissée et a une forme allongée. Elle est entourée par des fils de fer barbelés pour empêcher l'accès direct. L'eau stockée par la cuvette est exploitée à des fins diverses : l'irrigation des cultures pour la production de contre saison (Mais, riz, légumes...), l'abreuvement de l'important cheptel bovin local et venant d'ailleurs, les usages domestiques (Lessive, lavage d'engins).

La digue : Il s'agit d'une digue en terre homogène. Elle a une longueur de 270 m et une largeur en crête de 3,5 m. Sa hauteur est de 1.80 m et il est calé à la cote 180 m. Les pentes des talus amont et aval sont normales et sont de $\frac{1}{2}, 5$. Dans la zone de jonction entre la digue et le déversoir se trouve des perrés maçonnés. En amont et en aval de la digue se trouve des drains de pied et une espèce végétale antiérosive.

Le déversoir : Il est latéral et est situé en rive droite de la digue. Sa longueur est de 30m avec une crête aplatie et une hauteur très faible de 0,5 m servant à faire évacuer la crue.

Le chenal évacuateur : C'est un canal à fond plat de section trapézoïdale. Il comporte :

- Un bassin de dissipation en béton de dimensions 30 m x 3 m qui communique directement avec le déversoir ;
- Un perré maçonné sur les 30 premiers mètres du chenal évacuateur ;
- Quatre (04) chutes de 1 m de hauteur chacun avec bassin de dissipation en aval. Chaque chute est protégée en amont par 5 m de perré sec et par 10 m de perré maçonné à l'aval du bassin de dissipation.

Les mesures d'auscultation : Les mesures d'auscultation de retenues d'eau sont des équipements qui permettent de diagnostiquer la retenue en cas de dysfonctionnement. Il s'agit de l'échelle limnimétrique qui permet de suivre les variations de niveau d'eau dans la cuvette et d'un pluviomètre.

4.1.3. Etat des lieux de la retenue d'eau de Alafiarou

4.1.3.1. Etat du barrage après la réhabilitation



Photo 2 : Epis du chenal dégradé



Photo 3 : Epis du chenal dégradé



Photo 4 : Bassin de dissipation dégradé

4.1.3.2. Etat des lieux actuels du barrage

La cuvette : Les observations faites sur la cuvette se déclinent comme suit : la destruction des fils de fer barbelés l'entourant causant l'accès direct des troupeaux et les usages domestiques dans son emprise.

La digue : En dehors de la végétation présente sur les talus, les observations faites sur la digue présentent une digue apparemment en bon état.

Le déversoir : En dehors de la diminution de sa hauteur de pelle qui est de 0.40m actuellement, aucune observation particulière n'a été faite sur le déversoir.

Le chenal évacuateur : Les parements amonts des épis de protection dans le chenal sont enherbés ainsi que le chenal lui-même.

Les mesures d'auscultation : Elles sont pratiquement inexistantes. L'échelle limnimétrique est absente ainsi que les relevés limnimétriques et pluviométriques. Seul un pluviomètre est présent sans aucun relevé journalier.





- a, b)** : (Cuvette de la retenue d'eau de Alafiarou) ; **c)** Prélèvements d'eau dans la cuvette ;
d) Clôture en fil de fer barbelés de la cuvette détruits ; **e)** : Zone de jonction digue-déversoir ;
f) : Digue du barrage enherbée ; **g, i, j)** : Déversoir du barrage
h) : Bassin de dissipation et perrés maçonnés à la suite du déversoir ; **k)** : Chenal évacuateur enherbé ;
l) : Pluviomètre implanté sur le site sans relevés journaliers

Photo 5: Etat actuel des lieux des différentes parties du barrage de Alafiarou

4.1.4. Rapport d'enquête de terrain

A l'issue des entretiens sur le terrain, les informations suivantes ont été obtenues :

❖ Fonctionnement du barrage

La période pluvieuse à Alafiarou s'étend du mois d'avril à octobre. Les mois de juillet, août et septembre sont les mois les plus pluvieux. Cette période correspond à la crue sur la retenue d'eau avec un pic en septembre. Durant ces périodes, la crue est excessive sur la retenue surtout en septembre et la grande partie de ces eaux sont directement évacuées par le déversoir. Le volume d'eau stocké restant couvre la

période d'octobre à février et permet de subvenir aux besoins en eau pour les activités de production durant la période.

❖ Rendement et productivité

Ces dernières années, la productivité agricole et maraichère des exploitants de la retenue s'est affaiblit considérablement et a entraîné d'énormes pertes économiques aux producteurs. Cette baisse des rendements est causée par la non-survie des plantations malgré les traitements et soins. Selon certaines sources, cela serait lié à la mauvaise qualité de l'eau à cause des usages qui se font directement dans l'emprise de la cuvette.

❖ Causes probables des dégradations

En période de crue, un volume d'eau important transite par le chenal évacuateur du barrage pour atteindre le lit normal du cours d'eau. Cela aurait même occasionné auparavant la rupture d'un dalot situé à la fin du chenal et servant d'ouvrage de franchissement durant la période de crues. Par conséquent, les apports d'eau sur le barrage de Alafiarou sont considérables et pourraient être à l'origine des dégradations du barrage. Ces résultats prouvent la nécessité d'une étude hydrologique et hydraulique approfondie sur le barrage.

4.2. Analyse des facteurs hydrologiques pouvant contribuer aux dégradations

4.2.1. Simulation des débits sur le bassin versant alimentant le barrage

L'approche de régionalisation a été utilisée pour simuler les débits sur le bassin versant qui alimente la retenue d'eau de Alafiarou.

4.2.1.1. Identification du bassin versant donneur de paramètres

✦ Délimitation du bassin versant alimentant le barrage

La délimitation du bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou a été faite à partir de l'exutoire imposé par les coordonnées de l'emplacement du barrage prises sur le site. Sa superficie est de 167,6 Km² et son périmètre de 60,36 Km. Son réseau hydrographique est composé des cours d'eau temporaires dont la longueur totale est de 26,59 Km.

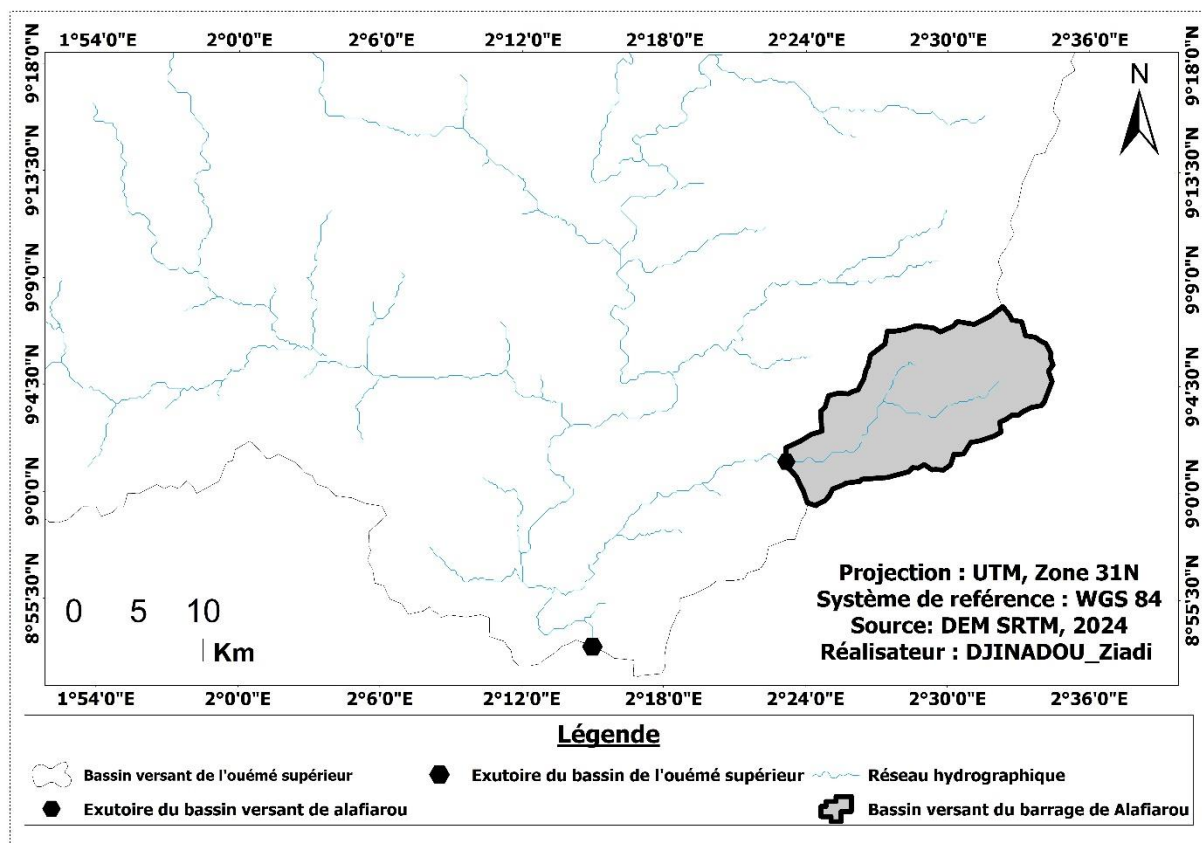


Figure 7 : Bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou

✦ Identification du bassin versant donneur de paramètres

L'identification du bassin donneur de paramètres à celui de Alafiarou a été faite à travers la délimitation des bassins versant jaugés voisins à partir des coordonnées des stations hydrométriques du Bénin. La carte suivante présente les différents bassins délimités :

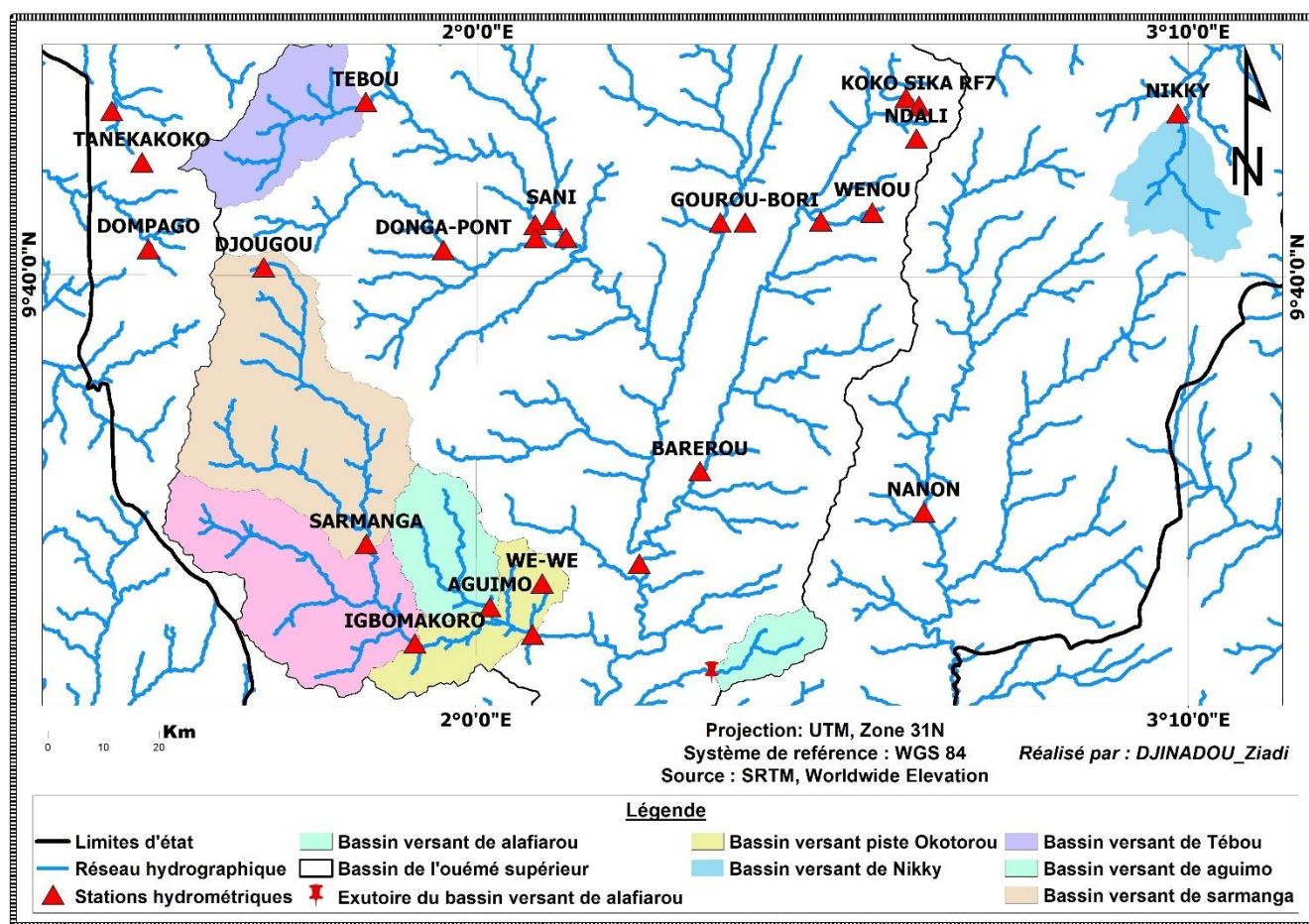


Figure 8 : Bassins versants jaugés délimités

De l'analyse de la figure 8, on remarque que les bassins versants délimités de Sarmanga, Igbomakoro, piste Okotorou et Aguimo sont situés dans la même latitude que le bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou (en dessous de la latitude $9^{\circ} 40' 0''N$). De même, ces bassins versants sont ceux les plus proches de celui de Alafiarou. Ils peuvent donc constituer une première liste de bassins versants à explorer.

Le tableau 8 présente les caractéristiques physiographiques des différents bassins délimités :

Tableau 8 : Caractéristiques physiographiques des bassins versants

Bassin versant	Alafiarou	Aguimo	Igbomakoro	Sarmanga	Piste okotorou
Paramètres morphométriques					
Superficie (Km²)	167,6	395,60	2345	1363	3135,17
Périmètre en km	60,36	85,81	245	179,3	286,28
Indice de compacité	1,32	1,22	1,43	1,37	1,44

Longueur du rectangle équivalent (Km)	22,85	29,49	98,75	70,25	116,15
Largeur du rectangle équivalent (Km)	7,34	13,41	23,75	19,40	26,99
Paramètres hydrologiques					
Longueur totale des cours d'eau (Km)	26,59	58,25	343,51	203,82	470,34
Paramètres du relief					
Pente moyenne en %	2,22	2,31	2,19	2,08	2,23

A l'issu de l'analyse de ce tableau, on remarque que le bassin versant de Aguimo est celui dont les caractéristiques physiographiques (hydrologiques, morphométriques et du relief) sont les plus proches de celui de Alafiarou. La figure 9 présente les bassins versants de Aguimo et de Alafiarou. L'analyse de cette figure montre que les bassins versants de Alafiarou et de Aguimo se situent entre les mêmes longitudes et latitudes.

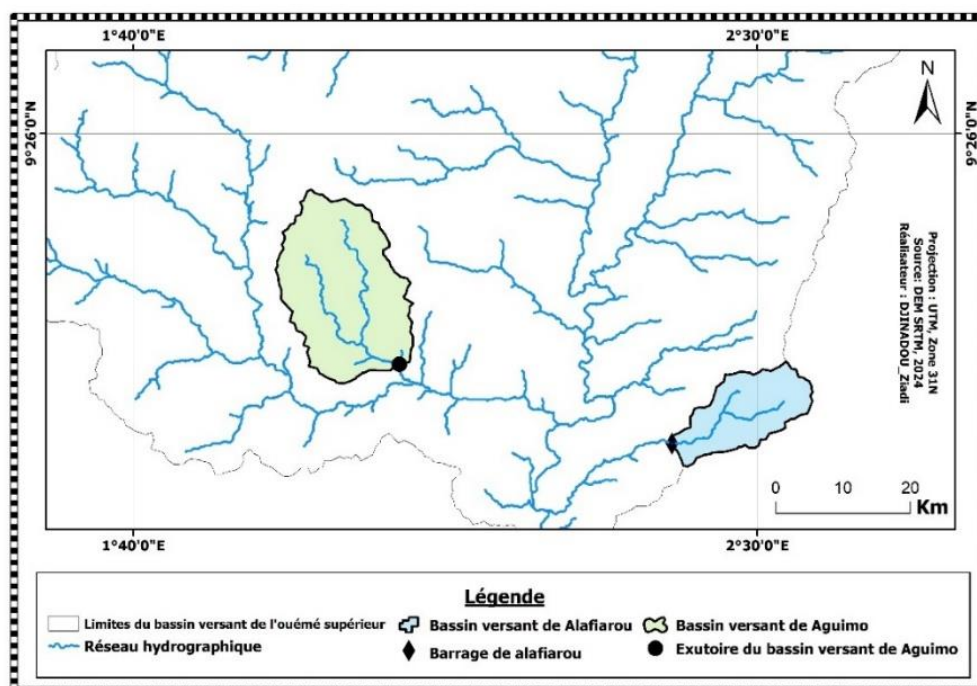


Figure 9 : Bassins versant de Alafiarou et de Aguimo

Du point de vue climatique, la figure 10 présente les variations des totaux pluviométriques annuels sur les bassins versants de Aguimo et de Alafiarou. De l'analyse de cette figure, il ressort que les totaux pluviométriques annuels des bassins versants de Aguimo et de Alafiarou suivent la même variation. De plus, en ce qui concerne la température et l'évapotranspiration potentielle, leurs variations sont identiques sur les deux bassins versants car elles proviennent de la station synoptique de Parakou qui est celle la

plus proche. On en déduit que les bassins versants de Alafiarou et de Aguimo sont pratiquement soumis au même régime climatique.

De tout ce qui précède, le bassin versant de Aguimo est le bassin versant apparenté similaire, le plus proche et disposant d'une bonne qualité de données par rapport au bassin versant alimentant le barrage de Alafiarou.

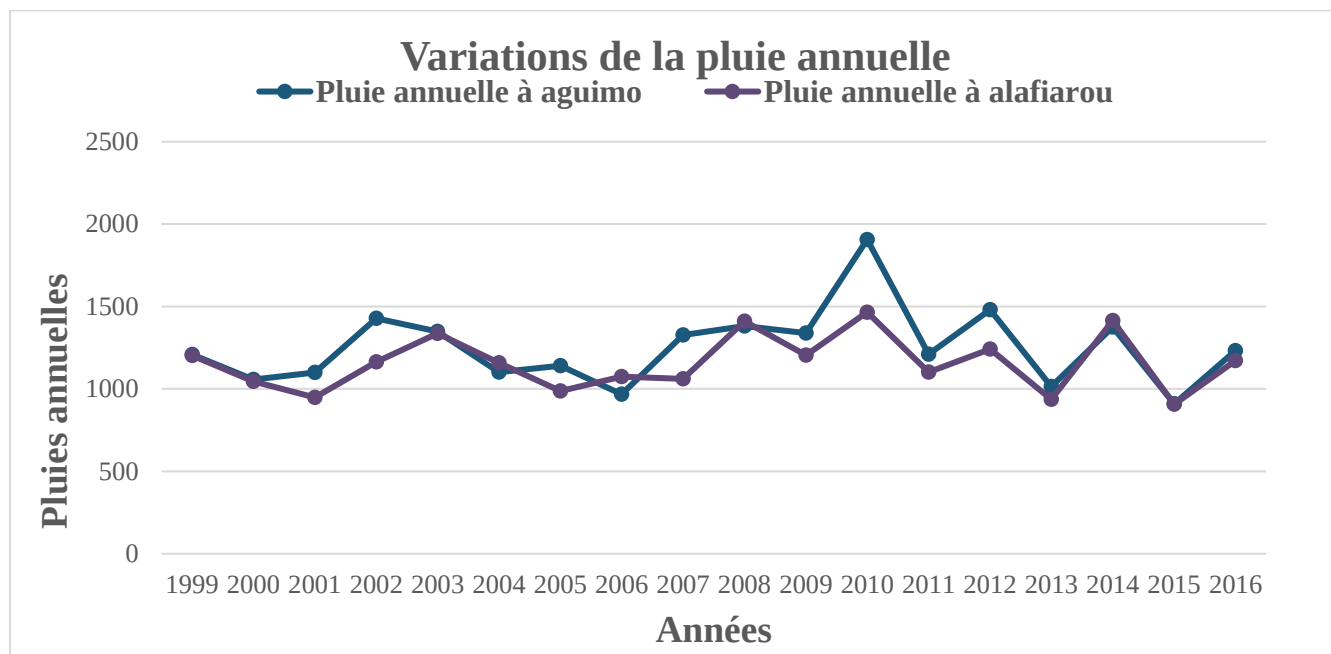


Figure 10: Variation de la pluie annuelle à Aguimo et Alafiarou

4.2.1.2. Modélisation hydrologique sur le bassin versant donneur

Deux modèles ont été utilisés dans le cadre de la modélisation hydrologique à Aguimo. Il s'agit des modèles GR4J et GR6J. Les figures ci-après présentent les résultats issus de ces modèles lors du calage sur la période de 2001 à 2004 avec 2000 utilisée comme année de mise en route du modèle.

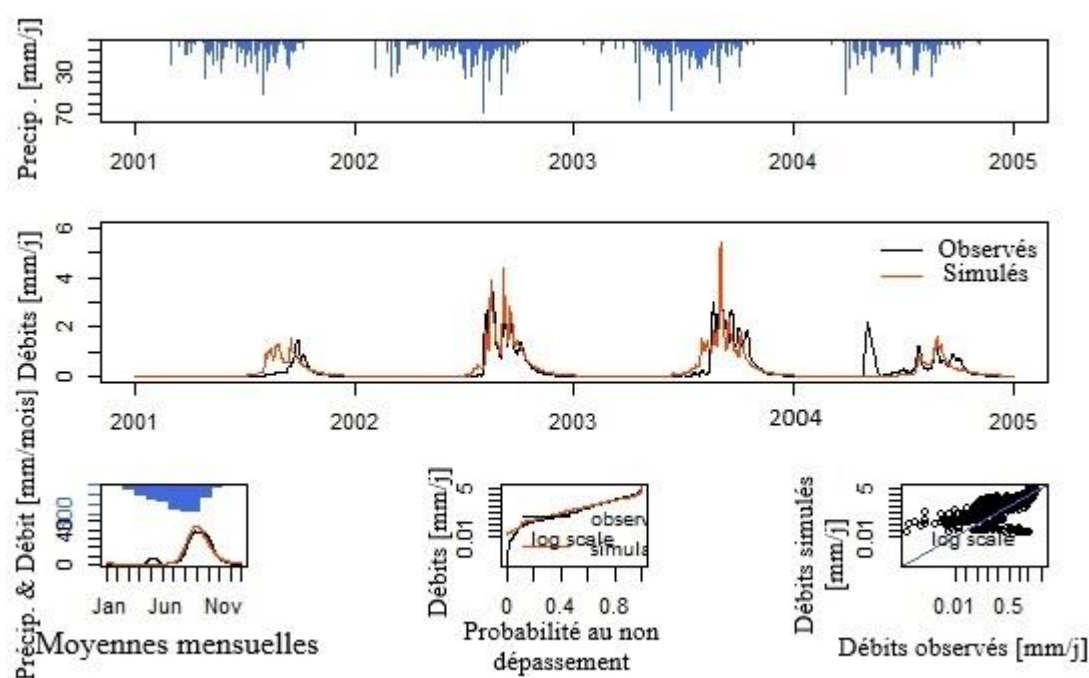


Figure 11: Résultat du calage du modèle pluie- débit à Aguimo sur la période de 2001 à 2004 par le modèle GR4J

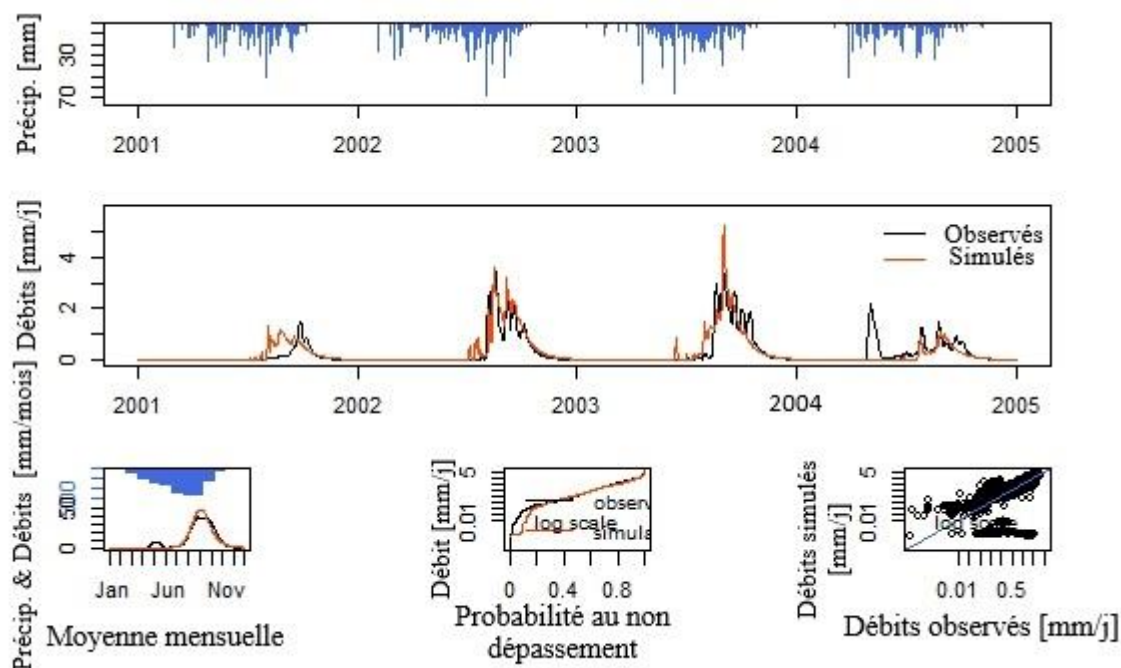


Figure 12: Résultats du calage du modèle pluie-débit à Aguimo sur la période de 2001 à 2006 par le modèle GR6J

Les critères de performance des modèles calés sont présentés dans le tableau 9 :

Tableau 9: Présentation des critères de performance obtenus en calage

Critères de performance Modèles Hydrologiques	Nash (NSE)	KGE	Pbiais (%)
GR4J	0,67	0,81	4,5
GR6J	0,68	0,84	0,30

D'après l'analyse des différentes figures et du tableau 9, il ressort que les valeurs des critères de performance obtenus avec le modèle GR6J sont ceux qui se rapprochent le plus des valeurs optimales ou acceptables comparativement au modèle GR4J.

De plus, pour ces deux modèles utilisés, le critère de Kling-Gupta efficiency (KGE) se rapproche plus de sa valeur efficiente qui est 1 par rapport aux autres critères. On en déduit que le critère de Kling-Gupta est le meilleur pour l'évaluation de la performance de nos modèles.

La validation du modèle a été effectuée sur 3 ans (2007-2009) à partir des paramètres calés donnés par la maximisation du critère KGE. Les résultats issus de la validation sur ladite période se présentent comme suit pour les deux modèles :

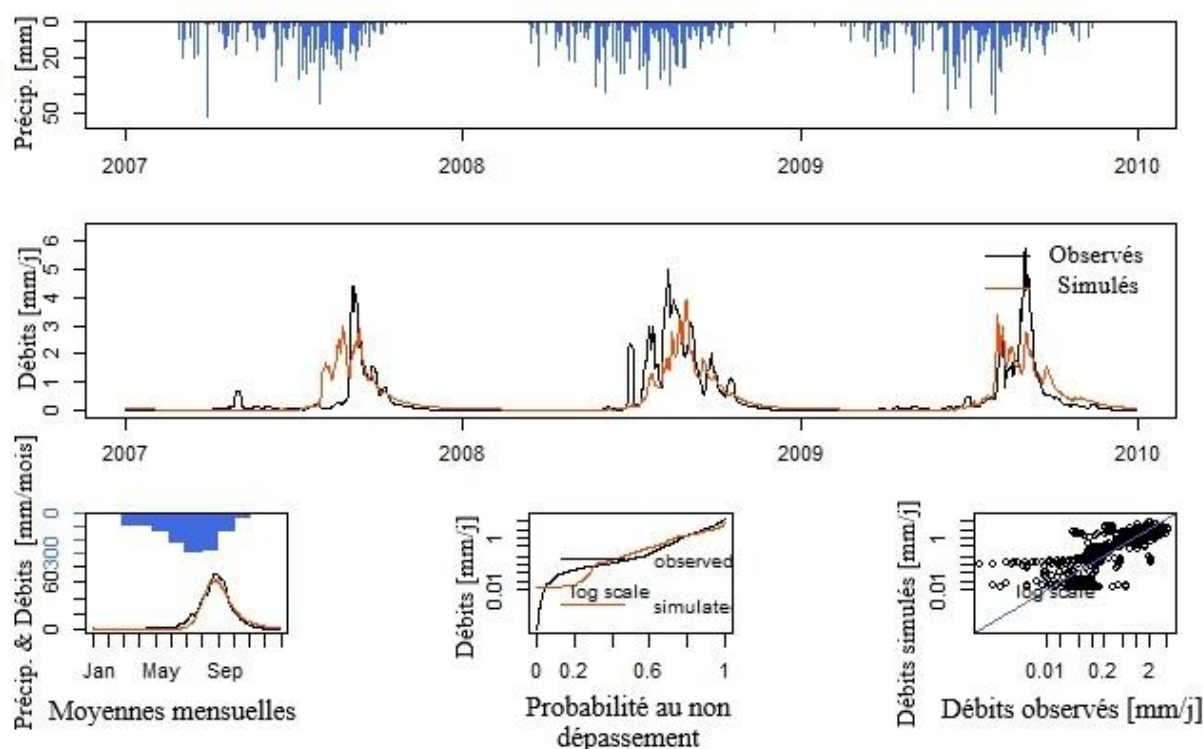


Figure 13: Résultat de la validation du modèle pluie-débit par le modèle GR4J

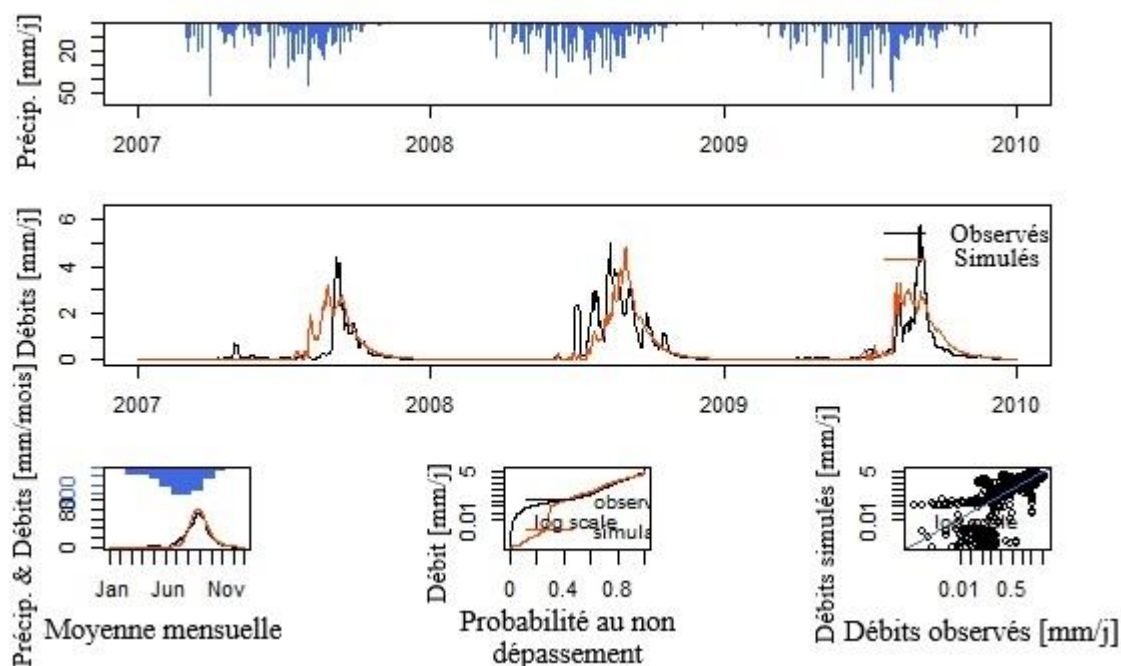


Figure 14 : Résultat de la validation du modèle pluie-débit par le modèle GR6J

Les critères de performance obtenus en validation des modèles sont :

Tableau 10 : Critères de performance en validation

Modèles Hydrologiques	Critères de performance		
	Nash (NSE)	KGE	Pbiais (%)
GR4J	0,58	0,67	-5
GR6J	0,57	0,76	5,8

L'analyse du tableau 10 indique que le critère de performance de Kling-Gupta donné par le modèle GR6J en validation se rapproche plus de sa valeur efficiente (1) comparé au modèle GR4J.

En somme, le KGE obtenu en calage et en validation avec le modèle GR6J est satisfaisant :

- Excellent en calage car ($KGE > 0,75$)
- Excellent en validation car ($KGE > 0,75$)

On en déduit que les paramètres donnés par le modèle GR6J ont une performance satisfaisante dans la représentation de la relation entre la pluie et le débit à l'exutoire du bassin versant de Aguimo.

4.2.1.3. Simulation des débits sur le bassin versant de Alafiarou

Les paramètres calés et validés à l'exutoire du bassin versant de Aguimo (Bassin versant donneur de paramètres identifié) sont transférés au bassin versant de Alafiarou (site du barrage) en vue de simuler les débits.

Le tableau suivant présente les valeurs des différents paramètres du modèle :

Tableau 11 : Paramètres du bassin versant de Aguimo par le modèle GR6J

Paramètres du modèle Modèle	X1	X2	X3	X4	X5	X6
GR6J (Aguimo)	118,269	-1,175	275,434	3,427	-0,101	14,033

A partir des données de précipitations, d'évapotranspiration potentielle et des paramètres régionalisés du bassin versant qui alimente le barrage, les débits ont été simulés sur la période de 1972 à 2022 avec 1971 utilisée comme année de mise en route du modèle lors de la simulation. La figure ci-dessous présente un échantillon de la variation des débits simulés sur le bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou sur la période de 2000 à 2010.

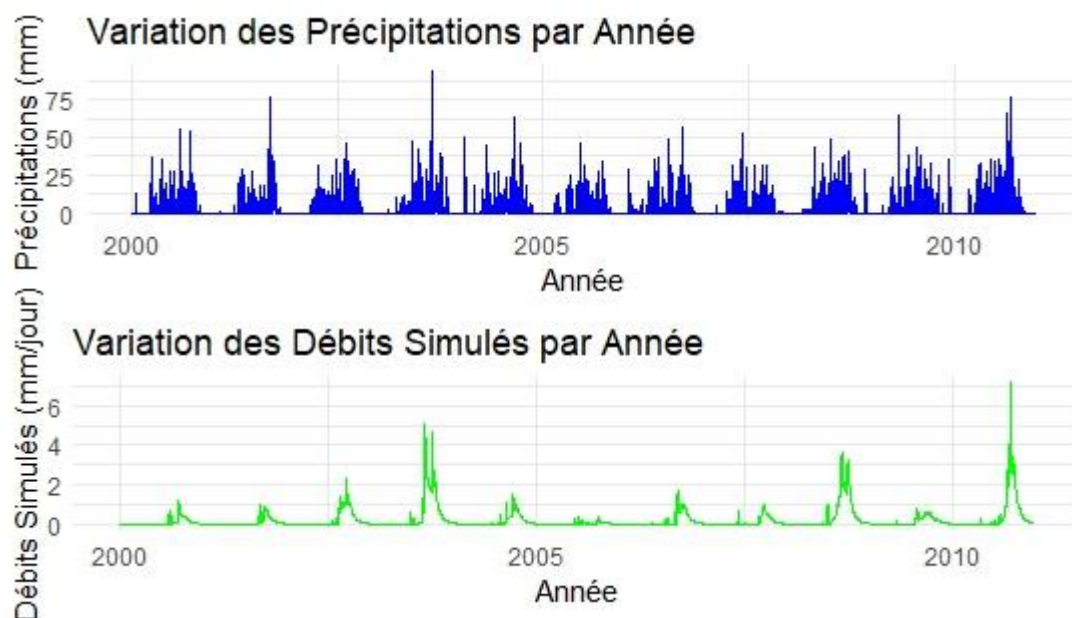


Figure 15: Variation des débits simulés et des pluies à Alafiarou

Les simulations ont été comparées aux observations brutes du bassin versant de Aguimo (Bassin versant donneur utilisé) en vue d'évaluer leur performance.

Le tableau 12 présente les critères de performance calculés sur les simulations du bassin versant de Alafiarou à partir des observations du bassin versant de Aguimo :

Tableau 12 : Performance des simulations sur le bassin versant alimentant le barrage

Critères de performance	Nash (NSE)	KGE	Pbiais (%)
Valeurs	0,51	0,64	-21,20

Des résultats du tableau 12, nous pouvons remarquer que les critères de performance de Nash, ainsi que le KGE évalués sont acceptables. Par ailleurs, le pourcentage de biais entre les observations du bassin versant donneur et les simulations sur le bassin versant de Alafiarou est négatif (-21,20%), traduisant une sous-estimation des débits simulés.

On en déduit que le modèle régionalisé a simulé les débits sur le bassin versant alimentant le barrage de Alafiarou avec une performance acceptable tout en sous estimant de 21,20% les écoulements sur ce dernier.

4.2.2. Estimation du volume d'apport moyen annuel d'eau sur le bassin versant

Le tableau 13 présente les volumes annuels calculés sur la période de 1972 à 2022

Tableau 13: Estimation des volumes d'apport annuels d'eau sur le bassin versant

	Années	Débits moyens annuels (m3/s)	Nombre de jours par an	Volume annuel en m3
1	1972	0,018644342	366	589578,8342
2	1973	0,416290401	365	13128134,07
3	1974	0,341335072	365	10764342,82
4	1975	0,357506924	365	11274338,36
5	1976	0,02709157	366	856700,4544
6	1977	0,052737584	365	1663132,446
7	1978	0,091873361	365	2897318,323
8	1979	0,281632648	365	8881567,172
9	1980	0,403712015	366	12766342,83
10	1981	0,142208669	365	4484692,597
11	1982	0,03663032	365	1155173,757
12	1983	0,013359452	365	421303,691
13	1984	0,075571734	366	2389759,588
14	1985	0,36537784	365	11522555,58
15	1986	0,014860691	365	468646,7511
16	1987	0,250516692	365	7900294,412
17	1988	1,294177479	366	40924997,91

18	1989	1,142777644	365	36038635,78
19	1990	0,125708689	365	3964349,215
20	1991	0,836026531	365	26364932,69
21	1992	0,148984333	366	4711242,168
22	1993	0,152138873	365	4797851,505
23	1994	0,391111889	365	12334104,53
24	1995	0,59115967	365	18642811,36
25	1996	0,314196144	366	9935636,132
26	1997	0,156938485	365	4949212,055
27	1998	0,684985738	365	21601710,23
28	1999	0,521231964	365	16437571,2
29	2000	0,170942609	366	5405615,569
30	2001	0,179877344	365	5672611,906
31	2002	0,43616237	365	13754816,5
32	2003	0,875841607	365	27620540,91
33	2004	0,273680284	366	8654427,418
34	2005	0,067783269	365	2137613,184
35	2006	0,281568898	365	8879556,771
36	2007	0,198110959	365	6247627,198
37	2008	0,861597448	366	27245779,13
38	2009	0,244828259	365	7720903,988
39	2010	0,920745003	365	29036614,4
40	2011	0,405799903	365	12797305,75
41	2012	0,282774763	366	8942016,68
42	2013	0,077415937	365	2441388,998
43	2014	0,974731299	365	30739126,25
44	2015	0,189153139	365	5965133,385
45	2016	0,437385919	366	13831192,47
46	2017	0,00719037	365	226755,5071
47	2018	0,001206632	365	38052,36132
48	2019	0,271424336	365	8559637,849
49	2020	0,030928249	366	978025,4615
50	2021	0,129353322	365	4079286,365
51	2022	1,199859366	365	37838764,97

De l'analyse de ce tableau, il ressort que le volume d'apport moyen annuel d'eau sur le bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou (évalué à partir de la moyenne interannuelle des volumes d'eau annuels sur la période de 1972 à 2022) est **V = 10 993 720,186 m³/an.**

4.2.3. Analyse fréquentielle des débits extrêmes de crue susceptibles d'être générés à l'amont immédiat du barrage

4.2.3.1. Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières annuelles

▲ Caractérisation des extrêmes pluviométriques sur les stations considérées

Le tableau 14 présente les statistiques de base des pluies maximales journalières annuelles sur les différentes stations :

Tableau 14 : Caractéristiques des valeurs de pluies extrêmes par stations

Statistiques Stations	Taille initiale de l'échantillon	Taille de l'échantillon utilisé	Min	Max	Moy	Ecart type	Médiane	CV	Cs	Ck
Tchaourou	64	50	40,8	181	80,8	25,6	79,8	0,317	1,58	5,48
Bétérou	64	59	35,5	144	79,8	19,6	80,4	0,246	0,39	3,53
Parakou	64	64	44,8	176	84,4	26,7	77,6	0,317	1,36	4,92

Avec Min = Minimum ; Max = Maximum ; Moy = Moyenne ; CV= coefficient de variation ; Cs= coefficient d'asymétrie et Ck= coefficient d'aplatissement.

De l'analyse de ce tableau, il ressort que les stations de Tchaourou et de Parakou ont en moyenne les plus fortes valeurs de pluie maximale journalières annuelles (80,8 et 84,4 respectivement).

▲ Vérification des tests d'hypothèses sur chacune des stations

Les hypothèses vérifiées sont l'indépendance, la stationnarité et l'homogénéité sur les échantillons de chaque station considérée. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de Wilcoxon et de Mann-Kendall.

Le tableau 15 présente les résultats de chaque test sur les pluies maximales journalières annuelles par stations :

Tableau 15 : Résultat des tests statistiques d'hypothèse sur les pluies maximales annuelles par stations

Stations	Test d'indépendance		Test de Stationnarité		Test d'Homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Stations pluviométriques						
Tchaourou	0,117	0,907	1,08	0,281	1,53	0,125

Parakou	1,25	0,213	1,28	0,200	1,78	0,0752
Bétéro	1,48	0,139	1,31	0,191	1,80	0,0714

$|U|$: valeur de la statistique ; $|K|$: valeur de la statistique ; $|W|$: valeur de la statistique ; P : p-value

L'application du test d'indépendance de wald-wolfowitz aux séries de données montre que les pluies maximales journalières annuelles aux stations de Tchaourou, Parakou et Bétéro sont indépendantes au seuil de significativité de 5%. En ce qui concerne les tests de stationnarité de Mann-Kendall et d'Homogénéité de wilcoxon, les séries de données aux différentes stations sont stationnaires et homogènes au seuil de significativité de 5%. En somme, les échantillons de pluies maximales journalières annuelles des stations de Parakou, Bétéro et Tchaourou sur la période de 1953 à 2016 sont indépendantes, stationnaires et homogènes.

✦ Identification de la meilleure distribution des pluies extrêmes par stations

Les résultats du calcul des critères AIC et BIC sur les différentes stations sont présentés dans le tableau 16 :

Tableau 16: Critères de comparaison AIC et BIC pour les quatre distributions de probabilité appliquées sur les pluies maximales journalières annuelles des différentes stations

Stations	Gumbel		GEV		Lognormal		Pearson type III	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
Tchaourou	458,37	462,19	460,30	466,04	458,43	462,25	461,07	466,80
Parakou	587,93	592,25	589,42	595,90	589,24	593,56	590,08	596,55
Bétéro	525,50	529,66	523,25	529,48	522,94	527,10	522,65	528,87

Les modèles d'ajustement qui offrent les plus faibles valeurs pour les critères AIC et BIC représentent les meilleures distributions des séries de valeurs extrêmes. De l'analyse des résultats issus du tableau ci-dessus, il ressort que la distribution de Gumbel est celle qui ajuste au mieux les pluies maximales journalières annuelles aux stations de Tchaourou et de Parakou suite aux valeurs des critères AIC et BIC. Par ailleurs, les pluies maximales journalières annuelles à la station de Bétéro suivent la loi Lognormal.

Les figures ci-après montrent l'ajustement de la distribution de Gumbel aux valeurs extrêmes de pluies des stations de Tchaourou et Parakou puis celui de la loi Lognormal pour la station de Bétéro.

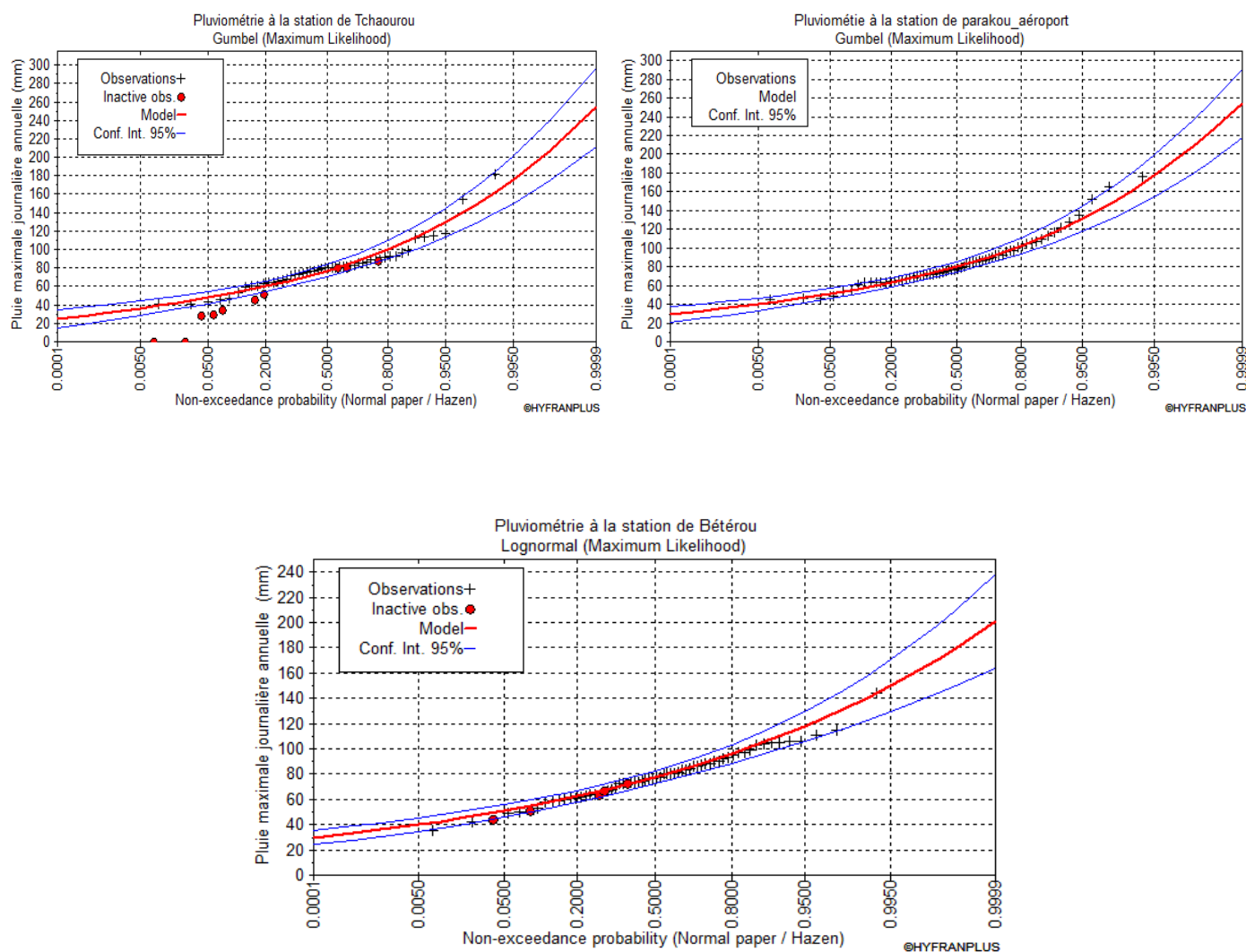


Figure 16 : Ajustement de la loi de Gumbel aux pluies maximales annuelles des stations de Tchaourou et de Parakou et de la loi Lognormal à celles de la station de Bétérou

De l'analyse de ces graphiques, il ressort que toutes les valeurs actives des échantillons de pluies maximales journalières annuelles sur les stations de Tchaourou, Parakou et Bétérou se situent dans l'intervalle de confiance 95% pour leurs distributions respectives. De plus, les courbes de chacune de ces distributions passent par le maximum des valeurs des échantillons sur les différentes stations.

★ Estimation des quantiles de pluie

Le tableau ci-dessous présente les valeurs des paramètres sur chaque station à partir des meilleures lois choisies.

Tableau 17 : Paramètres des lois estimés

Stations	Lois et méthodes	Paramètres des lois	
		α	μ
Tchaourou	Loi de Gumbel (maximum de vraisemblance)	20.04	69.59

Parakou	Loi de Gumbel (maximum de vraisemblance)	α	μ
		19.67	72.75
Bétérou	Loi lognormal (maximum de vraisemblance)	μ	σ
		4.35	0.26

Le tableau 18 présente les valeurs des quantiles de pluies et de leur intervalle de confiance aux différentes stations considérées.

Tableau 18 : Quantiles de pluie estimés aux différentes stations

Périodes de retour Stations	Quantiles de pluie et intervalles de confiance associés (mm)					
	2	5	10	20	50	100
Tchaourou	76.9 (70.4 - 83.4)	99.7 (89.6- 110)	115 (102 - 128)	129 (113 - 145)	148 (128- 168)	162 (139- 184)
Parakou	80.0 (74.3 - 85.6)	102 (93.5- 111)	117 (106 - 128)	131 (117 - 145)	150 (132- 167)	163 (144- 183)
Bétérou	77.4 (72.3 - 82.4)	96.0 (88.7- 103)	107 (98.0 - 117)	118 (106 - 130)	131 (116- 146)	140 (123- 158)

L'analyse de ce tableau montre que les plus fortes valeurs des quantiles de pluie s'observent sur les stations de Tchaourou et de Parakou (117 et 115 mm pour une pluie décennale respectivement aux stations de Parakou et Tchaourou).

4.2.3.2. Estimation des quantiles de débits par la méthode rationnelle

La méthode rationnelle utilisée est la méthode du CIA.

- Calcul du coefficient de ruissellement du bassin versant :

Le coefficient de ruissellement moyen annuel du bassin versant est calculé à partir de la formule :

$$C = \frac{P-D}{P} \times 100 \quad (18)$$

P : est la pluie moyenne annuelle du bassin versant ;

D : est le déficit d'écoulement (Quantité d'eau n'ayant pas participé au ruissellement) donné par la formule de TURC de l'équation 19:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad (19) \quad \text{et} \quad L = 300 + 25T + 0,05 T^3 \quad (20)$$

T : est la température moyenne annuelle

Tableau 19 : Paramètres pour l'estimation du coefficient de ruissellement moyen annuel par la formule de Turc

Paramètres	P (1972 – 2022)	T (1972 – 2022)	L	D
Valeurs	1076,23 mm	27,30 °C	1999,82	986,74 mm

Par conséquent, le coefficient de ruissellement du bassin versant est : **C = 8,32 %**

Le tableau 20 présente les valeurs des quantiles de débits estimés sur les différentes stations :

Tableau 20: Quantiles de débits estimés par la méthode rationnelle

Période de retour (ans)	2	5	10	20	50	100
Stations pluviométriques						
Tchaourou	12,41	16,09	18,56	20,82	23,87	26,15
Parakou	12,91	16,46	18,88	21,14	24,21	26,31
Bétérou	12,49	15,49	17,27	19,04	21,14	22,60

4.2.3.3. Analyse fréquentielle des débits extrêmes sur le bassin versant qui alimente le barrage

✦ Caractéristiques des débits extrêmes

Le tableau 21 présente les statistiques de base des débits maximaux journaliers annuels :

Tableau 21 : Caractéristiques des valeurs de débits maximaux annuels

Statistiques Echantillon	Taille initiale de l'échantillon	Taille de l'échantillon utilisé	Min	Max	Moy	Ecart type	Médiane	CV	Cs	Ck
Débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou	51	51	0,147	19,3	4,03	4,33	2,65	1,07	2,04	5,92

Avec Min = Minimum ; Max = Maximum ; Moy = Moyenne ; CV= coefficient de variation ; Cs= coefficient d'asymétrie et Ck= coefficient d'aplatissement.

▲ Vérification des tests d'hypothèses sur les débits maximaux annuels

Le tableau 22 présente les résultats de la vérification des différents tests d'hypothèse sur les débits maximaux annuels du bassin versant qui alimente le barrage de Alafiarou.

Tableau 22 : Résultat de la vérification des tests statistiques d'hypothèse sur les débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou

Echantillon	Test d'indépendance		Test de Stationnarité		Test d'Homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou	0,544	0,587	0,780	0,436	0,293	0,770

|U| : valeur de la statistique ; |K| : valeur de la statistique ; P : p-value

Des résultats de ce tableau, l'application du test d'indépendance de wald-wolfowitz aux séries de données montre que les débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou sur la période de 1972 à 2022 sont indépendants au seuil de significativité de 5%. En ce qui concerne les tests de stationnarité de Mann-Kendall et d'Homogénéité de Wilcoxon, les séries de données sont homogènes et stationnaires au seuil de significativité de 5%.

★ Identification de la meilleure distribution pour les débits extrêmes

Le tableau 23 présente les résultats des critères AIC et BIC calculés pour chaque distribution de probabilité sur les valeurs de débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou :

Tableau 23 : Résultat du calcul des critères AIC et BIC sur les débits maximaux annuels

Lois	Gumbel		GEV		Lognormal		Pearson type III	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
Débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou	263,243	267,107	243,276	249,071	243,695	247,559	N/D	N/D

Au regard des résultats de ce tableau, les critères optimaux de comparaison (AIC et BIC) des différents modèles statistiques pour l'ajustement des débits maximaux annuels du bassin versant de Alafiarou sont donnés par la loi Lognormal. On en déduit que la loi Lognormal offre la meilleure distribution des valeurs de débits maximaux annuels du bassin versant.

La figure 18 montre l'ajustement des débits maximaux annuels par cette loi et l'intervalle de confiance des valeurs.

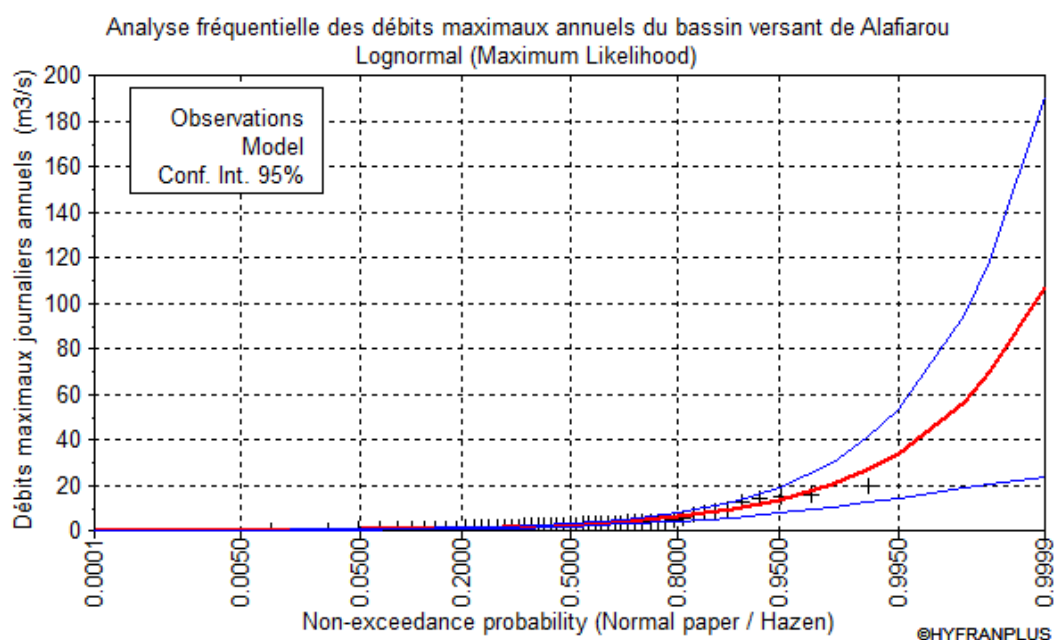


Figure 17 : Graphique d'ajustement des débits maximaux annuels par la loi Lognormal

★ Estimation des quantiles débits

Le tableau ci-dessous présente les valeurs des paramètres obtenus pour la loi GEV :

Tableau 24 : Paramètres calculés de la loi GEV

Echantillon	Lois et méthodes	Paramètres des lois	
		μ	σ
Débits maximaux annuels à Alafiarou	Loi Lognormal (maximum de vraisemblance)	0.937	1.004

Le tableau ci-dessous présente les valeurs des quantiles débits sur le bassin versant :

Tableau 25 : Quantiles de débits estimés sur le bassin versant

Quantiles de débit et intervalles de confiances associés (m³/s)					
2	5	10	20	50	100
2,55 (1.85 – 3.25)	5,94 (4.03 – 7.85)	9,24 (5.79 – 12.7)	13,3 (7.65 – 19.0)	20,1 (10.2 – 29.9)	26,4 (12.3 – 40.5)

4.3. Estimation de la capacité de stockage et la gestion des crues du barrage

Le tableau 26 qui suit présente les résultats de l'estimation de la capacité de stockage de la retenue d'eau de Alafiarou à partir du levé en plan de la cuvette.

Tableau 26 : Calcul du volume de stockage de la retenue

Cotes	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface moyenne (m ²)	Volume partiel (m ³)	Volume cumulé (m ³)
102,678	0	0	0	0	0
106,5	78669,733	3,822	78669,733	115644,507	115644,507
106,4	70678,612	0,1	74674,172	7467,417	123111,924
106,3	68071,802	0,1	69375,207	6937,521	130049,445
106,2	65589,044	0,1	66830,423	6683,042	136732,487
106,1	63115,755	0,1	64352,399	6435,240	143167,727
106	60516,593	0,1	61816,174	6181,617	149349,344
105,9	58054,886	0,1	59285,740	5928,574	155277,918
105,8	55602,967	0,1	56828,930	5682,893	160960,811
105,7	53160,836	0,1	54381,902	5438,190	166399,001
105,6	50560,519	0,1	51860,678	5186,068	171585,069
105,5	48133,099	0,1	49346,809	4934,681	176519,750
105,4	45715,746	0,1	46924,422	4692,442	181212,192
105,3	43292,257	0,1	44504,001	4450,400	185662,592
105,2	40861,769	0,1	42077,013	4207,701	189870,293
105,1	38556,713	0,1	39709,241	3970,924	193841,217
105	36228,796	0,1	37392,754	3739,275	197580,493
104,9	32742,581	0,1	34485,689	3448,569	201029,062
104,8	30500,427	0,1	31621,504	3162,150	204191,212
104,7	28370,849	0,1	29435,638	2943,564	207134,776
104,6	26170,486	0,1	27270,667	2727,068	209861,843
104,5	24194,435	0,1	25182,461	2518,246	212380,089
104,4	22277,258	0,1	23235,847	2323,585	214703,673
104,3	20418,954	0,1	21348,106	2134,811	216838,484
104,2	18619,523	0,1	19519,238	1951,924	218790,408
104,1	16878,964	0,1	17749,244	1774,924	220 565,332

En somme, l'analyse de ce tableau nous permet de dire que le volume de stockage de la retenue d'eau de Alafiarou est de **220 565,33 m³**.

L'application de la formule de calcul de la crue maximale que le déversoir peut évacuer permet d'avoir $Q_{cm} = 24,70 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4. Identification des causes des dégradations et proposition des options de réhabilitation durables

4.4.1. Identification des causes des dégradations

Les résultats des études hydrologiques et hydrauliques sur le barrage de Alafiarou sont résumés dans le tableau 27 :

Tableau 27: Résultats des études hydrologiques et hydrauliques

Caractéristiques	Valeurs	
Superficie du bassin versant	167,6 Km ²	
Périmètre du bassin versant	60,36 Km	
Pluviométrie maximale journalière décennale (1953 – 2016)	107 - 117 mm	
Pluie moyenne annuelle (1953 à 2016)	1076,23 mm	
Apport moyen annuel (1972 – 2022)	10 993 720,186 m ³ /an	
Capacité de stockage de la retenue	220565,33 m ³	
Débit de crue maximal évacuable par le déversoir (Qcm)	24,70 m ³ /s	
Paramètres	Méthode rationnelle	Méthode de régionalisation
Crue décennale (Q10)	17,27 – 18,88 m ³ /s	9,24 m ³ /s
Débit de projet vingtennale (Q20)	19,04 – 20,82 m ³ /s	13,3 m ³ /s
Débit de projet cinquantennale (Q50)	21,14 – 24,21 m ³ /s	20,01 m ³ /s
Débit de projet centennale (Q100)	22,60 – 26,31 m ³ /s	26,4 m ³ /s

Au regard de ces résultats, on remarque que la capacité de stockage de la retenue d'eau de Alafiarou est estimée à 220 565,33 m³. Par ailleurs, les apports annuels d'eau sur le bassin versant alimentant le barrage sont de l'ordre de 10 993 720,186 m³/an et sont largement au-dessus de la capacité de stockage du barrage. Ainsi, les volumes d'eau excédents sont évacués par le chenal évacuateur du barrage en tenant compte des incertitudes liées à l'estimation de la capacité de stockage de la retenue.

De plus, la crue maximale que le déversoir peut évacuer est estimée à 24,70 m³/s. Si on considère une crue exceptionnelle de fréquence centennale (T = 100 ans) sur le bassin versant qui alimente le barrage, qu'elle soit estimée par la méthode rationnelle ou par la méthode de régionalisation, elle est nettement supérieure à cette crue maximale évacuable.

Ainsi, bien que le déversoir soit conçu pour évacuer les excès d'eau, les apports excédentaires, en particulier lors des crues exceptionnelles, exercent une pression sur les talus du chenal ainsi que le chenal lui-même, contribuant à des dégradations.

Par conséquent, les dégradations observées dans le chenal évacuateur du barrage sont donc liées à une surcharge hydraulique, et à des débits excédentaires, bien au-delà de la capacité de conception de l'évacuateur de crues, entraînant une usure progressive des structures.

Ces résultats sont en conformité avec ceux issus des enquêtes de terrain effectuées dans le cadre du mémoire.

En somme, les dégradations dans le chenal évacuateur du barrage de Alafiarou sont dues à des surcharges hydrauliques, des débits excédents ainsi qu'une érosion rapide des talus des épis du chenal lors des crues.

4.4.2. Proposition des options de réhabilitation durable.

Dans « Contribution à l'amélioration de la sécurité et à la fiabilité De l'exploitation d'un barrage – Application au barrage de Foug El Gueiss », Y. Mouloudi et A. Kettab proposent des techniques pour assurer la sécurité d'un barrage. Les principales solutions proposées concernent :

- L'installation d'organes mobiles tels que les vannes secteurs ou vannes segments comme ci-après :



Photo 6: Barrage de grangent (Saint-Etienne/Chambles, 1957)

Source : <https://structurae.net/fr/ouvrages/barrage-de-grangent?r=/bauwerke/barrage-de-grangent>

-
- Mise en place d'un boudin gonflable, s'abaissant automatiquement en cas d'augmentation de la charge amont.
 - Pose des hausses métalliques ou en béton, fusibles lors des grosses crues.

En plus de ces solutions, pour renforcer le barrage Alafiarou et gérer efficacement les crues et apports annuels, on peut :

- Procéder au surcreusement et à l'extension de la cuvette pour augmenter sa capacité de rétention ;
- Construire une nouvelle digue sur la longueur de l'extension de la cuvette ;
- Construire un mur parapet sur toute la longueur de la digue pour éviter qu'elle ne soit submergée ;
- Planter des blocs de chute d'eau et de blocs chicanes dans le chenal évacuateur afin de mieux dissiper l'énergie de l'eau ;
- Utiliser des matériaux plus résistants pour renforcer les épis de protection.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

✓ Conclusion générale

L'objet de ce travail porte sur le diagnostic hydrologique et hydraulique du barrage de Alafiarou en vue de faire l'identification des causes des dégradations survenues et de proposer des options pour une nouvelle réhabilitation de manière à assurer sa pérennité. Pour cela, une évaluation de l'état du barrage et son fonctionnement a été effectuée à travers une enquête de terrain et des entretiens avec les exploitants de la retenue à l'issue de laquelle il ressort que les apports d'eau sur le barrage lors des crues sont considérables et le volume d'eau qu'il stocke couvre majoritairement les différents besoins en eau pendant la période sèche. Ensuite, les quantiles de débits en amont du barrage ont été estimés par la conversion des quantiles de pluies en quantiles de débits avec la méthode rationnelle, puis par l'analyse fréquentielle des débits extrêmes simulés. Les débits de projets centennaux estimés par les deux méthodes étaient supérieurs à la crue maximale évacuable par le déversoir du barrage. D'un autre côté, les apports en direction du barrage sont largement supérieurs à la capacité de rétention du barrage.

La mise en relation de toutes ces informations ont permis de conclure que les dégradations survenues sur le barrage de Alafiarou sont causées par la surcharge hydraulique et à des débits excédents transitant par le chenal évacuateur du barrage. Cela risque d'entraîner des dégradations continues sur le barrage au fil des années si aucune mesure de renforcement n'est prise. Pour ce fait, les options de réhabilitation proposées concernent surtout des mesures de renforcement du barrage à travers le prolongement de la digue et le surcreusement de la cuvette afin d'augmenter la capacité de stockage du barrage, l'installation d'organes mobiles tels que des vannes segment sur le déversoir afin de mieux réguler les débits d'eau évacués. Le renforcement de la digue à travers la construction de murs parapets sur toute l'étendue de la digue afin d'éviter qu'elle ne soit submergée et la construction de blocs de chutes dans le chenal en vue de mieux dissiper l'énergie de l'eau et l'utilisation de matériaux plus résistants pour renforcer les épis des structures. L'implantation d'une échelle limnimétrique dans la cuvette est également nécessaire en vue de suivre les variations de niveau d'eau et de mieux gérer la retenue.

Dans le cadre du projet opti-wam, les apports sur le barrage sont non négligeables et le volume d'eau stocké par le barrage couvre majoritairement les besoins en eau pour la production de contre saison. Ainsi, cette ressource en eau pourra donc être optimisée pour la satisfaction des différents besoins tout en garantissant un minimum écologique pour les êtres vivants et les populations en aval.

✓ Perspectives

Au regard de ces résultats, les travaux suivants pourraient être envisagés sur le barrage de Alafiarou :

- L'identification des causes des excédents de débits et de la surcharge hydraulique du barrage ;
- L'étude des poches de sécheresse sur le bassin versant en vue d'analyser les possibilités de lâcher de débits écologiques en années sèches ;
- Le jaugeage de la retenue en vue d'obtenir la courbe de tarage permettant de convertir les hauteurs d'eau en débits afin de décider des lâchers ;
- Le suivi de la variation du niveau d'eau dans la cuvette en fonction des différents usages (Courbe hauteur-volume).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Rapport d'études techniques d'avant-projet détaillé (APD) pour les travaux de réhabilitation de la retenue d'eau de Alafiarou avec aménagement hydro-agricole de 06,15 ha de périmètre à l'aval dans la commune de Tchaourou (Janvier, 2019)
2. PDC3 (2017). Plan de développement communal troisième génération, commune de Tchaourou, 223p.
3. Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchies, D., Perrin, C., & Michel, C. (2017). *airGR : Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling* (p. 1.7.6) [Jeu de données]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.airGR>
4. Lamouroux, N., Augeard, B., Baran, P., Capra, H., Le Coarer, Y., Girard, V., Gouraud, V., Navarro, L., Prost, O., Sagnes, P., Sauquet, E., & Tissot, L. (2018). Débits écologiques : La place des modèles d'habitat hydraulique dans une démarche intégrée. *Hydroécologie Appliquée*, 20, 1-27. <https://doi.org/10.1051/hydro/2016004>
5. Ouarda, T. B. M. J., St-Hilaire, A., & Bobée, B. (2008). Synthèse des développements récents en analyse régionale des extrêmes hydrologiques. *Revue des sciences de l'eau*, 21(2), 219-232. <https://doi.org/10.7202/018467ar>
6. Hounkpè, J., Bossa, A. Y., Yira, Y., Fusillier, J.-L., Da, A. S., & Keita, A. (2020). Chapitre 15. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du bas-fond réaménagé de Bankandi. In B. Sultan, A. Y. Bossa, S. Salack, & M. Sanon (Éds.), *Risques climatiques et agriculture en Afrique de l'Ouest* (p. 205-215). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.36399>
7. Rouhier, L. (2018). *Régionalisation d'un modèle hydrologique distribué pour la modélisation de bassins non jaugés. Application aux vallées de la Loire et de la Durance*. Thèse de doctorat pour obtenir le grade de Docteur de Sorbonne Université.
8. Avossè, A. D., Sintondji, L. O., Bessou, J., Bossa, A., Bodjrènou, R., & Gbaguidi, B. (2022). *Characterization of the frequency of hydroclimatic extremes in the lower Ouémé valley*. 12(6).

-
9. NDOUR. N., Sakho, I., Senghor, M., J. *Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en afrique de l'ouest et du centre.*
 10. Mouloudi, Y., & Kettab, A. (s. d.). *Contribution à l'amélioration de la sécurité et à la fiabilité De l'exploitation d'un barrage – Application au barrage de Foum El Gueiss.*
 11. Ouarda, T. B., St-Hilaire, A. & Bobée, B. (2008). Synthèse des développements récents en analyse régionale des extrêmes hydrologiques. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 21(2), 219–232. <https://doi.org/10.7202/018467ar>
 12. Amoussou, E., Camberlin, P., Trambly, Y., & Mahe, G. (2014). Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du Mono (Bénin- Togo) en contexte de variabilité / changement climatique. (July). Retrieved from www.researchgate.net/publication/281565491
 13. Hountondji B., Codo F. P., Sintondji L.O., Metongnon O. S. B. (2020). Contribution à l'étude technique de la réalisation du barrage de worogui adja dans la commune de Tchaourou au Bénin. *Larhyss Journal*, 41 (2020), 107-119.
 14. Degoutte, G. (1993). Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens.
 15. CIEH, ORSTOM et al. (1998). Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche.
 16. Galle et al. (2018). AMMA-CATCH a Critical Zone Observatory in West Africa Monitoring a Region in Transition. *Vadose Zone Journal*, 17 (1), 18006.
 17. AMMA-CATCH (1990) "AMMA-CATCH : a hydrological, meteorological and ecological observatory on West Africa". IRD, CNRS-INSU, OSUG, OMP, OREME. doi: 10.17178/AMMA-CATCH.all.

ANNEXES

1. Polygones de Thiessen des stations pluviométriques des bassins versants de Alafiarou et de Aguimo

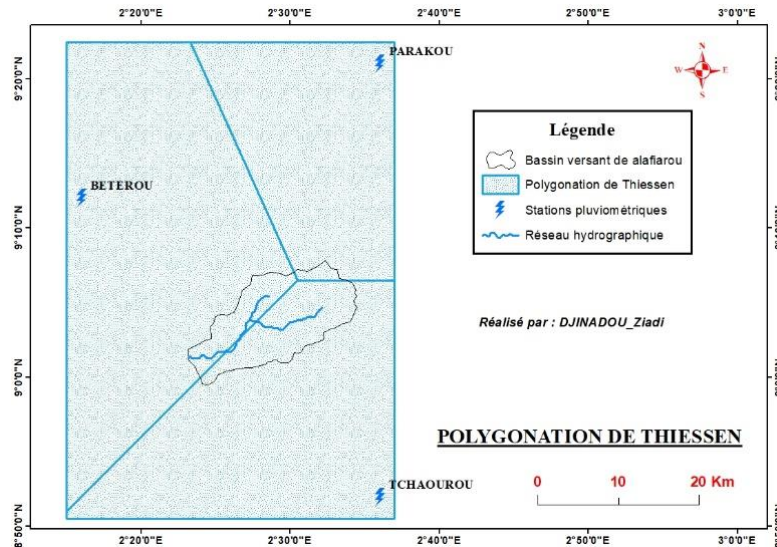


Figure 18: Polygones de Thiessen du bassin versant de Alafiarou

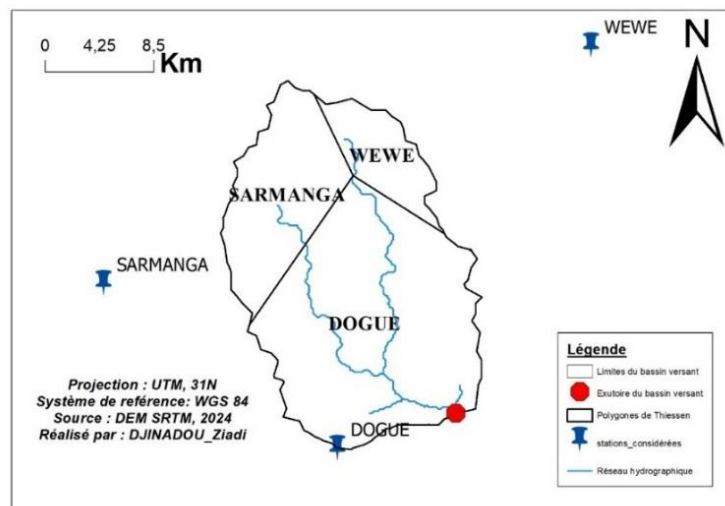


Figure 19: Polygones de Thiessen du bassin versant de Aguimo

2. Levé topographique de la cuvette du barrage de Alafiarou

