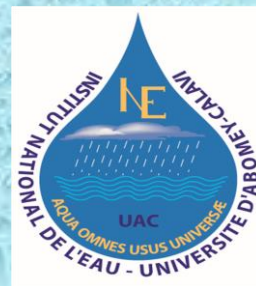




UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU
=====



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

Mémoire de fin de formation présenté par

ASSOGBA Nonvignon Oliver Amos

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle En Hydrologie

OPTION : Hydrologie Quantitative

=====

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE
COTONOU (PAPC) : TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE
COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS BASSIN
VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

=====

Maître de Mémoire :

Dr. Audace Amen V. DOSSOU-OLORY

Maître de Stage :

Ing. Sylvain BOKOVE



ANNEE ACADEMIQUE : 2022-2023

DÉDICACES

Je voudrais avant toutes choses, dédicacer ce travail à :

- ❖ Dieu tout puissant pour ses bienfaits ;
- ❖ Mes parents pour leurs soutiens indéfectibles ;
- ❖ Mes sœurs.

Que ce travail soit pour moi le meilleur moyen de leur exprimer ma profonde et sincère 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 qui m'a permis de faire cette formation ;
- ❖ Ma mère Rachidath SOUNOUVOU, pour avoir eu l'idée ingénieuse d'instruire tous ses enfants, pour son sens de responsabilité et son investissement dans mon éducation et ses sacrifices ;
- ❖ Mon directeur des travaux de mémoire pour sa disponibilité ;
- ❖ Mon encadreur Dr Audace Amen V DOSSOU-OLORY, Professeur à l'INE pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ❖ Mon maître de stage Sylvain BOKOVE, ingénieur à TECKNICART Ingénieurs-Conseils, pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ❖ Mes sœurs Danielle et Amaëlle pour l'amour fraternel qu'elles ont toujours manifesté à mon égard ;
- ❖ Mes professeurs et toutes les autorités de l'INE;
- ❖ Tous mes amis;
- ❖ Tous ceux qui ont œuvré à la réalisation de ce travail.

RESUME

L'objet de notre travail est de procéder à une étude hydrologique du sous bassin versant X3 logé dans le bassin XX d'Agla dans la ville de Cotonou. Cette étude a permis de retenir une précipitation annuelle maximale de 155,95 mm pour une période de retour de 10 ans. Il est à noter que cette détermination s'est faite suivant trois méthodes (la méthode d'ajustement statique d'une série de données-Distribution de Gumbel, la méthode des moments et la méthode de maximum de vraisemblance) toutes suivant une distribution de Gumbel et qui ont concouru toutes à des résultats presque similaires. Grâce à ce résultat, l'on a pu déterminer le débit décennal pour cette zone. Quant à son estimation, les deux méthodes que sont la méthode de l'ORSTOM et celle de CIEH présentent des résultats différents. Mais suite à la visite de terrain et après avoir consulté les mesures hydrologiques qui existent sur la ville de Cotonou, le débit décennal estimé par la méthode ORSTOM paraît plus raisonnable. Le débit ainsi déterminé, une étude hydraulique a été faite dans le but de calculer avec un maximum de précision les dimensions des ouvrages hydrauliques.

Mots clés : PAPC, Distribution de Gumbel, Sous bassin versant X3, Comportement hydrologique

ABSTRACT

The purpose of our work is to conduct a hydrological study of the Sub-Watershed X3 within the basin XX in Agla, Cotonou. This study has resulted in determining a maximum annual precipitation of 155.95 mm for a 10-year return period. It is worth noting that this determination was made using three methods (the static adjustment method of data series- Gumbel distribution, the method of moments, and the maximum likelihood method), all of which yielded nearly similar results. With this outcome, we were able to determine the ten-year flow for this area. As for its estimation, the two methods, ORSTOM and CIEH, produced different results. However, following a field visit and consulting the existing hydrological measurements in the city of Cotonou, the ten-year flow estimated by the O.R.S.T.O.M method appears to be more reasonable. Once the flow was determined, a hydraulic study was conducted with the aim of calculating the dimensions of hydraulic structures with the highest precision.

Key words : PAPC, Gumbel Distribution, X3 Sub-Watershed, Hydrological Behavior

SIGLES ET ACRONYMES

ANaMB	:	Agence Nationale de la Météorologie du BENIN
BV	:	Bassin Versant
CIEH	:	Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
FCC	:	Fréquence Cumulée Croissante
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
OH	:	Ouvrage Hydraulique
ORSTOM	:	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
Pan	:	Pluviométrie Moyenne Annuelle
P₁₀	:	Pluviométrie maximale décennale
PG	:	Plan de Gestion
PGE	:	Plan de Gestion des Eaux
SIG	:	Système d'Information Géographique
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission
UGP	:	Unité Géographique de Planification
UTM	:	Universal Transverse Mercator
INE	:	Institut National de l'Eau
IRD	:	Institut de Recherche pour le Développement

LISTES DES FIGURES

FIGURE 1 : ORGANISATION DU BUREAU D'ETUDE TECKNICART INGENIEURS-CONSEILS	7
FIGURE 2 : REALISATION DES CAGES A GABIONS	11
FIGURE 3 : ZONE DE L'ETUDE	17
FIGURE 4 : BASSIN X3	18
FIGURE 5 : VARIATION DE LA PLUIE MAXIMALE PAR ANNEE SUR UNE PERIODE ALLANT DE 1961 A 2020	39
FIGURE 6 : VARIATION DE LA VARIABLE REDUITE EN FONCTION DES PLUIES MAXIMALES ANNUELLES SUR LA PERIODE ALLANT DE 1961 A 2020	44
FIGURE 7 : VARIATION DE LA FONCTION DE REPARTITION EN FONCTION DES PLUIES MAXIMALES ANNUELLES SUR LA PERIODE ALLANT DE 1961 A 2020	44
FIGURE 8 : CALAGE DU MODELE FIGURE 9: VALIDATION DU MODELE	45
FIGURE 10 : VARIATION DE LA FONCTION DE REPARTITION EN FONCTION DES DONNEES DE PLUIES SUR LA PERIODE ALLANT DE 1961 A 2020	46
FIGURE 11 : CALAGE DU MODELE FIGURE 12: VALIDATION DU MODELE	47
FIGURE 13 : VARIATION DE LA FONCTION DE REPARTITION EN FONCTION DES DONNEES MAXIMALES ANNUELLES DE PLUIES SUR LA PERIODE ALLANT DE 1961 A 2020	48
FIGURE 14 : VARIATION DES RESIDUS EN FONCTION DES VALEURS PREDITES (METHODE DES MOMENTS)	50
FIGURE 15 : VARIATION DES RESIDUS EN FONCTION DES VALEURS PREDITES (METHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE)	50
FIGURE 16 : VARIATION DU COEFFICIENT D'ABATTEMENT AVEC LA SURFACE POUR DIFFERENTES PLUVIOSITES	51
FIGURE 17 : COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT. REGIMES TROPICAUX ET TROPICAUX DE TRANSITION (P VARIE DE 800 A 1600 MM). PERMEABILITE P4 ET P5 (D'APRES ORSTOM)	52
FIGURE 18 : REGIMES TROPICAUX ET TRANSITION. TEMPS DE BASE EN FONCTION DE LA SUPERFICIE DU BASSIN	53

LISTES DES IMAGES

IMAGE 1 : ETAPE DE L'ASSISE	9
IMAGE 2 : TALUS	12
IMAGE 3 : VUE SATELLITAIRE DU BASSIN XX	16
IMAGE 4 : RABANAPE	57
IMAGE 5 : MATELAS RENO	58
IMAGE 6 : CAGE	59
IMAGE 7 : TAS DE GABIONS	59
IMAGE 8 : BOTTE DE LIGATURE	60

LISTES DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : RECAPITULATIF DES INDICATEURS	40
TABLEAU 2 : TABLEAU DES EFFECTIFS, DES FREQUENCES ET DES FREQUENCES CUMULEES CROISSANTES	40
TABLEAU 3 : RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	42
TABLEAU 4 : TEST DE FIABILITE	49
TABLEAU 5 : RECAPITULATIF DES DEBITS DETERMINES	55

TABLE DES MATIERES

DÉDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
SIGLES ET ACRONYMES	v
LISTES DES FIGURES	vi
LISTES DES IMAGES	vii
LISTES DES TABLEAUX	viii
TABLE DES MATIERES	ix
INTRODUCTION	1
1. Contexte et justification	2
2. Objectif général et Objectifs spécifiques.....	3
3. Justification de l'étude hydrologique et de son importance	4
4. Structure du document.....	4
CHAPITRE I : CONTEXTE DE STAGE ET ACTIVITES MENEES	5
1.1. Introduction.....	6
1.2. Présentation de la structure d'accueil	6
1.3. Présentation des activités menées	8
1.4. Conclusion.....	12
CHAPITRE II : DONNEES, MATERIELS ET METHODES.	14
2.1. Introduction	15
2.2. Milieu d'étude	15
2.2.1. Généralité sur les bassins versants	15
2.3. Traitement des données	19
2.3.1. Obtention des pluies maximales annuelles.....	19
2.4 Outils	20
2.5. Méthodologie d'analyse et de calcul	21
2.5.1 Les indicateurs, les effectifs, les fréquences et les fréquences cumulées croissantes.	21
2.5.2 Paramètres physiques caractérisant le sous bassin versant	25
2.5.3 Choix de la période de retour	27
2.5.4 Test de vérification sur la fiabilité des modèles	32
2.5.5 Estimation du débit décennal.....	34
2.6. Conclusion	37

CHAPITRE III : RESULTATS.....	38
3.1. Introduction	39
3.2. Analyse des tendances et variations hydrologiques	39
3.3. Récapitulatif des indicateurs calculés.....	40
3.4. Récapitulatif des effectifs, des fréquences et des fréquences cumulées croissantes	40
3.5. Paramètres physiques caractérisant le sous bassin versant.....	42
3.6. Estimation des paramètres.....	43
3.6.1. Par la méthode d'ajustement statique d'une série de données	43
3.6.2. Par la méthode des moments	45
3.6.3. Par la méthode de vraisemblance	46
Résultat du test de fiabilité et interprétations	49
3.7. Estimation des débits décennal.....	50
3.7.1. Estimation du débit décennal par la méthode de l'ORSTOM	50
3.7.2. Estimation par la méthode du CIEH relative aux bassins du BENIN et du TOGO.....	54
3.8. Conclusion.....	56
CONCLUSION	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	63
ANNEXES	64
Annexe 1: Pluies maximales annuelles	65
Annexe 2 : Variation de la variable réduite en fonction des pluies maximales annuelles ...	66
Annexe 3: Fonction de répartition par la méthode d'ajustement statique.....	67
Annexe 4 : Fonction densité de probabilité par la méthode des moments	69
Annexe 5 : Fonction de répartition par la méthode des moments	70
Annexe 6 : Fonction densité de probabilité par la méthode du maximum vraisemblance ...	72
Annexe 7: Fonction de répartition par la méthode de maximum de vraisemblance.....	73
Annexe 8: Carte de pluviosité interannuelle (isohyetes).....	75
Annexe 9 : Caractéristiques des bassins versants tributaires du projet	76

INTRODUCTION

1. Contexte et justification

Une catastrophe naturelle est un événement d'origine naturelle, subi et brutal, qui provoque des bouleversements importants pouvant engendrer de grands dégâts matériels et humains. Elle se manifeste sous la forme de séisme, éruption volcanique (en Martinique, l'explosion de la montagne Pelée a détruit la ville de Saint-Pierre et ses alentours, faisant 30 000 morts), tsunami, mouvements de terrain, inondation, tempête, cyclone tropical, orages, ou encore d'avalanche. La fréquence, la complexité et la gravité de leurs effets risquent d'augmenter à l'avenir en raison de facteurs tels que le changement climatique, les déplacements de population, les conflits, l'urbanisation rapide et non planifiée, les risques technologiques et les urgences de santé publique (CIFRC, 2023).

Les inondations au Bénin résultent généralement de fortes pluies qui font déborder les cours d'eau. Le changement climatique, la croissance démographique non maîtrisée et l'urbanisation inadaptée sont les principales causes. Ces inondations causent des dégâts importants au niveau des infrastructures sociocommunautaires, sur les réseaux d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement, et sur d'autres biens et services publics (ANPC, 2019).

Face à l'aggravation des changements climatiques, la ville de Cotonou risque de subir de fréquentes inondations si des mesures ne sont pas prises. C'est pourquoi le gouvernement béninois a lancé le programme d'assainissement pluvial de la ville. Son but est de réduire considérablement les risques d'inondation, d'améliorer la qualité de vie des habitants et de garantir la mobilité urbaine pendant la saison des pluies.

L'objectif de développement du Projet d'Assainissement Pluvial de la Ville de Cotonou (PAPC) est de réduire les risques d'inondation dans des zones cibles de la ville de Cotonou et de renforcer la planification, la gestion et la capacité de résilience urbaine à l'échelle de la ville. Le PAPC vise à accélérer la mise en œuvre du Plan Directeur d'Assainissement (PDA) de la ville de Cotonou. C'est à cet effet que le Gouvernement l'a inscrit dans son Programme d'action quinquennal, afin d'implémenter les actions prévues à court et moyen terme. Au-delà du redimensionnement des ouvrages d'assainissement, ce projet s'étend à des actions de sensibilisation de la population en combinaison de la réforme en profondeur du système de gestion des déchets ménagers, autre projet phare du Programme d'Action du Gouvernement (PAG Bénin Révélé 2016-2021). De façon spécifique le PAPC vise les objectifs suivants :

- ❖ Limiter les inondations et leurs conséquences en termes d'eaux stagnantes dans la ville, de dommages aux habitations riveraines et aux infrastructures de drainage ;
- ❖ Assurer une évacuation des eaux permettant une amélioration des conditions sanitaires ;
- ❖ Informer, éduquer et communiquer auprès de la population sur l'hygiène, la gestion des déchets, l'assainissement et les activités du projet ;
- ❖ Améliorer la qualité de vie des habitants de plusieurs quartiers défavorisés riverains par des aménagements urbains annexes.

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 Ménontin et d'Agla situés en bordure du lac Nokoué.

Le présent rapport dont le thème s'intitule : « **PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) : TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX** » 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 XX, lot AFD-01.

2. Objectif général et Objectifs spécifiques

Tout au long de ce stage, nous étions amenés à mieux cerner le contexte hydrologique de la zone d'étude afin d'y pouvoir effectuer une étude hydrologique. Spécifiquement, nous aurons à :

- Faire une présentation des activités menées durant le stage effectué sur le bassin XX dans le cadre du PAPC
- Localiser la zone d'étude et caractériser ses principales composantes géographiques pour mieux comprendre son contexte environnemental et ses interactions hydrologiques
- Analyser les caractéristiques hydrologiques et les schémas d'écoulement du sous bassin versant X3 en vue de mieux comprendre ses besoins en gestion des eaux pluviales

3. Justification de l'étude hydrologique et de son importance

L'étude hydrologique est une analyse détaillée des caractéristiques et du comportement d'un système hydrologique, qui comprend l'ensemble des éléments liés à l'eau, tels que l'écoulement des nappes, des rivières, des fontes glacières, des précipitations, etc. L'objectif principal de l'étude hydrologique est de comprendre et de quantifier le cycle de l'eau dans une région donnée. Parmi ses composantes nous avons :

- La collecte des données hydrologiques,
- L'analyse des données,
- La modélisation hydrologique,
- L'évaluation des risques hydrologiques,
- La planification de la gestion de l'eau,
- La protection de l'environnement.

L'importance des études hydrologiques sont multiples. Elles permettent de mieux gérer les ressources eaux, d'atténuer les risques liés à l'eau comme dans le cas de notre étude, de répondre aux besoins en eau des populations, de protéger l'environnement et de contribuer au développement économique. De plus, dans un contexte de changement climatique, la compréhension des régimes hydrologiques devient cruciale pour anticiper et s'adapter aux variations du cycle de l'eau.

4. 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.

CHAPITRE I : CONTEXTE DE STAGE ET ACTIVITES MENEES

1.1. Introduction

Ce chapitre sera destiné à présenter la structure d'accueil à travers son organigramme, présenter les différents projets réalisés par la structure et pour finir exposer les différentes activités menées tout au long du stage.

1.2. Présentation de la structure d'accueil

Créé en 1998 par un groupe d'ingénieurs, TECKNICART Ingénieurs-Conseils a commencé en offrant des conseils techniques pour les bâtiments. Aujourd'hui, l'entreprise travaille dans divers domaines du génie civil, notamment les infrastructures routières, les espaces publics, les ouvrages hydrauliques, etc. Ses services incluent :

- ❖ les études techniques complètes et détaillées avec élaboration des plans d'exécution, et des DQE ;
- ❖ la supervision, le contrôle et la surveillance des travaux ;
- ❖ les études architecturales, de faisabilité économique, sociales et environnementales ;
- ❖ les expertises immobilières ;
- ❖ la formation technique des cadres du BTP, etc.

Cette entreprise, grâce à une organisation solide et un personnel compétent, garantit une exécution efficace des missions pour atteindre les objectifs et satisfaire les clients. Avec une équipe jeune et dynamique, elle dispose également d'une liste de collaborateurs externes diversifiée pour répondre à tous les besoins. L'utilisation d'équipements de pointe assure la qualité et le respect des délais. De plus, elle entretient de bonnes relations avec d'autres cabinets et collabore avec des partenaires internationaux pour des projets spécifiques. Dans l'ensemble, cette entreprise combine compétences, ressources, et partenariats pour fournir des résultats exceptionnels à ses clients. Des travaux réalisés par TECKNICART Ingénieurs-Conseils, en voici une sélection restreinte catégorisée :

- ❖ Routes, Assainissement, VRD
 - ⊗ Le projet de réhabilitation et d'aménagement des voiries primaires, secondaires et tertiaires dans les villes de Cotonou, Porto-Novo, Abomey-Calavi, SemèPodji, Parakou, Abomey, Bohicon, Natitingou et Lokossa (ASPHALTAGE) ;

- ⊗ Le projet d'Urgence de Gestion Environnementale en Milieu Urbain (PUGEMU : financement de base, 1er & 2ième financement additionnel y compris les avenants) ;
- ⊗ Le pavage et l'assainissement de rues dans les villes d'Athiémé et Aplahoué (Azovè), de Pobè, de Ouidah, de Porto-Novo, d'Abomey-Calavi, de Kétou, de Cotonou et de ses périphéries.
- ❖ Bâtiments, Ouvrages d'Art et Divers
 - ⊗ Le projet de rénovation et extension de l'Ecole Française Montaigne à Cotonou ;
 - ⊗ Le projet de construction d'un hangar métallique à usage de magasin au port sec de Parakou ;
 - ⊗ Le projet de reconstruction et modernisation du marché Dantokpa phase iv, du marché central de Djougou, du marché central de Ségbana, etc.
- ❖ Aménagements hydro agricoles
 - ⊗ Le projet « fonds d'investissement-agriculture » / aménagement de 319 ha de bas-fonds repartis sur 11 sites dans six (06) communes de l'Atacora-Donga ;
 - ⊗ Le Projet d'Appui aux Infrastructures Agricoles dans la Vallée de l'Ouémé PAIA-VO (périmètres irrigués, bas-fonds) ;
 - ⊗ Le Projet d'Appui aux Filières Lait et Viande – PAFILAV (Retenues d'eau, Forages, abattoirs, etc.).

L'organisation du bureau d'étude TECKNICART Ingénieurs-Conseils se présente comme suit :

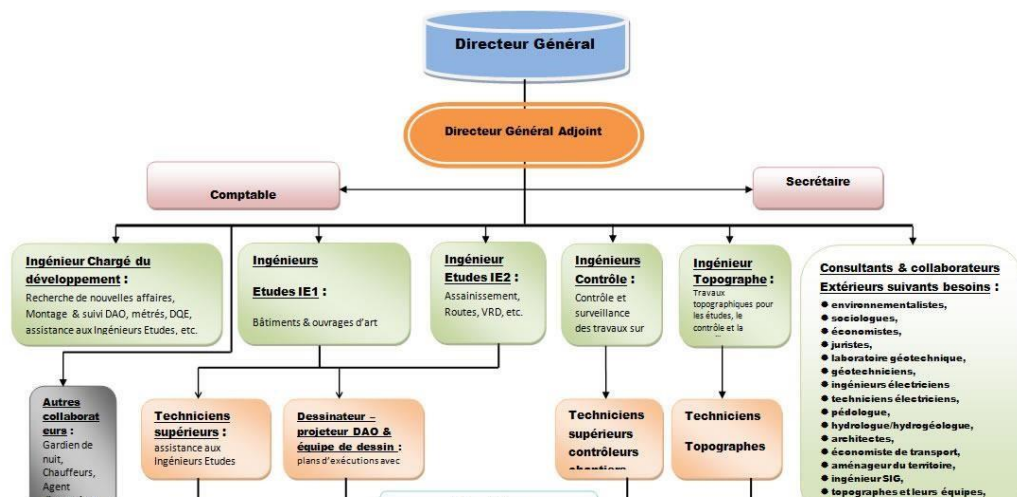


Figure 1: Organisation du bureau d'étude TECKNICART Ingénieurs-Conseils

1.3. Présentation des activités menées

En ce qui concerne les travaux d'assainissement du réseau de rues d'Agla, il a été prévu comme ouvrages d'assainissement des caniveaux rectangulaires en béton.

❖ Travaux suivis sur le bras X3

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. Cette piste encercle le bassin de rétention en construction et favorisera également une libre circulation des personnes et des biens. Pour assurer la pérennité de cette piste, il est envisagé 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. Les travaux de réalisation de la piste d'accès se sont déroulés comme suit :

- ⊗ le décapage/ le débroussaillage ;
- ⊗ la purge ;
- ⊗ le remblayage ;
- ⊗ l'assise ;
- ⊗ l'exécution du matelas Reno

❖ Le décapage et le débroussaillage

Ces deux étapes consistent à débarrasser la zone d'ouvrage d'une végétation gênante afin de faciliter l'accès aux ouvriers et aux engins.

❖ La purge

Cette étape consiste à retirer de la boue de la zone d'ouvrage sur une profondeur de 3 m.

❖ Le remblayage

Le but de cette étape est de mettre du sable lagunaire dans la partie purgée dans le but d'obtenir une certaine stabilité du sol.

❖ L'assise

Cette étape consiste à ajouter du sable marin toujours dans le but d'apporter de la stabilité à l'ouvrage et de pouvoir exécuter le matelas Reno. L'assise est valide après contrôle du topographe sans quoi l'exécution du matelas Reno ne peut se faire. Dans le cas du bassin de rétention X1 l'on a d'abord procédé à un pompage du fossé afin d'évacuer l'eau pouvant empêcher la réalisation de l'ouvrage. Le pompage a été fait grâce à un ensemble d'équipement appelé RABANAPE permettant d'évacuer l'eau persistante dans le sol.



Image 1: Etape de l'assise

❖ **L'exécution du matelas Reno**

- **Implantation**

L'implantation des berges est faite suivant les plans topographiques, établis par l'entreprise et approuvés par l'ingénieur. Ces plans indiquent l'alignement, les pentes et les côtes à respecter.

- **Terrassement**

Une fois l'implantation réceptionnée, les travaux de terrassement pour la réalisation de la berge du canal consisteront au :

- Désherbage et nettoyage des talus
- Substitution de ces terres par du sable lagunaire ;
- Le réglage des talus suivant le plan approuvé.

- **Protection des berges**

Avant toute opération de protection des berges, nous procéderons au traitement des fouilles par rabattement de la nappe phréatique.

- Le talutage des terres support du remblai sera assuré par une pelle hydraulique. Pour la zone à remblayer en fonction des profils en travers du canal, la reconstitution se fera en sable lagunaire par compactage hydraulique ce qui permettra la bonne tenue de l'ensemble du talus ainsi dressé. Ce talus constitue l'assise du remblai des berges en sable lagunaire. Le dressage et la vérification du talus se fera au moyen d'un gabarit.
- Recouvrir l'assise du remblai des berges du géotextile à base de fibres polymères se présentant sous forme de nappes perméables, souples, résistantes et filtrantes.
- Stabilisation du fond du canal avec un matelas (d'épaisseur $e=17\text{cm}$ est suffisante pour assurer la protection du parement ; Les matelas, prévus à cet effet, sont à maille hexagonale de type 60 x 80 mm en fils d'acier galvanisés classe C et revêtus de PVC, de diamètres $\varnothing 2,2/3,2$ mm avec des doubles diaphragmes tous les mètres et des fils de renfort en lisière) posé sur le géotextile de filtration pour éviter le fluage du terrain naturel.
- Stabilisation des berges avec un matelas (d'épaisseur $e=17\text{cm}$) est suffisante pour assurer la protection du parement ; les matelas, prévus à cet effet, sont à maille hexagonale de type 60 x 80 mm en fils d'acier galvanisés classe C et revêtus de PVC, de diamètres $\varnothing 2,2/3,2$ mm avec des doubles diaphragmes tous les mètres et des fils de renfort en lisière, posé en suivant la pente du talus.
- Agrafage sur le parement de la protection.

Pour une bonne stabilité des talus, il est nécessaire de maintenir l'arrosage du sable jusqu'à la pose des matelas.

Le stock de moellons, étant déjà disponible à proximité du canal sera contrôlé avant leur mise en cage. Le rapprochement du stock sera effectué à l'aide d'un chargeur et d'un camion. Progressivement et méthodiquement le remplissage des cages sera exécuté manuellement sur une rangée par une équipe spécialisée, qui prendra soin de limiter au mieux le pourcentage des vides.

Voici un résumé des étapes de la réalisation des cages à gabions

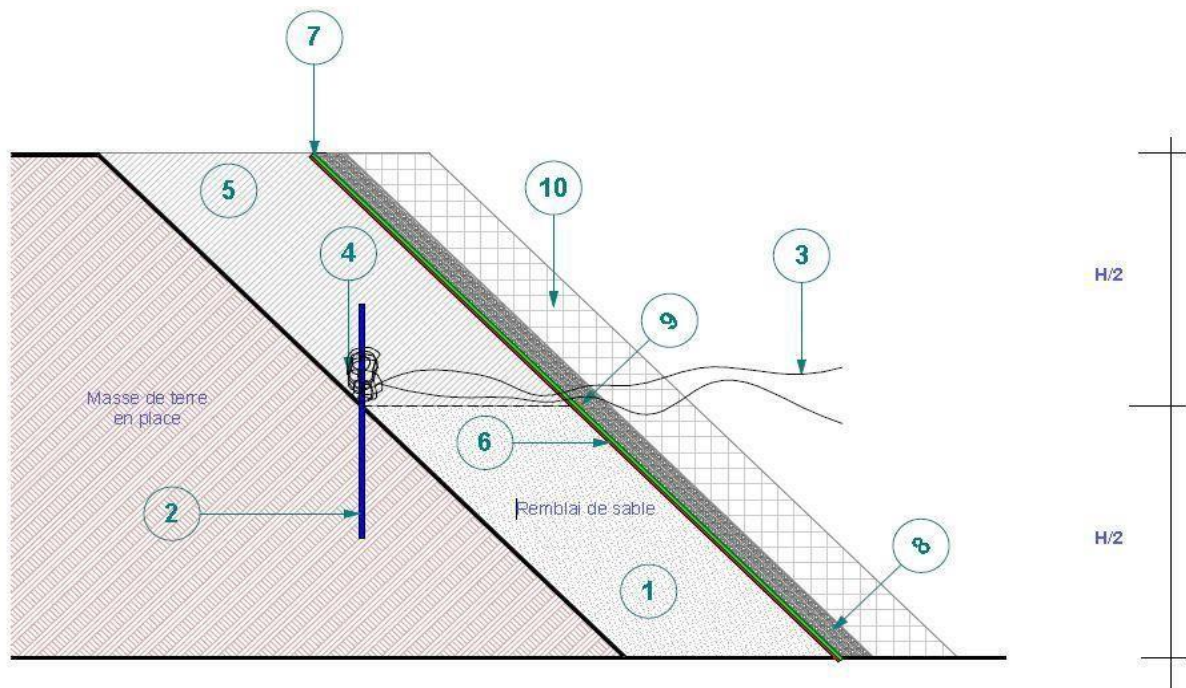


Figure 2 : Réalisation des cages à gabions

L'annotation de la figure ci-dessus se présente comme suit :

1. Remblai en sable lagunaire d'épaisseur sur mi-hauteur (H/2).
2. Mise en place des piquets en acier HA 14 de longueur 70 cm environ dont 40cm enfoncé dans la masse de terre en place et 30 cm dans le remblai complémentaire. Ces piquets seront implantés à intervalle régulier de 90 cm et seront au nombre de 03 par cage.
3. Fils d'attache galvanisé de 2ml.
4. Nœud d'attache des fils enroulés sur la partie supérieure des piquets (10cm au maximum)
5. Remblai complémentaire sur mi-hauteur.
6. Arrosage de stabilisation et réglage du talus de pose matelas RENO

7. Pose de géotextile après réglage.
8. Mise en place de la première couche de moellons.
9. Ancrage du fil d'attache sur la cage
10. Remplissage des cages de moellons et fermeture



Image 2 : Talus

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 impartie grâce au professionnalisme 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 toile de fond 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. Généralité sur les bassins versants

Le bassin versant est une surface élémentaire en théorie hydrologiquement close, c'est à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire. (Matieres, A.D.E.S. s. d.)

❖ Quelques caractéristiques essentielles des bassins versants

⊗ la surface du bassin versant

La superficie d'un bassin versant, mesurée en km^2 , est délimitée par la ligne de partage des eaux. On la mesure avec un planimètre ou la méthode des petits carrés. La position de l'exutoire est essentielle pour cette délimitation, et cette surface influe sur le débit, les précipitations et l'infiltration.

⊗ le périmètre

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km de la ligne de contour du bassin.

⊗ la pente topographique

C'est la pente qui influence l'écoulement superficiel des eaux : ruissellement de surface et écoulement hypodermique. Elle accélère le ruissellement sur les versants et détermine en partie le temps de réponse du cours d'eau aux impulsions pluviométriques (Eau, L.E.C.D.E.L.s. d.)

⊗ la pente hydrographique

La pente hydrographique peut être déterminée sur la carte ou mesurée sur le terrain par un nivellement de précision. Cette pente exprimée généralement en m/km conditionne :

- la vitesse de l'eau dans le chenal ;
- la vitesse de l'onde de crue ;

- le tirant d'eau de la rivière : pour un même débit et une même largeur une rivière plus pentue a une vitesse d'écoulement plus grande et donc, généralement, une profondeur plus faible.(Eau, s. d.)

2.2.2. Sous bassin versant X3 : Localisation et caractéristiques

Le Bassin Versant « XX » fait partie des 30 bassins identifiés à l'Ouest sur les 50 bassins versant de Cotonou. C'est un ensemble de bras qui couvre environ 524 hectares dont l'aval se situe au niveau du CEG le Nokoué, et l'amont dans les environs du CEG les Pylônes. C'est dans ce bassin que se situe le sous bassin X3 objet de notre étude. (*'Avant-Projet Détaillé (APD) et des Dossiers d'Appel d'Offres des ouvrages du Plan Directeur d'Assainissement pluvial de la Ville de Cotonou-LOT MO1906*, s. d.)

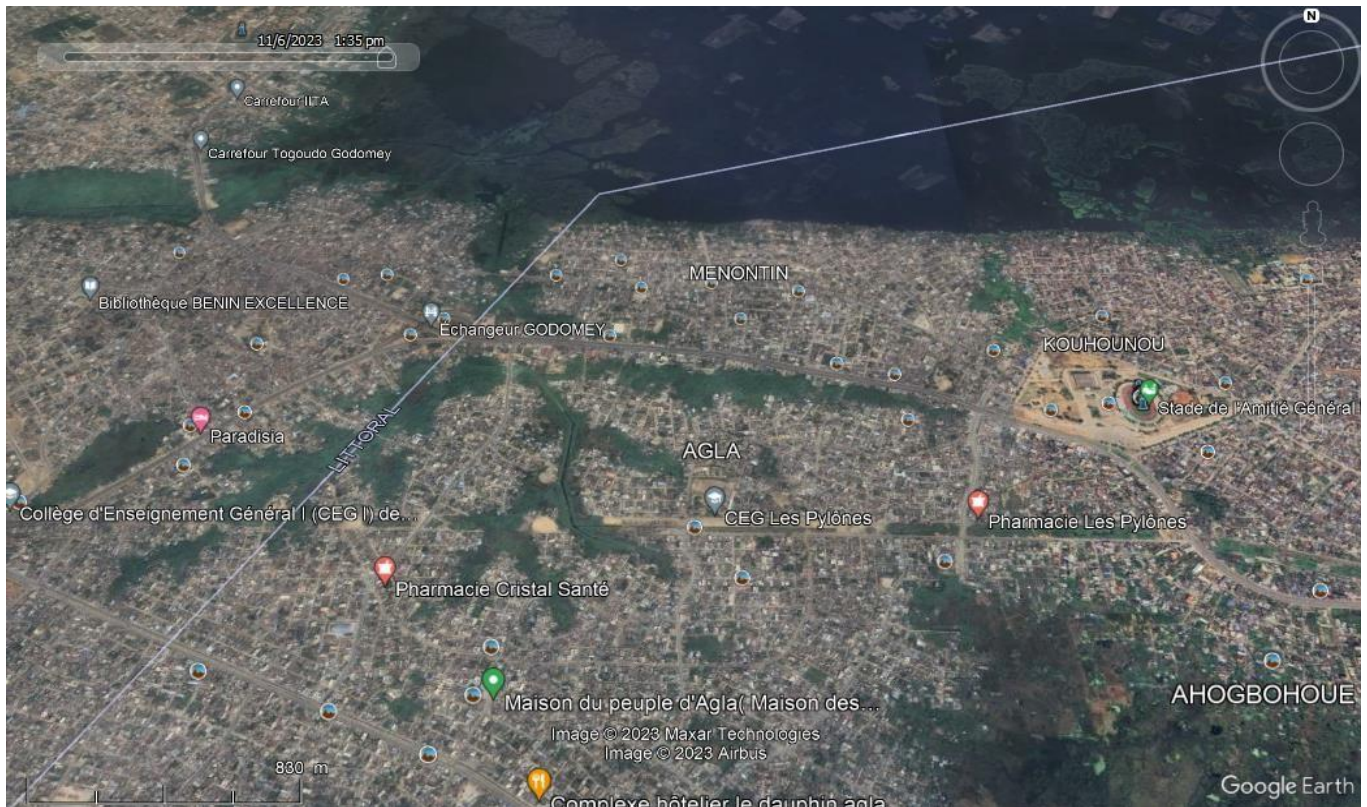


Image 3: Vue satellitaire du bassin XX

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

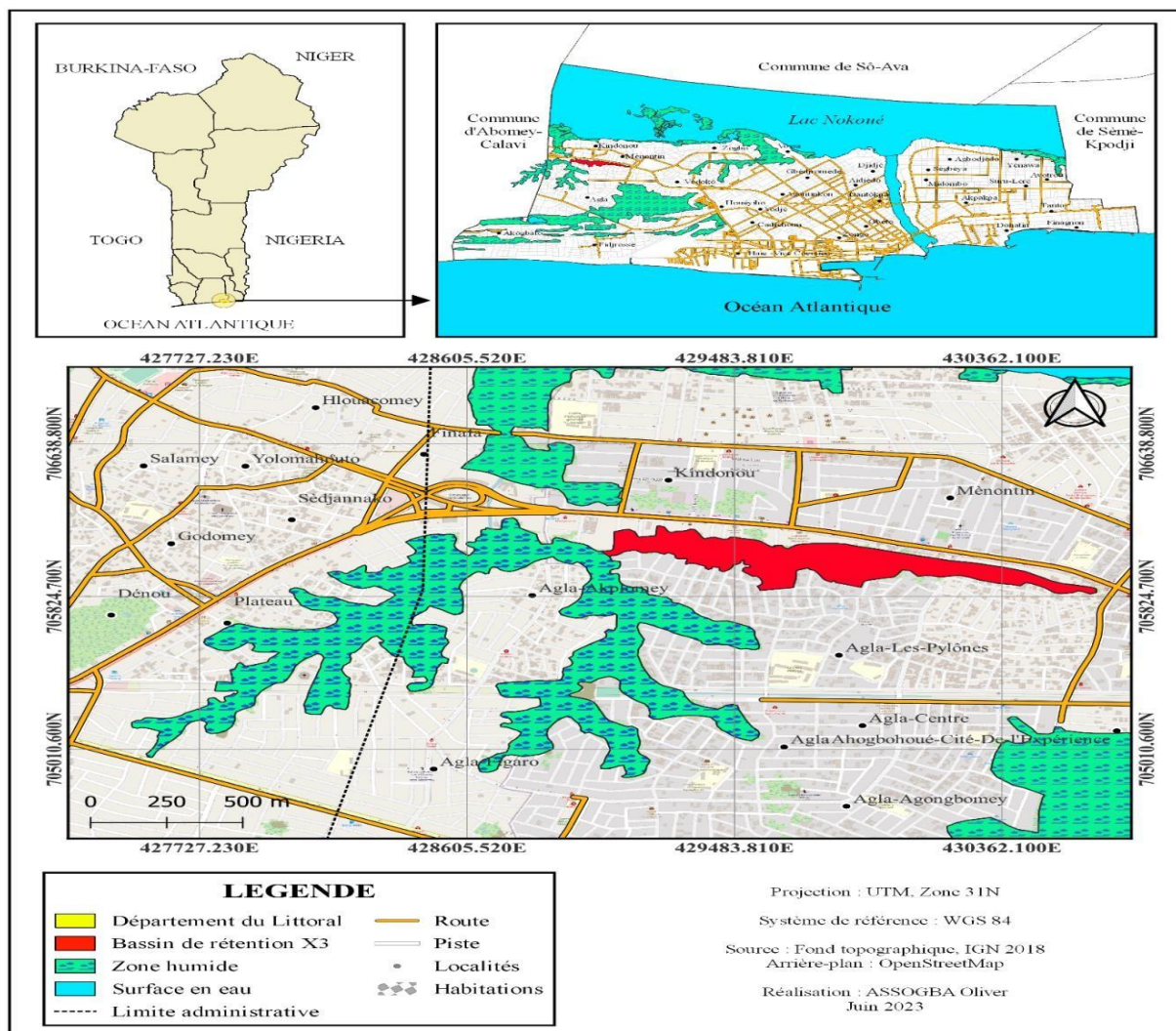


Figure 3: Zone de l'étude

De la figure 3 ci-dessus on peut donc situer notre zone d'étude dans le département du littoral précisément dans la commune de cotonou. Cette zone fait partie d'un grand raccordement de zone humides qui occupent la majeure partie de la ville de Cotonou et dont une partie termine tout droit dans le lac Nokoué.

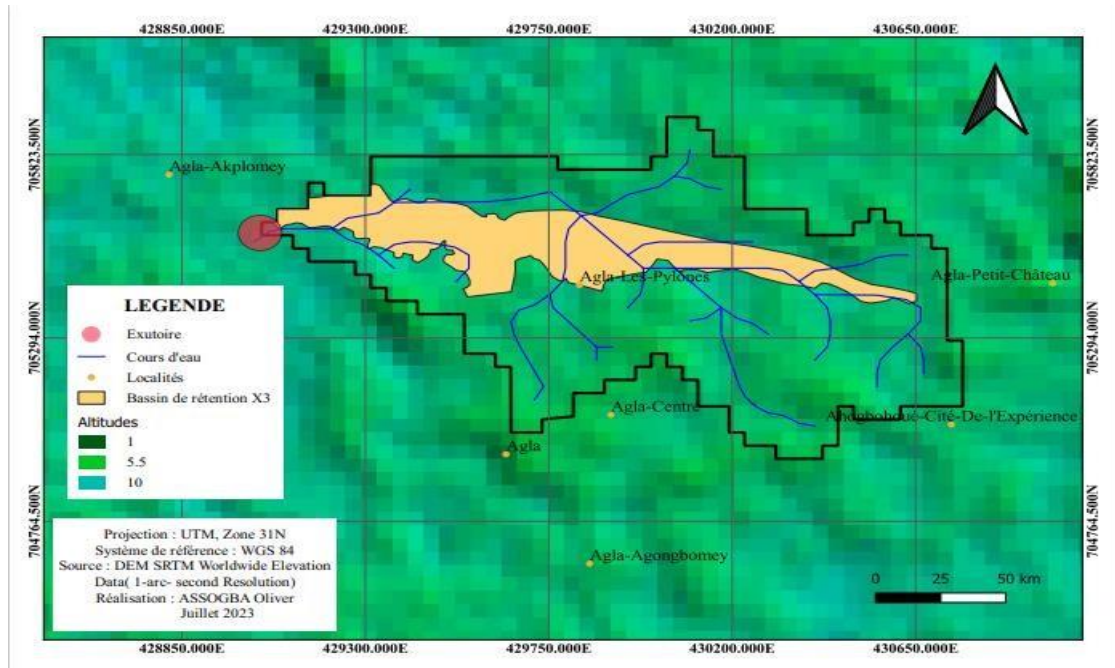


Figure 4: Bassin X3

2.2.2.1 Relief et topographie

La ville de Cotonou est bâtie dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin, dans le domaine margino-littoral et présente une morphologie qui repose essentiellement sur une grande composante de plaine côtière dont la partie basse, sableuse, souvent marécageuse, inférieur à 10 m d'altitude. Les côtes oscillent entre 1,02 et 6,52 m par rapport au zéro géographique. La côte moyenne de toute cette partie est de 3,52 m. Ce relief n'est donc pas favorable à l'écoulement des eaux pluviales. Il est plutôt à la source de la stagnation et l'infiltration (PAPCO 2019)

2.2.2.2 Hydrographie

La ville de Cotonou est dotée d'un réseau hydrographique dense constitué de lac, lagune, marécages et océan. Les principaux tributaires du lac Nokoué sont les fleuves Ouémé, Sô et la lagune Djonou. Le Lac Nokoué communique avec la mer par le chenal de Cotonou qui sépare les étendues Est et Ouest de la ville. Un des phénomènes les plus importants du point de vue hydrométrique ces dernières années fut enregistré à la fin de septembre 2010 où le niveau du lac a atteint un niveau de 2,05 m IGN. En absence de relevés pluviométriques sur une longue période, il convient de dire que cet événement correspond à une période de retour supérieure à 100 ans (PAPCO 2019).

2.2.2.3 Climat

Cotonou se situe dans la région côtière du Bénin, où prédomine le climat subéquatorial. Ce climat se caractérise par deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches tout au long de l'année. Le maximum pluviométrique est enregistré au mois de Juin (355 mm) pour la grande saison pluvieuse et au mois d'octobre (139 mm) pour la petite saison des pluies. De façon générale, la région côtière se caractérise par une anomalie climatique qui se traduit par une décroissance pluviométrique d'Est en Ouest sur le littoral, et des variations de températures plus accusées qu'elles ne le sont en général sous les climats équatoriaux. La température moyenne de la ville varie peu au cours de l'année et se situe entre 28 et 32°C. (PAPCO 2019)

2.2.2.4 Géologie et occupation du sol

La commune de Cotonou qui se situe dans la plaine côtière, possède des sols sableux qui sont généralement pauvres en matières organiques avec une faible capacité d'échange et un faible pouvoir de rétention en eau, ce qui a pour corollaire les inondations répétées observées pendant que la nappe phréatique se trouve à proximité de la surface du sol dont la perméabilité élevée accélère l'infiltration des eaux pluviales et usées pouvant ainsi générer des risques de pollution (DEHOUMON, 2022).

2.3. Traitement des données

2.3.1. Obtention des pluies maximales annuelles

Durant notre étude, nous étions appelés à utiliser des précipitations maximales annuelles de la période allant de 1961 à 2020. Les données qui nous ont été données étaient en pas de temps journalier. Grâce à l'outil Excel nous avons pu obtenir ces données au pas de temps mensuel et ensuite obtenir les maximales annuelles récapitulées à l'Annexe 1.

2.3.2. Délimitation des bassins élémentaires

Le bassin versant peut- être considéré comme une surface hydrologiquement close, où aucun écoulement ne pénètre de l'extérieur et qui est telle que toute goutte d'eau qui y tombe s'évapore, s'infiltre ou ruisselle vers un seul point appelé exutoire. Le bassin versant en un point d'un cours d'eau, est défini comme la totalité de la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de ce point. Il est caractérisé par son exutoire, à partir duquel se trace le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite (Ndao, 2010)

La délimitation des bassins versants a été faite grâce au logiciel Global Mapper, qui est un outil d'information de données géographiques. Auparavant, la zone du projet a été identifiée sur une carte planimétrique grâce au logiciel Google Earth.

La délimitation des bassins versants de la zone d'étude a été faite en 5 étapes :

- a) délimiter la zone d'étude sur le logiciel Google Earth par un polygone et enregistrer le fichier sous format .kmz ;
- b) importer le fichier .kmz sur le logiciel Global Mapper et télécharger l'imagerie de la zone ;
- c) appliquer les contours pour avoir les courbes de niveau ;
- d) relever les bassins versants de la zone ;
- e) digitaliser les bassins versants concernés avec l'outil polygone.

2.4 Outils

❖ Recherche documentaire

La recherche documentaire constitue la première étape de notre travail. Cela nous a permis de faire la collecte des données indispensables à la conduite de l'étude. Nous avons axé notre recherche autour :

- ⊗ des mémoires précédents en rapport avec notre sujet ;
- ⊗ des documents abordant des thèmes similaires ou ayant certains points en commun avec notre sujet de mémoire (rapports d'études, cours, etc.) ;
- ⊗ des généralités sur la zone d'étude.

❖ Visite de terrain

Cette étape consiste à aller sur le terrain afin d'être en contact avec le milieu physique de la zone d'étude. Elle a pour objectif de compléter et de confirmer certaines informations obtenues pendant la première phase. Elle nous a permis :

- ⊗ d'avoir une meilleure connaissance du terrain ;
- ⊗ de prendre les coordonnées géographiques de l'emplacement de notre déversoir ;
- ⊗ de voir les ouvrages et aménagements hydrauliques existants ;

- ⊗ de prendre quelques mesures sur le site ;
- ⊗ de prendre des images du site.

❖ Logiciels et outils utilisés

Le principal outil de travail utilisé est l'ordinateur. Pour prendre les différentes coordonnées sur le site nous avons utilisé un appareil GPS et pour les mesures un décamètre. Les logiciels utilisés sont :

- ⊗ Google Earth pour localiser et visualiser la zone ;
- ⊗ Global Mapper pour la délimitation du bassin versant et ses caractérisations physiques ;
- ⊗ les logiciels bureautiques de Microsoft Office : Word, Excel.

❖ Les données

Les cartes topographiques du bassin versant sont élaborées à partir de Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ces cartes nous ont permis de délimiter le sous-bassin versant X3. Le modèle utilisé durant l'étude est SRTM

Ces modèles numériques de terrains nous ont permis de déterminer la pente, les courbes de niveau et la carte des sous bassins versants. A partir de ce dernier, le logiciel Global Mapper est utilisé pour faire la délimitation du sous-bassin versant X3 pour avoir les données servant aux caractérisations physiques du bassin versant (la surface, le périmètre, la pente, etc.)

Nous avons également pu avoir à notre disposition les données de pluies journalières de Cotonou grâce à l'Agence Nationale et de la Météorologie du BENIN (ANaMB).

2.5. Méthodologie d'analyse et de calcul

2.5.1 Les indicateurs, les effectifs, les fréquences et les fréquences cumulées croissantes.

Nous débuterons notre séquence de traitement des données par la détermination des indicateurs.

❖ Les indicateurs de localisation

Le premier indicateur calculé est le plus souvent la **moyenne**.

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

Le deuxième indicateur est la **médiane**. L'on a souvent tendance à confondre les deux valeurs mais elles sont totalement différentes. La médiane contrairement à la moyenne est la valeur qui sépare l'échantillon en deux sous parties de même effectif. A titre d'exemple, la médiane des valeurs 10, 11, 12, 13, 14 est 12. Dans le cas d'un nombre de valeurs pair il suffira juste de prendre la moyenne des deux valeurs du milieu.

Le **mode** est également un indicateur parfois utilisé surtout pour les valeurs discrètes. C'est la valeur (pas forcément unique) la plus fréquente dans l'échantillon.

Le dernier indicateur quant à lui est particulièrement important en hydrologie. Il s'agit du **quantile** d'ordre **p** qui se définit comme la valeur de l'échantillon dont la fréquence cumulée vaut p. Cette valeur peut donc se lire sur la courbe des fréquences cumulées.

❖ Les indicateurs de dispersion

La **variance échantillonnage** permet de mesurer la façon dont les données se dispersent autour de la moyenne :

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

Nous avons également l'**écart-type** qui a l'avantage d'avoir la même dimension que les données qui se traduit par :

$$s_x = \sqrt{var_x} \quad (3)$$

Le **coefficient de variation** est également utilisé pour comparer la variabilité de plusieurs séries de données dont les ordres de grandeurs ne sont pas comparables, mais n'est évidemment pas défini pour les données dont la moyenne est nul. Il est généralement exprimé en pourcentage.

$$CV_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (4)$$

Enfin, l'**étendue** est également parfois utilisée. Ainsi, pour tout $i = 1, \dots, n$ on a :

$$Etendue_x = \max\{x_i\} - \min\{x_i\} \quad (5)$$

❖ Autres indicateurs

Il existe des indicateurs qui n'ont pas de signification aussi claire que les deux précédents indicateurs mais qui ont tout de même une importance en statistique notamment dans l'estimation.

Le moment **non centré d'ordre k** qui se définit de la manière suivante :

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k \quad (6)$$

Pour ce qui est du **moment centré d'ordre k**, nous avons la formule ci-dessous :

$$M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k \quad (7)$$

Nous remarquerons que, pour $k=1$ on se retrouve avec la moyenne.

$$m_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^1$$

Ainsi pour un moment centré d'ordre 3, on peut tirer un autre indicateur relatif à la forme de l'histogramme.

Asymétrie

$$asym_x = \frac{m_3}{s_x^3} \quad (8)$$

De même que pour le moment centré d'ordre 4 on tire également un indicateur relatif à la forme de l'histogramme.

Aplatissement

$$apla_x = \frac{m_4}{s_x^4} \quad (9)$$

Effectifs, Fréquences, Fréquences cumulées

- ❖ L'effectif d'une valeur donnée est le nombre de fois où cette valeur a été observée
- ❖ La fréquence est égale à l'effectif divisé par la taille de la série analysée.
- ❖ La fréquence cumulée est égale au cumul des fréquences associées à chaque valeur, lorsque ces valeurs sont classées par ordre croissant et non par ordre chronologique.

La fréquence cumulée revêt une importance capitale, car elle est étroitement liée aux concepts subséquents de quantiles et de période de retour. En hydrologie, elle est souvent désignée comme la fréquence de non-dépassement, représentant le pourcentage de données dans un

échantillon inférieur ou égal à une valeur donnée. Le choix de "inférieur ou égal" plutôt que "inférieur strict" dans cette définition suscite parfois des questionnements.

Grâce à la fréquence de non dépassement, on peut aisément déterminer des probabilités pour que telle ou telle hauteur de pluie soit dépassée. On parle également de quantile d'ordre n . Les fréquences cumulées croissantes (FCC) et les quantiles associés à la période de retour sont liés dans le contexte de l'analyse de données hydrométéorologiques, en particulier lors de l'étude des précipitations extrêmes et de la probabilité de leur occurrence sur une période donnée.

Cela signifie que pour chaque valeur de précipitation, nous comptons combien de fois cette valeur a été égale ou dépassée au fil du temps, en commençant par les valeurs les plus faibles et en progressant vers les valeurs les plus élevées. Les FCC nous donnent une idée de la probabilité d'obtenir une certaine quantité de précipitations ou plus sur une période donnée, comme dans le cas d'une précipitation maximale recherchée pour une période de retour donnée. Mais cette méthode descriptive est une **méthode empirique** pour plusieurs raisons :

- ❖ Le caractère arbitraire de la formule au non dépassement : Par définition, la fréquence au non-dépassement de la i -ième valeur de l'échantillon (lorsque celui-ci est classé par ordre croissant, et non dans l'ordre chronologique) est égale à i/n , où n est le nombre d'observations. Ceci correspond à la définition suivante : « La fréquence au non dépassement d'une valeur donnée est égale à la fréquence des observations inférieures ou égales à cette valeur ». Mais si l'on remplace « inférieur ou égal » par « inférieur strict », la formule devient alors $(i-1)/n$. En plus de ces deux formules naturelles, la littérature regorge d'autres formules pour le calcul des fréquences au non-dépassement, comme par exemple $(i-0,5)/n$, $i/(n+1)$, etc. Il serait donc souhaitable de se donner un cadre méthodologique s'affranchissant de ce choix largement arbitraire.
- ❖ Interpolation et extrapolation : si l'on se basait uniquement sur les fréquences au non dépassement empiriques (avec la formule i/n), on conclurait que la plus forte valeur observée ne peut pas être dépassée ! L'utilisation d'une autre formule de fréquence empirique ne résoudrait que partiellement le problème, puisque l'extrapolation au-delà de la valeur la plus forte resterait problématique. Mentionnons également que l'interpolation entre des fréquences empiriques par de segments de droite n'est guère satisfaisante.

- ❖ Variabilité d'échantillonnage et incertitudes : La plus forte motivation conduisant à l'utilisation de modèles probabilistes est liée à la variabilité d'échantillonnage. Ce terme générique désigne le fait que les observations de débit dont nous disposons ne constituent généralement qu'un faible échantillon de l'ensemble des réalisations possibles de la rivière. En conséquence, les estimations seront dépendantes des données effectivement observées.

Il serait un peu plus judicieux de proposer une autre méthode de description de la **distribution** des observations.

2.5.2 Paramètres physiques caractérisant le sous bassin versant

Surface : Le bassin versant étant une aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les quantités d'eau mesurées à l'exutoire seront fonction de sa surface. La surface du bassin versant notée (S) peut être mesurée à l'aide d'un planimètre, d'un papier millimétré ou par des techniques de digitalisation. On classe les bassins versants en général relativement à leur surface :

- ❖ 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 du bassin versant représente la longueur du contour de sa surface. Il est mesuré à l'aide d'un curvimètre, d'une ficelle ou de techniques de digitalisation.

Indice de compacité : L'indice de compacité est également appelé coefficient de forme. Il permet la comparaison de deux bassins versant de surface identique. Il est donné par la formule ci-après :

$$I_{comp} = 0,8 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (10)$$

P : Périmètre du bassin versant en km

S : Superficie du bassin versant en km^2

Icomp : Indice de compacité du bassin versant, il est adimensionnel. L'indice de compacité est toujours supérieur ou égal à 1. Plus il est proche de 1 plus le bassin versant est circulaire et plus il est supérieur à 1 plus le bassin versant est allongé.

Rectangle équivalent : Le rectangle équivalent d'un bassin versant correspond au rectangle ayant la même surface et le même périmètre ; par conséquent le même indice de compacité que ce bassin versant. Sa longueur est donnée par la formule ci-après :

$$L = \frac{I_{comp}}{1,128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{I_{comp}} \right)^2} \right] \quad (11)$$

S : Superficie du bassin versant en km²

Icomp : Indice de compacité du bassin versant, il est adimensionnel

L : Longueur du rectangle équivalent en km.

Indice global de pente : Il caractérise le relief d'un bassin versant et se calcule par la formule ci-dessous :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (12), \text{ avec :}$$

L : Longueur du rectangle en km

Ig : Indice global de pente en m/km

D : Dénivelée, exprimée en m, entre l'altitude surplombée par 5% de la superficie du bassin versant et celle surplombée par 95% de cette superficie. Ces altitudes sont données par la courbe hypsométrique du bassin versant obtenue sur Global Mapper. La courbe hypsométrique d'un bassin versant représente chaque niveau dans le bassin versant en fonction du cumul des superficies entre les courbes de niveau circonscrits dans le bassin versant et rapporté en pourcentage. Lorsque les pentes transversales sont trop différentes (différence > à 20%) de la pente longitudinale (Ig), on calcule alors un indice global de pente corrigé (Igccorr) qui est donnée par la formule (13) :

$$I_{g_{cor}} = \frac{(n-1)I_g + I_t}{n} \quad (13)$$

I_g : Indice global de pente en m/km

I_t : pente transversale moyenne mesurée sur 4 ou 6 lignes de plus grande pente du bassin versant, il est exprimé en m/km

n : coefficient dépendant de la longueur du rectangle équivalente (L) en Km de chaque bassin

- ❖ Pour $L < 5$ km, $n=2$
- ❖ Pour $5 < L < 25$ km, $n=3$
- ❖ Pour $25 < L < 50$ km, $n=4$
- ❖ Pour $L > 50$ km, $n=6$

Dénivelée spécifique : La dénivelée spécifique, comme donnée par la formule (14) est le produit de l'indice global de pente par la racine carrée de la superficie du bassin versant. Elle s'exprime en m et est indépendante en théorie de l'aire du bassin.

$$DS = I_g * \sqrt{S} \quad (14)$$

I_g : Indice global de pente en m/km

S : superficie du bassin versant en km

Ds : dénivelée spécifique en m

2.5.3 Choix de la période de retour

2.5.3.1 Ajustement de la pluviométrie maximale journalière par la loi de Gumbel

Dans le contexte de l'ajustement des valeurs maximales de pluies, il existe plusieurs modèles de distribution potentiels, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Parmi les options couramment considérées, on peut citer la distribution de Gumbel, la distribution de Pearson, la distribution exponentielle, et d'autres distributions de probabilité. Chacune de ces distributions peut être utilisées pour modéliser les valeurs extrêmes de pluies, mais le choix du modèle dépendra des caractéristiques spécifiques des données et des objectifs de l'analyse.

La distribution de Gumbel est largement utilisée pour modéliser les valeurs maximales de pluies. Elle est particulièrement adaptée pour décrire les queues de distribution, ce qui en fait

un choix approprié pour les événements rares et extrêmes, tels que les inondations majeures. Son utilisation est fondée sur la théorie des valeurs extrêmes et a été validée dans de nombreuses études hydrologiques.

L'une des raisons pour lesquelles on peut opter pour les modèles de Gumbel est son adéquation à la modélisation des phénomènes extrêmes, qui sont souvent d'une importance cruciale en hydrologie et en ingénierie. De plus, la distribution de Gumbel est relativement simple à utiliser et à interpréter, ce qui en fait un outil pratique pour estimer la probabilité d'occurrence d'événements rares.

En fin de compte, le choix d'utiliser la distribution de Gumbel pour ajuster les valeurs maximales de pluies repose sur sa pertinence dans la modélisation des événements extrêmes et sur sa validation empirique

La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ est formulée de la manière suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\lambda} \exp \left(-\frac{x-\mu}{\lambda} - \exp \left(-\frac{x-\mu}{\lambda} \right) \right) \quad (15)$$

Pour pouvoir donc déterminer cette fonction de répartition, il va falloir estimer les paramètres λ et μ

2.5.3.2 Estimation des paramètres

❖ Par la méthode d'ajustement statique d'une série de données

L'avantage d'utiliser la variable réduite est que l'expression d'un quantile est linéaire. En conséquence, dès lors que les points de la série à ajuster peuvent être reportés dans un système d'axes $x - y$ il est possible d'ajuster une droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres λ et μ de la loi. Il existe différentes méthodes d'ajustement : méthode graphique (ajustement à l'œil ou à l'aide d'une régression statistique), méthode des moments etc... En pratique, il s'agit essentiellement d'estimer la probabilité de non dépassement $F(x_i)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x_i . Il existe de nombreuses formules d'estimation de la fonction de répartition à l'aide de la fréquence empirique. Elles reposent toutes sur un tri de la série par valeurs croissantes permettant d'associer à chaque valeur son rang r . Des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen :

$$\frac{r-0,5}{n} \quad (16)$$

Où r est le rang dans la série de données classée par valeurs croissantes et n est la taille de l'échantillon. Rappelons encore que le temps de retour T d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement.

L'obtention de la période de retour se fait suivant les étapes ci-dessous :

Etape 1 : Préparation de la série de données des débits de pointe. Trier les valeurs dans l'ordre croissant. Attribuer un rang à chaque valeur.

Etape 2 : Calcul de la fréquence empirique pour chaque rang.

Etape 3 : Calcul de la variable réduite « u » de Gumbel.

Etape 4 : Représentation graphique des couples (u_i, x_i) de la série à ajuster

Etape 5 : Ajustement d'une relation linéaire aux couples (u_i, x_i) et en déduire les deux paramètres μ (μ) et λ (λ)

Etape 6 : Utilisation du modèle statistique pour estimer des débits de pointe de différents temps de retour T

❖ Méthode des moments

L'idée de cette méthode est la suivante : si les paramètres sont bien estimés, alors il devrait y avoir adéquation entre les caractéristiques observées (ou empiriques) et les caractéristiques théoriques. Nous allons rechercher cette adéquation sur les moments, en général le premier moment non centré (c'est à dire la moyenne) et le second moment centré (c'est à dire la variance), plus éventuellement des moments d'ordre supérieur pour les distributions possédant plus de deux paramètres. Plus précisément, supposons que nous ayons p paramètres $\theta_1, \dots, \theta_p$ à estimer, alors leurs estimateurs $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_p = \hat{\theta}$ seront solutions du système :

$$\begin{cases} E_{\hat{\theta}}(X) = m_1 \\ Var_{\hat{\theta}}(X) = m_2 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ E_{\hat{\theta}} \left((X - E_{\hat{\theta}}(X))^p \right) = m_p, P \geq 2 \end{cases} \quad (17)$$

Dans le cas de Gumbel, nous sommes en face de deux paramètres λ et μ ainsi le système se réduit à

$$\begin{cases} E_{\hat{\theta}}(X) = m_1 \\ Var_{\hat{\theta}}(X) = m_2 \end{cases} \quad (18)$$

En remplaçant les valeurs de la moyenne et de la variance par leurs formules selon Gumbel on obtient

$$\begin{cases} \hat{\lambda} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s_x \\ \hat{\mu} = \bar{x} - \gamma \hat{\lambda}, \quad \text{où } \gamma = 0,5772 \end{cases} \quad (19)$$

Grâce à ces valeurs, on pourra ainsi déterminer la valeur de la pluie maximale pour la période de retour de 10 ans.

❖ Maximum de vraisemblance (MLE)

Dans le cas de Gumbel, l'emploi de cette méthode se fera numériquement. L'estimation de ces paramètres s'effectue suivant ces étapes

1. Définition de la vraisemblance :

- ⊗ La vraisemblance mesure à quel point les données observées sont compatibles avec différentes valeurs des paramètres (λ) et (μ) ;

Pour la distribution de Gumbel, la vraisemblance pour un échantillon X_i est donnée par la formule :

$$L(\mu, \lambda | x_i) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\lambda}\right) \exp\left(-\exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\lambda}\right)\right) \quad (20)$$

- ⊗ La vraisemblance totale pour l'ensemble des données est le produit des vraisemblances individuelles pour chaque observation.

2. Log-vraisemblance :

- ⊗ Pour simplifier les calculs, on utilise souvent la log-vraisemblance, notée LL, qui est le Logarithme naturel de la vraisemblance. Cela simplifie les produits en sommes.
- ⊗ La log-vraisemblance totale pour l'ensemble des données est la somme des log-vraisemblances individuelles :

$$LL(\mu, \lambda | \text{données}) = \sum_{i=1}^n \left[\log\left(\frac{1}{\lambda}\right) - \frac{x_i - \mu}{\lambda} - \exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\lambda}\right) \right] \quad (21)$$

3. Maximisation de la log-vraisemblance sur Excel

Cette maximisation suit des étapes bien précises qui, théoriquement seront pénible à réaliser. Ainsi, cette maximisation s'effectuera vers l'outil de calcul Excel suivant les étapes ci-dessous :

Étape 1 : Préparation des données

Importer ou saisir les données extrêmes dans une feuille de calcul Excel. S'assurer que les données sont correctement organisées en colonnes.

Étape 2 : Calcul des fonctions de vraisemblance

- ⊗ Dans une cellule Excel, créer la fonction de densité de probabilité de la distribution de Gumbel.
- ⊗ Créer une colonne supplémentaire pour calculer la log-vraisemblance. Utiliser la formule qui consiste à sommer le logarithme de la densité de probabilité pour chaque observation.

Étape 3 : Paramètres initiaux

Définir des valeurs initiales pour les paramètres de la distribution de Gumbel (par exemple, μ et λ) dans des cellules dédiées.

Étape 4 : Création de la fonction de log-vraisemblance totale

Créer une cellule qui calcule la somme totale des log-vraisemblances pour toutes les observations. C'est la fonction de log-vraisemblance totale.

Étape 5 : Utilisation de la fonction "Solver"

Dans Excel, utiliser l'outil "Solver" pour maximiser la fonction de log-vraisemblance totale. Nous pouvons trouver "Solver" dans l'onglet "Données".

Étape 6 : Configuration de "Solver"

- Configurer "Solver" en spécifiant que l'on souhaite maximiser la cellule contenant la log-vraisemblance totale en ajustant les cellules contenant les paramètres μ et λ .
- Définir des limites et des contraintes pour les paramètres si nécessaire.
- Définir des limites et des contraintes pour les paramètres si nécessaire.
- Spécifier les options de convergence et les conditions d'arrêt pour l'optimisation

Étape 7 : Exécution de l'optimisation

Exécuter "Solver" pour lancer le processus d'optimisation. Il ajustera les paramètres μ et λ pour maximiser la log-vraisemblance totale.

Étape 8 : Résultats

Une fois que "Solver" a terminé, noter les valeurs optimales des paramètres μ et λ dans la feuille de calcul.

Étape 9 : Analyse et interprétation

- ⊗ Analyser les résultats obtenus pour les paramètres μ et λ . Ce sont les estimations des paramètres de la distribution de Gumbel basées sur les données.
- ⊗ Enfin, interpréter les valeurs estimées de μ et λ pour comprendre la distribution de Gumbel qui décrit les données. Par exemple, le paramètre μ représente la localisation de la distribution, tandis que λ est lié à l'échelle de dispersion.

2.5.4 Test de vérification sur la fiabilité des modèles

Ce test consiste à déterminer plusieurs métriques dont l'erreur Moyenne Absolue (MAE), le coefficient de Nash-Sutcliffe, la Racine Carrée de le Moyenne des Erreurs au Carrée et la courbe de résidu.

Erreur Moyenne Absolue

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 :

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

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

La Racine Carrée de la Moyenne des Erreurs au Carré

C'est une mesure de la précision d'un modèle hydrologique. Elle mesure l'écart entre les valeurs par le modèle et les valeurs observées, en prenant la racine carrée de la moyenne des carrés de ces écarts.

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

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

Le coefficient de Nash-Sutcliffe

Considéré également comme une mesure couramment utilisée pour évaluer la performance des modèles de prévision hydrologique, il se définit comme suit :

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

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

La courbe des résidus

La courbe des résidus est un outil visuel puissant pour évaluer la qualité d'un modèle hydrologique ou statistique, en identifiant les modèles systématiques dans les erreurs de prédiction. Les résidus sont les différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle. La courbe des résidus trace ces résidus par rapport aux valeurs prédites par le modèle.

Pour obtenir une courbe de résidus, il faudra :

- Obtenir les valeurs prédites par le modèle
- Obtenir les valeurs observées ou réelles
- Calculer les résidus en soustrayant les valeurs prédites des valeurs observées pour chaque point de données. Ces différences sont les résidus.
- Tracer les résidus par rapport aux valeurs prédites : Sur l'axe des x, placez les valeurs prédites, et sur l'axe des y, placez les résidus correspondants. Chaque point sur le graphique représente un point de données individuel.

Après analyse de la courbe des résidus, l'on pourra déceler certaines caractéristiques importantes :

- Si les résidus semblent être distribués de manière aléatoire autour de zéro et qu'il n'y a pas de tendance claire, cela indique que le modèle est probablement approprié pour les données.

- Si l'on remarque une tendance dans les résidus (par exemple, s'ils augmentent ou diminuent avec les valeurs prédites), cela suggère que le modèle ne capture peut-être pas correctement certaines informations ou tendances présentes dans les données.

Le modèle peut donc être utilisé dans la détermination de la pluie de période de retour 10 ans en déterminant la fonction de répartition $F(x)$ comme l'indique l'Annexe 5. Ce tableau nous a permis de ressortir une courbe de variation de la fonction de répartition $F(x)$ en fonction des pluies journalières annuelles.

2.5.5 Estimation du débit décennal

2.5.5.1 Estimation par la méthode de l'ORSTOM

Ce qui suit constitue un résumé de publication de l'ORSTOM Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale par (J. RODIER, C. AUVRAY, 1965).

❖ Principes

Cette méthode, dite aussi méthode de l'ORSTOM, s'applique à des bassins versants de taille inférieures à 200 km² en Afrique Occidentale. Au-delà de cette limite, les auteurs estiment qu'il devient difficile voire impossible de déterminer la lame précipitée de fréquence décennale à partir de l'averse ponctuelle de même récurrence (FAO, 1996). A partir des résultats de 60 bassins versants observés sous des régimes pluviométriques couvrant l'étendue géographique des isohyètes de pluies annuelles comprises entre 150 à 1 200 mm, RODIER & AUVRAY ont proposé une estimation de débit de pointe de la crue décennale par une méthodologie résumée ci-après : Les auteurs partent d'une synthèse de résultats obtenus sur 60 bassins expérimentaux dispersés en Afrique. L'hypothèse de base admise est que la crue décennale est engendrée par une averse décennale. Ces bases étant fixées, le principe de calcul du débit maximal décennal de ruissellement pur est le suivant :

1. On estime la hauteur H de l'averse décennale ponctuelle, sans prendre en compte son intensité.
2. On calcule le volume total (V_p) de la précipitation sur le bassin en multipliant la hauteur déterminée ci-dessus par un coefficient d'abattement α (qui tient compte de la non

homogénéité spatiale de l'averse considérée) et par la superficie S du bassin considéré. On a ainsi :

$$V_p = \alpha H S \quad (22)$$

3. On recherche la valeur du coefficient de ruissellement K_r à partir des caractéristiques topographiques, végétales et géologiques du sol. Le volume d'eau V_r , effectivement ruisselé sur le bassin est égal au produit de V_p par le coefficient de ruissellement K_r .

$$V_r = K_r \cdot V_p \quad (23)$$

4. A partir des caractéristiques du bassin, on évalue le temps de base T, qui correspond à la durée effective du ruissellement sur le bassin. On peut également évaluer le temps de montée T_M de la crue permettant de définir l'hydrogramme de crue une fois connu le débit de pointe.

Le débit moyen Q_r de ruissellement, pour la crue décennale, pendant un temps égal au temps de base T_b est :

$$Q_r = \frac{K_r \cdot V_r}{T_b} \quad (24)$$

5. Le débit de pointe Q_p de la crue décennale est égale au produit du débit moyen Q_r par un coefficient γ déterminé expérimentalement.

$$Q_{\max} = \gamma Q_r \quad (25)$$

Pour les petits bassins perméables :

$$Q_{10} = 1,05 \times Q_r \quad (26)$$

Pour les grands bassins imperméables (plusieurs centaines de km²) avec un réseau hydrographique bien marqué :

$$Q_{10} = (1,10 \text{ à } 1,15) \times Q_r \quad (27)$$

Pour les grands bassins perméables avec des lits suffisamment larges :

$$Q_{10} = (1,15 \text{ à } 1,20) \times Q_r \quad (28)$$

Q_r : débit d'eau ruisselée

2.5.5.2 Méthode du CIEH

La méthode développée par le CIEH, reprend les principes fondamentaux d'études statistiques en se servant de données et de mesures actuelles. Cette méthode établie par PUECH & CHABIGONNI en 1983 puis révisée en 1994, repose sur l'étude statistique initiale de 162 bassins dont la superficie varie entre 0,07 et 2 500 km² et sur 414 bassins versants lors de la révision de 1994 pour des pluies annuelles comprises entre 100 et 2 500mm. Sur l'échantillon de bassins versants utilisés, les auteurs montrent que cette méthode est satisfaisante pour des conditions de perméabilité et de relief moyens. Des conditions extrêmes peuvent entraîner de fortes erreurs (FAO, 1996).

Le débit décennal en m³/s est donné par les formules suivantes :

$$Q_{10} = (S)^2(Pan)^p(Ig)^i(Kr10)^k(Dd)^d \quad (29)$$

Où **a**, **i**, **p**, **k**, **d** sont des coefficients à déterminer

S : superficie du bassin versant en Km²

Ig : indice global de pente en m/Km

Pan : la pluie annuelle moyenne en mm

Kr : coefficient de ruissellement en %

Dd : densité de drainage en km⁻¹

La liste des paramètres à utiliser n'est pas limitative et est fonction du modèle de calcul utilisé. La détermination de ces coefficients est effectuée par une méthode de régression linéaire multiple tenant compte de plusieurs variables. Pour des raisons de conformité de la formule avec la zone étudiée, Albergel et al., 1991 retiennent, dans une étude réalisée sur des sous bassins au BENIN et TOGO, les trois premiers paramètres comme étant les plus significatifs avec les coefficients qui apparaissent dans la formule suivante :

$$Q_{10} = 0,167 * S^{0,435} * Kr^{1,204} \quad (30)$$

Dans le cadre de cette étude, l'expression ci-dessus de la méthode de CIEH a été aussi utilisée. Selon NGUYEN V.T (1981) les deux méthodes proposées (ORSTOM et CIEH) donnent dans la plupart des cas des résultats cohérents. Au cas contraire une analyse est faite suivant le domaine d'application pour faire un choix entre les valeurs données par les deux formules. Une

fois la méthode choisie, le passage de la crue décennale à la crue centennale se fait par la méthode GRADEX qui sera donnée par la formule ci-dessous.

$$Q_{100} = C \times Q_{10} \quad (31)$$

Avec C = coefficient majorateur supérieur à 1

Le coefficient (C) est fonction des précipitations de même temps de retour pour le même temps de base caractéristique du bassin versant. D'où l'expression du coefficient majorateur est :

$$C = 1 + \left[\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \times \frac{\left(\frac{T_{b10}}{24} \right)^{0,12}}{K_r} \right] \quad (32)$$

P10 : précipitation journalière (mm) correspondant à une période de retour de 10ans

P100 : précipitation journalière (mm) correspondant à une période de retour de 100ans

Tb10 : temps de base en heures

Kr10 : coefficient de ruissellement de la crue décennale (exprimé en fraction et non en pourcentage).

On peut prendre, une première approximation, les valeurs suivantes pour le rapport entre précipitations de fréquence centennale et décennale :

$$\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} = 0,45 \text{ en zone sahérienne} \quad (33)$$

$$\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} = 0,38 \text{ en zone tropicale} \quad (34)$$

2.6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a établi le contexte et les bases méthodologiques de notre étude. Nous avons présenté le milieu d'étude qui a servi de toile de fond à nos recherches, offrant ainsi une compréhension plus profonde de l'environnement dans lequel notre travail a été mené. De plus, nous avons détaillé les méthodes et les outils que nous avons employés pour collecter, analyser et interpréter les données, démontrant ainsi la rigueur de notre approche. En fin de compte, les résultats de notre recherche seront le produit de cette démarche méthodologique rigoureuse, offrant ainsi des insights précieux pour notre domaine d'étude.

CHAPITRE III : RESULTATS

3.1. Introduction

Dans ce chapitre dédié aux résultats, nous explorerons en détail les différentes facettes de notre étude, en commençant par une analyse approfondie des indicateurs, des effectifs et des fréquences. Nous examinerons également les fréquences cumulées croissantes pour mieux comprendre la distribution des données. Ensuite, nous nous pencherons sur les paramètres physiques qui caractérisent notre sous bassin, avant de dévoiler la détermination de la pluie décennale, l'ajustement des valeurs de pluies par le modèle de Gumbel et l'estimation de ses paramètres. Enfin, nous conclurons en examinant les débits, pièce maîtresse de notre étude hydrologique.

3.2. Analyse des tendances et variations hydrologiques

La figure ci-dessous nous présente le graphe de la variation des pluies maximales en fonction de l'année.

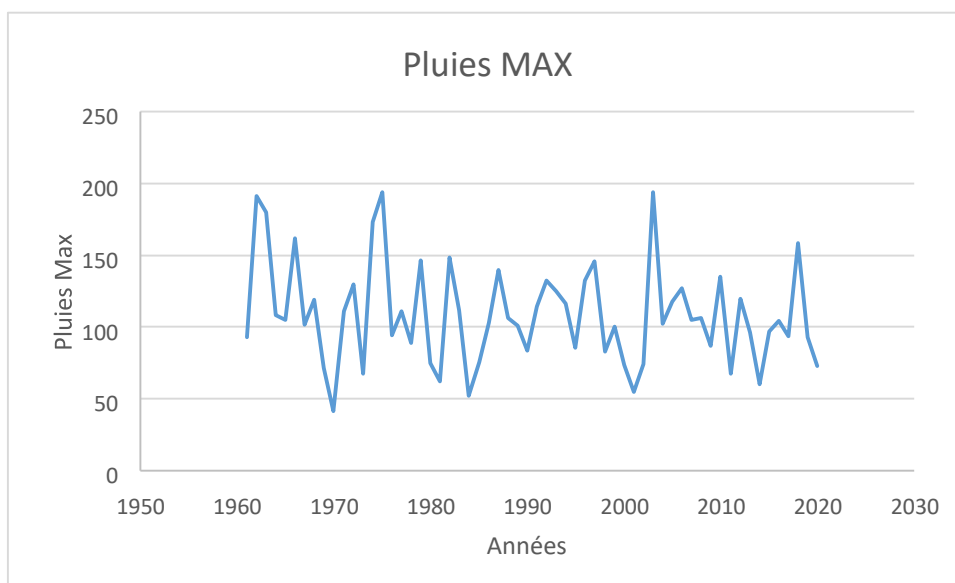


Figure 5 : Variation de la pluie maximale par année sur une période allant de 1961 à 2020

De ce graphe, on retient que la plus grande valeur de pluie maximale a été obtenue en 2003 pour une valeur de 194,2 mm et la plus petite valeur de pluie maximale a été obtenue en 1970 pour une valeur de 41,5 mm.

3.3. Récapitulatif des indicateurs calculés

Sur la base des indicateurs déterminés, on obtient le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Récapitulatif des indicateurs

Indicateurs	Moyenne	Étendue	Nombre	Variance	Sx	CVx	M3	M4	Asymétrie	Aplatissement
Valeurs	108,67	152,7	60	1267,028	35,59534	0,327554	54725,81	9506914	0,042645	0,068171

La moyenne étant de 108,67 indique que la valeur centrale des données se situe autour ce chiffre. L'étendue de 152,7 révèle une large dispersion entre les valeurs maximales et minimales de l'échantillon. La variance et l'écart type confirment une variation significative autour de la moyenne, signifiant une distribution relativement large des données. L'asymétrie étant très proche de zéro, suggère que la distribution des données est symétrique, sans déviation notable à gauche ou à droite. Enfin, un aplatissement de 0,068171 indique une distribution légèrement plus plate que la courbe normale, signifiant que les valeurs sont légèrement moins concentrées autour de la moyenne. Ces résultats offrent une d'ensemble équilibrée de la distribution de notre échantillon, mettant en évidence une dispersion notable mais symétrique autour de la moyenne.

3.4. Récapitulatif des effectifs, des fréquences et des fréquences cumulées croissantes

Le tableau ci-dessous nous présente un tableau récapitulatif des effectifs, des fréquences et des fréquences cumulées croissantes. Notre série de données a un **effectif** de (01) pour chaque observation, ce qui correspond à une **fréquence** de 0,016666667

Tableau 2: Tableau des effectifs, des fréquences et des fréquences cumulées croissantes

Années	Pluies MAX	Fréquence Cumulées croissants
1970	41,5	0,016666667
1984	51,9	0,033333333
2001	54,8	0,05
2014	60,1	0,066666667
1981	61,9	0,083333333
2011	67,3	0,1
1973	67,7	0,116666667
1969	71,8	0,133333333
2020	72,8	0,15
2000	73,8	0,166666667
2002	74,2	0,183333333

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

1980	74,8	0,2
1985	75,2	0,216666667
1998	82,7	0,233333333
1990	83,7	0,25
1995	85,3	0,266666667
2009	86,7	0,283333333
1978	89	0,3
2019	92,6	0,316666667
1961	93	0,333333333
2017	93,6	0,35
1976	94,1	0,366666667
2013	96,1	0,383333333
2015	97,1	0,4
1999	100,2	0,416666667
1989	101	0,433333333
1967	101,6	0,45
2004	102,2	0,466666667
1986	102,6	0,483333333
2016	104,6	0,5
1965	104,7	0,516666667
2007	105,1	0,533333333
1988	106,4	0,55
2008	106,6	0,566666667
1964	108,2	0,583333333
1971	110,8	0,6
1977	111	0,616666667
1983	111,7	0,633333333
1991	114,3	0,65
1994	116,4	0,666666667
2005	117,5	0,683333333
1968	119,2	0,7
2012	119,6	0,716666667
1993	124,7	0,733333333
2006	126,8	0,75
1972	129,4	0,766666667
1992	132,2	0,783333333
1996	132,2	0,8
2010	134,9	0,816666667
1987	139,4	0,833333333
1997	145,8	0,85
1979	146,3	0,866666667
1982	148,6	0,883333333

2018	158,2	0,9
1966	161,7	0,916666667
1974	173	0,933333333
1963	180,1	0,95
1962	191,5	0,966666667
1975	193,8	0,983333333
2003	194,2	1

La moyenne des précipitations maximales annuelles a été dépassée ou égale sur 26 années.

Cette précipitation a une fréquence de non dépassement de 0,583333333.

3.5. Paramètres physiques caractérisant le sous bassin versant

Pour une vue d'ensemble claire des paramètres physiques que nous avons examinés, jetons un coup d'œil au tableau récapitulatif ci-dessous, qui présente de manière synthétique les caractéristiques essentielles de chaque paramètre.

Tableau 3: Récapitulatif des caractéristiques du bassin Versant

Paramètres	Détermination	Unités	résultats
Surface (S)	Extraction sur Global Mapper	km ²	4,54
Périmètre (P)		Km	15,950
Pente Moyenne		%	1,11
Alt Max (Zmax)		m	9
Alt Min (Zmin)		m	-0,5
Indice de Compacité (Icomp)	$I_{comp} = \frac{P}{2\sqrt{\pi} + S} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$	-	1,94
Longueur du Rectangle équivalent (L)	$L = \sqrt{S} * \left(\frac{I_{comp}}{1,128}\right) * [1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{I_{comp}}\right)^2}]$	Km	7,09
Altitude avec 5% de la surface du bassin versant	Courbe hypsométrique du bassin versant obtenue sur Global Mapper	M	0,5
Altitude avec 95% de la surface du bassin versant			7
Dénivelé (D) entre 5% et 95% de la surface du bassin versant			6,5
Indice Global des Pentes (Ig)	$I_g = \frac{D}{L}$	m/Km	0,92

Pente Transversale moyenne (I_t)	Mesurée sur 4 ou 6 lignes de plus grande pente du bassin Versant	m/Km	2,78
Coefficient Bassin versant. (n)	Dépendant de la longueur du rectangle-équivalente (L) en Km	-	3
Indice Global des Pentes corrigés (I_{gcorr})	$I_{gcorr} = \frac{(n-1)I_g + I_t}{n}$	m/Km	1,54
Densité Spécifique (D_s)	$D_s = I_g * \sqrt{S}$	m	2,11

3.6. Estimation des paramètres

Dans le cadre de l'estimation des paramètres pour notre étude hydrologique, le modèle de Gumbel a été choisi parmi plusieurs distributions de probabilité en raison de son efficacité bien établie dans la modélisation des événements extrêmes. Le modèle de Gumbel s'est avéré être un outil précieux pour caractériser la distribution des maxima annuels des précipitations ou des débits dans un bassin versant, ce qui en fait un choix judicieux pour notre analyse. Sa capacité à représenter de manière fiable les valeurs extrêmes et à fournir des estimations précises des paramètres en fait un modèle préféré dans de nombreuses études hydrologiques.

3.6.1. Par la méthode d'ajustement statique d'une série de données

Dans cette section, nous présenterons la courbe qui illustre la relation entre les variables réduites et les pluies maximales. Cette courbe constitue une représentation visuelle clé de nos résultats. Pour une vue plus détaillée des données et des valeurs spécifiques, nous invitons les lecteurs à se référer au tableau récapitulatif des variables réduites, qui est disponible en Annexe 2.

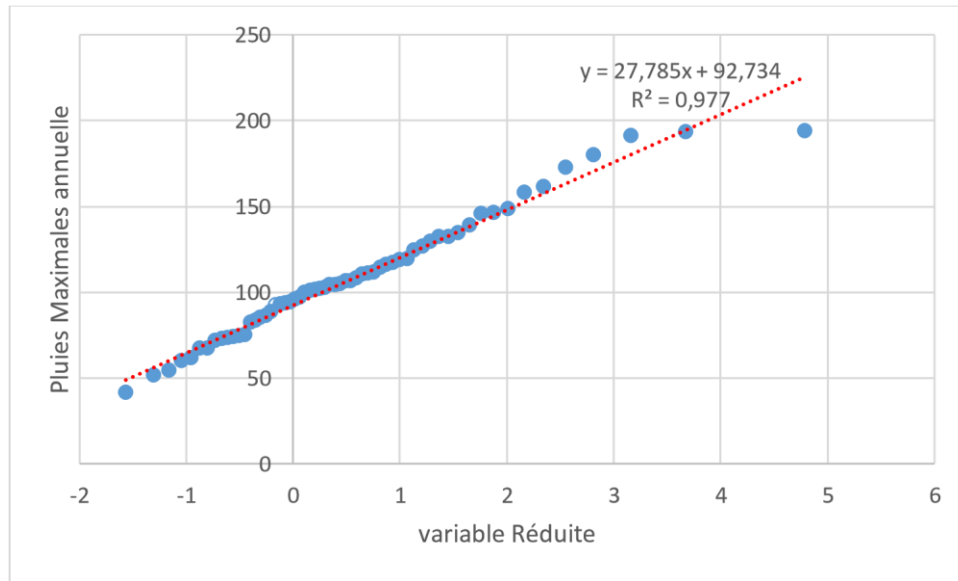


Figure 6 : Variation de la variable réduite en fonction des pluies maximales annuelles sur la période allant de 1961 à 2020

Sur ce graphe, il a été effectué un ajustement linéaire par la méthode des moindres carrés. Par suite, on obtient un $\mu = 92,734$ et $\lambda = 27,785$ avec $R^2 = 0,977$. En insérant ces paramètres dans la formule, on obtient un tableau exhaustif regroupant les fonctions de répartition associées aux pluies maximales annuelles. Ce tableau constitue une ressource essentielle pour notre analyse. De plus, nous utiliserons la courbe qui en découle pour calculer la pluie décennale, un paramètre clé dans notre étude. Les détails complets de ces données se trouvent en annexe 3 pour référence ultérieure.

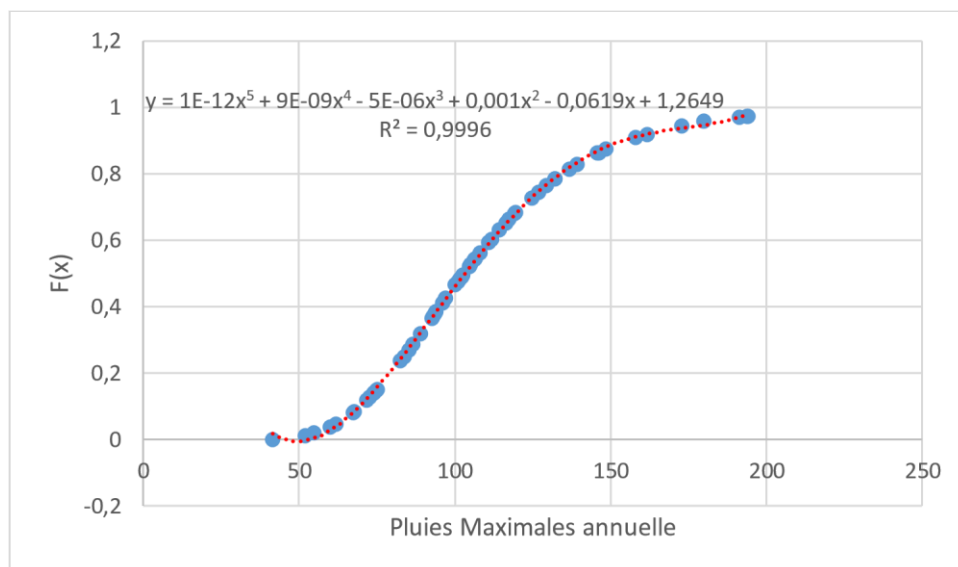


Figure 7 : Variation de la fonction de répartition en fonction des pluies maximales annuelles sur la période allant de 1961 à 2020

Une fois le $F(x)$ déterminé, il sera plus aisé de déterminer la hauteur de pluie pour une période de retour donnée. Ici, notre $F(x)$ n'est que le quantile q_x et nous ne sommes pas sans savoir qu'il y a une relation liant ce quantile et la période de retour T :

$$1 - q_x = \frac{1}{T} \quad (35)$$

Ce qui nous permet de trouver le quantile équivalent à la période de retour :

$$q_x = 1 - \frac{1}{T} \quad (36)$$

Ainsi, déterminer le X pour une période de retour de 10 ans revient à déterminer le X pour un quantile de 0,9 ce qui nous donne une pluie de 155,11 mm.

3.6.2. Par la méthode des moments

Par la méthode des moments, on obtient les valeurs $\mu = 92,65064$ et $\lambda = 27,75357$. Dans cette section, nous explorerons un tableau complet rassemblant les fonctions de densité de probabilité liées aux pluies maximales annuelles. Ce tableau revêt une importance cruciale dans notre analyse. De plus, nous utiliserons la courbe issue de ces données pour interpréter les ajustements et valider le modèle de Gumbel que nous avons adopté. Pour une consultation détaillée de ces informations, l'on peut se reporter à l'Annexe 4.

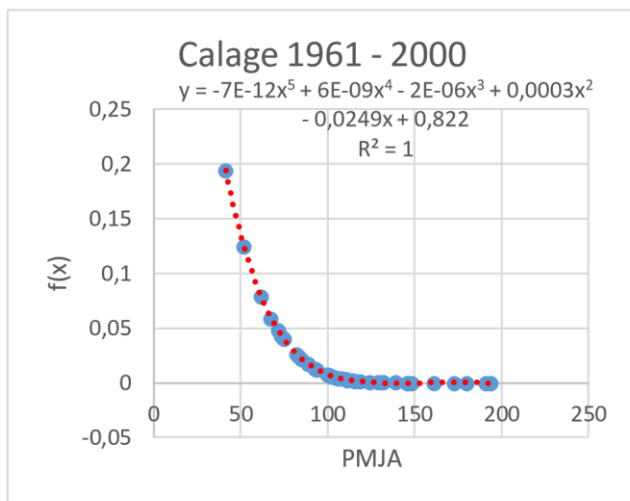


Figure 8: Calage du modèle

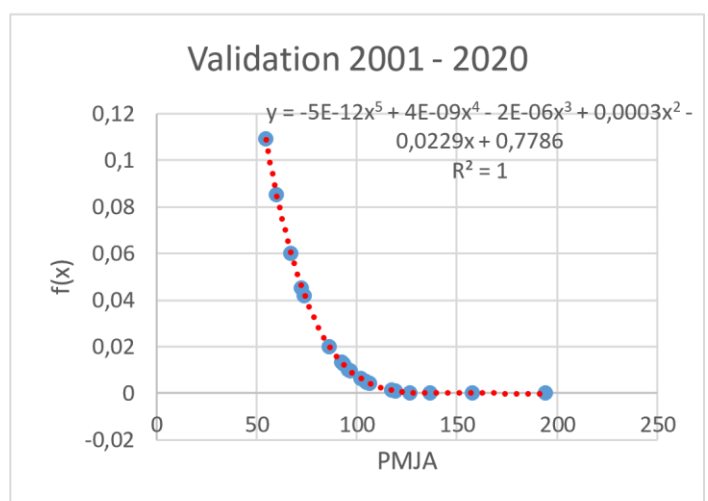


Figure 9: Validation du modèle

Les courbes issues du calage et de la validation du modèle sont issues d'un meilleur ajustement polynomial au sens des moindres carrés. Ces courbes sont presque similaires, ce qui prouve la fiabilité du modèle utilisé dans le cadre de notre étude.

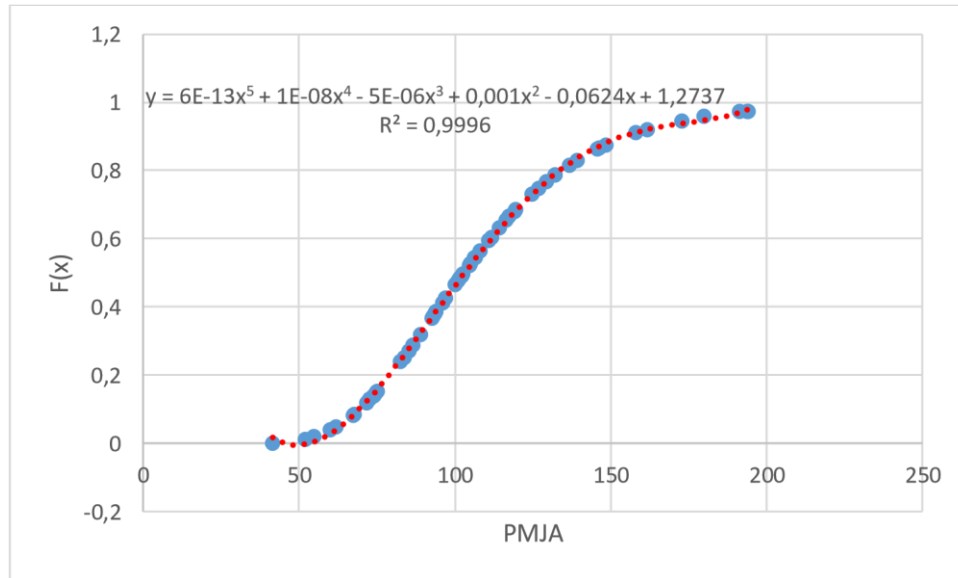


Figure 10 : Variation de la fonction de répartition en fonction des données de pluies sur la période allant de 1961 à 2020

Ainsi, déterminer le X pour une période de retour de 10 ans revient à déterminer le X pour un quantile de 0,9 ce qui nous donne une pluie de 155,92 mm.

3.6.3. Par la méthode de vraisemblance

Dans la première étape de notre analyse, nous avons utilisé la méthode de vraisemblance pour déterminer les paramètres μ et λ de la distribution de Gumbel. Ces paramètres permettent de caractériser la distribution et sont un point de départ pour notre modélisation. En appliquant la méthodologie de la maximisation de log vraisemblance, l'on a pu déterminer les paramètres μ et λ . On a donc :

$$\mu = 92,9 ; \lambda = 28$$

Dans la deuxième étape, nous avons utilisé les paramètres (μ) et (λ) obtenus pour calculer la fonction de densité de probabilité (Annexe 6) associée à la distribution de Gumbel. En ajustant notre modèle aux données, nous pouvons évaluer sa pertinence et son adéquation pour décrire les pluies maximales observées.

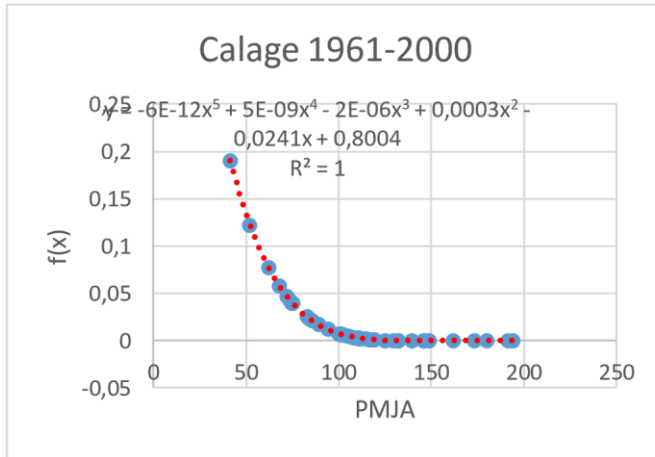


Figure 11: Calage du modèle

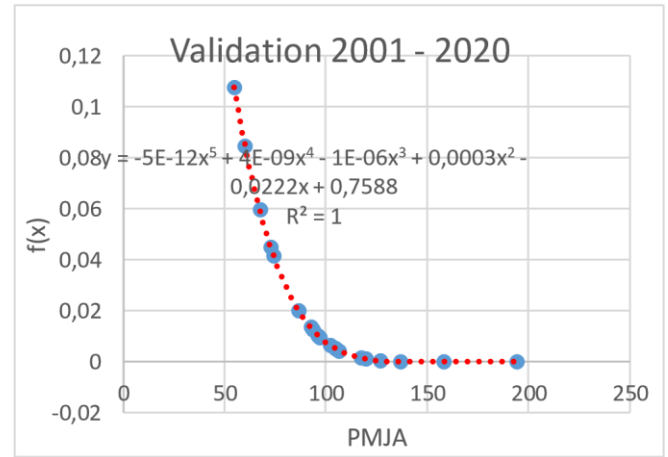


Figure 12: Validation du modèle

Les courbes issues du calage et de la validation du modèle sont issues d'un meilleur ajustement polynomial au sens des moindres carrés. Ces courbes sont presque similaires, ce qui peut nous renforcer donc notre certitude sur la fiabilité du modèle utilisé dans le cadre de notre étude.

Dans cette troisième étape cruciale de notre analyse, nous allons élaborer un tableau exhaustif présentant les valeurs de la fonction de répartition $F(x)$ en fonction des pluies journalières maximales disponible en Annexe 7. Cependant, ce tableau ne constitue qu'une étape préliminaire. L'élément clé de cette étape réside dans la création du graphique associé, car ce dernier jouera un rôle essentiel dans la détermination de la pluie décennale. Le graphe à venir nous permettra d'analyser de manière approfondie les caractéristiques des données, nous conduisant ainsi vers une estimation précise de la pluie décennale.

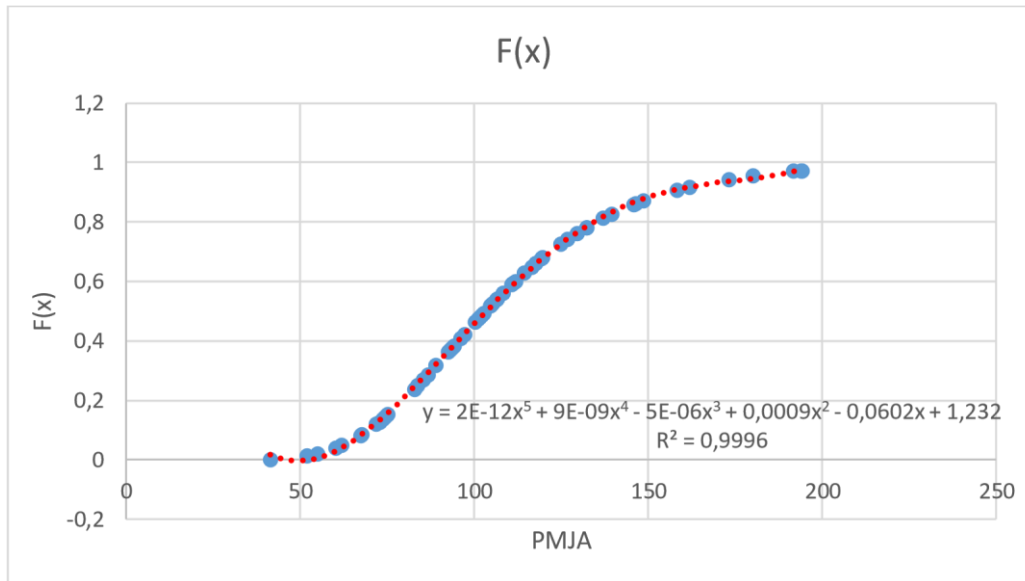


Figure 13 : Variation de la fonction de répartition en fonction des données maximales annuelles de pluies sur la période allant de 1961 à 2020

Ainsi, déterminer le X pour une période de retour de 10 ans revient à déterminer le X pour un quantile de 0,9 ce qui nous donne une pluie de 155,3 mm.

Les trois traitements statistiques des données pluviométriques conduisent presque à la même valeur de la hauteur de pluie décennale. La valeur retenue est $P_{10} = 155,4433\text{mm}$

Dans le cadre de notre analyse, nous avons examiné la répartition fréquentielle des maxima annuels des hauteurs de pluies journalières en utilisant l'échelle de probabilité de Gumbel. Ce qui ressort clairement du graphique est que l'ensemble des points représentatifs s'aligne de manière remarquable. Cette observation suggère que la loi de Gumbel est une représentation adéquate de la répartition fréquentielle de nos données, ce qui est essentiel pour notre modélisation.

À partir de cet ajustement théorique, nous pouvons en tirer plusieurs conclusions significatives. Tout d'abord, nous avons pu estimer la pluie journalière décennale, que nous notons à une valeur de 155,4433 mm. Cette conclusion repose sur le fait que trois méthodes distinctes de détermination des paramètres de Gumbel ont presque toutes convergé vers cette valeur.

Il est important de noter que la pluie journalière décennale est la quantité de précipitations attendue en moyenne une fois tous les dix ans. Sur une période de 60 ans (de 1961 à 2020), nous avons relevé que seulement sept événements dans l'ensemble, ont connu des précipitations

dépassant les 155,4433 mm. La pluie la plus intense observée au cours de cette période exceptionnelle a atteint 194,2 mm, ce qui correspond à un événement particulièrement remarquable, daté du 14 avril 2003.

Ces informations nous permettent d'appréhender la fréquence et l'intensité des précipitations extrêmes dans la région étudiée, des éléments essentiels pour une gestion efficace des ressources en eau et des risques liés aux précipitations.

Résultat du test de fiabilité et interprétations

Le tableau ci-dessous regroupe les différentes valeurs des métriques déterminées à l'issue du test de fiabilité des modèles.

Tableau 4: Test de fiabilité

	Méthode de vraisemblance	Méthode des moments
MAE	0,030907	0,03125
RSME	0,005853	0,005565
NASH	-0,68606	-0,68067

De ce tableau, on remarque que les valeurs métriques issues des deux modèles utilisés sont satisfaisantes pour valider l'utilisation de ces dernières dans notre étude.

Interprétation des courbes de résidus

Après observation du comportement des résidus dans les deux différents modèles, on constate qu'il n'y a pas une certaine tendance discernable. Ainsi, on peut supposer les deux modèles assez satisfaisants pour être utilisé dans notre étude.

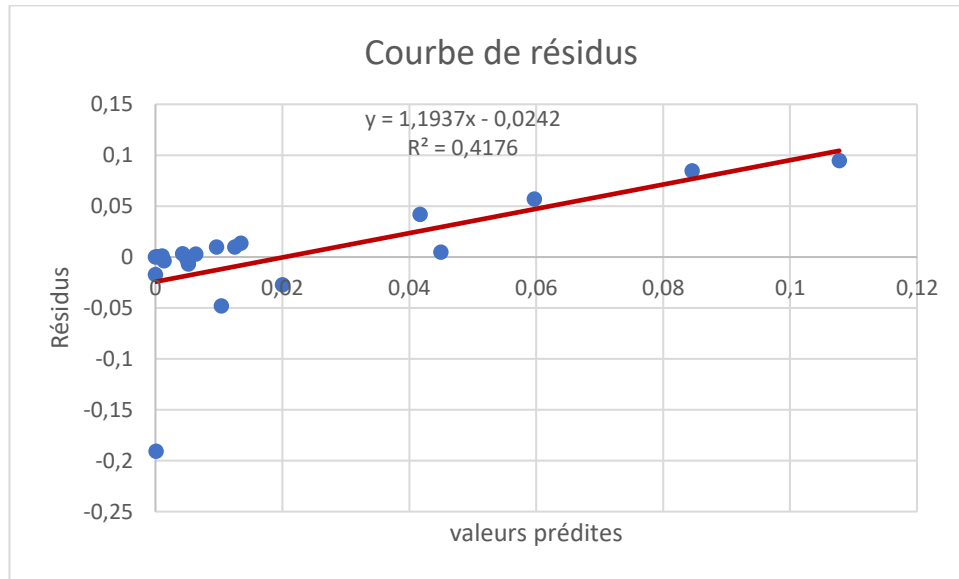


Figure 14: Variation des résidus en fonction des valeurs prédites (Méthode des Moments)

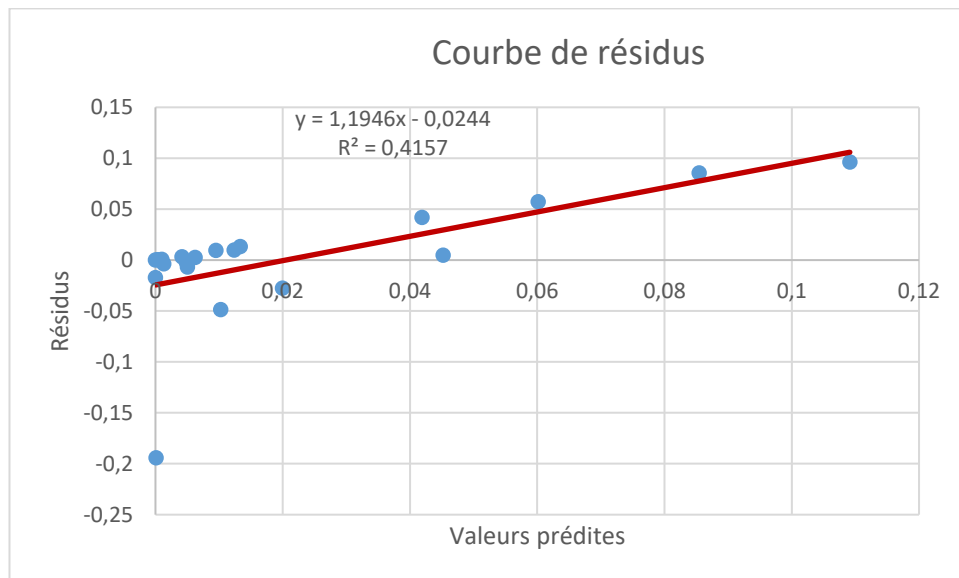


Figure 15: Variation des résidus en fonction des valeurs prédites (Méthode du Maximum de Vraisemblance)

3.7. Estimation des débits décennal

3.7.1. Estimation du débit décennal par la méthode de l'ORSTOM

En premier lieu, déterminons le volume ruisselé.

D'après les formules (22) et (23) on a :

$$V_r = K_r \cdot V_p \text{ et } V_p = \alpha HS$$

Déterminons le coefficient d'abattement.

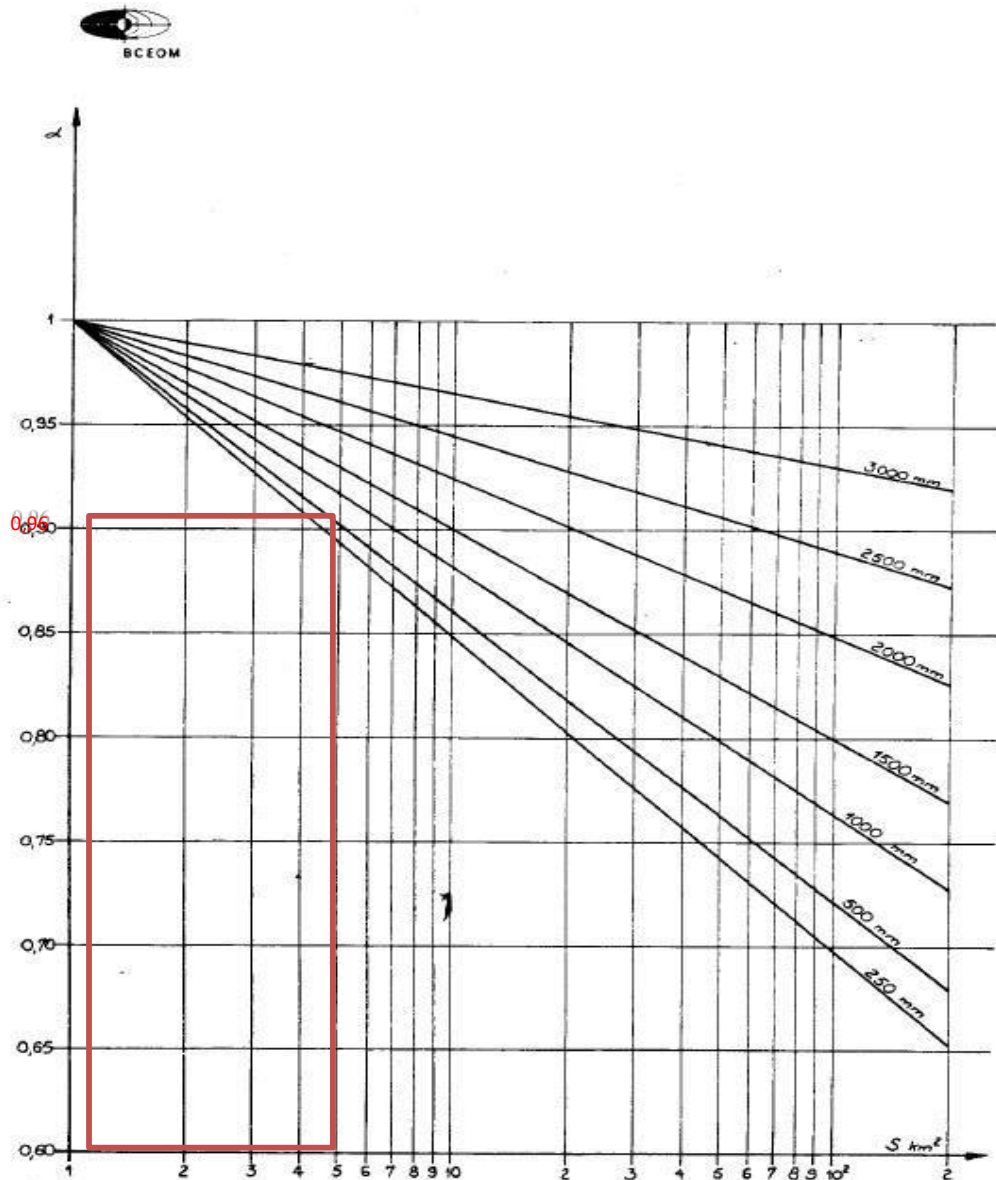


Figure 16: Variation du Coefficient d'abattement avec la surface pour différentes pluviosités

Pour déterminer le coefficient d'abattement à partir d'un abaque, on commence par identifier la courbe correspondant à la pluviométrie donnée. Ensuite, on trouve la valeur de la surface sur l'axe des abscisses et on trace une ligne verticale depuis cette valeur jusqu'à ce qu'elle intercepte la courbe de la pluviométrie. A partir du point d'intersection, on trace une ligne horizontale vers l'axe des ordonnées. La valeur où cette ligne horizontale croise l'axe des ordonnées représente le coefficient d'abattement recherché.

Pour $S = 4,539 \text{ km}^2$; $\alpha = 0,96$

Ensuite, il sera lieu de déterminer le coefficient de ruissellement K_r . Pour ce faire, on aura besoin de la nature du terrain.

Nature du terrain :

L'étude pédologique des sols de la zone du projet (la ville de Cotonou) nous renseigne :

- d'une part des sables littoraux récents en provenance de l'atlantique,
- ensuite des dépôts de sable gris fin intercalés avec des limons argileux lacustres avec des tourbes,
- enfin des terrasses de sable fin coloré jaune à rougeâtre et de limon dont l'origine est à chercher dans l'érosion des terres de barre des plateaux continentaux voisins.

Ce qui permet de conclure que les sols sont à caractère prédominance sableux argileux (plus de sable que d'argile) sur le plateau et argileux sableux (plus d'argile que de sable) dans la vallée. Ceci correspond à la classe P4 :

Relief du terrain

La pente moyenne du terrain est variable et autour de 1,1%. Ce qui correspond à des pentes modérées comprises entre 0,5 et 1 % : ce sont des terrains intermédiaires entre la plaine et les zones à ondulation de terrain. Ce qui correspond à un indice de **R3**. Le coefficient de ruissellement sera déterminé à partir de la courbe **R3P4**.

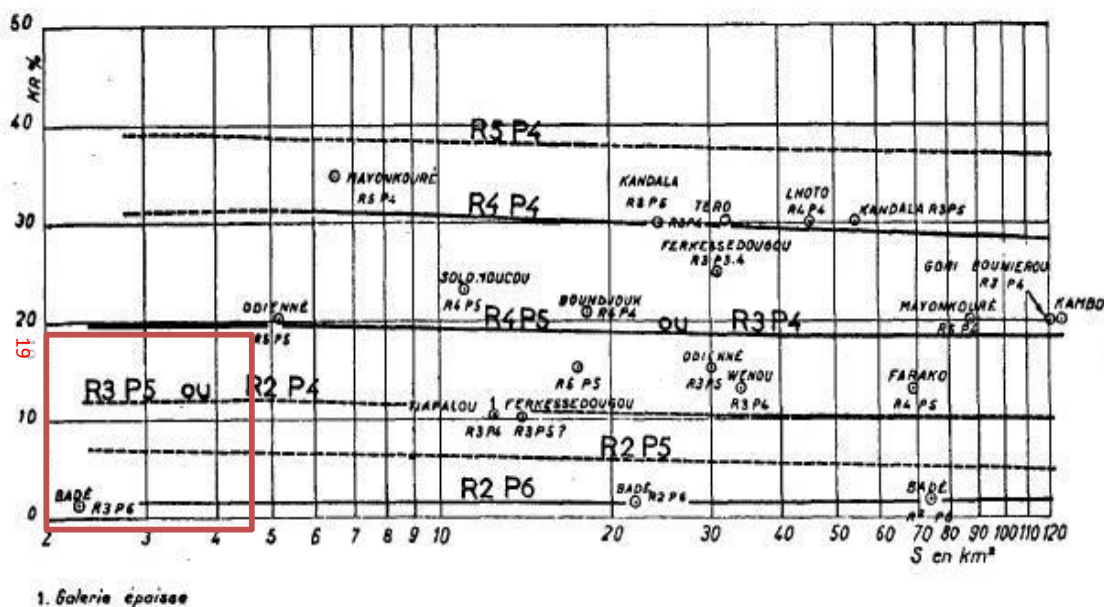


Figure 17: Coefficient de ruissellement. Régimes tropicaux et tropicaux de transition (p varie de 800 à 1600 mm). Perméabilité P4 et P5 (D'après ORSTOM)

La valeur du coefficient de ruissellement (K_r) est 19%.

Le volume ruisselé de la crue décennale est donc :

$$V_r = S * K_r * \alpha * P_{10}$$

$$V_r = 4,539 * 0,19 * 0,96 * 155,4433 * 10 * 100$$

$$(1\text{mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha})$$

$$V_r = 128693,6 \text{ m}^3$$

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 R_3

$$\text{Avec } S = 4,539 \text{ Km}^2$$

Du graphique ci-dessous, on retient un temps de base de 8h

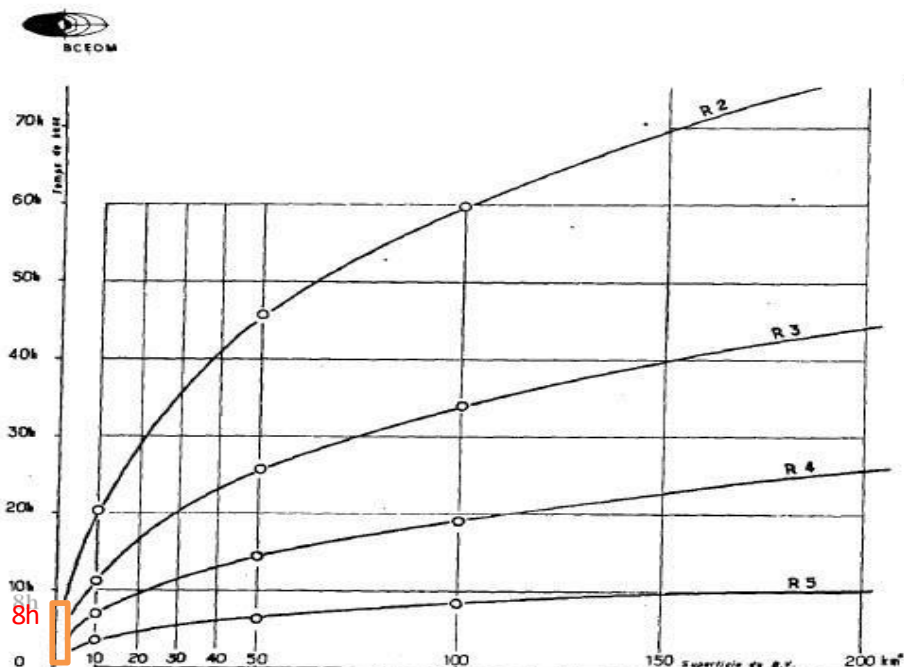


Figure 18: Régimes tropicaux et transition. Temps de base en fonction de la superficie du bassin

Le temps de base ainsi déterminé, on a un débit moyen égale à :

$$Q_{moy} = \frac{V_r}{T_b} \quad (37)$$

$$Q_{moy} = \frac{128693,6}{8 \times 3600}$$

$$Q_{moy} = 4,46853 \text{ m}^3/\text{s}$$

Une fois le débit moyen déterminé, on peut donc déterminer le débit maximal.

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

$$K = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}} \quad (38)$$

$$Q_{max} = 2,5 \times 4,46853$$

$$Q_{max} = 11,17132 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (39)$$

On conclura par la 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 :

$$Q_p = 1,05 \times Q_{max} \quad (40)$$

$$Q_p = 1,05 \times 11,17132$$

$$Q_p = 11,71989$$

3.7.2. Estimation par la méthode du CIEH relative aux bassins du BENIN et du TOGO

Le débit décennal en m^3/s est donné par les formules suivantes :

$$Q_{10} = 0,167 \times S^{0,435} \times Kr^{1,204} \quad (41)$$

$$Kr = 300 \text{ Pan}^{-0,3}$$

D'après le résultat des paramètres physiques du bassin, on a :

$$S = 4,539 \text{ km}^2$$

$$I_g = 0,92$$

Pan = 1300 mm (D'après la carte de pluviosité interannuelle de l'Annexe 8

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

Tableau 5:Récapitulatif des débits déterminés

PARAMETRES	DETERMINATION	UNITES	RESULTATS
SURFACE (S)	Extraction sur Global Mapper	Km ²	4,54
PLUIE JOURNALIERE MAXIMALE DECENNAL (P10)	Analyse fréquentielle des données pluviométriques	mm	155,4433
PLUIE ANNUELLE MOYENNE	Analyse fréquentielle des données pluviométriques	mm	1300
INDICE GLOBAL DES PENTES (IG)	Voir tableau caractéristiques physique du Bassin Versant	m/Km	0,92
COEFFICIENT D'ABATTEMENT (A)	(Fig. 15 de BCEOM)	-	0,96
COEFFICIENT DU RUISSELLEMENT KR	déterminé à partir de la courbe R ₃ P ₄ . (Fig. 16 de BCEOM) ¹	%	19
LE VOLUME RUISSELLE DE PLUIE DECENNAL V_r	$V_r = S * K_r * \alpha * P_{10}$	m ³	128693,6 m3
TEMPS DE BASE TB	Il sera fonction de la surface tributaire et de l'indice R3 (fig 17 de BCEOM)	h	8
LE DEBIT MOYEN DE LA CRUE DECENNAL	$Q_{moy} = \frac{V_r}{T_b}$ $Q_{moy} = \frac{S * K_r * \alpha * P_{10}}{T_b}$	m ³ /s	4,46853 m3/s
LE DEBIT MAXIMAL DE LA CRUE DECENNAL	$Q_{max} = k * Q_{moy}$	m ³ /s	11,17132 m3/s
DEBIT DECENNALORSTOM(Q₁₀)	$Q_p = 1,05 * Q_{max}$	m ³ /s	11,72989 m3/s

DEBIT DECENNAL CIEH (Q ₁₀)	$Q_{10} = 0,167 * S^{0,435} * Kr^{1,204}$	m ³ /s	23,58 m ³ /s
---	---	-------------------	-------------------------

3.8. Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse approfondie des maxima annuels de précipitation de notre bassin versant a été réalisée. Les indicateurs clés, tels que les effectifs, les fréquences et les fréquences cumulées croissantes, ont été déterminés pour caractériser la distribution des données. De plus, les paramètres physiques du bassin ont été évalués pour soutenir notre modélisation hydrologique, aboutissant au calcul du débit de point par la méthode de l'ORSTOM.

L'estimation de la pluie décennale a été effectuée en utilisant la distribution de Gumbel avec une approche rigoureuse pour obtenir des résultats fiables.

En résumé, nos résultats fournissent une base solide pour la gestion des ressources en eau et la prise de décisions éclairées en matière de gestion des risques liés aux précipitations dans notre bassin versant. Les données collectées, les méthodes utilisées et les conclusions tirées constituent une contribution précieuse à la compréhension des phénomènes hydrologiques dans notre région d'étude.

Clarification Conceptuelle

Bénin : Le Bénin est situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer (entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude nord et les méridiens 1° et 30°40' de longitude est).

Programme d'Assainissement Pluvial de Cotonou (PAPC) : Le Programme d'Assainissement Pluvial de Cotonou (PAPC) a pour objectif de réduire la vulnérabilité des populations face aux inondations et de rendre la ville plus belle et plus propre.

Bassin XX : Le Bassin « XX », est un ensemble de bras qui couvre environs 524 hectares dont l'aval se situe au niveau du CEG le Nokoué, et l'amont dans les environs du CEG les Pylônes. L'essentiel des travaux sur ce site est la création de bassins de rétention d'une capacité de 1,5 millions de mètres cubes d'eau.

Boue : La boue est un mélange d'eau et de particules sédimentaires fines de limons et d'argile

Rabanape : Ensemble de matériels destinés à évacuer l'eau. Elle est constituée de moteur pompe, d'aiguille d'implantation, de flexible et d'évacuateur.



Image 4:Rabanape

Géotextile : Les géotextiles sont des tissus en polymères (naturels ou synthétiques), plans, perméables, utilisés en contact avec un sol et/ou d'autres matériaux pour des applications en génie Civil.

Il s'agit d'une trame, tissée ou non, qui a la propriété de laisser passer l'eau (perméable aux fluides). Elle est également appelée « anti contaminant ».



Image 5: Matelas Reno

Matelas Reno : Le matelas Reno est une structure composée de maille hexagonale double fil torsadé. Matelas Reno sont remplis de pierres sur le chantier de forme souple et perméables, monolithiques structures tels que rivièrè Banque garnitures de protection et canal pour la lutte contre l'érosion. Le fil d'acier utilisé pour fabriquer le matelas est acier galvanisé fortement souple trempé

Cage : C'est un constituant du matelas Reno ; Elle servira de récipient pour les gabions.



Image 6: Cage

Moellons : Encore appelé Gabions, ceux sont les pierres qui servent à remplir les cages du matelas Reno



Image 7: Tas de gabions

Ligature : Ce sont des cordes assez résistantes servant à connecter les cages entre elles.



Image 8: Botte de ligature

CONCLUSION

Ce rapport de stage représente une étape importante de notre parcours académique et professionnel en hydrologie. L'objectif de ce stage était de reprendre et d'approfondir une étude hydrologique sur le bras X3 du bassin XX objet de travaux par la structure d'accueil TECKNICART Ingénieurs-Conseils, un domaine très crucial pour la gestion des ressources en eau et la prévention des risques de crues dans la commune de Cotonou.

Durant ce stage, nous avons pu mettre en pratiques nombreuses connaissances théoriques ayant servi dans la collecte des données météorologiques, l'utilisation d'outils avancés de cartographie et de modélisation hydrologique pour analyser les données recueillies.

Les résultats des études hydrologiques ont mis en évidence des tendances significatives dans le comportement hydrologique du bras X3 du Bassin XX en particulier en ce qui concerne le débit de crue maximale déterminé par la méthode de ORSTOM et celle du CIEH. Ces résultats ont des implications importantes dans la planification des infrastructures hydrauliques dans la région.

Partant de la détermination du débit de projet, elles ont abouti à la détermination des dimensions idéales des ouvrages et finalement au choix des dimensions à appliquer sur le chantier de construction. Le débit de projet a été calculé avec un temps de retour de dix (10) ans. Il a été noté une rigueur exceptionnelle dans les calculs effectués et dans le suivi des travaux par la structure d'accueil TECKNICART Ingénieurs-Conseils. Toutefois, il serait intéressant de prendre en compte les variations dues aux changements climatiques durant la phase des études techniques de projet afin de s'aligner sur les réalités environnementales et climatiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- Programme d'Assainissement de la ville de Cotonou (PAPC)
- 2- Rapport APD Annexes version révisée définitive Mai 2019
- 3- Programme d'Action du Gouvernement (PAG Bénin Révélé 2016-2021)
- 4- Programme d'Assainissement Pluvial de la ville de Cotonou (PAPCO) 2019
- 5- FAO, 1996. Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche, 265p
- 6- Renard, Benjamin 2014. Probabilité et Statistique
- 7- PUECH (C.), CHABI-GONNI (D.). 1984. - Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et centrale. CIEH, Ouagadougou, 91 p
- 8- Matieres, A. D. E. S. (s. d.). Résumé-CHAPITRE 2 LE BASSIN VERSANT ET SON COMPLEXE Définition du bassin versant
- 9- Eau, L. E. C. D. E. L. (s. d.). 1 Le Bassin Versant 1.1. Le Cycle De L'Eau. 1.12.
- 10- J. RODIER, C. AUVRAY. (s. d.). Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale.
- 11- DEHOUMON, D. A. B. (2022). Etude hydrologique et hydraulique de la rue exutoire du réseau de rues d'Agla dans le cadre du Programme d'Assainissement Pluvial de la ville de (PAPC) lot AFD-01. Université D'ABOMEY-CALAVI (UAC).
- 12- 'Avant-Projet Détaillé (APD) et des Dossiers d'Appel d'Offres des ouvrages du Plan Directeur d'Assainissement pluvial de la Ville de Cotonou-LOT MO1906 (Vol. 1). (s. d.).

ANNEXES

Annexe 1: Pluies maximales annuelles

Années	Pluies MAX
1961	93
1962	191,5
1963	180,1
1964	108,2
1965	104,7
1966	161,7
1967	101,6
1968	119,2
1969	71,8
1970	41,5
1971	110,8
1972	129,4
1973	67,7
1974	173
1975	193,8
1976	94,1
1977	111
1978	89
1979	146,3
1980	74,8
1981	61,9
1982	148,6
1983	111,7
1984	51,9
1985	75,2
1986	102,6
1987	139,4
1988	106,4
1989	101
1990	83,7
1991	114,3
1992	132,2
1993	124,7
1994	116,4

1995	85,3
1996	132,2
1997	145,8
1998	82,7
1999	100,2
2000	73,8
2001	54,8
2002	74,2
2003	194,2
2004	102,2
2005	117,5
2006	126,8
2007	105,1
2008	106,6
2009	86,7
2010	134,9
2011	67,3
2012	119,6
2013	96,1
2014	60,1
2015	97,1
2016	104,6
2017	93,6
2018	158,2
2019	92,6
2020	72,8

Annexe 2 : Variation de la variable réduite en fonction des pluies maximales annuelles

Années	Pluies MAX	Rang	$f(x_i)=(i-0,5)/n$	$U=-\ln[-\ln(f(x_i))]$
1970	41,5	1	0,008333333	-1,56600663
1984	51,9	2	0,025	-1,305322741
2001	54,8	3	0,041666667	-1,156269006
2014	60,1	4	0,058333333	-1,044360796
1981	61,9	5	0,075	-0,951761023
2011	67,3	6	0,091666667	-0,871124511
1973	67,7	7	0,108333333	-0,798651759
1969	71,8	8	0,125	-0,732099368
2020	72,8	9	0,141666667	-0,67002102
2000	73,8	10	0,158333333	-0,611423307
2002	74,2	11	0,175	-0,555590156
1980	74,8	12	0,191666667	-0,501985178
1985	75,2	13	0,208333333	-0,45019365
1998	82,7	14	0,225	-0,399886159

1990	83,7	15	0,241666667	-0,350794829
1995	85,3	16	0,258333333	-0,302697183
2009	86,7	17	0,275	-0,255404859
1978	89	18	0,291666667	-0,208755483
2019	92,6	19	0,308333333	-0,162606681
1961	93	20	0,325	-0,116831558
2017	93,6	21	0,341666667	-0,071315204
1976	94,1	22	0,358333333	-0,025951943
2013	96,1	23	0,375	0,019356889
2015	97,1	24	0,391666667	0,064704784
1999	100,2	25	0,408333333	0,110181624
1989	101	26	0,425	0,155875037
1967	101,6	27	0,441666667	0,201871625
2004	102,2	28	0,458333333	0,248258101
1986	102,6	29	0,475	0,295122383
2016	104,6	30	0,491666667	0,342554679
1965	104,7	31	0,508333333	0,390648599
2007	105,1	32	0,525	0,439502333
1988	106,4	33	0,541666667	0,489219929
2008	106,6	34	0,558333333	0,539912709
1964	108,2	35	0,575	0,591700887
1971	110,8	36	0,591666667	0,644715432
1977	111	37	0,608333333	0,699100262

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

1983	111,7	38	0,625	0,755014863
1991	114,3	39	0,641666667	0,812637451
1994	116,4	40	0,658333333	0,872168851
2005	117,5	41	0,675	0,933837306
1968	119,2	42	0,691666667	0,997904516
2012	119,6	43	0,708333333	1,064673327
1993	124,7	44	0,725	1,134497663
2006	126,8	45	0,741666667	1,207795525
1972	129,4	46	0,758333333	1,285066322
1992	132,2	47	0,775	1,366914374
1996	132,2	48	0,791666667	1,454081455
2010	134,9	49	0,808333333	1,547492919
1987	139,4	50	0,825	1,64832484
1997	145,8	51	0,841666667	1,758104838
1979	146,3	52	0,858333333	1,878869185
1982	148,6	53	0,875	2,013418678
2018	158,2	54	0,891666667	2,165758687
1966	161,7	55	0,908333333	2,341909662
1974	173	56	0,925	2,551539632
1963	180,1	57	0,941666667	2,811680147
1962	191,5	58	0,958333333	3,156849494
1975	193,8	59	0,975	3,676247258
2003	194,2	60	0,991666667	4,783310536

Annexe 3: Fonction de répartition par la méthode d'ajustement statique

Années	PJAM	F(x)
1961	93	0,371401
1962	191,5	0,971814
1963	180,1	0,957821
1964	108,2	0,563754
1965	104,7	0,522005
1966	161,7	0,919831
1967	101,6	0,48345
1968	119,2	0,679931
1969	71,8	0,11952
1970	41,5	0,001797
1971	110,8	0,59337
1972	129,4	0,765494
1973	67,7	0,085261
1974	173	0,945878
1975	193,8	0,974023

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

1976	94,1	0,385958
1977	111	0,595595
1978	89	0,318594
1979	146,3	0,864627
1980	74,8	0,148547
1981	61,9	0,048144
1982	148,6	0,874676
1983	111,7	0,603323
1984	51,9	0,012937
1985	75,2	0,152651
1986	102,6	0,496032
1987	139,4	0,829892
1988	106,4	0,542539
1989	101	0,47584
1990	83,7	0,250518
1991	114,3	0,631181
1992	132,2	0,785358
1993	124,7	0,728705
1994	116,4	0,652682
1995	85,3	0,270694
1996	132,2	0,785358
1997	145,8	0,862346
1998	82,7	0,238127
1999	100,2	0,465628
2000	73,8	0,138521
2001	54,8	0,019905
2002	74,2	0,14249
2003	194,2	0,97439
2004	102,2	0,491015
2005	117,5	0,663581
2006	126,8	0,745689
2007	105,1	0,526878
2008	106,6	0,544924
2009	86,7	0,288647
2010	136,9	0,81545
2011	67,3	0,082271
2012	119,6	0,68369
2013	96,1	0,41234
2014	60,1	0,039298
2015	97,1	0,425458
2016	104,6	0,520783
2017	93,6	0,379344

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

2018	158,2	0,90957
2019	92,6	0,366105
2020	72,8	0,128841

Annexe 4 : Fonction densité de probabilité par la méthode des moments

Years	Max Year	f(x)
1961	93	0,012924634
1962	191,5	5,16409E-19
1963	180,1	1,10707E-13
1964	108,2	0,00357151
1965	104,7	0,004985714
1966	161,7	1,77332E-08
1967	101,6	0,006562789
1968	119,2	0,001025234
1969	71,8	0,047651059
1970	41,5	0,194237673
1971	110,8	0,002738274
1972	129,4	0,00022343
1973	67,7	0,058934295
1974	173	2,78616E-11
1975	193,8	2,26625E-20
1976	94,1	0,011924057
1977	111	0,002681062
1978	89	0,01710177
1979	146,3	5,19891E-06
1980	74,8	0,040526562
1981	61,9	0,078426084
1982	148,6	2,63393E-06
1983	111,7	0,002488086
1984	51,9	0,124260102
1985	75,2	0,039643013
1986	102,6	0,006017882
1987	139,4	3,05158E-05
1988	106,4	0,004253802
1989	101	0,006907166
1990	83,7	0,024108431
1991	114,3	0,001864024
1992	132,2	0,00013553
1993	124,7	0,000475338
1994	116,4	0,001455855
1995	85,3	0,021800356

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

1996	132,2	0,00013553
1997	145,8	5,98856E-06
1998	82,7	0,025641886
1999	100,2	0,007387365
2000	73,8	0,042802246
2001	54,8	0,109127578
2002	74,2	0,041880391
2003	194,2	1,28174E-20
2004	102,2	0,00623156
2005	117,5	0,001272296
2006	126,8	0,000343412
2007	105,1	0,00480547
2008	106,6	0,004173426
2009	86,7	0,019921168
2010	136,9	5,3121E-05
2011	67,3	0,060139039
2012	119,6	0,000973091
2013	96,1	0,010255011
2014	60,1	0,085434537
2015	97,1	0,009489551
2016	104,6	0,005031569
2017	93,6	0,012371374
2018	158,2	8,37354E-08
2019	92,6	0,013303646
2020	72,8	0,045175966

Annexe 5 : Fonction de répartition par la méthode des moments

Années	PJMA	F(x)
1961	93	0,37251
1962	191,5	0,972008
1963	180,1	0,958091
1964	108,2	0,564928
1965	104,7	0,523189
1966	161,7	0,920277
1967	101,6	0,484632
1968	119,2	0,681
1969	71,8	0,120067
1970	41,5	0,001808
1971	110,8	0,594527
1972	129,4	0,766413
1973	67,7	0,085678
1974	173	0,946207

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

1975	193,8	0,974205
1976	94,1	0,387082
1977	111	0,596751
1978	89	0,319633
1979	146,3	0,865278
1980	74,8	0,149191
1981	61,9	0,0484
1982	148,6	0,875294
1983	111,7	0,604473
1984	51,9	0,013012
1985	75,2	0,153308
1986	102,6	0,497216
1987	139,4	0,830649
1988	106,4	0,543719
1989	101	0,47702
1990	83,7	0,251433
1991	114,3	0,632307
1992	132,2	0,786232
1993	124,7	0,729697
1994	116,4	0,653786
1995	85,3	0,27165
1996	132,2	0,786232
1997	145,8	0,863005
1998	82,7	0,239014
1999	100,2	0,466805
2000	73,8	0,139133
2001	54,8	0,020019
2002	74,2	0,143115
2003	194,2	0,97457
2004	102,2	0,492198
2005	117,5	0,664672
2006	126,8	0,746648
2007	105,1	0,528062
2008	106,6	0,546104
2009	86,7	0,289636
2010	136,9	0,816248
2011	67,3	0,082676
2012	119,6	0,684754
2013	96,1	0,413488
2014	60,1	0,039511
2015	97,1	0,426615
2016	104,6	0,521967

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

2017	93,6	0,380461
2018	158,2	0,910058
2019	92,6	0,367208
2020	72,8	0,12942

Annexe 6 : Fonction densité de probabilité par la méthode du maximum vraisemblance

Années	PJAM	f(x)
1961	93	0,013045
1962	191,5	2,14E-18
1963	180,1	2,64E-13
1964	108,2	0,003677
1965	104,7	0,005104
1966	161,7	2,61E-08
1967	101,6	0,006689
1968	119,2	0,001081
1969	71,8	0,047391
1970	41,5	0,190903
1971	110,8	0,002832
1972	129,4	0,000244
1973	67,7	0,058497
1974	173	5,27E-11
1975	193,8	1,09E-19
1976	94,1	0,012048
1977	111	0,002774
1978	89	0,017199
1979	146,3	6,31E-06
1980	74,8	0,040369
1981	61,9	0,077648
1982	148,6	3,27E-06
1983	111,7	0,002578
1984	51,9	0,122559
1985	75,2	0,039498
1986	102,6	0,006142
1987	139,4	3,51E-05
1988	106,4	0,004366
1989	101	0,007034
1990	83,7	0,024147
1991	114,3	0,001942
1992	132,2	0,00015
1993	124,7	0,00051

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

1994	116,4	0,001524
1995	85,3	0,021861
1996	132,2	0,00015
1997	145,8	7,24E-06
1998	82,7	0,025665
1999	100,2	0,007516
2000	73,8	0,042613
2001	54,8	0,107747
2002	74,2	0,041704
2003	194,2	6,32E-20
2004	102,2	0,006356
2005	117,5	0,001336
2006	126,8	0,000371
2007	105,1	0,004922
2008	106,6	0,004285
2009	86,7	0,019997
2010	136,9	6,02E-05
2011	67,3	0,059682
2012	119,6	0,001027
2013	96,1	0,010383
2014	60,1	0,084526
2015	97,1	0,009619
2016	104,6	0,00515
2017	93,6	0,012494
2018	158,2	1,17E-07
2019	92,6	0,013422
2020	72,8	0,044953

Annexe 7: Fonction de répartition par la méthode de maximum de vraisemblance

Années	PJAM	F(x)
1961	93	0,369193
1962	191,5	0,970875

1963	180,1	0,956561
1964	108,2	0,560451
1965	104,7	0,518866
1966	161,7	0,917888
1967	101,6	0,480502
1968	119,2	0,676443
1969	71,8	0,119484

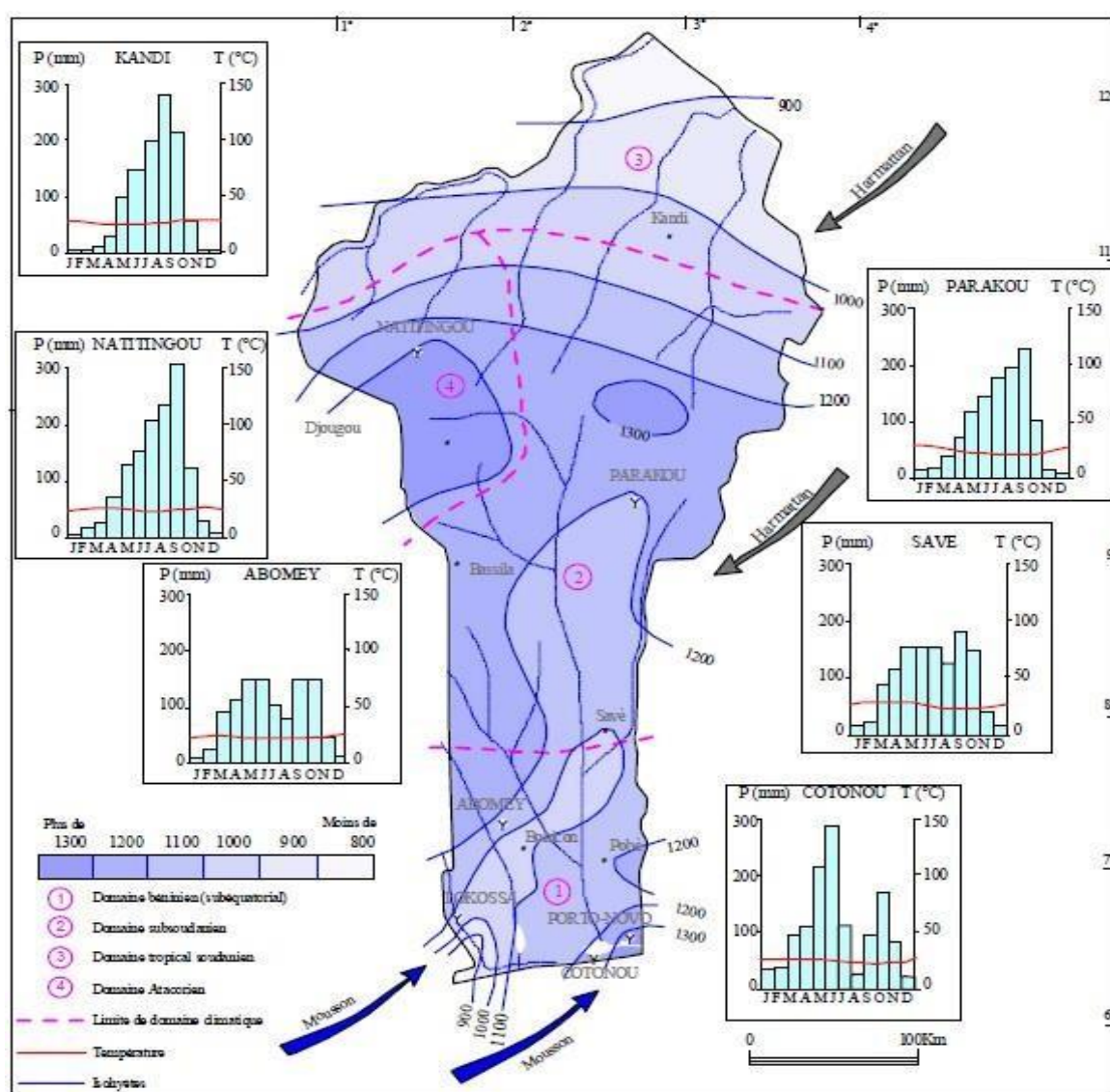
**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

1970	41,5	0,001893
1971	110,8	0,589978
1972	129,4	0,762189
1973	67,7	0,085469
1974	173	0,944379
1975	193,8	0,973141
1976	941	0,383641
1977	11,1	0,592198
1978	89	0,31681
1979	146,3	0,861996
1980	74,8	0,148271
1981	61,9	0,048524
1982	148,6	0,872151
1983	111,7	0,599909
1984	51,9	0,013241
1985	75,2	0,15234
1986	102,6	0,493018
1987	139,4	0,826956
1988	106,4	0,539313
1989	101	0,472935
1990	83,7	0,249329
1991	114,3	0,627717
1992	132,2	0,782143
1993	124,7	0,725284
1994	116,4	0,649197
1995	85,3	0,269325
1996	132,2	0,782143
1997	145,8	0,859693
1998	82,7	0,23705
1999	100,2	0,462781
2000	73,8	0,13833
2001	54,8	0,020263
2002	74,2	0,142266
2003	194,2	0,973517
2004	102,2	0,488027
2005	117,5	0,660092
2006	126,8	0,742313
2007	105,1	0,523718
2008	106,6	0,541689
2009	86,7	0,287119
2010	136,9	0,812412
2011	67,3	0,082497

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL DE LA VILLE DE COTONOU (PAPC) :
TENDANCES SIGNIFICATIVES DANS LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU SOUS
BASSIN VERSANT X3 DU LOT AFD-BASSIN XX**

2012	119,6	0,680204
2013	96,1	0,409834
2014	60,1	0,039692
2015	97,1	0,422863
2016	104,6	0,51765
2017	93,6	0,377075
2018	158,2	0,907477
2019	92,6	0,363938
2020	72,8	0,12873

Annexe 8: Carte de pluviosité interannuelle (isohyètes)



Annexe 9 : Caractéristiques des bassins versants tributaires du projet

BRAS X2							
Nom du bassin versant	Zone	Surface tributaire (ha)	pente m/m	longueur hydraulique (m)	$L/(p^{1/0,5})$	Temps de concentration t_c (min)	Débit corrigé (m^3/s)
BV 1	(Côté Est) Aval bras X2 (bassin de retention)	8,20	0,87	334	358,09	1,81	3,999
BV 1 (côté Ouest)	(Côté Ouest) Aval bras X2 (bassin de retention)	4,60	0,87	295	316,27	1,64	2,335
BV 3 (côté Est)	(Côté Est) amont bras X2	9,30	0,7	350	418,33	2,04	4,335
BV 3 (côté Ouest)	(Côté Ouest) amont bras X2	8,40	0,7	480	573,71	2,60	3,652
BV 2(côté Ouest)	(Côté Ouest) bras X2a	5,40	1,05	310	302,53	1,59	2,777
BRAS X3							
BV17	(Côté Sud) du début sur 922 mètres environ le long du bras X3	18,90	0,69	285	343,10	1,75	8,679
BV17	(Côté Nord) du début sur 922 mètres environ le long du bras X3	2,90	0,69	80	96,31	0,66	1,712
BV15	(Côté Sud) Sur 150 mètres environ le long du bras X3	2,40	0,79	210	236,27	1,31	1,315
BV15	(Côté Nord) Sur 150 mètres environ le long du bras X3	2,20	0,79	80	90,01	0,62	1,375
BV15 bis	(Côté Sud) Sur 400 mètres environ jusqu'au dalot existant	5,15	0,79	250	281,27	1,50	2,670
BV1	(Côté Sud) Du dalot existant jusqu'au point de convergence	1,10	0,87	125	134,01	0,85	0,699
BV12	(Côté Nord) Du dalot existant jusqu'au point de convergence	6,90	0,87	170	182,26	1,07	3,752