UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Contribution à l'amélioration des études d' aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi.

Nizigiyimana, Willy; Sous la direction de : Dr. Ir. Nzeyimana Joseph

2023
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1732

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

République du Burundi

Ministère de l'éducation nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Master en Génie Civil, aménagement et Maîtrise des Projets.

Année Académique: 2021-2022

CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DES ETUDES D'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE PAR LA PRODUCTION DE LA CARTE NATIONALE DES ISOHYETES EXTREMES.

Cas de la Région : Nord-Ouest du Burundi

Mémoire

Présenté publiquement par :

NIZIGIYIMANA Willy

En vue de l'obtention du grade de Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets.

Soutenu le20/07/2023 devant le jury composé de:

Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor	**: Président**
Dr. Ir. MVUYEKURE Jean Claude	**: Lecteur principal**
Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph	**: Directeur**

Bujumbura, juillet 2023

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor : Président

Dr. Ir. MVUYEKURE Jean Claude : Lecteur principal

Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph : Directeur

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

DEDICACE

A Dieu Tout Puissant ;

A mes chers parents que dieu les garde et les protège ;

A mes sœurs et frères ;

A toutes les amies et à toutes les personnes intéressées par mon travail ;

A mes camarades étudiants.

Je dédie ce travail

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

REMERCIEMENT

- Je tiens à remercier en premier lieu à Dieu qui m'a donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.
- Je voudrais exprimer mes vifs remerciements à mes parents MAHINDAGU Sylvestre et NDAYISHIMIYE Gaudence ainsi qu'à tous les membres de la famille qui ont contribués moralement et financièrement pour mon éducation.
- J'adresse ma sincère gratitude à mon directeur de Mémoire Dr. Ir NZEYIMANA Joseph pour son aide précieuse dans l'élaboration de ce Mémoire, ses conseils et ses suggestions pour améliorer la qualité de ce travail. J'ai beaucoup bénéficié de ses idées et de son expérience.
- Mes sincères remerciements s'adressent à tous les enseignants ayant participés dans ma formation avec un accent particulier aux enseignants de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'Université du Burundi.
- Les remerciements s'adressent également à tous les autres membres du jury de soutenance de mon travail de fin d'études du deuxième cycle universitaire pour avoir accepté de lire et d'examiner mon travail.
- Je tiens à remercier la famille KIRABISHA Siméon pour le soutien moral et financier qu'elle m'a accordé.
- Je tiens à remercier aussi la famille NAHIMANA Appolinaire pour le soutien moral et financier qu'elle m'a accordé.
- Je voudrais aussi exprimer mes vifs remerciements à mes camarades de la troisième promotion du cycle de Master en Génie Civil, Aménagement et Maitrise des Projets (GCAMP) de l'Université du Burundi.
- Je tiens aussi à cœur tous ceux qui m'ont aidé moralement et financièrement dont leurs noms et personnalités n'ont pas été mentionnées dans la présente partie du travail. A vous tous qui ont mérité ma reconnaissance, que Dieu vous bénisse.

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

RESUME

Le présent travail de fin d'étude a pour objectif principal de contribuer à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes.

Pour atteindre cet objectif, cette étude s'est appuyée à l'estimation des fréquences des crues sur tout le territoire national en vue de faciliter les études hydrauliques, d'aménagements agricoles, d'assainissement et de la production d'énergie malgré l'abscence ou le nombre limité des stations pluviométriques en République du Burundi.

A cet effet, les données de 8 stations ont été utilisées et couvrent globalement la période de 32ans (1990 à 2021). Trois lois statistiques ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle des précipitations à savoir la loi Normale ou la loi de Gauss, la loi de Gumbel ou la loi de double exponentielle et la loi de Pearson III. Le choix du meilleur modèle a été fait sur la base de la comparaison numérique.

Ce travail comporte quatres chapitres : Le premier chapitre est consacré à la situation géographique de la zone d'étude et revue de la littérature ; le second chapitre est consacré au traitement des données et discussions des résultats ; le troisième chapitre est consacré à la représentation cartographiques des isohyètes extrêmes et le dernier chapitre présente les conclusions et recommandations formulées sur base des résultats obtenus de cette étude.

Les précipitations extrêmes obtenues nous ont permis d'élaborer les courbes de fréquences des crues pour que les valeurs des précipitations extrêmes seront consultées à l'aise sur les courbes des fréquences extrêmes pour toutes les stations pluviométriques représentatives et de disposer une carte nationale des isohyètes extrêmes correspondantes aux probabilités d'apparitions de **0.1%,0.2%,0.5%,1% et 2%** au Burundi.

Mots clés : isohyètes extrêmes, précipitations maximales annuelles, analyse fréquentielle ; précipitation extrêmes.

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

ABSTRACT

The main objective of this end-of-study work is to contribute to the improvement of hydraulic development studies by producing the national map of extreme isohyets.

To achieve this objective ,this study relied on the estimation of flood frequencies throughout the national territory in order to facilitate hydraulic studies, agricultural development and sanitation despite the absence or the limited number of stations rainfall in the Republic of Burundi.

For this purpose, data from 8 stations were used and globally cover the period of 32 years (1990 to 2021).

Three statistical laws were used for the frequency analysis of precipitation, namely the normal law or Gauss's law, Gumbel's law or the double exponential law and the Pearson III law. The choise of the best model was made on the basic of the numerical comparison.

This work has four chapters : The first chapter is devoted to the geographical location of the study area and review of the literature ; the second chapter is devoted to the processing of data and discussions of the results ; the third chapter is devoted to the cartographic representation of extreme isohyets and the last chapter presents the conclusions and recommendations formulated on the basis of the results obtained from this study.

The extreme precipitation obtained allowed us to develop the frequency curves of the floods so that the values of the extreme precipitation will be consulted at ease on the curves of the extreme frequencies for all the representative pluviometric stations and to have a national map of the corresponding extreme isohyets with probability of appearances of 0.1% ; 0.2% ; 0.5% ; 1% and 2% in Burundi.

Keywords : Extreme isohyets ; maximum annual precipitation ; frequency analysis ; extreme precipitation.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i

DEDICACE ii

REMERCIEMENT iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES xi

SIGLES ET ABREVIATIONS xiii

AVANT –PROPOS xiv

0 . INTRODUCTION GENERALE 1

0.1 Contexte, problématique et justification de l'étude 1

0.2 Objectif global 2

0.3 Objectifs spécifiques 2

0.4 Utilité du travail 2

0.5 Matériel 2

0.6 Méthodologie de travail 3

0.7 Les résultats attendus 3

CHAPITRE I : SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET REVUE DE LA LITTERATURE 4

I.1 Présentation de la zone d'étude 4

I.2 Climat 5

I.3 REVUE DE LA LITTERATURE 7

I.3.1 Cycle hydrologique 7

I.3.2 Processus hydrologiques de génération des écoulements 8

I.4 Le bassin versant 9

I.4.1 Définition 9
I.4.2 Caractéristiques d'un bassin versant 9
I.5 La rivière 13
I.5.1 Définition 13
I.5.2 Caractéristiques spécifiques d'une rivière 14
I.6 Réseau hydrographique. 15
I.7 Les précipitations 16
I.7.1 Définitions 16
I.7.2 Les principales caractéristiques des précipitations 17
I.7.3 La représentation et l'analyse des précipitations 17
I.7.4 La mesure des précipitations 18
I.7.5 Notion de temps de retour 18
I.7.6 Détermination des précipitations moyenne dans un bassin versant 19
I.7.7 Calcul de la moyenne arithmétique 19
I.7.8 Méthode des polygones de Thiessen 19
I.7.9 La méthode des isohyètes (isovaleurs) 20
I.7.10 Variabilité spatio-temporelle des précipitations 22
I.8 Homogénéisation des séries de précipitations 22
I.8.1 Introduction 22
I.8.2 Homogénéisations pour l'extension des données 22
I.9 Analyse fréquentielle 24
I.9.1 Définition 24
I.9.2 Lois statistiques 24
I.10 Contribution d'un SIG à la gestion des ressources en eaux. 28
I.10.1 Définition 28
I.10.2 Présentation du logiciel ArcGis 10.3 28

I.11 Modélisation spatio-temporelle des précipitations 29

I.11.1 Les différents types méthodes d'interpolation locales les plus utilisées en ArcGis 29

CHAPITRE II :TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS 32

II.1 Méthodologie de travail 32

II.2 Présentation des résultats 33

II.2.1 Comparaison des lois sur base de l'analyse fréquentielle 33

II.2.2 Commentaires des résultats obtenus 44

II.2.3 Homogénéisation des données 45

II.2.4 Analyse statistique détaillé des données des précipitations station par station 46

II.3 Discussion des résultats obtenus 77

CHAPITRE III : REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ISOHYETES EXTREMES 78

III.1 : Généralités 78

CHAPITRE IV : CONCLUSION ET RECOMMANDATION 84

IV.1 Conclusion 84

IV.2 Recommandation 85

Références Bibliographiques 86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Répartition de la précipitation, de l'altitude, de la température et du pourcentage de la superficie de la carte éco climatique de la zone d'étude. 5
Tableau I-2 : Les Grands fleuves du globe 13
Tableau II-1 **:** Le tableau suivant montre les résultats des données pluviométriques à l'état brutes (non homogénéiser) : 34
Tableau II-2 : Le tableau suivant montre les résultats des données pluviométriques brutes homogénéisées : 35
Tableau II-3: Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Nyamuswaga 36
Tableau II-4: Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Muyinga 37
Tableau II-5 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Rwegura 38
Tableau II-6 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Kirundo. 39
Tableau II-7 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Karuzi ... 40
Tableau II-8 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Mparambo 41
Tableau II-9 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Ngozi Ocibu 42
Tableau II-10 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Buhoro 43
Tableau II-11: Le tableau suivant montre les résultats des données brutes homogénéisées 45
Tableau II-12: Calcul du coefficient de variation et du coefficient d'asymétrie pour la station Nyamuswaga 47
Tableau II-13: Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Nyamuswaga..... 48
Tableau II-14: Calcul du coefficient des crues par interpolation 48
Tableau II-15: Calcul des précipitations extrêmes 49
Tableau II-16: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Muyinga 51
Tableau II-17 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Muyinga 51
Tableau II-18: Calcul du coefficient des crues par interpolation entre Cs=1Cv et Cs=2Cv 52
Tableau II-19: Calcul des précipitations extrêmes pour CS=1.984cv..... 53
Tableau II-20: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Rwegura 55
Tableau II-21: Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Rwegura 55
Tableau II-22: Calcul des précipitations extrêmes pour Cs=4Cv 56

Tableau II-23: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Kirundo 58
Tableau II-24 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Kirundo 58
Tableau II-25: Calcul du coefficient des crues par interpolation. 59
Tableau II-26: Calcul des précipitations extrêmes pour Cs=1.61Cv 60
Tableau II-27: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Karuzi 62
Tableau II-28: Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Karuzi 62
Tableau II-29: Calcul du coefficient des crues par interpolations suivant la valeur de Cv=0.28 63
Tableau II-30: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Mparambo .. 66
Tableau II-31 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Mparambo 66
Tableau II-32: Calcul du coefficient des crues par interpolation suivant la valeur de Cs =1Cv et Cv=2cv 67
Tableau II-33: Calcul des précipitations extrêmes suivant la valeur de Cs=1.56cv 67
Tableau II-34: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station de Ngozi ocibu 69
Tableau II-35 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Ngozi ocibu 69
Tableau II-36: Calcul du coefficient des crues par interpolation entre Cs=2.5cv et Cs=3Cv .. 70
Tableau II-37: Calcul des précipitations extrêmes suivant la valeur du coefficient d'asymétrie Cs=2.69Cv 71
Tableau II-38: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Buhoro 74
Tableau II-39 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Buhoro 74
Tableau II-40: Calcul du coefficient des crues par interpolation entre Cs=3Cv et Cs=3.5cv .. 75
Tableau II-41: Calcul des valeurs des précipitations extrêmes après interpolations pour Cs=3.34Cv 75

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Carte de localisation de la zone d'étude 4
Figure I-2 : Carte climatique de la zone d'étude 6
Figure I-3 : cycle hydrologique naturel 7
Figure I-4: Classification des affluents hydrographique selon la Règle de Strahler. 15
Figure I-5 : Hyétogramme des précipitations 17
Figure I-6 : Courbe des précipitations cumulées 18
Figure I-7 : Schéma illustrant la représentation graphique de la méthode de thiessen 20
Figure I-8 : Schéma illustrant la carte des isohyète. 21
Figure II-1: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Nyamuswaga**.** 36
Figure II-2 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Muyinga. 37
Figure II-3 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Rwegura**.** 38
Figure II-4 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Kirundo**.** 39
Figure II-5 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Karuzi**.** 40
Figure II-6 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Mparambo. 41
Figure II-7 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Ngozi Ocibu. 42
Figure II-8 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Buhoro. 43
Figure II-9: Courbe corrélative de la station Nyamuswaga 50
Figure II-10: courbe de fréquence de la station Nyamuswaga 50
Figure II-11:courbe corrélative de la station Muyinga 53
Figure II-12:courbe de fréquence de la station Muyinga 54
Figure II-13: Courbe corrélative de la station Rwegura 57
Figure II-14: Courbe de fréquence de la station Rwegura 57
Figure II-15: Courbe corrélative de la station Kirundo 60

Figure II-16:Courbe de fréquence de la station Kirundo 61
Figure II-17: Courbe corrélative de la station Karuzi 64
Figure II-18:courbe de fréquence de la station karuzi..... 65
Figure II-19: Courbe corrélative de la station Mparambo..... 68
Figure II-20: Courbe de fréquence de la station Mparambo 68
Figure II-21: Courbe corrélative de la station Ngozi 72
Figure II-22: Courbe de fréquence de la station Ngozi ocibu 73
Figure II-23: Courbe corrélative de la station Buhoro 76
Figure II-24:courbe de fréquence de la station Buhoro..... 76
Figure III-1 : Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 1000ans..... 79
Figure III-2: Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 500ans..... 80
Figure III-3 : Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 200 ans..... 81
Figure III-4: Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 100 ans..... 82
Figure III-5: Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 50ans..... 83

SIGLES ET ABREVIATIONS

A : Superficie du Bassin Versant

BCG : Bureau de Centralisation Géomatique

BV : Bassin Versant

Cs : Coefficient d'Asymétrie

CV : Coefficient de Variation Ou de divergence

D : Densité du Réseau

DH : Hauteur de Pluie

DT : Intervalle de temps

ESRI : Environnemental System Research Institute

F : Fréquence

I : Intensité de pluie

IDW : Inverse de la Distance

IGEBU: Institut Géographique du Burundi

Im : pente moyenne du bassin versant

KG : Coefficient de Gravelius

Li : longueur totale du réseau

P : Précipitation

Pi : précipitation au poste i

Pmoy : Précipitation Moyenne

Q : Débit

R : Hauteur totale de Ruissellement

Rf : coefficient de Horton

Si : surface d'influence du pluviomètre i

SIG : système d'information Géographique

T : Période de retour

T exp : Temps de retour exprimée en années

W : Quantité Totale de Ruissellement

AVANT –PROPOS

Le traitement statistique lié aux précipitations représente un vaste domaine qui pose de nombreux défis aux météorologues et hydrologues. Parfois, il est nécessaire, voir indispensable d'approcher en valeur les évènements extrêmes pour des sites où il existe peu, ou aucune donnée, ainsi que leurs périodes de retour.

La recherche d'un modèle de fréquence des hauteurs des précipitations journalières annuelles revêt une grande importance en hydrologie opérationnelle: Elle constitue la base de calcul de la crue de projet associée à une probabilité d'occurrence donnée, une fois les quantiles déterminés. L'approche la plus connue et la plus courante est l'approche statistique.

Elle consiste à rechercher une loi de probabilité qui s'ajuste le mieux aux valeurs observées de la variable aléatoire de la précipitation maximale journalière annuelle après comparaison de différentes lois de probabilités. De ce fait, une analyse fréquentielle de séries annuelles des précipitations maximales journalières annuelles a été réalisée sur les données de 8 stations pluviométriques contournant les régions Nord-Ouest du Burundi.

Ce choix a été porté sur trois lois usuellement appliquées à l'étude et l'analyse fréquentielle des précipitations journalières maximales annuelles. Les lois utilisées sont : La loi Normale ou la loi de Gauss ; la loi de Gumbel ou la loi de double exponentielle et la loi de Pearson III.

Le présent travail de fin d'étude, intitulé≪ **Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydrauliques par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : cas des régions Nord-Ouest couvrants les provinces Kirundo, Ngozi, Muyinga, Karuzi, Kayanza Et Cibitoke**≫s'inscrit dans le cadre de pallier à cette inégale répartition des stations pluviométriques et en conséquence rendre disponible les données hydrologiques utiles.

Au cours de ce travail, les courbes de fréquence des crues sur chaque station ont été élaborées et on a produit cinqs cartes modèles des isohyètes extrêmes suivant les différentes probabilités de P=**0.1% ; P=0.2% ; P=0.5% ; P=1% et P=2%.**

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

0 . INTRODUCTION GENERALE

0.1 Contexte, problématique et justification de l'étude

L'amélioration des services météorologiques, hydrologiques et climatiques est alors essentiel pour renforcer la résilience climatique et celle aux catastrophes naturelles en réduisant les pertes en termes d'infrastructures, de la vie humaine et de moyens de subsistance des agriculteurs ruraux pauvres pouvant toucher sur l'économie de tout le pays.

Mais malheureusement; dans certains endroits du Burundi, les installations actuellement en place, notamment les stations météorologiques et les stations hydrométriques, sont soit défectueuses, soit inactives ou simplement non disponibles (**IGEBU, 2010**). Cela va influencer la qualité et la quantité des données hydrométéorologiques qui auront un impact majeur sur l'exactitude des calculs hydrologiques.

La production d'une carte nationale des isohyètes extrêmes est alors une avancée majeure dans le domaine de l'hydrologie et de l'aménagement du territoire Burundais.

Au Burundi comme ailleurs, les ingénieurs ont toujours besoin des données hydrologiques fiables pour bien mener des études de conception et de dimensionnement de certains ouvrages hydrauliques.

La fiabilité et la disponibilité de certaines données hydrologiques au Burundi est l'une des principales contraintes auxquelles font face à certains ingénieurs au moment où ils veulent mener des études nécessitant des données hydrologiques plus ou moins précise, car la non disponibilité de ces données très utiles à déjà cause des dommages liés à certaines erreurs de conception et de dimensionnement des ouvrages hydrauliques qui avaient une lourde importance sur la société. On rappellera toutes fois les cas publiquement connus comme : le barrage d'irrigation de Kajeke, le barrage hydroélectrique de Mpanda et autres… qui peuvent être l'une des causes.

Pour garantir le bon dimensionnement des ouvrages hydrauliques basé sur les informations hydrologiques utiles et fiables ; le présent mémoire disponibiliser les données hydrologiques trouver à base du traitement de celles disponibles et sont représentées sous formes d'isohyètes extrêmes dans 8 Provinces modèles.

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

0.2 Objectif global

L'objectif Global de notre travail est de Contribuer à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes.

0.3 Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif global, des objectifs spécifiques sont les suivants:

- Collecter les données hydrologiques à savoir les précipitations journalières maximales annuelles (P24) des différentes stations;
- Traiter les données pluviométriques en les comparant et les homogénéisant ;
- Produire des courbes de fréquences des précipitations extrêmes, station par station;
- Analyser et Discuter les résultats obtenus ;
- Elaborer des cinqs cartes modèles des isohyètes extrêmes pour les probabilités de **P=0.1%, P=0.2%, P=0.5% ; P=1% et P=2% .**

0.4 Utilité du travail

Les cinqs cartes modèles des isohyètes extrêmes qui seront élaborées par ce travail de mémoire serviront de modèle à l'institut Géographique du Burundi (**IGEBU**) mais aussi pour l'université du Burundi qui va faciliter à l'élaboration de plusieurs cartes similaires correspondant aux autres valeurs de probabilités à des fréquences variées suivant la demande des utilisateurs.

Les valeurs des précipitations extrêmes seront directement consultées à l'aise sur les courbes des fréquences extrêmes pour toutes les stations pluviométriques représentatives.

0.5 Matériel

Les données météorologiques utilisées au cours de notre étude ont été mises à notre disposition par l'institut géographique du Burundi (**IGEBU**).Il s'agit des données pluviométriques journalières maximales annuelles (P24) des différentes stations pluviométriques situées dans les régions Nord-Ouest du Burundi. Les données collectées s'étendent sur la période de 1990-2021. Le traitement des données pour cette étude a nécessité l'utilisation du logiciel Excel 2013 qui va nous faciliter à faire la manipulation des données et des représentations graphiques. On utilise aussi le Microsoft Word pour la rédaction du rapport et le logiciel ArcGis qui nous facilitera à tracer les courbes des isohyètes extrêmes.

0.6 Méthodologie de travail

Afin d'atteindre l'objectif de ce travail, la méthodologie utilisée est la suivante :

- Une description de la zone d'étude;
- Une revue de la littérature sur les processus, les modèles hydrologiques et hydrauliques pour les bassins versants et ses caractéristiques, le cycle de l'eau;
- Collecter des données à l'institut géographique du Burundi (**IGEBU**) et au Bureau de Centralisation Géomatique (**BCG**);
- L'Analyse et traitement des données recueillies en utilisant l'outil Excel;
- Utilisation du logiciel ArcGis pour la construction des cartes des isohyètes extrêmes ;
- Analyse et discussion des résultats obtenus;
- Conclusions et Recommandations.

0.7 Les résultats attendus

- Les données pluviométriques sont traitées, comparées et homogénéisées ;
- Les courbes de fréquences des crues pour chaque période de retour sont produites ;
- Les résultats obtenus sont discutés et disponibles ;
- Les cartes modèles des isohyètes pour les temps de retour **P=0.1%, P=0.2%, P=0.5%, P=1%, P=2%** sont élaborées.

CHAPITRE I : SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET REVUE DE LA LITTERATURE

I.1 Présentation de la zone d'étude

Notre zone de travail est située dans la région Nord-Ouest du Burundi et couvrent globalement les provinces Kirundo, Kayanza, Ngozi, Muyinga, Karuzi et Cibitoke et cette zone d'étude se situe entre 2°10'0''S et 3°18 '0''S de latitude Sud et entre 29°0'0''E et 30°30'0''E de longitude Est.

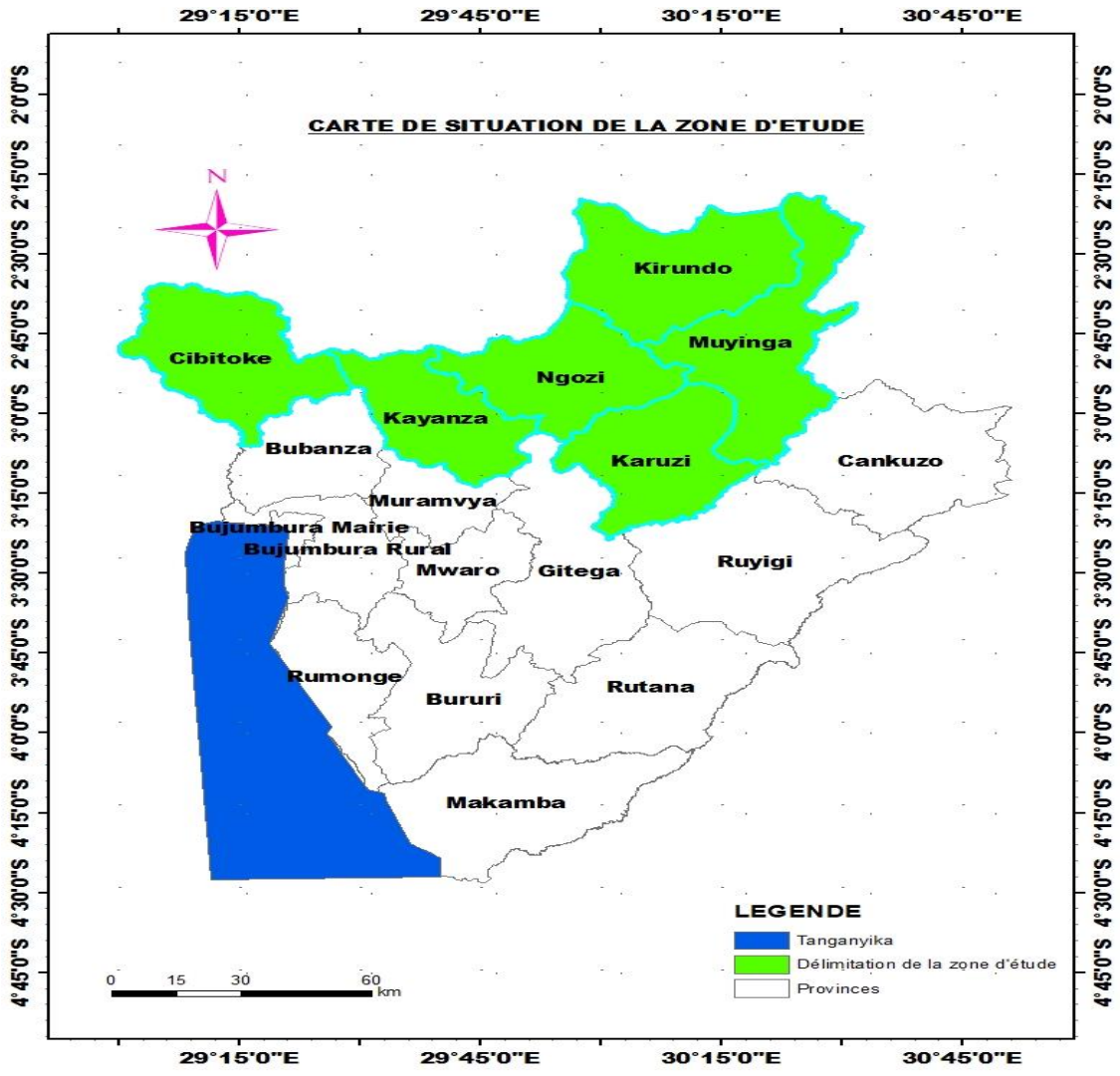


Figure I-1 *: Carte* de localisation de la zone d'étude

I.2 Climat

Du point de vue climatique la zone d'étude couvre 5 zones climatiques à savoir :(i) : la plaine de l'Imbo, (ii) :la région escarpée de Mumirwa, (iii) : la zone montagneuse de la crête Congo Nil, (iv) :les plateaux centraux et (v) :dépressions de Bugesera et qui est situé entre 29°0'0''et 30°30'15''de longitude Est et entre 2°16'15''et 3°18'15''de latitude sud.

Son climat est influencé par l'altitude qui varie entre 774 m et 2500 m. Il est caractérisé par une alternance de deux saison à savoir la saison pluvieuse qui commence du mois de septembre jusqu'au mois de Mai et la saison sèche qui commence du mois de Juin jusqu'à la fin du mois d'Août.

Tableau I-1: Répartition de la précipitation, de l'altitude, de la température et du pourcentage de la superficie de la carte éco climatique de la zone d'étude.

Région Eco climatique	Pourcentage de la superficie du pays(%)	Altitude(en m)	Température en degré silcius (°c)	Précipitations moyennes annuelles (mm)
Plaine de l'Imbo	7%	774-1000	>23°c	800-1100
Le contrefort de Mumirwa	10%	1000-1900	18-28°c	1100-1900
Crête Congo-Nil	15%	1700-2500	14-15°c	1300-2000
Plateaux centraux	52%	1350-2000	17°c -20°c	1200-1500
Dépressions de Bugesera	16%	1000-1200	20-23°c	1100-1550

.

Source :(MINATTE) MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE, DU TOURISME ET DE L'ENVIRONNEMENT.

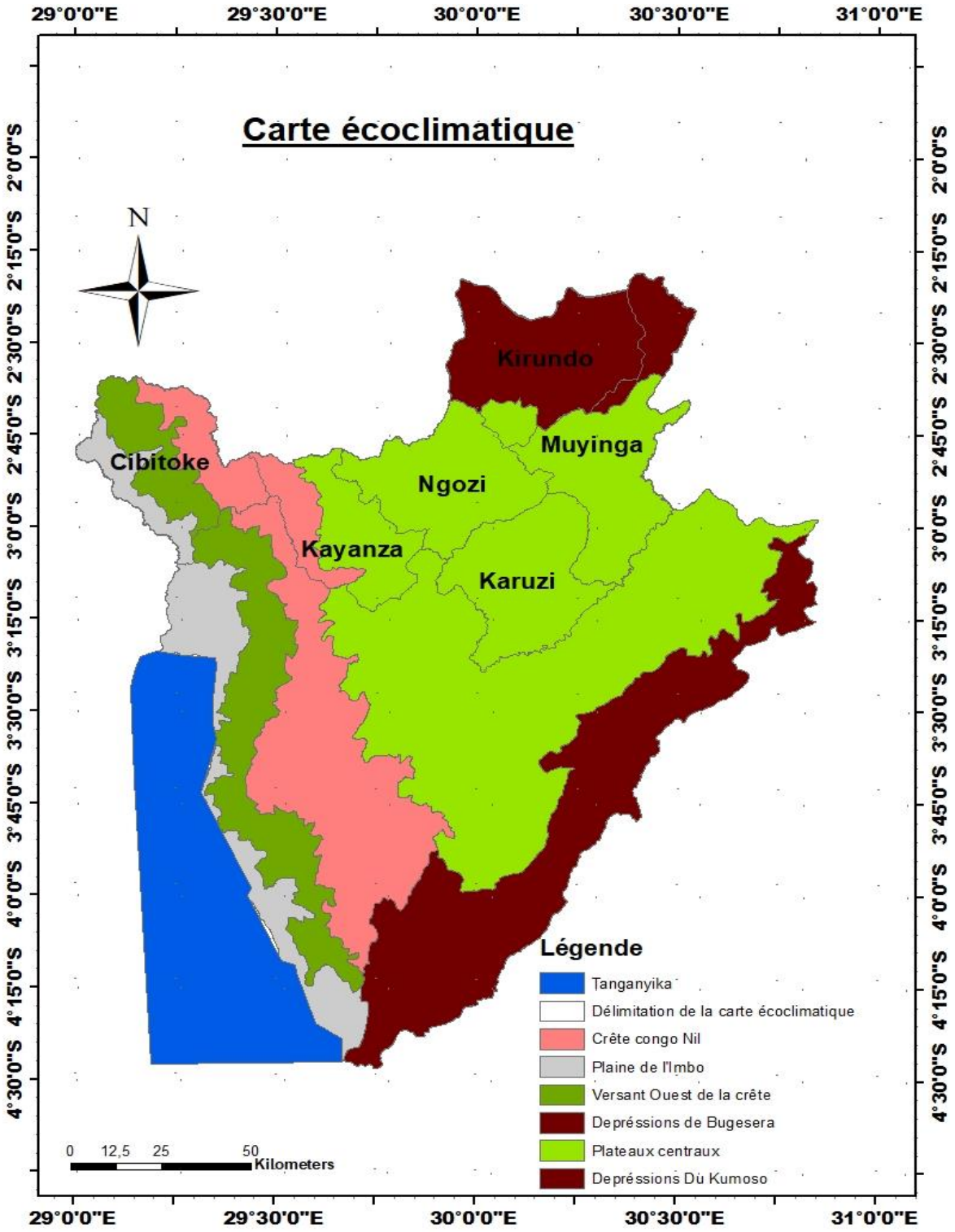
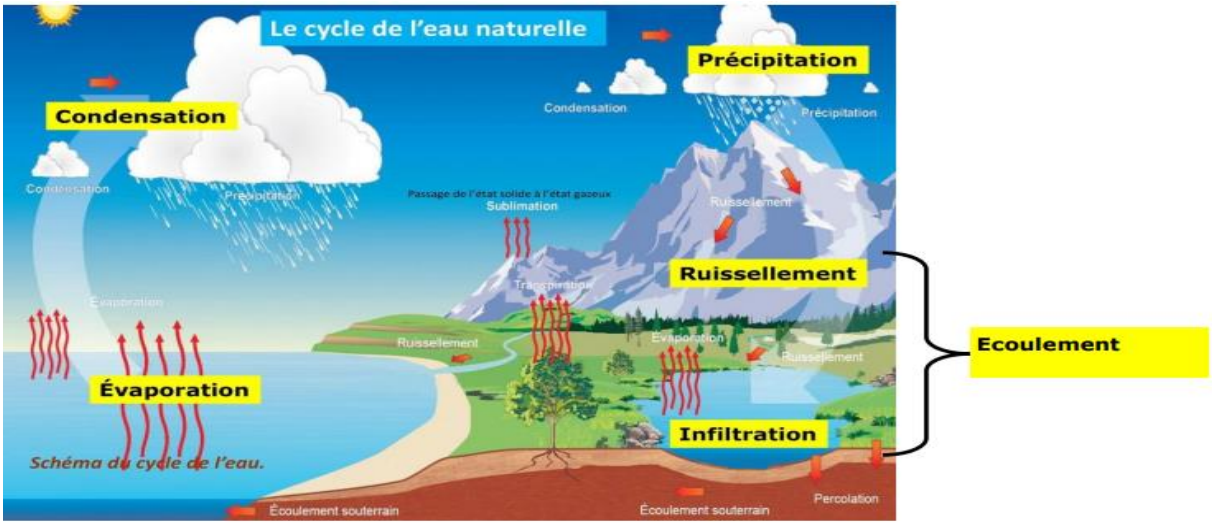


Figure I-2 : Carte climatique de la zone d'étude

I.3 REVUE DE LA LITTERATURE

I.3.1 Cycle hydrologique

Le cycle de l'eau traduit le phénomène naturel de circulation perpétuelle de l'eau sur la terre, sous la terre et dans l'atmosphère. Il est régi par l'énergie solaire qui est à la base de l'évaporation de l'eau de surface. De cette évaporation et de la transpiration des plantes, la vapeur d'eau s'élève dans l'atmosphère et par refroidissement elle se transforme en fines gouttelettes d'eau (et en cristaux des glaces), c'est la condensation. Ces gouttelettes d'eau se rassemblent ensuite, deviennent lourdes et tombent sous forme des précipitations. Dans sa chute, l'eau peut être interceptée par la végétation, ruisseler à la surface du sol, s'infiltrer dans le sous-sol et tomber directement dans les océans et les autres réservoirs d'eau. L'eau interceptée retourne dans l'atmosphère par évaporation. L'eau de ruissellement est recueillie dans le réseau de drainage (naturel ou artificiel) qui l'achemine vers les masses d'eau de surface (et les océans). Une partie de l'eau infiltrée à faibles profondeurs est absorbée par les racines des plantes et rejetée dans l'atmosphère via la transpiration des feuilles. Une autre partie peut atteindre la nappe souterraine, et émerger à la surface à travers les sources et rejoindre le ruissellement de surface. L'eau à la surface de la terre est évaporée vers l'atmosphère et le cycle hydrologique se poursuit. Il n'y a ainsi pas de départ ni de fin identifiés pour le cycle dont les nombreux processus se produisent continuellement. Le cycle hydrologique naturel est illustré dans la Figure II.1-1 ci-dessous (**Bwirabucaza F.L (2020**),



Source : LECON_Cycle-de-l-eau-dans-la-nature.pdf

Figure I-3 : cycle hydrologique naturel

I.3.2 Processus hydrologiques de génération des écoulements

I.3.2.1 **Précipitations directes à la surface libre du cours d'eau**

La première composante dans la génération des crues est la contribution directe des précipitations dans le réseau hydrographique du bassin versant. Dans la majorité des cas, les précipitations directes représentent une part négligeable en raison de la faible portion de surface qu'occupent les cours d'eau par rapport à l'étendue du bassin versant. Cependant les études de Gburek ont révélé que pour des événements des faibles intensités, elles peuvent constituer une part importante dans la quantification des crues. Dans l'analyse de la réponse hydrologique d'un bassin versant, les précipitations directes sont intégrées dans le ruissellement de surface. (**Musy, A., 1998).**

I.3.2.2 **Ecoulement de surface**

Lors d'un événement pluvieux (ou la fonte des neiges), le ruissellement de surface est la résultante observable après que toutes les pertes par interception, infiltration et rétention superficielle aient été soustraites. **Horton (1933)** a décrit l'écoulement de surface comme suit : « En négligeant l'interception par la végétation, le ruissellement de surface est la partie des précipitations qui n'est pas absorbée par le sol par infiltration ». Il établit donc qu'il y a ruissellement quand l'intensité pluviométrique excède la capacité d'infiltration du sol. Ce type d'écoulement - écoulement hortonien - est typique des fortes intensités pluviométriques sur les bassins versants arides et semi-arides, qui manquent souvent de couverture végétale suffisante (et associée à un environnement litière et racinaire peu profond) pour retenir l'humidité pendant de longues périodes (**ASCE, 1996, p. 332). D'après Dunne (1978**), l'écoulement de surface se produit quand l'eau de pluie nouvelle tombe sur des surfaces saturées. Dans ce cas, l'écoulement se produit, indépendamment de la différence entre l'intensité des précipitations et le taux d'infiltration, en raison de l'incapacité du sol à absorber plus d'eau.

I.3.2.3 **Ecoulement de subsurface**

Les écoulements de subsurface apparaissent dans les couches peu profondes du sol et se caractérisent par un mouvement latéral de l'eau suite au processus d'infiltration.

La condition essentielle pour voir apparaître les écoulements de subsurface est que la conductivité latérale du milieu doit être nettement supérieure à la conductivité verticale. L'écoulement de subsurface se veut intermédiaire entre l'écoulement profond et l'écoulement de surface**. (Musy, 1998).**

I.3.2.4 **Ecoulement souterrain**

Le concept d'écoulement souterrain se réfère au milieu de la circulation de l'eau : il correspond aux contributions des aquifères d'un bassin à l'écoulement total, donc au débit de l'ensemble des nappes souterraines dont les exutoires sont situés dans le bassin versant considéré. L'écoulement souterrain constituant la principale et souvent unique composante régulière de l'écoulement total, il est généralement en pratique identifié au "débit de base" estimé à partir de l'analyse de l'hydrogramme du cours d'eau. **(Musy, 1998).**

I.4 Le bassin versant

I.4.1 Définition

Le bassin versant en un point d'un cours d'eau est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont du point considéré. Il est délimité par la ligne de partage des eaux.

I.4.2 Caractéristiques d'un bassin versant

On distingue les caractéristiques géométriques suivantes d'un bassin versant :

- La superficie : C'est l'aire délimitée par la ligne de partage des eaux par rapport au point d'exutoire considéré. Elle représente la surface de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. C'est la première et la plus importantes des caractéristiques.
- La densité du réseau : C'est le quotient de la longueur totale du réseau (affluents +cours principal) et la superficie totale du bassin.

$$D=\sum \frac{li}{A} \qquad \textit{I-1}$$

Li : longueur total du réseau, A : superficie totale du bassin

D : la densité du réseau

- le coefficient morphologique : c'est le quotient de la superficie totale du bassin et le carré de la distance «L» mesurée entre l'exutoire et le point le plus éloigné de la ligne de partage des eaux à vol d'oiseau. On l'appelle aussi le coefficient de HORTON.

$$R_{f=\frac{A}{L^2}} \qquad \textit{I-2}$$

- ✓ R_f = Coefficient morphologique

- ✓ A= la superficie totale du bassin
- ✓ L = la distance

La pente moyenne du bassin versant : c'est la moyenne de pente remarquable du réseau fluvial du bassin.

$$I=\frac{DL_c}{A} \qquad \textbf{I-3}$$

- ✓ D – est l'équidistance des courbes de niveau,
- ✓ Lc – est la longueur totale des courbes de niveau équidistante de D,
- ✓ A – est la superficie totale du bassin.

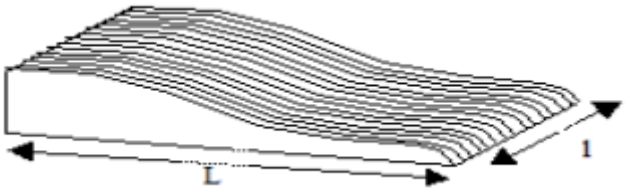
- la longueur du bassin : On utilise différentes caractéristiques de longueur ; la première et une des plus utilisées est le "périmètre P du bassin versant". Le périmètre P n'est généralement pas utilisé directement mais le plus souvent à travers des valeurs qui en dérivent, comme la "longueur L du rectangle équivalent". On définit le rectangle équivalent comme le rectangle de longueur L et de largeur l qui a même surface et même périmètre que le bassin versant, soit à l'aide des formules suivantes :

$$\mathbf{P = 2.\ (L + l)\ et\ A = L.\ l} \qquad \textbf{I-4}$$

On définit les grandeurs L et l représentantes respectivement la longueur et la largeur du triangle équivalent :

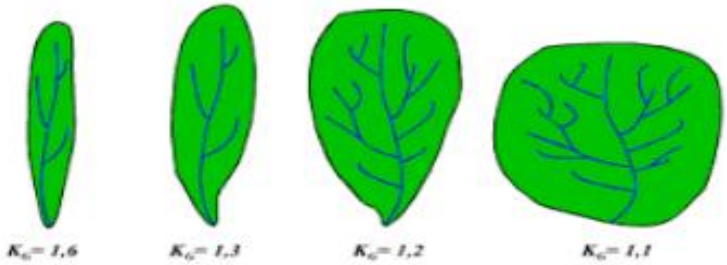
$$\mathbf{L}=\frac{1}{2}K_G\sqrt{\pi * A}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}K_G}\right)^2}\right] \qquad \textbf{I-5}$$

$$\mathbf{l}=\frac{1}{2}K_G\sqrt{\pi * A}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}K_G}\right)^2}\right] \qquad \textbf{I-6}$$



L'inconvénient de cette méthode est que l'on peut rencontrer des bassins plus compacts qu'un carré ; l'équation n'a alors plus de racines réelles.

- La caractéristique de forme la plus utilisée est le "coefficient KG de Gravelius". Il se définit comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant même surface (appelée aussi coefficient de compacité)



- **Le périmètre et rectangle équivalent**

Le périmètre est la caractéristique de la longueur la plus utilisée. Le périmètre peut être mesuré directement sur la carte topographique par curvimétrage ou de manière indirecte en utilisant la longueur du rectangle équivalent. **(Mlle Souad RIAD 2003).**

❖ Le rectangle équivalent

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau**. (Mlle Souad RIAD 2003)**

$$K_G = \frac{P}{2\,\pi\,R} = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28\,\frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \textit{I-7}$$

P= périmètre en km

A= aire en km2

KG = le coefficient de Gravelius

- **Le relief**

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.,) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. **(Laborde 2009).** Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

❖ **Les altitudes caractéristiques**

✓ **Les altitudes maximales et minimales**

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

[https://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre2/main.html].(visité le 31/11/2022)

✓ **L'altitude moyenne**

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique, on peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \sum \frac{Ai,hi}{A} \qquad \textbf{I-8}$$

H_{moy}=altitude moyenne du bassin $[m]$

Ai= aire comprise entre deux courbes de niveaux $[km^2]$

Hi= altitude moyenne entre deux courbes de niveaux$[m]$

A=superficie totale du bassin versant $[km^2]$

✓ **L'altitude médiane**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. **[https://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre2/main.html].(visité le 31/11/2022**

- ✓ **La pente moyenne du bassin versant**

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante.

Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration tc et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

[https://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre2/main.html].(visité le 31/11/2022)

Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{DL}{A} \qquad \textbf{I-9}$$

Où : i_m=pente moyenne $\left[\frac{m}{km}\ ou\ 0/00\right]$

L=longueur totale de courbes de niveau $[km]$

D : équidistance entre deux courbes de niveau $[m]$

A : surface du bassin versant $[km^2]$

I.5 La rivière

I.5.1 Définition

La rivière est une piste naturelle dans laquelle l'eau coule. Les plus grandes rivières du globe sont :

Tableau I-2 : Les Grands fleuves du globe

Nom	**Supérificie 10^6km²**	**Longueur km**	**Teneur en sable (mg/ l)**
Amazone	7.0	6280	290
Mississipi	3.9	6260	530
Fleuve Congo	3.7	4640	50
Nil	2.9	6670	630
Yang-Tsé	1.8	6300	1400
Fleuve Jaune	0.77	5460	15000

I.5.2 Caractéristiques spécifiques d'une rivière

a) ***La longueur*** **:** C'est la distance entre l'exutoire et la source la plus lointaine. La longueur d'une rivière est unique.

b) ***Le profil*** **:** On distingue le profil en travers et le profil en long. Le profil en long est tracé suivant la ligne la plus profonde du lit du cours d'eau

c) ***La chute*** **:** C'est la différence d'altitude calculée entre la source et l'exutoire, donc sur les 2 bouts de la rivière.

d) ***La pente*** **:** La pente d'une rivière est la différence d'altitude par unité de longueur, en général par Km.

On écrit ***:***

$$I = \frac{H}{L} x100/1000 \qquad \textbf{I-10}$$

3) Le réseau fluvial

a) ***Définition*** **:** On appelle « réseau fluvial d'un bassin » l'ensemble constitué par un cours d'eau principal et les affluents se jetant les uns dans les autres jusqu'à l'exutoire du bassin

b) Classification :

- Chaque affluent est classé suivant son degré, selon qu'il se jette dans un autre affluent ou qu'il se jette directement dans le cours principale.
- Le degré du cours principal augmente suivant les degrés des affluents qui s'y jettent.

Pour classer les affluents en différents degrés, on utilise généralement la méthode de STRALHER (Britanique) résumé en 4 règles suivantes :

Règle1 : Tout affluent sortant directement de la source est classé l'affluent de 1er degré

Règle2 : Deux affluents de 1er degré qui se rencontrent forment un cours d'eau de 2ème degré, ceux de 2ème degré forment un cours d'eau de 3ème degré…et ainsi de suite.

Règle3 : Deux affluents de degrés différents qui se rencontrent forment un cours d'eau dont le degré est celui du plus grand des deux.

Règle4 : Le degré du bassin est donc le plus grand degré qu'on trouve à l'exutoire de tous les affluents du réseau fluvial de ce bassin.

D'une façon mathématique, le Principe de Strahler est résumé de la façon suivant:

$$\begin{cases} \boldsymbol{n + n = n + 1} \\ \boldsymbol{n + m = max(n, m)} \end{cases} \qquad \textbf{I-11}$$

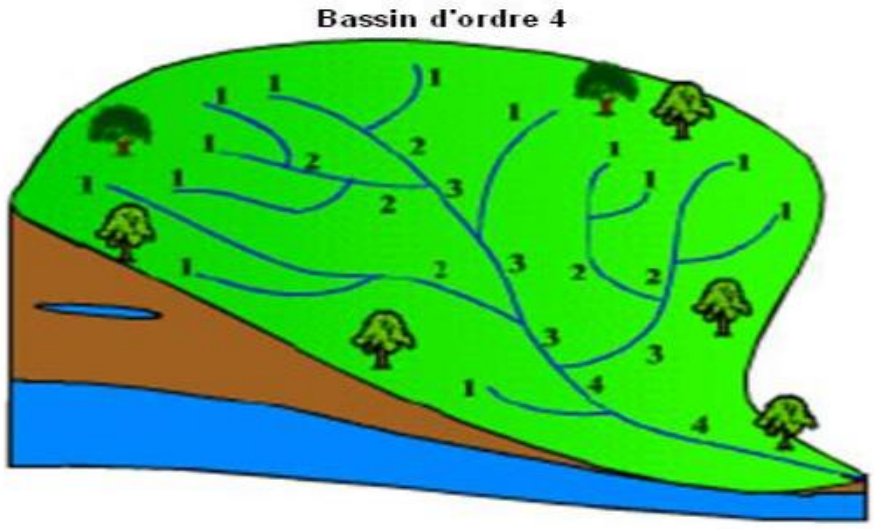


Figure I-4: Classification des affluents hydrographique selon la Règle de Strahler**.**

I.6 Réseau hydrographique.

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux tels que la géologie, le climat, la pente du terrain et la présence humaine : **[Https://f2school.com/wp-content/uploads/2020/04/Bassin-versant-Cours-01.pdf] (Consulté le 30/11/2022 à 10h00').**

Les paramètres descriptifs utilisés pour définir le réseau hydrographique sont :

- La topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau
- Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau

➢ Les longueurs caractéristiques

Un bassin versant se caractérise principalement par deux longueurs : la longueur du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal.

➢ Le profil longitudinal du cours d'eau : Le profil en longitudinal du cours d'eau est la représentation graphique de la variation altimétrique du fond du cours d'eau en

fonction de la distance à l'émissaire. Le profil en long d'un cours d'eau permet de définir sa pente moyenne. (**Eugénie ; 2020**)

- La pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau. (**Eugénie ; 2020**)

$$P_{moy}=\frac{DH_{max}}{L} \qquad \textbf{I-12}$$

Où P_{moy} =pente moyenne du cours d'eau $\left[\frac{m}{km}\right]$

DH_{max}=denivellation maximale de la rivière $[m]$ (différence d'altitude entre le point le plus éloigne et l'émissaire.

$L = longueur\ du\ cours\ d'eauprincipal[km]$

I.7 Les précipitations

I.7.1 Définitions

Les précipitations constituent la principale « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

Ce sont l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

D'une manière générale, sur base des phénomènes météorologiques qui donnent naissance aux précipitations, ou qui les accompagnent, on peut les grouper en trois classes :

- Les précipitations convectives,
- Les précipitations orographiques
- Les précipitations frontales.

Elles correspondent à différents mécanismes d'ascendance (formation des nuages) et présentent des caractéristiques d'intensité et de durée diverses.

A l'échelle mondiale on peut classer les précipitations en plusieurs régimes pluviométriques.

Ces régimes sont définis à partir des précipitations moyennes annuelles ou moyennes mensuelles. **(2005, Prof. André Musy**)

I.7.2 Les principales caractéristiques des précipitations

Les éléments les plus importants qu'il faut noter lors d'une averse sont :

- la quantité de pluie : exprimée en mm ;
- la durée de la pluie : exprimée en heures ;
- l'intensité de la pluie : exprimée en mm/h ;
- l'étendue de la pluie : exprimée enKm^2 ;
- la fréquence de la pluie : exprimée en Km

Une averse est une pluie subite, abondante et généralement de courte durée.

I.7.3 La représentation et l'analyse des précipitations

Il y a plusieurs manières de représenter les précipitations mais les plus utilisées sont les suivants :

- ❖ l'hyétogramme: c'est le diagramme des hauteurs moyennes des précipitations par unité de temps (heures, jours, mois). Il permet de prévoir l'intensité et la durée d'une crue sur un bassin versant. - une courbe de la quantité cumulée par rapport au temps.

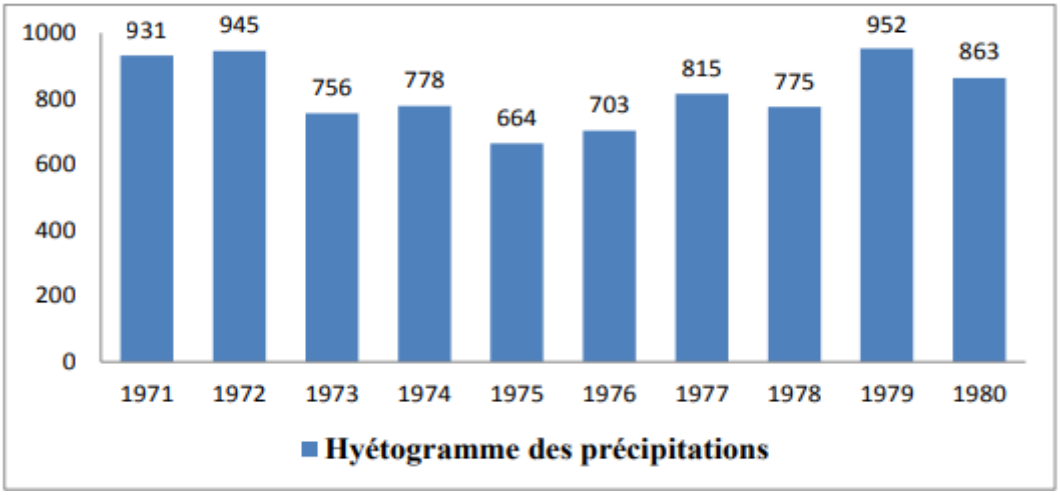


Figure I-5 : Hyétogramme des précipitations

❖ une courbe de la quantité cumulée par rapport au temps.

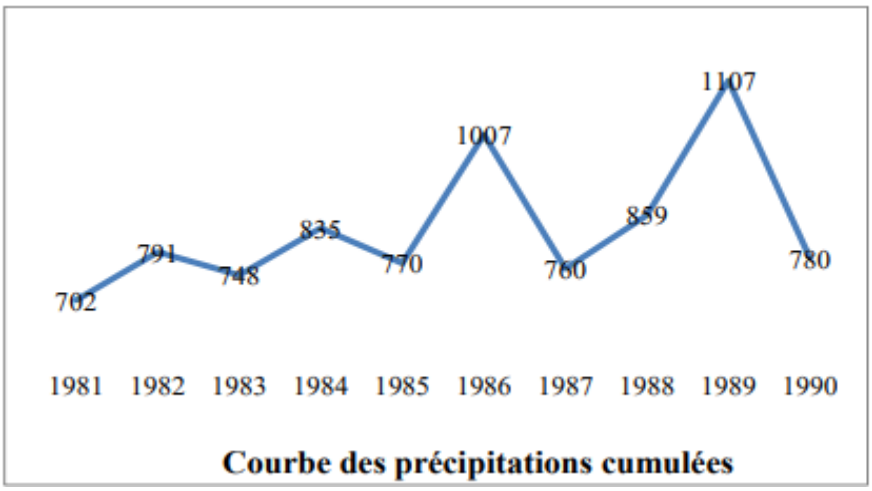


Figure I-6 *:* Courbe des précipitations cumulées

I.7.4 La mesure des précipitations

La mesure des précipitations est l'une des plus complexes en météorologie car on observe une forte variation spatiale selon le déplacement de la perturbation, le lieu de l'averse, la topographie et les obstacles géographiques locaux gênant sa captation. On exprime généralement les précipitations en hauteur ou lame d'eau précipitée par unité de surface horizontale (mm) .Si on rapporte cette hauteur d'eau à l'unité de temps, il s'agit d'une intensité (mm/h)

L'enregistrement des pluies en générale des averses en particulier, se fait au moyen de divers appareils de mesure. Les plus classiques sont les pluviomètres et les pluviographes.

Le pluviomètre : instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la quantité d'eau totale précipitée et recueillie à l'intérieur d'une surface calibrée dans un intervalle de temps séparant deux relevés.

Le pluviographe : instrument captant la précipitation de la même manière que le pluviomètre mais avec un dispositif permettant de connaître, outre la hauteur d'eau totale, leur répartition dans le temps, autrement dit les intensités. **(2005, Prof. André Musy).**

I.7.5 Notion de temps de retour

La notion de temps de retour est essentielle en hydrologie. On définit le temps de retour T d'un événement comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement :

$$T=\frac{1}{1-F} \qquad \textbf{I-13}$$

F : probabilité de dépassement d'un événement

(1-F): probabilité de non dépassement

T : est le temps de retour

I.7.6 Détermination des précipitations moyenne dans un bassin versant

Suivant la longueur de la série de données dont on dispose, la densité du réseau de mesure, et la variation du champ pluviométrique, on utilisera préférentiellement l'une des trois méthodes : la méthode de la moyenne arithmétique (peu utilisé), le calcul de moyennes pondérées avec l'utilisation, par exemple, de la méthode des polygones de Thiessen, et finalement les méthodes d'interpolation comme l'utilisation d'isohyètes ou le krigeage. Les méthodes les plus simples et les plus couramment utilisées pour calculer la pluie moyenne sur le bassin sont les méthodes d'interpolation des données pluviométriques collectées sur le bassin ou à proximité de celui-ci. **(2005, Prof. André Musy)**.

I.7.7 Calcul de la moyenne arithmétique

La méthode la plus simple à utiliser qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, elle donne des résultats de plus en plus représentatifs si la pluie est répartie de façon relativement homogène et si la répartition des postes est suffisamment homogène sur la région d'étude. (**ALLAL Randa & KAHLANE Nesrine)**

La pluie moyenne sur le bassin, est calculée de la manière suivante :

$$P_m = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{n_i} \qquad \textit{I-14}$$

Avec Pi=Les hauteurs des précipitations mesurés dans les stations ;

Ni=le nombre des stations

I.7.8 Méthode des polygones de Thiessen

La méthode du polygone de Thiessen est la plus couramment utilisée, parce que son application est aisée et qu'elle donne en général de bons résultats. Elle convient notamment quand le réseau

pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement). Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur locale. (**ALLAL Randa & KAHLANE Nesrine 2021).**

La méthode de Thiessen permet, lors d'une étude hydrologique, d'identifier la station pluviométrique la plus proche de la zone d'étude.

La précipitation moyenne pondérée Pmoy pour le bassin, se calcule alors en effectuant la somme des précipitations Pi de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire Ai), le tout divisé par la surface totale A du bassin.

La précipitation moyenne sur le bassin s'écrit :

$$P_{moy}=\sum_{i=0}^{n}\frac{Si*Pi}{S} \qquad \textbf{I-15}$$

Avec : Si : Surface d'influence du pluviomètre i en Km²

Pi : Précipitation au poste i en mm

S : Surface du bassin versant en Km²

P_{moy}=précipitation moyenne

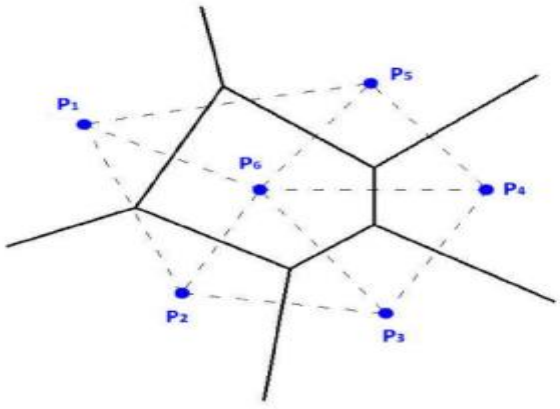


Figure I-7 : Schéma illustrant la représentation graphique de la méthode de thiessen

I.7.9 La méthode des isohyètes (isovaleurs)

Les isohyètes ou lignes (courbes) d'égale pluviométrie sont tracées avec des logiciels de cartographie en tenant compte des coordonnées géographique et topographique et des précipitations aux différentes stations pluviométriques. Leur tracé nécessite un réseau dense par

rapport à la variabilité spatiale des précipitations. Elles peuvent être tracées aussi bien pour la détermination de la précipitation moyenne sur l'ensemble du bassin que sur les précipitations fréquentielles (année humide, année sèche…..). Dans cet exemple, vu l'étendue du bassin versant, le réseau est lâche et n'est pas très représentatif du bassin, cependant, il a permis de spatialiser la pluie sur le bassin. Lors d'une étude d'aménagement par exemple, il suffit de positionner la zone à étudier selon ses coordonnées géographiques sur la carte des isohyètes pour avoir l'information en ce point relative à la précipitation à considérer.(**ALLAL Randa & KAHLANE Nesrine 2021)**

La précipitation Pmoy est calculée par l'expression

$$P_{moy}=\sum_{i=0}^{n}\frac{Si*(Pi+Pi+1)/2}{S} \qquad \textbf{I-16}$$

Avec : Si : Surface d'influence du pluviomètre i en Km²

Pi : Précipitation au poste i en mm

Pi : Précipitation moyenne comprise entre 2 isohyètes en mm

S: Surface du bassin versant en Km²

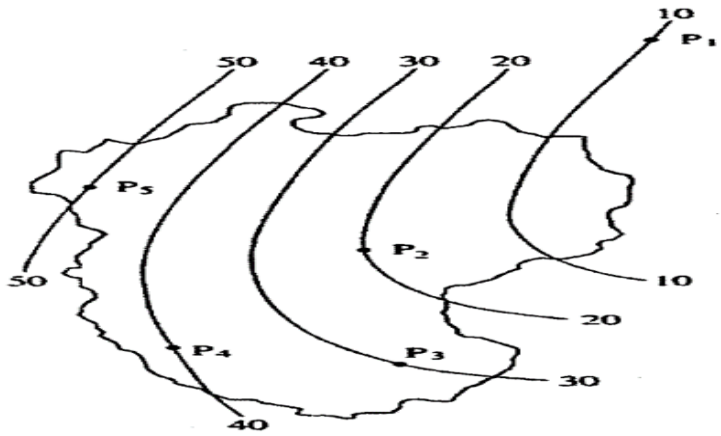


Figure I-8 : Schéma illustrant la carte des isohyète.

La méthode des isohyètes ainsi que celle du polygone de Thiessen sont des méthodes de calcul de la moyenne pondérée et donnent des bons résultats par rapport à la méthode arithmétique lorsque les stations ne sont pas régulièrement réparties sur tout le bassin mais la méthode à retenir quand le réseau pluviométriques est dense est celle des isohyètes.

I.7.10 Variabilité spatio-temporelle des précipitations

Les précipitations sont un des processus hydrologiques les plus variables. D'une part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace et ceci quelle que soit l'échelle spatiale prise en compte (régionale, locale, etc.). D'autre part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.

I.8 Homogénéisation des séries de précipitations

I.8.1 Introduction

Toute étude climatique ou hydrologique est basée sur l'exploitation de séries de données recueillies pendant des périodes plus ou moins longues continues ou discontinues. Les méthodes statistiques d'analyse de ces séries exigent de celles-ci une homogénéité de leurs composants. **(Mr. BALAH BELKACEM ; 2017)**

L'homogénéisation est un procédé qui consiste à détecter puis à corriger les variations des données dans le temps et dans l'espace.

L'homogénéisation porte sur les périodes d'observations des séries homogènes, ou rendues homogènes, de relevés aux postes pluviométriques. Ces périodes sont disparates : certains postes sont observés plus longtemps que d'autres, certains présentent des lacunes de plusieurs années. L'homogénéisation doit s'efforcer de combler les lacunes ou 'l'insuffisance d'observations de certaines stations en prenant en considération les observations sans lacune et de longue durée effectuées en d'autres stations. (**Dubreuil, 1974**).

I.8.2 Homogénéisations pour l'extension des données

Le principe de cette méthode consiste à vérifier l'homogénéité des valeurs mesurées de la station à tester en les corrélant avec celles de référence.

Cette opération permet de combler les lacunes, de tester l'homogénéité des séries de données et de critiquer les données brutes du réseau pluviométrique.

L'évaluation des données manquantes à une station a été déterminée à partir des valeurs provenant de la station voisine présentant le meilleur coefficient de corrélation et ayant fonctionnée durant de l'année manquante. L'extension des données hydrométriques ou climatologiques est souvent indispensable, préalablement aux calculs hydrologiques.

Il arrive fréquemment qu'une station climatologique présente des interruptions dans les relevés, rendant difficile l'utilisation de la station .il convient par conséquent de remplacer les données anormales et de compléter les données manquantes. (**NGUYEN VAN TUU 1979)**

La méthode pratique utilisée pour étendre ou compléter une série de données d'une station A donnée repose sur la régression linéaire entre les données X_A de cette station avec les données X_B d'une station de base B voisine dont la série de données est plus complète et pour la quelle au préalable :

- On s'est assuré de la fiabilité des données.

On a vérifié graphiquement (par courbe de double masse ou bien en portant en ordonnées et en abscisses les données X_A et X_B) qu'il y a une corrélation suffisamment étroite entre les 2 stations. (**NGUYEN VAN TUU 1979)**

Le nombre de couples (X_A,X_B) devra être supérieur à 15 pour que la corrélation soit acceptable

La corrélation linéaire entre les stations A et B s'écrit :

$$\boldsymbol{X_A = \alpha * X_B + \beta} \qquad \textbf{I-17}$$

Avec $$\boldsymbol{\alpha} = \frac{N \sum XA_i \, XB_i - \sum A_i \sum B_i}{N \sum {X_{B_i}}^2 - (\sum X_{Bi})^2} = \frac{\sum X_{Ai} X_{Bi-\overline{X_B}} \sum X_{Ai}}{\sum {X_{Bi}}^2 - \overline{X_B} \sum X_{Bi}} \qquad \text{I-18}$$

$$\beta = \frac{\sum {X_{Bi}}^2 \sum X_{Ai} - \sum X_{Bi} \sum X_{Ai}}{N \sum {X_{Bi}}^2 - (\sum X_{Bi})^2} = \overline{X_A} - \alpha \overline{X_B} \qquad \textbf{I-19}$$

$\overline{X_A}$ *et* $\overline{X_B}$ *Étant les moyennes des* X_{Ai} *et des* X_{Bi}

Les expressions ci –dessus ont été obtenues en rendant minimum les carrés des distances des points représentatifs des couples (X_{Ai} ,X_{Bi}) à la droite d'ajustement $X_A = X_B + \beta$ c'est la méthode des moindres carrés

La précision de la corrélation est caractérisée par le coefficient de corrélation donnée par :

$$\boldsymbol{r = \alpha \frac{\sigma B}{\sigma A} \;\; ou \; r^2 = \alpha^2 \frac{\sum (X_{Bi-\overline{X_B}})^2}{\sum (X_{Ai-\overline{X_A}})^2}} \qquad \textbf{I-20}$$

r : est le coefficient de corrélation

Qui caractérise l'ensemble des écarts $X_{Ai} - X'_{Ai}$ entre valeurs observées X_{Ai} et valeurs calculées X'_{Ai} par la droite de régression ci-dessus.σA et σB étant les écarts quadratiques moyens des X_{Ai} et X_{Bi} .Plus r est proche de 1, meilleure est la corrélation entre les stations A et B. Pour r inférieur à 0.75. Cette corrélation est considérée comme sujette à caution

La droite de régression $X_A=\alpha X_B+\beta$ permettra ainsi de générer les données manquantes ou défectueuses de la station A à partir des données correspondantes de la station B. **(NGUYEN VAN TUU 1979).**

I.9 Analyse fréquentielle

I.9.1 Définition

L'analyse fréquentielle est une approche statistique de prédiction basée sur des calculs de probabilité utilisant l'historique des événements passés pour prédire des fréquences d'apparitions futures. Cette analyse devra permettre, pour chacune des stations étudiées, d'estimer les quantiles correspondants aux périodes de retour.

I.9.2 Lois statistiques

Le phénomène cru est généralement ajustable à des lois statistiques très nombreuses
Le choix de celle qui s'ajuste mieux se fait après comparaison de differentes lois de probabilités et méthodes d'estimation à l'aide de test d'adéquation (**Habibi et al.2013**)

Beaucoup d'auteurs utilisent le test d'adéquation comme technique permettant de choisir le model fréquentiel approprié. Cependant il est à remarquer qu'un test statistique ne permet que de conclure au rejet, ou à l'acceptation, il n'est pas en mesure de comparer plusieurs modèles fréquentiels et de choisir le meilleur.

Un tel choix résulte fréquemment de l'expérience d'un ou plusieurs auteurs dans certains pays ou dans certaines administrations, il existe en effet des règles ou normes qui fixent la méthodologie d'une analyse fréquentielle. Pour l'étude des débits maximums, par exemple, la loi de Pearson III est recommandée aux Etas unis.
En effet, les lois statistiques qui font intervenir peu de paramètres et qui sont communément employées sont les suivantes :

- La loi Normale ou la loi de Gauss ;
- La loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle ;
- La loi de Pearson III

I.9.2.1 **Loi Normale ou de Gauss.**

La loi normale est une loi à deux paramètres dont la fonction de densité de la probabilité **est** *:*

$$F(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}.e^{\frac{-(x-\mu)^2}{\sigma}} \qquad \textbf{I-21}$$

Avec : F(x) est la fonction de la Densité de la probabilité

: $\sigma\ est\ l'ecart\ type\ de\ la\ précipitation\ estimé\ par\ S$

:μ est la moyenne de la précipitation estimée par $\bar{x}$

La probabilité de non dépassement d'une variable Xi est calculée par l'intégrale :

$$P(X\leq xi) = F(x) = \int_{-\infty}^{xi} f(x)dx \qquad \textbf{I-22}$$

$$F(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{xi} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}\,dx \qquad \textbf{I-23}$$

Si on pose que u=$\frac{x-\mu}{\sigma}$) est :

$$F(u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{ui} e^{\frac{-u^2}{2}}\,du \qquad \textbf{I-24}$$

Si on connait la probabilité de non dépassement ; la variable réduite Zi correspondante est détermine en Excel par la fonction $\ll LOI.NORMALE.STANDARD.INVERSE.N \gg$ en y entrant la probabilité correspondante à Zi .pour la loi normale ; le facteur de fréquence K_T est égale la valeur de la variable réduite Zi on a donc :

$$X_T=\mu + Z_T * \sigma \qquad \textbf{I-25}$$

I.9.2.2 **La loi de Gumbel ou la loi de double exponentielle**

La loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle est une loi de probabilité à deux paramètres dont la fonction de répartition ou fréquence de non dépassement s'écrit :

$$\mathbf{p(X\leq x_i) =F(x)=}\ e^{-e^{\frac{x-a}{b}}}$$

Si on pose que u=$\frac{x-a}{b}$ alors X=a+ub, on aura

$$\mathbf{P(X\leq x_i) = F(x)=}\ e^{-e^{-u}}$$

$$\mathbf{u= -ln}[-\mathbf{ln}(F(x)]$$

Pour un quartile $X_T$de période de retour on aura

$$X_T = a + u_T.b \qquad \textit{I-26}$$

$$\text{Avec } u_T = -ln[-\ln(F(x_T)]$$

$$u_T = -ln\left[-\ln(1-\frac{1}{T})\right]$$

$$u_T = -ln\left[ln(\frac{T}{T-1})\right] \quad \textit{I-27}$$

Pour une série de n variable xi, les paramètres de position « a » et d'échelle « b » peuvent être déterminé par l'une des quatre méthodes à savoir la méthode graphique (méthode de la droite de régression), la méthode des moments, la méthode de L-moment et la méthode du maximum de vraisemblance. Afin d'établir l'Equation générale d'un quartile X_T correspondant à une période de retour T, le facteur de fréquence de la loi de Gumbel est calculé à partir des expressions des paramètres « a » et « b » déterminés avec la méthode des moments. En effet, par la méthode des moments, les paramètres « a » et « b » sont déterminés en résolvant le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \mu = a + b.\gamma \\ \sigma^2 = \frac{\pi^2}{6} * b^2 \end{cases} \text{ Avec } \gamma = 0.57772 \ \textit{la constante d'erreur} \quad \text{I-28}$$

$$\begin{cases} b = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\sigma \\ a = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.\gamma \end{cases} \quad \textit{I-29}$$

En reportant les valeurs de $\ll a \gg et \ll b \gg dans\ l'equation\ on\ aura$

$$x_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.\gamma - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.ln\left[ln(\frac{T}{T-1})\right] \quad \textbf{I-30}$$

$$x_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma\ (\gamma + ln\left[ln(\frac{T}{T-1})\right] \quad \textit{I-31}$$

$$x_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma\ (0.57772 + ln\left[ln(\frac{T}{T-1})\right] \quad \textbf{I-32}$$

$$x_T = \mu + k_T.\sigma \quad \textbf{I-33}$$

$$\textit{Avec} \quad k_T = 0.57772 + ln\left[ln(\frac{T}{T-1})\right] \quad \textit{I-34}$$

Avec

$$\begin{cases} k_T = \text{est le facteur de fréquence de la loi de Gumbel} \\ \sigma = \text{est l'ecart type de la précpitation estimé par S} \\ \mu = \text{est la moyenne de la précipitation estimé par } \overline{X} \end{cases}$$

I.9.2.3 **La loi de Pearson *III***

La loi de Pearson III est une loi de probabilité à trois paramètres dont la fonction de densité de probabilité s'écrit :

$$F(x)=\frac{1}{\lambda\gamma(\beta)}\left(\frac{x-\gamma}{\lambda}\right)\beta-1).e^{\frac{-(x-\gamma)}{\lambda}} \quad \textbf{I-35}$$

Avec ƛ, β et γ des paramètres estimés par les relations suivantes :

$$\beta=(2/cs)^2\ ; \quad \textit{I-36}$$

$$\lambda=\frac{S}{\sqrt{\beta}}\ ; \quad \textit{I-37}$$

$$\gamma=\overline{x}+S\sqrt{\beta} \quad \textit{I-38}$$

Ou Cs est le coefficient d'asymétrie de la distribution et S est l'écart type

Le quartile correspondant à la période de retour T est calculé par l'équation de fréquence Généralisée suivante :

$$X_{T=}\overline{X}+K_T*\mathbf{S} \quad \textbf{I-39}$$

Le facteur de fréquence K_T de la loi de Pearson III est calculé par la formule suivante :

$$K_T=\frac{2}{Cs}\left(\left(\frac{cs}{6}\right)\left(Z-\frac{cs}{6}\right)+1\right)^3-1) \quad \textit{I-40}$$

Avec Z la variable réduite de la loi normale correspondante au quartile : X_T

I.9.2.4 **Expressions de calcul des différentes caractéristiques de la distribution**

- La moyenne ***:*** $\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}xi$ **I-41**
- La variance *:* $var\ (x)=\frac{1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}(xi-\overline{x})^2$ ***I-42***
- L'écart type **:** $\sigma=\sqrt{\frac{\sum(xi-\overline{x})^2}{n-1}}$ **I-43**
- Coefficient de variation *:* $Cv=\frac{\sigma}{\overline{x}}=\frac{\sqrt{\frac{\sum(xi-\overline{x})^2}{n-1}}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}xi}$ ***I-44***

$$\mathbf{Cv}=\frac{\sigma}{\overline{x}}=\sqrt{\frac{\sum(xi-\overline{x})^2}{(n-1)\overline{x}^2}} \quad \textbf{I-45}$$

Si on pose Ki= $\frac{xi}{\bar{x}}$ on aura : $\mathrm{Ki}\textbf{-1}=\frac{xi-\overline{x}}{\overline{x}}=(ki-1)^2$ **I-46**

Donc on aura : $Cv=\sqrt{\frac{\sum(Ki-1)^2}{n-1}}$ **I-47**

- Coefficient d'asymétrie *:* $Cs=\frac{\sum_{i=1}^{n}(xi-\overline{x})^3}{(n-3)(C_v{}^3*\overline{x^3})}$ **I-48**

I.10 Contribution d'un SIG à la gestion des ressources en eaux.

I.10.1 Définition

Un système d'information géographique est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace.

Dans la matière de la gestion des ressources, les systèmes d'informations géographiques se présentent comme des technologies efficientes. Ayant un large domaine d'application, ils ont montré une grande efficacité dans la matière de la gestion des ressources grâce à leur performance dans le géo référencement .Ils offrent des outils appropriés pour la combinaison de données spatiales ainsi que des modèles sur un même support graphiques. Ceci permettra une communication des informations entre les intervenants afin d'assurer une bonne coordination des activités.

I.10.2 Présentation du logiciel ArcGis 10.3

Pour le present Mémoire on a utilisé le logiciel ArcGis 10.3.Il est l'un des systèmes d'informations géographiques les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales. Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées. **(initiation_arcgis10xks1115.pdf visité le 22/12/2022)**

Les différentes couches d'informations sont descriptives d'un espace géographique terrestre déterminé. Elles peuvent correspondre à des documents cartographiques représentants des objets thématiques géographiques identifiés (carte de type IGN, photographies aériennes, image s satellitaires, etc.) Ou issus des analyses et des procédures de spatialisation (carte de la teneur en eau de sol, carte topographique, carte de la hauteur des arbres dans un peuplement forestier, etc.)**. (initiation_arcgis10xks1115.pdf visité le 22/12/2022).**

Le logiciel ArcGis 10.3comprend plusieurs applications dont les principales sont

- ArcMap : ArcMap est l'application fondamentale du logiciel ArcGIS. Elle contient une boîte à outils, organisés sous forme de modules indépendants (extensions), permettant de gérer, manipuler, analyser et éditer les différentes couches d'informations de la base de données. ArcMap est l'équivalent de l'ancienne version d'ArcView.
- Arc Globe et Ar Scène : Deux environnement d'affichage, de manipulation et d'animation 2D et 3D de données issues de 3D et Spatial Analyst.
- AR Catalogue : est un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux offerts par les systèmes d'exploitation comme WINDOWS ou DOS (copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc.). Il est vivement conseillé d'utiliser ArcCatalog pour effacer les fichiers car ces fichiers sont accompagnés d'autres fichiers que l'explorateur de Windows, s'il est utilisé, ne permet pas de les effacer automatiquement. ArcCatalog permet aussi de visualiser les données tabulaires et des couches géographiques ainsi qu'une exploration des différents thèmes qui les constituent**. (initiation_arcgis10xks1115.pdf visité le 22/12/2022)**

I.11 Modélisation spatio-temporelle des précipitations

I.11.1 Les différents types méthodes d'interpolation locales les plus utilisées en ArcGis

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation des points dont les valeurs sont connues pour estimer des valeurs à d'autres points inconnues. Des méthodes d'interpolations différentes appliquées sur les mêmes données peuvent produire des résultats différents d'où il est donc nécessaire d'évaluer la pertinence comparée de ces méthodes.
En effet l'ArcGis 10.3 comprend plusieurs méthodes d'interpolations mais les plus utilisées sont :

- La méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW),
- La méthode polynomiale locale,
- La méthode du voisin naturel (NN), et
- Les méthodes de base radiales (Spline).

I.11.1.1 **Le krigeage**

C'est une méthode d'interpolation géostatistique qui utilise un variogramme (analyse de la variabilité des données en fonction de la distance qui les sépare). Le variogramme dépend de la

répartition spatiale des données plutôt que sur les valeurs réelles. Quand on applique la méthode de krigeage on peut voir des résultats pour des points en entrée différents de la valeur en entrée.

I.11.1.2 *La méthode IDW*

C'est une technique d'interpolation déterministe locale qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondérées par l'inverse de la distance au point calculé: plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte. Elle estime que les points plus proches de l'emplacement à calculer auront plus d'influence.

I.11.1.3 *La méthode du voisin naturel*

Cette méthode cherche le sous-ensemble d'échantillons le plus proche à un point et applique une pondération en fonction de la zone où ils se trouvent. C'est une méthode déterministe locale et les hauteurs interpolées sont forcément à l'intérieur de la plage de valeurs utilisées. Elle ne produit pas de pics, de fosses, de crêtes ou vallées qui ne sont pas déjà présents dans les échantillons en entrée et s'adapte localement à la structure des données en entrée. Elle ne nécessite pas de paramétrage par l'utilisateur et fonctionne aussi bien pour des données réparties régulièrement ainsi qu'irrégulièrement. **(ALLAL Randa & KAHLANE Nesrine, 2020)**

I.11.1.4 *La méthode d'interpolation Spline*

Pour élaborer la carte des isohyètes, il est possible d'utiliser des outils de système d'information géographique tels que l'outil Spline.

Cette méthode utilise une fonction mathématique afin de minimiser la courbure de la surface et produit une surface lisse qui correspond exactement aux points d'entrée.

Dans le contexte de la production d'une carte nationale des isohyètes extrêmes, l'outil Spline peut être utilisé pour interpoler les données des précipitations recueillies à partir des stations météorologiques pour créer une surface continue des précipitations. Cette surface peut ensuite être utilisée pour générer des isohyètes extrêmes qui sont des lignes qui relient les points ayant la même quantité des précipitations. **(ALLAL Randa & KAHLANE Nesrine, 2020).**

CONCLUSIONS : Comme notre travail a pour objectif principal de contribuer à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes nous optons d'utiliser pour la suite du développement du travail les méthodes de calcul suivantes :

- Pour le traitement des données,
  - homogénéisation pour extension des séries des précipitations journalières maximales annuelles (P_{24})
  - Utilisation de la loi de Pearson III pour l'analyse fréquentielle des précipitations extrêmes.
  - Calcul de la courbe de fréquence des précipitations extrêmes.
- Pour la modélisation spatio- temporel des précipitions extrêmes,
  - Utilisation du logiciel Arc Gis 10.3 pour la construction des cartes des isohyètes extrêmes suivant la méthode d'interpolation Spline.

CHAPITRE II : TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

II.1 Méthodologie de travail

La méthodologie de travail a respecté le protocole suivant :

- Collecter les données brutes des précipitations journalières annuelles maximales(P24) station par station auprès de l'IGEBU.
- Trier et étendre ou compléter la série des précipitations en utilisant la méthode d'homogénéisation.
- Ranger les précipitations journalières annuelles maximales du plus grand au plus petit.
- Faire une analyse statistique détaillée des précipitations
    - Calcule de la précipitation moyenne :

$$P_m = \sum_{i=0}^{n} \frac{Pi}{N} \qquad \textit{II-1}$$

    - Calcule de la précipitation au poste i en mm

$$P_i = \frac{m}{n+1} * 100\% \qquad \textit{II-2}$$

Pi=précipitation au poste i en mm

m=numéro d'ordre

N =nombre total d'échantillon

    - Calcule du coefficient de divergence :

$$Cv = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)\bar{x}^2}} \qquad \textit{II-3}$$

    - Calcule du coefficient d'asymétrie

$$Cs = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^3}{(n-3)\, Cv^3 * \bar{x}^3} \qquad \textit{II-4}$$

    - Faire le rapport entre le coefficient d'asymétrie par rapport au coefficient de variation
- Calcul de la courbe de fréquence des précipitations extrêmes
    - Suivant la valeur du rapport en considérant le coefficient de variation on a utilisé le tableau de Pearson III pour trouver la valeur du coefficient des crues (kp) correspondant aux valeurs de probabilité données.
    - Tracer la courbe de fréquence correspondante à chaque coefficient d'asymétrie.

II.2 Présentation des résultats

II.2.1 Comparaison des lois sur base de l'analyse fréquentielle

Nous avons fait une analyse fréquentielle en comparant les résultats trouvés selon la loi normale, la loi de Gumbel ou exponentielle et la loi de Pearson III afin de juger quelle loi adéquate pour le présent travail en comparant les résultats obtenus après l'analyse statistique des précipitations annuelles maximales journalières.

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix de la loi de distribution fréquentielle

Le présent sous chapitre consiste à choisir la loi statistique la plus adéquate à l'estimation des quantiles extrêmes à partir des observations faites au niveau des stations implantées aux différents endroits de la zone d'étude. Afin de pallier aux contraintes liées aux interruptions des séries pluviométriques observées sur différentes stations météorologiques et sur différentes périodes d'observations, on a procédé à une homogénéisation des données pluviométriques.

Ce qui consiste à étendre une série courte discontinue par rapport à la série le plus long mois discontinue.

Tableau II-1 **:** *Le tableau suivant montre les résultats des données pluviométriques à l'état brutes (non homogénéiser) :*

NYAMUSWAGA		MUYINGA	RWEGURA	KIRUNDO PROJET	KARUZI	NGOZI OCIBU	MPARAMBO	BUHORO
ANNEE	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	p24
1990	77	62,2	56,5	64	48,4	50	107,2	69,8
1991	41,9	34,2	48,8	49,6	50,8	37,3	65,5	68,2
1992	54,9	43,8	61,2	42,7	57	40,3	31,1	40,3
1993	41	76	79	51,9	43,8	25,6	51,8	62,5
1994	97	51,2	63,5	48	39,5	-	46	62,6
1995	32,4	72,3	64,2	53,2	76,8	-	58,8	42,3
1996	34,6	51,8	91,2	70,8	44,8	-	44,3	39,2
1997	48,5	70,4	51,9	86,3	60,1	-	-	44,8
1998	43	37,1	47,7	93	69,3	-	-	-
1999	56	52,4	122,4	71,4	59,6	-	-	-
2000	55,6	57	64,6	36,5	88,4	-	-	-
2001	24,4	45,5	91	39	47,6	-	-	-
2002	14,6	47,7	61	93,4	80,6	-	-	-
2003	35	51,5	83,8	108,5	66,4	-	-	-
2004	65,6	56	91,4	80,2	67,6	-	-	-
2005	70,3	62	100,3	81,9	42,5	-	-	-
2006	49,6	49,5	41,6	62	98,9	-	-	-
2007	39,3	49,4	65	88,5	55,5	-	-	-
2008	55	59,9	37,4	64	72	-	-	50
2009	60	59,4	56,2	65,6	32,6	-	129,3	90,6
2010	66	69,5	77,7	50,4	50	-	82,8	80
2011	54,5	53,6	43,7	70	51,5	-	64,7	64
2012	44,5	86,5	43,8	55,9	46,2	-	86,8	75,78
2013	67	86,3	58	63,2	40,3	60,7	99	50
2014	54,2	36,1	56	74,2	65,9	60,8	61	72,5
2015	47,3	64,1	56,4	56	54,7	51,6	51,9	39,5
2016	62,6	44,7	50	37,7	64,5	84,6	126,9	125
2017	91,6	72	66,4	50	103,6	81,1	56,2	47
2018	49,2	68,9	56,2	37,7	58,2	70,7	104,2	91
2019	36,6	49,1	60	65	65,2	101,5	44,5	63,5
2020	56,5	58	66,3	95,4	83,2	75,6	98,6	81,5
2021	72,8	54	60	54,6	74,2	43,3	54	52,93

Le tableau II-2 condense les résultats après l'homogénéisation des précipitations pour laquelle les stations de Ngozi ocibu nous avons fait l'extension de 1994 à 2012. Donc on a homogénéisé la station de Ngozi ocibu seulement.

Tableau II-2 : Le tableau suivant montre les résultats des données pluviométriques brutes homogénéisées :

NYAMUSWAGA		MUYINGA	RWEGURA	KIRUNDO PROJET	KARUZI	NGOZI OCIBU	MPARAMBO	BUHORO
ANNEE	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	p24
1990	77	62,2	56,5	64	48,4	50	107,2	69,8
1991	41,9	34,2	48,8	49,6	50,8	37,3	65,5	68,2
1992	54,9	43,8	61,2	42,7	57	40,3	31,1	40,3
1993	41	76	79	51,9	43,8	25,6	51,8	62,5
1994	97	51,2	63,5	48	39,5	47,08	46	62,6
1995	32,4	72,3	64,2	53,2	76,8	33,98	58,8	42,3
1996	34,6	51,8	91,2	70,8	44,8	34,43	44,3	39,2
1997	48,5	70,4	51,9	86,3	60,1	37,25	-	44,8
1998	43	37,1	47,7	93	69,3	36,13	-	-
1999	56	52,4	122,4	71,4	59,6	38,77	-	-
2000	55,6	57	64,6	36,5	88,4	38,69	-	-
2001	24,4	45,5	91	39	47,6	32,36	-	-
2002	14,6	47,7	61	93,4	80,6	30,37	-	-
2003	35	51,5	83,8	108,5	66,4	34,51	-	-
2004	65,6	56	91,4	80,2	67,6	40,71	-	-
2005	70,3	62	100,3	81,9	42,5	41,67	-	-
2006	49,6	49,5	41,6	62	98,9	37,47	-	-
2007	39,3	49,4	65	88,5	55,5	35,38	-	-
2008	55	59,9	37,4	64	72	38,56	-	50
2009	60	59,4	56,2	65,6	32,6	39,58	129,3	90,6
2010	66	69,5	77,7	50,4	50	40,79	82,8	80
2011	54,5	53,6	43,7	70	51,5	38,46	64,7	64
2012	44,5	86,5	43,8	55,9	46,2	36,43	86,8	75,78
2013	67	86,3	58	63,2	40,3	60,7	99	50
2014	54,2	36,1	56	74,2	65,9	60,8	61	72,5
2015	47,3	64,1	56,4	56	54,7	51,6	51,9	39,5
2016	62,6	44,7	50	37,7	64,5	84,6	126,9	125
2017	91,6	72	66,4	50	103,6	81,1	56,2	47
2018	49,2	68,9	56,2	37,7	58,2	70,7	104,2	91
2019	36,6	49,1	60	65	65,2	101,5	44,5	63,5
2020	56,5	58	66,3	95,4	83,2	75,6	98,6	81,5
2021	72,8	54	60	54,6	74,2	43,3	54	52,93

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Nyamuswaga sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-3: Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Nyamuswaga

	P(X≤ Xi)	P(X≥ Xi)	NORMALE		GUMBEL		LOI DE PEARSON III	
T (ans)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	KT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,84162123	38,151	-0,82	38,508	-0,854	37,93
2	0,5	0,5	0	53,078	-0,16	50,163	-0,064	51,94
5	0,8	0,2	0,84162123	68,005	0,72	65,845	0,817	67,56
10	0,9	0,1	1,28155157	75,808	1,305	76,228	1,315	76,4
25	0,96	0,04	1,75068607	84,128	2,045	89,346	1,876	86,35
50	0,98	0,02	2,05374891	89,504	2,594	99,078	2,255	93,08
100	0,99	0,01	2,32634787	94,338	3,138	108,74	2,608	99,33
250	0,996	0,004	2,65206981	100,12	3,855	121,46	3,043	107,1
500	0,998	0,002	2,87816174	104,13	4,397	131,06	3,355	112,6
1000	0,999	0,001	3,09023231	107,89	4,938	140,66	3,654	117,9

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

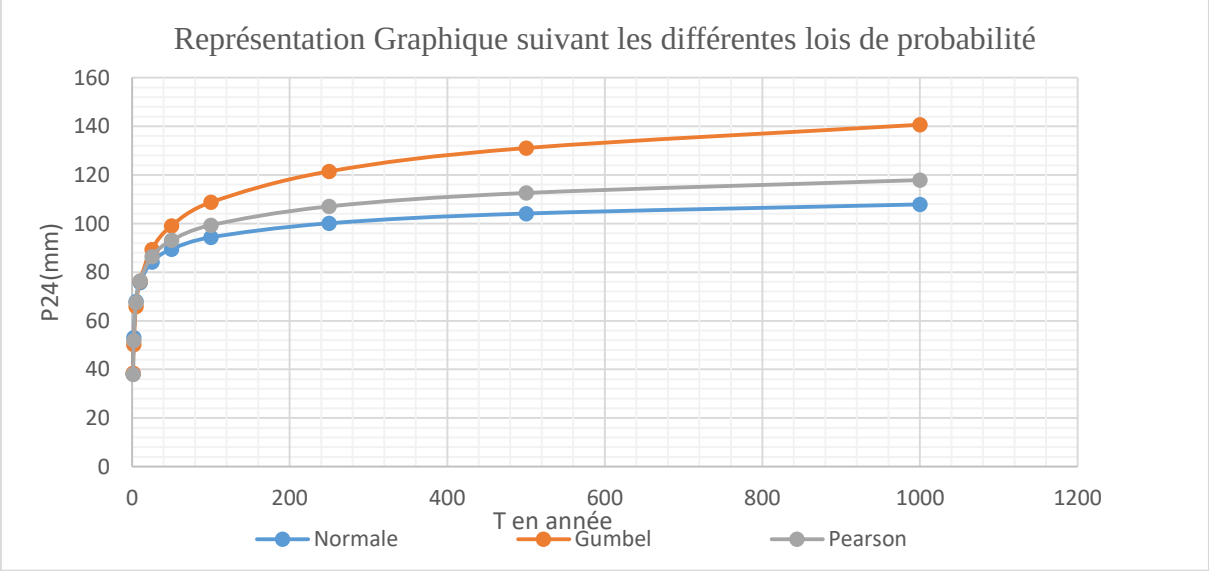


Figure II-1: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Nyamuswaga**.**

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Muyinga sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-4: Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Muyinga

			Normale		GUMBEL		LOI DE PEARSON III	
T (ans)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	KT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,842	46,198	-0,822	46,462	-0,855	46,021
2	0,5	0,5	0,000	57,253	-0,164	55,094	-0,075	56,262
5	0,8	0,2	0,842	68,308	0,720	66,708	0,811	67,907
10	0,9	0,1	1,282	74,087	1,305	74,398	1,319	74,583
25	0,96	0,04	1,751	80,249	2,045	84,114	1,897	82,166
50	0,98	0,02	2,054	84,230	2,594	85,000	2,290	87,327
100	0,99	0,01	2,326	87,811	3,138	89,000	2,657	92,149
250	0,996	0,004	2,652	90,000	3,855	93,000	3,113	98,138
500	0,998	0,002	2,878	95,059	4,397	99,000	3,440	102,443
1000	0,999	0,001	3,090	95,000	4,938	100,000	3,756	106,593

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

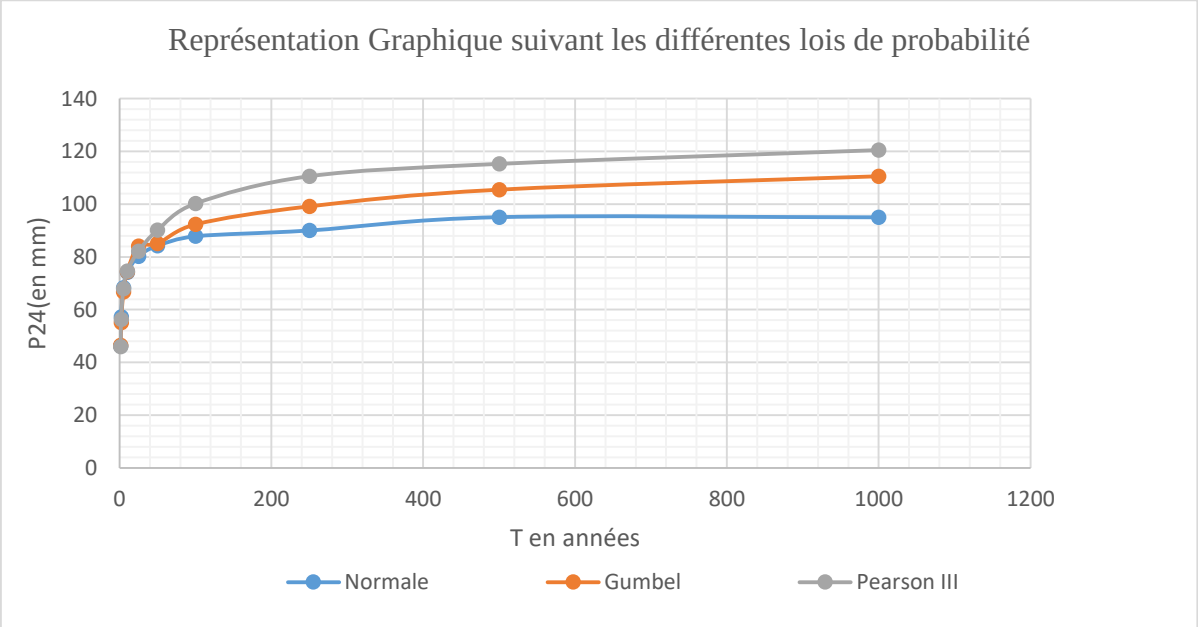


Figure II-2 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Muyinga.

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Rwegura sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-5 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Rwegura

			NORMALE		GUMBEL		LOI DE PEARSON III	
T (ans)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	YT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,842	48,935	-0,822	49,314	-0,8394776	50,987
2	0,5	0,5	0,000	64,788	-0,164	61,692	-0,1927276	63,478
5	0,8	0,2	0,842	80,640	0,720	78,346	0,72689667	80,654
10	0,9	0,1	1,282	88,927	1,305	89,373	1,3322708	92,336
25	0,96	0,04	1,751	97,763	2,045	103,305	2,08216206	105,569
50	0,98	0,02	2,054	103,472	2,594	113,640	2,62765427	115,789
100	0,99	0,01	2,326	108,606	3,138	123,900	3,16145836	130,654
250	0,996	0,004	2,652	114,742	3,855	137,408	3,85522859	145,789
500	0,998	0,002	2,878	119,000	4,397	147,608	4,37398489	155,987
1000	0,999	0,001	3,090	122,995	4,938	157,800	4,88922395	165,478

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

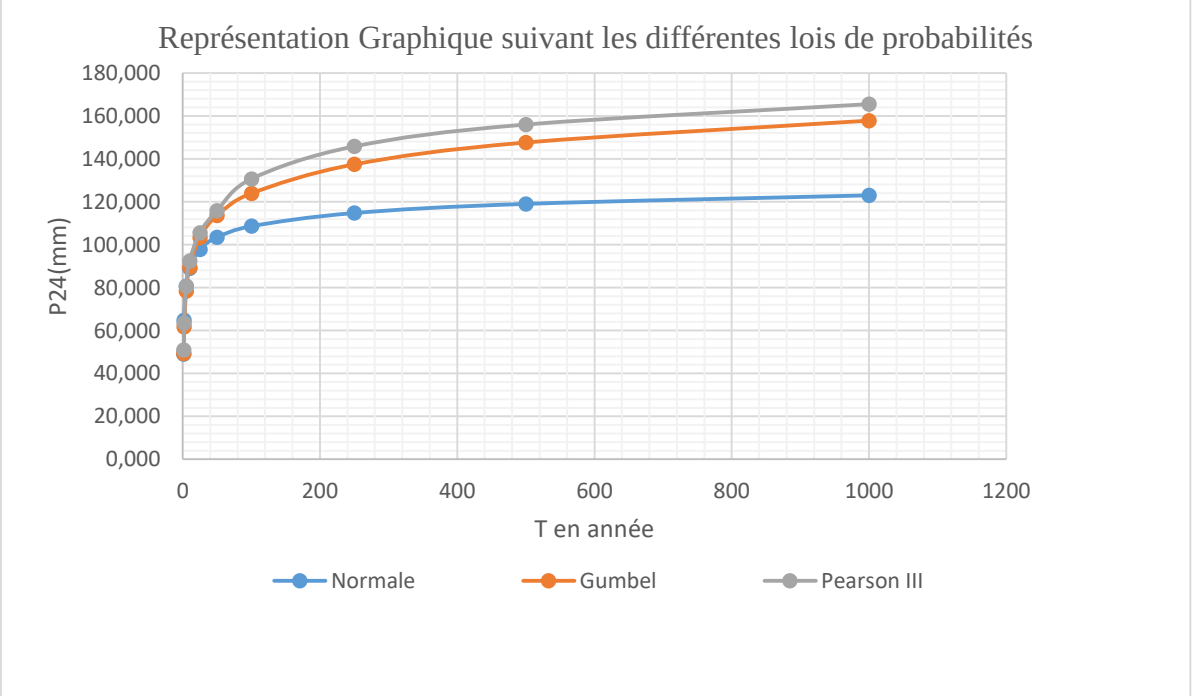


Figure II-3 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Rwegura**.**

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Kirundo sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-6 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Kirundo.

			NORMALE		GUMBEL		LOI DEPEARSON III	
T (ans)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	YT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,841621	48,4395	-0,8215	48,8209	-0,855294917	48,18029
2	0,5	0,5	0	64,39375	-0,16436	61,2781	-0,078626074	62,90327
5	0,8	0,2	0,8416212	80,348	0,719822	78,0391	0,809427137	79,73771
10	0,9	0,1	1,2815516	88,68757	1,305225	89,1363	1,320454381	89,42504
25	0,96	0,04	1,7506861	97,58075	2,044883	103,158	1,902384376	100,4564
50	0,98	0,02	2,0537489	103,3258	2,593603	113,56	2,299197396	107,9786
100	0,99	0,01	2,3263479	108,4933	3,138272	123,885	2,670468525	115,0167
250	0,996	0,004	2,6520698	114,6679	3,855417	137,479	3,132274122	123,7709
500	0,998	0,002	2,8781617	118,9538	4,396918	147,744	3,464679862	130,0722
1000	0,999	0,001	3,0902323	122,974	4,938027	158,002	3,785448486	136,1529

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

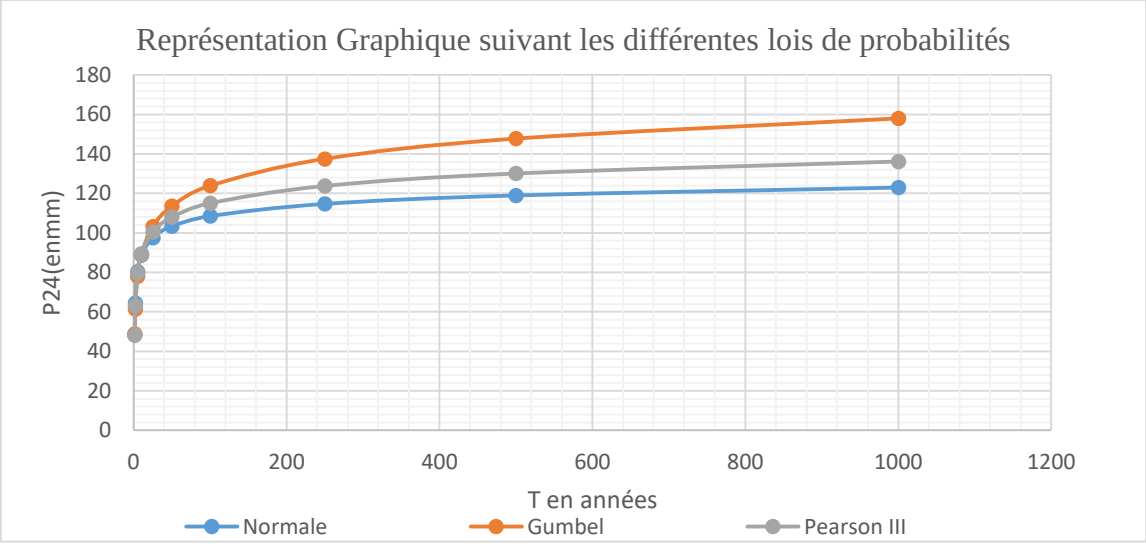


Figure II-4 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Kirundo**.**

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Karuzi sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-7 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Karuzi

			NORMALE		GUMBEL		PEARSON III	
T(anS)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	YT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,8416	46,7541	-0,8215	47,1004	-0,9	46,522
2	0,5	0,5	0	61,2406	-0,1644	58,4116	-0,1	59,247
5	0,8	0,2	0,84162	75,7271	0,7198	73,6306	0,79	74,796
10	0,9	0,1	1,28155	83,2995	1,3052	83,707	1,33	84,142
25	0,96	0,04	1,75069	91,3745	2,0449	96,4384	1,97	95,09
50	0,98	0,02	2,05375	96,591	2,5936	105,883	2,41	102,72
100	0,99	0,01	2,32635	101,283	3,1383	115,258	2,83	109,98
250	0,996	0,004	2,65207	106,89	3,8554	127,602	3,36	119,14
500	0,998	0,002	2,87816	110,781	4,3969	136,923	3,75	125,83
1000	0,999	0,001	3,09023	114,432	4,938	146,237	4,13	132,35

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

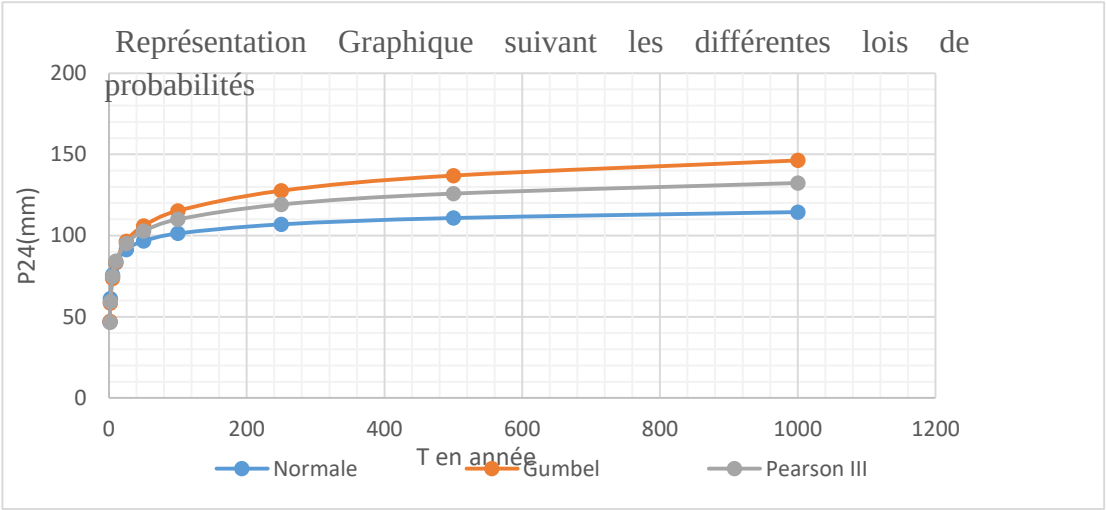


Figure II-5 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Karuzi.

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Mparambo sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-8 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Mparambo

			NORMALE		GUMBEL		PEARSON III	
T (anS)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	YT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,84162	31,6745	-0,8215	49,4176	-0,85569	48,4266
2	0,5	0,5	0	56,07	-0,16436	68,4659	-0,10203	70,2724
5	0,8	0,2	0,841621	80,4655	0,719822	94,095	0,79616	96,3079
10	0,9	0,1	1,281552	93,2175	1,305225	111,064	1,32744	111,708
25	0,96	0,04	1,750686	106,816	2,044883	132,504	1,94335	129,561
50	0,98	0,02	2,053749	115,601	2,593603	148,409	2,36932	141,908
100	0,99	0,01	2,326348	123,502	3,138272	164,197	2,7719	153,577
250	0,996	0,004	2,65207	132,944	3,855417	184,985	3,27768	168,238
500	0,998	0,002	2,878162	139,497	4,396918	200,681	3,64495	178,884
1000	0,999	0,001	3,090232	145,645	4,938027	216,365	4,00177	189,227

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

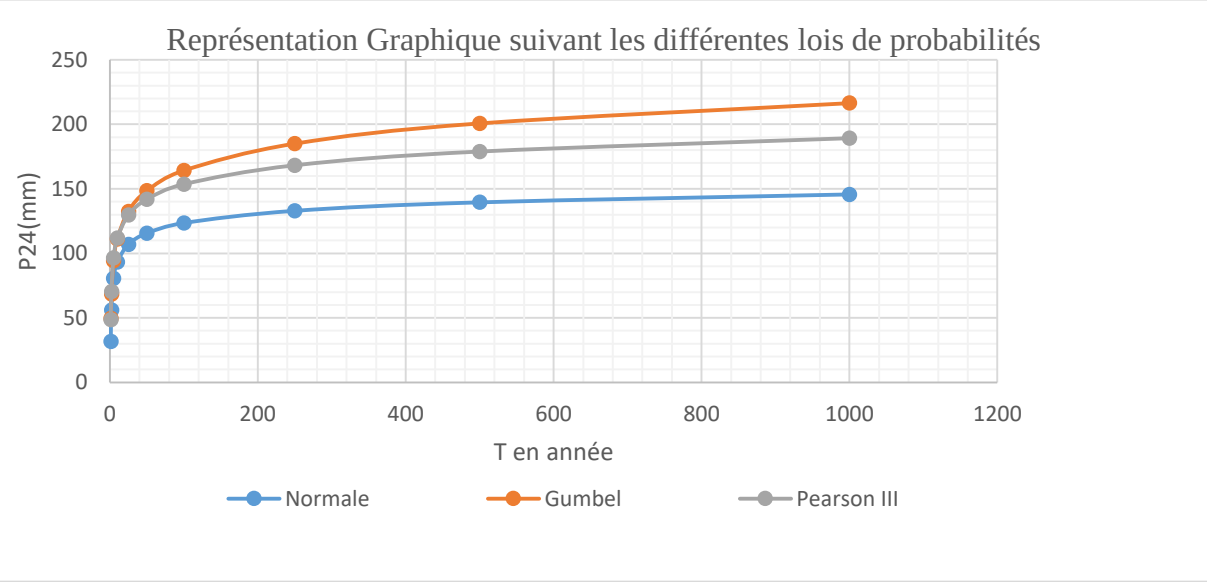


Figure II-6 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Mparambo.

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Ngozi Ocibu sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-9 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Ngozi Ocibu

			NORMALE		GUMBEL		PEARSON III	
T (anS)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	YT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,841621	29,51385	-0,8215	29,907431	-0,8440165	29,4669846
2	0,5	0,5	0	45,97936	-0,16436	42,763903	-0,0085876	45,8113497
5	0,8	0,2	0,8416212	62,44487	0,719822	60,061991	0,839007	62,3937239
10	0,9	0,1	1,2815516	71,05168	1,305225	71,51483	1,2869307	71,1569224
25	0,96	0,04	1,7506861	80,22985	2,044883	85,985524	1,7682923	80,5742995
50	0,98	0,02	2,0537489	86,15898	2,593603	96,72071	2,0812928	86,6978547
100	0,99	0,01	2,3263479	91,49212	3,138272	107,37663	2,3642018	92,2326975
250	0,996	0,004	2,6520698	97,86456	3,855417	121,40689	2,7039503	98,8795496
500	0,998	0,002	2,8781617	102,2878	4,396918	132,00083	2,9408738	103,514732
1000	0,999	0,001	3,0902323	106,4368	4,938027	142,58712	3,163922	107,878455

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

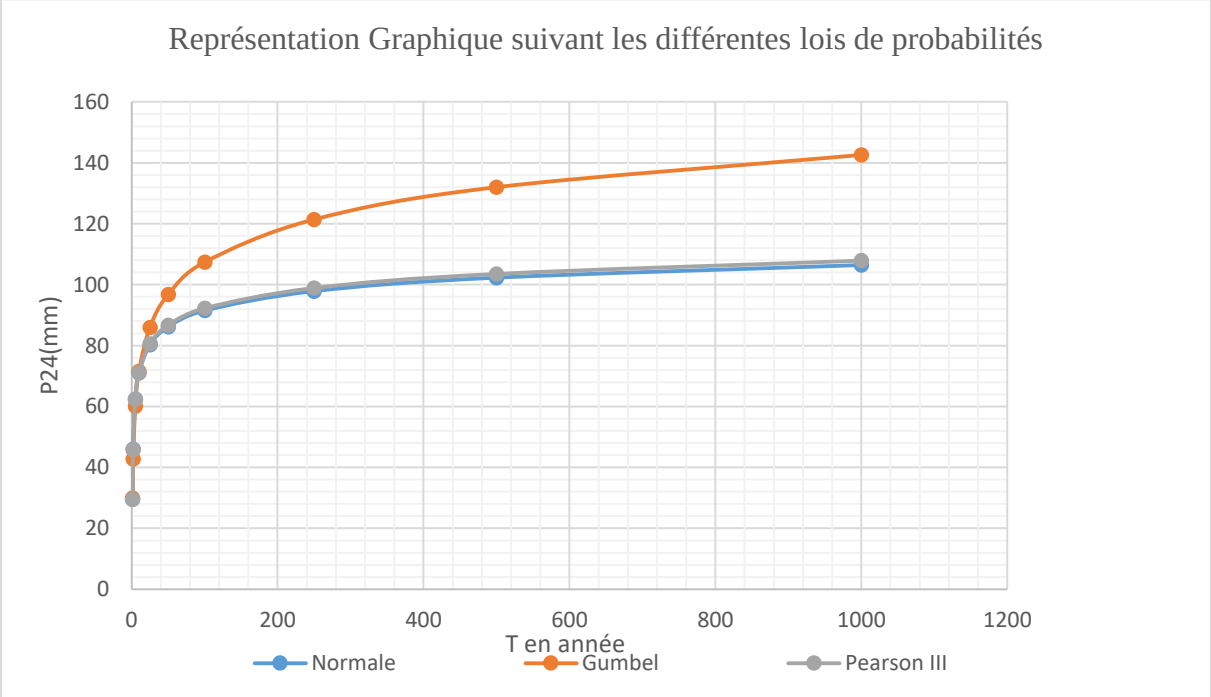


Figure II-7 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Ngozi Ocibu.

Les résultats de l'analyse fréquentielles des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III pour la station Buhoro sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-10 : Synthèses d'analyses fréquentielle des précipitations pour la station Buhoro

			NORMALE		GUMBEL		LOI DE PEARSON III	
T (ans)	F(XT)	P(XT)	ZT=KT	XT	KT	XT	KT	XT
1,25	0,2	0,8	-0,842	46,41635	-0,8215	46,8421	-0,8443	52,456
2	0,5	0,5	0	64,22773	-0,16436	60,7494	-0,1777	65,897
5	0,8	0,2	0,8416	82,03911	0,71982	79,4615	0,7405	83,387
10	0,9	0,1	1,2816	91,34943	1,30522	91,8504	1,3341	95,698
25	1	0,04	1,7507	101,2778	2,04488	107,504	2,0616	110,856
50	1	0,02	2,0537	107,6916	2,5936	119,117	2,5865	122,569
100	1	0,01	2,3263	113,4606	3,13827	130,644	3,0974	135,879
250	1	0,004	2,6521	120,354	3,85542	145,821	3,7579	155,333
500	1	0,002	2,8782	125,1388	4,39692	157,28	4,2496	165,659
1000	1	0,001	3,0902	129,6269	4,93803	168,732	4,7363	178,235

Les résultats présentés dans le tableau-ci dessus sont également représentés graphiquement dans le repère suivant :

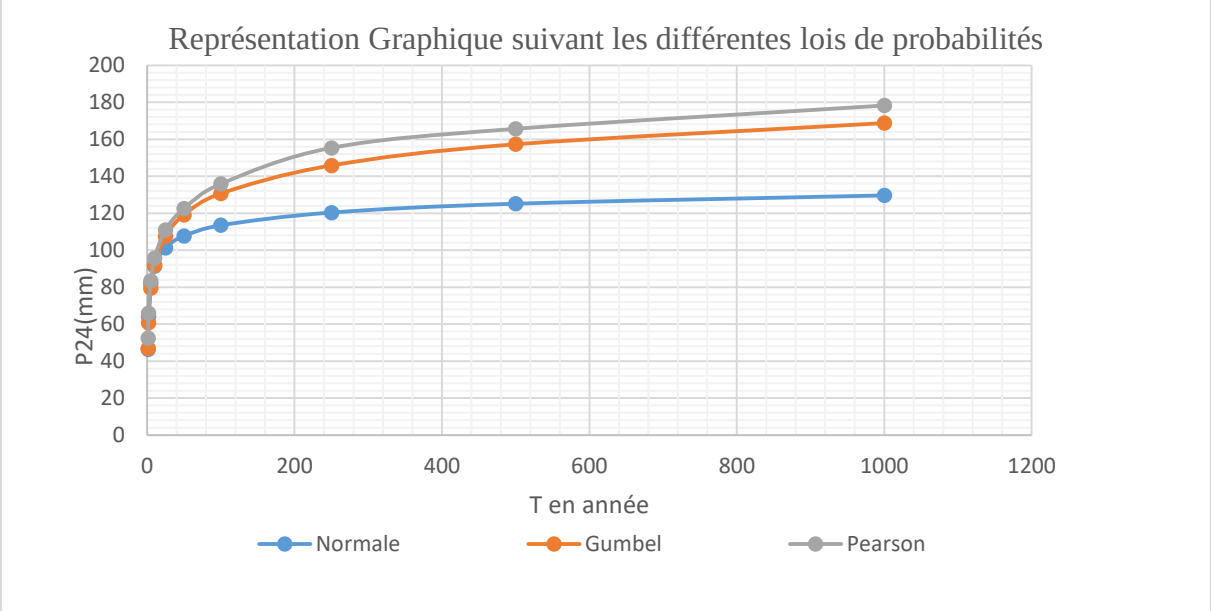


Figure II-8 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations pour la station Buhoro.

II.2.2 Commentaires des résultats obtenus

Si on observe les trois courbes représentées sur le graphique ci-dessus, on peut remarquer que pour une période de récurrence inférieure ou égale à 10ans, les courbes de la loi normale, **G**umbel et Pearson III sont presque confondues. Au-delà de 10ans, les trois courbes commencent à se décaler avec un écart très net pour une période de retour égale à 1000ans (C'est-à-dire lorsque T tend vers l'infini) .Il reste à choisir la courbe qui représente mieux la série entre les courbes Gumbel, normale et Pearson III. On remarque que la période de retour correspondante à la plus grande valeur de précipitation expérimentale se situe sur la courbe Gumbel bien que la valeur précédente lui soit décalée. Pour la suite de ce travail, nous avons jugé bon d'adopter la loi Pearson III comme la loi de probabilité représentant au mieux la série des observations.

II.2.3 Homogénéisation des données

Après analyse de la corrélation et de la période d'observations des précipitations recueillies sur les stations météorologiques se trouvant dans notre zone d'étude, afin de faciliter leurs analyses statistiques et leurs utilisations dans la suite de ce travail.

Tableau II-11: Le tableau suivant montre les résultats des données brutes homogénéisées

	NYAMUSWAGA	MUYINGA	RWEGURA	KIRUNDO PROJET	KARUZI	NGOZI OCIBU	MPARAMBO	BUHORO
ANNEE	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	p24
1990	77	62,2	56,5	64	48,4	50	107,2	69,8
1991	41,9	34,2	48,8	49,6	50,8	37,3	65,5	68,2
1992	54,9	43,8	61,2	42,7	57	40,3	31,1	40,3
1993	41	76	79	51,9	43,8	25,6	51,8	62,5
1994	97	51,2	63,5	48	39,5	47,08	46	62,6
1995	32,4	72,3	64,2	53,2	76,8	33,98	58,8	42,3
1996	34,6	51,8	91,2	70,8	44,8	34,43	44,3	39,2
1997	48,5	70,4	51,9	86,3	60,1	37,25	-	44,8
1998	43	37,1	47,7	93	69,3	36,13	-	-
1999	56	52,4	122,4	71,4	59,6	38,77	-	-
2000	55,6	57	64,6	36,5	88,4	38,69	-	-
2001	24,4	45,5	91	39	47,6	32,36	-	-
2002	14,6	47,7	61	93,4	80,6	30,37	-	-
2003	35	51,5	83,8	108,5	66,4	34,51	-	-
2004	65,6	56	91,4	80,2	67,6	40,71	-	-
2005	70,3	62	100,3	81,9	42,5	41,67	-	-
2006	49,6	49,5	41,6	62	98,9	37,47	-	-
2007	39,3	49,4	65	88,5	55,5	35,38	-	-
2008	55	59,9	37,4	64	72	38,56	-	50
2009	60	59,4	56,2	65,6	32,6	39,58	129,3	90,6
2010	66	69,5	77,7	50,4	50	40,79	82,8	80
2011	54,5	53,6	43,7	70	51,5	38,46	64,7	64
2012	44,5	86,5	43,8	55,9	46,2	36,43	86,8	75,78
2013	67	86,3	58	63,2	40,3	60,7	99	50
2014	54,2	36,1	56	74,2	65,9	60,8	61	72,5
2015	47,3	64,1	56,4	56	54,7	51,6	51,9	39,5
2016	62,6	44,7	50	37,7	64,5	84,6	126,9	125
2017	91,6	72	66,4	50	103,6	81,1	56,2	47
2018	49,2	68,9	56,2	37,7	58,2	70,7	104,2	91
2019	36,6	49,1	60	65	65,2	101,5	44,5	63,5
2020	56,5	58	66,3	95,4	83,2	75,6	98,6	81,5
2021	72,8	54	60	54,6	74,2	43,3	54	52,93

II.2.4 Analyse statistique détaillé des données des précipitations station par station

Les valeurs des précipitations extrêmes estimées à partir des analyses statistiques sont effectuées sur des séries de mesures pluviométriques d'une certaine durée. Ces analyses permettent d'ajuster une courbe de régression en fonction de la fréquence d'apparition des évènements dans le passé et de prévoir la probabilité d'apparition d'un évènement de plus grande ampleur avec une période de retour plus longue que les séries de mesures disponibles.

Pour le présent travail, cette analyse statistique consiste à calculer les valeurs caractéristiques de la distribution de la série des précipitations qui par après vont nous servir d'estimer les crues en fonction de la période de retour.

On a commencé par le calcul des coefficients de variation et d'asymétrie qui nous ont permis de déterminer les coefficients des crues K_P lus dans le tableau de Pearson III pour les courbes de fréquence.

Le rapport Cs/Cv nous a permis de trouver directement la valeur du coefficient des crues Kp correspondantes dans le tableau de Pearson III.

Enfin, nous avons calculé les courbes de fréquences qui vont nous servir de tracer les courbes de même hauteur des précipitations dites isohyètes extrêmes à base du logiciel approprié ArcGIS.

Tableau II-12: Calcul du coefficient de variation et du coefficient d'asymétrie pour la station Nyamuswaga

ANNEE	P24	N°	P24 Trié	P0/0	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^3
1990	77	1	97	3,030	53,078	1,827	0,827	0,685	43,922	84731,055
1991	41,9	2	91,6	6,061	53,078	1,726	0,726	0,527	38,522	57163,953
1992	54,9	3	77	9,091	53,078	1,451	0,451	0,203	23,922	13689,439
1993	41	4	72,8	12,121	53,078	1,372	0,372	0,138	19,722	7670,870
1994	97	5	70,3	15,152	53,078	1,324	0,324	0,105	17,222	5107,887
1995	32,4	6	67	18,182	53,078	1,262	0,262	0,069	13,922	2698,318
1996	34,6	7	66	21,212	53,078	1,243	0,243	0,059	12,922	2157,628
1997	48,5	8	65,6	24,242	53,078	1,236	0,236	0,056	12,522	1963,397
1998	43	9	62,6	27,273	53,078	1,179	0,179	0,032	9,522	863,311
1999	56	10	60	30,303	53,078	1,130	0,130	0,017	6,922	331,643
2000	55,6	11	56,5	33,333	53,078	1,064	0,064	0,004	3,422	40,068
2001	24,4	12	56	36,364	53,078	1,055	0,055	0,003	2,922	24,945
2002	14,6	13	55,6	39,394	53,078	1,048	0,048	0,002	2,522	16,039
2003	35	14	55	42,424	53,078	1,036	0,036	0,001	1,922	7,099
2004	65,6	15	54,9	45,455	53,078	1,034	0,034	0,001	1,822	6,047
2005	70,3	16	54,5	48,485	53,078	1,027	0,027	0,001	1,422	2,875
2006	49,6	17	54,2	51,515	53,078	1,021	0,021	0,000	1,122	1,412
2007	39,3	18	49,6	54,545	53,078	0,934	-0,066	0,004	-3,478	-42,076
2008	55	19	49,2	57,576	53,078	0,927	-0,073	0,005	-3,878	-58,326
2009	60	20	48,5	60,606	53,078	0,914	-0,086	0,007	-4,578	-95,954
2010	66	21	47,3	63,636	53,078	0,891	-0,109	0,012	-5,778	-192,913
2011	54,5	22	44,5	66,667	53,078	0,838	-0,162	0,026	-8,578	-631,215
2012	44,5	23	43	69,697	53,078	0,810	-0,190	0,036	-10,078	-1023,621
2013	67	24	41,9	72,727	53,078	0,789	-0,211	0,044	-11,178	-1396,712
2014	54,2	25	41	75,758	53,078	0,772	-0,228	0,052	-12,078	-1761,970
2015	47,3	26	39,3	78,788	53,078	0,740	-0,260	0,067	-13,778	-2615,594
2016	62,6	27	36,6	81,818	53,078	0,690	-0,310	0,096	-16,478	-4474,282
2017	91,6	28	35	84,848	53,078	0,659	-0,341	0,116	-18,078	-5908,268
2018	49,2	29	34,6	87,879	53,078	0,652	-0,348	0,121	-18,478	-6309,191
2019	36,6	30	32,4	90,909	53,078	0,610	-0,390	0,152	-20,678	-8841,653
2020	56,5	31	24,4	93,939	53,078	0,460	-0,540	0,292	-28,678	-23585,890
2021	72,8	32	14,6	96,970	53,078	0,275	-0,725	0,526	-38,478	-56969,408
							Σ	3,46135		62568,91305

Tableau II-13: Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Nyamuswaga

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{x}$	53,078
Coefficient de variation	**Cv**	0,334
Coefficient d'asymétrie	**Cs**	0,387
Rapport	**Cs/Cv**	1,157

Le coefficient de variation est égal à 0.334 et le coefficient d'asymétrie est égal à 0.387. Le rapport Cs/cv est égale à 1.157.donc on fait l'interpolation suivant la valeur Cs=cv et Cs=2cv en utilisant le tableau de Pearson III.

Pour la valeur de cv=0.38 on utilise le tableau de Pearson III pour trouver la valeur correspondante de coefficient des crues pour Cs=1.15cv

Tableau II-14: Calcul du coefficient des crues par interpolation

Cs=1cv		Cs=2cv			Cs=1,15cv
p%	Kp	p%	Kp	p%	Kp
0,01	2,47	0,01	2,72	0,01	2,492
0,1	2,17	0,1	2,34	0,1	2,185
0,2	2,08	0,2	2,22	0,2	2,092
0,33	2,01	0,33	2,13	0,33	2,020
0,5	1,95	0,5	2,05	0,5	1,959
1	1,85	1	1,93	1	1,857
2	1,73	2	1,79	2	1,735
5	1,57	5	1,6	5	1,573
10	1,43	10	1,44	10	1,431
20	1,27	20	1,26	20	1,269
50	0,98	50	0,96	50	0,978
75	0,78	75	0,76	75	0,778
90	0,59	90	0,61	90	0,592
95	0,5	95	0,53	95	0,503
99	0,32	99	0,4	99	0,327

- **Calcul de la valeur de la précipitation extrême suivant la valeur du coefficient d'asymétrie**

Tableau II-15: Calcul des précipitations extrêmes

P%	Z	Kp	Xp
0,01	-3,719	2,492	132,250
0,1	-3,090	2,185	115,959
0,2	-2,878	2,092	111,045
0,33	-2,716	2,020	107,237
0,5	-2,576	1,959	103,961
1	-2,326	1,857	98,561
2	-2,054	1,735	92,100
5	-1,645	1,573	83,470
10	-1,282	1,431	75,948
20	-0,842	1,269	67,363
50	0,000	0,978	51,925
75	0,674	0,778	41,309
90	1,282	0,592	31,408
95	1,645	0,503	26,677
99	2,326	0,327	17,352

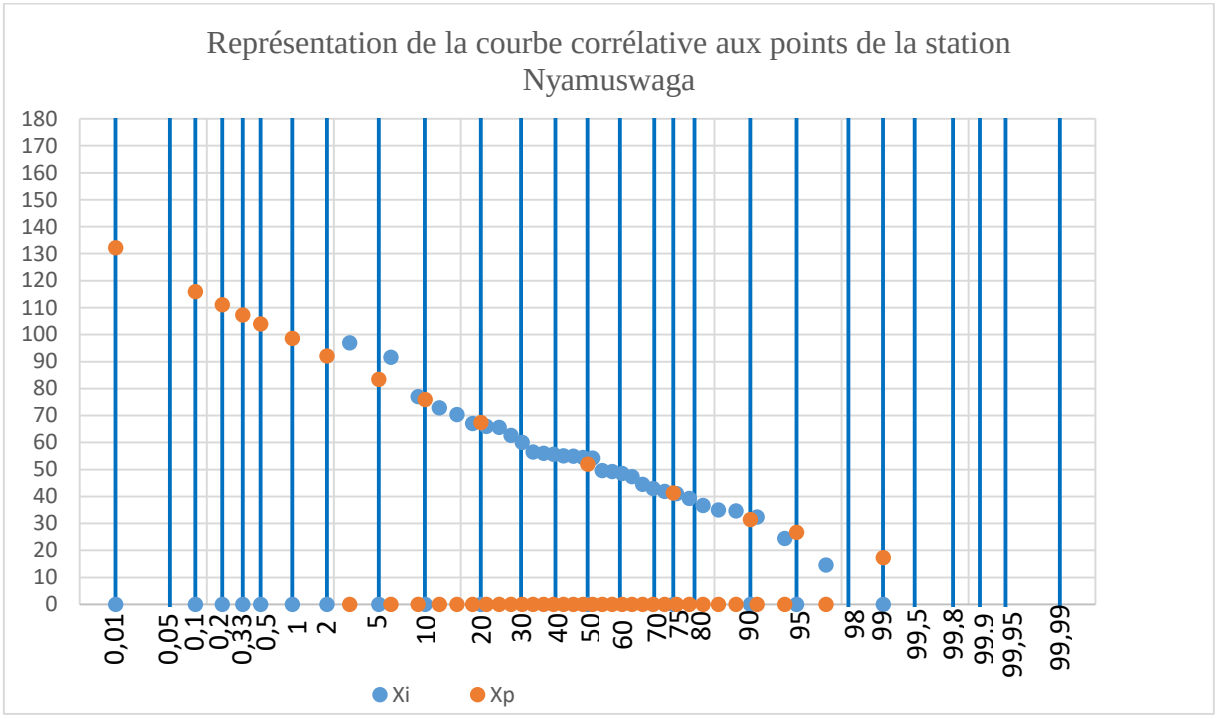


Figure II-9: Courbe corrélative de la station Nyamuswaga

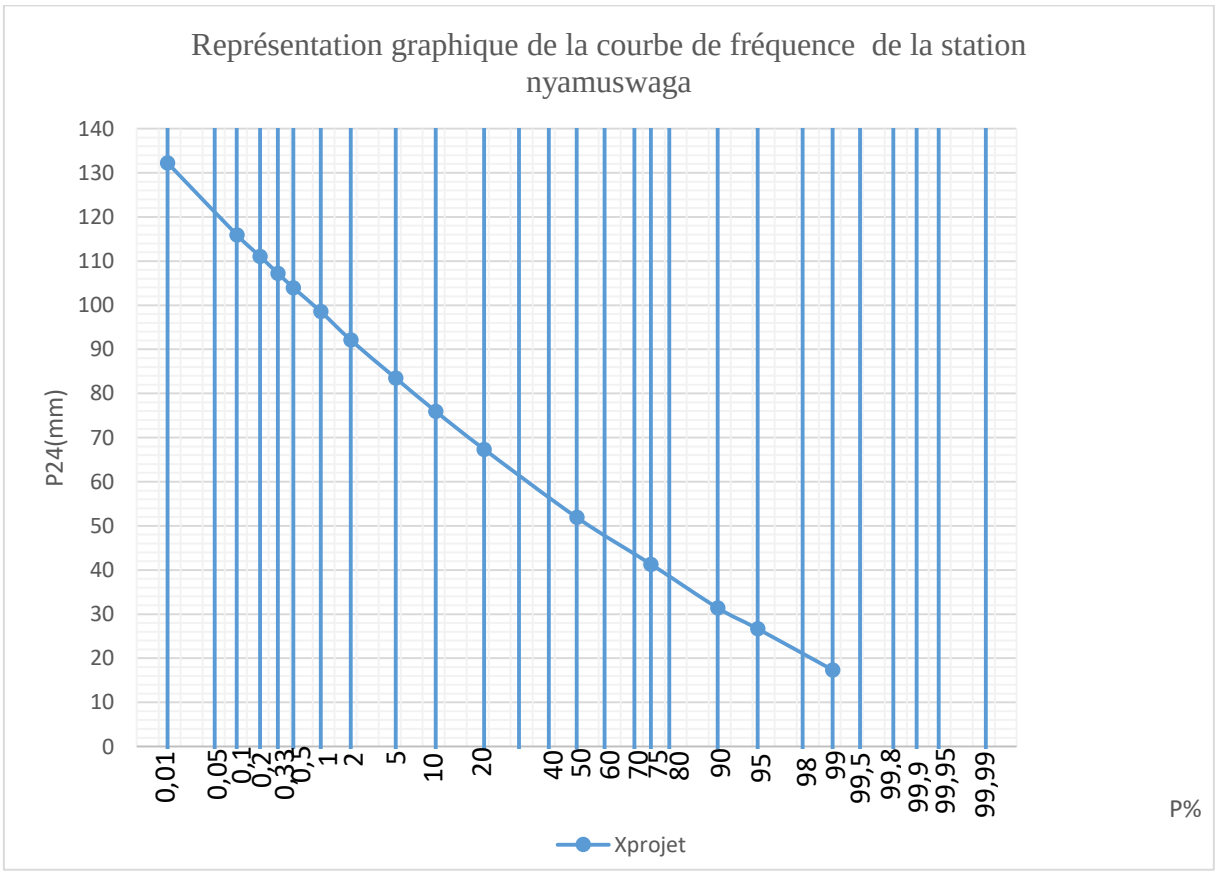


Figure II-10: courbe de fréquence de la station Nyamuswaga

Tableau II-16: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Muyinga

Année	P24	N°	P24 Trie	P%	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^3
1990	62,2	1	86,5	3,030	57,253	1,511	0,511	0,261	29,25	25017,183
1991	34,2	2	86,3	6,061	57,253	1,507	0,507	0,257	29,05	24507,457
1992	43,8	3	76	9,091	57,253	1,327	0,327	0,107	18,75	6588,502
1993	76	4	72,3	12,121	57,253	1,263	0,263	0,069	15,05	3406,740
1994	51,2	5	72	15,152	57,253	1,258	0,258	0,066	14,75	3207,008
1995	72,3	6	70,4	18,182	57,253	1,230	0,230	0,053	13,15	2272,310
1996	51,8	7	69,5	21,212	57,253	1,214	0,214	0,046	12,25	1836,859
1997	70,4	8	68,9	24,242	57,253	1,203	0,203	0,041	11,65	1579,895
1998	37,1	9	64,1	27,273	57,253	1,120	0,120	0,014	6,85	320,979
1999	52,4	10	62,2	30,303	57,253	1,086	0,086	0,007	4,95	121,058
2000	57	11	62	33,333	57,253	1,083	0,083	0,007	4,75	106,960
2001	45,5	12	59,9	36,364	57,253	1,046	0,046	0,002	2,65	18,544
2002	47,7	13	59,4	39,394	57,253	1,037	0,037	0,001	2,15	9,895
2003	51,5	14	58	42,424	57,253	1,013	0,013	0,000	0,75	0,417
2004	56	15	57	45,455	57,253	0,996	-0,004	0,000	-0,25	-0,016
2005	62	16	56	48,485	57,253	0,978	-0,022	0,000	-1,25	-1,968
2006	49,5	17	54	51,515	57,253	0,943	-0,057	0,003	-3,25	-34,427
2007	49,4	18	53,6	54,545	57,253	0,936	-0,064	0,004	-3,65	-48,752
2008	59,9	19	52,4	57,576	57,253	0,915	-0,085	0,007	-4,85	-114,305
2009	59,4	20	51,8	60,606	57,253	0,905	-0,095	0,009	-5,45	-162,157
2010	69,5	21	51,5	63,636	57,253	0,900	-0,100	0,010	-5,75	-190,420
2011	53,6	22	51,2	66,667	57,253	0,894	-0,106	0,011	-6,05	-221,788
2012	86,5	23	49,5	69,697	57,253	0,865	-0,135	0,018	-7,75	-466,048
2013	86,3	24	49,4	72,727	57,253	0,863	-0,137	0,019	-7,85	-484,315
2014	36,1	25	49,1	75,758	57,253	0,858	-0,142	0,020	-8,15	-541,966
2015	64,1	26	47,7	78,788	57,253	0,833	-0,167	0,028	-9,55	-871,839
2016	44,7	27	45,5	81,818	57,253	0,795	-0,205	0,042	-11,75	-1623,529
2017	72	28	44,7	84,848	57,253	0,781	-0,219	0,048	-12,55	-1978,133
2018	68,9	29	43,8	87,879	57,253	0,765	-0,235	0,055	-13,45	-2434,835
2019	49,1	30	37,1	90,909	57,253	0,648	-0,352	0,124	-20,15	-8185,160
2020	58	31	36,1	93,939	57,253	0,631	-0,369	0,137	-21,15	-9465,065
2021	54	32	34,2	96,970	57,253	0,597	-0,403	0,162	-23,05	-12251,504
							Σ	1,632		29917,5781

Tableau II-17 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Muyinga

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne x	$\bar{x}$	57,253
Coefficient de variation	**Cv**	0,229
Coefficient d'asymétrie	**Cs**	0,455
Rapport	**Cs/Cv**	1,984

On a trouvé la valeur du coefficient de variation qui est égale à 0.229 et le coefficient d'asymétrie qui est égale à 0.455 en faisant le rapport entre Cs/Cv on a trouvé une valeur qui est égale à 1.984. Donc on fait encore l'interpolation entre Cs=1Cv et Cs= 2Cv en utilisant le tableau de Pearson III pour le Calcul de la valeur du coefficient de Variation Cv=0.229 .on trouve la valeur correspondante au coefficient des crues pour Cs=1.984cv en utilisant le tableau de Pearson III

Tableau II-18: Calcul du coefficient des crues par interpolation entre Cs=1Cv et Cs=2Cv

Cs=1cv		Cs=2cv		Cs=1,98cv	
P%	Kp	P%	Kp	P%	Kp
0,01	1,92	0,01	2,04	0,01	1,926
0,1	1,75	0,1	1,82	0,1	1,754
0,2	1,69	0,2	1,75	0,2	1,693
0,33	1,64	0,33	1,7	0,33	1,643
0,5	1,61	0,5	1,66	0,5	1,613
1	1,55	1	1,58	1	1,552
2	1,48	2	1,5	2	1,481
5	1,37	5	1,39	5	1,371
10	1,29	10	1,29	10	1,290
20	1,18	20	1,18	20	1,180
50	0,99	50	0,98	50	0,989
75	0,85	75	0,84	75	0,849
90	0,72	90	0,73	90	0,721
95	0,65	95	0,67	95	0,651
99	0,52	99	0,56	99	0,522

Tableau II-19: Calcul des précipitations extrêmes pour CS=1.984cv

P%	Z	Kp	XP
0,01	-3,719	1,926	110,272
0,1	-3,090	1,754	100,395
0,2	-2,878	1,693	96,931
0,33	-2,716	1,643	94,068
0,5	-2,576	1,613	92,322
1	-2,326	1,552	88,829
2	-2,054	1,481	84,792
5	-1,645	1,371	78,494
10	-1,282	1,290	73,857
20	-0,842	1,180	67,559
50	0,000	0,989	56,652
75	0,674	0,849	48,636
90	1,282	0,721	41,251
95	1,645	0,651	37,272
99	2,326	0,522	29,887

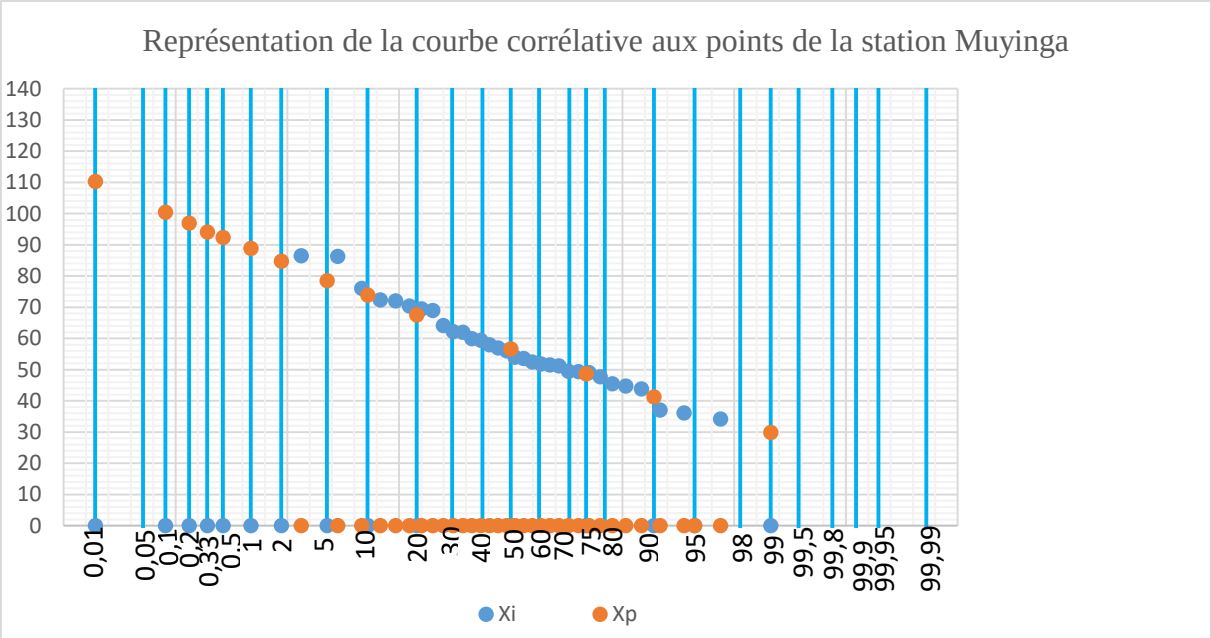


Figure II-11:courbe corrélative de la station Muyinga

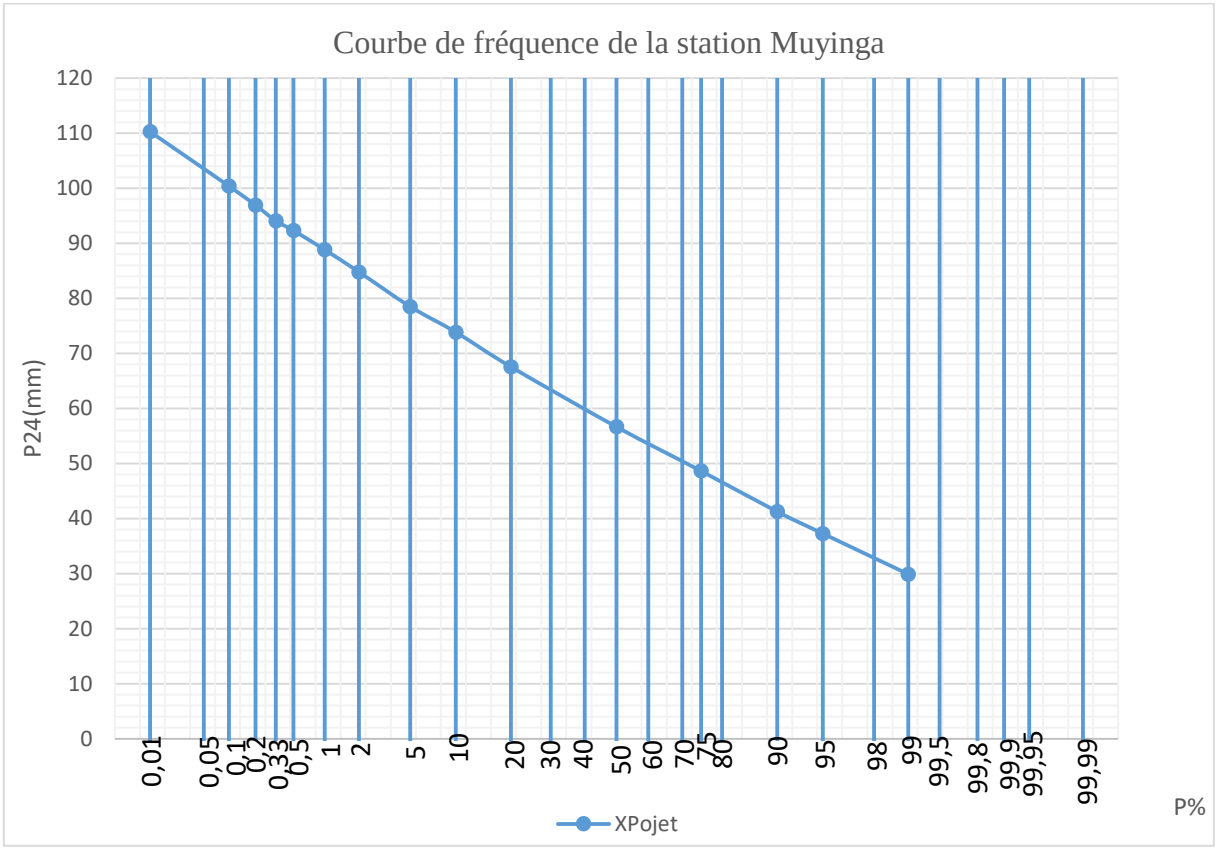


Figure II-12:courbe de fréquence de la station Muyinga

Tableau II-20: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Rwegura

Année	P24	N°	P24Trié	P%	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^3
1990	56,5	1	122,4	3,030	64,788	1,889	0,889	0,791	57,613	191227,419
1991	48,8	2	100,3	6,061	64,788	1,548	0,548	0,300	35,513	44786,151
1992	61,2	3	91,4	9,091	64,788	1,411	0,411	0,169	26,613	18847,642
1993	79	4	91,2	12,121	64,788	1,408	0,408	0,166	26,413	18425,892
1994	63,5	5	91	15,152	64,788	1,405	0,405	0,164	26,213	18010,482
1995	64,2	6	83,8	18,182	64,788	1,293	0,293	0,086	19,013	6872,546
1996	91,2	7	79	21,212	64,788	1,219	0,219	0,048	14,213	2870,856
1997	51,9	8	77,7	24,242	64,788	1,199	0,199	0,040	12,913	2152,935
1998	47,7	9	66,4	27,273	64,788	1,025	0,025	0,001	1,613	4,193
1999	122,4	10	66,3	30,303	64,788	1,023	0,023	0,001	1,512	3,460
2000	64,6	11	65	33,333	64,788	1,003	0,003	0,000	0,212	0,010
2001	91	12	64,6	36,364	64,788	0,997	-0,003	0,000	-0,188	-0,007
2002	61	13	64,2	39,394	64,788	0,991	-0,009	0,000	-0,588	-0,203
2003	83,8	14	63,5	42,424	64,788	0,980	-0,020	0,000	-1,288	-2,134
2004	91,4	15	61,2	45,455	64,788	0,945	-0,055	0,003	-3,588	-46,172
2005	100,3	16	61	48,485	64,788	0,942	-0,058	0,003	-3,788	-54,332
2006	41,6	17	60	51,515	64,788	0,926	-0,074	0,005	-4,788	-109,730
2007	65	18	60	54,545	64,788	0,926	-0,074	0,005	-4,788	-109,730
2008	37,4	19	58	57,576	64,788	0,895	-0,105	0,011	-6,788	-312,701
2009	56,2	20	56,5	60,606	64,788	0,872	-0,128	0,016	-8,288	-569,208
2010	77,7	21	56,4	63,636	64,788	0,871	-0,129	0,017	-8,388	-590,062
2011	43,7	22	56,2	66,667	64,788	0,867	-0,133	0,018	-8,588	-633,287
2012	43,8	23	56,2	69,697	64,788	0,867	-0,133	0,018	-8,588	-633,287
2013	58	24	56	72,727	64,788	0,864	-0,136	0,018	-8,788	-678,572
2014	56	25	51,9	75,758	64,788	0,801	-0,199	0,040	-12,888	-2140,455
2015	56,4	26	50	78,788	64,788	0,772	-0,228	0,052	-14,788	-3233,585
2016	50	27	48,8	81,818	64,788	0,753	-0,247	0,061	-15,988	-4086,407
2017	66,4	28	47,7	84,848	64,788	0,736	-0,264	0,070	-17,088	-4989,254
2018	56,2	29	43,8	87,879	64,788	0,676	-0,324	0,105	-20,988	-9244,472
2019	60	30	43,7	90,909	64,788	0,675	-0,325	0,106	-21,088	-9377,246
2020	66,3	31	41,6	93,939	64,788	0,642	-0,358	0,128	-23,188	-12466,995
2021	60	32	37,4	96,970	64,788	0,577	-0,423	0,179	-27,388	-20542,683

Tableau II-21: Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Rwegura

Les valeurs caractéristiques de distribution		
Moyenne x	$\bar{x}$	64,788
Coefficient de variation	**Cv**	0,291
Coefficient d'asymétrie	**Cs**	1,204
Rapport	**Cs/Cv**	4,142

La valeur du coefficient de divergence est égale à 0.291 et la valeur du coefficient d'asymétrie est égale à 1.204.en faisant le rapport Cs/Cv on a trouvé 4.142 .Pour cette valeur on n'a pas besoin d'interpoler on peut utiliser directement le tableau de Pearson III pour trouver directement la valeur du coefficient des crues pour Cs=4cv suivant la valeur du coefficient de variation cv=0.29 dans le tableau de pearson III.

Tableau II-22: Calcul des précipitations extrêmes pour Cs=4Cv

P%	Z	Kp	Xp
0,01	-3,719	2,83	183,349
0,1	-3,090	2,38	154,194
0,2	-2,878	2,24	145,124
0,33	-2,716	2,14	138,645
0,5	-2,576	2,06	133,462
1	-2,326	1,91	123,744
2	-2,054	1,76	114,026
5	-1,645	1,55	100,421
10	-1,282	1,39	90,055
20	-0,842	1,21	78,393
50	0,000	0,95	61,548
75	0,674	0,79	51,182
90	1,282	0,68	44,056
95	1,645	0,64	41,464
99	2,326	0,57	36,929

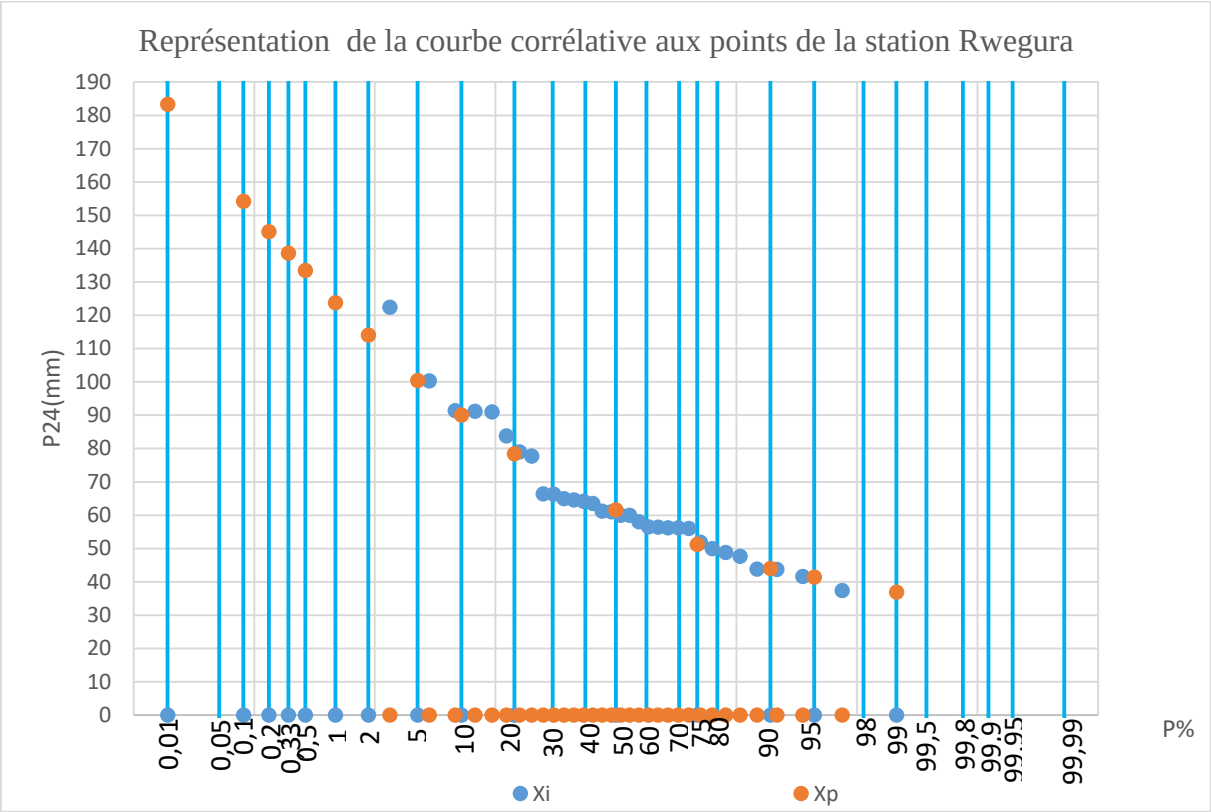


Figure II-13: Courbe corrélative de la station Rwegura

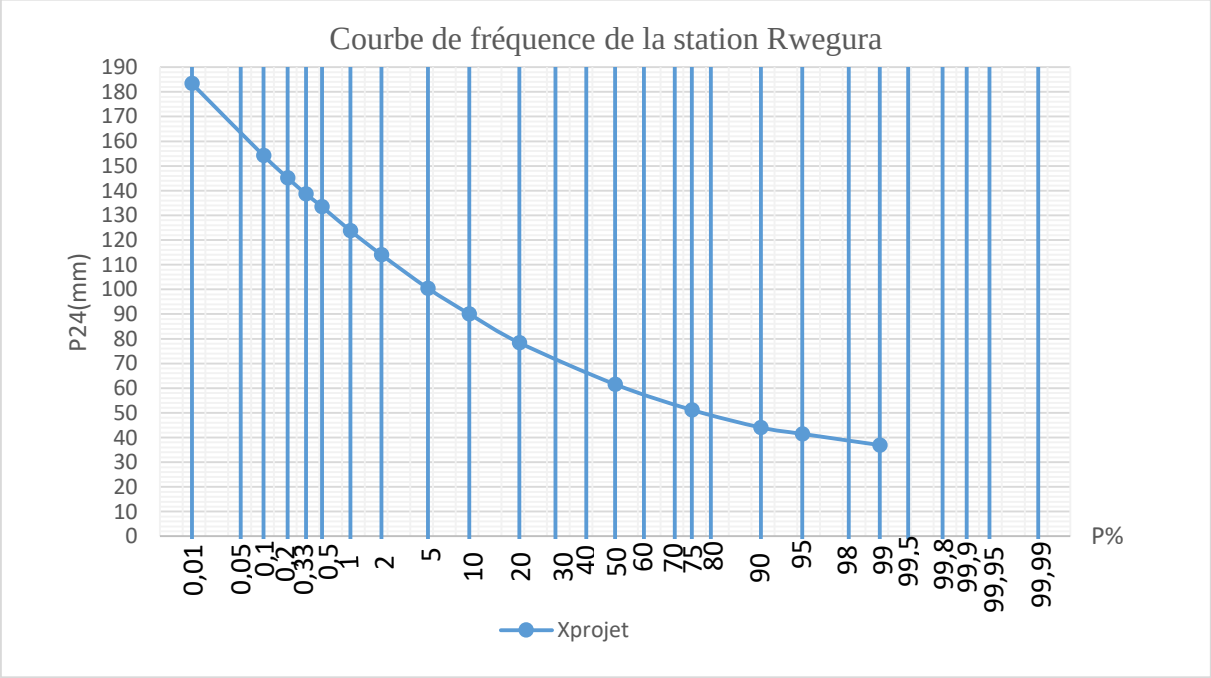


Figure II-14: Courbe de fréquence de la station Rwegura

Tableau II-23: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Kirundo

Année	P24	N°	Ptrié	P%	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^3
1990	64	1	108,5	3,030	64,394	1,685	0,685	0,469	44,106	85802,591
1991	49,6	2	95,4	6,061	64,394	1,482	0,482	0,232	31,006	29809,022
1992	42,7	3	93,4	9,091	64,394	1,450	0,450	0,203	29,006	24404,772
1993	51,9	4	93	12,121	64,394	1,444	0,444	0,197	28,606	23408,996
1994	48	5	88,5	15,152	64,394	1,374	0,374	0,140	24,106	14008,414
1995	53,2	6	86,3	18,182	64,394	1,340	0,340	0,116	21,906	10512,454
1996	70,8	7	81,9	21,212	64,394	1,272	0,272	0,074	17,506	5365,119
1997	86,3	8	80,2	24,242	64,394	1,245	0,245	0,060	15,806	3948,995
1998	93	9	74,2	27,273	64,394	1,152	0,152	0,023	9,806	942,994
1999	71,4	10	71,4	30,303	64,394	1,109	0,109	0,012	7,006	343,920
2000	36,5	11	70,8	33,333	64,394	1,099	0,099	0,010	6,406	262,913
2001	39	12	70	36,364	64,394	1,087	0,087	0,008	5,606	176,205
2002	93,4	13	65,6	39,394	64,394	1,019	0,019	0,000	1,206	1,755
2003	108,5	14	65	42,424	64,394	1,009	0,009	0,000	0,606	0,223
2004	80,2	15	64	45,455	64,394	0,994	-0,006	0,000	-0,394	-0,061
2005	81,9	16	64	48,485	64,394	0,994	-0,006	0,000	-0,394	-0,061
2006	62	17	63,2	51,515	64,394	0,981	-0,019	0,000	-1,194	-1,701
2007	88,5	18	62	54,545	64,394	0,963	-0,037	0,001	-2,394	-13,716
2008	64	19	56	57,576	64,394	0,870	-0,130	0,017	-8,394	-591,382
2009	65,6	20	55,9	60,606	64,394	0,868	-0,132	0,017	-8,494	-612,771
2010	50,4	21	54,6	63,636	64,394	0,848	-0,152	0,023	-9,794	-939,392
2011	70	22	53,2	66,667	64,394	0,826	-0,174	0,030	-11,194	-1402,577
2012	55,9	23	51,9	69,697	64,394	0,806	-0,194	0,038	-12,494	-1950,197
2013	63,2	24	50,4	72,727	64,394	0,783	-0,217	0,047	-13,994	-2740,327
2014	74,2	25	50	75,758	64,394	0,776	-0,224	0,050	-14,394	-2982,098
2015	56	26	49,6	78,788	64,394	0,770	-0,230	0,053	-14,794	-3237,687
2016	37,7	27	48	81,818	64,394	0,745	-0,255	0,065	-16,394	-4405,903
2017	50	28	42,7	84,848	64,394	0,663	-0,337	0,113	-21,694	-10209,486
2018	37,7	29	39	87,879	64,394	0,606	-0,394	0,156	-25,394	-16374,970
2019	65	30	37,7	90,909	64,394	0,585	-0,415	0,172	-26,694	-19020,799
2020	95,4	31	37,7	93,939	64,394	0,585	-0,415	0,172	-26,694	-19020,799
2021	54,6	32	36,5	96,970	64,394	0,567	-0,433	0,188	-27,894	-21703,047

Tableau II-24 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Kirundo

Les valeurs caractéristiques de distribution		
Moyenne x	$\bar{x}$	64,394
Coefficient de variation	**Cv**	0,294
Coefficient d'asymétrie	**Cs**	0,475
Rapport	**Cs/Cv**	1,613

La valeur du coefficient de variation est égale à 0.294 et la valeur du coefficient d'asymétrie est égale à 0.475.

En faisant le rapport Cs/Cv on a trouvé une valeur qui est égale à 1.613 donc cette valeur nous permet de faire l'interpolation entre Cs=1cv et Cs=2Cv

En utilisant le tableau de Pearson III pour toutes les valeurs correspondantes à cv=0.29 on trouve les valeurs du coefficient des crues

Tableau II-25: Calcul du coefficient des crues par interpolation.

Cs=1cv		Cs=2cv		Cs=1,61cv	
P%	kp	P%	Kp	P%	Kp
0,01	2,27	0,01	2,46	0,01	2,282
0,1	2,02	0,1	2,14	0,1	2,027
0,2	1,94	0,2	2,04	0,2	1,946
0,33	1,88	0,33	1,97	0,33	1,886
0,5	1,83	0,5	1,9	0,5	1,834
1	1,74	1	1,8	1	1,744
2	1,64	2	1,69	2	1,643
5	1,5	5	1,52	5	1,501
10	1,38	10	1,39	10	1,381
20	1,24	20	1,23	20	1,239
50	0,99	50	0,97	50	0,989
75	0,79	75	0,79	75	0,790
90	0,64	90	0,65	90	0,641
95	0,55	95	0,58	95	0,552
99	0,39	99	0,45	99	0,394

Tableau II-26: Calcul des précipitations extrêmes pour Cs=1.61Cv

P%	Z	Kp	Xp
0,01	-3,719	2,282	146,933
0,1	-3,090	2,027	130,555
0,2	-2,878	1,946	125,323
0,33	-2,716	1,886	121,420
0,5	-2,576	1,834	118,120
1	-2,326	1,744	112,285
2	-2,054	1,643	105,805
5	-1,645	1,501	96,670
10	-1,282	1,381	88,903
20	-0,842	1,239	79,808
50	0,000	0,989	63,670
75	0,674	0,790	50,871
90	1,282	0,641	41,252
95	1,645	0,552	35,536
99	2,326	0,394	25,353

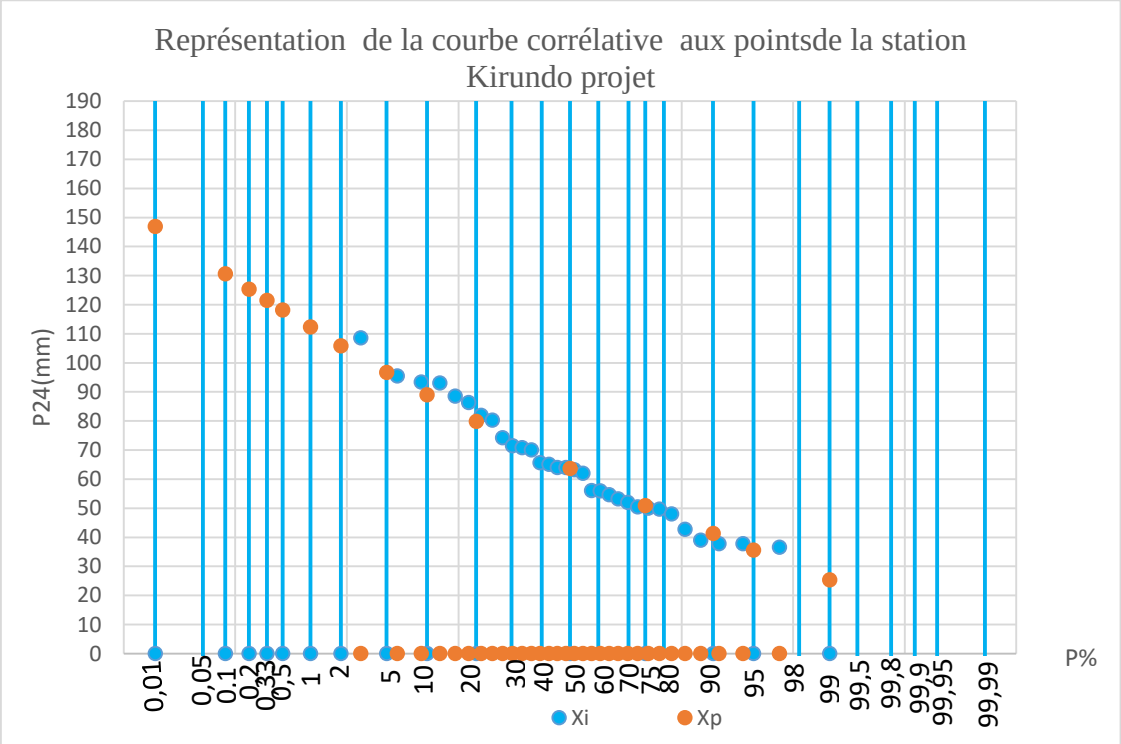


Figure II-15: Courbe corrélative de la station Kirundo

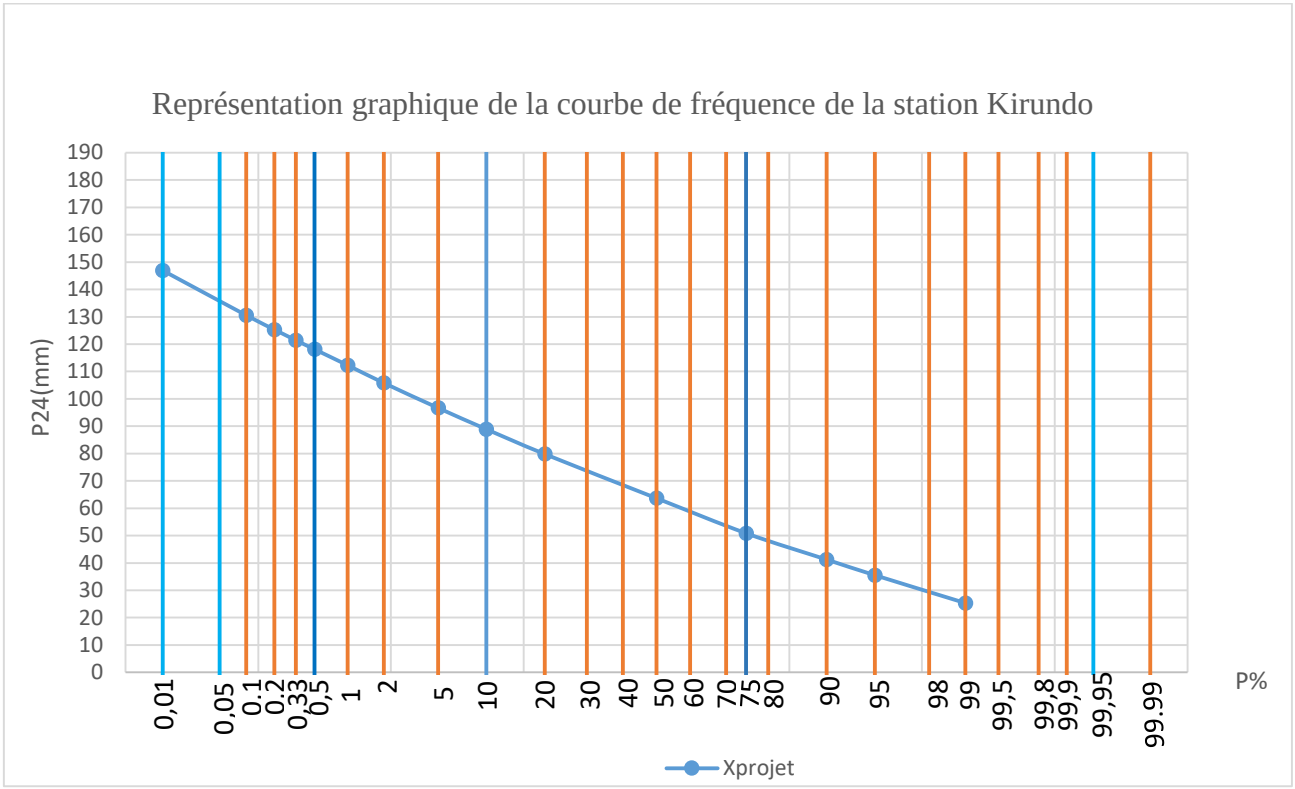


Figure II-16:Courbe de fréquence de la station Kirundo

Tableau II-27: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Karuzi

Année	P24	N°	Ptrié	P%	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^3
1990	48,4	1	103,6	3,030	61,241	1,692	0,692	0,478	42,359	76006,132
1991	50,8	2	98,9	6,061	61,241	1,615	0,615	0,378	37,659	53409,600
1992	57	3	88,4	9,091	61,241	1,443	0,443	0,197	27,159	20033,615
1993	43,8	4	83,2	12,121	61,241	1,359	0,359	0,129	21,959	10589,121
1994	39,5	5	80,6	15,152	61,241	1,316	0,316	0,100	19,359	7255,611
1995	76,8	6	76,8	18,182	61,241	1,254	0,254	0,065	15,559	3766,834
1996	44,8	7	74,2	21,212	61,241	1,212	0,212	0,045	12,959	2176,467
1997	60,1	8	72	24,242	61,241	1,176	0,176	0,031	10,759	1245,550
1998	69,3	9	69,3	27,273	61,241	1,132	0,132	0,017	8,059	523,485
1999	59,6	10	67,6	30,303	61,241	1,104	0,104	0,011	6,359	257,184
2000	88,4	11	66,4	33,333	61,241	1,084	0,084	0,007	5,159	137,338
2001	47,6	12	65,9	36,364	61,241	1,076	0,076	0,006	4,659	101,154
2002	80,6	13	65,2	39,394	61,241	1,065	0,065	0,004	3,959	62,070
2003	66,4	14	64,5	42,424	61,241	1,053	0,053	0,003	3,259	34,626
2004	67,6	15	60,1	45,455	61,241	0,981	-0,019	0,000	-1,141	-1,484
2005	42,5	16	59,6	48,485	61,241	0,973	-0,027	0,001	-1,641	-4,416
2006	98,9	17	58,2	51,515	61,241	0,950	-0,050	0,002	-3,041	-28,112
2007	55,5	18	57	54,545	61,241	0,931	-0,069	0,005	-4,241	-76,259
2008	72	19	55,5	57,576	61,241	0,906	-0,094	0,009	-5,741	-189,181
2009	32,6	20	54,7	60,606	61,241	0,893	-0,107	0,011	-6,541	-279,806
2010	50	21	51,5	63,636	61,241	0,841	-0,159	0,025	-9,741	-924,188
2011	51,5	22	50,8	66,667	61,241	0,830	-0,170	0,029	-1138,098	-1138,098
2012	46,2	23	50	69,697	61,241	0,816	-0,184	0,034	-1420,272	-1420,272
2013	40,3	24	48,4	72,727	61,241	0,790	-0,210	0,044	-2117,183	-2117,183
2014	65,9	25	47,6	75,758	61,241	0,777	-0,223	0,050	-2538,065	-2538,065
2015	54,7	26	46,2	78,788	61,241	0,754	-0,246	0,060	-3402,496	-3402,496
2016	64,5	27	44,8	81,818	61,241	0,732	-0,268	0,072	-4443,805	-4443,805
2017	104	28	43,8	84,848	61,241	0,715	-0,285	0,081	-5305,009	-5305,009
2018	58,2	29	42,5	87,879	61,241	0,694	-0,306	0,094	-6581,914	-6581,914
2019	65,2	30	40,3	90,909	61,241	0,658	-0,342	0,117	-9182,669	-9182,669
2020	83,2	31	39,5	93,939	61,241	0,645	-0,355	0,126	-10275,810	-10275,810
2021	74,2	32	32,6	96,970	61,241	0,532	-0,468	0,219	-23493,487	-23493,487

Tableau II-28: Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Karuzi

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne x	$\bar{x}$	61,241
Coefficient de variation	**Cv**	0,281
Coefficient d'asymétrie	**Cs**	0,705
Rapport	**Cs/Cv**	2,507

La valeur du coefficient de variation est égale à 0.281et la valeur du coefficient d'asymétrie est égale à 0.705

En faisant le rapport Cs/Cv on a trouvé une valeur qui est égale à 2.507

Cette valeur nous aide à faire l'interpolation en utilisant le tableau de Pearson III pour Cs=2.5Cv et Cs=3Cv suivant la valeur du coefficient de variation Cv=0.28

En utilisant le tableau de Pearson III on trouve les valeurs du coefficient des crues suivant la valeur du coefficient de variation cv=0.28

Tableau II-29: Calcul du coefficient des crues par interpolations suivant la valeur de Cv=0.28

Cs=2cv		Cs=3cv		Cs=2,5067cv	
P0/0	Kp	P0/0	Kp	P0/0	Kp
0,01	2,49	0,01	2,57	0,01	2,493
0,1	2,15	0,1	2,2	0,1	2,152
0,2	2,05	0,2	2,09	0,2	2,052
0,33	1,97	0,33	2,01	0,33	1,972
0,5	1,9	0,5	1,94	0,5	1,902
1	1,8	1	1,82	1	1,801
2	1,68	2	1,69	2	1,680
5	1,51	5	1,52	5	1,510
10	1,37	10	1,37	10	1,370
20	1,22	20	1,22	20	1,220
50	0,97	50	0,96	50	0,970
75	0,8	75	0,8	75	0,800
90	0,67	90	0,68	90	0,670
95	0,6	95	0,62	95	0,601
99	0,5	99	0,52	99	0,501

Tableau II-30: Calcul de la valeur des précipitations extrêmes suivant la valeur de Cs=2.506cv

P%	Z	Kp	Xp
0,01	-3,719	2,493	152,685
0,1	-3,090	2,152	131,789
0,2	-2,878	2,052	125,641
0,33	-2,716	1,972	120,742
0,5	-2,576	1,902	116,455
1	-2,326	1,801	110,282
2	-2,054	1,680	102,909
5	-1,645	1,510	92,498
10	-1,282	1,370	83,900
20	-0,842	1,220	74,714
50	0,000	0,970	59,379
75	0,674	0,800	48,993
90	1,282	0,670	41,056
95	1,645	0,601	36,793
99	2,326	0,501	30,669

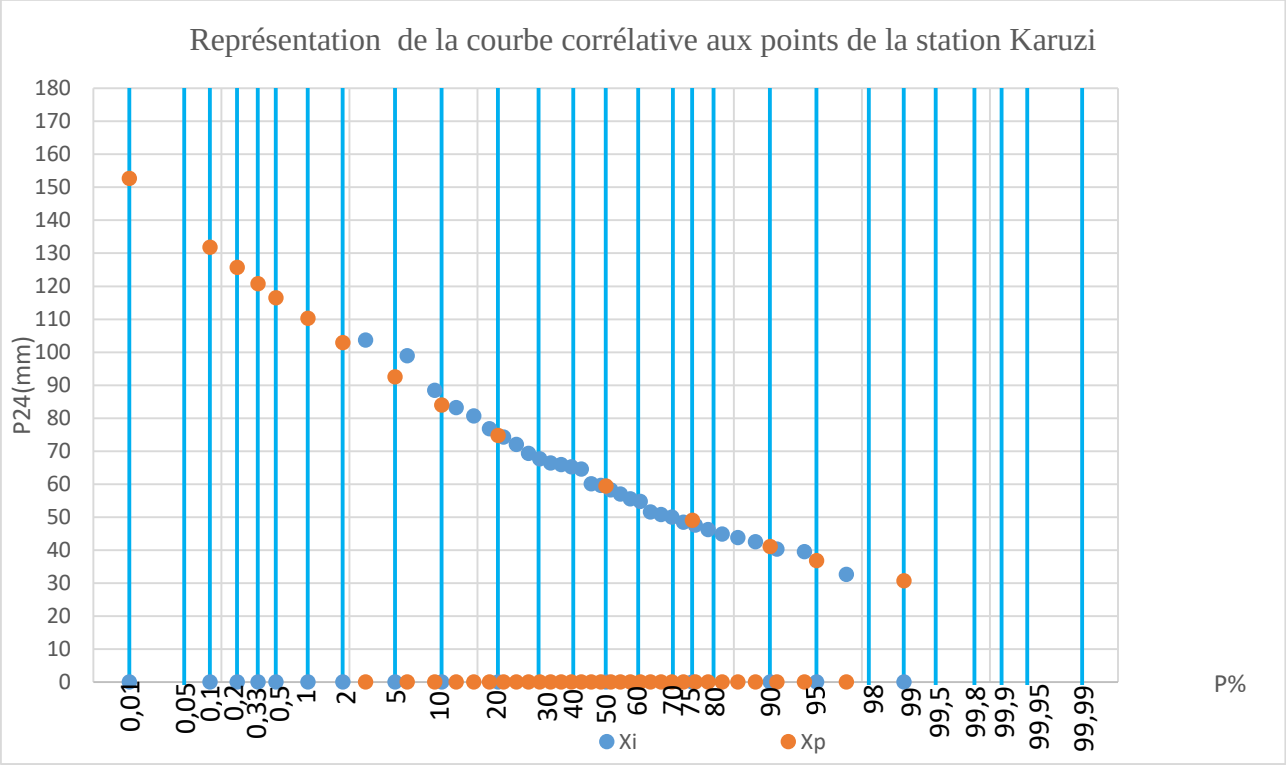


Figure II-17: Courbe corrélative de la station Karuzi

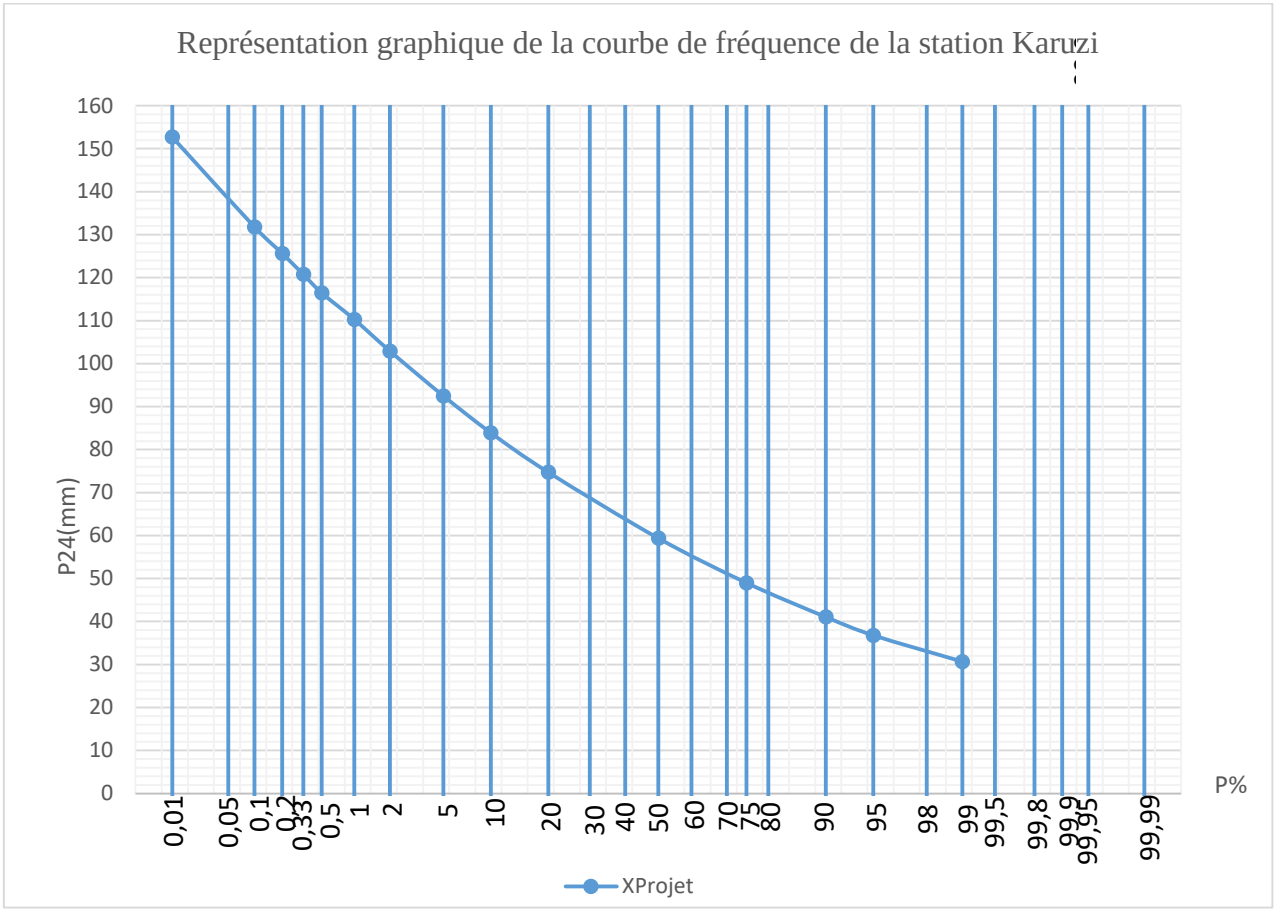


Figure II-18:courbe de fréquence de la station karuzi

Tableau II-30: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Mparambo

ANNEE	N°	P24Trié	P%	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^3
1990	1	129,3	4,762	73,23	1,766	0,766	0,586	56,07	176275,384
1991	2	126,9	9,524	73,23	1,733	0,733	0,537	53,67	154594,766
1992	3	107,2	14,286	73,23	1,464	0,464	0,215	33,97	39200,052
1993	4	104,2	19,048	73,23	1,423	0,423	0,179	30,97	29704,594
1994	5	99	23,810	73,23	1,352	0,352	0,124	25,77	17113,674
1995	6	98,6	28,571	73,23	1,346	0,346	0,120	25,37	16329,068
1996	7	86,8	33,333	73,23	1,185	0,185	0,034	13,57	2498,846
1997	8	82,8	38,095	73,23	1,131	0,131	0,017	9,57	876,467
1998	9	65,5	42,857	73,23	0,894	-0,106	0,011	-7,73	-461,890
1999	10	64,7	47,619	73,23	0,884	-0,116	0,014	-8,53	-620,650
2000	11	61	52,381	73,23	0,833	-0,167	0,028	-12,23	-1829,277
2001	12	58,8	57,143	73,23	0,803	-0,197	0,039	-14,43	-3004,685
2002	13	56,2	61,905	73,23	0,767	-0,233	0,054	-17,03	-4939,056
2003	14	54	66,667	73,23	0,737	-0,263	0,069	-19,23	-7111,117
2004	15	51,9	71,429	73,23	0,709	-0,291	0,085	-21,33	-9704,487
2005	16	51,8	76,190	73,23	0,707	-0,293	0,086	-21,43	-9841,618
2006	17	46	80,952	73,23	0,628	-0,372	0,138	-27,23	-20190,307
2007	18	44,5	85,714	73,23	0,608	-0,392	0,154	-28,73	-23714,113
2008	19	44,3	90,476	73,23	0,605	-0,395	0,156	-28,93	-24212,816
2009	20	31,1	95,238	73,23	0,425	-0,575	0,331	-42,13	-74778,092

Tableau II-31 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Mparambo

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne x	$\bar{x}$	73,23
Coefficient de variation	**Cv**	0,396
Coefficient d'asymétrie	**Cs**	0,619
Rapport	**Cs/Cv**	0,619

La valeur du coefficient de variation est égale à 0.396 et la valeur du coefficient d'asymétrie est égale à 0.619 et la valeur qu'on a trouvée en faisant le rapport entre Cs/Cv est égale à 1.563.Cette valeur me permet de faire l'interpolation entre Cs=1Cv et Cs=2cv en utilisant le tableau de Pearson III suivant la valeur de Cv qui est égale à 0.396.

Tableau II-32: Calcul du coefficient des crues par interpolation suivant la valeur de Cs =1Cv et Cv=2cv

Cs=1cv		Cs=2cv		Cs=1,56cv	
P%	kp	P%	Kp	P%	Kp
0,01	2,79	0,01	3,13	0,01	2,812
0,1	2,43	0,1	2,65	0,1	2,444
0,2	2,3	0,2	2,49	0,2	2,312
0,33	2,22	0,33	2,38	0,33	2,230
0,5	2,15	0,5	2,28	0,5	2,158
1	2,02	1	2,13	1	2,027
2	1,88	2	1,95	2	1,884
5	1,68	5	1,72	5	1,683
10	1,52	10	1,52	10	1,520
20	1,32	20	1,31	20	1,319
50	0,97	50	0,95	50	0,969
75	0,72	75	0,72	75	0,720
90	0,52	90	0,54	90	0,521
95	0,41	95	0,46	95	0,413
99	0,21	99	0,31	99	0,216

Tableau II-33: Calcul des précipitations extrêmes suivant la valeur de Cs=1.56cv

P%	Z	Kp	Xp
0,01	-3,719	2,812	205,904
0,1	-3,090	2,444	178,980
0,2	-2,878	2,312	169,319
0,33	-2,716	2,230	163,320
0,5	-2,576	2,158	158,053
1	-2,326	2,027	148,440
2	-2,054	1,884	138,000
5	-1,645	1,683	123,214
10	-1,282	1,520	111,310
20	-0,842	1,319	96,617
50	0,000	0,969	70,939
75	0,674	0,720	52,726
90	1,282	0,521	38,173
95	1,645	0,413	30,259
99	2,326	0,216	15,847

.

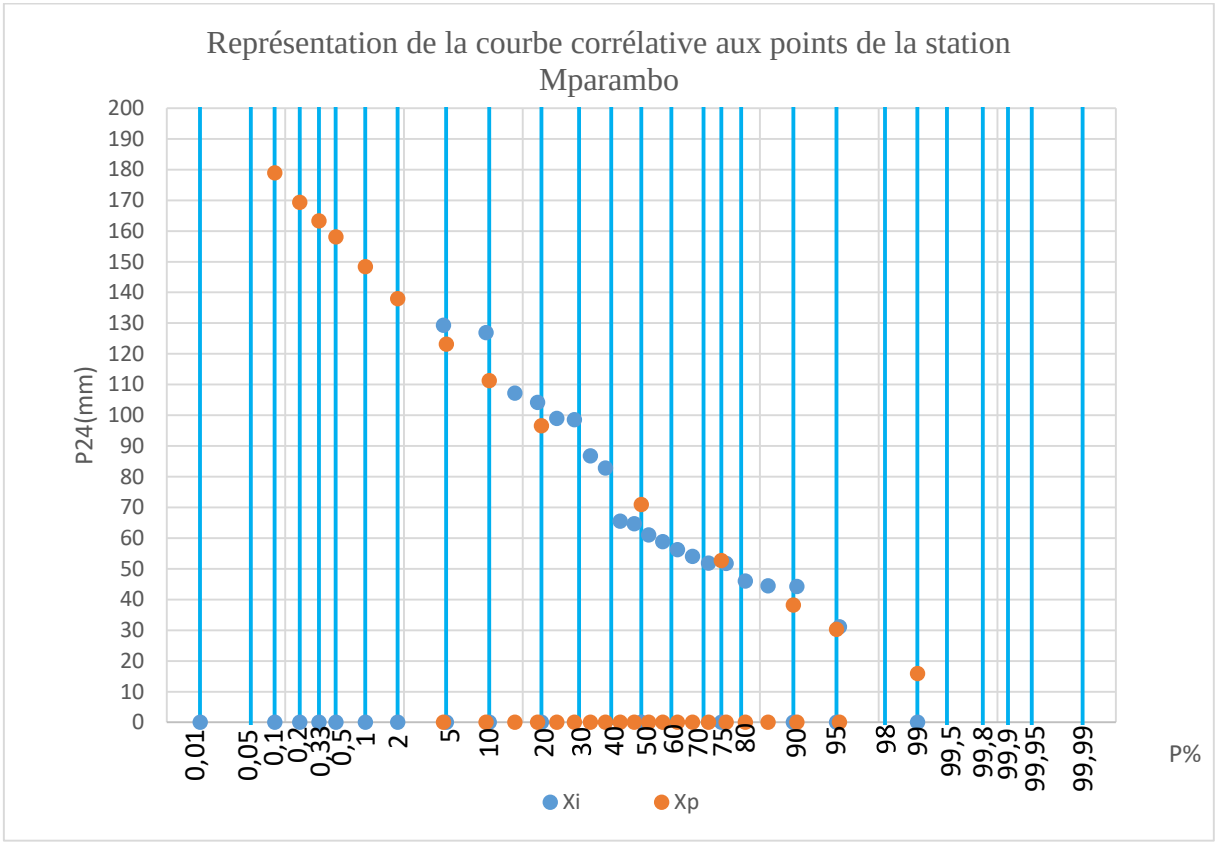


Figure II-19: Courbe corrélative de la station Mparambo

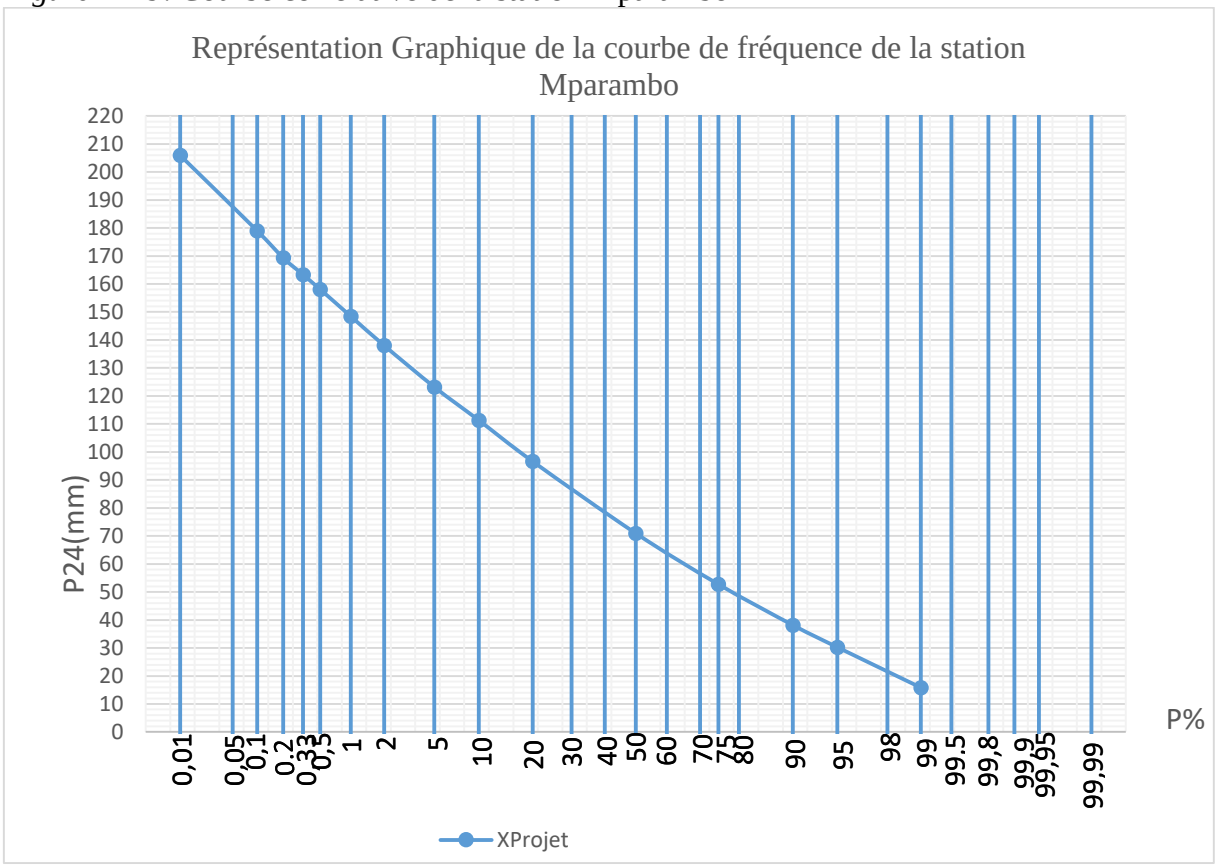


Figure II-20: Courbe de fréquence de la station Mparambo

Tableau II-34: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station de Ngozi ocibu

Année	N°	P24Trié	P%	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^3
1990	1	101,5	3,030	45,979	2,208	1,208	1,458	55,521	171144,695
1991	2	84,6	6,061	45,979	1,840	0,840	0,706	38,621	57604,773
1992	3	81,1	9,091	45,979	1,764	0,764	0,583	35,121	43319,890
1993	4	75,6	12,121	45,979	1,644	0,644	0,415	29,621	25988,631
1994	5	70,7	15,152	45,979	1,538	0,538	0,289	24,721	15107,035
1995	6	61,27	18,182	45,979	1,332	0,332	0,111	15,286	3571,935
1996	7	60,8	21,212	45,979	1,322	0,322	0,104	14,821	3255,375
1997	8	60,7	24,242	45,979	1,320	0,320	0,103	14,721	3189,924
1998	9	51,6	27,273	45,979	1,122	0,122	0,015	5,621	177,565
1999	10	50,00	30,303	45,979	1,087	0,087	0,008	4,021	64,996
2000	11	47,10	33,333	45,979	1,024	0,024	0,001	1,125	1,424
2001	12	44,82	36,364	45,979	0,975	-0,025	0,001	-1,156	-1,543
2002	13	44,61	39,394	45,979	0,970	-0,030	0,001	-1,368	-2,559
2003	14	43,30	42,424	45,979	0,942	-0,058	0,003	-2,679	-19,235
2004	15	41,64	45,455	45,979	0,906	-0,094	0,009	-4,338	-81,630
2005	16	40,30	48,485	45,979	0,876	-0,124	0,015	-5,679	-183,188
2006	17	39,52	51,515	45,979	0,860	-0,140	0,020	-6,459	-269,520
2007	18	39,31	54,545	45,979	0,855	-0,145	0,021	-6,672	-296,958
2008	19	38,99	57,576	45,979	0,848	-0,152	0,023	-6,990	-341,511
2009	20	38,72	60,606	45,979	0,842	-0,158	0,025	-7,255	-381,875
2010	21	37,30	63,636	45,979	0,811	-0,189	0,036	-8,679	-653,827
2011	22	36,13	66,667	45,979	0,786	-0,214	0,046	-9,854	-956,816
2012	23	35,54	69,697	45,979	0,773	-0,227	0,052	-10,437	-1137,028
2013	24	33,42	72,727	45,979	0,727	-0,273	0,075	-12,559	-1980,859
2014	25	32,62	75,758	45,979	0,710	-0,290	0,084	-13,354	-2381,658
2015	26	30,66	78,788	45,979	0,667	-0,333	0,111	-15,317	-3593,447
2016	27	28,38	81,818	45,979	0,617	-0,383	0,146	-17,598	-5449,484
2017	28	28,17	84,848	45,979	0,613	-0,387	0,150	-17,810	-5648,965
2018	29	27,00	87,879	45,979	0,587	-0,413	0,170	-18,977	-6833,615
2019	30	25,60	90,909	45,979	0,557	-0,443	0,196	-20,379	-8463,919
2020	31	22,76	93,939	45,979	0,495	-0,505	0,255	-23,220	-12518,845
2021	32	17,562	96,970	45,979	0,382	-0,618	0,382	-28,417	-22948,340

Tableau II-35 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Ngozi ocibu

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne x	$\bar{x}$	45,979
Coefficient de variation	Cv	0,425
Coefficient d'asymétrie	Cs	1,148
Rapport	Cs/Cv	2,698

La valeur du coefficient de variation est égale à 0.425 et la valeur du coefficient d'asymétrie est égale à 1.148 en faisant le rapport entre Cs/Cv on a trouvé une valeur qui est égale à 2.698 Cette valeur me permet de faire l'interpolation en utilisant le tableau de Pearson III pour trouver le coefficient des crues correspondantes entre Cs =2.5cv et Cs=3Cv suivant la valeur de Cv qui est égale à 0.42

Tableau II-36: Calcul du coefficient des crues par interpolation entre Cs=2.5cv et Cs=3Cv

Cs=2,5cv		Cs=3cv		Cs=2,69cv	
P%	Kp	P%	Kp	P%	Kp
0,01	3,56	0,01	3,75	0,01	3,567
0,1	2,93	0,1	3,06	0,1	2,935
0,2	2,75	0,2	2,85	0,2	2,754
0,33	2,6	0,33	2,69	0,33	2,603
0,5	2,48	0,5	2,56	0,5	2,483
1	2,28	1	2,34	1	2,282
2	2,08	2	2,11	2	2,081
5	1,79	5	1,81	5	1,791
10	1,56	10	1,56	10	1,56
20	1,32	20	1,31	20	1,319
50	0,93	50	0,91	50	0,929
75	0,69	75	0,69	75	0,69
90	0,53	90	0,55	90	0,531
95	0,45	95	0,49	95	0,452
99	0,34	99	0,41	99	0,342

Tableau II-37: Calcul des précipitations extrêmes suivant la valeur du coefficient d'asymétrie Cs=2.69Cv

P%	Z	Kp	Xp
0,01	-3,719	3,567	164,010
0,1	-3,09	2,9348	134,941
0,2	-2,878	2,7537	126,614
0,33	-2,716	2,6033	119,699
0,5	-2,576	2,483	114,165
1	-2,326	2,2822	104,935
2	-2,054	2,0811	95,688
5	-1,645	1,7907	82,337
10	-1,282	1,56	71,728
20	-0,842	1,3196	60,676
50	0	0,9293	42,727
75	0,674	0,69	31,726
90	1,282	0,5307	24,403
95	1,645	0,4515	20,758
99	2,326	0,3426	15,75

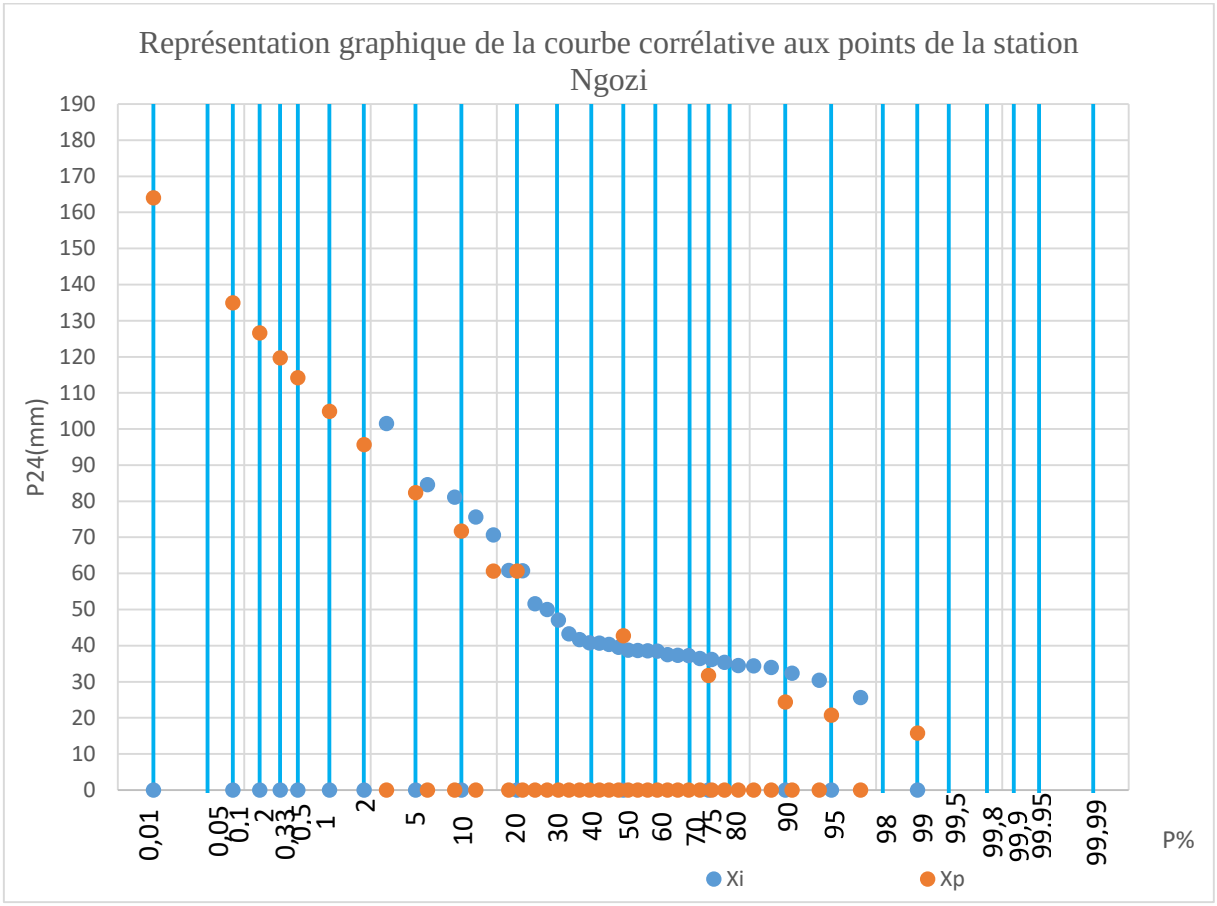


Figure II-21: Courbe corrélative de la station Ngozi

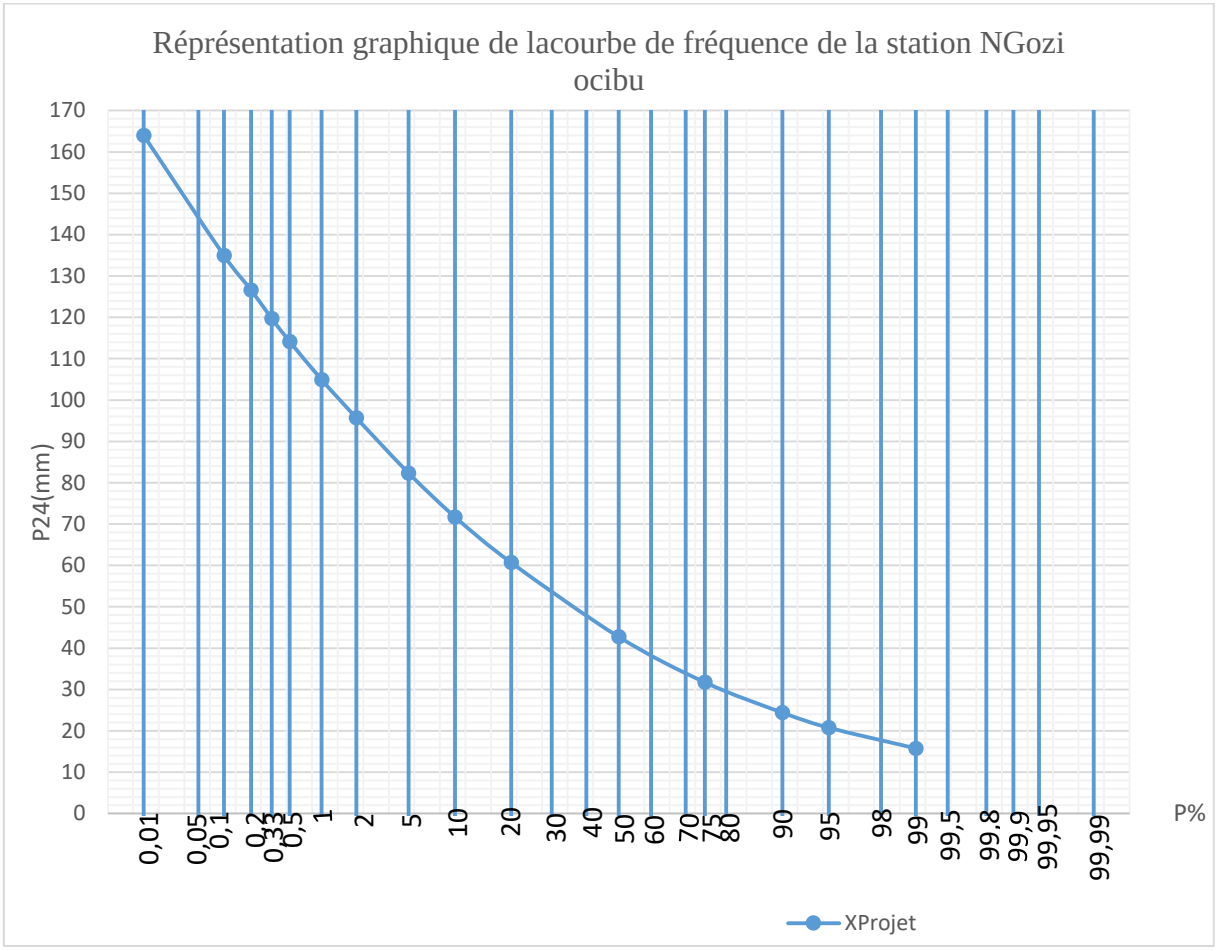


Figure II-22: Courbe de fréquence de la station Ngozi ocibu

Tableau II-38: Calcul du coefficient de variation et d'asymétrie pour la station Buhoro

Année	N°	P trié	P%	Xm	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	Xi-Xm	(Xi-Xm)^2	(Xi-Xm)^3
1990	1	125	4,348	64,228	1,946	0,946	0,895	60,772	3693,269	224448,359
1991	2	91	8,696	64,228	1,417	0,417	0,174	26,772	716,755	19189,149
1992	3	90,6	13,043	64,228	1,411	0,411	0,169	26,372	695,497	18341,830
1993	4	81,5	17,391	64,228	1,269	0,269	0,072	17,272	298,331	5152,861
1994	5	80	21,739	64,228	1,246	0,246	0,060	15,772	248,765	3923,583
1995	6	75,78	26,087	64,228	1,180	0,180	0,032	11,552	133,455	1541,709
1996	7	72,5	30,435	64,228	1,129	0,129	0,017	8,272	68,430	566,076
1997	8	69,8	34,783	64,228	1,087	0,087	0,008	5,572	31,050	173,020
1998	9	68,2	39,130	64,228	1,062	0,062	0,004	3,972	15,779	62,678
1999	10	64	43,478	64,228	0,996	-0,004	0,000	-0,228	0,052	-0,012
2000	11	63,5	47,826	64,228	0,989	-0,011	0,000	-0,728	0,530	-0,385
2001	12	62,6	52,174	64,228	0,975	-0,025	0,001	-1,628	2,649	-4,313
2002	13	62,5	56,522	64,228	0,973	-0,027	0,001	-1,728	2,985	-5,157
2003	14	52,93	60,870	64,228	0,824	-0,176	0,031	-11,298	127,639	-1442,027
2004	15	50	65,217	64,228	0,778	-0,222	0,049	-14,228	202,428	-2880,094
2005	16	50	69,565	64,228	0,778	-0,222	0,049	-14,228	202,428	-2880,094
2006	17	47	73,913	64,228	0,732	-0,268	0,072	-17,228	296,795	-5113,096
2007	18	44,8	78,261	64,228	0,698	-0,302	0,091	-19,428	377,437	-7332,735
2008	19	42,3	82,609	64,228	0,659	-0,341	0,117	-21,928	480,825	-10543,404
2009	20	40,3	86,957	64,228	0,627	-0,373	0,139	-23,928	572,536	-13699,488
2010	21	39,5	91,304	64,228	0,615	-0,385	0,148	-24,728	611,460	-15120,028
2011	22	39,2	95,652	64,228	0,610	-0,390	0,152	-25,028	626,387	-15677,046

Tableau II-39 : Les valeurs caractéristiques d'analyse pour la station Buhoro

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne x	$\bar{x}$	64,228
Coefficient de variation	**Cv**	0,330
Coefficient d'asymétrie	**Cs**	1,103
Rapport	Cs/Cv	3,348

La valeur du coefficient de variation est égale à 0.330 et la valeur du coefficient d'asymétrie est égale à 1.103 et le rapport entre Cs/Cv la valeur qu'on a trouvé est égal à 3.348.Cette valeur me permet de faire l'interpolation entre Cs=3cv et Cs=3.5Cv en utilisant le tableau de Pearson III suivant la valeur du coefficient de variation Cv=0.33.

Tableau II-40: Calcul du coefficient des crues par interpolation entre Cs=3Cv et Cs=3.5cv

CS=3cv		Cs=3,5		Cs=3,34cv	
p%	Kp	p%	Kp	p%	Kp
0,01	2,88	0,01	2,99	0,01	2,883
0,1	2,43	0,1	2,5	0,1	2,432
0,2	2,29	0,2	2,35	0,2	2,292
0,33	2,19	0,33	2,24	0,33	2,191
0,5	2,1	0,5	2,15	0,5	2,101
1	1,96	1	1,99	1	1,961
2	1,81	2	1,83	2	1,811
5	1,6	5	1,61	5	1,600
10	1,43	10	1,43	10	1,430
20	1,24	20	1,24	20	1,240
50	0,95	50	0,94	50	0,950
75	0,77	75	0,76	75	0,770
90	0,64	90	0,65	90	0,640
95	0,58	95	0,59	95	0,580
99	0,48	99	0,52	99	0,481

Tableau II-41: Calcul des valeurs des précipitations extrêmes après interpolations pour Cs=3.34Cv

P%	Z	Kp	Xp
0,01	-3,719	2,883	185,187
0,1	-3,090	2,432	156,208
0,2	-2,878	2,292	147,197
0,33	-2,716	2,191	140,755
0,5	-2,576	2,101	134,974
1	-2,326	1,961	125,944
2	-2,054	1,811	116,291
5	-1,645	1,600	102,784
10	-1,282	1,430	91,846
20	-0,842	1,240	79,642
50	0,000	0,950	60,997
75	0,674	0,770	49,436
90	1,282	0,640	41,125
95	1,645	0,580	37,271
99	2,326	0,481	30,906

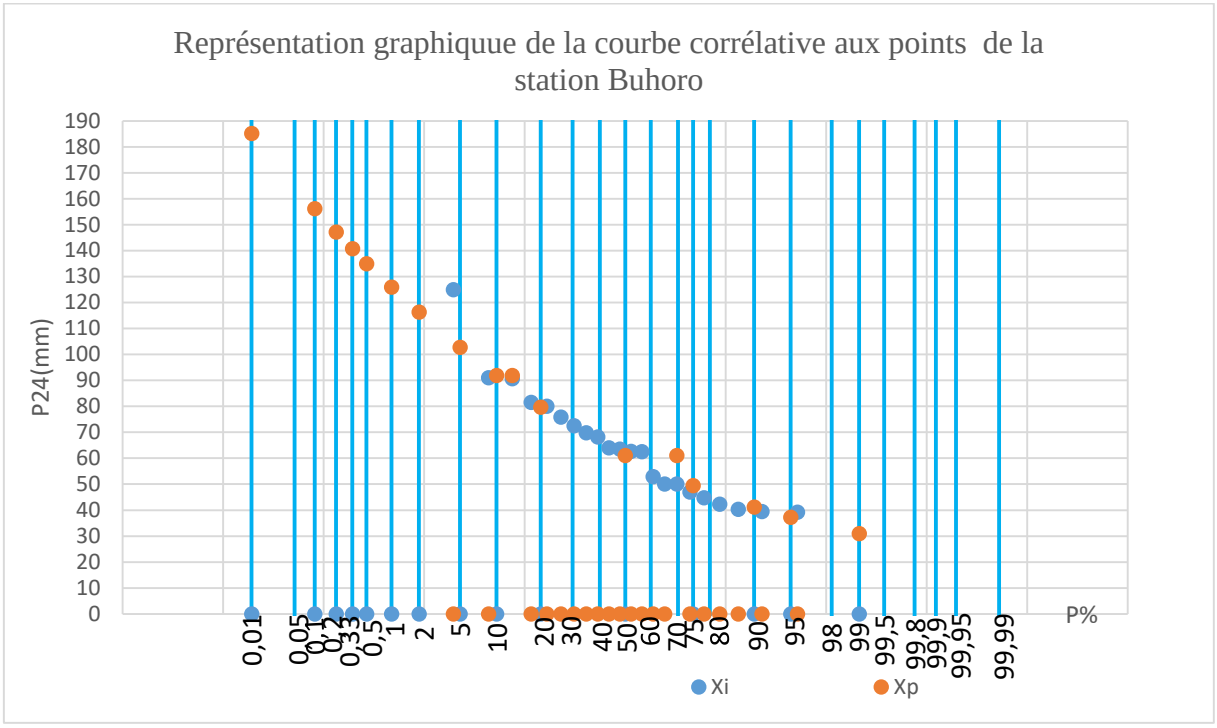


Figure II-23: Courbe corrélative de la station Buhoro

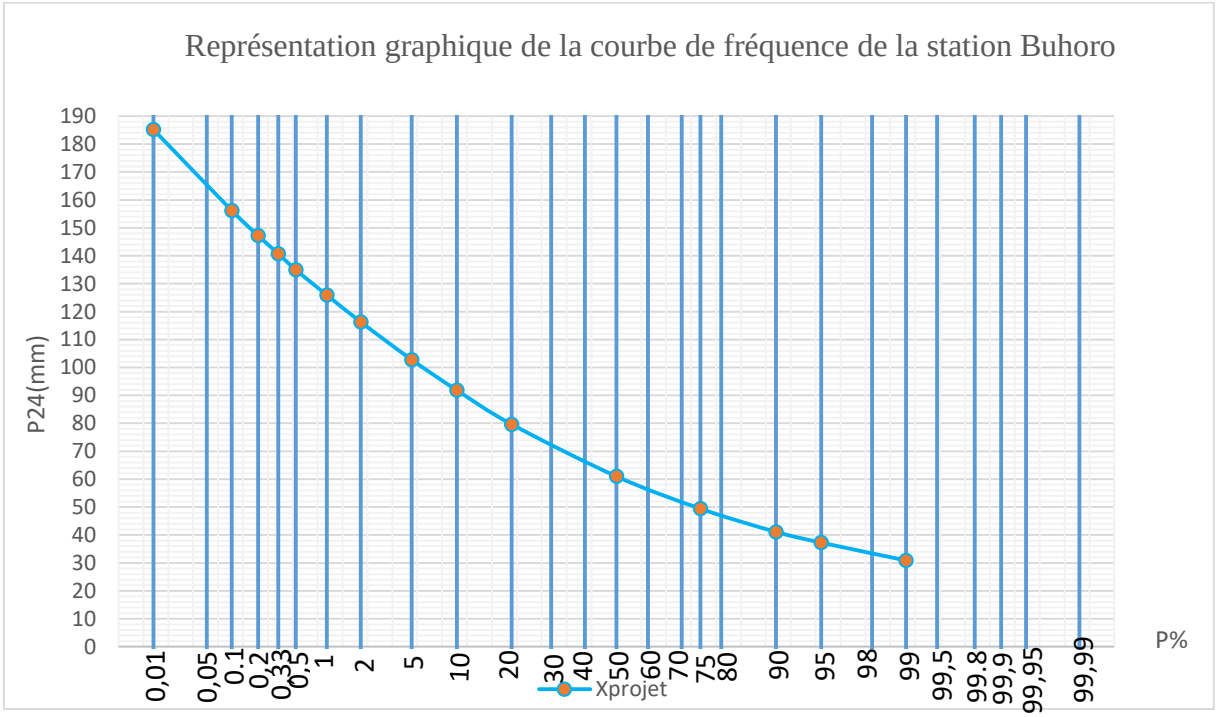


Figure II-24:courbe de fréquence de la station Buhoro

II.3 Discussion des résultats obtenus

L'analyse fréquentielle des séries de précipitations journalières maximales nous a permis de faire le choix de la loi de Pearson III.

Cette méthode avait comme objectif principal d'utiliser des mesures d'évènements passés pour estimer les probabilités futures d'occurrence.

Les résultats de ces précipitations sont dans une même allure d'alignement, ce qui fait qu'il Ya une bonne corrélation par rapport au point de chaque station correspondante ; cela nous a permis de constater qu'il ya l'exactitude dans nos calculs de traitement.

Quant à la courbe de fréquence nous pouvons faire la lecture facilement la valeur des précipitations extrêmes pour n'importe quel période de retour.

Pour cette étude, les résultats des précipitations extrêmes obtenus après l'analyse fréquentielle sont inversement proportionnel à la probabilité d'apparition, plus la probabilité augmente plus les valeurs des précipitations extrêmes diminue et plus la probabilité diminue plus les valeurs des précipitations extrêmes augmente.

Suivant les résultats des précipitations extrêmes obtenues des différentes courbes de fréquences en fonction de la période de retour et en utilisant le logiciel ArcGis avec la méthode d'interpolation Spline nous pouvons dresser les cartes des précipitations journalières maximales annuelles appelées aussi cartes des isohyètes extrêmes.

Enfin, nous espérons que cette étude fera l'objet d'autres travaux pour qu'on puisse cartographier les précipitations extrêmes suivant les autres périodes de retour.

CHAPITRE III : REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ISOHYETES EXTREMES

III.1 : Généralités

Le présent travail a été choisi plus utile dans le but d'élaborer en premier lieu la carte nationale des isohyètes les plus extrêmes sur la courbe de fréquence.

Ces isohyètes sont des isohyètes sur différentes probabilités à savoir **P =0.1%, P=0.2%, P=0.5% P=1% et P=2%**

Suivant les autres probabilités montrées sur les courbes de fréquences déjà calculées dans ce mémoire nous pouvons élaborer facilement les autres cartes nationales des isohyètes extrêmes suivant la même méthode.

Pour un temps de retour T correspondant à une fréquence P(T), le présent travail donne des données pluviométriques des crues les plus fiables correspondantes et cela pour chaque station.

Ces données sont calculées pour chaque station avec le logiciel d'ArcGis qui donnent des cartes appelées cartes des isohyètes extrêmes représentées sur les pages suivantes :

« Contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Nord- Ouest du Burundi. »

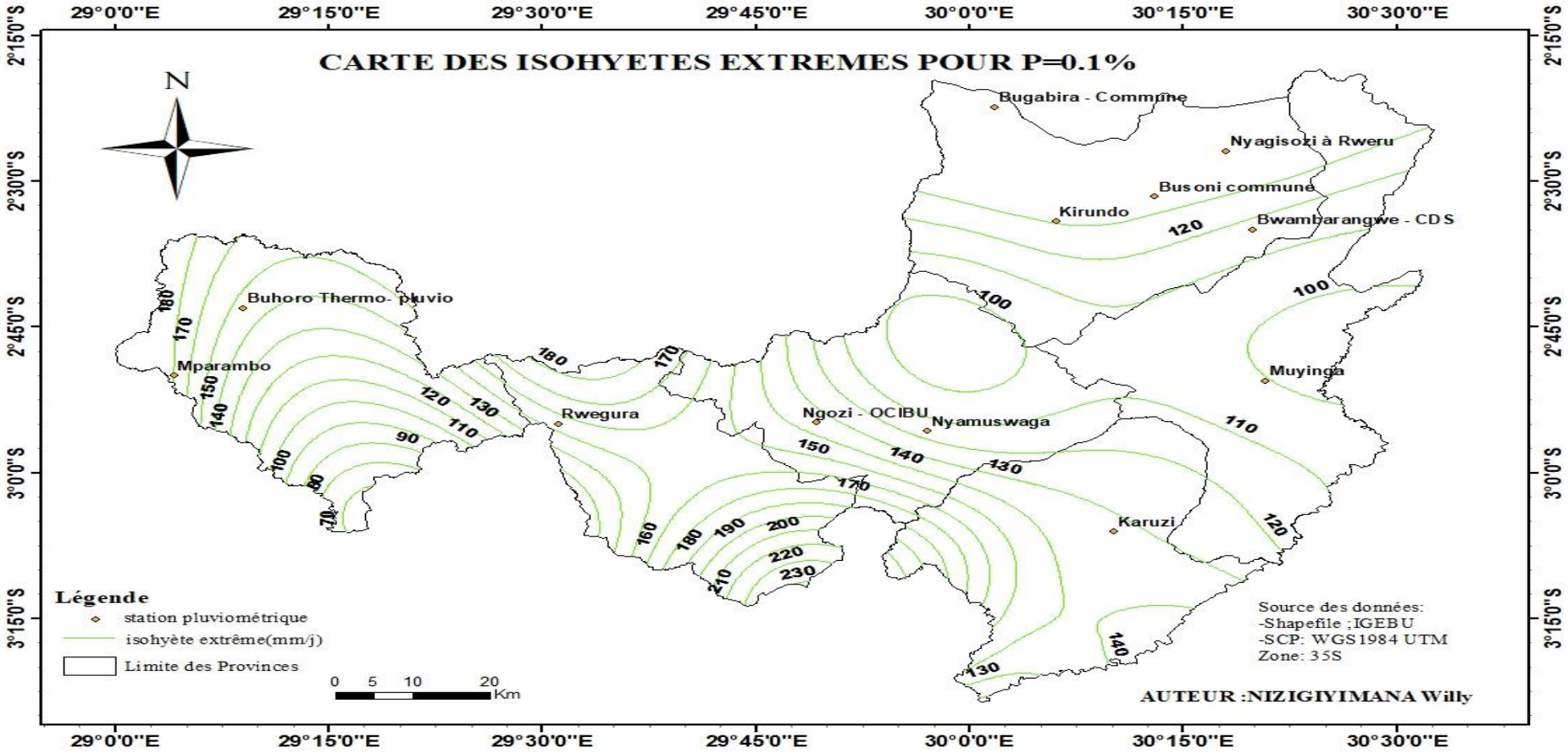


Figure III-1 : Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 1000ans

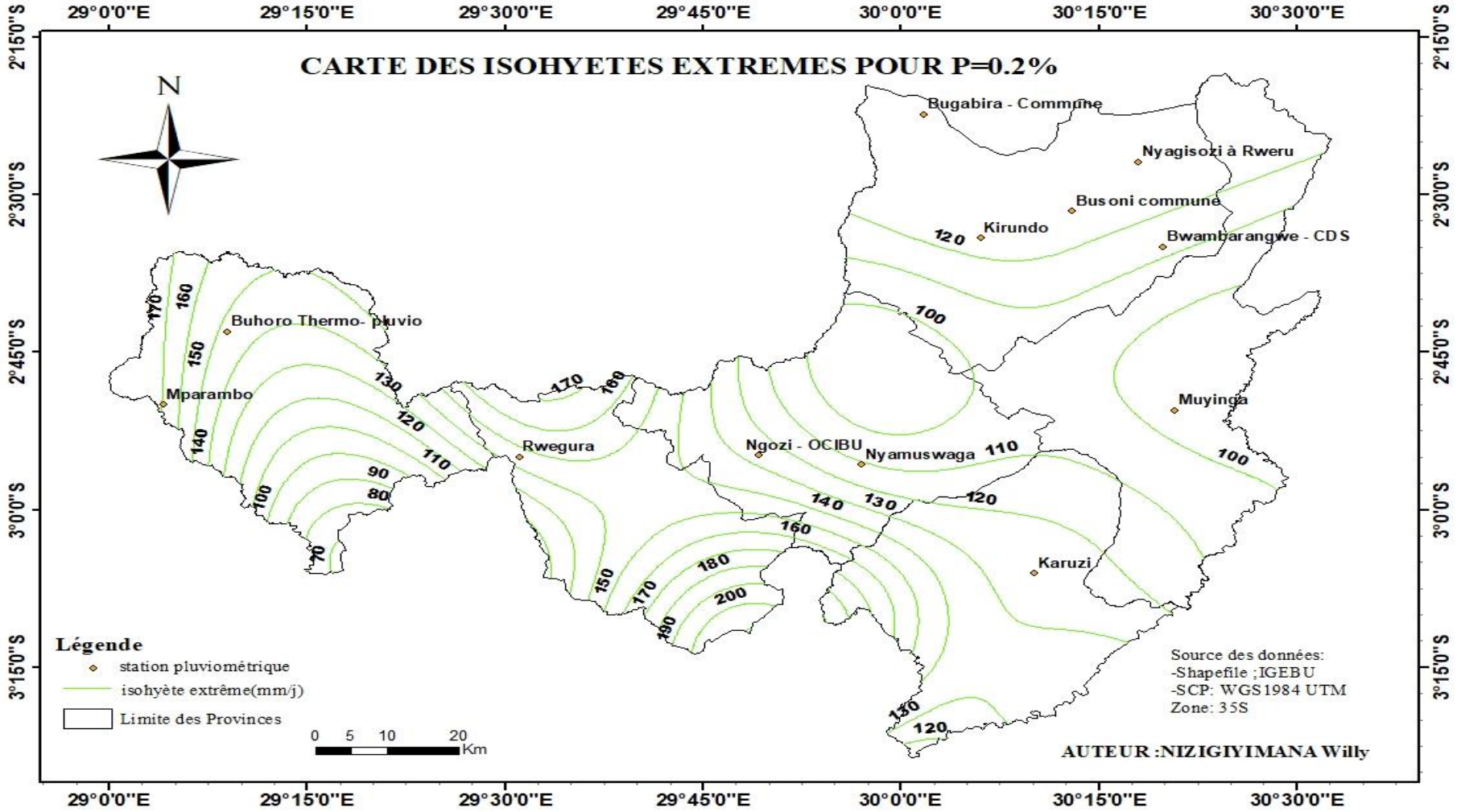


Figure III-2: Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 500ans

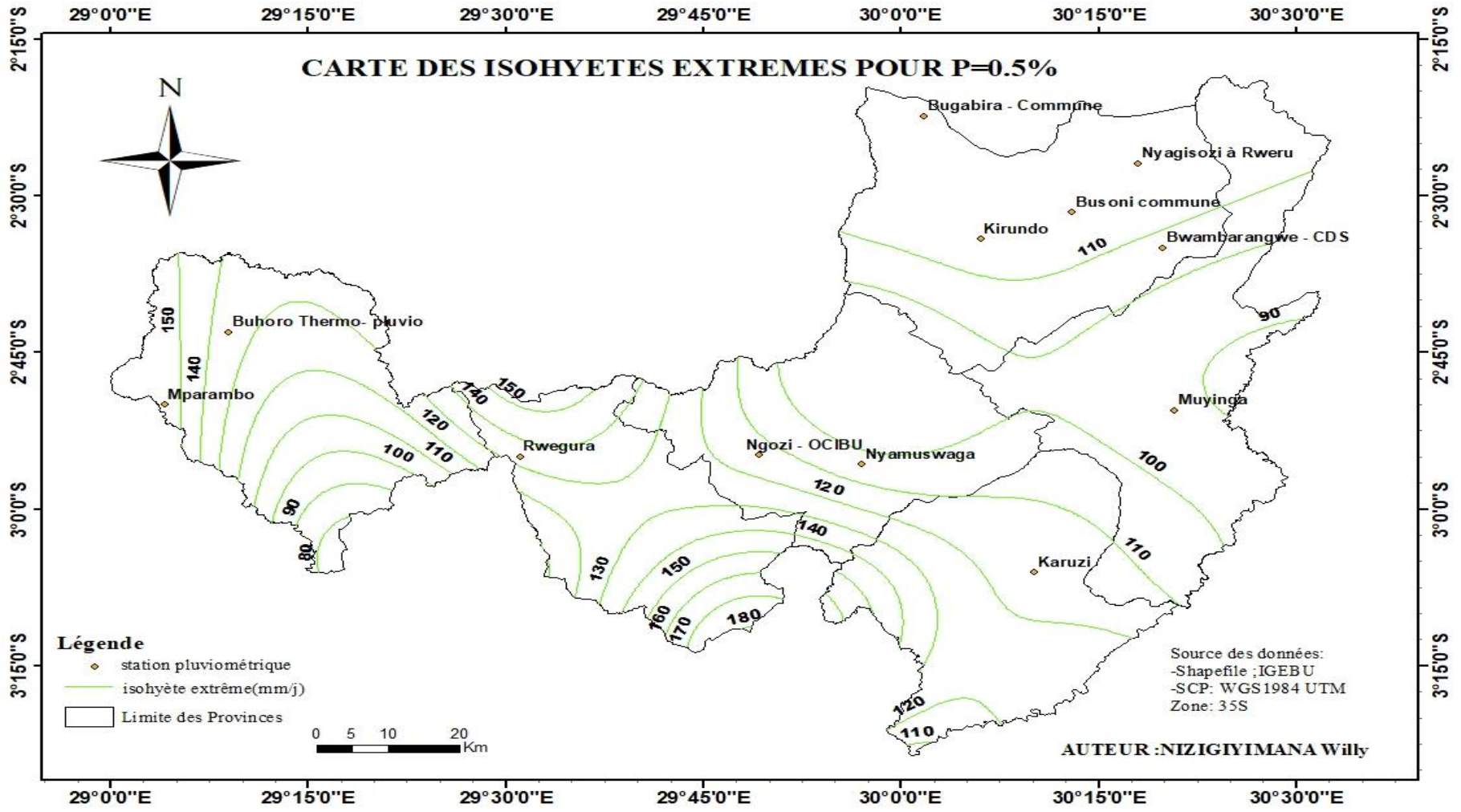


Figure III 3 : Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 200 ans

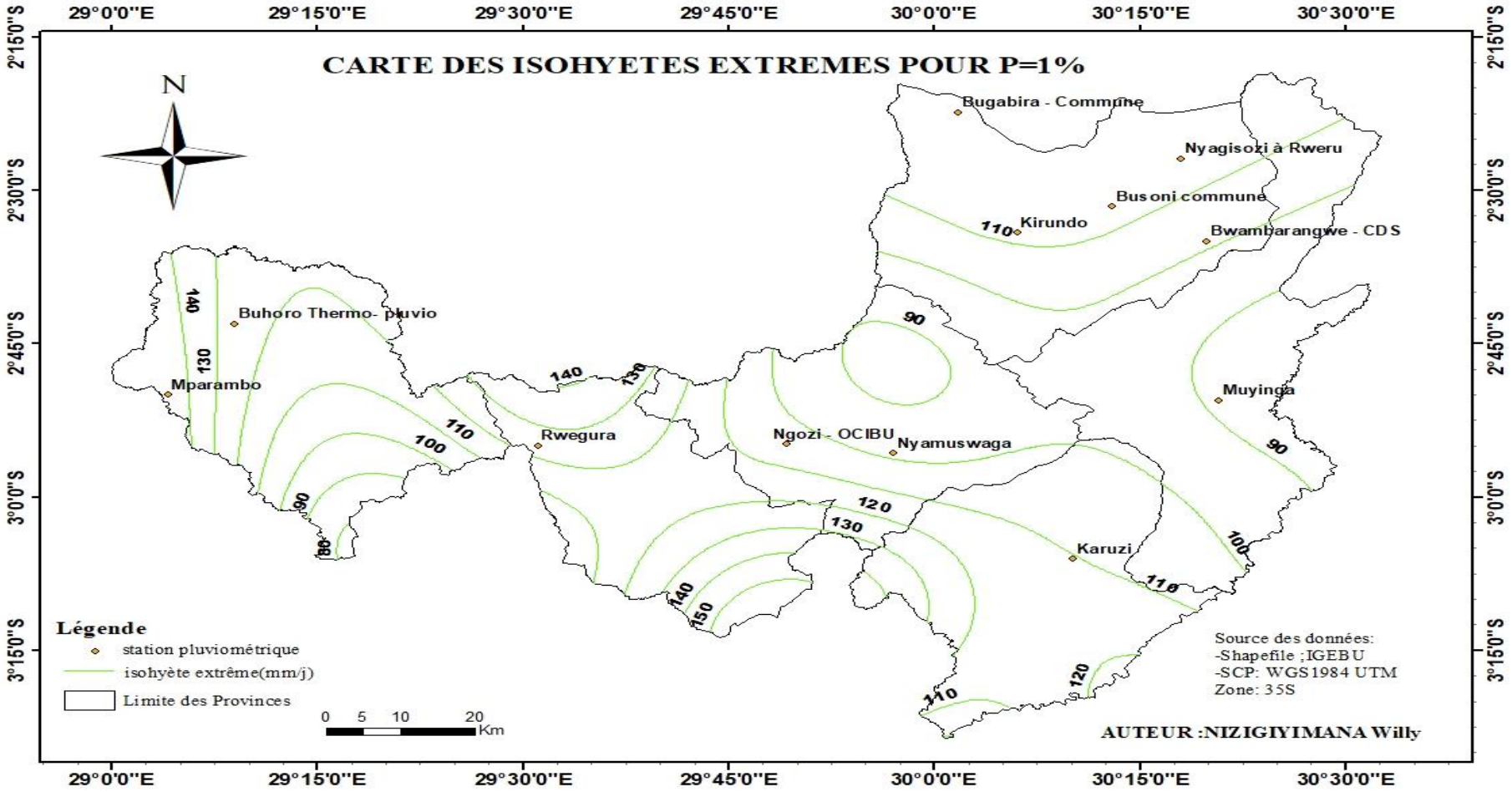


Figure III-4: Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 100 ans

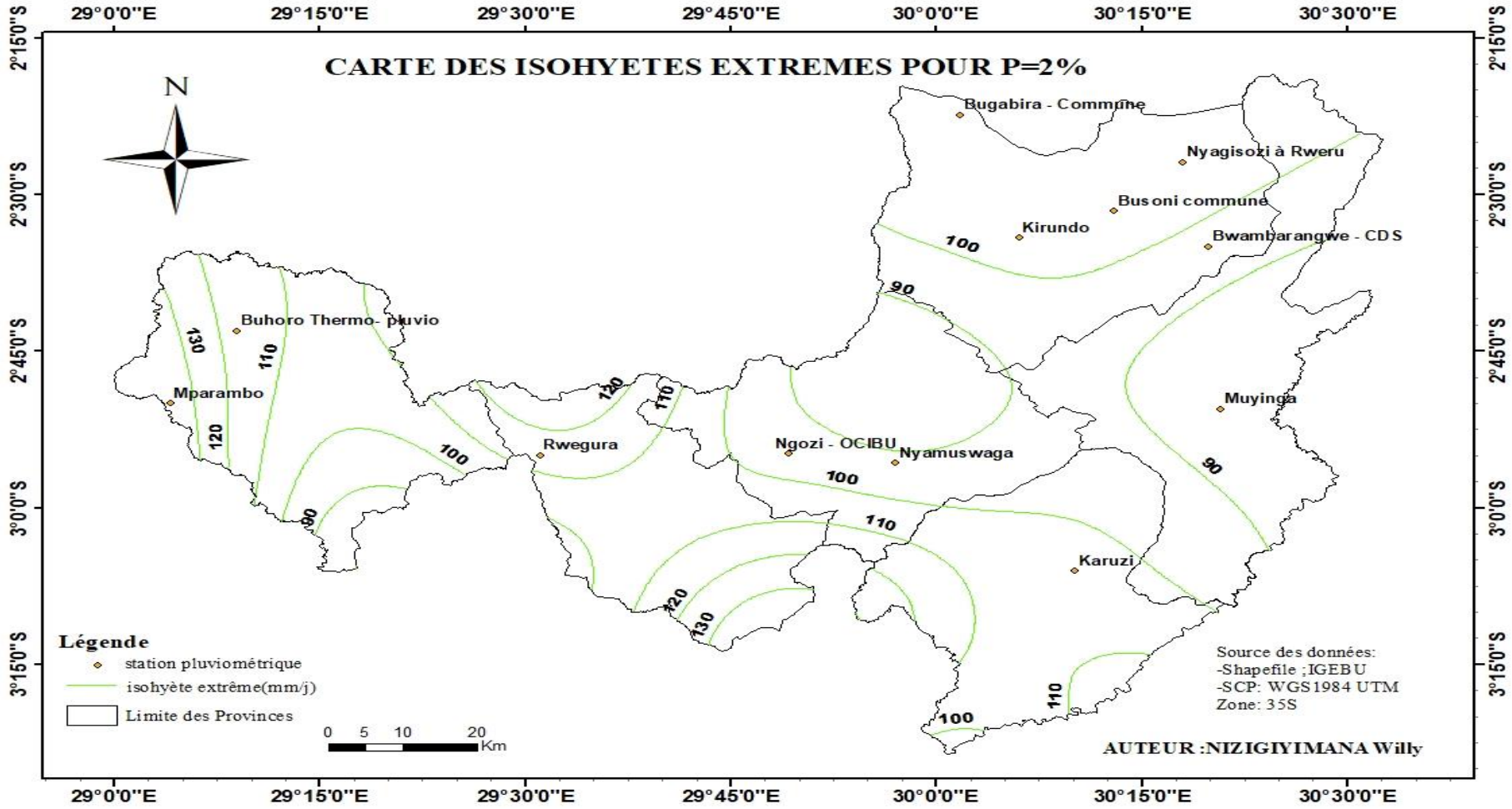


Figure III-5: Carte des isohyètes extrêmes pour la période de retour 50ans.

CHAPITRE IV : CONCLUSION ET RECOMMANDATION

IV.1 Conclusion

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à l'amélioration des études d'aménagement hydrauliques par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : cas de la région Nord-Ouest du Burundi couvrant les provinces Kirundo, Ngozi, Muyinga Karuzi, Kayanza et Cibitoke en République du Burundi.

Le présent travail vient de faire une amélioration dans la résolution des problèmes de non exploitation des données de l'**IGEBU** pour donner des informations utiles, nécessaires fiables et complètes aux études faites dans des différentes domaines variés, en l'occurrence le domaine de l'agriculture, le domaine d'assainissement, le domaine de la production d'énergie etc.

Cette carte nationale des isohyètes des extrêmes est une nouvelle carte qui donne des informations très importante que l'**IGEBU** n'avait pas jusqu'à présent. De plus, cette carte constituera un outil indispensable pour les ingénieurs qui font des études hydrauliques, d'assainissement ou de production d'énergie hydroélectrique, qui ne sont pas nécessairement outillé dans le traitement des données hydrologiques pour trouver les crues du projet.

La création de cette carte est donc aussi une excellence ressource pour les ingénieurs et les urbanistes afin de prendre des décisions éclairées en matière de construction et d'investissement dans le domaine de l'aménagement du territoire.

En effet, avec cette carte nationale des isohyètes des extrêmes pour un site donné, il suffira de choisir le temps de retour de la crue du projet et de consulter directement l'isohyète qu'il passe par ce site pour trouver la hauteur de l'averse journalière correspondante. C'est cette averse journalière qui avec la superficie du bassin, donnera directement le débit des crues du projet.

Evidemment, le présent mémoire s'est arrête sur cinqs cas des temps de retour, tout en espérant que l'**IGEBU**, à l'instar de ce mémoire pourra continuer à produire les cartes des autres temps de retour les plus fréquemment utilisés dans des études de planification des ressources hydrauliques disponibles.

Enfin, nous invitons d'autres étudiants à exploiter les riches données de l'**IGEBU**, pour produire d'autres informations qui sont encore inconnues aux ingénieurs jusqu'à présent, comme par exemple, le potentiel hydroélectrique national exploitable, le potentiel national de l'énergie solaire, le potentiel national de l'énergie éolienne etc.

IV.2 Recommandation

Après avoir terminé notre travail qui nous a conduits à l'élaboration de la carte nationale des isohyètes extrêmes pour 1es quelques différentes probabilités au Burundi.

Les recommandations sont les suivantes :

- Pour faciliter les études hydrologiques au Burundi, les étudiants qui sont intéressés par le domaine d'étendre l'étude aux autres probabilités afin d'avoir une base complète sur tout le territoire national ;
- Pour avoir des modèles variés et performants il faut avoir des données nombreuses d'entrée de longue période et spatialement représentatives ;
- Au ministère de l'éducation, d'accompagner des étudiants dans la préparation de leurs travaux de fin d'études par des moyens financiers;
- A l'université du Burundi avec son centre de recherche, de prendre ce travail avec l'ambition de le publier vu que ça a une utilité importante dans tous les domaines de génie civil ;
- Pour cette belle opportunité, nous recommandons au gouvernement du Burundi d'augmenter les stations météorologiques et les équiper des appareils modernes automatiques pour éviter de recevoir des fausses données ;
- A l'IGEBU, nous lui recommandons de faciliter l'accès aux données météorologiques des différentes années et les rendre disponibles pour ceux qui veulent faire des travaux de recherche.

❖ Références Bibliographiques

➢ Thèses

- **David PENOT (2006).** Cartographie des événements hydrologiques extrêmes et estimation Schadex en sites non jaugés.
- **Mlle Souad RIAD (2003).** Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à Partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc.
- **Salima GUECHI (2017).** Cartographie des pluies extrêmes du nord-est algérien.

➢ Mémoires

- **ALLAL Randa & KAHLANE Nesrine(2021).** Analyse et cartographie de la variabilité spatiotemporelle des précipitations journalières maximales fréquentielles. Cas du bassin versant Oued El-Hai.
- **BIGIRIMANA Dialo(2021).** « Contribution à l'évaluation de l'impact de l'aménagement des bassins versants sur la dynamique des cours d'eau : cas du bassin versant de la rivière muha en république du burundi≫.
- **Bwirabucaza F.L (2020**), « Modélisation des processus hydrologique et hydraulique pour améliorer la résilience aux inondations. Cas du bassin versant de la rivière Gasenyi en république du Burundi.», Université du Burundi.
- **Claudie Beaulieu(2009).**Homogénéisation des séries de précipitations : identification des techniques les plus prometteuses et nouveaux développements.
- **NKURUNZIZA Protais(2021).** Contribution à la modélisation hydrologique pluriannuelle par introduction des paramètres dynamiques : cas du bassin versant de la rivière Ruvubu en république du burundi.
- **RAFANOMEZANTSOA Herimalala Edmond(2017).** Homogénéisation des données de températures dans la région d'atsimo andrefana de madagascar. Modele de prévision de ces températures.
- **TWAGIRAYEZU Eugénie(2021).** Contribution à l'étude de la gestion intégrée des ressources en eau pour une irrigation optimisée et une lutte contre les inondations : cas du bassin versant de la rivière mutimbuzi en république du Burundi.

Articles

- **André St-Hilaire (2005).** Analyse fréquentielle des précipitations des stations de montréal et shawinigan. Chaire en hydrologie statistique Institut national de la recherche scientifique (INRS) Centre Eau, Terre et Environnement 490 de la Couronne, Québec, (Québec) GIV 4C7.
- **André St-Hilaire (2007).** Analyse fréquentielle des précipitations de la station assomption. Chaire industrielle Hydro-Québec / CRSNG en Hydrologie statistique.
- **Barcelo, A. & Coudray, J. (1996)**. Nouvelle carte des isohyètes annuelles et des maxima pluviométriques sur le massif du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 9(4), 457–484. https://doi.org/10.7202/705262ar **A.**
- **Benhattab, K., Bouvier, C. & Meddi, M. (2014).** Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles dans le bassin hydrographique - Chéliff, Algérie. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 27(3), 189–203. https://doi.org/10.7202/1027805ar**.**
- **BENKHALED (2007).** Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff comparaison des techniques et des résultats.
- **Claudie Beaulieu Taha B.M.J. Ouarda Ousmane Seidou(2005).** Revue bibliographique des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations.
- **J.-F. Zumstein (1973**). Contribution à l'élaboration de cartes hydrologiques.
- **Kouassi, A. M., Nassa, R. A., Yao, K. B., Kouame, K. F. & Biemi, J. (2018)**. Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 31(2), 147–160. https://doi.org/10.7202/1051697ar**.**
- **P. Dubreuil(1974).** Initiation à l'analyse hydrologique. Paris Masson et Cie

.

➢ **Cours**

- **Dr Ir Joseph NZEYIMANA : Professeur de l'Université du Burundi (cours Hydrologie de l'Ingénieur)**