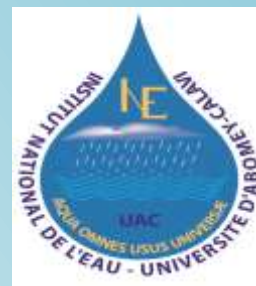




UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

ADJIBOLA Folayimi Chahwane

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie quantitative

=====

**OPTIMISATION DE LA GESTION DES EAUX
PLUVIALES PAR DES METHODES EMPIRIQUES :
APPLICATION AU BASSIN DE RETENTION AAC
DANS LE CADRE DU PAPC A COTONOU**

Mention : *Très-Bien*

Jury

Président : Dr. Onésime AKOWANOU

Examineur : Dr. Ernesto BONGOU

Rapporteur : Dr. Charlene GABA

PROMOTION : 2023-2024



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

ADJIBOLA Folayimi Chahwane

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie quantitative

=====

**OPTIMISATION DE LA GESTION DES EAUX
PLUVIALES PAR DES METHODES EMPIRIQUES :
APPLICATION AU BASSIN DE RETENTION AAc
DANS LE CADRE DU PAPC A COTONOU**

=====

Maître de Mémoire

Dr. Charlène GABA

Maître de Stage

Ir Sylvain BOKOVE



PROMOTION : 2023-2024

DÉDICACES

Je voudrais avant toutes choses, dédicacer ce travail à mes parents pour leur existence et soutien inconditionnels ;

Que ce travail soit pour moi le meilleur moyen de leur exprimer ma profonde gratitude, et pour eux une raison de légitime fierté.

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements vont particulièrement à l'endroit de :

- DIEU, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux ;
- Mon père, M. Gafar ADJIBOLA, pour avoir eu la bonne volonté d'instruire tous ses enfants, son investissement dans mon éducation et ses sacrifices;
- Ma mère, Mme Florentine AKPAHI, pour son sacrifice et son acharnement dans chaque étape de mon existence;
- Mon oncle, M. Adrien ADECHIAN, pour son soutien et sa disponibilité;
- Le directeur général de l'INE, M. Daouda MAMA;
- Mon encadreur, Dr Charlene GABA, pour sa disponibilité et ses conseils ;
- Mon professeur, Dr Audace Amen DOSSOU OLORY, pour sa disponibilité;
- Mon maître de stage, M. Sylvain BOKOVE, ingénieur à TECKNICART, Ingénieurs et Conseils, pour sa disponibilité et ses conseils ;
- M. Calixte DEDJINOU, directeur général de TECKNICART, Ingénieur et Conseils, pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer mon stage;
- M. Olivier ADJAHOU, chef contrôleur et superviseur des travaux, ingénieur à TECKNICART, Ingénieur et Conseils, pour sa disponibilité et ses conseils ;
- M. Crespin AGUIDISSOU, ingénieur à TECKNICART, Ingénieur et Conseils et superviseur des travaux, pour ses apports et sa disponibilité ;
- M. Richard Hugues HOUNKPE, Ingénieur en Génie Civil et contrôleur des travaux, pour son soutien et ses conseils;
- M. Yanov Romulus ANATO, Ingénieur à TECKNICART, pour ses conseils ;
- M. Oswald HOUETO pour sa disponibilité et ses conseils ;
- Mon frère Ramdane, mes sœurs Michkath et Hamidath, pour l'amour fraternel qu'ils ont toujours manifesté à mon égard ;
- Mes professeurs et toutes les autorités de l'INE;
- Tous mes amis;

RESUME

Dans le cadre de la réalisation du bassin AAc dans la ville de Cotonou, cette étude se concentre sur l'application des méthodes empiriques pour la gestion des eaux pluviales à Cotonou par ce bassin. Nous avons déterminé la pluie décennale en utilisant la loi de Gumbel, avec un ajustement des paramètres via la méthode des moments et celle du maximum de vraisemblance. Ce travail a permis de retenir une précipitation annuelle maximale de 157,27 mm pour une période de retour de 10 ans. Les résultats obtenus ont permis d'estimer le coefficient de ruissellement, le débit de pointe décennal et le volume total ruisselé grâce à la méthode d'ORSTOM. Bien que les résultats varient entre différentes approches, la méthode d'ORSTOM a été jugée la plus adaptée au contexte local après des analyses sur le terrain. Ces données vont servir de base pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques nécessaires au contrôle des inondations.

Mots-clés: Optimisation, Inondation, Bassin de rétention, Distribution de Gumbel

ABSTRACT

As part of the implementation of the AAC basin in the city of Cotonou, this study focuses on the application of empirical methods for the management of rainwater in Cotonou by this basin. We determined the ten-year rainfall using Gumbel's law, with adjustment of the parameters via the method of moments and the maximum likelihood method. This work resulted in a maximum annual precipitation of 157,27 mm for a 10-year return period. The results obtained made it possible to estimate the 10-year peak flow the method of ORSTOM, the runoff-coefficient and the volume of water runoff. Although the results vary between different approaches, ORSTOM's method was found to be the most appropriate for the local context after field analyses. These data were used as a basis for the evaluation of the hydraulic structures necessary for flood control.

Keywords: Optimization, Flooding, Retention basin, ,Gumbel distribution.

SIGLES ET ACRONYMES

ANaMB : Agence Nationale de la Météorologie du BENIN

BV : Bassin Versant

DCM : Données calculées par la méthode des moments

DCMV : Données calculées par la méthode du maximum de vraisemblance

Fm: Fonction de répartition par la méthode des moments

Fmv: Fonction de répartition par la méthode du maximum de vraisemblance

Fg: Fonction de répartition par la méthode graphique

fm: Fonction densité de probabilité par la méthode des moments

fmv: Fonction densité de probabilité par la méthode du maximum de vraisemblance

fg: Fonction densité de probabilité par la méthode graphique

F(x) : Fréquence de non dépassement

INE : Institut National de l'Eau

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique

d'Outre-Mer

PM : Pluie maximale

P10 : Pluviométrie maximale décennale

SIG : Système d'Information Géographique

VAR: Variable centrée réduite

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme TECKNICART INGENIEURS-CONSEILS	11
Figure 2: Carte géographique du bassin de rétention AAC	23
Figure 3: Bassin AAC	24
Figure 4: Variation des pluies en fonction des variables centrées réduites	52
Figure 5: Variation de la fonction de répartition en fonction des données de pluies sur la période allant de 1961 à 2023.....	53
Figure 6: Variation de la fonction de répartition en fonction des données de pluies maximales annuelles de pluies sur la période allant de 1961 à 2023	54
Figure 7: Comparaison des résultats issus des deux lois d'ajustements	55
Figure 8: Variation du Coefficient d'abattement avec la surface pour différentes pluviosités.....	56
Figure 9: Coefficient de ruissellement. Régimes tropicaux et tropicaux de transition (p varie de 800 à 1600 mm). Perméabilité P4 et P5 (D'après RODIER et AUVRAY)	57
Figure 10: Régimes tropicaux et transition. Temps de base en fonction de la superficie du bassin. (D'après RODIER et AUVRAY)	58

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Surperficie des bassins	43
Tableau 2: Indicateurs statistiques de la série de pluie	46
Tableau 3: Fréquences cumulées de la série	47
Tableau 4: Caractéristiques des sous-bassins	50
Tableau 5: Caratéristiques du bassin AAC	51
Tableau 6: Résultats de tests de fiabilité.....	54

LISTES DES IMAGES

Image 1: Vue d'ensemble des aménagements projetés dans le bassin aac.....	12
Image 2:Création du batardeau.....	14
Image 3: Motopompe.....	14
Image 4: La purge	14
Image 5: Mise en place du rabat nappe.....	15
Image 6: L'implantation des pickets et nivellement de l'assise	16
Image 7: Géotextile.....	16
Image 8: La pose des cages.....	17
Image 9: Les cages.....	17
Image 10: Remplissage et fermeture des cages.....	18
Image 11: Ancrages.....	18
Image 12: Matelas reno mis en place.....	19
Image 13: Diagramme ombrothermique de cotonou, agence météo bénin.....	27

TABLE DES MATIERES

DÉDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RESUME	iii
ABSTRACT.....	iv
SIGLES ET ACRONYMES	v
LISTES DES FIGURES	vi
LISTES DES TABLEAUX	vi
LISTES DES IMAGES.....	vii
INTRODUCTION GENERALE	1
1. Contexte et justification	1
2. Revue de la littérature	3
2.1. Clarification des concepts	3
2.2. Etat des connaissances	4
3. But de la recherche.....	7
4. Objectif général et spécifique	7
4.1. Objectif général.....	7
4.2. Objectifs spécifiques	7
5. Structure du document	8
CHAPITRE I : CONTEXTE DE STAGE ET ACTIVITES MENEES	9
1.1. Introduction.....	10
1.2. Présentation de la structure d'accueil.....	10
1.2.1. Historique.....	10
1.2.2. Organisation interne de la structure d'accueil.....	10
1.3. Bref présentation du projet et des activités menées sur le bassin AAc	12
1.3.1. Bref présentation du projet.....	12
1.3.2. Activités menées sur le bassin AAc	13
1.4. Conclusion	20
CHAPITRE II : DONNEES,MATERIELS ET METHODES.....	21

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

2.1. Introduction.....	22
2.2. Milieu d'étude.....	22
2.2.1. Géomorphologie et Morphologie du Milieu d'Étude.....	22
2.2.2. Hydrogéologie du Milieu d'Étude.....	25
2.2.3. Végétation, Climat et Hydrographie.....	26
2.3. Matériel utilisé.....	28
2.4. Collecte et traitement de données.....	29
2.4.1. Données pluviométriques.....	29
2.4.2. Cartes.....	30
2.5. Méthodologie d'analyse et de calcul.....	30
2.5.1. Analyse statistique et descriptive des données.....	30
2.5.2. Recherche la pluie décennale P10 de la zone d'étude.....	33
2.5.3. Estimation du débit de pointe.....	40
2.5.4. Caractéristiques du bassin AAC.....	41
2.6. Conclusion.....	44
CHAPITRE 3: RESULTATS.....	45
3.1. Introduction.....	46
3.2. Résultats de l'analyse statistique descriptive des données.....	46
3.3. Caractéristiques physiques du bassin AAC.....	50
3.4. Détermination de la pluie décennale grâce à l'ajustement de Gumbel.....	51
3.4.1. Détermination des paramètres μ et λ par la méthode graphique.....	51
3.4.2. Détermination des paramètres μ et λ par la méthode des moments.....	52
3.4.3. Détermination des paramètres μ et λ par la méthode du maximum de vraisemblance.....	53
3.5. Détermination du débit de pointe.....	55
3.6. Discussion.....	60
CONCLUSION.....	63
RÉFÉRENCES.....	64
ANNEXES.....	65

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification

L'eau est une ressource vitale pour l'humanité, mais sa gestion représente un défi complexe, notamment en milieu urbain où les dynamiques d'urbanisation rapide créent des pressions accrues sur les systèmes d'assainissement et de drainage. À Cotonou, la capitale économique du Bénin, la gestion des eaux pluviales est particulièrement problématique en raison de plusieurs facteurs interdépendants. La croissance démographique rapide, l'urbanisation anarchique, le manque d'infrastructures adéquates et une sensibilisation insuffisante à l'importance de la gestion des eaux de ruissellement contribuent à une situation où les inondations sont devenues fréquentes et dévastatrices.

D'après les statistiques, la population de Cotonou a plus que doublé en l'espace de quelques décennies, et cette croissance exponentielle n'a pas été accompagnée d'un développement proportionnel des infrastructures de drainage et de gestion des eaux. Cotonou concentre plus de 10% de la population béninoise avec une croissance qui avoisine les 4% par an (Capo Armelle, 2008). Cette situation rend la ville vulnérable aux inondations lors des fortes pluies, qui, en plus de causer des dégâts matériels importants, aggravent la vulnérabilité des populations face aux maladies hydriques telles que le choléra et la malaria.

L'inondable de 2010 est encore vivant dans les mémoires des béninois(es) avec un effectif estimé à 680.000 sinistrés dont 15000 sans-abri, 46 morts (MEPN, 2011). Les mois les plus pluvieux sont avril, mai, juin, juillet, septembre et octobre. (Léocardie ODOULAMI, Expédit W. VISSIN & Michel BOKO, 2023).

De plus, l'imperméabilisation croissante des sols due à l'expansion des zones bâties entraîne une diminution de la capacité naturelle des sols à absorber l'eau de pluie, exacerbant les problèmes de ruissellement. Dans des villes en développement comme Cotonou, environ 70 % de la surface urbaine est couverte de structures imperméables, ce qui empêche une infiltration efficace des eaux pluviales dans le sol, augmentant ainsi les volumes de ruissellement de surface. La porosité

du sol (35%) et l'infiltration du sol sont élevées mais l'emmagasinement est faible et favorise la resurgence et le séjour plus ou moins long de lame des eaux pluviales à la surface du sol (Léocardie ODOULAMI, Expédit W. VISSIN & Michel BOKO, 2023). Ce phénomène, combiné à l'absence de bassins de rétention naturels ou artificiels en nombre suffisant, accentue les risques d'inondations dans les zones basses de la ville.

Pour faire face à cette situation critique, le gouvernement béninois a initié le Projet d'Assainissement Pluvial de Cotonou (PAPC), une initiative visant à améliorer le drainage des eaux plusviales et à réduire la fréquence des inondations dans la ville. Le PAPC se fixe comme objectifs principaux la construction de nouvelles infrastructures de drainage, la réhabilitation des canaux existants, et la mise en place de bassins de rétention pour stocker temporairement les eaux excédentaires en période de pluie. L'importance de ce projet réside non seulement dans sa capacité à réduire les inondations récurrentes, mais aussi dans son potentiel à améliorer la santé publique en réduisant la stagnation des eaux, qui favorise la prolifération des moustiques et d'autres vecteurs de maladies. Cependant, la simple construction d'infrastructures ne suffit pas, il est crucial d'adopter une approche intégrée de la gestion des eaux pluviales, en tenant compte des aspects environnementaux, socio-économiques et techniques. C'est dans ce cadre que la connaissance du débit de pointe est incontournable et l'un des moyens de cette détermination est le recours aux méthodes empiriques. La recherche vise à explorer l'application des modèles empiriques comme outil stratégique pour améliorer la gestion des eaux pluviales à Cotonou. En combinant des données hydrologiques et météorologiques avec des modèles numériques, cette étude cherche à mieux comprendre les schémas de ruissellement des eaux pluviales et de survenue d'évènements rares dans le bassin AAC, afin de proposer des solutions innovantes et durables pour atténuer les risques d'inondation et améliorer la résilience urbaine.

. Le PAPC prévoit la réalisation de canaux de drainage et de bassins de rétention sur l'ensemble de la ville notamment dans les quartiers de Firdjrossè et Aibatin. Le présent document dont le thème s'intitule : « Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou » retrace l'ensemble des travaux que nous avons menés tout au long de la durée de notre stage au sein de l'entreprise

TECKNICART Ingénieurs-Conseils chargée du contrôle des travaux de construction de collecteurs d'assainissement pluvial et d'aménagement de voies connexes sur le bassin AAC.

2. Revue de la littérature

2.1. Clarification des concepts

- **Optimisation**

L'optimisation de la gestion des eaux pluviales consiste à concevoir et à mettre en œuvre des stratégies et des infrastructures pour gérer efficacement les eaux de pluie, afin de minimiser les inondations, améliorer la qualité de l'eau, et protéger les écosystèmes et les infrastructures. Dans le contexte urbain, cette optimisation est cruciale pour limiter les impacts de l'imperméabilisation des sols, qui empêche l'infiltration naturelle et favorise le ruissellement.

- **Distribution de Gumbel**

La distribution de Gumbel est une loi statistique utilisée pour modéliser les valeurs extrêmes, c'est-à-dire les événements rares ou extrêmes telles que les précipitations maximales ou les crues. Elle est particulièrement utile dans l'hydrologie pour estimer les variables comme les débits ou les précipitations associées à des périodes de retour élevées.

- **Bassin de rétention**

Un bassin de rétention est une infrastructure hydraulique conçue pour capter et stocker temporairement les eaux de ruissellement provenant des précipitations, principalement en milieu urbain ou semi-urbain. Le rôle principal du bassin de rétention est de réguler le débit des eaux pluviales en réduisant le risque de crues soudaines et en limitant la surcharge des réseaux de drainage et d'assainissement. En retenant l'eau pendant une période déterminée, il permet de réduire l'impact des fortes précipitations sur les zones en aval, où des inondations pourraient autrement se produire. Outre leur fonction de prévention des inondations, les bassins de rétention jouent un rôle important dans la gestion durable des eaux urbaines. Ils contribuent à la recharge des nappes phréatiques, réduisent l'érosion des sols, et améliorent la biodiversité locale lorsqu'ils sont intégrés à des projets d'aménagement écologiques.

- **Inondation**

L'inondation est un phénomène naturel qui se produit lorsque des quantités excessives d'eau submergent des zones de terrain habituellement sèches. Les inondations peuvent résulter de divers phénomènes hydrologiques, tels que des pluies abondantes, des tempêtes, la fonte des neiges, ou encore des défaillances d'infrastructures hydrauliques comme des barrages ou des digues. En milieu urbain, l'inondation est souvent aggravée par l'imperméabilisation des sols et le manque d'infrastructures de drainage suffisantes, ce qui empêche les eaux de pluie de s'infiltrer dans le sol ou d'être correctement évacuées.

2.2. Etat des connaissances

La présente revue se concentre sur la notion de gestion des eaux pluviales grâce aux modèles empiriques et leur pertinence dans le contexte des villes côtières comme Cotonou. La gestion des eaux pluviales en milieu urbain constitue un défi et l'un des moyens mis en œuvre dans l'optique de mener cette lutte est la construction des bassins de rétention.

Les bassins de rétention jouent un rôle essentiel dans la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Ils permettent de stocker temporairement les eaux de ruissellement avant qu'elles ne soient évacuées ou infiltrées. Toutefois, la conception et la gestion de ces infrastructures doivent être adaptées aux spécificités locales, notamment aux régimes pluviométriques et à l'imperméabilisation des sols. Le bassin de rétention AAC, qui constitue le cas d'étude de cette recherche, se situe au cœur des préoccupations liées à la maîtrise des écoulements pluviaux et à la réduction des risques d'inondation.

Dans leur étude sur les bassins urbains de rétention, Beniston et Stephenson (2004) soulignent l'importance de bien dimensionner ces infrastructures pour éviter les sous-dimensionnements qui pourraient entraîner des débordements en cas de précipitations extrêmes. Leur analyse montre que les erreurs de dimensionnement peuvent aggraver les problèmes d'inondation dans les zones urbaines densément peuplées, comme Cotonou. Agué et Afouda (2015) insistent sur la nécessité de prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle des précipitations dans la conception des bassins de rétention. Leur recherche démontre que la gestion efficace des bassins de rétention

nécessite une compréhension fine des modèles de précipitations extrêmes et des dynamiques de ruissellement, des éléments cruciaux dans le contexte du bassin AAC.

L'analyse fréquentielle des données hydrologiques est une étape cruciale pour la gestion des eaux pluviales et la modélisation des événements extrêmes. De nombreuses méthodes statistiques telles que la loi normale, la loi de Gumbel, la loi de Pearson, ont été développées pour estimer les valeurs extrêmes des précipitations et des débits, ce qui est fondamental pour la conception des infrastructures hydrauliques. Les techniques de modélisation empirique, telles que la loi de Gumbel, offrent une approche robuste pour quantifier la probabilité de survenue des événements pluvieux, ce qui est particulièrement pertinent dans le contexte des bassins de rétention.

La loi de Gumbel est souvent utilisée dans les études de fréquence pour ajuster les valeurs maximales de précipitations. Selon Gumbel (1958), "la distribution des valeurs extrêmes est une clé pour comprendre les événements hydrologiques extrêmes". Cette méthode est efficace pour modéliser les queues de distribution, ce qui est essentiel pour évaluer les risques d'inondation dans les zones urbaines. Selon Hosking et Wallis (1997), la loi de Gumbel est particulièrement adaptée pour les événements rares et extrêmes, ce qui en fait un choix judicieux pour l'évaluation des risques d'inondation. De plus, Kottegoda et Rosso (1997) soulignent que "la capacité à estimer les valeurs extrêmes de manière précise est primordiale pour la planification des ressources en eau".

L'estimation des paramètres de la loi de Gumbel peut être réalisée par plusieurs méthodes, notamment la méthode des moments et la méthode du maximum de vraisemblance. La méthode des moments, décrite par Duncan (1986), permet d'ajuster les paramètres de manière simple et directe en utilisant les moments statistiques des données. Le choix de cette méthode permet d'obtenir des estimations robustes même avec des échantillons de petite taille (David et Nagaraja, 2003).

La méthode du maximum de vraisemblance est souvent privilégiée pour l'estimation des paramètres des distributions statistiques en raison de sa capacité à fournir des estimateurs efficaces et non biaisés, surtout lorsque la taille de l'échantillon est grande. Selon Casella et

Berger (2002), “la méthode des maximums de vraisemblance a des propriétés asymptotiques désirables, telles que l'unicité et la convergence vers les véritables valeurs des paramètres lorsque la taille de l'échantillon augmente” (p. 183). Cette méthode est particulièrement adaptée pour modéliser des événements extrêmes, comme les crues, où la précision des estimations est cruciale.

De plus, Hosking et Wallis (1987) soulignent que “la méthode des maximums de vraisemblance est une approche robuste pour le traitement des données extrêmes et pour les estimations de paramètres de distributions telles que Gumbel” (p. 88). En utilisant cette méthode, on pourra maximiser la vraisemblance d'observer les données de précipitations, ce qui peut aboutir à des estimations plus fidèles des paramètres de la distribution de Gumbel, favorisant ainsi une meilleure compréhension des risques d'inondation.

Pour valider les modèles empiriques, il est impératif de vérifier leur fiabilité à l'aide de critères statistiques tels que le RMSE (Root Mean Square Error), le NASH-Sutcliffe Efficiency (NSE) et l'Erreur Moyenne Absolue (MAE). Le MAE évalue l'erreur moyenne entre les valeurs prédites et les valeurs observées, fournissant ainsi une autre perspective sur la précision du modèle (Klein et al., 2005). Willmott (1981) affirme que “la précision d'un modèle peut être efficacement évaluée par l'analyse de ses erreurs”. Ce coefficient évalue la capacité d'un modèle à reproduire les valeurs observées. Un NSE proche de 1 indique un excellent ajustement, tandis qu'une valeur inférieure à 0 suggère que le modèle est moins efficace que la moyenne des observations (Nash et Sutcliffe, 1970).

Dans le cadre de l'estimation du débit décennal, plusieurs méthodes sont disponibles. En effet, la méthode ORSTOM, comme discutée par Bacou et al. (1992), fournit une approche systématique pour estimer le débit de crue à partir des données de précipitations, en tenant compte des caractéristiques spécifiques du bassin versant. Elle s'appuie sur des relations empiriques et est recommandée pour les études hydrologiques dans des contextes similaires (Brouyère et al., 2004). Cette méthode repose sur l'utilisation de coefficients de ruissellement et permet d'estimer le volume à partir des données pluviométriques et des caractéristiques du bassin versant. Chow et al.

(1988) notent que le coefficient de ruissellement est un paramètre clé dans la modélisation des flux hydriques”.

En conclusion, nous faisons le choix de nous concentrer sur des techniques empiriques, adaptées aux données disponibles et aux besoins spécifiques du bassin de rétention AAC. Ce choix permet de contourner les contraintes liées aux données et à la complexité des logiciels de simulation, tout en offrant des résultats utilisables pour la gestion des eaux pluviales dans ce contexte. Les approches empiriques, telles que celles décrites ici, permettent de mieux comprendre les phénomènes hydrologiques et d’anticiper les impacts des événements extrêmes sur les infrastructures urbaines. Ces méthodes, soutenues par une littérature abondante, offrent des outils fiables pour la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau, particulièrement face aux défis posés par les inondations.

3. But de la recherche

Le but de cette recherche est d’évaluer la capacité des modèles empiriques à prédire les événements rares, le volume d’eau excédentaire du bassin de rétention artificiel AAC, afin d’optimiser la gestion des bassins de rétention et de réduire les risques d’inondation dans le contexte d’une ville fortement urbanisée comme Cotonou.

4. Objectif général et spécifique

4.1. Objectif général

L’objectif général de ce travail est d’évaluer l’efficacité et l’applicabilité des lois empiriques bien définies pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain, en se concentrant sur le bassin AAC à Cotonou, précisément à Firdjrossè, afin de proposer des solutions adaptées aux défis spécifiques rencontrés dans cette ville.

4.2. Objectifs spécifiques

Trois (03) objectifs spécifiques ont été formulés pour ce travail à savoir :

- Faire une présentation des activités menées durant le stage effectué sur le bassin AAC dans le cadre du PAPC.

- Évaluer les caractéristiques physiques de la zone d'étude.
- Intégrer les données géographiques et météorologiques disponibles dans les modèles empiriques bien choisis pour la recherche de la pluie décennale, la détermination du volume de ruissellement pour cet événement extrême et l'estimation du débit de pointe notamment.

5. Structure du document

Ce document est subdivisé en trois chapitres. Le premier sur le stage et les activités menées au cours du stage, le deuxième sur les données, matériels et méthodes. Enfin le troisième sur les résultats de recherche et discussion.

CHAPITRE I : CONTEXTE DE STAGE ET ACTIVITES MENEES.

1.1. Introduction

Ce chapitre sera destiné à présenter la structure d'accueil (TECKNICART Ingénieurs-Conseils) à travers les organigrammes et exposer les différentes activités menées tout au long du stage.

1.2. Présentation de la structure d'accueil

1.2.1. Historique

Créé depuis 1998 par un groupe d'ingénieurs, TECKNICART INGENIEURS-CONSEILS a commencé ses activités par des assistances techniques et conseils aux propriétaires privés surtout dans le domaine des bâtiments, afin de contribuer à l'amélioration de la qualité technique des constructions. De ce fait, il a réalisé les études techniques et le suivi de plusieurs habitations privées de standing varié : un étage à R+7 surtout à Porto-Novo, Cotonou, Abomey-Calavi, Ouidah, Lokossa, Abomey.

Actuellement, TECKNICART INGENIEURS-CONSEILS œuvre aussi pour la vulgarisation des constructions en matériaux locaux, en particulier, les constructions en terre de barre stabilisées au ciment de type autobloquant dit "HYDRAFORM" et ceux en collaboration avec un technicien formé en Afrique du Sud. Elle intervient dans plusieurs domaines tel que :

- Études techniques, plan d'exécution, avant métré et élaboration du DQE ;
- Études stratégiques, définition de plans, normes et standards ;
- Expertises immobilières ;
- Études architecturales des travaux, de faisabilités économiques et socio-Environnementales ;
- Supervision de la réalisation et suivi de la conformité des travaux en génie civil et autres ;
- Aménagement urbain (voiries et réseaux divers, espaces publics) et hydraulique ;
- Assistance technique et étude de synthèse ;
- Réception des matériels.

1.2.2. Organisation interne de la structure d'accueil

Ayant pour directeur général M. DEDJINOU Calixte, l'entreprise TECKNICART INGENIEURS-CONSEILS dispose pour une meilleure exécution de ses travaux d'un personnel qualifié et rompu à la tâche résumée dans l'organigramme ci-après :

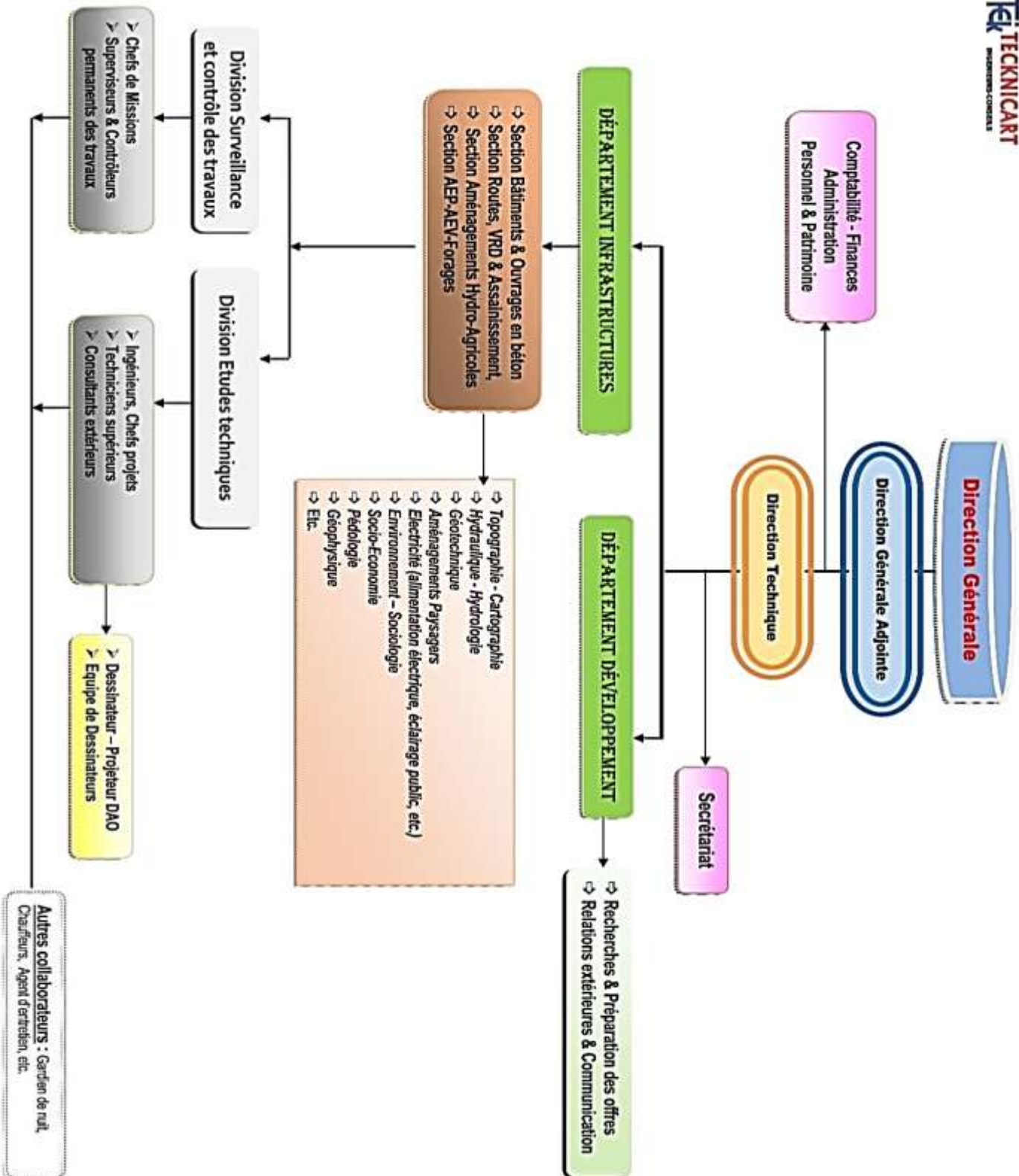


Figure 1 : Organigramme TEKNICART INGENIEURS-CONSEILS

1.3. Bref présentation du projet et des activités menées sur le bassin AAC

1.3.1. Bref présentation du projet

Le Programme d'Assainissement Pluvial de Cotonou (PAPC) a servi de point d'ancrage à notre étude. Initié par le gouvernement du Président Patrice TALON et financé par six (06) bailleurs de fond, il porte sur la réhabilitation des exutoires naturels et le dragage des couloirs d'écoulement des eaux, la construction de nouveaux collecteurs primaires dans les bassins pour un linéaire de 64 km, l'aménagement des canaux naturels avec berges en gabions et le confortement des berges.

Ces aménagements concernent 50 bassins dont 20 à l'Est et 30 à l'Ouest de Cotonou. Parmi les trente(30) bassins de l'Ouest figure le bassin AAC sur lequel on a effectué notre étude et qui draine les quartiers AIBATIN 1, FIDJROSSE KPOTA ; FIEYON 2 et AHOGBOHOUE.

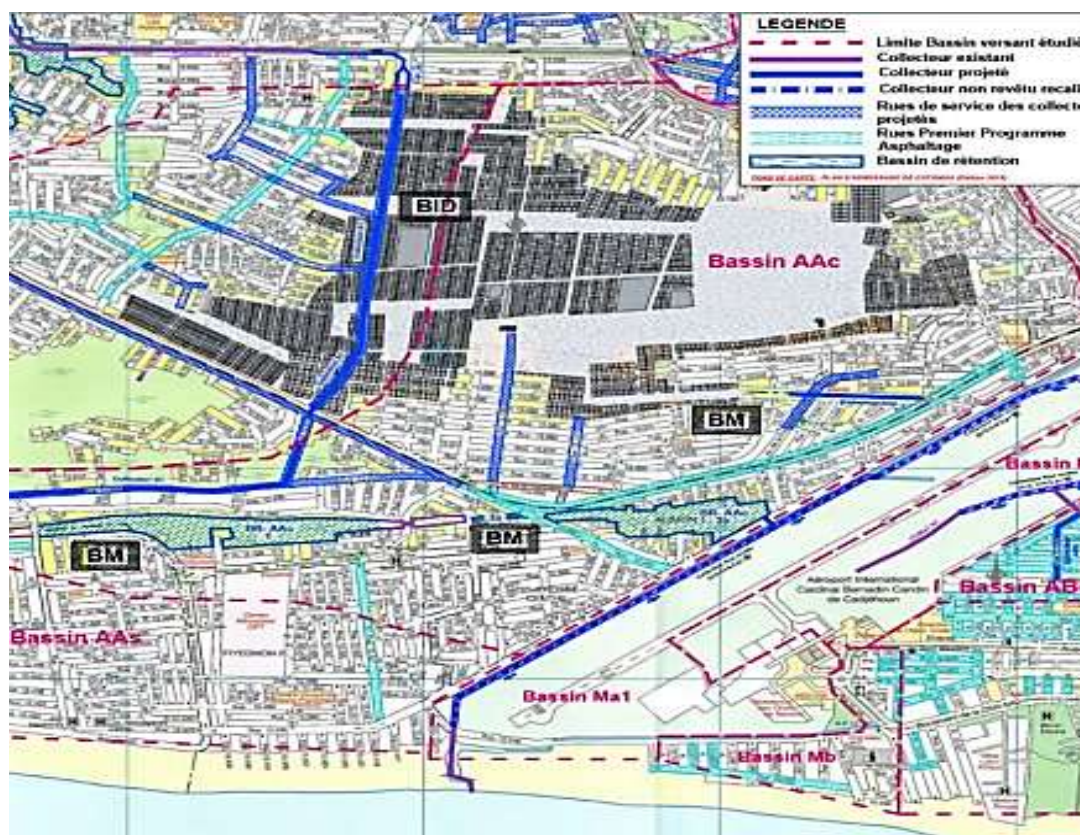


Photo 1: Vue d'ensemble des aménagements projetés dans le bassin AAC

1.3.2. Activités menées sur le bassin AAC

Ce bassin est subdivisé en cinq (05) sous-bassins ou bras: les bras AAC-1, AAC-2a, AAC-2b, AAC-3a, AAC-3b. En ce qui concerne les travaux d'assainissement du réseau des rues de Firdjrossè et Aibatin, il a été prévu comme ouvrages d'assainissement des caniveaux rectangulaires en béton.

1.3.2.1. Activités avant la réalisation du matelas Reno

Avant notre arrivée sur le chantier, des activités ont été menées en amont. Il s'agit de: l'élaboration du dossier d'exécution; les opérations topographiques (implantation des piquets de bords pour délimiter l'emprise du bassin à aménager); la mise en place du chantier.

Avant le démarrage proprement dit de la construction du bassin de rétention d'eau, l'on a d'abord procédé à la réalisation d'une piste d'accès au bassin de rétention et qui l'encercle. Dans le but d'assurer la pérennité de la piste de circulation, il est prévu la réalisation des fossés triangulaires en terre dans lesquels seront piégées les eaux pluviales des impluviums tributaires et des bues de traversées de piste pour reprendre ces eaux pluviales et les décharger dans le bassin en construction. La mise en place du chantier (le décapage et le débroussaillage) et le balisage qui consiste la mise en place des signaux délimitant le chantier et des zones dangereuses de ce dernier.

1.4.2.2. Réalisation du matelas Reno

Passées ces étapes, on procède à celles suivantes que sont:

- La mise en place du batardeau: Créé après 7m de largeur , le batardeau empêche les eaux environnantes de trouver place sur la surface de la zone de travail. Le batardeau est faite par la boue et est renforcé par le sable marin.
- Le pompage de l'eau: La motopompe est utilisée pour refouler les eaux qui s'écoulent à la surface de la zone de travail, et permet d'avoir à sec la zone de travail avant de commencer la purge.



Photo 2 : Création du batardeau



Photo 3: Motopompe

- La purge consiste en l'enlèvement de la boue de la zone que doit occuper l'assise sur une profondeur de 3 m.



Photo 4: la purge

- Le remblayage qui consiste à mettre du sable lagunaire dans la partie purgée afin d'obtenir une certaine stabilité du sol.
- Mise en place du rabat nappe

Après le remblayage, on constate une remontée de l'eau dans la fouille. Ainsi on passe à l'évacuation de l'eau par le rabat nappe afin d'abaisser le niveau piézométrique de la nappe phréatique.

Cette action permet d'assécher complètement le fond de fouille pour les travaux de terrassement et de nivellement de l'assise.



Photo 5: Mise en place du rabat nappe

- L'assise
La réalisation de l'assise se fait en plusieurs étapes: l'implantation des pickets et nivellement de l'assise, le déploiement du géotextile, la pose des cages, remplissage et la fermeture des cages.
- ✓ L'implantation des pickets et nivellement de l'assise

L'implantation des pickets est l'étape au cours de laquelle le topographe donne des piquets indiquant l'emplacement proprement dit de l'assise. Cette opération est rendue possible grâce à l'appareil GPS, qui donne à base des altitudes des piquets, les niveaux, l'épaisseur et la largeur de l'assise selon le plan d'exécution. Les coordonnées d'implantation étant déjà connues et enregistrées dans un carnet, le topographe donne les piquets qui montrent l'emplacement de l'ouvrage et ces piquets sont donnés selon un intervalle de 12,5m. Dans le cas d'une assise formant un arc de cercle, les piquets sont donnés avec des piquets intermédiaires faisant une

distance de 6,25m. Après l'implantation de l'assise, le nivellement est l'opération qui s'en suit et s'effectue par le topographe à l'aide du niveau optique et de la mire, en suivant quelques étapes selon lesquelles après le stationnement du niveau.



Photo 6: L'implantation des pickets et nivellement de l'assise

✓ Le déploiement du géotextile

Le géotextile est posé sur le lit de pose de l'assise pour empêcher le contact du matelas Reno avec le sol, l'infiltration de mauvaises matières et permettre la circulation facile de l'eau dans le matelas Reno.



Photo 7: Géotextile

- ✓ La pose des cages



Photo 8: La pose des cages



Photo 9: Les cages

✓ Le remplissage et la fermeture des cages

Après la pose des cage, ces dernières sont remplies par des moellons et sont fermées.



Photo 10: Remplissage et fermeture des cages

- Le talus

Le talus est constitué de la pente et de la crête.

✓ Préparation des ancrages

Les points d'ancrage sont importants pour maintenir le matelas à cause de la stabilité du sol. La longueur minimum des ancrages est de 1m.



Photo 11: Ancrages

- ✓ Le recouvrement en géotextile et préparation du talus

Après la fermeture des cages de l'assise, une partie de largeur 1.8m est recouverte en géotextile. Cette portion recouverte constitue une partie de la mise en place du talus précisément la pente.

- ✓ Mise en place des ancrages et terrassement de la pente
- ✓ Mis en place du géotextile, pose et remplissage des cages, fermeture des cages
- ✓ Implantation de la crête et nivellement
- ✓ Déploiement du géotextile et pose des cages
- ✓ Remplissage des cages et fermeture



Photo 16: Matelas Reno mis en place

1.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail la structure de stage et les activités qui y ont été menées, toutes ancrées dans le vaste domaine de l'hydraulique. Les travaux se sont bien déroulés durant ces trois mois et l'atteinte de chaque étape a pu se faire dans le temps imparti grâce au professionnalisme de l'entreprise et des ouvriers. Il est impératif de noter que ces activités n'ont eu lieu qu'après une étude hydrologique. Dans le chapitre suivant, nous prolongerons profondément dans cette analyse hydrologique, en explorant ses détails, ses méthodologies et sa relation étroite avec le domaine de l'hydraulique.

CHAPITRE II : DONNEES,MATERIELS ET METHODES.

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous expliquerons le milieu d'étude qui a servi de repère à notre recherche. Nous plongerons également dans les méthodes et outils utilisés pour collecter, analyser et interpréter les données. Cette section jettera les bases nécessaires pour comprendre la rigueur de nos calculs et les conclusions qui en découleront.

2.2. Milieu d'étude

2.2.1. Géomorphologie et Morphologie du Milieu d'Étude

2.2.1.1. Géomorphologie de Cotonou

L'ensemble géologique béninois est constitué de quatre formes principales qui sont: la plaine côtière, les plateaux de grès, la pénéplaine cristalline, la chaîne de l'Atacora. Cotonou, capitale économique du Bénin, appartient à la plaine côtière qui s'étend sur 125 km de long, 4 km de large et atteint au plus 10 m d'altitude. C'est une plaine basse, sableuse, marécageuse et jalonnée de lacs et lagunes dont le lac Nokoué qui délimite la ville au nord (Capo Armelle, 2008). Cette configuration géomorphologique en fait une région particulièrement vulnérable aux inondations, surtout pendant la saison des pluies.

La région se distingue par un relief d'origine fluviale et lagunaire, formé à partir de dépôts alluviaux apportés par les cours d'eau avoisinants et les mouvements sédimentaires de l'océan Atlantique. Les sols y sont principalement composés de sables fins et de limons, ce qui a des implications pour l'infiltration de l'eau, la capacité de drainage et la gestion des eaux pluviales.

2.2.1.2. Morphologie de la Zone du Bassin AAc et localisation

Les études d'actualisation du Plan Directeur d'Assainissement Pluvial (Igip, 2019) de la ville de Cotonou ont abouti à la définition de cinquante (50) bassins versants sur l'ensemble du territoire de la ville dont vingt (20) sont situés dans la partie Est (Ra, Rb, Rc, Rd, S, Ta, Tb, Tc, Td, Te, Wa, Wb, Wc, WW1, WW2, WW3, WW4, Y, Ya et Z) et trente (30) dans la partie Ouest de la ville (A, Abis, AAc, AAn, ABa, Abc, B, Bbis, C, D, F, Ga, Gb, Gc, Gd, Ha, Hb, I, J, L, M, Ma1, Ma2, Mb, XX, Pb, Pc, Q et Pa). Celui de notre étude (le bassin AAc) est situé à l'Ouest de la ville dans le 12ème arrondissement. Le bassin AAc draine les quartiers de AIBATIN 1, FIDJROSSE KPOTA, FIEYON 2 et AHOGBOHOUÉ.

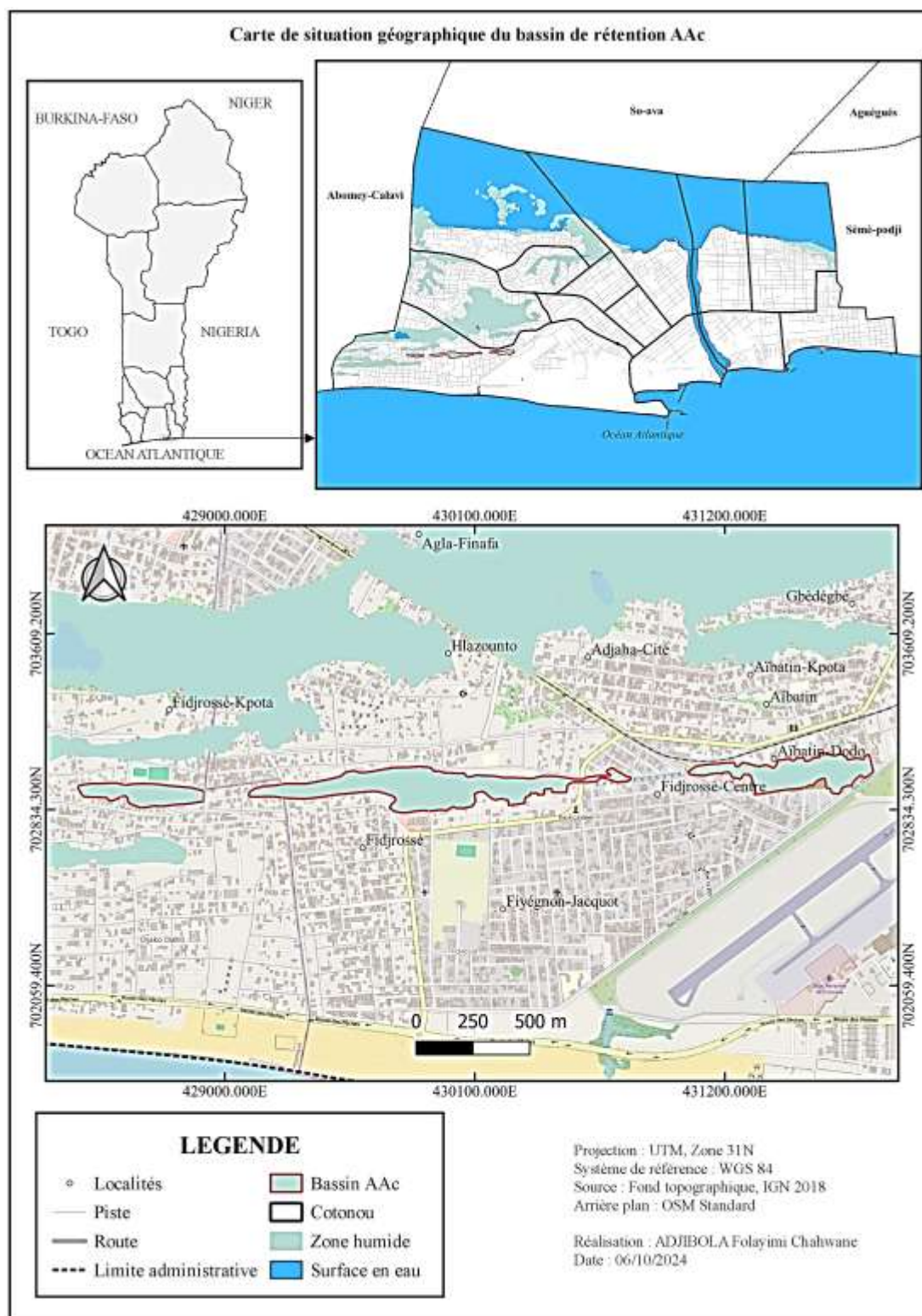


Figure 2: Carte géographique du bassin de retention AAC

2.2.2. Hydrogéologie du Milieu d'Étude

L'hydrogéologie de la région de Cotonou, notamment dans la zone du bassin AAC, est un élément crucial pour comprendre les dynamiques souterraines qui influencent la gestion des eaux pluviales et la conception des ouvrages tels que les bassins de rétention. La présence d'une nappe phréatique peu profonde et la nature des sols influencent fortement l'infiltration, le stockage et l'évacuation des eaux.

2.2.2.1. Nature des sols et aquifères

Les sols de Cotonou sont principalement constitués de sables fins et de limons, résultant des dépôts alluviaux et marins, ce qui confère à la région des caractéristiques hydrogéologiques spécifiques. Le bassin sédimentaire côtier où se trouve Cotonou est composé de couches successives de sables, d'argiles et de limons, formant ainsi des aquifères relativement perméables, mais avec des zones de moindre perméabilité en raison de la présence d'argiles.

Ces sédiments sablonneux sont généralement très perméables, facilitant l'infiltration des eaux pluviales dans le sous-sol. Cependant, l'imperméabilisation croissante due à l'urbanisation affecte cette capacité naturelle, augmentant le ruissellement de surface. La nappe phréatique, dans cette région, se situe souvent à une profondeur relativement faible, généralement entre 1 et 3 mètres sous la surface, bien qu'elle puisse varier en fonction des saisons et des précipitations.

2.2.2.2. Nappe phréatique

La nappe phréatique dans la zone de Cotonou est peu profonde, ce qui a des implications importantes pour les infrastructures hydrauliques, y compris le bassin de rétention AAC. La stagnation des eaux, un facteur d'inondation est principalement dû à la faible pente du terrain (Cotonou est une plaine) et à la mauvaise infiltration des eaux dans le sol (La nappe phréatique cotonnoise n'est profonde que de 2 à 6 mètres), selon Capo Armelle en 2008. En saison des pluies, cette nappe phréatique tend à monter rapidement en raison des fortes précipitations et du faible drainage naturel. Cela peut entraîner une saturation rapide des sols et une augmentation des risques d'inondation dans les zones avoisinantes.

La nappe phréatique est alimentée principalement par l'infiltration des eaux pluviales, bien que des échanges puissent également avoir lieu avec la lagune de Nokoué et l'océan Atlantique. Ce phénomène est renforcé par le faible dénivelé de la région, qui limite l'écoulement rapide des eaux souterraines vers la mer. La faible profondeur de la nappe phréatique pose des défis pour la gestion des eaux pluviales, car elle limite la capacité des bassins de rétention à évacuer les eaux par infiltration.

2.2.3. Végétation, Climat et Hydrographie

2.2.3.1. Végétation

La végétation naturelle de Cotonou est caractéristique des zones humides littorales et lagunaires. Autrefois, la région était recouverte de mangroves, de forêts galeries et de prairies humides, mais l'expansion urbaine a considérablement réduit la couverture végétale. Aujourd'hui, la végétation qui subsiste est essentiellement constituée de plantations d'arbres comme le cocotier (*Cocos nucifera*), le palmier à huile (*Elaeis guineensis*), et diverses espèces d'arbres fruitiers.

La végétation des zones de bas-fonds de Cotonou est caractérisée par des forêts marécageuses, des prairies et par endroits de mangroves à *Rhizophora racemosa* (palétuvier rouge) et *Avicennia Africana* (palétuvier blanc) (N'Bessa, 1997). Les espèces végétales dominantes observées dans les prairies sont: *Paspalum vaginatum*, *Typha australis*, *Cyrtosperma galensis* et *Cyperus articulatus*, et *Cyperus striatus* (Rapport APD, Mai 2019). Dans les zones non construites autour du bassin AAC, on trouve encore des herbes et des buissons, mais la végétation est généralement faible à cause de l'urbanisation. La présence d'une végétation limitée réduit la capacité naturelle de rétention des sols et aggrave le ruissellement en période de fortes pluies.

Le bassin de rétention AAC est occupé de part et d'autre par des espèces végétales naturelles caractéristiques des milieux humides surtout *Typha domingensis* et *Paspalum vaginatum*, et Quelques espèces exogènes telles que *Carica papaya*, *Terminalia catappa*, *Elaeis guineensis* et *Musa sp.* On note une faune aviaire composée des espèces telles que: *Ardea cinerea*, *Egretta alba*, *Phalacrocorax africanus*, *Dendrocygna viduata*, *Actophilornis africanus*, *Saxicola rubetra*. Ajoutée à cette dernière, on note des batraciens, des grillons

(*Gryllus campestris*), les sauterelles (*Tettigonia viridissima*), (PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE (PGES) Bassin de rétention AAC, 2019).

2.2.3.2. Climat

Cotonou bénéficie d'un climat tropical humide, caractérisé par deux saisons des pluies et deux saisons sèches. Les saisons des pluies principales se déroulent entre avril et juillet, avec un second pic de précipitations en septembre et octobre. La pluviométrie annuelle moyenne oscille entre 1 200 et 1 500 mm, avec des précipitations plus intenses durant les mois de mai et juin. Les températures varient peu au cours de l'année, avec une moyenne annuelle de 26 à 28°C. L'humidité relative est élevée, souvent supérieure à 80 %, en raison de la proximité de l'océan Atlantique. Ces conditions climatiques influencent fortement la gestion des eaux pluviales, avec des périodes de ruissellement intense pendant les saisons des pluies, augmentant ainsi la pression sur les infrastructures de drainage et de rétention des eaux.

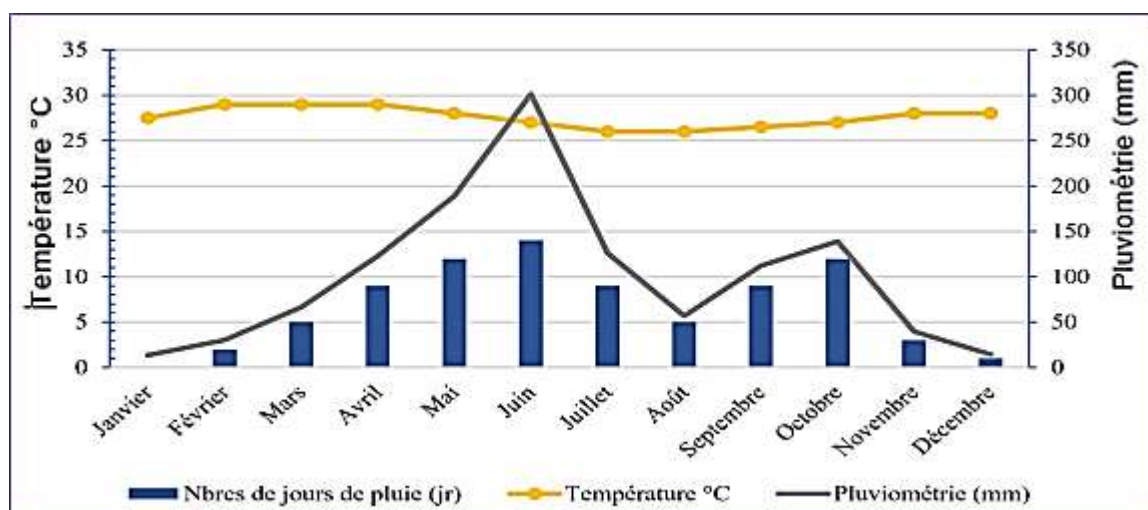


Photo 13: Diagramme ombrothermique de Cotonou, Agence Météo Bénin

Le climat joue un rôle crucial dans la gestion du bassin de rétention AAC. Pendant les fortes pluies, le bassin doit contenir un volume important d'eau pour éviter les inondations dans les zones habitées.

Enumérons que la variation saisonnière des précipitations implique que les solutions de gestion des eaux doivent être adaptées à ces changements afin de prévenir les débordements.

2.2.3.3. Hydrographie

L'hydrographie de Cotonou est fortement influencée par la présence de la lagune de Nokoué au nord et de l'océan Atlantique au sud. Le réseau hydrographique de la ville est constitué de chenaux naturels et artificiels qui relient ces deux grandes masses d'eau. Ces cours d'eau jouent un rôle essentiel dans l'évacuation des eaux pluviales, mais sont souvent encombrés par des déchets et des sédiments, réduisant leur efficacité.

Le bassin de rétention AAC fait partie de ce système hydrographique urbain. Il a été conçu pour stocker temporairement les eaux de ruissellement afin de limiter les risques d'inondation lors des épisodes pluvieux intenses. Les eaux drainées par le bassin proviennent des quartiers environnants et des réseaux de drainage pluvial qui collectent les eaux de pluie à travers des caniveaux et des rigoles.

2.3. Matériel utilisé

Dans l'accomplissement de notre travail, on a eu à faire recours à des outils. L'ordinateur et le Smartphone ont été nos principaux outils de travail. Nous avons également utilisé un appareil GPS pour enregistrer les coordonnées du site, ainsi qu'un décamètre pour certaines mesures. Les logiciels employés comprennent :

- Global Mapper, pour la délimitation du bassin versant et l'analyse de ses caractéristiques physiques ;
- QGIS, pour la réalisation des cartes;
- Les outils bureautiques de Microsoft Office : Word et Excel.

Combiné à ces outils, nous avons :

- La Recherche documentaire

La recherche documentaire a constitué la première étape de notre étude, nous permettant de rassembler les informations essentielles pour mener à bien notre analyse. Cette phase de recherche s'est concentrée sur :

- Les travaux de fin d'études antérieurs en lien avec notre sujet ;
- Des documents traitant de thématiques similaires ou partageant des aspects communs avec notre sujet (rapports d'études, cours, etc.) ;
- Des informations générales sur la zone d'étude.

• Visite de terrain

La visite sur le terrain a été une étape clé, visant à explorer directement le milieu physique de la zone d'étude. Elle a eu pour but de valider et compléter certaines données recueillies lors de la phase initiale. Cette étape nous a permis de :

- Mieux comprendre les caractéristiques du terrain ;
- Relever les coordonnées géographiques de notre point de déversement ;
- Observer les infrastructures et aménagements hydrauliques existants ;
- Effectuer quelques relevés sur le site ;
- Capturer des images du site.

2.4. Collecte et traitement de données

2.4.1. Données pluviométriques

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les précipitations maximales annuelles de la ville de Cotonou sur la période allant de 1961 à 2020. Nous les avons obtenues grâce à l'Agence Nationale et de la Météorologie du BENIN (ANaMB). Les données fournies étaient au pas de temps journalier. À l'aide d'Excel, nous avons pu les convertir en données mensuelles, puis en extraire les précipitations maximales annuelles, récapitulées dans le tableau à l'annexe 2.

2.4.2. Cartes

La délimitation des bassins versants a été faite grâce au logiciel Global Mapper et QGIS, qui sont des outils de SIG. Les cartes topographiques du bassin versant ont été générées à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

2.5. Méthodologie d'analyse et de calcul

Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour l'utilisation de modèles empiriques afin d'analyser les données hydrologiques et d'estimer les précipitations extrêmes. Ces méthodes sont couramment utilisées dans les études hydrologiques en raison de leur simplicité et de leur capacité à fournir des résultats fiables sans recours à des logiciels de modélisation complexes.

Nous avons choisi d'appliquer des lois statistiques, telles que la loi de Gumbel, la méthode du maximum de vraisemblance et celle des moments, qui permettent de modéliser les événements hydrologiques extrêmes. Ces approches se basent sur des séries de données historiques et offrent une estimation des événements rares, comme les pluies maximales ou les débits extrêmes, sur une période donnée. La loi de Gumbel sera utilisée pour déterminer les valeurs extrêmes des précipitations, tandis que la méthode des moments et celle du maximum de vraisemblance nous serviront à calculer les paramètres statistiques nécessaires à la caractérisation des phénomènes hydrologiques. Ces méthodes permettent de fournir des résultats pertinents pour la gestion des eaux pluviales et l'évaluation des risques d'inondation dans la zone d'étude.

Mais avant toute manipulation, faudrait passer par une étude statistique.

2.5.1. Analyse statistique et descriptive des données

Avant de procéder à l'application des méthodes empiriques pour modéliser les événements extrêmes, une première étape d'analyse statistique descriptive a été réalisée. Cette étape est essentielle pour comprendre la structure et la distribution des données disponibles, ainsi que pour identifier d'éventuelles anomalies ou tendances.

2.5.1.1. Indicateurs de localisation

Pour résumer les données, plusieurs indicateurs de localisation ont été calculés :

- La moyenne : Elle représente la valeur centrale des données, la valeur autour duquel tournent les données. Elle permet ici d'avoir une idée générale de l'ampleur des précipitations. La moyenne est comme le "centre" de nos données.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n nixi \quad (1)$$

Si $n=1$ comme notre cas, la moyenne représente le moment non centré d'ordre 1.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi^1 \quad (2)$$

- La médiane : Contrairement à la moyenne, la médiane divise les données en deux moitiés égales, offrant une mesure de tendance centrale qui est moins sensible aux valeurs extrêmes.

2.5.1.2. Indicateurs de dispersion

L'analyse de la variabilité des données est tout aussi cruciale que l'étude des indicateurs de tendance centrale. Les indicateurs suivants ont été utilisés :

- La variance : Elle mesure la dispersion des données autour de la moyenne. La variance mesure à quel point nos données s'écartent de la moyenne. Si il y a des jours avec beaucoup de pluie et d'autres avec très peu, la variance sera élevée, ce qui signifie que les quantités de pluie varient beaucoup. Si les quantités sont proches de la moyenne, la variance sera faible. Une grande variance indique une forte variabilité dans les précipitations ou les débits.

$$Var(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \quad (3)$$

- L'écart-type : Il est dérivé de la variance et permet d'apprécier la dispersion des données avec la même unité que les valeurs observées. Un écart-type élevé suggère une variabilité importante dans les données. L'écart type est simplement la racine carrée de la variance. Il indique à quel point, en moyenne, chaque quantité de pluie s'éloigne de la moyenne. C'est un peu comme mesurer la "largeur" de la distribution des données.

$$\sigma = \sqrt{Var(x)} \quad (4)$$

- Le coefficient de variation : Il permet de comparer la variabilité entre plusieurs séries de données, en tenant compte des ordres de grandeur différents. Il est particulièrement utile pour évaluer la dispersion relative des précipitations ou des débits.

$$CVx = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (5)$$

- L'étendue : Elle représente la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale des données, offrant un aperçu de l'amplitude totale des événements observés.

$$Etendue = \max(xi) - \min(xi) \quad (6)$$

2.5.1.3. Autres indicateurs

Un autre aspect important de l'analyse est l'effectif. Il s'agit du nombre total d'observations dans un échantillon, souvent utilisé pour calculer les fréquences et les fréquences cumulées. La fréquence correspond au rapport entre l'effectif d'une classe spécifique et l'effectif total, exprimée en pourcentage. Elle permet de visualiser la répartition des données dans différentes catégories ou intervalles.

$$Effectif = \sum_{i=1}^n ni \quad (7)$$

La fréquence cumulée est la somme des fréquences observées jusqu'à une certaine valeur de l'échantillon. Cet indicateur est particulièrement important dans l'étude des distributions, car il montre la proportion d'observations inférieures ou égales à une valeur donnée. En hydrologie, on l'appelle souvent la fréquence de non-dépassement, car elle représente le pourcentage de données qui n'excèdent pas une certaine valeur. Cela permet d'évaluer facilement la probabilité qu'une certaine hauteur de pluie soit dépassée. On parle alors de quantile d'un certain ordre.

$$FCC(x) = \sum_{i=1}^k fi \quad (8)$$

Nous ne pouvons clore cet onglet sans parler des moments centrés d'ordre k . Le moment centré d'ordre k se définit de la manière suivante :

$$M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k \quad (9)$$

Pour $k=3$, on a $M_k = M_3$.

Pour $k=4$, on a $M_k = M_4$.

Les deux autres indicateurs importants sont l'aplatissement et l'asymétrie.

$$Asym(x) = \frac{M_3}{\sigma^3} \text{ est l'asymétrie (10)}$$

$$Apla(x) = \frac{M_4}{\sigma^4} \text{ est l'aplatissement (11)}$$

En somme, on note que ces indicateurs statistiques fournissent une base solide pour l'application des méthodes empiriques dans l'étape suivante. Ils permettent de mieux comprendre les caractéristiques des données avant de passer à l'estimation des valeurs extrêmes à l'aide de la loi de Gumbel ou de la méthode des moments.

2.5.2. Recherche la pluie décennale P10 de la zone d'étude.

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique utilisée pour étudier la répartition et la probabilité de survenue d'événements naturels, comme les précipitations, les crues ou les débits, sur une période donnée. En hydrologie, elle est particulièrement utile pour évaluer la fréquence à laquelle des événements rares mais potentiellement destructeurs, comme les crues décennales (événement qui a une probabilité de se produire une fois tous les 10 ans) ou centennales (une fois tous les 100 ans) extrêmes, les inondations ou des pluies intenses, peuvent se produire.

Par exemple, si l'on veut savoir combien de fois une pluie de 100 mm en 24 heures peut se produire, on pourrait utiliser les données de pluies passées pour déterminer la fréquence de cet événement, puis extrapoler pour estimer sa période de retour (par exemple, une fois tous les 50 ans).

Dans le cadre de l'analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes, tels que les précipitations maximales ou les crues, il est essentiel de choisir une loi de probabilité capable de modéliser efficacement les valeurs extrêmes.

2.5.2.1. Choix de la méthode d'ajustement des maximales de précipitations

Plusieurs méthodes statistiques peuvent être utilisées dans ce contexte pour ajuster les séries de données et prédire les valeurs extrêmes.

Parmi ces méthodes, nous retrouvons notamment la loi de Gumbel (ou loi des valeurs extrêmes de type I), largement utilisée en hydrologie pour l'analyse des crues maximales; la loi normale, qui est souvent employée pour des données symétriques mais qui montre des limites pour les événements extrêmes; la loi de Log-Pearson type III, adaptée pour modéliser les séries hydrologiques asymétriques, surtout pour les données de débit; la loi de Weibull, utilisée pour une grande variété d'applications en ingénierie et en hydrologie pour l'analyse des données extrêmes.

Parmi les nombreuses lois utilisées en hydrologie, la loi de Gumbel s'est imposée comme un outil incontournable pour la prévision de ces événements rares.

La loi normale, quant à elle, est fréquemment utilisée pour modéliser des phénomènes où les valeurs sont symétriquement réparties autour d'une moyenne. Cependant, elle montre des limites significatives lorsqu'il s'agit de représenter des événements extrêmes. Comme le soulignent Chow et al. (1988), "la loi normale est inadéquate pour des phénomènes extrêmes car elle suppose une symétrie dans la répartition des données, ce qui ne correspond pas à la nature des événements rares". En effet, dans un contexte où les événements de forte intensité sont rares mais significatifs, la loi normale tend à sous-estimer la probabilité de ces occurrences extrêmes.

En comparaison, la loi de Gumbel, connue également sous le nom de loi des valeurs extrêmes de type I, est particulièrement adaptée pour modéliser la probabilité des valeurs maximales, telles que les crues annuelles. Contrairement à la loi normale, elle intègre une queue de distribution asymétrique, ce qui permet de mieux représenter les événements rares à forte intensité. Comme l'expliquent Stedinger et al. (1993) dans leur ouvrage sur l'hydrologie statistique, "la loi de Gumbel est particulièrement adaptée pour l'analyse des extrêmes, car elle permet de mieux capturer la variabilité des événements exceptionnels"

【Stedinger et al., 1993】.

En pratique, cette différence se manifeste par une meilleure précision dans l'estimation des périodes de retour des événements extrêmes. Par exemple, alors que la loi normale pourrait suggérer une sous-évaluation des crues de 100 ans, la loi de Gumbel permet une estimation plus réaliste et plus prudente des valeurs maximales à long terme. En optant pour la loi de Gumbel dans ce travail, nous visons donc à minimiser les risques d'erreur dans la prédiction des événements rares et extrêmes, qui constituent un enjeu critique dans la gestion des bassins de rétention et des infrastructures de drainage urbain.

La fonction densité de probabilité est définie par

$$f(x) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x-\mu}{\lambda} - \exp\left(-\frac{x-\mu}{\lambda}\right)\right) \quad (12)$$

La fonction de répartition est définie par

$$F(x) = \exp(-\exp(-\frac{x-\mu}{\lambda})) \quad (13)$$

Afin de déterminer cette fonction de répartition, il est incontournable de déterminer les paramètres μ et λ .

2.5.2.2. Détermination des paramètres

Dans le contexte de la distribution de Gumbel, les paramètres d'échelle (λ) et de position (μ) sont cruciaux pour modéliser les événements extrêmes. Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans l'ajustement de la distribution de Gumbel aux données d'événements extrêmes, comme les crues, et ils influencent directement la forme de la courbe de la distribution.

Pour estimer les paramètres μ et λ de la loi de Gumbel, plusieurs méthodes existent. Parmi les plus courantes, on trouve la méthode des moments et celle du maximum de vraisemblance.

- La méthode des moments consiste à évaluer les moments (la moyenne, la variance, etc.) des données empiriques avec ceux de la distribution théorique pour en déduire les paramètres.

On calcule d'abord les moments empiriques des données, c'est-à-dire la moyenne et l'écart-type. Ensuite, on exprime les moments théoriques de la loi de Gumbel en fonction des paramètres. On égalise ensuite les moments empiriques et théoriques pour en déduire les paramètres.

Ainsi, on a:

$$\lambda = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma \quad (14) \quad \text{et}$$

$$\mu = \bar{P} - \lambda \gamma \quad (15) \quad \text{avec } \gamma = 0.5772 \text{ et } \bar{P} = 109 \text{ mm}$$

Avantages

- Simple à calculer pour des petits ensembles de données.
- Ne nécessite pas de calculs compliqués.
- Fonctionne mieux pour des données symétriques (comme dans notre cas) et bien distribuées.
- La méthode des maximums de vraisemblance (MV) consiste à maximiser une fonction de vraisemblance pour obtenir des estimations des paramètres d'une distribution statistique. La vraisemblance permet d'évaluer la compatibilité des données observées avec différentes valeurs des paramètres μ et λ .

Pour la distribution de Gumbel, la vraisemblance d'un échantillon est exprimée par une formule spécifique:

$$L(\mu, \lambda | \text{données}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\lambda}\right) \exp\left(-\exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\lambda}\right)\right) \quad (16)$$

En appliquant cette méthode à la distribution de Gumbel, on peut exprimer la vraisemblance en fonction des paramètres d'échelle (μ) et de position (λ). Les estimateurs obtenus par MV sont généralement plus efficaces et donnent des intervalles de confiance plus précis, surtout pour des données extrêmes.

Dans le cadre de cette étude, après avoir ajusté les données pluviométriques et hydrologiques à l'aide de modèles empiriques, il est essentiel de s'assurer de la fiabilité

des résultats obtenus. La vérification de la robustesse et de la précision des modèles utilisés permet d'évaluer leur capacité à prédire correctement les événements extrêmes et à fournir des estimations fiables. Cette étape vise à valider les choix méthodologiques faits tout au long de l'analyse fréquentielle, garantissant ainsi la pertinence des résultats pour la gestion durable des eaux pluviales. Nous procédons donc à l'évaluation de la fiabilité des modèles ajustés afin de confirmer leur efficacité pour l'estimation des risques hydrologiques.

2.5.2.3. Vérification de la fiabilité des modèles

Lorsque des modèles empiriques sont utilisés pour estimer des phénomènes hydrologiques, tels que les précipitations maximales ou les débits extrêmes, il est essentiel de vérifier la fiabilité des résultats obtenus. Cela permet d'assurer que les modèles choisis représentent adéquatement la réalité observée et sont suffisamment robustes pour être utilisés dans des applications pratiques. Ici, on se basera sur 03 principaux indicateurs de performance:

- **Coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE)**

Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) est un critère couramment utilisé pour évaluer la performance des modèles hydrologiques. Il compare les résultats modélisés avec les observations pour vérifier la qualité de l'ajustement.

La valeur du NSE varie généralement entre $-\infty$ et 1, où une valeur proche de 1 indique une bonne correspondance entre les données observées et celles prédites par le modèle.

Le NSE est calculé comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

Avec $\hat{y}_i$ = Valeur prédite, y_i = valeur observée et $\bar{y}$ = moyenne des valeurs observées

Un NSE égal à 1 signifie que les prévisions modélisées sont parfaites.

Un NSE de 0 indique que le modèle n'est pas plus performant que la simple moyenne des observations, tandis qu'un NSE inférieur à 0 montre que le modèle est moins performant que cette moyenne.

- **Root Mean Square Error (RMSE)**

Le Root Mean Square Error (RMSE) est une autre mesure importante qui permet d'évaluer la performance des modèles en analysant l'écart quadratique moyen entre les valeurs modélisées et observées.

Le RMSE est calculé avec la formule suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (18)$$

Avec $\hat{y}_i$ = valeur prédite et y_i = valeur observée

Le RMSE est sensible aux grandes erreurs de prédiction. Plus sa valeur est faible, plus les prévisions du modèle sont proches des observations.

- **Mean Absolue Error (MAE)**

C'est une mesure de la précision d'un modèle statistique souvent utilisé dans le domaine de la prévision et de la régression. Elle représente la moyenne des écarts absolus entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles des données.

Ainsi, on a :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (19)$$

Avec $\hat{y}_i$ = Valeur prédite, y_i = valeur observée

Dans le cadre des analyses hydrologiques, l'utilisation de logiciels spécialisés tels que Hyfran joue un rôle essentiel pour l'évaluation des événements extrêmes. Hyfran permet d'appliquer diverses méthodes statistiques pour l'analyse fréquentielle des précipitations, évitant ainsi une dépendance exclusive à la loi de Gumbel. En adoptant une approche flexible, cet outil permet de tester plusieurs distributions statistiques et de choisir celle qui s'ajuste le mieux aux données disponibles. L'un des points fondamentaux dans l'analyse hydrologique est la détermination des paramètres des lois probabilistes utilisées. Les méthodes de Moments et de Maximum de Vraisemblance offrent deux cadres robustes pour cette estimation. La méthode des Moments, bien que conceptuellement simple, repose sur l'approximation des paramètres à partir des moments statistiques des données. Elle présente l'avantage d'être rapide et intuitive, mais peut parfois manquer de précision en présence de données très dispersées. À l'inverse, la méthode du Maximum de Vraisemblance, plus sophistiquée, permet une estimation directe des paramètres en maximisant la probabilité des observations. Cette méthode offre généralement une meilleure précision, particulièrement pour des échantillons de grande taille, mais elle exige une rigueur computationnelle accrue.

Pour garantir la pertinence et la fiabilité des résultats, l'évaluation des performances des modèles utilisés est indispensable. Des critères de performance tels que le MASH, le MAE et le RMSE jouent un rôle clé dans cette étape. Ces indicateurs permettent de quantifier les écarts entre les valeurs observées et les valeurs simulées, assurant ainsi une validation rigoureuse des modèles. Le RMSE, par exemple, est particulièrement utile pour mesurer les erreurs quadratiques moyennes, tandis que le MAE se concentre sur les écarts absolus, offrant une vision complémentaire de l'efficacité des modèles.

En somme, l'intégration de Hyfran dans l'analyse hydrologique constitue une avancée méthodologique importante. L'utilisation combinée des méthodes de Moments et de Vraisemblance, associée à une évaluation rigoureuse par des critères de performance, assure une fiabilité accrue des résultats. Ces démarches offrent aux chercheurs et aux praticiens une base solide pour la prise de décision en matière de gestion des eaux pluviales et de prévention des risques.

2.5.3. Estimation du débit de pointe

Après la détermination de la pluie décennale grâce à la loi de Gumbel, on passe à la détermination du débit de pointe décennale. Pour arriver à ces fins, libre a été notre choix sur la méthode de l'ORSTOM.

Cette méthode a été développée par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM) pour des bassins non jaugés en Afrique. Elle repose sur l'utilisation de relations empiriques entre les caractéristiques physiques du bassin (superficie, pente, type de sol) et des observations climatiques (pluviométrie). L'objectif est de proposer une estimation rapide et fiable du débit décennal, même en l'absence de données historiques sur les débits. On utilise des formules spécifiques basées sur des coefficients empiriques pour calculer le débit en fonction de la superficie du bassin et de la pluviométrie.

La méthode ORSTOM, développée pour l'estimation des débits de crue décennaux sur des bassins versants de moins de 200 km² en Afrique de l'Ouest, est basée sur les travaux de J. Rodier et C. Auvray (1965). Selon les auteurs, au-delà de cette superficie, il devient compliqué, voire irréalisable, de déterminer la lame d'eau décennale à partir des précipitations ponctuelles de même fréquence (FAO, 1996). Cette approche se fonde sur les observations effectuées sur 60 bassins versants, soumis à des régimes de précipitations annuelles allant de 150 à 1 200 mm. L'objectif principal est d'estimer le débit de pointe d'une crue décennale à travers un processus méthodologique détaillé.

Les auteurs présument que la crue décennale est provoquée par une précipitation décennale. Partant de cette hypothèse, le calcul du débit maximal décennal de ruissellement poursuit les étapes suivantes :

1. Estimation de la hauteur de précipitation : On détermine la hauteur de l'averse décennale sans considérer son intensité.
2. Calcul du volume total de précipitation : Le volume total de précipitation sur le bassin est calculé en multipliant la hauteur par un coefficient d'abattement (qui reflète l'hétérogénéité spatiale de la pluie) et par la superficie du bassin. La formule est donnée par :

$$V_p = \alpha H S \quad (20)$$

3. Détermination du volume ruisselé : Le volume d'eau ruisselée est obtenu en multipliant le volume total de précipitation V_p par le coefficient de ruissellement, qui dépend des caractéristiques du bassin (topographie, végétation, géologie). Ainsi, on a :

$$V_r = K_r V_p \quad (21)$$

4. Estimation du temps de base et du débit moyen : Le temps de base correspond à la durée effective du ruissellement sur le bassin. Le débit moyen pendant ce temps est donné par la formule :

$$Q_{moy} = \frac{V_r}{T_b} \quad (22)$$

5. Calcul du débit de pointe : Le débit de pointe de la crue décennale est obtenu en multipliant le débit moyen par un coefficient déterminé empiriquement :

$$Q_p = \gamma \cdot Q_{moy} \quad (23)$$

Les valeurs du coefficient γ varient selon la taille et la perméabilité du bassin. Par exemple, pour les petits bassins perméables $\gamma=1,05$. Pour les grands bassins imperméables dotés d'un réseau hydrographique bien marqué, γ se situe entre 1,10-1,15, tandis que pour les grands bassins perméables avec des lits suffisamment larges, γ est compris entre 1,15-1,20.

Ce processus permet de calculer de manière efficace le débit de pointe pour des bassins variés en Afrique de l'Ouest, en tenant compte des spécificités géographiques et hydrologiques de chaque zone étudiée.

2.5.4. Caractéristiques du bassin AAC

La détermination du débit ne peut se faire sans déterminer les caractéristiques physiques de notre bassin. Ce qui a été fait grâce aux étapes que nous allons présenter ci-dessous :

Carte de localisation géographique réalisé à l'aide du logiciel QGIS

Téléchargement des fichiers vecteurs sur le site de l'IGN

Importation de ces données dans le logiciel QGIS

Superposition de ces données pour avoir une carte

Mise en page de la page en incluant les détails à vouloir afficher.

Délimitation de la carte grâce au logiciel Global Mapper

Recherche et délimitation de la zone d'étude

Afficher les lignes de cours d'eau

Positionnement des exutoires

Délimitation du bassin

Calcul des caractéristiques de façon automatique.

Exporter les données des sous bassins recueillies sur Global Mapper dans QGIS pour refaire une nouvelle carte dans laquelle il y'a les sous bassins.

Les principaux caractéristiques à visualiser sont:

Surface

Le bassin versant, en tant que zone de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, conditionne les volumes d'eau mesurés à son exutoire en fonction de sa surface. La surface du bassin versant, notée S , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre, d'un papier millimétré, ou par des techniques de digitalisation.

Les bassins versants sont généralement classés en fonction de leur surface de la manière suivante :

Tableau 1: Surperficie des bassins

Type de bassin	Indices
Très petit bassin versant	$0 < S \leq 10 \text{ km}^2$
Petit bassin versant	$10 < S \leq 200 \text{ km}^2$
Grand bassin versant	$200 < S \leq 2000 \text{ km}^2$
Très grand bassin versant	$S > 2000 \text{ km}^2$

Périmètre

Le périmètre d'un bassin versant correspond à la longueur de la frontière qui délimite sa surface. Il est mesuré à l'aide d'un curvimètre, d'une ficelle, ou encore par des techniques de digitalisation.

Indice de compacité

L'indice de compacité, également appelé coefficient de forme, permet de comparer deux bassins versants de même surface. Il est défini par la formule suivante :

$$I_{comp} = \frac{0,8 P}{\sqrt{S}} \quad (24)$$

Où :

P représente le périmètre du bassin versant en km,

S la superficie du bassin en km²,

Et I_{comp} est un indice adimensionnel.

Cet indice est toujours supérieur ou égal à 1. Plus il se rapproche de 1, plus le bassin versant tend vers une forme circulaire. À l'inverse, plus l'indice est supérieur à 1, plus le bassin est allongé.

Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent d'un bassin versant correspond au rectangle ayant la même surface, le même périmètre et le même indice de compacité que le bassin versant étudié. Sa longueur est donnée par la formule suivante :

$$L = \frac{I_{comp}}{1,128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{I_{comp}} \right)^2} \right] \quad (25)$$

Où :

I_{comp} est l'indice de compacité,

Et L représente la longueur du rectangle équivalent en km.

2.6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté le contexte et les bases méthodologiques de nos recherches. De la présentation du milieu d'étude qui a servi de toile de fond à nos recherches aux détails sur les méthodes et outils employés pour l'analyse et l'interprétation des données, nous présenterons les résultats de notre recherche dans le chapitre suivant.

.

CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Introduction

Dans ce chapitre dédié aux résultats, nous étudierons en détail les différents compartiments de notre recherche, en débutant par l'analyse statistique. Ensuite, nous dévoilerons les paramètres physiques qui caractérisent notre bassin. Par la suite, nous déterminerons la pluie décennale, en se basant sur l'ajustement par le modèle de Gumbel et l'estimation de ses paramètres. Cette pluie décennale et les caractéristiques physiques de notre bassin vont nous servir de pilier pour la détermination de notre débit de pointe, l'élément central sans lequel ne pouvait se faire le dimensionnement du bassin AAC. Enfin, nous concluons.

3.2. Résultats de l'analyse statistique descriptive des données

Suite à la recherche de la valeur des différents indicateurs statistiques essentiels, on obtient le tableau ci-dessous:

Tableau 2: Indicateurs statistiques de la série de pluie

Indicateurs	Moyenne	Plus grande valeur	Plus petite valeur	Médiane	Étendue	Variance	Ecart-type	CV	Asymétrie	Applatissement
Valeurs	109	194,2	41,5	104,7	152,7	1286,6569	35,87	0,3291	0,6179	2,857

La plus grande valeur de pluie pour cette série, 194,2 a été aperçue en 2003 et la plus petite valeur de pluie maximale a été obtenue en 1970 pour une valeur de 41,5 mm. La moyenne étant de 108,67 indique que les données tournent autour de cette valeur. L'étendue de 152,7 révèle une large dispersion entre les valeurs maximales et minimales de l'échantillon. Les valeurs élevées de la variance et l'écart type confirment une variation importante autour de la moyenne, signifiant une distribution relativement large des données. L'asymétrie étant de 0,6179, signifie que la distribution des données est asymétrique, avec une longue queue à droite. L'aplatissement de 2,857 indique une distribution presque normale autour de la moyenne.

Les fréquences d'apparition de chaque valeur maximale de pluie durant ces soixante années trouvées sont consignés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 3: Fréquences cumulées de la série

Années	Pluies maximales	Fréquence	Fréquences cumulées croissants
1970	41.5	0.015873016	0.015873016
1984	51.9	0.015873016	0.031746032
2001	54.8	0.015873016	0.047619048
2014	60.1	0.015873016	0.063492063
1981	61.9	0.015873016	0.079365079
2011	67.3	0.015873016	0.095238095
1973	67.7	0.015873016	0.111111111
2021	69	0.015873016	0.126984127
1969	71.8	0.015873016	0.142857143
2020	72.8	0.015873016	0.158730159
2000	73.8	0.015873016	0.174603175
2002	74.2	0.015873016	0.19047619
1980	74.8	0.015873016	0.206349206
1985	75.2	0.015873016	0.222222222
1998	82.7	0.015873016	0.238095238
1990	83.7	0.015873016	0.253968254
1995	85.3	0.015873016	0.26984127
2009	86.7	0.015873016	0.285714286
1978	89	0.015873016	0.301587302

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

2019	92.6	0.015873016	0.317460317
1961	93	0.015873016	0.333333333
2017	93.6	0.015873016	0.349206349
1976	94.1	0.015873016	0.365079365
2013	96.1	0.015873016	0.380952381
2015	97.1	0.015873016	0.396825397
1999	100.2	0.015873016	0.412698413
1989	101	0.015873016	0.428571429
1967	101.6	0.015873016	0.444444444
2004	102.2	0.015873016	0.46031746
1986	102.6	0.015873016	0.476190476
2016	104.6	0.015873016	0.492063492
1965	104.7	0.015873016	0.507936508
2007	105.1	0.015873016	0.523809524
1988	106.4	0.015873016	0.53968254
2008	106.6	0.015873016	0.555555556
1964	108.2	0.015873016	0.571428571
2022	110.4	0.015873016	0.587301587
1971	110.8	0.015873016	0.603174603
1977	111	0.015873016	0.619047619
1983	111.7	0.015873016	0.634920635
1991	114.3	0.015873016	0.650793651
1994	116.4	0.015873016	0.666666667

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

2005	117.5	0.015873016	0.682539683
1968	119.2	0.015873016	0.698412698
2012	119.6	0.015873016	0.714285714
1993	124.7	0.015873016	0.73015873
2006	126.8	0.015873016	0.746031746
1972	129.4	0.015873016	0.761904762
1992	132.2	0.015873016	0.777777778
1996	132.2	0.015873016	0.793650794
2010	134.9	0.015873016	0.80952381
1987	139.4	0.015873016	0.825396825
1997	145.8	0.015873016	0.841269841
1979	146.3	0.015873016	0.857142857
1982	148.6	0.015873016	0.873015873
2018	158.2	0.015873016	0.888888889
1966	161.7	0.015873016	0.904761905
2023	168.2	0.015873016	0.920634921
1974	173	0.015873016	0.936507937
1963	180.1	0.015873016	0.952380952
1962	191.5	0.015873016	0.968253968
1975	193.8	0.015873016	0.984126984
2003	194.2	0.015873016	1

Ces résultats mettent en évidence une dispersion importante et normale mais asymétrique autour de la moyenne avec une queue plus longue à droite au sein de l'échantillon.

3.3. Caractéristiques physiques du bassin AAC

Lors de l'analyse de notre bassin versant AAC, deux approches de délimitation ont été adoptées, aboutissant à des résultats sensiblement différents en termes de surface et de périmètre. Ces différences s'expliquent par la méthodologie utilisée pour tracer les contours du bassin et des sous-bassins.

Délimitation basée sur les sous-bassins

Dans un premier temps, nous avons choisi de subdiviser directement le bassin en fonction des sous-bassins. Cette méthode permet une analyse plus localisée et fine, en isolant chaque bras du bassin pour en déterminer les caractéristiques spécifiques. Cette subdivision a donné lieu à des superficies plus petites pour chaque sous-bassin, ce qui reflète précisément les zones individuelles où l'écoulement de l'eau est concentré dans des affluents distincts.

En utilisant cette méthode, nous avons pu obtenir des données spécifiques pour chaque sous-bassin, telles que le périmètre, la surface, la pente moyenne et la longueur hydraulique, ce qui est pertinent pour les calculs à petite échelle ou pour des études hydrologiques localisées.

Les caractéristiques ici sont regroupées dans le tableau ci-après:

Tableau 4: Caractéristiques des sous-bassins

BV Aac	Perimètre (km)	Aire (km ²)	Altitude (m)		Pente moy		Longueur hydraulique (km)
			Max	Min	Pourcentage	Deg	
SBV1	7.55	1.039	12	2	2.26	1.29	1.726
SBV2	2.074	0.1617	10	1	2.66	1.52	0.535
SBV3	4.656	0.4768	10	2	2.38	1.36	1.533

Délimitation globale du bassin

En revanche, on a pris une autre approche en délimitant le bassin de manière plus large, incluant l'ensemble du réseau fluvial, y compris les affluents et d'autres zones environnantes. Cette approche a permis d'obtenir une surface beaucoup plus grande, ainsi qu'un périmètre plus étendu. Cette délimitation prend en compte la totalité des bras d'eau et des affluents, ce qui représente une vision plus holistique du bassin versant. Cette méthodologie est particulièrement pertinente

lorsque l'on utilise des méthodes hydrologiques comme celle de l'ORSTOM où la surface totale du bassin est un facteur clé pour déterminer les volumes d'eau qui peuvent s'écouler.

Les caractéristiques relevés figurant ci-dessous :

Tableau 5: Caratéristiques du bassin AAC

Paramètres	Détermination	Valeurs
Surface (S) en km ²	Extraction sur Global Mapper	6,919
Périmètre (P)) en km	Extraction sur Global Mapper	22,927
Pente Moyenne en degré	Extraction sur Global Mapper	1,37
Pente Moyenne en pourcentage	Extraction sur Global Mapper	2,40
Alt Max (Zmax)) en m	Extraction sur Global Mapper	12
Alt Min (Zmin)) en m	Extraction sur Global Mapper	-1
Indice de Compacite (Icomp)	$I_{comp} = \frac{P}{2\sqrt{\pi + S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$	2,44
Longueur du Rectangle équivalent (L)) en km	$L = \sqrt{S} * \left(\frac{I_{comp}}{1,128} \right) * [1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{I_{comp}} \right)^2}]$	10,164

3.4. Détermination de la pluie décennale grâce à l'ajustement de Gumbel

L'équation de Gumbel est sous la forme de $x = \mu + \lambda uq$. Notre x ici n'est rien d'autre que la pluie décennale nécessaire à la détermination du débit de pointe décennal.

3.4.1. Détermination des paramètres μ et λ par la méthode graphique

La détermination des paramètres mu et lambda se fera ici de façon graphique. La courbe ci-dessous fournit un aperçu de la relation entre les variables réduites et les pluies maximales.

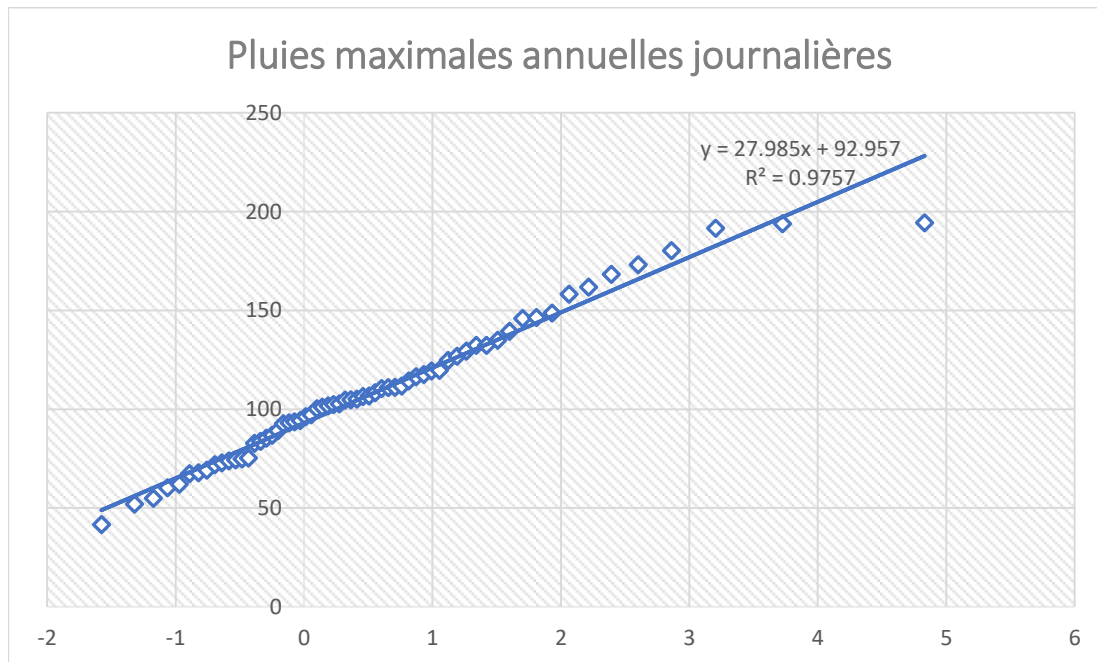


Figure 5: Variation des pluies en fonction des variables centrées réduites

De ce graphe, il ressort que $\mu = 92,957$ et $\lambda = 27,985$ avec $R=0,9757$.

Ainsi, on a $x = 92,957 + 27,985 * (-\ln(-\ln(1-T^{-1}))$ avec $T=10$ ans

$$X=P10=155,93 \text{ mm}$$

Le tableau récapitulatif des variables centrées réduites est disponible à l'Annexe 2 et celui qui renseigne sur les fonctions de repartition et densité de probabilité obtenues à base des paramètres déterminés se trouve à l'annexe 4.

3.4.2. Détermination des paramètres μ et λ par la méthode des moments

D'après les calculs, il ressort que $\lambda = 27,97$ et $\mu = 92,84$.

On retient donc ici que notre pluie décennale est égale à **155,8 mm** et qui est la moyenne des valeurs compris dans la marge de confiance **152,5-199,3 mm**.

Le tableau qui renseigne ici sur les fonctions de répartition et densité de probabilité obtenues à base des paramètres déterminés se trouve à l'annexe 4.

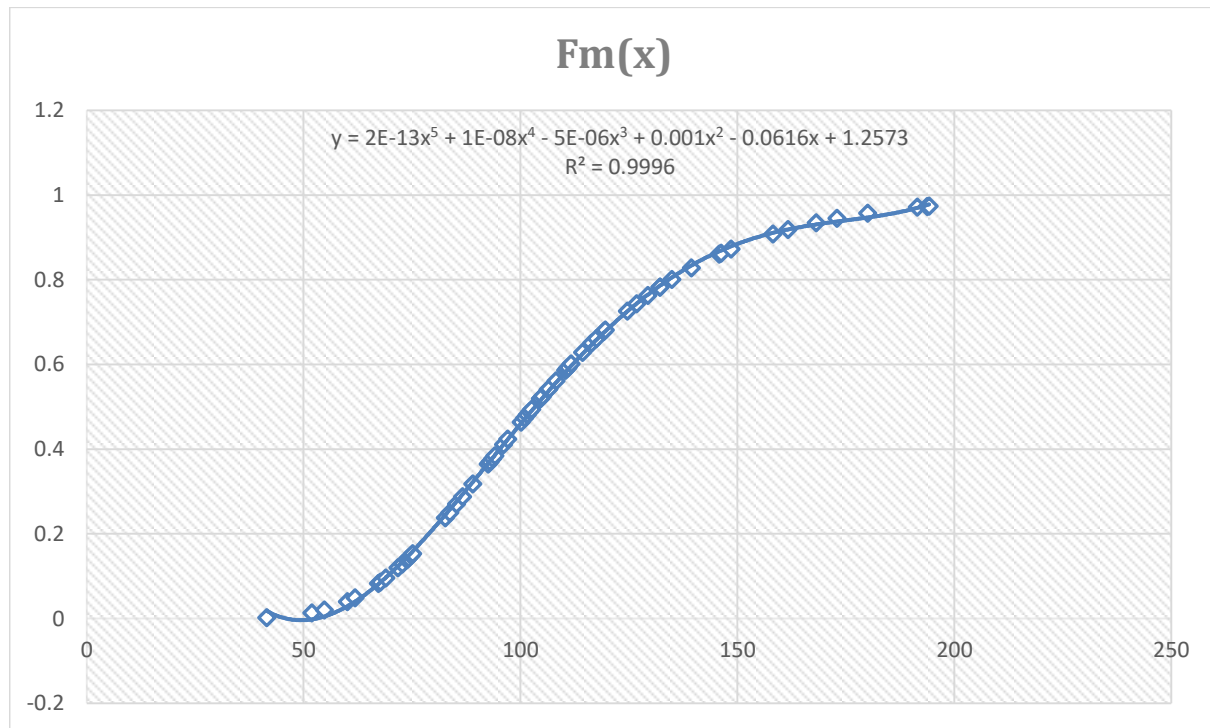


Figure 6: Variation de la fonction de répartition en fonction des données de pluies sur la période allant de 1961 à 2020

3.4.3. Détermination des paramètres μ et λ par la méthode du maximum de vraisemblance

Le but de la méthode du maximum de vraisemblance est de maximiser la log-vraisemblance de la distribution en fonction des paramètres μ et λ . Ainsi, en utilisant cette relation on a pu obtenir les paramètres $\mu = 92,08$ et $\lambda = 30,23$.

On obtient donc une pluie égale à **160,1mm** et qui est la moyenne des valeurs comprises dans la marge de confiance **142,8-177,5mm**.

L'insertion de ces paramètres dans les fonctions de répartition et densité de probabilité nous donne les tableaux disponibles à l'annexe 4.

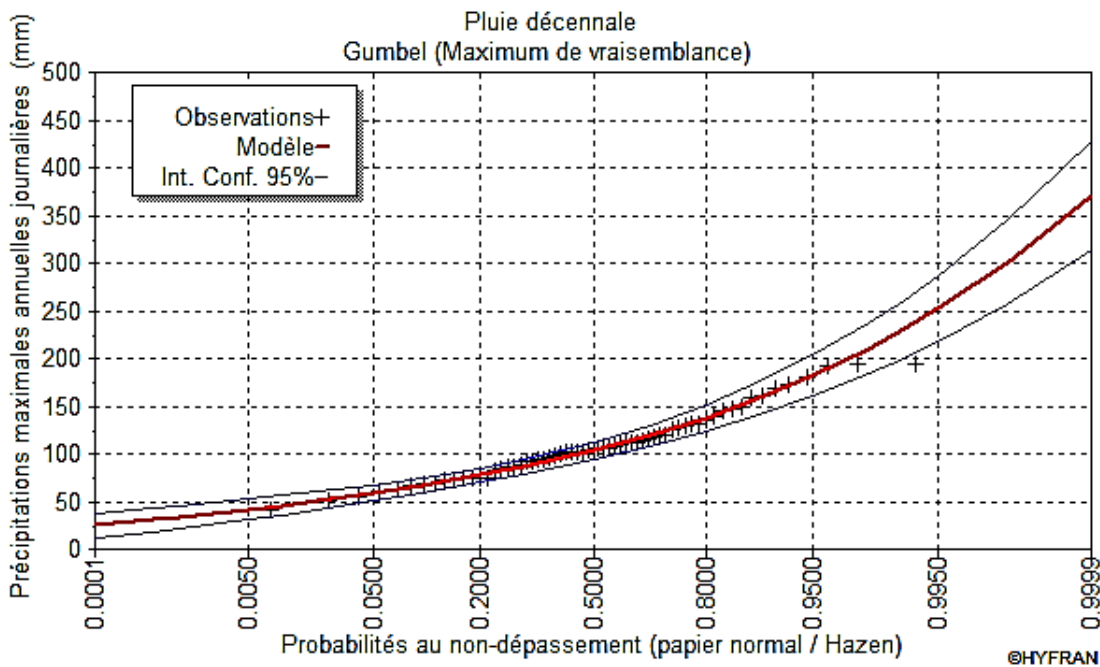


Figure 7: Variation de la fonction de répartition en fonction des données de pluies maximales annuelles de pluies sur la période allant de 1961 à 2020

Des trois(03) résultats, on retient une pluie décennale de 157,27mm et qui est compris dans la marge de confiance 150,41-177,58mm.

3.4.4. Résultats de tests de fiabilité

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats du test de fiabilité des modèles.

Tableau 6: Résultats de tests de fiabilité

	MAE	NASH	RMSE
Méthode des moments	3,30	0,9757	5,55
Méthode de vraisemblance	2,97	0,9693	6,24

Ces valeurs étant satisfaisantes alors, on peut valider l'utilisation de ces dernières dans notre étude.

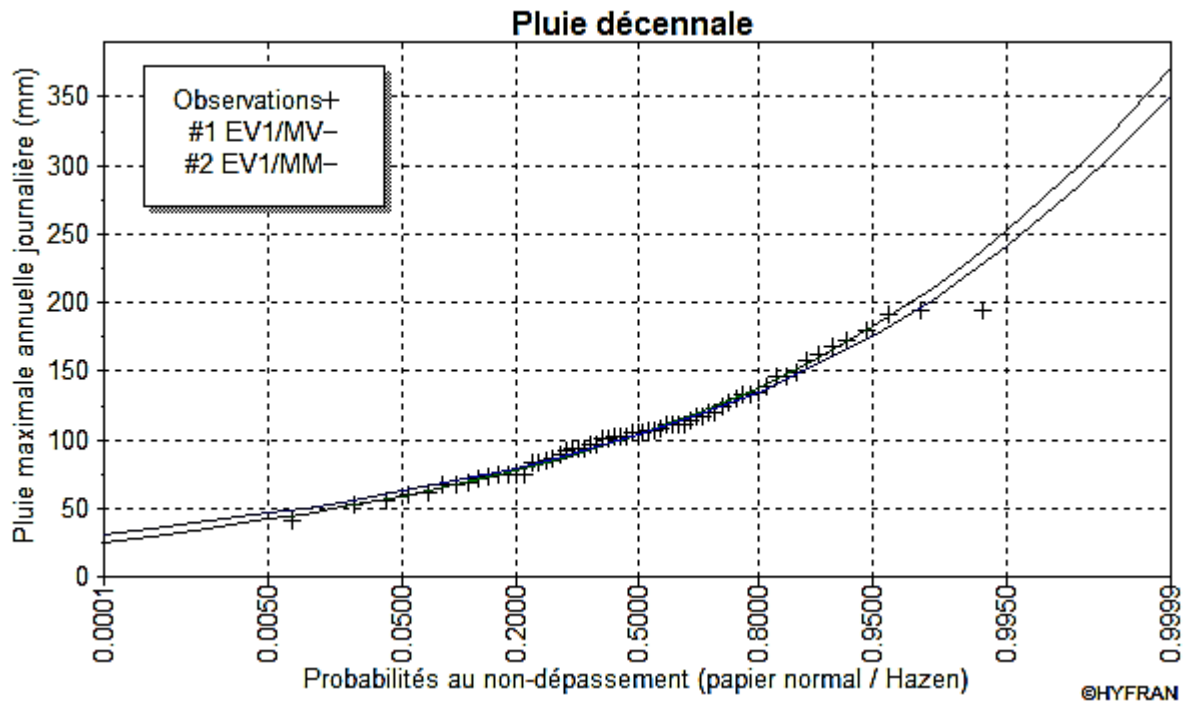


Figure 8: Comparaison des résultats issus des deux lois d'ajustements

De plus, la courbe issue de la superposition des fréquences déterminées par la méthode des moments et celle du maximum de vraisemblance permet de voir que les résultats des deux modèles sont presque semblables.

3.5. Détermination du débit de pointe

Ayant déterminé la pluie décennale, passons au calcul du volume ruisselé.

D'après les formules (19) et (20) on a : $V_r = K_r V_p$ et $V_p = \alpha H S$

Déterminons le coefficient d'abattement α .

Pour déterminer le coefficient d'abattement à l'aide d'un abaque, il convient tout d'abord d'identifier la courbe correspondant à la pluviosité spécifique. Une fois cette courbe identifiée, il faut localiser la valeur de la surface sur l'axe des abscisses. À partir de ce point, on trace une ligne verticale jusqu'à ce qu'elle rencontre la courbe de pluviosité. À partir de ce point d'intersection, on prolonge une ligne horizontale vers l'axe des ordonnées. La valeur à laquelle

cette ligne horizontale croise l'axe des ordonnées correspond au coefficient d'abattement recherché.

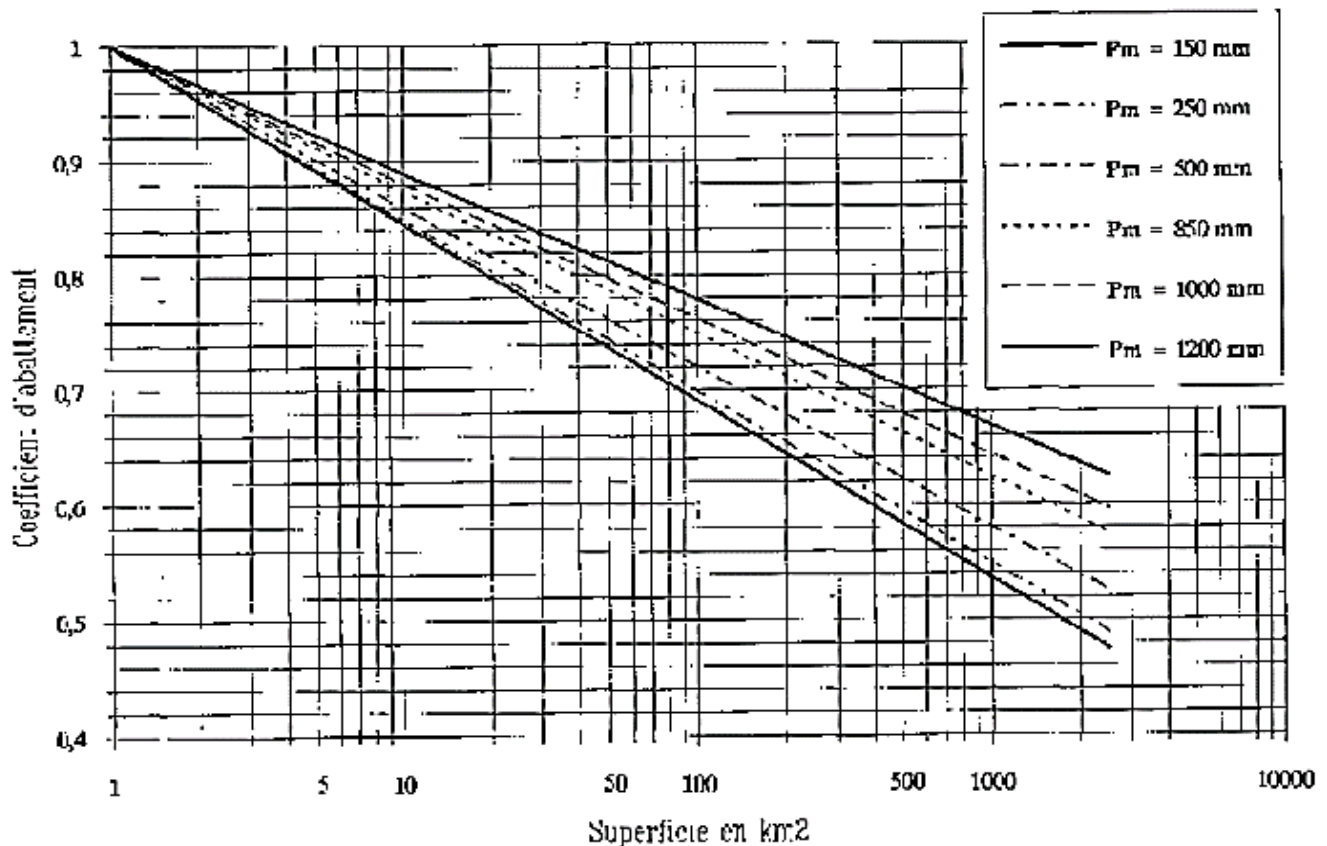


Figure 9: Variation du Coefficient d'abattement avec la surface pour différentes pluviosités

Pour $S = 6,919 \text{ km}^2$ et une averse décennale de 157,27 mm, on a $\alpha = 0,87$.

Ensuite, passons à la détermination du coefficient de ruissellement K_r . Pour ce faire, on aura besoin de la nature du terrain notamment la pente et la perméabilité.

Dans le cas des pentes, voici une classification approximative :

- Pentes faibles (0-1%) : Terrains plats, bonne infiltration, faibles coefficients de ruissellement.

- Pentes modérées (1-3%) : Terrains intermédiaires, infiltration modérée, coefficients de ruissellement modérés.
- Pentes fortes (>3%) : Terrains très inclinés, infiltration faible, coefficients de ruissellement élevés.

Dans le cadre de l'analyse hydrologique du bassin de rétention AAC, une première estimation de la pente a été effectuée à partir des caractéristiques des sous-bassins. En considérant la démutation et les spécificités de chaque sous-bassin, une pente de 2,33 % a été dérivée.

$$Pente\ moyenne\ totale = \frac{\sum SBV * Pente\ moyenne}{\sum Surface\ de\ sous - bassins} \quad (26)$$

Cette valeur reflète la variabilité des sous-bassins et les conditions spécifiques observées lors des relevés. Cependant, afin d'assurer une cohérence et une uniformité dans l'analyse du bassin dans son ensemble, il est impératif de prendre en compte une pente plus représentative de l'ensemble du système. Après une réévaluation de la topographie et des caractéristiques hydrologiques globales du bassin, une pente de 2,40 % a été retenue comme étant la plus appropriée pour les calculs hydrologiques.

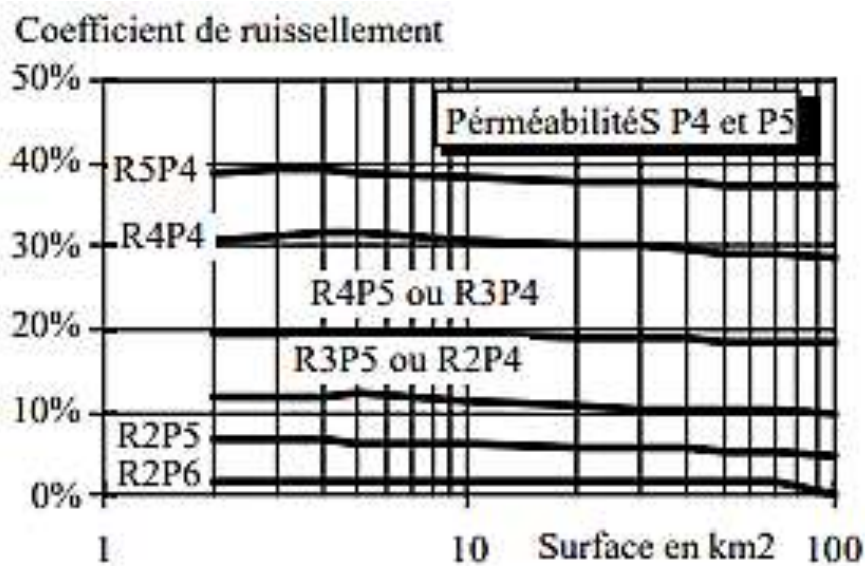


Figure 10: Coefficient de ruissellement. Régimes tropicaux et tropicaux de transition (p varie de 800 à 1600 mm). Perméabilité P4 et P5 (D'après RODIER et AUVRAY)

Avec une pente de 2,4 %, on a un indice R4 car selon les systèmes de classification des coefficients de ruissellement l'indice R4 représente généralement des pentes comprises entre 2 et 5 % présentant des caractéristiques d'une zone intermédiaire à légèrement montagneuse. Les terrains à cette inclinaison peuvent présenter un ruissellement modéré à élevé, en fonction d'autres facteurs comme le type de sol et la couverture végétale. Pour déterminer l'indice approprié, il est essentiel de considérer non seulement la pente, mais aussi d'autres facteurs tels que la nature du sol, la végétation, et l'imperméabilité de la surface. Les indices P4 et P5 se réfèrent à des types de couverture du sol et à des conditions d'utilisation des terres qui influencent le coefficient de ruissellement. Dans le cas d'une pente de 2,4 %, choisir entre P4 et P5 dépendra des caractéristiques spécifiques de la zone d'étude, telles que la couverture du sol et l'imperméabilité. Ici, il y a encore des zones de végétation ou des sols partiellement perméables, alors P4 est le meilleur choix.

La valeur du coefficient de ruissellement (K_r) est 31%.

Le volume ruisselé de la crue décennale est donc $V_r = K_r \cdot P_{10} \cdot \alpha \cdot S$

$$V_r = 6,919 \cdot 0,31 \cdot 0,87 \cdot 157,27 \cdot 1000 \text{ (1mm} = 10 \text{ m}^3 \text{ /ha)} ; V_r = 293474,3598 \text{ m}^3$$

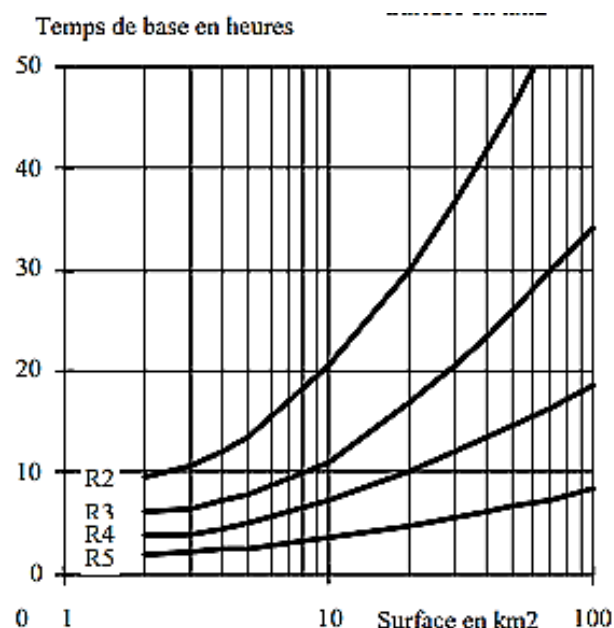


Figure 11: Régimes tropicaux et transition. Temps de base en fonction de la superficie du bassin. (D'après RODIER et AUVRAY)

Une fois le volume ruisselé déterminé, il sera question de déterminer le débit moyen. Pour déterminer ce débit, nous aurons besoin du temps de base. Il est fonction de la surface tributaire et de l'indice R4.

Avec $S = 6,919 \text{ km}^2$, on retient du graphique ci-dessous un temps de base de 5h

Le débit moyen est égal à :

$$Q_{moy} = \frac{V_r}{T_b} \quad (28)$$

$$Q_{moy} = \frac{V_r}{T_b}$$

$$Q_{moy} = 16,30 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour les bassins versants tropicaux et tropicaux de transition, le coefficient de pointe est 2,5 quelle que soit la surface.

$$K = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}} \quad (29)$$

$$Q_{max} = 2,5 * 16,30$$

$$Q_{max} = 40,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

Détermination du débit de pointe.

La zone du projet étant en zone tropicale et constituée de petits bassins perméables, on prendra comme formule du débit de pointe :

$$Q_p = 1,05 * Q_{max}$$

$$Q_p = 1,05 * 40,76$$

$$Q_p = 42,80 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.6. Discussion

Dans le cadre de notre étude sur le bassin AAC, nous avons opté pour des modèles empiriques tels que la méthode de Gumbel et la méthode de vraisemblance pour l'analyse fréquentielle des données pluviométriques. Ces méthodes ont été choisies en raison de leur capacité à traiter des données historiques de manière efficace et relativement simple. La méthode de Gumbel, en particulier, est largement reconnue pour sa pertinence dans l'estimation des valeurs extrêmes, ce qui est crucial dans le contexte de la gestion des crues (Gumbel, 1958; Stedinger et al., 1993). La méthode de vraisemblance, quant à elle, offre des estimations robustes des paramètres de distribution, renforçant ainsi la fiabilité de nos résultats (Cressie, 1993). Les résultats obtenus ont révélé des tendances significatives dans le comportement hydrologique du bassin AAC, notamment en ce qui concerne le débit de crue maximale. Ces résultats, déterminés par les méthodes de l'ORSTOM et du coefficient de ruissellement, ont des implications pratiques importantes pour la planification des infrastructures hydrauliques dans la région. En effet, l'estimation précise des débits permet d'optimiser la conception des ouvrages et de réduire les risques d'inondation, comme le souligne le travail de Graham et al. (2003). Cependant, ces méthodes empiriques présentent des limites.

Bien que les méthodes empiriques offrent une approche simple et directe pour analyser les données hydrologiques, elles présentent également certaines limites qu'il convient de nuancer.

- Leur caractère arbitraire

Les formules utilisées pour calculer les fréquences de non-dépassement reposent sur des choix méthodologiques arbitraires. Ces variations peuvent influencer sur les résultats finaux, rendant nécessaire l'adoption d'un cadre méthodologique clair pour éviter des conclusions biaisées.

- Limitation de l'extrapolation

En se basant uniquement sur les fréquences empiriques, il devient difficile d'estimer la probabilité de survenue d'événements extrêmes qui n'ont pas encore été observés, comme des précipitations exceptionnellement fortes. L'extrapolation au-delà de la plus

forte valeur observée reste incertaine, et les méthodes empiriques seules ne suffisent pas toujours à résoudre ce problème.

- Incertitude liée à la variabilité d'échantillonnage

Les observations disponibles représentent souvent un échantillon limité du comportement global de la région étudiée. Cela peut conduire à des estimations dépendant fortement des données observées, sans nécessairement prendre en compte toutes les possibilités. Pour mieux gérer ces incertitudes, il est souvent utile de recourir à des modèles probabilistes complémentaires, permettant une description plus robuste de la distribution des valeurs hydrologiques et permettant d'éviter certaines imprécisions dues aux choix arbitraires ou aux incertitudes liées aux échantillons afin de mieux appréhender les phénomènes hydrologiques extrêmes. Bien que les méthodes empiriques soient pratiques, elles doivent être utilisées avec précaution et idéalement complétées par d'autres approches plus fiables dans certains contextes. Par ailleurs, il est également essentiel d'aborder la nécessité d'intégrer les variations climatiques dans notre analyse hydrologique. Les changements climatiques peuvent modifier les régimes de précipitations et affecter les résultats de nos études. Plusieurs auteurs, tels que IPCC (2021) et Mastrorillo et al. (2016), soulignent l'importance de prendre en compte ces variations pour assurer la pertinence des modèles hydrologiques. Ainsi, des recommandations pour de futures études incluent l'utilisation de simulations climatiques pour mieux comprendre l'impact potentiel des changements environnementaux sur les ressources en eau. Aussi, dans la zone du bassin AAC, il existe des interactions complexes entre les eaux de surface (pluie et ruissellement) et les eaux souterraines (nappe phréatique). En période de fortes précipitations, les eaux de surface pénètrent rapidement dans les sols sablonneux, rechargeant ainsi la nappe phréatique. Toutefois, en raison de l'urbanisation et de la création d'infrastructures imperméables, l'infiltration est limitée, augmentant la proportion des eaux de ruissellement qui doivent être gérées par le bassin de rétention. Ces interactions créent des défis pour la conception et la gestion du bassin AAC. La remontée rapide de la nappe phréatique, qui est d'ailleurs ce qu'on a remarqué au cours de notre stage, peut réduire l'efficacité du bassin en termes de capacité de stockage et augmenter les risques de débordement en cas de crues importantes. Des études spécifiques sur la dynamique

des nappes souterraines et des modélisations hydrogéologiques sont nécessaires pour mieux comprendre ces interactions et optimiser la gestion des infrastructures. La faible profondeur de la nappe phréatique rend également la zone particulièrement vulnérable à la pollution des eaux souterraines. Le ruissellement urbain, souvent chargé de polluants (huiles, déchets, métaux lourds), peut s'infiltrer dans le sol et contaminer la nappe phréatique. De plus, la montée de la nappe phréatique en période de fortes précipitations peut conduire à des inondations, exacerbant ainsi les risques sanitaires et environnementaux. Les inondations peuvent provoquer la dispersion des polluants stockés à la surface dans les nappes souterraines, augmentant ainsi les défis liés à la gestion de la qualité des eaux. D'où la nécessité d'impliquer les populations dans la gestion des bassins et les sensibiliser sur l'entretien des infrastructures pour garantir leur durabilité. L'utilisation du logiciel Hyfran a permis de déterminer la pluie décennale en utilisant la loi de Gumbel, avec une approche basée sur les critères statistiques tels que l'AIC, BIC et le test de Khi². Cependant, il convient de souligner que cette approche présente certaines limitations, notamment le fait que Hyfran ne prend pas en compte des paramètres clés du bassin, tels que le type de sols, l'infiltration, la végétation, et la topographie. Ces facteurs sont pourtant cruciaux pour une modélisation hydrologique réaliste, car ils influencent directement le comportement du ruissellement et la réponse du bassin face aux événements pluvieux. Pour les recherches futures, il serait intéressant d'explorer d'autres paramètres susceptibles d'influencer le comportement hydrologique du bassin AAC, tels que les variations d'usage du sol et leur impact sur le ruissellement. L'intégration de modèles hydrologiques plus complexes tels que les modèles de type HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) ou SWMM (Storm Water Management Model) pourrait également améliorer la précision de nos prévisions. Des travaux antérieurs montrent que l'utilisation de simulations hydrologiques peut renforcer les estimations empiriques et offrir une meilleure compréhension des dynamiques hydrologiques (Knebl et al., 2005). Il serait également intéressant d'intégrer des données de terrain supplémentaires, telles que des mesures de débit en temps réel et des observations de la réponse hydrologique du bassin lors de pluies extrêmes, afin d'affiner les estimations de débits de pointe et de tester la validité des modèles utilisés.

CONCLUSION

Dans le cadre de notre recherche, nous avons appliqué des techniques empiriques. En utilisant le modèle de Gumbel et la méthode de maximum de vraisemblance pour l'analyse fréquentielle, nous avons pu estimer les paramètres de la distribution des événements de pluie extrêmes. Ces modèles sont essentiels pour comprendre les phénomènes hydrologiques, car ils permettent de prévoir la probabilité d'occurrence de ces événements, ce qui est crucial pour la gestion des ressources en eau et la prévention des inondations. Par ailleurs, nous avons également intégré la formule de l'ORSTOM pour déterminer le débit dans le bassin AAC. Ces approches pratiques et empiriques fournissent des estimations de débits basées sur des données observées et des caractéristiques spécifiques du bassin, ce qui est fondamental pour la planification des infrastructures hydrauliques et la gestion des eaux de ruissellement. Cette étude constitue une contribution significative à la gestion des ressources en eau dans la région de Cotonou notamment dans le bassin AAC. Notre travail souligne l'importance d'une approche multidisciplinaire et actualisée dans la planification des infrastructures hydrauliques, garantissant ainsi une meilleure résilience face aux défis hydrologiques à venir. Néanmoins, bien que cette étude ait permis de démontrer l'efficacité des solutions mises en place pour la gestion des eaux pluviales dans le bassin AAC, plusieurs perspectives méritent d'être explorées. Notamment, l'intégration de paramètres hydrologiques non pris en compte par Hyfran, comme l'infiltration et le type de sol, pourrait améliorer la précision des modèles. Par ailleurs, une évaluation comparative des solutions structurelles, telles que les matelas Reno, avec des alternatives comme la végétalisation ou les géotextiles, pourrait offrir des approches plus adaptées aux spécificités locales. Enfin, intégrer des projections climatiques et étudier des pluies de périodes de retour plus longues permettraient de mieux anticiper les impacts des événements extrêmes. Ces perspectives ouvrent des pistes prometteuses pour des recherches futures et une optimisation accrue des pratiques de gestion des eaux pluviales.

RÉFÉRENCES

Rapport APD Annexes version révisée définitive Mai 2019, IGIP Afrique

Programme d'Action du Gouvernement (PAG Bénin Révélé 2016-2021)

Plan de gestion environnementale et sociale (PGES), Bassin de rétention AAC, 2019

Brouyère, S., et al. (2004). *“Estimation des débits de crue à partir des pluies maximales.”*
Hydrologie.

Éléments d'hydrologie de surface. J.P. LABORDE Professeur à l'Université de Nice - Sophia Antipolis
Ingénieur hydraulicien de l'ENSEEIH Toulouse Ingénieur hydrogéologue de l'ENSG Nancy Docteur es
Sciences en Hydrologie Edition 2000.

Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based
on L-Moments.* Cambridge University Press.

Klein, M. et al. (2005). *“Performance measures for hydrological models: A comparative study.”*
Water Resources Research.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). *“River flow forecasting through conceptual models part I
— A discussion of principles.”* *Journal of Hydrology.*

Beniston, M., & Stephenson, D.B. (2004). *Extreme climatic events and their evolution under
changing climatic conditions.* *Global and Planetary Change.*

Wang, J., et al. (2005). *“The implications of the choice of frequency distribution on flood
frequency analysis.”* *Hydrological Sciences Journal.*

Agué, A., & Afouda, A, (2015). *Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima
annuels de pluies journalières au Bénin. (February)*

ANNEXES

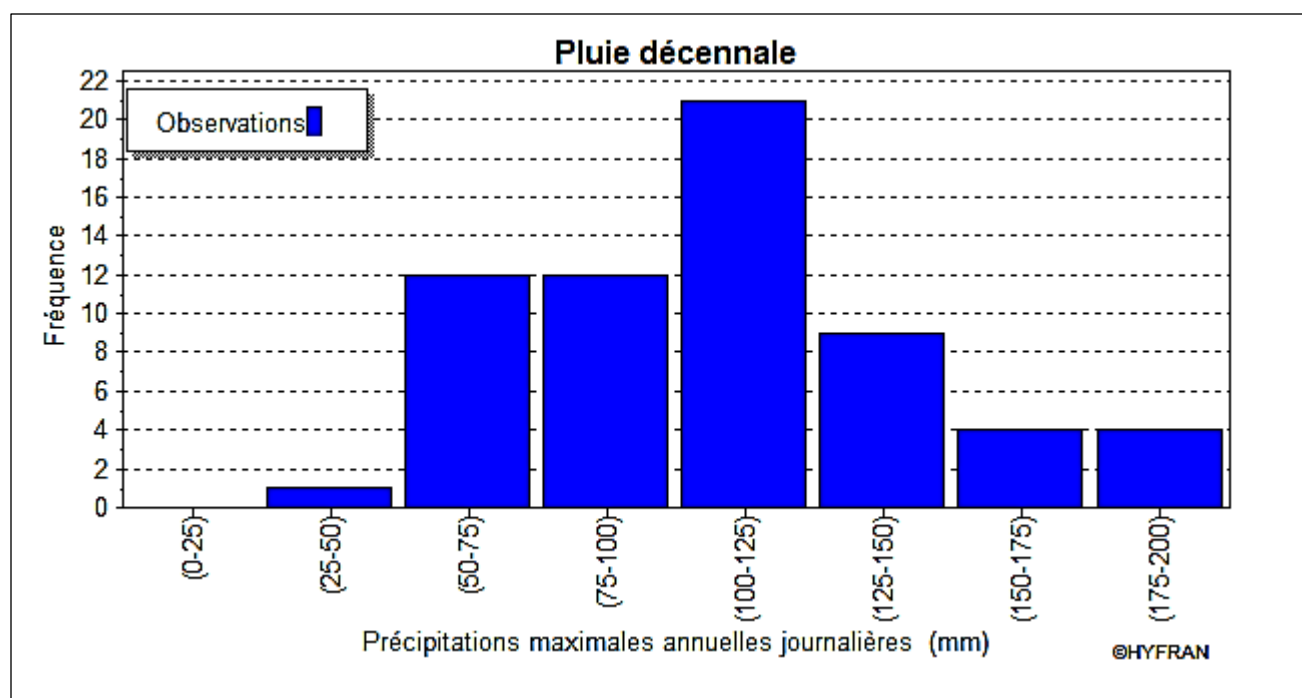
1 Données pluviométriques et histogrammen de pluie

Années	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
PMJA	93	191,5	180,1	108,2	104,7	161,7	101,6	119,2	71,8	41,5	110,8	129,4	67,7	173	193,8

1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
94,1	111	89	146,3	74,8	61,9	148,6	111,7	51,9	75,2	102,6	139,4	106,4	101	83,7	114,3

1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
132,2	124,7	116,4	85,3	132,2	145,8	82,7	100,2	73,8	54,8	74,2	194,2	102,2	117,5	126,8	105,1

2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
106,6	86,7	134,9	67,3	119,6	96,1	60,1	97,1	104,6	93,6	158,2	92,6	72,8	69	110,4	168,2



2. Comparaison entre les lois

Critères	AIC	BIC	Khi ²
Lois			
Loi de Gumbel	628,559	632,846	6.05
Loi de Pearson Type III	629,680	636,109	7,32
Loi GEV	629,716	636,145	4,78
Loi de Weibull	632,437	636,724	10,81
Loi Normale	632,844	637,130	8,27

3. Variables centrées réduites

Années	PM	Rang	F(x)	VAR (μ)
1970	41.5	1	0.007936508	-1.576146224
1984	51.9	2	0.023809524	-1.318462321
2001	54.8	3	0.03968254	-1.171504568
2014	60.1	4	0.055555556	-1.06138513
1981	61.9	5	0.071428571	-0.970421781
2011	67.3	6	0.087301587	-0.891336605
1973	67.7	7	0.103174603	-0.820366685
2021	69	8	0.119047619	-0.75529145
1969	71.8	9	0.134920635	-0.694680286
2020	72.8	10	0.150793651	-0.637551448
2000	73.8	11	0.166666667	-0.583198081

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

2002	74.2	12	0.182539683	-0.531091491
1980	74.8	13	0.198412698	-0.480823682
1985	75.2	14	0.214285714	-0.432071362
1998	82.7	15	0.23015873	-0.384572419
1990	83.7	16	0.246031746	-0.338109968
1995	85.3	17	0.261904762	-0.292501201
2009	86.7	18	0.277777778	-0.247589379
1978	89	19	0.293650794	-0.203237938
2019	92.6	20	0.30952381	-0.159326059
1961	93	21	0.325396825	-0.115745263
2017	93.6	22	0.341269841	-0.072396744
1976	94.1	23	0.357142857	-0.029189236
2013	96.1	24	0.373015873	0.013962721
2015	97.1	25	0.388888889	0.05714024
1999	100.2	26	0.404761905	0.100421318
1989	101	27	0.420634921	0.143881925
1967	101.6	28	0.436507937	0.187596981
2004	102.2	29	0.452380952	0.231641256
1986	102.6	30	0.468253968	0.276090234
2016	104.6	31	0.484126984	0.321020965
1965	104.7	32	0.5	0.366512921

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

2007	105.1	33	0.515873016	0.412648894
1988	106.4	34	0.531746032	0.459515958
2008	106.6	35	0.547619048	0.50720651
1964	108.2	36	0.563492063	0.555819451
2022	110.4	37	0.579365079	0.60546151
1971	110.8	38	0.595238095	0.65624879
1977	111	39	0.611111111	0.708308566
1983	111.7	40	0.626984127	0.761781428
1991	114.3	41	0.642857143	0.816823857
1994	116.4	42	0.658730159	0.873611345
2005	117.5	43	0.674603175	0.932342245
1968	119.2	44	0.69047619	0.993242545
2012	119.6	45	0.706349206	1.05657189
1993	124.7	46	0.722222222	1.122631247
2006	126.8	47	0.738095238	1.191772815
1972	129.4	48	0.753968254	1.264413014
1992	132.2	49	0.76984127	1.341049795
1996	132.2	50	0.785714286	1.422286137
2010	134.9	51	0.801587302	1.508862572
1987	139.4	52	0.817460317	1.601703308
1997	145.8	53	0.833333333	1.701983355

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

1979	146.3	54	0.849206349	1.811229348
1982	148.6	55	0.865079365	1.931476642
2018	158.2	56	0.880952381	2.06552518
1966	161.7	57	0.896825397	2.217379537
2023	168.2	58	0.912698413	2.39305942
1974	173	59	0.928571429	2.602232166
1963	180.1	60	0.944444444	2.861928676
1962	191.5	61	0.96031746	3.206666628
1975	193.8	62	0.976190476	3.725645038
2003	194.2	63	0.992063492	4.832300468

4. Fonction densité de probabilité $f(x)$ et fonction de répartition $F(x)$

Années	PM	$F_m(x)$	$F_{mv}(x)$	$F_g(x)$	$f_m(x)$	$f_{mv}(x)$	$f_g(x)$
1970	41.5	0.001892073	0.00485265	0.00517959	0.004862272	0.005145185	0.00484687
1984	51.9	0.013262716	0.022881353	0.023227624	0.006563659	0.006719313	0.006542947
2001	54.8	0.020302978	0.032323837	0.032508567	0.007099118	0.007201235	0.007076908
2014	60.1	0.039787606	0.056127694	0.055711264	0.008133111	0.008115046	0.008108349
1981	61.9	0.048644721	0.066293422	0.065572055	0.008496794	0.00843134	0.008471264
2011	67.3	0.082715584	0.103331412	0.101383839	0.009605441	0.009379239	0.009578133
1973	67.7	0.085695742	0.10646037	0.10440437	0.00968766	0.009448549	0.009660261
2021	69	0.0958134	0.116984765	0.114561157	0.009953974	0.009672088	0.009926329

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

1969	71.8	0.119803629	0.141433732	0.138146499	0.010519123	0.010141455	0.010491227
2020	72.8	0.129074406	0.150726105	0.147109714	0.010716624	0.010303806	0.010688745
2000	73.8	0.138698972	0.160296808	0.156342037	0.010911017	0.010462705	0.010883217
2002	74.2	0.142645182	0.164200425	0.160107971	0.01098778	0.010525199	0.01096003
1980	74.8	0.148665173	0.17013413	0.165832888	0.011101746	0.010617708	0.011074092
1985	75.2	0.15274434	0.174140942	0.169699108	0.011176883	0.010678516	0.011149308
1998	82.7	0.237643266	0.255660793	0.248477456	0.012407911	0.011649013	0.012384244
1990	83.7	0.249946517	0.267260567	0.259711832	0.012537925	0.011747502	0.012515179
1995	85.3	0.269979782	0.286070159	0.277944952	0.012724175	0.011886166	0.012703122
2009	86.7	0.287805367	0.302737625	0.294119186	0.012863064	0.011986861	0.012843719
1978	89	0.31754451	0.330429042	0.321030229	0.013036825	0.012106404	0.01302076
2019	92.6	0.364737941	0.374164825	0.363640937	0.01315427	0.012165642	0.013144529
1961	93	0.369999791	0.379030401	0.368389972	0.01315453	0.012161781	0.013145578
2017	93.6	0.377891424	0.386324907	0.375513122	0.013149832	0.012151872	0.013142098
1976	94.1	0.384464467	0.392398374	0.38144703	0.013141175	0.012139784	0.013134483
2013	96.1	0.410685246	0.416612344	0.405133417	0.013062051	0.012055662	0.013059776
2015	97.1	0.423726074	0.428650737	0.416927116	0.012994956	0.011991569	0.012995027
1999	100.2	0.46367564	0.465537824	0.45314046	0.012665589	0.011696348	0.012673419
1989	101	0.473835385	0.474925542	0.46237564	0.012550209	0.011596077	0.012560136
1967	101.6	0.481407412	0.481925088	0.469266604	0.012455427	0.011514347	0.012466945
2004	102.2	0.488935875	0.48888723	0.476125167	0.012353578	0.011427026	0.0123667

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

1986	102.6	0.493929539	0.493507001	0.480678667	0.012281762	0.011365712	0.012295959
2016	104.6	0.518570727	0.516327396	0.503201072	0.011876108	0.011022254	0.011895711
1965	104.7	0.519787672	0.517455593	0.504315824	0.011853811	0.011003483	0.011873684
2007	105.1	0.524640336	0.521955591	0.508763424	0.011762733	0.010926899	0.011783687
1988	106.4	0.540239196	0.536434996	0.523087696	0.011446162	0.010661624	0.011470604
2008	106.6	0.542614909	0.538642248	0.525273126	0.011394717	0.010618624	0.01141969
1964	108.2	0.56137872	0.556096395	0.542572082	0.010957782	0.010254255	0.010986933
2022	110.4	0.58644274	0.579475857	0.56579323	0.010287814	0.009697186	0.010322392
1971	110.8	0.590904317	0.58364624	0.569941502	0.01015808	0.009589394	0.010193593
1977	111	0.59312382	0.585721927	0.572006887	0.01009236	0.009534788	0.010128332
1983	111.7	0.600832264	0.592936432	0.579189261	0.00985802	0.009340053	0.009895561
1991	114.3	0.628630826	0.619030784	0.605216097	0.00893527	0.008571958	0.008977996
1994	116.4	0.650100039	0.639275682	0.625463064	0.008142577	0.007908857	0.008188599
2005	117.5	0.660988127	0.649576892	0.635784306	0.007715872	0.007550041	0.00776325
1968	119.2	0.677326925	0.665081716	0.651344221	0.007047601	0.006984694	0.007096523
2012	119.6	0.681084914	0.668656241	0.654935789	0.006889607	0.006850333	0.006938791
1993	124.7	0.726118369	0.711762364	0.698382013	0.004911098	0.005136957	0.004960067
2006	126.8	0.743126014	0.728187499	0.715005659	0.00414923	0.004456569	0.00419623
1972	129.4	0.762973793	0.747471032	0.734574309	0.003279606	0.003659292	0.003322838
1992	132.2	0.78289481	0.766963875	0.754415705	0.002456129	0.002876294	0.002494003
1996	132.2	0.78289481	0.766963875	0.754415705	0.002456129	0.002876294	0.002494003

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

2010	134.9	0.800730235	0.784546279	0.772367761	0.001787828	0.002211638	0.001819727
1987	139.4	0.827620795	0.811318989	0.79981187	0.000957266	0.001324714	0.000978844
1997	145.8	0.860279095	0.844336342	0.83385749	0.000309127	0.000530146	0.000318694
1979	146.3	0.862576412	0.846682767	0.836286226	0.000279154	0.000488404	0.000288005
1982	148.6	0.872703156	0.857067777	0.847051427	0.00016972	0.000327766	0.000175728
2018	158.2	0.907921671	0.893795165	0.885353108	1.18162E-05	3.99199E-05	1.24698E-05
1966	161.7	0.918297775	0.90483263	0.896943511	3.36838E-06	1.50229E-05	3.58675E-06
2023	168.2	0.934674783	0.92250757	0.915595527	1.97293E-07	1.6926E-06	2.1441E-07
1974	173	0.944686865	0.933495518	0.927255896	1.4652E-08	2.35025E-07	1.62257E-08
1963	180.1	0.956816785	0.947038334	0.94170883	1.17554E-10	6.34911E-09	1.34856E-10
1962	191.5	0.971062131	0.96336513	0.959280939	1.97667E-15	2.048E-12	2.46135E-15
1975	193.8	0.973316091	0.966002466	0.962138153	1.15844E-16	2.65857E-13	1.47381E-16
2003	194.2	0.973690013	0.966441701	0.962614594	6.89861E-17	1.83307E-13	8.81126E-17

5. Données observées et calculées

Années	PM	Rang	Fréquence de Hazen	VAR	DCM	DCMV
1970	41.5	1	0.007936508	-1.576146224	48.76105893	44.42898113
1984	51.9	2	0.023809524	-1.318462321	55.96732433	52.22000243
2001	54.8	3	0.03968254	-1.171504568	60.07707489	56.66324068
2014	60.1	4	0.055555556	-1.06138513	63.15662268	59.99267988
1981	61.9	5	0.071428571	-0.970421781	65.70046039	62.74293853

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

2011	67.3	6	0.087301587	-0.891336605	67.91211878	65.13406301
1973	67.7	7	0.103174603	-0.820366685	69.89682977	67.27982434
2021	69	8	0.119047619	-0.75529145	71.71669283	69.24736107
1969	71.8	9	0.134920635	-0.694680286	73.41171578	71.07992748
2020	72.8	10	0.150793651	-0.637551448	75.00935368	72.80720648
2000	73.8	11	0.166666667	-0.583198081	76.52937408	74.45056967
2002	74.2	12	0.182539683	-0.531091491	77.98656215	76.02600198
1980	74.8	13	0.198412698	-0.480823682	79.39232778	77.54583914
1985	75.2	14	0.214285714	-0.432071362	80.75571195	79.01985577
1998	82.7	15	0.23015873	-0.384572419	82.08404478	80.45597682
1990	83.7	16	0.246031746	-0.338109968	83.38339158	81.86075974
1995	85.3	17	0.261904762	-0.292501201	84.65886465	83.23973169
2009	86.7	18	0.277777778	-0.247589379	85.91484729	84.59763165
1978	89	19	0.293650794	-0.203237938	87.15515857	85.93858859
2019	92.6	20	0.30952381	-0.159326059	88.38317726	87.26625546
1961	93	21	0.325396825	-0.115745263	89.60193706	88.58391211
2017	93.6	22	0.341269841	-0.072396744	90.81420113	89.89454594
1976	94.1	23	0.357142857	-0.029189236	92.02252172	91.20091629
2013	96.1	24	0.373015873	0.013962721	93.22928882	92.50560709
2015	97.1	25	0.388888889	0.05714024	94.43677075	93.81107073
1999	100.2	26	0.404761905	0.100421318	95.64714877	95.11966546

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

1989	101	27	0.420634921	0.143881925	96.86254744	96.43368824
1967	101.6	28	0.436507937	0.187596981	98.08506188	97.75540421
2004	102.2	29	0.452380952	0.231641256	99.3167831	99.08707404
1986	102.6	30	0.468253968	0.276090234	100.5598221	100.43098
2016	104.6	31	0.484126984	0.321020965	101.8163335	101.7894517
1965	104.7	32	0.5	0.366512921	103.0885399	103.1648919
2007	105.1	33	0.515873016	0.412648894	104.3787566	104.5598038
1988	106.4	34	0.531746032	0.459515958	105.6894185	105.9768201
2008	106.6	35	0.547619048	0.50720651	107.0231098	107.4187344
1964	108.2	36	0.563492063	0.555819451	108.3825962	108.8885369
2022	110.4	37	0.579365079	0.60546151	109.7708624	110.3894547
1971	110.8	38	0.595238095	0.65624879	111.1911553	111.9249979
1977	111	39	0.611111111	0.708308566	112.6470342	113.4990148
1983	111.7	40	0.626984127	0.761781428	114.1424308	115.1157561
1991	114.3	41	0.642857143	0.816823857	115.6817212	116.779953
1994	116.4	42	0.658730159	0.873611345	117.269813	118.4969113
2005	117.5	43	0.674603175	0.932342245	118.9122534	120.2726283
1968	119.2	44	0.69047619	0.993242545	120.6153622	122.1139367
2012	119.6	45	0.706349206	1.05657189	122.3864005	124.0286868
1993	124.7	46	0.722222222	1.122631247	124.2337851	126.0259782
2006	126.8	47	0.738095238	1.191772815	126.1673653	128.1164597

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

1972	129.4	48	0.753968254	1.264413014	128.1987865	130.3127216
1992	132.2	49	0.76984127	1.341049795	130.3419742	132.6298194
1996	132.2	50	0.785714286	1.422286137	132.6137911	135.0859839
2010	134.9	51	0.801587302	1.508862572	135.0349465	137.7036051
1987	139.4	52	0.817460317	1.601703308	137.6312863	140.5106262
1997	145.8	53	0.833333333	1.701983355	140.4356704	143.5425734
1979	146.3	54	0.849206349	1.811229348	143.4907918	146.8456041
1982	148.6	55	0.865079365	1.931476642	146.8535704	150.481257
2018	158.2	56	0.880952381	2.06552518	150.602308	154.5341877
1966	161.7	57	0.896825397	2.217379537	154.8489946	159.1254738
2023	168.2	58	0.912698413	2.39305942	159.7619746	164.4371199
1974	173	59	0.928571429	2.602232166	165.6116001	170.7614161
1963	180.1	60	0.944444444	2.861928676	172.8741491	178.6132881
1962	191.5	61	0.96031746	3.206666628	182.5149265	189.0363711
1975	193.8	62	0.976190476	3.725645038	197.0284297	204.7275796
2003	194.2	63	0.992063492	4.832300468	227.9766287	238.1870852

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAC dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

5. Tableau récapitulatif des différents éléments caractéristiques de la dynamique du bassin AAC

PARAMETRES	DETERMINATION	UNITES	RESULTATS	
SURFACE (S)	Extraction sur Global Mapper	Km ²	6,919	
PLUIE JOURNALIERE MAXIMALE DECENNAL (P10)	Analyse fréquentielle des données pluviométriques	mm	Max	177,58
			Moy	157,27
			Min	150,41
PLUIE ANNUELLE MOYENNE	Analyse fréquentielle des données pluviométriques	mm	1300	
COEFFICIENT D'ABATTEMENT (α)	Fig. 8		0,87	
COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (KR)	Déterminé à partir de la courbe R4P4. (Fig. 9)	%	0,31	
LE VOLUME RUISSELLE DE PLUIE DECENNAL (Vr)	$Vr = S * P10 * \alpha * Kr$	m ³	Max	331373,92
			Moy	293474,36
			Min	280673,23
TEMPS DE BASE Tb	Il sera fonction de la surface tributaire et de l'indice R4 (fig 10)	h	5	
LE DÉBIT MOYEN DE LA CRUE DECENNAL	$Q_{moy} = \frac{Vr}{Tb}$	m ³ /s	Max	18,40
			Moy	16,24
			Min	15,6
DÉBIT MAXIMAL DE LA CRUE DECENNAL	$Q_{max} = k * Q_{moy}$	m ³ /s	Max	46,02
			Moy	40,76
			Min	38,98

Optimisation de la gestion des eaux pluviales par des méthodes empiriques : Application au bassin de rétention AAc dans le cadre du PAPC à Cotonou

2024

DÉBIT DECENNAL ORSTOM(Q10)	$Q_{10} = Q_{max} * 1,05$	m ³ /s	Max	48,32
			Moy	42,80
			Min	40,93
DÉBIT DECENNAL (Q10) TROUVEE DANS LE RAPPORT APD PAR LA METHODE RATIONNELLE	Méthode rationnelle	m ³ /s	18,6	