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 Ouest du Burundi

Irankunda, Delphin; Sous la direction de : Dr. Ir. Nzeyimana Joseph

2023
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1566

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



Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

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 Ouest du Burundi

Mémoire

Présenté publiquement par :

IRANKUNDA Delphin

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

Soutenu le17/7/2023 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 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 Ouest du Burundi. »

DEDICACE

Avec une profonde gratitude, je dédie ce travail à mes très chers parents, NTAHONKIRIYE Libérat et BUCUMI Hilda, pour l'amour inconditionnel et leur dévouement à mon bien-être et ma formation.

IRANKUNDA Delphin

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 Ouest du Burundi. »

REMERCIEMENT

Au terme du présent travail, il nous tient d'exprimer notre action de gratitude à l'endroit de toute personne tant physique que morale qui a contribué à sa réalisation.

- D'abord à Dieu Tout Puissant, qui m'a créé et qui m'a gardé toujours en vie. C'est par sa volonté que j'ai pu arriver à cette étape. La louange et la gloire sont à lui pour l'éternité.

- Mes vifs remerciements sont également adressés à mon Directeur Dr- Ir. NZEYIMANA Joseph. Sa rigueur scientifique, sa détermination, ses conseils et remarques si judicieux ainsi que sa disponibilité malgré ses multiples obligations m'a été d'une importance incomparable dans la réalisation effective du présent travail.

- Un grand merci aux services de l'IGEBU auprès desquels j'ai obtenu les données pluviométriques de la zone d'étude. Ils m'ont accueilli et servi avec beaucoup de gentillesse.

- Ma gratitude éternelle à ma famille, mes chers parents NTAHONKIRIYE Libérat et BUCUMI Hilda, aux familles NAHIMANA Innocent, BARANYIKWA Isaac, NAHIMANA Révérien, NIYONGABO Astère, NSHIMIRIMANA Euphraim, NTIHARIRIZWA Constantin ainsi qu'à ma sœur IRAKOZE Florienne, mes neveux et nièces qui, même quand mes travaux les privaient de ma présence, n'ont jamais cessé de me témoigner de l'affection. Je n'oublie pas vos encouragements et soutiens émotionnel, financier et spirituel dont la réussite de l'ensemble de ce cursus qui s'achève est tributaire.

- Aux membres de jury pour le temps que vous avez consacré à la lecture et à l'amélioration de ce travail, votre contribution a été d'une importance capitale.

- Qu'il me soit permis d'adresser mes remerciements à mes enseignants, pour leur formation tant humaine que scientifique qu'ils m'ont fait bénéficier, qu'ils trouvent à travers ces lignes l'expression de ma profonde gratitude et l'encouragement dans leur lourde et noble tâche.

- Que tous ceux qui de prêt ou de loin ont contribué aussi bien sur le plan moral que matériel à l'aboutissement de ce travail trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

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

RESUME

L'estimation des statistiques liées aux précipitations représente un vaste domaine qui pose de nombreux défis aux météorologues et hydrologues. Parfois, il est 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 précipitations journalières maximales annuelles a une grande importance en hydrologie opérationnelle: elle constitue la base de calcul des crues de projet associée à une probabilité d'occurrence donnée, une fois les quantiles déterminés.

Le présent travail est consacré à estimer la fréquence des crues sur tout le territoire national en vue de faciliter les études hydrauliques, d'aménagement agricoles et d'assainissement malgré l'absence ou le nombre limité des stations pluviométriques. A cet effet, les données de 13 stations ont été utilisées et couvrent globalement la période de 32 ans (1990 à 2021). Trois lois statistiques qui sont entre autres loi normale ou de Gauss, loi de Gumbel et la loi de Pearson III ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle des précipitions. Le choix de la meilleure loi a été fait sur la base de la comparaison numérique.

Ce travail comporte trois chapitres : Le premier est consacré à la revue bibliographique, le second est consacré à l'analyse des précipitations de la zone d'étude et le dernier chapitre présente les conclusions et recommandations formulées sur base des résultats de cette étude.

Les précipitations extrêmes obtenues nous ont permis d'élaborer les courbes de fréquence des crues pour que les valeurs de ces précipitations correspondantes à chaque période de retour soient consultées aisément et de produire les cinq cartes nationales des isohyètes extrêmes correspondantes aux probabilités d'apparition de 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%, 2% .

Mots clés : isohyètes extrêmes, homogénéisation, analysée fréquentielle.

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

ABSTRACT

The estimation of statistics related to precipitation represents a vast field that poses many challenges to meteorologists and hydrologists. Sometimes, it is essential to estimate the value of extreme events for sites where there is little or no data, as well as their return periods. The search for a frequency model of annual maximum daily precipitation is of great importance in operational hydrology: it constitutes the basis for calculating design floods associated with a given probability of occurrence, once the quantiles have been determined.

This work is dedicated to estimating the frequency of floods throughout the national territory in order to facilitate hydraulic, agricultural development and sanitation studies despite the absence or limited number of rainfall stations. For this purpose, data from 13 stations were used and generally cover the period of 32 years (1990 to 2021). Three statistical laws which are among others normal or Gauss law, Gumbel law and Pearson III law were used for the frequency analysis of precipitation. The choice of the best law was made on the basis of the numerical comparison.

This work has three chapters: The first is devoted to the bibliographic review, the second is devoted to the analysis of precipitation in the study area and the last chapter presents the conclusions and recommendations formulated based on the results of this study.

The extreme precipitation obtained allowed us to develop flood frequency curves so that the values of these precipitation corresponding to each return period are easily consulted, and to produce the five national maps of extreme isohyets corresponding to the probabilities of occurrence of 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%, 2%.

Keywords: extreme isohyets, homogenization, frequency analysis.

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

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i
DEDICACE ii
REMERCIEMENT iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DES MATIERES vi
LISTE DES TABLEAUX viii
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. Objectifs 1
0.2.1. Objectif Global 1
0.2.2. Objectifs Spécifiques 1
0.3 Méthodologie 1
0.4. Résultat attendus 2
CHAPITREI: SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET REVUE DE LA LITTERATURE 3
I.1 Présentation de la zone d'étude 3
I.2 Climat 4
I.3 REVUE DE LA LITTERATURE 6
I.3.1 Cycle de l'eau 6
I.3.1.1 Définition 6
I.3.1.2 Les processus hydrologiques de génération des écoulements 7
I.3.2 Bassin versant 10
I.3.2.1 Caractéristiques morphométriques 11
I.3.2.2 Les indices de pente 13
I.3.2.3 Réseau hydrographique 15
I.3.3 Les Précipitations 17
I.3.3.1 Les principales caractéristiques des précipitations 17
I.3.3.2 La représentation et l'analyse des précipitations 17
I.3.3.3 La mesure des précipitations 18

I.3.3.4 Détermination de précipitations moyenne dans un bassin versant 19
I.3.3.5 Variabilité spatio-temporelle des précipitations 22
I.3.4 Homogénéisation des séries de précipitations 22
I.3.4.1 Les méthodes d'homogénéisation 23
I.3.5 Analyse fréquentielle 24
I.3.6 Lois statistiques 25
I.3.6.1 Loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle 26
I.3.6.2 Loi Normale ou de Gauss 27
I.3.6.3 La loi de Pearson III 28
I.3.7 .Contribution d'un SIG à la gestion des ressources en eaux 29
I.3.7.1 Présentation du logiciel Arcgis 10.3 30
I.3.8 Modélisation spatio-temporelle des précipitations 30
I.3.8.1 Les méthodes d'interpolation spatiale en arcgis 30
I.4 Conclusion 32
CHAPITREII: TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS 33
II.1 Méthodologie de travail 33
II.2 Présentation des résultats 34
II.2.1 Comparaison des lois sur base de l'analyse fréquentielle 34
II.2.1.1 Commentaires 49
II.2.2 Analyse statistique détaillée des données des précipitations 50
II.3 Discussion des résultats 81
CHAPITREIII: REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ISOHYETES EXTREMES 82
III.1 Généralité 82
CHAPITREIV: CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS 88
IV.1 Conclusion 88
IV.2 Recommandation 89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1:Répartition de la pluviométrie et de la température de la zone d'étude 4
Tableau I-2 : Valeurs du paramètre «α » selon les différents auteurs..... 25
Tableau II-1 : Précipitions maximale journalière annuelle à l'état brut..... 35
Tableau II-2: Précipitions maximale journalière annuelle homogénéisée 36
Tableau II-3: Les valeurs caractéristiques d'analyse 37
Tableau II-4 : Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normal et Gumbel..... 37
Tableau II-5 *:* Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 38
Tableau II-6 : Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normal et Gumbel. 39
Tableau II-7 : Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 39
Tableau II-8: Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel. 40
Tableau II-9:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 41
Tableau II-10: Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel. 42
Tableau II-11: Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 42
Tableau II-12 Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel. 43
Tableau II-13:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 44
Tableau II-14:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel. 45
Tableau II-15:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 45
Tableau II-16:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel. 46

Tableau II-17:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 47
Tableau II-18:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel. 48
Tableau II-19:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III 48
Tableau II-20 : Analyse statistique des données recueillies à la station Buja aéro 51
Tableau II-21 : Les valeurs caractéristiques 52
Tableau II-22: Les valeurs des coefficients K_p 52
Tableau II-23 : Précipitations extrêmes calculées à la station Buja aéro 53
Tableau II-24 : Analyse statistique des données recueillies à la station Imbo Sems 55
Tableau II-25 : Les valeurs caractéristiques d'analyse (Imbo Sems) 56
Tableau II-26: Les valeurs des coefficients K_p 56
Tableau II-27 : Précipitations extrêmes calculées à la station Imbo Sems 57
Tableau II-28 : Analyse statistique des données recueillies à la station Makamba 59
Tableau II-29: Les valeurs caractéristiques d'analyses (Station Makamba) 60
Tableau II-30 : Précipitations extrêmes calculées à la station Makamba 60
Tableau II-31 : Analyse statistique des données recueillies à la station Gisozi 62
Tableau II-32 : Les valeurs caractéristiques d'analyses (station Gisozi) 63
Tableau II-33: Les valeurs de coefficient K_p 63
Tableau II-34 : Précipitations extrêmes calculées à la station Gisozi 64
Tableau II-35 : Analyse statistique des données recueillies à station Mpota Tora 66
Tableau II-36 : Les valeurs caractéristiques d'analyses (station Mpota tora) 67
Tableau II-37: Les valeurs de coefficient K_p 67
Tableau II-38 : Précipitations extrêmes calculées à la station Mpota tara 68
Tableau II-39 : Analyse statistique des données recueillies à la station Vyanda-Rweza 70
Tableau II-40 : Les valeurs caractéristiques d'analyse (station Vyanda-Rweza) 71
Tableau II-41: Les valeurs de coefficient K_p 71
Tableau II-42 : Précipitations extrêmes calculées à la station Vyanda -Gweza 72
Tableau II-43 : Analyse statistique données recueillies à station Nyanza-Lac 74
Tableau II-44:Les valeurs caractéristiques d'analyse (station Nyanza lac) 75
Tableau II-45: Les valeurs de coefficient K_p 75
Tableau II-46 : Précipitations extrêmes calculées sur la station Nyanza- lac 76

Tableau II-47 : Analyse statistique données recueillies à la station Bugarama 78

Tableau II-48 : Les valeurs caractéristiques d'analyse (station Bugarama)..... 79

Tableau II-49 : Précipitations extrêmes calculées à la station Nyanza- lac 79

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

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : carte de localisation de la zone d'étude 3
Figure I-2 : Situation climatique de la zone d'étude 5
Figure I-3:Cycle hydrologique naturel (https://cms.alloprof.qc) 6
Figure I-4 : Processus de génération des écoulements (Ambroise, 1999) 10
Figure I-5 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique (Roche, 1963)..... 11
Figure I-6 : Illustration de hiérarchisation du réseau fluvial 15
Figure I-7 : Illustration d'un hyétogramme des précipitations 18
Figure I-8:Illustration de la courbe des précipitations 18
Figure I-9 : Illustration du polygone de Thiessen 20
Figure I-10 : Illustration des isohyètes 21
Figure I-11 : Méthode d'interpolation spline 32
Figure II-1:Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Buja aéro 39
Figure II-2 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Imbo Sems 40
Figure II-3 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Mpota Tora 41
Figure II-4:Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Bugarama 43
Figure II-5 Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Vyanda Gweza 44
Figure II-6: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Gisozi 46
Figure II-7: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Makamba 47
Figure II-8: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Nyanza –lac 49
Figure II-9: La corrélation de la courbe par rapport aux points de la station Buja aéro 54
Figure II-10 : La courbe de fréquences des crues de station Buja Aéro 54
Figure II-11 : La corrélation de la courbe par rapport aux points de la station Imbo Sems..... 58
Figure II-12 : La courbe de fréquences des crues de la station Imbo Sems 58

Figure II-13 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Makamba ... 61
Figure II-14 : La courbe de fréquences des crues (station Makamba) ... 61
Figure II-15 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Gisozi ... 65
Figure II-16 : La courbe de fréquences des crues (station Gisozi) ... 65
Figure II-17 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Mpota- Tora .. 69
Figure II-18 : La courbe de fréquences des crues (Mpota Tora) ... 70
Figure II-19 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Vyanda- Gweza ... 73
Figure II-20 : La courbe de fréquences des crues (Vyanda-Rweza) ... 73
Figure II-21 : La corrélation de la courbe par rapport aux points la station Nyanza- lac ... 77
Figure II-22 : La courbe de fréquences des crues (Nyanza-lac) ... 77
Figure II-23 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Bugarama ... 80
Figure II-24 : La courbe de fréquences des crues (Bugarama) ... 80
Figure III-1: Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 0.1% ... 83
Figure III-2:Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 0.2% ... 84
Figure III-3 : Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 0.5% ... 85
Figure III-4 : Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 1% ... 86
Figure III-5 : Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 2% ... 87

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

SIGLES ET ABREVIATIONS

BCG : Bureau de Centralisation Géomatique

BV: Bassin Versant

IDW: Inverse Distance Weighted

IGEBU : Institut Géographique du Burundi

P : Probabilité

P_i : Précipitation au Poste I

P_m : Précipitation Moyenne Du Bassin

P_{moy} : Pente Moyenne du Bassin

S : Surface Totale du Bassin Versant

S_i : Surface d'influence du Pluviomètre I

SIG : Système d'Information Géographique

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

AVANT-PROPOS

Les valeurs extrêmes des précipitations sont des valeurs maximales journalière (p24) relevées sur les différentes stations, celles –ci présentent un intérêt tout particulier lorsqu'on parle en termes de risque. L'estimation de la récurrence de précipitations extrêmes fournit des éléments indispensables pour la construction des ouvrages hydrotechniques comme les digues, les barrages, les ponts, les ouvrages d'assainissement.., afin de protéger efficacement la population et leurs biens.

La conception et la réalisation de ces ouvrages est un processus qui est fait en plusieurs étapes réalisées par plusieurs intervenants suivant la spécialité de chacun en complexité des études à mener. L'analyse est fondée sur les objectifs à atteindre et le nœud du problème est beaucoup de fois basé sur les données d'entrée.

Le Burundi est marqué par une forte Variabilité spatio-temporelle des précipitations en plus les stations hydrologiques qui fournissent les données sont inégalement réparties. Le présent travail de fin d'études, intitulé **« contribution à l'amélioration des études d'aménagement hydraulique par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes »** s'inscrit dans le cadre de pallier à cette inégale répartition des stations pluviométrique 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 cinq cartes modèles des isohyètes extrêmes.

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

0. INTRODUCTION GENERALE

0.1 Contexte, Problématique et Justification de l'étude

Au Burundi, les ingénieurs qui font des études d'exécution des ouvrages hydrauliques rencontrent chaque fois des problèmes de fiabilité des données hydrologiques de base pour la conception des ouvrages. Quelques cas plus catastrophiques ont déjà été enregistrés par le Gouvernement du Burundi qui a connu des pertes énormes des fonds par la suite des études non fiables causées par le manque d'information hydrologique suffisante pour la conception des ouvrages. C'est le cas de barrage de Mpanda, Kajeke et autres dont parmi les causes de leur endommagement figure le manque d'information hydrologique.

Pour garantir le bon dimensionnement des ouvrages hydrauliques basé sur les informations hydrologiques utiles et fiables, le présent mémoire met à la disposition les données hydrologique trouvées à base du traitement de celles disponible (P24) et sont représentées sous forme des isohyètes extrêmes dans 8 provinces modèles.

0.2. Objectifs

0.2.1. 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**.**

0.2.2. Objectifs Spécifiques

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

- ✓ Traiter les données en leur comparant et homogénéisation
- ✓ Produire les courbes de fréquences afin d'avoir les crues pour chaque période de retour
- ✓ Discuter les résultats obtenus
- ✓ Elaborer les cartes modèles des isohyètes pour quelques temps de retour à savoir p=0.1%, 0.2% 0.5%,1%,2%.

0.3 Méthodologie

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

- ✓ Une revue de la littérature sur les processus, les modèles hydrologiques et hydrauliques pour les bassins versants, les caractéristiques du bassin versant ainsi

que les caractéristiques des précipitations

- ✓ La collecte des données aux seins des différentes institutions (, IGEBU, BCG).
- ✓ La délimitation de la zone d'étude
- ✓ L'analyse et traitement des données météorologiques fournies par l'IGEBU en homogénéisant par extension car ces données s'étalonnent sur des périodes inégalement réparties
- ✓ Examiner le logiciel de cartographie (Arc GIS 10.3)
- ✓ L'analyse les méthodes d'interpolation

0.4. Résultat attendus

- Les données pluviométriques sont traitées, comparées et homogénéisées
- Les courbes de fréquence des crues pour chaque période de retour sont produites
- Les résultats obtenus sont discutées et disponible
- Les cartes modelés des isohyètes pour les temps de retour p=0.1%, 0.2% 0.5%,1%,2 sont élaborées.

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

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

I.1 Présentation de la zone d'étude

Notre zone d'étude s'étend du centre ouest vers le sud du pays et couvre les provinces de Muramvya, Mwaro, Bubanza ,Bujumbura , Bujumbura Mairie, Rumonge, Bururi et Makamba entre 4°27'00" et 2°54'00" de latitude Sud et 29°12'00" et 30°11'00" de longitude Est.

La zone d'étude est présentée sur la figure suivante:

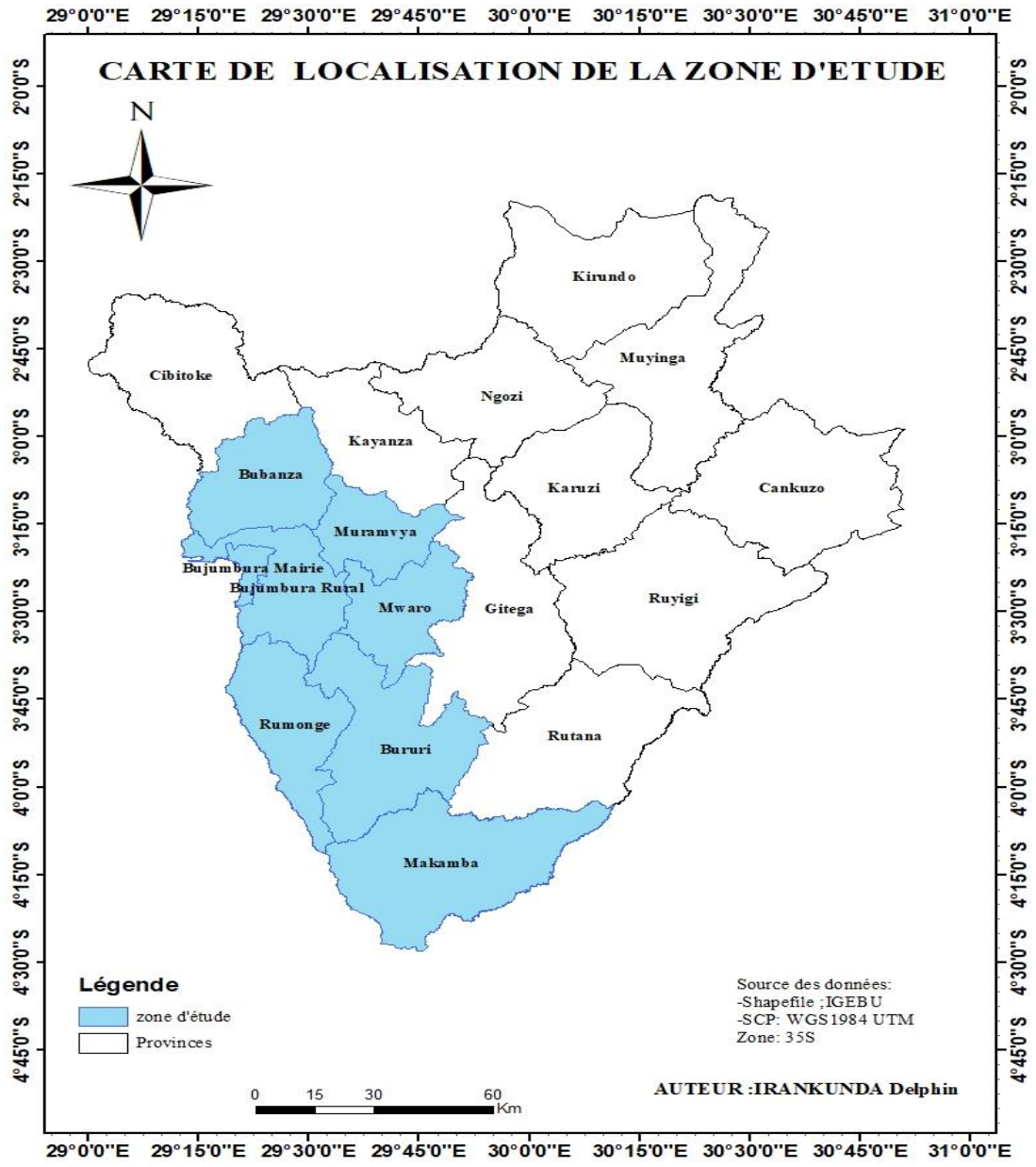


Figure I-1 : carte de localisation de la zone d'étude

I.2 Climat

Au point de vue climatique, la zone d'étude couvre toutes les cinq régions climatiques dont la plaine de l'Imbo, contrefort de Mumirwa, Crête Congo-Nil ; les plateaux centraux ; les dépressions de Kumoso et Bugesera.

Son climat est influencé par l'altitude qui varie entre 759 m et 2505 m. Il est caractérisé par une alternance de la saison pluvieuse qui s'étend généralement du mois d'Octobre à Mai et de la saison sèche qui va de Juin à Septembre. La température moyenne annuelle de l'air diminue au fur et à mesure que l'altitude augmente. La moyenne annuelle la plus élevée est de 24.1°c dans la plaine de l'Imbo (Ministère de l'Eau, 2010)

Tableau I-1:Répartition de la pluviométrie et de la température de la zone d'étude

Régions climatiques	**Altitude en m**	**Température moyenne annuelle (°c)**	**pluie moyenne annuelle (en mm)**
Plaine occidentale de l'imbo	800-1100	Sup à 23°c	800-1100
Escarpement occidental de Mumirwa	1000-1700	18°c-28°c	1100-1900
Crête Congo-Nil	1700-2500	14°c-15°c	1300-2000
Les plateaux centraux	1350-2000	17°c-20°c	1200-1500
Les dépressions de Kumoso et de Bugesera	1100-1400	20°c-23°c	1100-1550

Source :(MINATTE, 2005 cité par Ministère de l'eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'urbanisme)

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

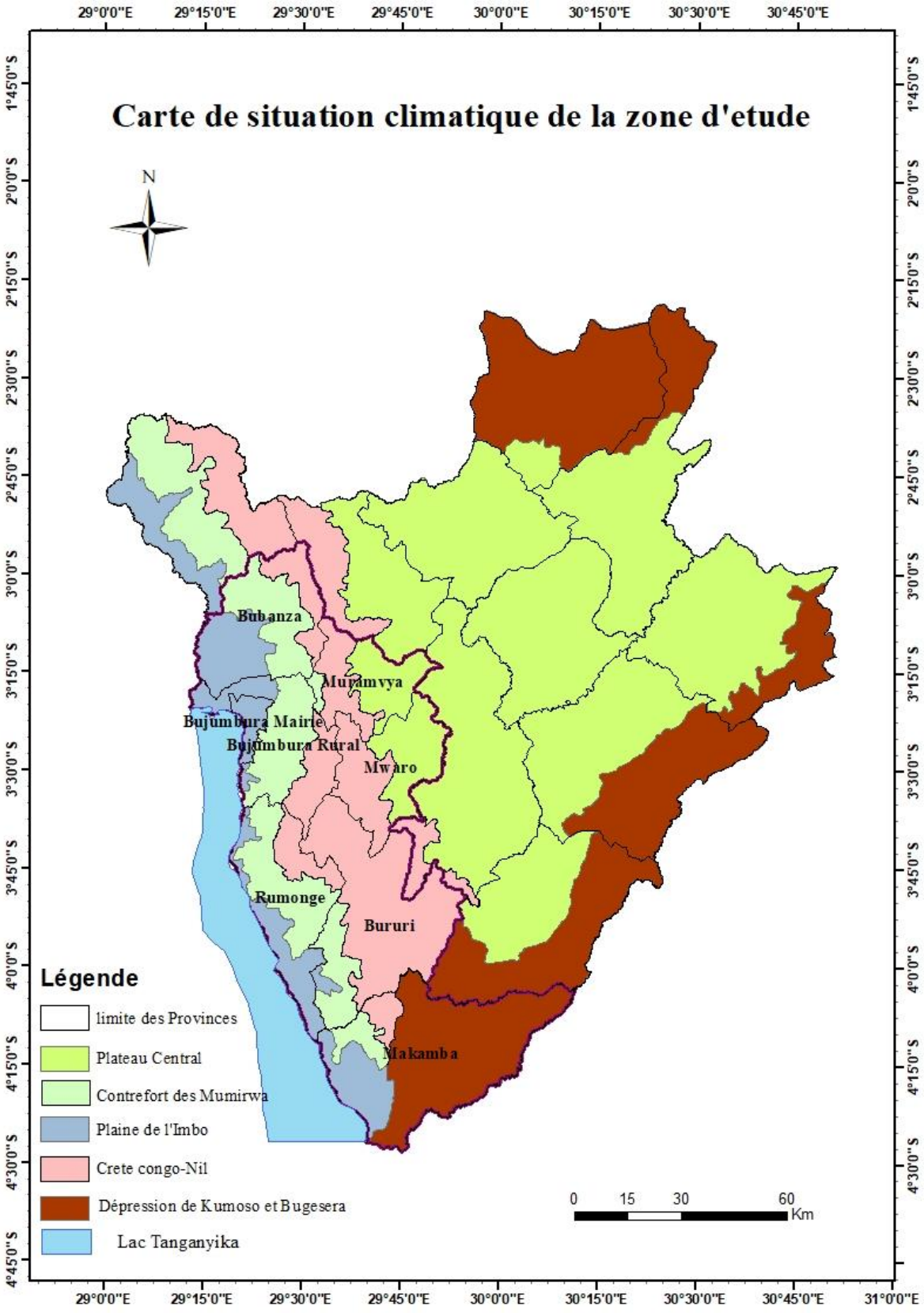


Figure I-2 : Situation climatique de la zone d'étude

I.3 REVUE DE LA LITTERATURE

I.3.1 Cycle de l'eau

I.3.1.1 Définition

Le cycle de l'eau, appelé aussi le cycle hydrologique est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau, accompagnés de changements d'état et qui s'effectuent dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol.

Sous l'effet du soleil, l'eau de surface (océans, mers, rivières, lacs, etc.) et celle contenue dans le sol, s'évaporent en abandonnant les sels qu'elle contient. Les océans restent, donc, salés et c'est de la vapeur d'eau douce qui s'élève dans les airs.

La vapeur d'eau refroidit sous l'effet des vents et de l'altitude, puis se condense et forme des gouttelettes qui forment des nuages. Quand les gouttelettes deviennent trop grandes et trop lourdes, elles retombent sous forme de pluie, de grêle ou de neige.

Une partie de cette eau s'accumule sous forme de neige sur les glaciers. Une autre tombe sur le sol et est absorbée par la végétation. Si le sol est imperméable, l'eau ruisselle, rejoint les lacs et rivières et retourne dans la mer. Si le sol est poreux, l'eau s'infiltre doucement jusqu'à ce qu'elle rencontre une roche perméable (qui devient alors une nappe phréatique si sous elle se trouve une autre roche imperméable). L'eau ainsi stockée ressort par des fissures du sol et forme une source. L'eau de source va alimenter les cours d'eau et les rivières et rejoindre la mer.

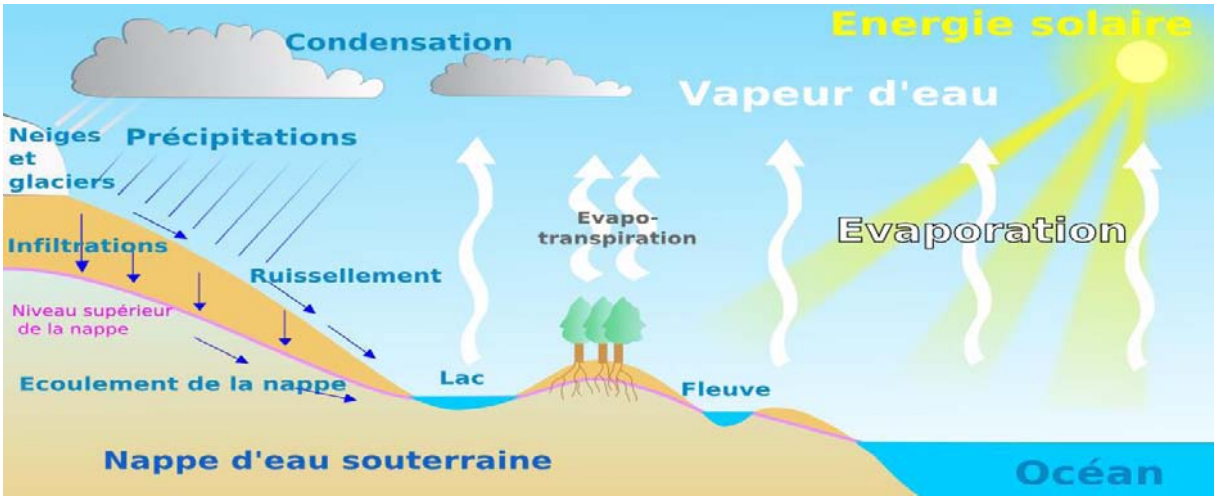


Figure I-3:Cycle hydrologique naturel (https://cms.alloprof.qc)

Le soleil est le moteur de l'ensemble du cycle de l'eau, qui fait circuler des quantités énormes d'eau et qui transforme l'eau salée en eau douce. C'est l'énergie solaire qui entraîne les

changements d'état de l'eau : l'évaporation de l'eau et son élévation dans l'atmosphère, son refroidissement et sa retombée sous forme de pluie, la formation et la fonte des glaces, etc.

I.3.1.2 Les processus hydrologiques de génération des écoulements

On distingue quatre principaux processus de génération des écoulements ((Musy, et al. 1998):

a. Les précipitations directes à la surface libre du cours d'eau

Parmi les processus de génération de crue, le premier qui peut être souligné est bien évidemment la contribution directe de la précipitation sur la surface des cours d'eau du bassin versant. Cependant, ce type de processus est considéré comme marginal du fait que la surface occupée par les cours d'eau de type pérenne ne représente qu'une très faible fraction de la surface totale du versant. L'importance des précipitations directes croît toutefois suite à des précipitations de longues durées ou avec le développement du réseau hydrologique qui présente alors d'importantes zones lacustres ou marécageuses. (Musy, et al. 1998)

b. Les écoulements de subsurface

La condition essentielle pour voir apparaître des écoulements de subsurface est que la conductivité hydraulique latérale du milieu doit être nettement supérieure à la conductivité verticale. Dans ce cas l'eau, s'écoule latéralement en zone non-saturée, par un mécanisme type « toit de chaume » ou dans le cas d'un écoulement en zone saturée, lorsqu'une nappe perchée se forme dans la partie supérieure d'un horizon peu perméable. (Musy, et al. 1998)

Des conditions particulièrement favorables existent là où une couche de sol, mince et perméable, couvre un substratum quasi imperméable. Il se peut aussi que plusieurs niveaux superposés d'écoulement de subsurface se forment. Ces niveaux correspondent à des changements de texture et/ou de structure dans le sol. L'écoulement de subsurface en régime non-saturé peut devenir l'écoulement de base dans des terrains de forte pente, et domine généralement dans les régions humides aux sols couverts de végétation et bien drainés ; une frange saturée réduite au pied du versant étant continuellement alimentée par les écoulements non-saturés.

c. Les écoulements de surface

On peut décomposer l'écoulement de surface par rapport aux modalités de l'écoulement (les causes) :

❖ Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration est un écoulement de surface. Il apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau. Cette capacité, caractérisée par l'infiltrabilité du sol, est supposée décroissante dans le temps jusqu'à une valeur constante. Dans un sol homogène avec une nappe profonde, cette constante finale est la conductivité hydraulique à saturation K_s.

Avec $K_s = \frac{k\rho\, g}{\mu}$

Où : K_s : la conductivité hydraulique à saturation (m/s) ;

K : la perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2) ;

ρ : la masse volumique du fluide (kg/m^3) ;

g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

$\boldsymbol{\mu}$: la Viscosité dynamique du fluide (Pa s = kg m^{-1} s^{-1}).

L'écoulement de surface se produit donc lorsque la capacité d'infiltration devient inférieure à l'intensité des précipitations. En cas d'averse, le processus d'écoulement se développe en deux phases :

- Au début de l'averse, la capacité d'infiltration est en général supérieure à l'intensité de la pluie et celle-ci s'infiltre intégralement. La teneur en eau et la charge hydraulique en surface croissent jusqu'à ce que la teneur en eau à saturation et la pression atmosphérique soient atteintes. On définit alors le seuil de submersion ou temps de submersion (t_s) comme la durée entre le début de la précipitation et le moment où la surface du sol est saturée. Le temps de submersion marque ainsi le début de l'écoulement. Pour un sol donné, le temps de submersion est d'autant plus court que l'intensité de la pluie est grande et que l'humidité initiale du sol est importante.
- Par la suite, l'intensité de la pluie devient plus importante que la capacité d'infiltration. L'écoulement de surface est alors constitué par la différence entre ces deux termes

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration est considéré comme pertinent pour expliquer la réponse hydrologique des bassins en climats semi-arides ainsi que lors de conditions de fortes intensités pluviométriques. Il est généralement admis que même des sols naturels présentant une conductivité hydraulique élevée en climats tempérés et humides peuvent avoir une capacité d'infiltration inférieure aux intensités maximales des précipitations enregistrées.

- Ecoulement sur surfaces saturées

L'écoulement sur surfaces saturées se produit lorsque la capacité du sol à stocker l'eau est épuisée et lorsque la capacité à transmettre latéralement le flux d'eau est dépassée. Par conséquent, l'eau ne pourra plus s'infiltrer et va s'écouler en surface.

Le développement de conditions saturées à la surface du sol peut résulter de l'écoulement latéral d'une nappe profonde ou perchée. La remontée de la nappe à partir d'un horizon peu perméable ou à partir d'une nappe préexistante peut aussi être à l'origine de ce développement. Dans ces trois cas, il s'agit donc d'une saturation « par dessous ». La convergence des lignes de courant (concavité des lignes d'écoulement vers l'aval), les pentes faibles et les sols minces favorisent la saturation « par dessous ».Cette forme de saturation est à opposer à la saturation « par-dessus », qui est quant à elle favorisée par les conditions évoquées dans le paragraphe précédent ainsi que par la présence d'un horizon peu perméable à faible profondeur et de fortes précipitations. (Musy et al. 1998)

d. Ecoulement souterrain

L'eau souterraine joue un rôle aussi important dans la génération des écoulements et notamment dans la composante "débit de base" de l'hydrogramme. En termes de processus, l'eau qui rejoint la nappe peut être considérée comme de l'eau souterraine. Une partie de cette eau, après percolation, va transiter à travers l'aquifère avec une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau souvent par le biais d'un phénomène de résurgence de la nappe. L'écoulement de base assure ainsi le débit des rivières en l'absence de précipitations et soutient les débits d'étiage. (Musy et al. 1998)

Si l'on s'attache à la **zone de résurgence** ou zone de contact de la nappe, on doit noter que celle-ci n'existe pas nécessairement. Il peut donc s'avérer, dans certaines situations, que la nappe souterraine n'apporte aucune contribution à l'écoulement de la rivière. Cette situation peut

notamment se produire dans des climats semi-arides à arides présentant un faible module pluviométrique : le toit de la nappe étant plus bas que le fond de la rivière, la nappe va drainer le cours d'eau. Au contraire, si le niveau de la nappe est suffisamment élevé, on assiste à la situation inverse

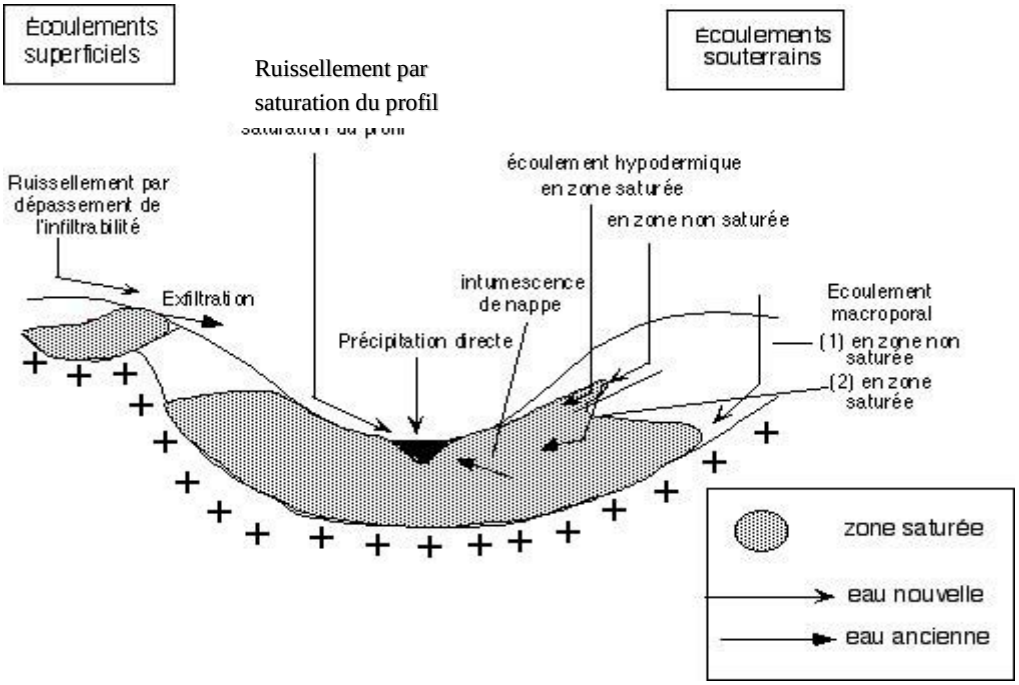


Figure I-4 : Processus de génération des écoulements (Ambroise, 1999)

I.3.2 Bassin versant

Le bassin versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval. (Laborde, 2009)

Selon la nature des terrains, nous serons amenés à considérer deux définitions:

a. Bassin versant topographique

Si le sous-sol est imperméable, le cheminement de l'eau ne sera déterminé que par la topographie. Le bassin versant sera alors limité par des lignes de crêtes et des lignes de plus grande pente

b. Bassin versant hydrogéologique

Dans le cas d'une région au sous-sol perméable, il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infiltre puis sorte souterrainement du bassin (ou qu'à

l'inverse des eaux entrent souterrainement dans le bassin). Dans ce cas, nous serons amenés à ajouter aux considérations topographiques des considérations d'ordre géologique

Pour déterminer les limites du bassin versant. Cette distinction entre bassin topographique et hydrogéologique se justifie surtout pour les petits bassins.

En effet, lorsque la taille du bassin augmente, les apports et les pertes souterraines ont plus de chance de se compenser. De plus, on peut admettre que le débit des cours d'eau est proportionnel à la surface du bassin, les échanges souterrains se font, eux, aux frontières et varient donc sensiblement comme le périmètre. Lorsque la taille du bassin augmente, la surface croît plus vite que le périmètre et la valeur relative des échanges souterrains par rapport au débit de surface tend à devenir négligeable.

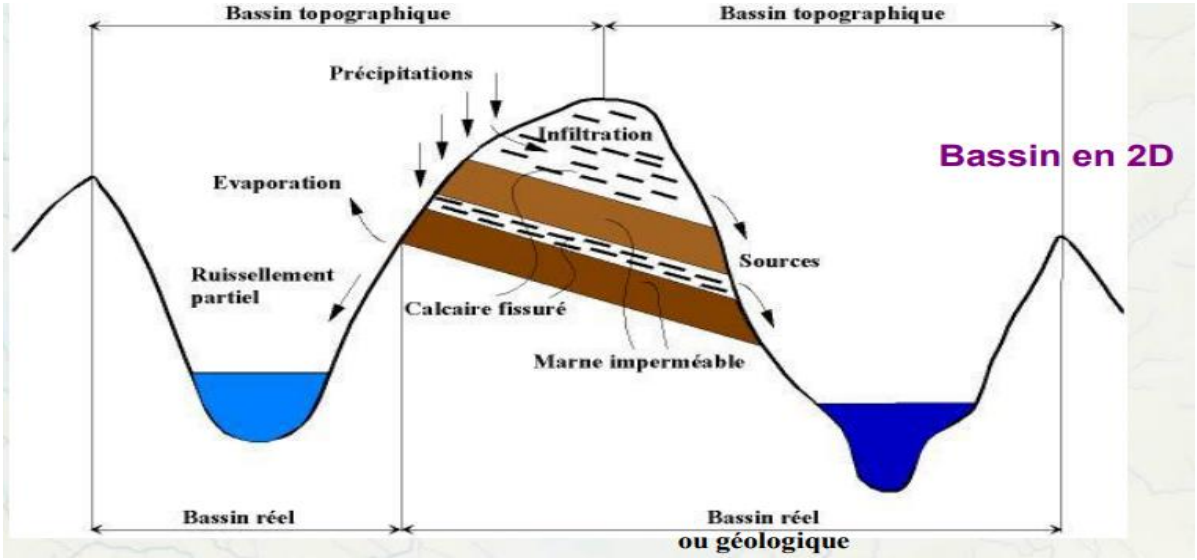


Figure I-5 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique (Roche, 1963).

I.3.2.1 Caractéristiques morphométriques

L'utilisation de caractéristiques morphométriques a pour but de condenser en un certain nombre de paramètres chiffrés, la fonction h = f (x, y) à l'intérieur du bassin versant (h altitude, x et y coordonnées d'un point du bassin versant). Nous utiliserons trois types différents de paramètres morphométriques.

Les caractéristiques de disposition dans le plan d'un bassin versant sont :

- **Surface (A)** : Elle est la première et la plus importante des caractéristiques. Elle s'obtient par planimétrage sur une carte topographique. Elle est souvent exprimée en km2.

- Périmètre (P) : C'est une des caractéristiques des longueurs la plus utilisée.

Elle correspond au contour du bassin. Le périmètre n'est généralement pas utilisé directement mais le plus souvent à travers des valeurs qui en dérivent comme la longueur « L » et la largeur « l » **du rectangle équivalent** (Laborde, 2009).

Ces deux dernières caractéristiques sont déterminées par les formules suivantes :

$$P = 2.(L + l) \quad et \quad A = L.l \qquad \text{I-1}$$

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.

A la suite de ces remarques critiques sur l'utilisation du périmètre comme critère de longueur, il a fallu définir d'autres caractéristiques et en particulier :

- ✓ Longueur du plus long thalweg (lt) : c'est la longueur totale de la ligne de plus grande pente d'une vallée, suivant laquelle se dirigent les eaux. Elle va de l'exutoire vers l'amont jusqu'à la limite du bassin.

- ✓ Coefficient de Gravelius (K_G) : Aussi appelé coefficient de compacité, c'est la caractéristique de forme la plus utilisée. Il correspond au rapport du périmètre (P) du bassin à celui d'un cercle (Pc) de même surface ((Wisler & Brater, 1959; Roche, 1963; Ward, 1975; OMM, 1996)

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \cong 0.28\frac{P}{A} \qquad \text{I-2}$$

Avec : K_G : Coefficient de compacité de Gravelius ;

A : Surface du bassin versant ;

P : Périmètre du bassin versant.

- Rectangle équivalent

Le bassin versant peut être assimilé à une surface rectangulaire de même superficie. Ses dimensions équivalentes sont déterminées en résolvant le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} K_G = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \\ P = 2(L + l) \\ A = L * l \end{cases} \qquad \text{I-3}$$

Alors les dimensions du rectangle équivalent deviennent

$$L=\frac{K_G*\sqrt{A}}{1.12}\left[1+\sqrt{1-(\frac{1.12}{K_G})^2}\right] \quad \text{I-4}$$

$$l=\frac{K_G*\sqrt{A}}{1.12}\left[1-\sqrt{1-(\frac{1.12}{K_G})^2}\right] \quad \text{I-5}$$

Où: K_G: coefficient de compacité ;

A: surface du bassin versant ;

P:perimetre du rectangle équivalent ;

L:longeur du rectangle équivalent ;

l:largeur du rectangle équivalent.

I.3.2.2 Les indices de pente

L'objet de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. On distingue trois indices suivants :

A. La pente moyenne

L'idée première qui vient à l'esprit est de caractériser les pentes par leur valeur moyenne I pondérée par les surfaces. Soit D l'équidistance des courbes de niveau, soit dj la largeur moyenne de la bande j comprise entre les lignes de niveau j et j+1 et soit l_i la longueur moyenne de cette bande.

La pente moyenne n_j sur cette bande est :

$$n_j=\frac{D}{d_j} \quad \text{I-6}$$

La surface de la bande j est :

$$a_j = d_j.l_j \quad \text{I-7}$$

La pente moyenne I pondérée par les surfaces est donc

$$I=\frac{\sum n_j a_j}{\sum a_j} = \frac{\sum \frac{D d_j l_j}{d_j}}{\sum d_j l_j} = \frac{D \sum l_j}{A} \quad \text{I-8}$$

Avec : I : La pente moyenne Pondérée par les surfaces

D : l'équidistance des courbes de niveau

dj : la largeur moyenne de la bande

n_j :la pente moyenne

a_j : la surface de la bande

B. Indice de pente de Roche Ip

M. ROCHE a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le précédent : Ip est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces.

La pente moyenne i sur la bande j est :

$$i_j=\frac{D}{X_j} \qquad \textbf{I-9}$$

La surface de cette bande est **:**

$$a_j=l_j\, x_j \qquad \textbf{I-10}$$

D'où l'expression :

$$I_p=\frac{\sum_{i=1}^{n} a_j\sqrt{i_j}}{\sum_{i=1}^{n} a_j} \qquad \textbf{I-11}$$

$$\Longleftrightarrow I_p=\frac{\sum_{i}^{n} lxj\sqrt{\frac{D}{xj}}}{A}$$

$$\Longleftrightarrow I_P=\frac{l\sum_{i=1}^{n}\sqrt{D}\sqrt{Xj}}{Ll}$$

$$\Longleftrightarrow I_P=\frac{\sqrt{D}}{L}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{xj} \qquad \textbf{I-12}$$

Avec: I_P: indice de pente de roche

D: équidistance des courbes de niveau

X_j : La distance qui sépare les deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent

L: la longueur du rectangle équivalent.

C. Indice de pente globale Ig

L'indice de Roche étant cependant trop long à évaluer pour des études rapides, on a proposé un indice encore plus simple :

La pente globale... $$Ig = \frac{D}{L}$$ **I-13**

Ou : Ig : Indice de pente globale

D étant la dénivelée h5 % - h95 %, définie sur la courbe hypsométrique ou même directement à l'œil sur la carte topographique ; L étant la longueur du rectangle équivalent.

I.3.2.3 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant.(J.P. LABORDE).

Le réseau hydrographique peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement (nombres et longueurs des cours d'eau) et son profil en long.

A. Hiérarchisation du réseau

Pour chiffrer la ramification du réseau, chaque cours d'eau reçoit un numéro fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs. Parmi toutes ces classifications, nous adopterons celle de Strahler :

- tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1,
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre n, le cours d'eau résultant est d'ordre n + 1,
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par :

$$\begin{cases} n + n = n + 1 \\ n + m = \max(n, m) \end{cases}$$

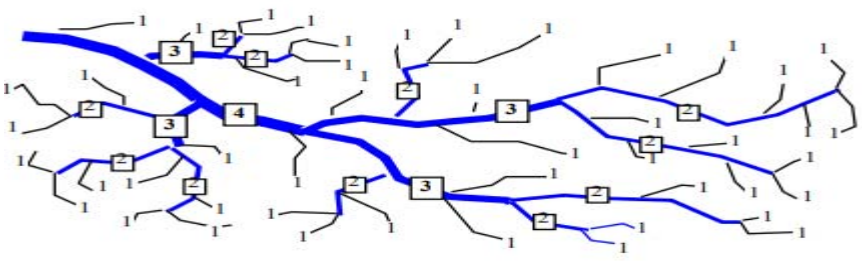


Figure I-6 : Illustration de hiérarchisation du réseau fluvial

B. La densité de drainage Dd

Elle se définit par le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin versant :

$$\mathbf{Dd= \frac{\sum l_i}{A}(km^{-1})} \qquad \textbf{I-14}$$

C. Profil en long

Le profil en long d'un réseau hydrographique est une représentation graphique qui porte en abscisses les longueurs développées à partir d'un point donné de référence et en ordonnées les altitudes de l'eau dans le cours d'eau principal et dans ses affluents (soit par nivellement sur le terrain ou à partir des cartes topographiques).

Les profils en long permettent d'estimer la pente moyenne du cours d'eau. Cette pente moyenne sert surtout dans l'évaluation des temps de concentration d'un bassin versant, ce temps de concentration étant lié à la vitesse de propagation des particules fines.

D. 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.

$$\mathbf{Pmoy = \frac{\Delta H_{max}}{L}} \qquad \textbf{I-15}$$

Où : Pmoy : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;

ΔHmax : dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;

L : longueur du cours d'eau principal [km].

I.3.3 Les Précipitations

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

C'est 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.

Les précipitations peuvent être classées en trois principaux types :

- Les précipitations convectives,
- les précipitations orographiques,
- et 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.

I.3.3.1 Les principales caractéristiques des précipitations

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

- ✓ La quantité de la 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 en km2
- ✓ la fréquence de la pluie : exprimée en Km

I.3.3.2 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.

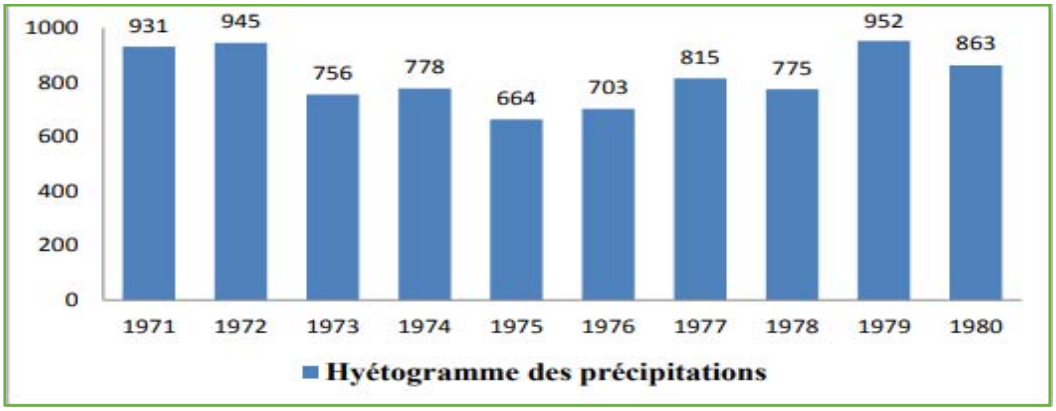


Figure I-7 : Illustration d'un hyétogramme des précipitations

- une courbe de la quantité cumulée par rapport au temps

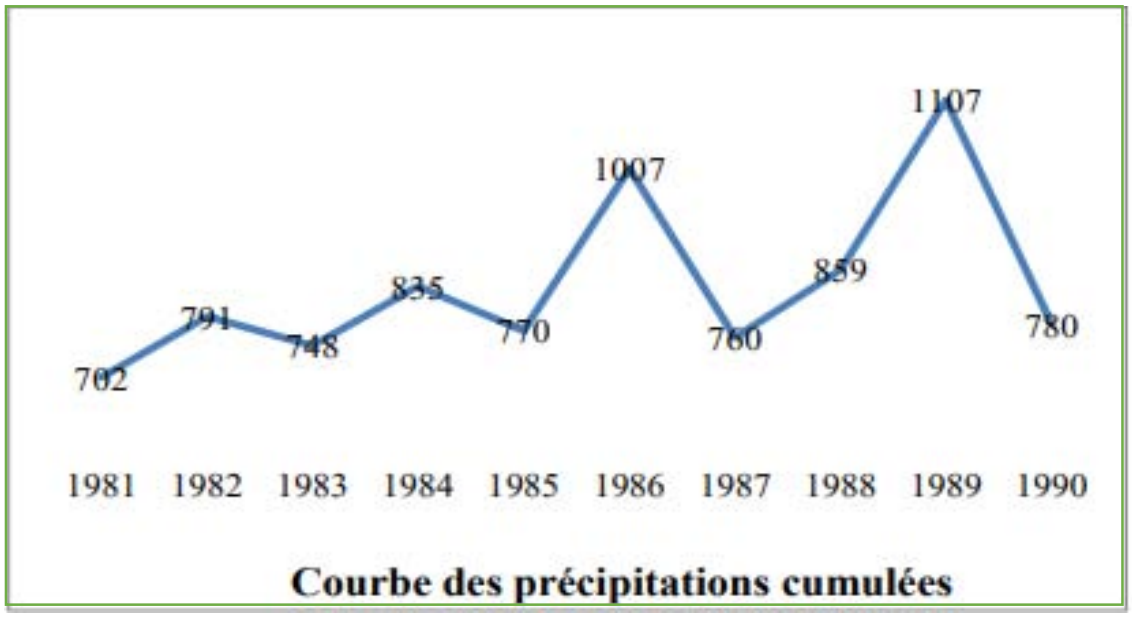


Figure I-8:Illustration de la courbe des précipitations

I.3.3.3 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 général, et 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.

I.3.3.4 Détermination de 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.

A. La moyenne arithmétique

La méthode consister à calcul la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations pluviométrique et s'applique uniquement si les stations sont bien reparties et si le relief du bassin est homogène.

$$P_m = \Sigma P_i / n \qquad \text{I-16}$$

Avec : P_m : précipitation moyenne du bassin ;

n : nombre des stations ;

P_i : précipitation au poste i.

B. La méthode des polygones de Thiessen

C'est une méthode purement géométrique. Elle suppose que la pluie en tout point est celle enregistrée au poste pluviométrique le plus proche. Les stations étant Géoréférencées, la lame d'eau précipitée interannuelle annuelle est calculée pour chaque station pluviométrique sur n années d'observations communes.

Il faudrait délimiter la zone d'influence de chaque poste pluviométrique et calculer la surface correspondante. La précipitation moyenne est calculée par l'expression :

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i P_i}{S} \qquad \textbf{I-17}$$

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

P_i : Précipitation au poste i en mm ;

S : Surface du bassin versant en Km².

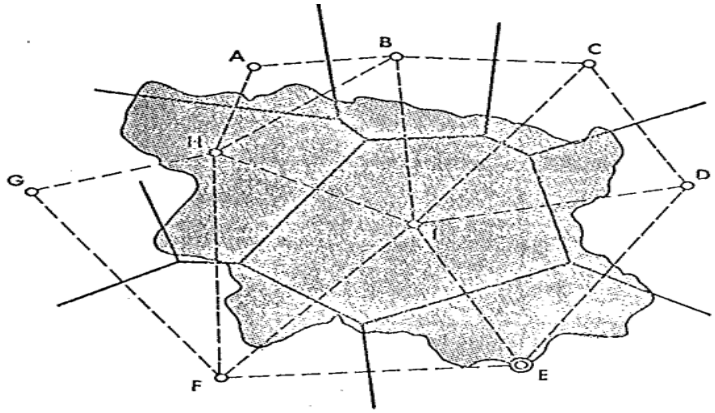


Figure I-9 : Illustration du polygone de Thiessen

C. Méthode des Isohyètes

Une isohyète est également connue sous le nom de **ligne isohyètes**, et c'est une ligne sur une carte qui relie les points qui ont les mêmes quantités de précipitations au cours d'une période déterminée.

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…..).

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.

La précipitation P_m est calculée par l'expression :

$$\boldsymbol{P_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \overline{P}_i}{S}} \qquad \textbf{\textit{I-18}}$$

$$\boldsymbol{\overline{P} = \frac{P_i + P_{i+1}}{2}} \qquad \textit{I-19}$$

Avec :

S_i : Surface d'influence du pluviomètre i en Km² ;

P_i : Précipitation au poste i en mm ;

$\overline{P}$: Précipitation moyenne comprise entre 2 isohyètes en mm ;

S: Surface du bassin versant en Km².

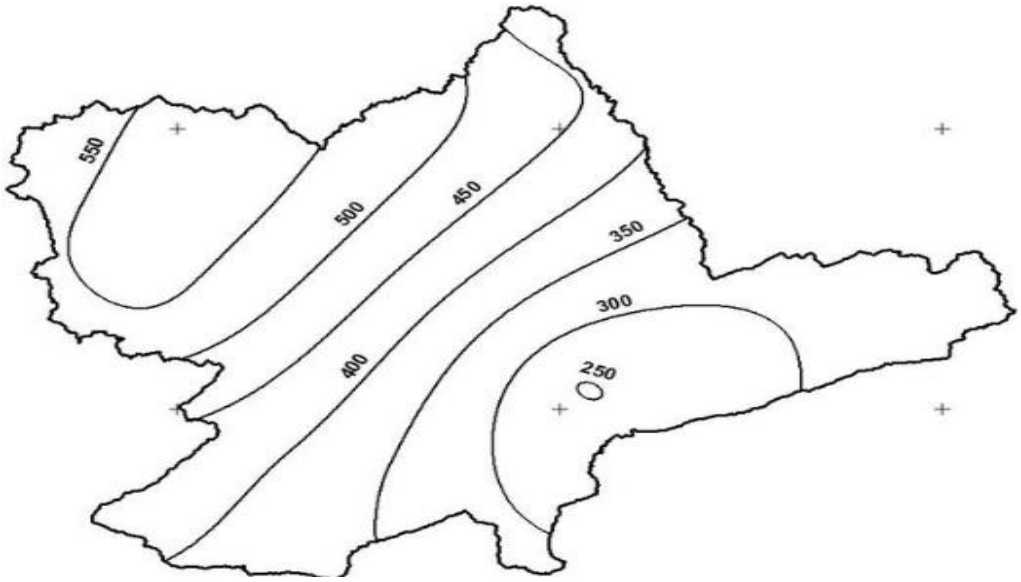


Figure I-10 : Illustration des isohyètes

Les méthodes de isohyète ainsi que celle du polygone de thiessen sont des méthodes de calculs de la moyenne pondérée et donnent des bons résultats par rapport à la méthode arithmétiques lorsque les stations ne sont pas régulièrement réparties sur tout le bassin mais la méthode à retenir quand le réseau pluviométrique est dense est celle des isohyètes.

I.3.3.5 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. 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.

a. Variabilité spatiale des précipitations

La spatialisation des irrégularités des précipitations peut être approchée par le coefficient de variation(Cv) des séries de mesures disponibles. Ce coefficient permet une comparaison entre les stations. La variabilité interannuelle des pluies augmente lorsque l'on se rapproche des régions arides. L'augmentation de la variabilité suit l'accroissement de la longitude et la diminution de la latitudinale. L'altitude atténue cet accroissement **(M. Meddi, H. Meddi, 2009).**

b. Variabilité temporelle des précipitations

Les précipitations n'ont cessé de fluctuer à toutes les échelles de temps. L'étude de variabilité des précipitations est importante pour toute étude hydrologique. Egalement, elle est d'un apport considérable dans l'étude des changements climatiques.

Le climat et plus exactement les précipitations ont connus des variations importantes ; un réchauffement et une baisse des précipitations sont observés depuis la moitié des années 1970 à l'échelle globale et à l'échelle régionale. (**Taibi.2011).**

I.3.4 Homogénéisation des séries de précipitations

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.

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. Le résultat est l'obtention de séries pluviométriques homogènes dans le temps et dont les résultats sont comparables dans une étude régionale et sont affectés de la plus faible incertitude possible.

I.3.4.1 Les méthodes d'homogénéisation

Plusieurs approches sont utilisées pour l'homogénéisation des données climatiques. Certains auteurs utilisent des méthodes directes basées sur les métadonnées des comparaisons d'instruments côte à côte ou des études statistiques de changements d'instruments (Peterson et al. 1998). Ces approches ne consistent pas à détecter un changement avec une méthode statistique, elles permettent plutôt de corriger directement la série de données. Elles sont avantageuses et devraient être utilisées lorsque les informations sur le changement sont précises.

Toutefois, elles sont inapplicables lorsque les informations sont vagues, incomplètes ou inexistantes. Puisque c'est souvent le cas, des méthodes d'homogénéisation dites 'indirectes', qui utilisent des séries voisines pour détecter des discontinuités, ont été développées.

a. Homogénéisation pour l'extension des données

La méthode pratique utilisée pour étendre ou compléter une série de données d'une station A donnée repose sur la régression linéaire entres 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 laquelle au préalable, 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.

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

$$X_A = \alpha X_B + \beta \qquad \text{I-20}$$

$$\text{Avec} \quad \alpha = \frac{\sum X_{Ai} X_{Bi} - \bar{X}_B \sum X_{Ai}}{\sum X^2_{Bi} - \bar{X}_B \sum X_{Bi}} \qquad \text{I-21}$$

$$\beta = \bar{X}_A - \alpha \bar{X}_B \qquad \text{I-22}$$

Où: $\bar{X}_A$ et $\bar{X}_B$: les moyennes des X_{Ai} et des X_{Bi} ;

α : coefficient de pente de la droite de régression.

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

$$\mathbf{r= \alpha\frac{\sigma_B}{\sigma_A} \quad ou\ r^2= \alpha^2\frac{\sum(X_{Bi}-\bar{X}_B)^2}{\sum(X_{Ai}-\bar{X}_B)^2}} \qquad \textbf{I-23}$$

Avec : r : le coefficient de corrélation entre A et B

σ_A : écart-type des valeurs composant l'échantillon d'une station A ;

σ_B : écart-type des valeurs composant l'échantillon d'une station B.

Plus **r** est proche de 1, meilleure est la corrélation entre les stations A et B, pour r<0.75 cette corrélation est considérée comme sujette à caution.

I.3.5 Analyse fréquentielle

Un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes est l'analyse fréquentielle. Cette méthode statistique a comme objectif principal d'utiliser des mesures d'événements passés pour estimer les probabilités futures d'occurrence. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel X_T auquel est associé un période de retour T.

$$\mathbf{X}_T = \bar{x} + k_T\sigma \qquad \textbf{I-24}$$

Avec: K_T un facteur de fréquence qui dépend de la période de retour et de la loi de distribution utilisée,

$\bar{x}$ et σ respectivement la moyenne et l'écart-type de la série enregistrée.

La fonction de répartition F(x) est la probabilité pour que cette variable X soit inferieur ou égale à x, x étant une valeur que peut prendre X

F(x) =prob(x≤x)

Cette fonction F(x) appelée encore fonction de non dépassement tend asymptotiquement vers 1(pour X $\longrightarrow \infty$) .la fonction F(x) est liée à la fonction de dépassement P(x) par la relation

$$\mathbf{P(x)=1-F(x)} \qquad \textbf{I-25}$$

L'équation générale donnant la probabilité de non dépassement d'une variable X se trouvant au rang m dans une série de n variables aléatoires rangées par ordre croissant est de la forme :

$$F(x)= \frac{x-\alpha}{n+1-2\alpha} \quad \text{I-26}$$

- F(x) : probabilité de dépassement de la x^{ème} valeur ;
- x : rang qu'occupe la valeur ;
- n : nombre total d'observations
- α : Paramètre qui varie selon l'auteur

Tableau I-2 : Valeurs du paramètre «α » selon les différents auteurs.

Auteur	α	Formule finale
Hazen	**0.5**	$p_x=\frac{m-0.5}{n}$
Weibul	**0**	$p_x=\frac{m}{n+1}$
Chegodayev	**0.3**	$p_x=\frac{m-0.3}{n+0.4}$
Blom	**0.375**	$p_x=\frac{m-3/8}{n+1/4}$
Tukey	**0.333**	$p_x=\frac{m-1/3}{n+1/3}$
Gringorten	**0.44**	$p_x=\frac{m-0.44}{n+0.12}$
Cunnane	**0.4**	$p_x=\frac{m-0.4}{n+0.2}$

La période de retour expérimentale est l'inverse de la probabilité de dépassement :

$$Texp = \frac{1}{p(x)} \text{ ou } \frac{1}{1-F(X)} \quad \text{I-27}$$

I.3.6 Lois statistiques

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

Beaucoup d'auteurs utilisent le test d'adéquation comme technique permettant de choisir le modèle fréquentiel approprie. 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 de plusieurs auteur, 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 log Pearson III est recommandée aux états unis.

En effet, les lois statistiques qui font intervenir peu de paramètres et qui sont communément employées sont les suivantes :

- Loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle.
- Loi Log-normale ou Loi de Galton
- Loi Normale ou de Gauss
- La loi de Pearson III

I.3.6.1 Loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle

Un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes est la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle ou loi de Gumbel). La fonction de répartition de la loi de Gumbel F(x) s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right) \qquad \text{I-28}$$

Avec la variable réduite suivante **:**

$$\mu = \frac{x-a}{b} \qquad \text{I-29}$$

Où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel. La distribution s'écrit alors de la manière suivante :

$$F(x) = \exp(-\exp(-u)) \qquad \text{et } u = -\ln(-\ln(F(x)))$$

L'avantage d'utiliser la variable réduite est que l'expression d'un quantile est alors linéaire

$$X_T = a + u_T . b \qquad \text{I-30}$$

Avec : $u_T = -\ln(-\ln(1-1/T))$

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

En conséquence, des lors que les points de la série à ajuster peuvent être reportés dans un système d'axes X-u il est possible d'ajuster une droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les paramètres a et b de la loi. Il existe différentes méthodes d'ajustement comme la méthode graphique (méthode de la droite de régression), méthodes des moments

En effet, par la méthode des moments, les paramètres « a » et « b » sont déterminés en résolvant le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} u = a + b\gamma \\ \sigma^2 = \frac{\pi^2}{6} * b^2 \end{cases}$$ Avec γ =0. 5772(constante d'Euler).

$$\Leftrightarrow \begin{cases} b = \frac{\sqrt{6}*\sigma}{\pi} \\ a = u - \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma * \gamma \end{cases}$$ **I-31**

En reportant les valeurs de « a » et « b » dans l'équation I-321 on aura :

$$\Leftrightarrow X_T = u - \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma * \gamma - \frac{\sqrt{6}*\sigma}{\pi} * \ln\left(-\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)$$

$$\Leftrightarrow X_T = u - \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma(\gamma + \ln\left(-\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)$$

$$\Leftrightarrow X_T = u - \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma(0.5772 + \ln\left(-\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)$$

Si on pose : $K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} * (0.5772 + \ln\left(-\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)$ **I-33**

On aura : $X_T = u + K_T * \sigma$

Avec : X_T : Le quartile correspondant à la période de retour T ;

σ : écart-type des valeurs composant l'échantillon ;

μ : moyenne de l'échantillon ;

K_T: Le facteur de fréquence de la loi de Gumbel.

I.3.6.2 Loi Normale ou de Gauss

La loi normale ou la loi de GAUSS admet pour fonction de répartition :

$$\mathbf{F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u} e^{-1/2z^2}.dz}$$ **I-34**

Avec z= $\frac{x-u}{\sigma}$ variable réduite.

Où $\begin{cases} \text{u: est la moyenne} \\ \sigma : \text{ est l'ecart types} \end{cases}$

Si on connaît la probabilité de non dépassement, la variable réduite z_i correspondante est déterminée en Excel par la fonction « LOI.NORMALE. STANDARD.INVERSE. N » en y entrant la probabilité correspondant à z_i.

Pour la loi normale, le facteur de fréquence (k) est égal à la valeur de la variable réduite (z). On a donc *:*

$$x_T = \mu + z_T . \sigma \qquad \textbf{I-35}$$

I.3.6.3 La loi de Pearson III

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

$$F(x) = \frac{1}{\lambda \Gamma \beta}\left(\frac{x-\Upsilon}{\lambda}\right)\beta - 1). e^{-\frac{(x-\Upsilon)}{\lambda}} \qquad \textbf{I-36}$$

Avec $\lambda, \beta \; et \; \gamma$ des paramètres estimés par les relations suivantes :

$$\beta = (2/c_s)^2$$

$$\lambda = \frac{s}{\sqrt{\beta}}$$

$$\Upsilon = \bar{x} + s\sqrt{\beta}$$

Où « Cs » est le coefficient d'asymétrie de la distribution et « s » son écart type. Le quartile correspondant à la période de retour T est calculé par l'équation de fréquence généralisée suivante :

$$X_T = \bar{x} + k_T . s \qquad \textbf{I-37}$$

Le facteur de fréquence k_T de la loi Pearson III est calculé par l'expression suivante :

$$K_T = \frac{2}{C_S}\left\{\left[\frac{C_S}{6}\left(Z - \frac{C_S}{6}\right) + 1\right]^3 - 1\right\} \qquad \textbf{I-38}$$

Avec z la variable réduite de la loi normale correspondante au quartile X_T

Expressions de calcul des différentes caractéristiques de la distribution

-la moyenne :

$$\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad \textbf{I-39}$$

-La variance :

$$\text{Var }((x)=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \quad \textbf{I-40}$$

-L'écart type:

$$\sigma=\sqrt{var}(x) \quad \textbf{I-41}$$

- Coefficient de variation :

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \textbf{I-42}$$

Si on pose $Ki=\frac{x_i}{\bar{x}}$ **I-43**

On aura $Ki\text{-}1 = \frac{x_i-\bar{x}}{\bar{x}}$ **I-44**

Alors on aura $Cv=\sqrt{\frac{\sum(ki-1)^2}{n-1}}$ **I-45**

-Coefficient d'asymétrie :

$$c_s = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x-\bar{x})^3}{(n-3)({c_v}^3*\bar{x}^3)} \quad \textbf{I-46}$$

Dans ces expressions, n désigne nombre total d'années d'observation.

I.3.7 .Contribution d'un SIG à la gestion des ressources en eaux

Un système d'information géographique (SIG) 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'Information 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 géoréférencement. 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.3.7.1 Présentation du logiciel Arcgis 10.3

Pour le présent travail on a utilisé comme support le logiciel ArcGIS 10.3. Il est l'un des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) 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.

Les différentes couches d'informations sont descriptives d'un espace géographique terrestre déterminé. Elles peuvent correspondre à des documents cartographiques représentant des objets thématiques géographiquement identifiés (carte de type IGN, photographies aériennes, images satellitaires, etc.) ou issus des analyses et des procédures de spatialisation (carte de la teneur en eau du sol, carte topographique, carte de la hauteur des arbres dans un peuplement forestier, etc.).

Le logiciel Arcgis 10.3 comprend plusieurs applications dont les principales sont:

- ✓ ArcCatalog
- ✓ ArcMap
- ✓ ArcGlobe
- ✓ ArcScene

I.3.8 Modélisation spatio-temporelle des précipitations

I.3.8.1 Les méthodes d'interpolation spatiale 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 inconnus. Des méthodes d'interpolation 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 dispose plusieurs méthodes d'interpolation mais les plus utilisées sont :

- ✓ La méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW)
- ✓ La méthode du voisin naturel

- ✓ Le krigeage
- ✓ Les méthodes de base radiales (spline)

A. 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 situes dans le voisinage pondérées par l'inverse de la distance au point calculé, plus les points sont proches plus la pondération affectée est forte.

B. 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.

C. 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.

D. La méthode d'interpolation 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.

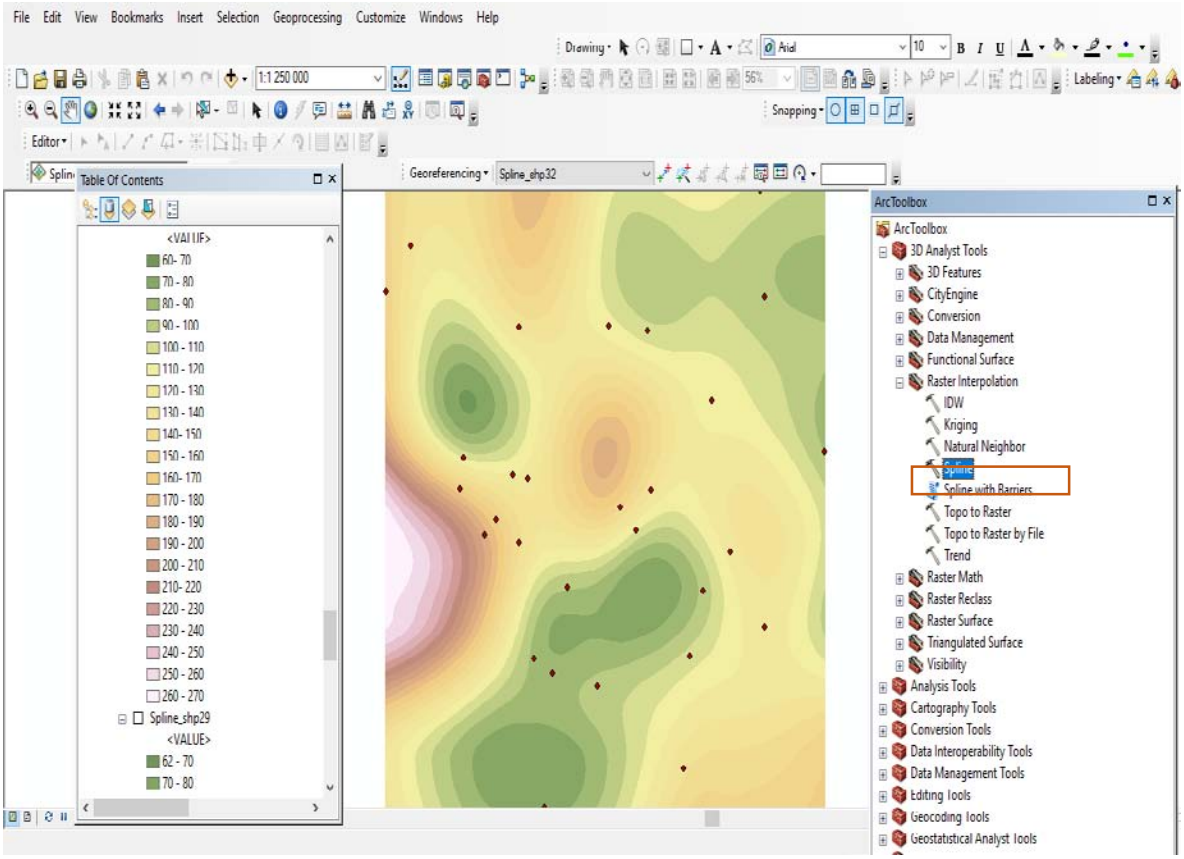


Figure I-11 : Méthode d'interpolation spline

I.4 Conclusion

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 traitement des données,
  - homogénéisation pour extension des séries des précipitations (P_{24})
  - La loi de Pearson III pour analyse fréquentiel des précipitations extrêmes
- Pour la modélisation spatio- temporel des précipitions extrêmes,
  - Un outil informatique Arc Gis 10.34

CHAPITREII: TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

II.1 Méthodologie de travail

La méthodologie de travail à respecter le protocole suivant :

- Recueillir les données brutes des précipitations (P_{24}) auprès de l'IGEBU, ces derniers couvre une période de 32 ans entre 1990-2021.
- Trier et étendre ou compléter la série des précipitations en utilisant la méthode d'homogénéisation
- Faire Analyse statistique détaille :
    - calculer la moyenne P_m
    - Calculer la fréquence empirique pour chaque rang
    - Coefficient de divergence (C_V).
    - Coefficient d'asymétrie (C_S).
    - Calculer le rapport C_S / C_V et calculer coefficient des crues (k_p).
- Calcul de la courbe de fréquence des précipitations
    - utiliser le tableau de Pearson III pour trouver le k_p correspondant aux probabilités indiquées.
    - tracer la courbe de fréquence correspondante à la valeur de C_S trouvée.

II.2 Présentation des résultats

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

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'observation, on a procédé à une homogénéisation des données pluviométriques. Ce qui consiste à étendre une série courte discontinue par rapport à la série la plus longue moins discontinue.

Le tableau suivant montre les résultats des données pluviométriques à l'état brut relevées sur chaque station.

Tableau II-1 : Précipitions maximale journalière annuelle à l'état brut

STATION	BUJA AERO	IMBO SEMS	MAKAMBA	GISOZI	MPOTA TORA	VYANDA-RWEZA	NYANZA LAC	BUGARAMA
ANNEE	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24
1990	77,8	84,30	59,9	72,5	65,7	59	-	60,2
1991	61,7	62,40	62,7	46,3	58,6	61,4	121,4	34,6
1992	46,7	56,30	58,3	44,7	58,5	56,2	89,5	62,1
1993	50,7	38,60	35,7	41,8	36,4	63,9	70	55,7
1994	59,5	61,70	67	46,3	62,1	66,3	63	38,5
1995	43,4	70,00	43,2	69,1	41,5	58,9	66	42,3
1996	40,3	54,00	49,4	53,2	49,7	58,5	39,5	50,8
1997	32,1	41,20	64,3	66	50	71,4	74,1	40,5
1998	60,7	80,60	55,6	79,5	47,4	44,8	80	62
1999	71,2	31,40	47,2	64	70,9	51,2	63	117
2000	77	-	54,2	-	48,6	54	66	33,9
2001	49,8	-	110	63,7	43	50,4	75	60,4
2002	39,4	-	65,5	46,5	40	51,2	68	67,1
2003	29,4	-	42	65,2	48,7	61,9	78	50,2
2004	64,8	-	73,5	52,3	47,5	54,5	75	35,2
2005	58,4	-	50,4	49,3	39,2	69,4	65	38,5
2006	31,3	-	72	53	66,7	-	93	50,9
2007	63	-	60,7	52	65,5	47,1	87	58,4
2008	79,8	-	75	64	48,8	56,4	61,9	53,7
2009	142	67,70	53,2	70	53,7	57,3	67,7	66,1
2010	52,9	81,80	70,4	39,7	80,2	60,9	56,2	54,6
2011	113,2	76,00	54,2	76,3	67,3	51	72,2	42,6
2012	55,5	92,80	53,3	87,3	54,9	44,3	108,9	50,9
2013	60,2	57,00	65,2	-	55,5	57	61,7	60,2
2014	80	38,50	40,9	63,8	55,3	49,2	69,1	81,8
2015	48,5	51,80	61,4	58,7	60,3	59	56	57,6
2016	47,5	77,00	60,2	72,2	40,8	66	67,7	64,8
2017	50,8	66,80	63,3	64	53,4	45,2	45,3	-
2018	60,5	101,00	52,3	61,1	64,6	66	110,9	-
2019	60,5	57,50	57	59,9	54,3	49	60,9	65,5
2020	-	81,00	75,4	59,4	47,6	50,8	69,6	-
2021	-	59,50	54	58,2	77	57	67,2	_

Le tableau II-7 condense les résultats après l'homogénéisation des précipitations pour laquelle les stations de Imbo sems, nous avons fait l'extension de 2000 à 2008, Buja Aéro de 2020 à

2021. Mais pour le reste des stations leur coefficient de corrélation est inférieur à 0.75 de ce fait l'homogénéisation n'a pas été faite pour réduire la propagation des erreurs dans la suite des calculs.

Le tableau suivant montre les résultats des données pluviométriques brutes homogénéisées.

Tableau II-2: Précipitions maximale journalière annuelle homogénéisée

STATION	BUJA AERO	IMBO SEMS	MAKAMBA	GISOZI	MPOTA TORA	VYANDA-RWEZA	NYANZA LAC	BUGARAMA
ANNEE	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24
1990	77,8	84,30	59,9	72,5	65,7	59	-	60,2
1991	61,7	62,40	62,7	46,3	58,6	61,4	121,4	34,6
1992	46,7	56,30	58,3	44,7	58,5	56,2	89,5	62,1
1993	50,7	38,60	35,7	41,8	36,4	63,9	70	55,7
1994	59,5	61,70	67	46,3	62,1	66,3	63	38,5
1995	43,4	70,00	43,2	69,1	41,5	58,9	66	42,3
1996	40,3	54,00	49,4	53,2	49,7	58,5	39,5	50,8
1997	32,1	41,20	64,3	66	50	71,4	74,1	40,5
1998	60,7	80,60	55,6	79,5	47,4	44,8	80	62
1999	71,2	31,40	47,2	64	70,9	51,2	63	117
2000	77	67,21	54,2	-	48,6	54	66	33,9
2001	49,8	56,18	110	63,7	43	50,4	75	60,4
2002	39,4	51,96	65,5	46,5	40	51,2	68	67,1
2003	29,4	47,91	42	65,2	48,7	61,9	78	50,2
2004	64,8	62,26	73,5	52,3	47,5	54,5	75	35,2
2005	58,4	51,00	50,4	49,3	39,2	69,4	65	38,5
2006	31,3	48,68	72	53	66,7	-	93	50,9
2007	63	61,53	60,7	52	65,5	47,1	87	58,4
2008	79,8	68,35	75	64	48,8	56,4	61,9	53,7
2009	142	67,70	53,2	70	53,7	57,3	67,7	66,1
2010	52,9	81,80	70,4	39,7	80,2	60,9	56,2	54,6
2011	113,2	76,00	54,2	76,3	67,3	51	72,2	42,6
2012	55,5	92,80	53,3	87,3	54,9	44,3	108,9	50,9
2013	60,2	57,00	65,2	-	55,5	57	61,7	60,2
2014	80	38,50	40,9	63,8	55,3	49,2	69,1	81,8
2015	48,5	51,80	61,4	58,7	60,3	59	56	57,6
2016	47,5	77,00	60,2	72,2	40,8	66	67,7	64,8
2017	50,8	66,80	63,3	64	53,4	45,2	45,3	-
2018	60,5	101,00	52,3	61,1	64,6	66	110,9	-
2019	60,5	57,50	57	59,9	54,3	49	60,9	65,5
2020	68,46	81,00	75,4	59,4	47,6	50,8	69,6	-
2021	71,70	59,50	54	58,2	77	57	67,2	_

Le tableau suivant présente les caractéristiques de distribution de la série des précipitations maximales journalières relevées sur toutes les stations se trouvant dans notre zone d'étude.

Tableau II-3: Les valeurs caractéristiques d'analyse

Les valeurs caractéristiques de la distribution		**Buja Aéro**	**Imbo**	**Makamba**	**GISOZI**	**MPOTA - TORA**	**VYANDA GWEZA**	**NYANZA-LAC**	**BUGARAMA**
Moyenne de x	$\bar{x}$	60,9	62,62	59,6	60	54.8	56.43	72.54	55.58
Ecart type de x	σ	22,53	16,08	13,62	11,59	11,03	7,29	17,69	16,81
coefficient de variation	Cv	0,4	0,26	0,2	0.19	0.2	0.13	0.24	0.3
coefficient d'asymétrie	Cs	1,8	0,33	1,46	0.2	0.44	0.17	1.07	1.8

- **Présentation des résultats d'analyse des précipitations**.

Les résultats de l'analyse statistique des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Normale, Gumbel, et Pearson-III sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau II-4 : Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normal et Gumbel

			Station Buja Aéro			
			Loi Normale		Gumbel	
T(Ans)	F (x)	P(x)	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	60,90	-0,16	57,20
5	0,8	0,2	0,84	79,86	0,72	77,11
10	0,9	0,1	1,28	89,77	1,31	90,30
25	0,96	0,04	1,75	100,34	2,04	106,97
50	0,98	0,02	2,05	107,17	2,59	119,33
100	0,99	0,01	2,33	113,31	3,14	131,60
250	0,996	0,004	2,65	120,65	3,85	147,75
500	0,998	0,002	2,88	125,75	4,40	159,95
1000	0,999	0,001	3,09	130,52	4,94	172,14

Tableau II-5 *:* Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

Nom de la station		Buja Aéro		
	Cs=4,8Cv			
T (ans)	p%	zi	kp	pi
1000	0,1	-3,09	3,25	197,93
500	0,2	-2,88	3,00	182,77
200	0,5	-2,58	2,66	161,82
100	1	-2,33	2,40	146,05
50	2	-2,05	2,13	129,95
20	5	-1,64	1,79	108,98
10	10	-1,28	1,53	92,88
5	20	-0,84	1,26	76,47
2	50	0,00	0,89	54,23

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

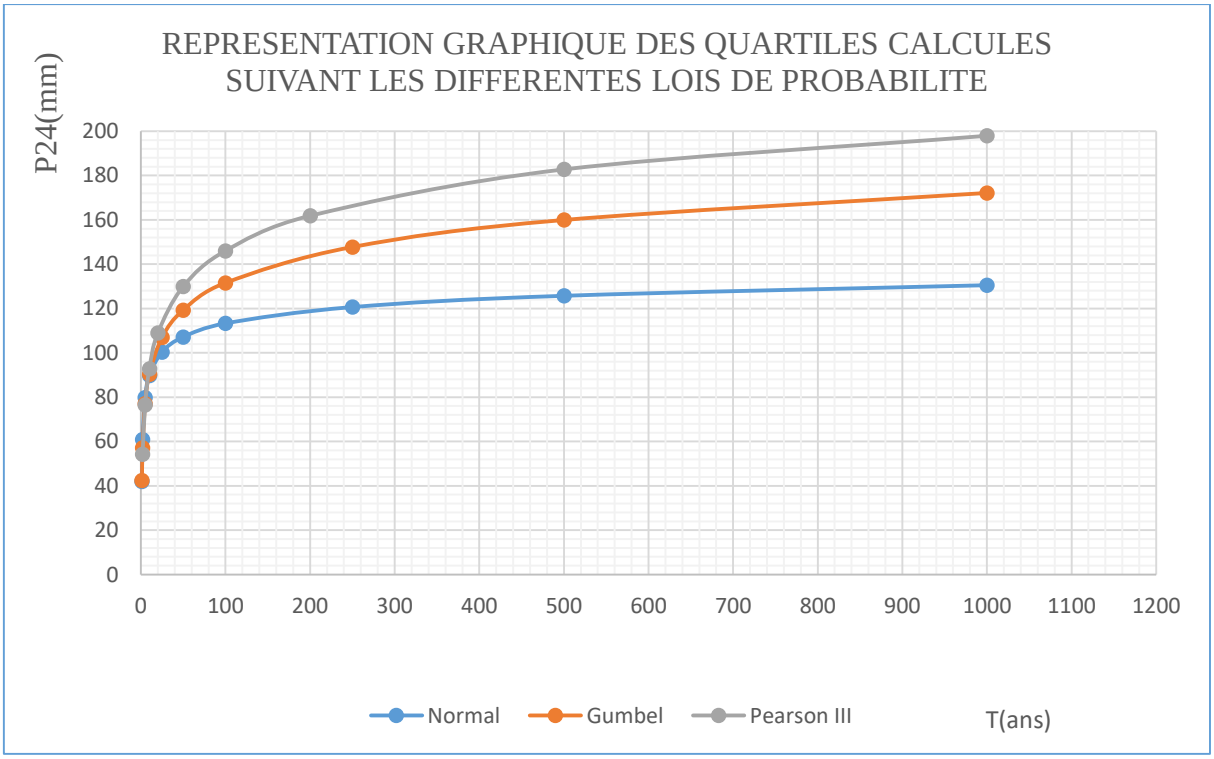


Figure II-1: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Buja aéro

Tableau II-6 : Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normal et Gumbel.

			Station Imbo Sems			
			Loi Normale		Gumbel	
T(Ans)	F (x)	P(x)	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	62,62	-0,16	59,98
5	0,8	0,2	0,84	76,16	0,72	74,20
10	0,9	0,1	1,28	83,23	1,31	83,61
25	0,96	0,04	1,75	90,77	2,04	95,50
50	0,98	0,02	5,05	95,65	2,59	104,32
100	0,99	0,01	2,33	100,03	3,14	113,08
250	0,996	0,004	2,65	105,27	3,85	124,61
500	0,998	0,002	2,88	108,90	4,40	133,31
1000	0,999	0,001	3,09	112,31	4,94	142,01

Tableau II-7 : Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

	Nom de la station:	Imbo Sems		
	Cs=1,3Cv			
T (ans)	p%	zi	kp	pi
1000	0,1	-3,09	1,91	119,87
500	0,2	-2,88	1,84	115,25
200	0,5	-2,58	1,74	108,90
100	1	-2,33	1,66	103,73
50	2	-2,05	1,57	98,56
20	5	-1,64	1,44	90,34
10	10	-1,28	1,34	83,92
5	20	-0,84	1,22	76,32
2	50	0,00	0,99	61,92

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

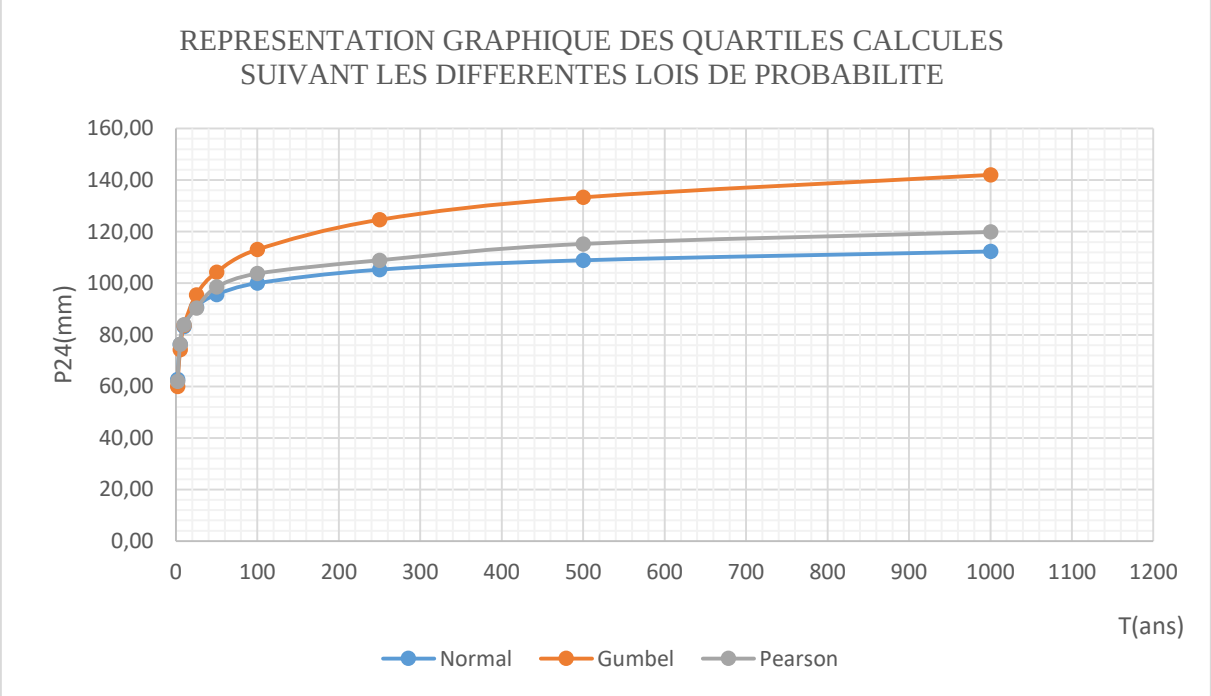


Figure II-2 : **Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Imbo Sems**

Tableau II-8*:* Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel.

			Station Mpota Tora			
			Loi Normale		Gumbel	
T (ans)	F (x)	P (x)	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	54,80	-0,16	52,99
5	0,8	0,2	0,84	64,09	0,72	62,74
10	0,9	0,1	1,28	68,94	1,31	69,20
25	0,96	0,04	1,75	74,12	2,04	77,36
50	0,98	0,02	2,05	77,46	2,59	83,42
100	0,99	0,01	2,33	80,47	3,14	89,43
250	0,996	0,004	2,65	84,06	3,85	97,34
500	0,998	0,002	2,88	86,56	4,40	103,31
1000	0,999	0,001	3,09	88,90	4,94	109,28

Tableau II-9: Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

Nom de la station : Mpota Tora				
Cs=2,2Cv				
T (ans)	p%	Zi	kp	Pi
1000	0,1	-3,090	1,74	95,168
500	0,2	-2,878	1,68	91,880
200	0,5	-2,576	1,59	87,376
100	1	-2,326	1,52	83,540
50	2	-2,054	1,45	79,584
20	5	-1,645	1,35	73,984
10	10	-1,282	1,26	69,052
5	20	-0,842	1,16	63,572
2	50	0,000	0,99	54,135

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

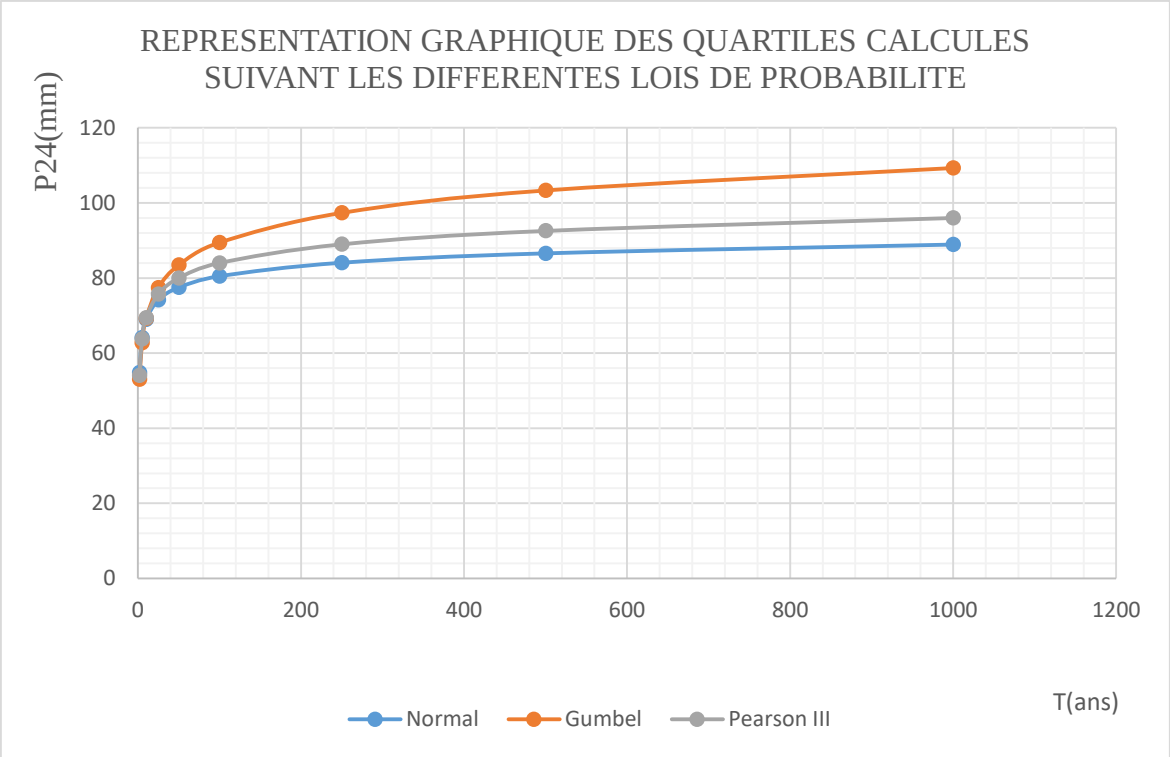


Figure II-3 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Mpota Tora

Tableau II-10: Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel.

			Station Bugarama			
			Loi Normale		Gumbel	
T	F	P	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	55,58	-0,16	52,81
5	0,8	0,2	0,84	69,72	0,72	67,67
10	0,9	0,1	1,28	77,12	1,31	77,51
25	0,96	0,04	1,75	85,00	2,04	89,95
50	0,98	0,02	2,05	90,10	2,59	99,17
100	0,99	0,01	2,33	94,68	3,14	108,32
250	0,996	0,004	2,65	100,16	3,85	120,38
500	0,998	0,002	2,88	103,96	4,40	129,48
1000	0,999	0,001	3,09	107,52	4,94	138,57

Tableau II-11: Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

Nom de la Station : Bugarama				
Cs=4,4cv				
T(ans)	p%	zi	kp	Pi
1000	0,1	-3,09	2,69	149,50
500	0,2	-2,88	2,5	138,94
200	0,5	-2,58	2,24	124,49
100	1	-2,33	2,05	113,93
50	2	-2,05	1,86	103,37
20	5	-1,64	1,59	88,36
10	10	-1,28	1,4	77,81
5	20	-0,84	1,19	66,13
2	50	0,00	0,92	51,13

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

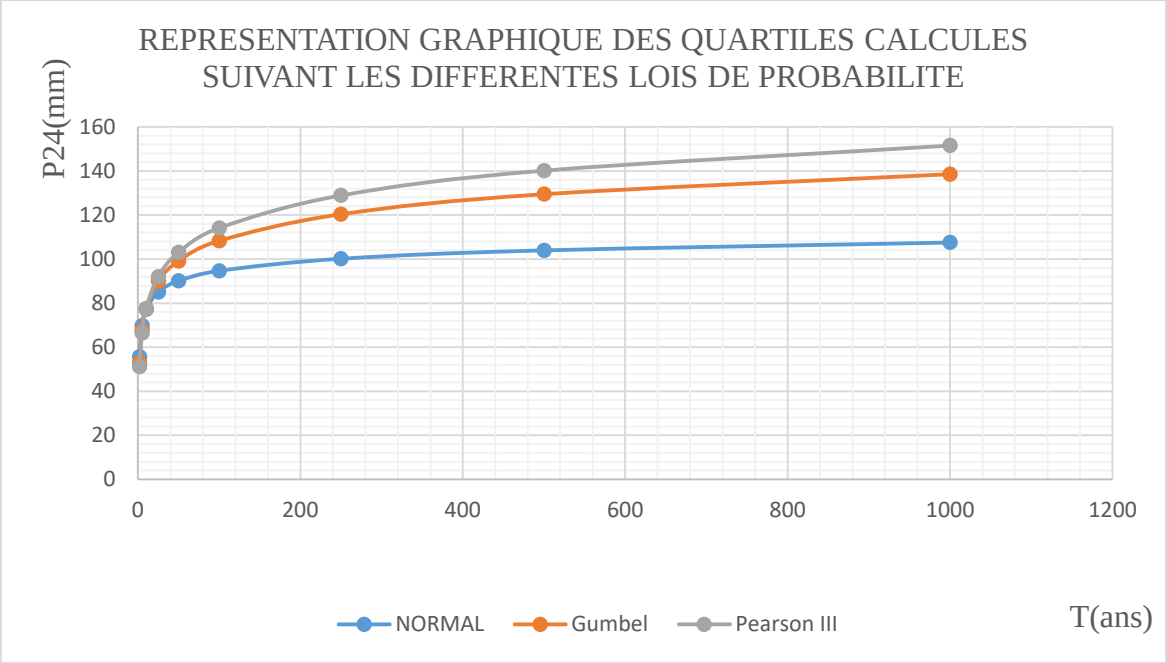


Figure II-4:Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Bugarama

Tableau II-12 : Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel.

			Station Vyanda-Rweza			
			Loi Normale		Gumbel	
T	F	P	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	56,43	-0,16	55,23
5	0,8	0,2	0,84	62,56	0,72	61,67
10	0,9	0,1	1,28	65,77	1,31	65,94
25	0,96	0,04	1,75	69,18	2,04	71,33
50	0,98	0,02	2,05	71,39	2,59	75,32
100	0,99	0,01	2,33	73,38	3,14	79,29
250	0,996	0,004	2,65	75,75	3,85	84,52
500	0,998	0,002	2,88	77,40	4,40	88,47
1000	0,999	0,001	3,09	78,95	4,94	92,41

Tableau II-13:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

Nom de la Station : Vyanda Gweza				
Cs=1,3cv				
T (ans)	p%	zi	kp	Pi
1000	0,1	-3,09	1,43	80,92
500	0,2	-2,88	1,39	78,66
200	0,5	-2,58	1,35	76,33
100	1	-2,33	1,32	74,56
50	2	-2,05	1,28	72,30
20	5	-1,64	1,22	68,84
10	10	-1,28	1,17	66,02
5	20	-0,84	1,11	62,63
2	50	0,00	1,00	56,35

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

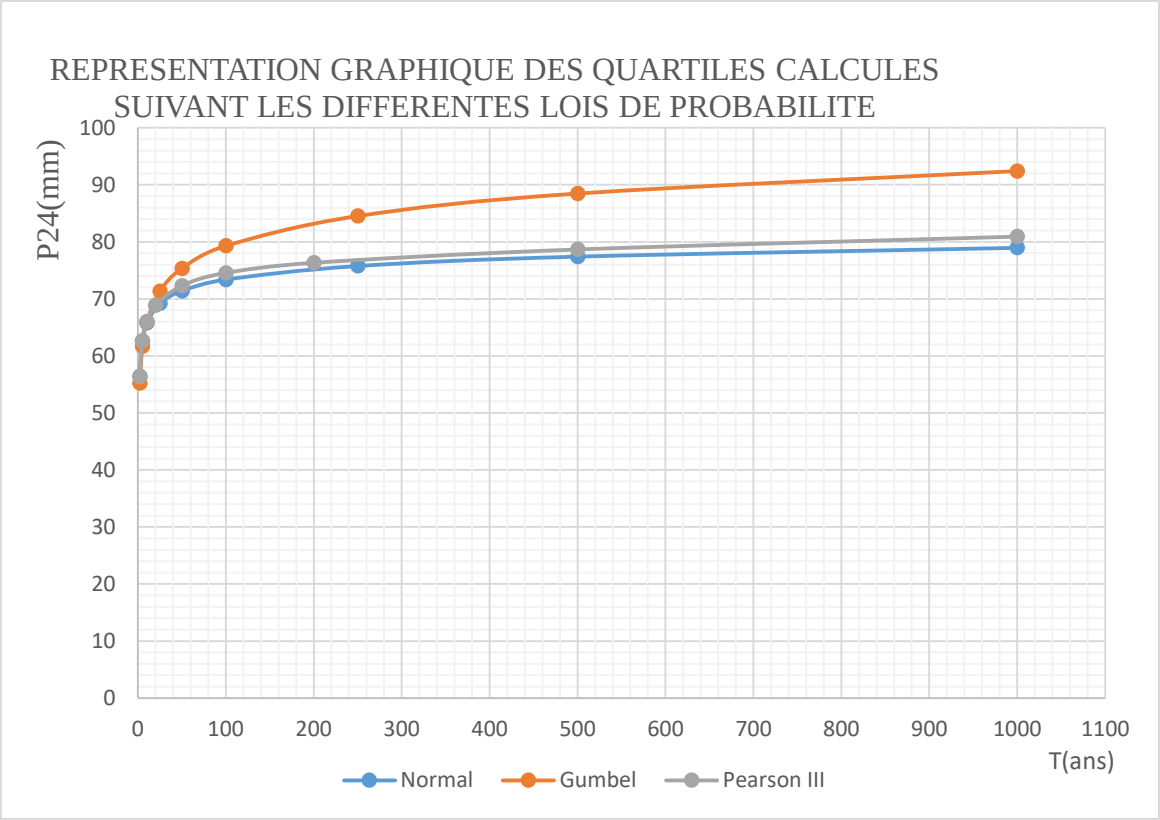


Figure II-5 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Vyanda Gweza

Tableau II-14:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel.

			Station Gisozi			
			Loi Normale		Gumbel	
T	F	P	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	60,00	-0,16	58,10
5	0,8	0,2	0,84	69,75	0,72	68,34
10	0,9	0,1	1,28	74,85	1,31	75,12
25	0,96	0,04	1,75	80,28	2,04	83,69
50	0,98	0,02	2,05	83,79	2,59	90,05
100	0,99	0,01	2,33	86,95	3,14	96,36
250	0,996	0,004	2,65	90,73	3,85	104,66
500	0,998	0,002	2,88	93,35	4,40	110,94
1000	0,999	0,001	3,09	95,80	4,94	117,21

Tableau II-15:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

Nom de la Station : Gisozi				
Cs=1,2cv				
T (ans)	p%	Zi	kp	pi
1000	0,1	-3,09	1,64	98,4
500	0,2	-2,88	1,59	95,4
200	0,5	-2,58	1,52	91,2
100	1	-2,33	1,47	88,2
50	2	-2,05	1,41	84,6
20	5	-1,64	1,32	79,2
10	10	-1,28	1,25	75
5	20	-0,84	1,16	69,6
2	50	0,00	0,99	59,4

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

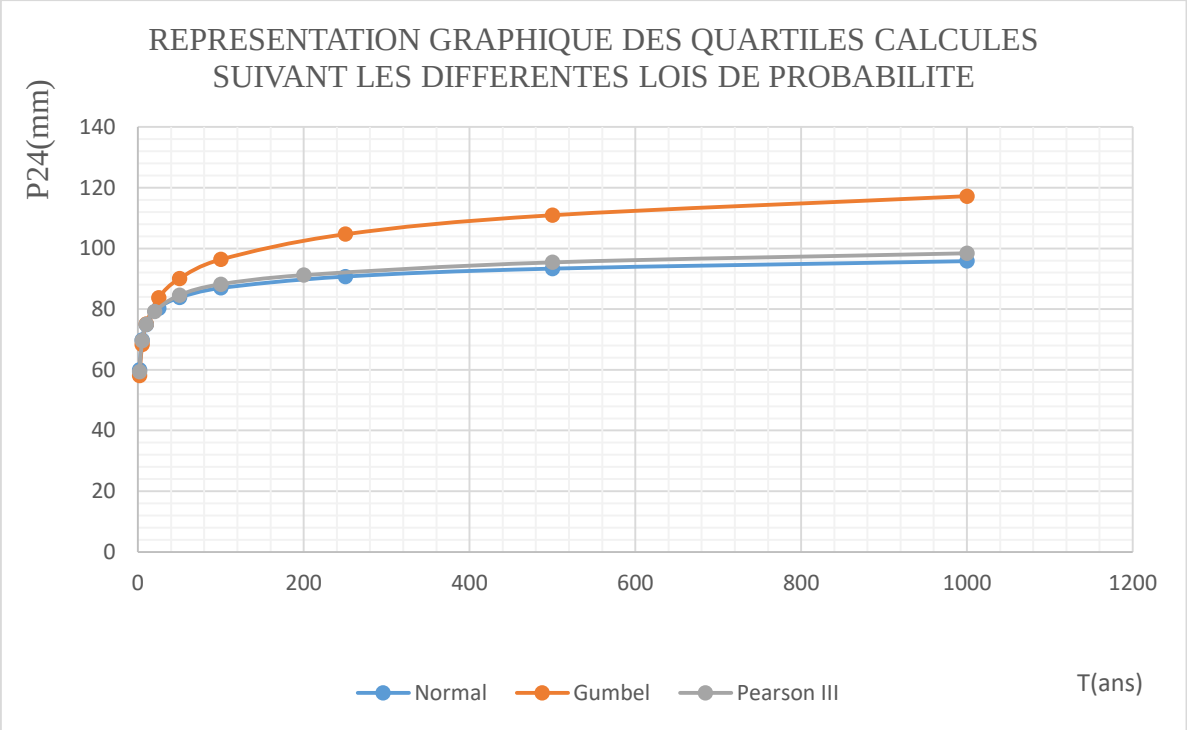


Figure II-6: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Gisozi

Tableau II-16:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel.

			Station Makamba			
			Loi Normale		Gumbel	
T	F	P	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	59,61	-0,16	57,37
5	0,8	0,2	0,84	71,07	0,72	69,41
10	0,9	0,1	1,28	77,06	1,31	77,38
25	0,96	0,04	1,75	83,45	2,04	87,46
50	0,98	0,02	2,05	87,58	2,59	94,93
100	0,99	0,01	2,33	91,29	3,14	98,06
250	0,996	0,004	2,65	95,73	3,85	105,15
500	0,998	0,002	2,88	98,81	4,40	110,23
1000	0,999	0,001	3,09	101,70	4,94	115,39

Tableau II-17:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

Nom de la station : Makamba				
Cs=6cv				
T (ans)	p%	zi	kp	Pi
1000	0,1	-3,09	1,96	116,83
500	0,2	-2,88	1,86	110,87
200	0,5	-2,58	1,73	103,12
100	1	-2,33	1,63	97,16
50	2	-2,05	1,52	90,60
20	5	-1,64	1,38	82,26
10	10	-1,28	1,27	75,70
5	20	-0,84	1,15	68,55
2	50	0,00	0,96	57,22

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

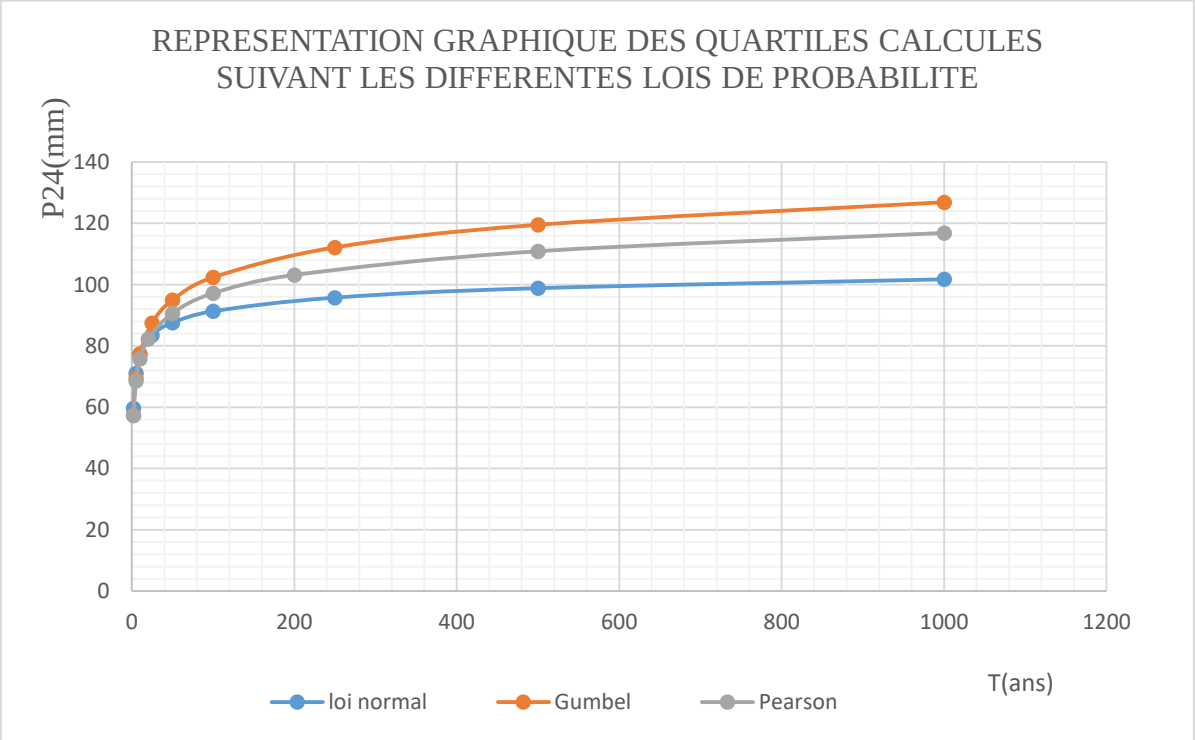


Figure II-7: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Makamba

Tableau II-18:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi normale et Gumbel.

			Station Nyanza- lac			
			Loi Normale		Gumbel	
T	F	P	K_T	X_T(mm)	K_T	X_T(mm)
2	0,5	0,5	0,00	72,54	-0,16	69,64
5	0,8	0,2	0,84	87,43	0,72	85,27
10	0,9	0,1	1,28	95,21	1,31	95,62
25	0,96	0,04	1,75	103,50	2,04	108,70
50	0,98	0,02	2,05	108,86	2,59	118,41
100	0,99	0,01	2,33	113,69	3,14	128,04
250	0,996	0,004	2,65	119,45	3,85	140,72
500	0,998	0,002	2,88	123,45	4,40	148,30
1000	0,999	0,001	3,09	127,20	4,94	156,87

Tableau II-19:Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations par la loi de Pearson III

Nom de la Station : Nyanza -Lac				
Cs=4,4cv				
T(ans)	p%	zi	kp	Pi
1000	0,1	-3,09	2,136	157,38
500	0,2	-2,88	2,027	149,08
200	0,5	-2,58	1,874	137,56
100	1	-2,33	1,755	128,95
50	2	-2,05	1,632	119,61
20	5	-1,64	1,463	106,14
10	10	-1,28	1,329	96,39
5	20	-0,84	1,180	85,60
2	50	0,00	0,956	69,32

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

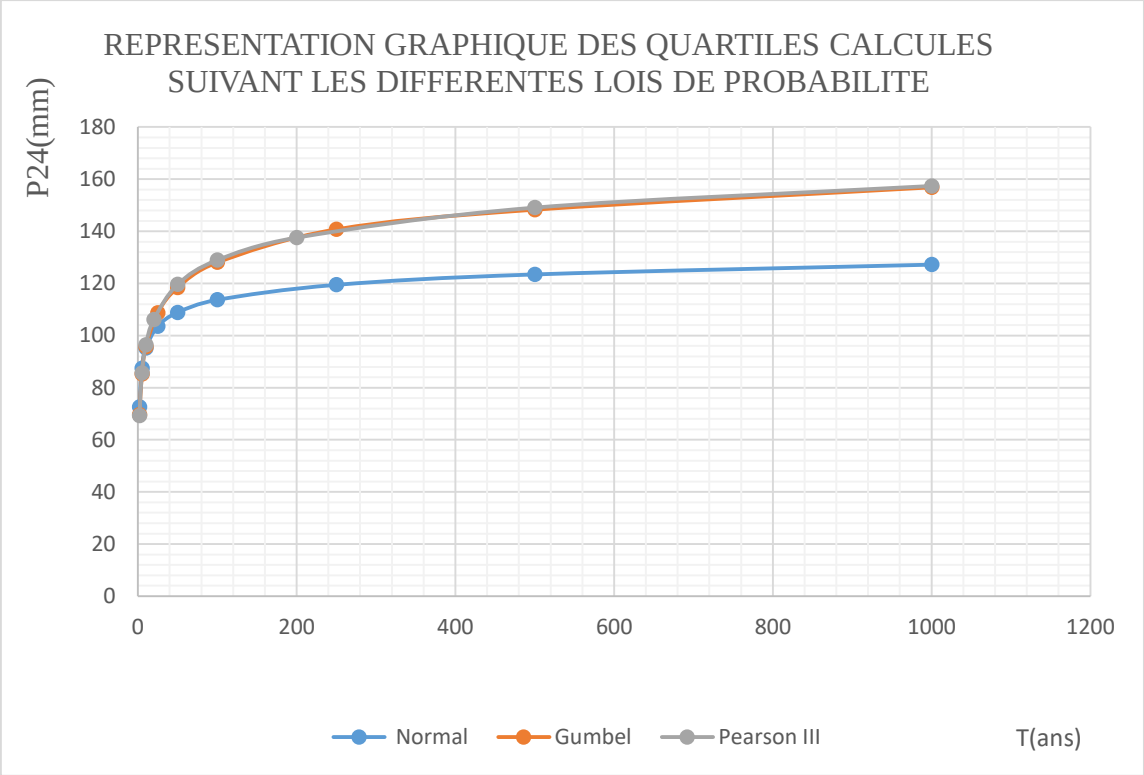


Figure II-8: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations à la station Nyanza –lac

II.2.1.1 Commentaires

L'analyse des résultats trouvés sur les courbes représentées par les graphiques ci-dessus, nous permet de conclure que la loi normale sous-estime dans tous les cas la hauteur des précipitations par rapport aux autres lois probabilistes utilisées dans notre travail de recherche. Selon les valeurs des précipitations expérimentales obtenues sur 8 stations, on remarque que la loi de Pearson III se substitue toujours avec la loi de Gumbel au niveau de la première position. Donc il y a un écart-type entre les résultats trouvés sur ces stations par ces deux méthodes dernièrement évoquées.

Pour la suite de ce travail, la loi probabiliste de Pearson III est adoptée comme loi représentant au mieux la série des observations.

II.2.2 Analyse statistique détaillée des données des précipitations

Les précipitations extrêmes ont fait l'objet de nombreuses études pour les estimations basées sur deux approches principales : les méthodes statistiques et les méthodes déterministes. 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 événement 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 précipitations extrêmes en fonction de la probabilité d'apparition (ou période de retour).

Le rapport Cs/Cv nous a permis de trouver directement le tableau correspondant de k_p pour les courbes de fréquence de Pearson III. De ce fait les précipitations extrême du projet sont calculées par la formule suivante : p extrêmes =Pm *Kp

Avec p extrêmes : précipitations extrêmes

Pm : précipitation moyenne

Kp : coefficient des crues

Les tableaux suivants montrent les résultats de l'analyse statistique détaillée station par station

Tableau II-20 : Analyse statistique des données recueillies à la station Buja aéro

Station Buja aéro									
ANNEE	P24	N°	P_{24} trié	P%	Zi	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990	77,8	1	142,00	3,030	-1,876	2,332	1,332	1,774	533437,44
1991	61,7	2	113,20	6,061	-1,550	1,859	0,859	0,738	143066,36
1992	46,7	3	80,00	9,091	-1,335	1,314	0,314	0,098	6969,30
1993	50,7	4	79,80	12,121	-1,169	1,310	0,310	0,096	6752,67
1994	59,5	5	77,80	15,152	-1,030	1,278	0,278	0,077	4827,93
1995	43,4	6	77,00	18,182	-0,908	1,264	0,264	0,070	4174,29
1996	40,3	7	71,70	21,212	-0,799	1,177	0,177	0,031	1258,64
1997	32,1	8	71,20	24,242	-0,699	1,169	0,169	0,029	1093,14
1998	60,7	9	68,46	27,273	-0,605	1,124	0,124	0,015	432,77
1999	71,2	10	64,80	30,303	-0,516	1,064	0,064	0,004	59,38
2000	77	11	63,00	33,333	-0,431	1,035	0,035	0,001	9,28
2001	49,8	12	61,70	36,364	-0,349	1,013	0,013	0,000	0,51
2002	39,4	13	60,70	39,394	-0,269	0,997	-0,003	0,000	-0,01
2003	29,4	14	60,50	42,424	-0,191	0,993	-0,007	0,000	-0,06
2004	64,8	15	60,50	45,455	-0,114	0,993	-0,007	0,000	-0,06
2005	58,4	16	60,20	48,485	-0,038	0,989	-0,011	0,000	-0,34
2006	31,3	17	59,50	51,515	0,038	0,977	-0,023	0,001	-2,74
2007	63	18	58,40	54,545	0,114	0,959	-0,041	0,002	-15,60
2008	79,8	19	55,50	57,576	0,191	0,911	-0,089	0,008	-157,35
2009	142	20	52,90	60,606	0,269	0,869	-0,131	0,017	-511,75
2010	52,9	21	50,80	63,636	0,349	0,834	-0,166	0,027	-1029,90
2011	113,2	22	50,70	66,667	0,431	0,833	-0,167	0,028	-1060,80
2012	55,5	23	49,80	69,697	0,516	0,818	-0,182	0,033	-1367,15
2013	60,2	24	48,50	72,727	0,605	0,796	-0,204	0,041	-1906,02
2014	80	25	47,50	75,758	0,699	0,780	-0,220	0,048	-2405,40
2015	48,5	26	46,70	78,788	0,799	0,767	-0,233	0,054	-2862,50
2016	47,5	27	43,40	81,818	0,908	0,713	-0,287	0,083	-5358,18
2017	50,8	28	40,30	84,848	1,030	0,662	-0,338	0,114	-8740,16
2018	60,5	29	39,40	87,879	1,169	0,647	-0,353	0,125	-9936,57
2019	60,5	30	32,10	90,909	1,335	0,527	-0,473	0,224	-23884,63
2020	68,46	31	31,30	93,939	1,550	0,514	-0,486	0,236	-25930,91
2021	71,70	32	29,40	96,970	1,876	0,483	-0,517	0,268	-31252,00
							∑	4,243	585659,56

Tableau II-21 : Les valeurs caractéristiques

les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{x}$	60,90
coefficient de divergence	Cv	0,4
coefficient d'asymétrie	Cs	1,8
	Cs/Cv	4,8

- **Calcul des précipitations extrêmes**

Les valeurs de coefficient k_p correspondant à Cs= 4.8 Cv ont été trouvées par interpolation de coefficient k_p respectivement associé aux valeurs de Cs=4 Cv et Cs =5 Cv.

Tableau II-22: Les valeurs des coefficients K_p

		Cs=4Cv	**Cs=5Cv**
p%	**zi**	K_{pi}	K_{pi}
0,01	-3,719	3,92	4,28
0,1	-3,090	3,15	3,36
0,2	-2,878	2,92	3,09
0,33	-2,716	2,74	2,88
0,5	-2,576	2,6	2,72
1	-2,326	2,36	2,44
2	-2,054	2,11	2,16
5	-1,645	1,78	1,8
10	-1,282	1,53	1,52
20	-0,842	1,27	1,24
50	0,000	0,9	0,88
75	0,674	0,71	0,72
90	1,282	0,6	0,64
95	1,645	0,56	0,62
99	2,326	0,52	0,6

Le tableau suivant présente les valeurs de coefficient K_p pour Cs égal 4.8 Cv, ainsi que les valeurs des précipitations extrêmes correspondantes à chaque probabilité.

Tableau II-23 : Précipitations extrêmes calculées à la station Buja aéro

Cs=4,8Cv			
p%	zi	K_{pi}	Pi extrême
0,01	-3,719	4,092	249,186
0,1	-3,090	3,250	197,934
0,2	-2,878	3,001	182,765
0,33	-2,716	2,807	170,931
0,5	-2,576	2,657	161,824
1	-2,326	2,398	146,046
2	-2,054	2,134	129,949
5	-1,645	1,790	108,981
10	-1,282	1,525	92,884
20	-0,842	1,256	76,469
50	0,000	0,890	54,228
75	0,674	0,715	43,529
90	1,282	0,619	37,702
95	1,645	0,589	35,847
99	2,326	0,558	33,992

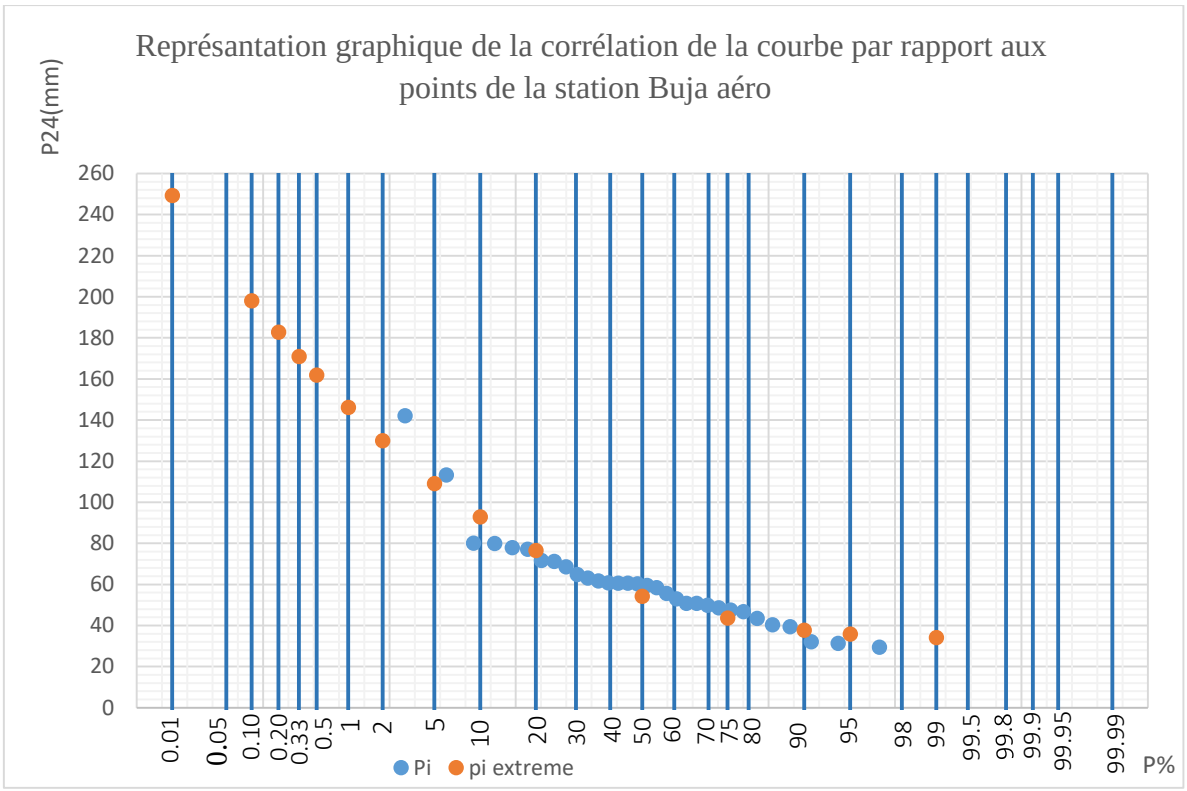


Figure II-9: La corrélation de la courbe par rapport aux points de la station Buja aéro

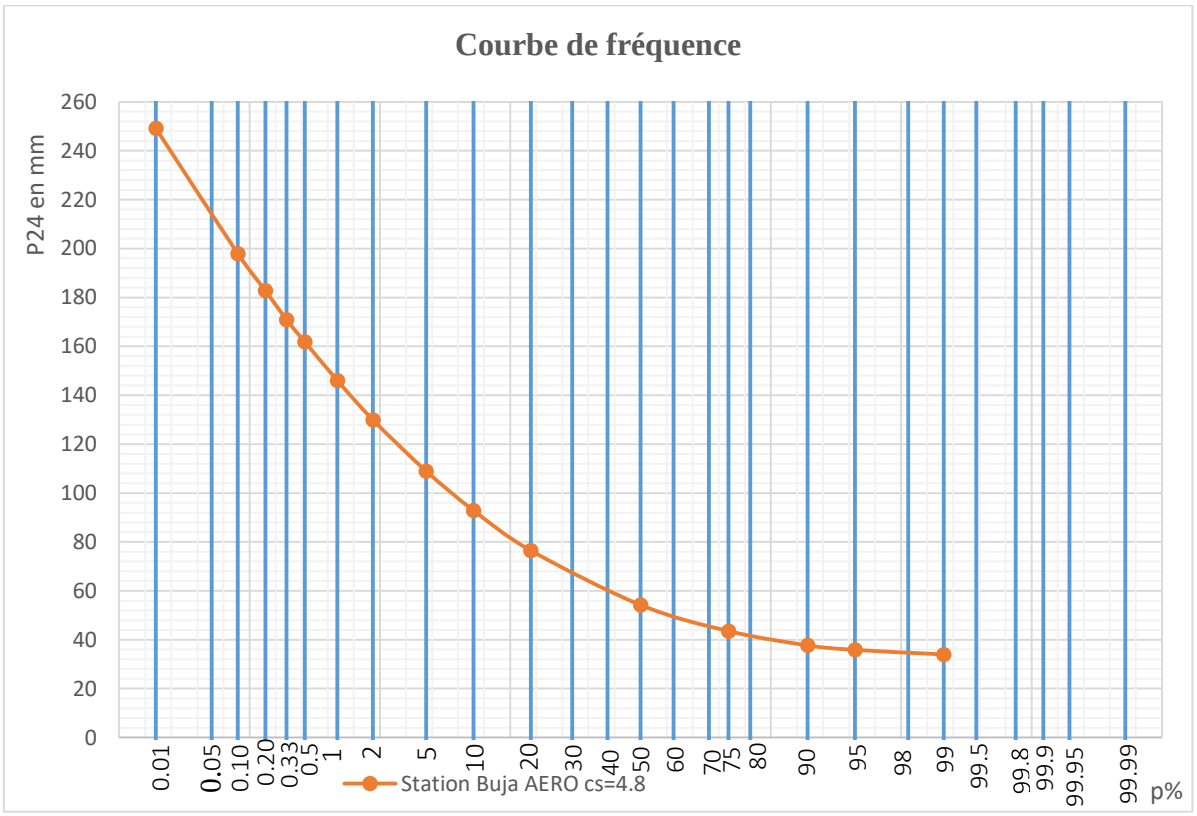


Figure II-10 : La courbe de fréquences des crues de station Buja Aéro

Tableau II-24 : Analyse statistique des données recueillies à la station Imbo Sems

Station Imbo Sems								
Année	P24	N°	P_{24} trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990	84,30	1	101,00	3,030	1,613	0,613	0,376	56514,842
1991	62,40	2	92,80	6,061	1,482	0,482	0,232	27476,658
1992	56,30	3	84,30	9,091	1,346	0,346	0,120	10183,757
1993	38,60	4	81,80	12,121	1,306	0,306	0,094	7050,840
1994	61,70	5	81,00	15,152	1,293	0,293	0,086	6204,664
1995	70,00	6	80,60	18,182	1,287	0,287	0,082	5808,229
1996	54,00	7	77,00	21,212	1,230	0,230	0,053	2970,776
1997	41,20	8	76,00	24,242	1,214	0,214	0,046	2392,936
1998	80,60	9	70,00	27,273	1,118	0,118	0,014	401,214
1999	31,40	10	68,35	30,303	1,091	0,091	0,008	187,471
2000	67,21	11	67,70	33,333	1,081	0,081	0,007	130,749
2001	56,18	12	67,21	36,364	1,073	0,073	0,005	96,554
2002	51,96	13	66,80	39,394	1,067	0,067	0,004	72,800
2003	47,91	14	62,40	42,424	0,996	-0,004	0,000	-0,011
2004	62,26	15	62,26	45,455	0,994	-0,006	0,000	-0,047
2005	51,00	16	61,70	48,485	0,985	-0,015	0,000	-0,790
2006	48,68	17	61,53	51,515	0,983	-0,017	0,000	-1,297
2007	61,53	18	59,50	54,545	0,950	-0,050	0,002	-30,503
2008	68,35	19	57,50	57,576	0,918	-0,082	0,007	-134,571
2009	67,70	20	57,00	60,606	0,910	-0,090	0,008	-177,930
2010	81,80	21	56,30	63,636	0,899	-0,101	0,010	-252,974
2011	76,00	22	56,18	66,667	0,897	-0,103	0,011	-267,617
2012	92,80	23	54,00	69,697	0,862	-0,138	0,019	-641,505
2013	57,00	24	51,96	72,727	0,830	-0,170	0,029	-1212,139
2014	38,50	25	51,80	75,758	0,827	-0,173	0,030	-1268,301
2015	51,80	26	51,00	78,788	0,814	-0,186	0,034	-1570,803
2016	77,00	27	48,68	81,818	0,777	-0,223	0,050	-2713,260
2017	66,80	28	47,91	84,848	0,765	-0,235	0,055	-3188,293
2018	101,00	29	41,20	87,879	0,658	-0,342	0,117	-9834,027
2019	57,50	30	38,60	90,909	0,616	-0,384	0,147	-13866,360
2020	81,00	31	38,50	93,939	0,615	-0,385	0,148	-14040,235
2021	59,50	32	31,40	96,970	0,501	-0,499	0,249	-30442,900
						∑	2,044	39847,929

Tableau II-25 : Les valeurs caractéristiques d'analyse (Imbo Sems)

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{X}$	62,62
Coefficient de divergence	Cv	0,26
Coefficient d'asymétrie	Cs	0,33
	Cs/Cv	1,3

- **Calcul des précipitations extrêmes à la station Imbo Sems**

Les valeurs de coefficient k_p correspondant à Cs= 1.3 Cv ont été trouvées par interpolation de coefficient k_p respectivement associé aux valeurs de Cs=Cv et Cs =2 Cv.

Tableau II-26: Les valeurs des coefficients K_p

		Cs=CV	**Cs=2CV**
p%	**zi**	K_{pi}	K_{pi}
0,01	-3,719	2,12	2,28
0,1	-3,090	1,9	2,01
0,2	-2,878	1,83	1,91
0,33	-2,716	1,77	1,85
0,5	-2,576	1,73	1,8
1	-2,326	1,65	1,7
2	-2,054	1,57	1,6
5	-1,645	1,44	1,46
10	-1,282	1,34	1,34
20	-0,842	1,22	1,21
50	0,000	0,99	0,98
75	0,674	0,82	0,82
90	1,282	0,67	0,69
95	1,645	0,59	0,62
99	2,326	0,45	0,5

Le tableau suivant présente les valeurs de coefficient K_p pour Cs égal 1.3 Cv, ainsi que les valeurs des précipitations extrêmes correspondantes à chaque probabilité.

Tableau II-27 : Précipitations extrêmes calculées à la station Imbo Sems

Cs=1,3Cv			
p%	z	K_{pi}	Pi extrêmes
0,01	-3,719	2,14	134,05
0,1	-3,090	1,91	119,87
0,2	-2,878	1,84	115,25
0,33	-2,716	1,78	111,49
0,5	-2,576	1,74	108,90
1	-2,326	1,66	103,73
2	-2,054	1,57	98,56
5	-1,645	1,44	90,34
10	-1,282	1,34	83,92
20	-0,842	1,22	76,32
50	0,000	0,99	61,92
75	0,674	0,82	51,35
90	1,282	0,67	42,12
95	1,645	0,59	37,19
99	2,326	0,46	28,58

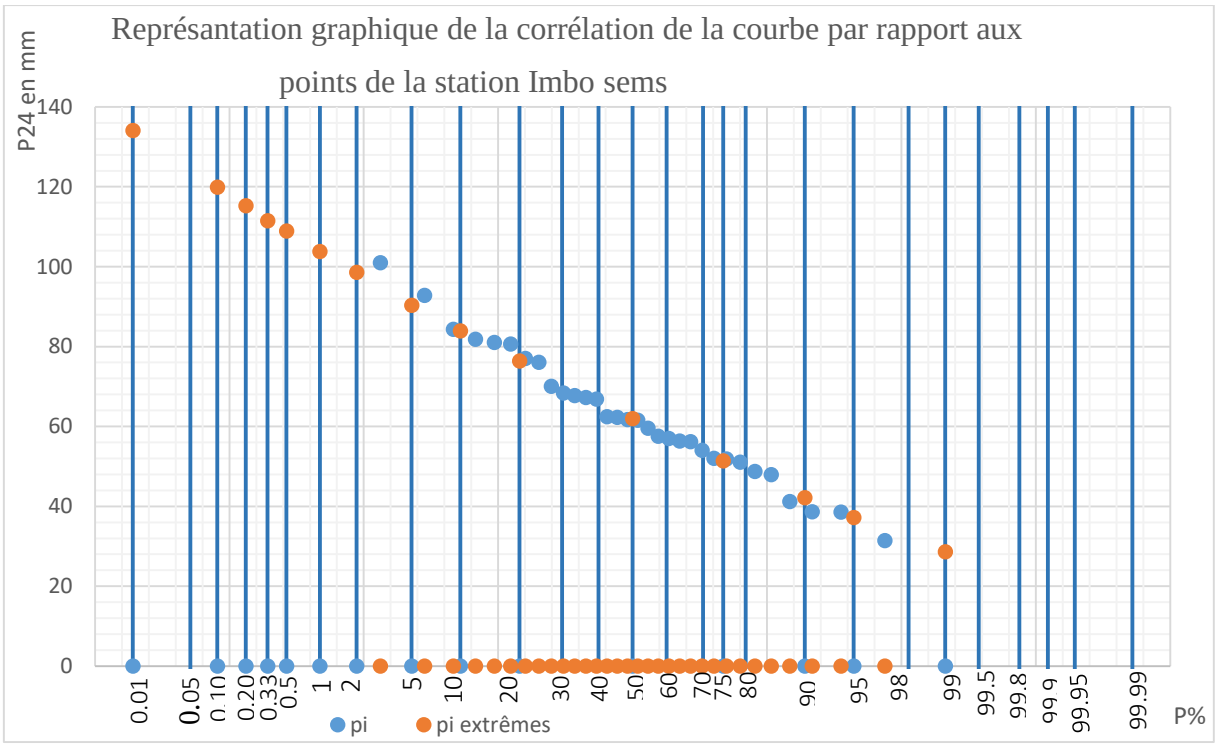


Figure II-11 : La corrélation de la courbe par rapport aux points de la station Imbo Sems

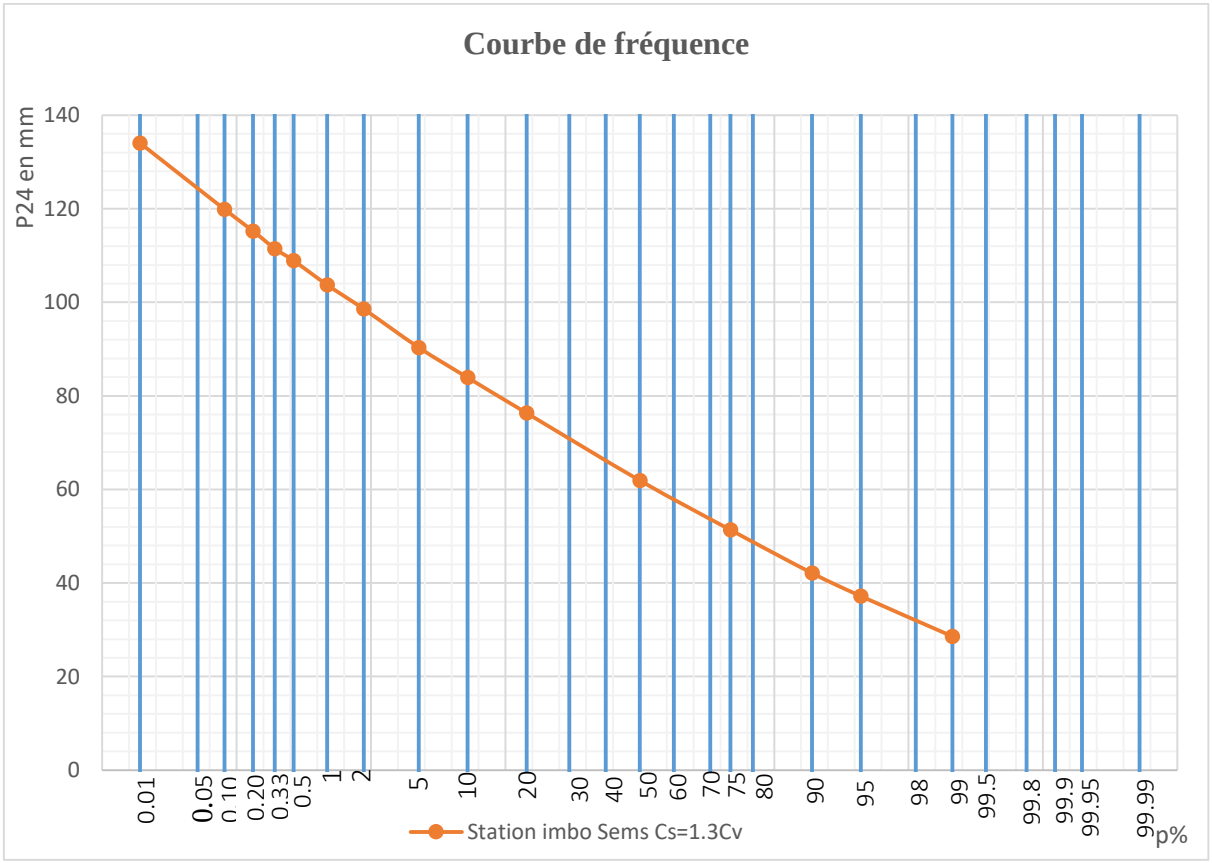


Figure II-12 : La courbe de fréquences des crues de la station Imbo Sems

Tableau II-28 : Analyse statistique des données recueillies à la station Makamba

Station Makamba									
Année	P24	N°	P_{24} trié	P%	zi	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990	59,9	1	110	3,030	-1,876	1,845	0,845	0,715	127976,442
1991	62,7	2	75,4	6,061	-1,550	1,265	0,265	0,070	3939,633
1992	58,3	3	75	9,091	-1,335	1,258	0,258	0,067	3647,819
1993	35,7	4	73,5	12,121	-1,169	1,233	0,233	0,054	2681,998
1994	67	5	72	15,152	-1,030	1,208	0,208	0,043	1903,742
1995	43,2	6	70,4	18,182	-0,908	1,181	0,181	0,033	1257,526
1996	49,4	7	67	21,212	-0,799	1,124	0,124	0,015	404,198
1997	64,3	8	65,5	24,242	-0,699	1,099	0,099	0,010	204,727
1998	55,6	9	65,2	27,273	-0,605	1,094	0,094	0,009	175,029
1999	47,2	10	64,3	30,303	-0,516	1,079	0,079	0,006	103,409
2000	54,2	11	63,3	33,333	-0,431	1,062	0,062	0,004	50,397
2001	110	12	62,7	36,364	-0,349	1,052	0,052	0,003	29,611
2002	65,5	13	61,4	39,394	-0,269	1,030	0,030	0,001	5,771
2003	42	14	60,7	42,424	-0,191	1,018	0,018	0,000	1,308
2004	73,5	15	60,2	45,455	-0,114	1,010	0,010	0,000	0,209
2005	50,4	16	59,9	48,485	-0,038	1,005	0,005	0,000	0,025
2006	72	17	58,3	51,515	0,038	0,978	-0,022	0,000	-2,229
2007	60,7	18	57	54,545	0,114	0,956	-0,044	0,002	-17,703
2008	75	19	55,6	57,576	0,191	0,933	-0,067	0,005	-64,300
2009	53,2	20	54,2	60,606	0,269	0,909	-0,091	0,008	-158,011
2010	70,4	21	54,2	63,636	0,349	0,909	-0,091	0,008	-158,011
2011	54,2	22	54	66,667	0,431	0,906	-0,094	0,009	-176,205
2012	53,3	23	53,3	69,697	0,516	0,894	-0,106	0,011	-250,792
2013	65,2	24	53,2	72,727	0,605	0,893	-0,107	0,012	-262,913
2014	40,9	25	52,3	75,758	0,699	0,877	-0,123	0,015	-390,017
2015	61,4	26	50,4	78,788	0,799	0,846	-0,154	0,024	-780,276
2016	60,2	27	49,4	81,818	0,908	0,829	-0,171	0,029	-1063,160
2017	63,3	28	47,2	84,848	1,030	0,792	-0,208	0,043	-1909,508
2018	52,3	29	43,2	87,879	1,169	0,725	-0,275	0,076	-4415,989
2019	57	30	42	90,909	1,335	0,705	-0,295	0,087	-5457,586
2020	75,4	31	40,9	93,939	1,550	0,686	-0,314	0,098	-6545,762
2021	54	32	35,7	96,970	1,876	0,599	-0,401	0,161	-13662,632
							$\sum$	1,619	107066,752

Tableau II-29: Les valeurs caractéristiques d'analyses (Station Makamba)

Les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{X}$	59,61
Coefficient de divergence	Cv	0,2
Coefficient d'asymétrie	Cs	1,46
	Cs/Cv	6

- **Calcul des précipitations extrêmes à la station Makamba**

Comme le rapport Cs/Cv=6, les valeurs de coefficient K_p pour les courbes de fréquences de Pearson III sont lus sur le tableau CS=6CV.

Tableau II-30 : Précipitations extrêmes calculées à la station Makamba

Cs=6Cv			
p%	zi	K_{pi}	Pi extrêmes
0,01	-3,719	2,28	135,90
0,1	-3,090	1,96	116,83
0,2	-2,878	1,86	110,87
0,33	-2,716	1,79	106,70
0,5	-2,576	1,73	103,12
1	-2,326	1,63	97,16
2	-2,054	1,52	90,60
5	-1,645	1,38	82,26
10	-1,282	1,27	75,70
20	-0,842	1,15	68,55
50	0,000	0,96	57,22
75	0,674	0,85	50,67
90	1,282	0,78	46,49
95	1,645	0,75	44,70
99	2,326	0,71	42,32

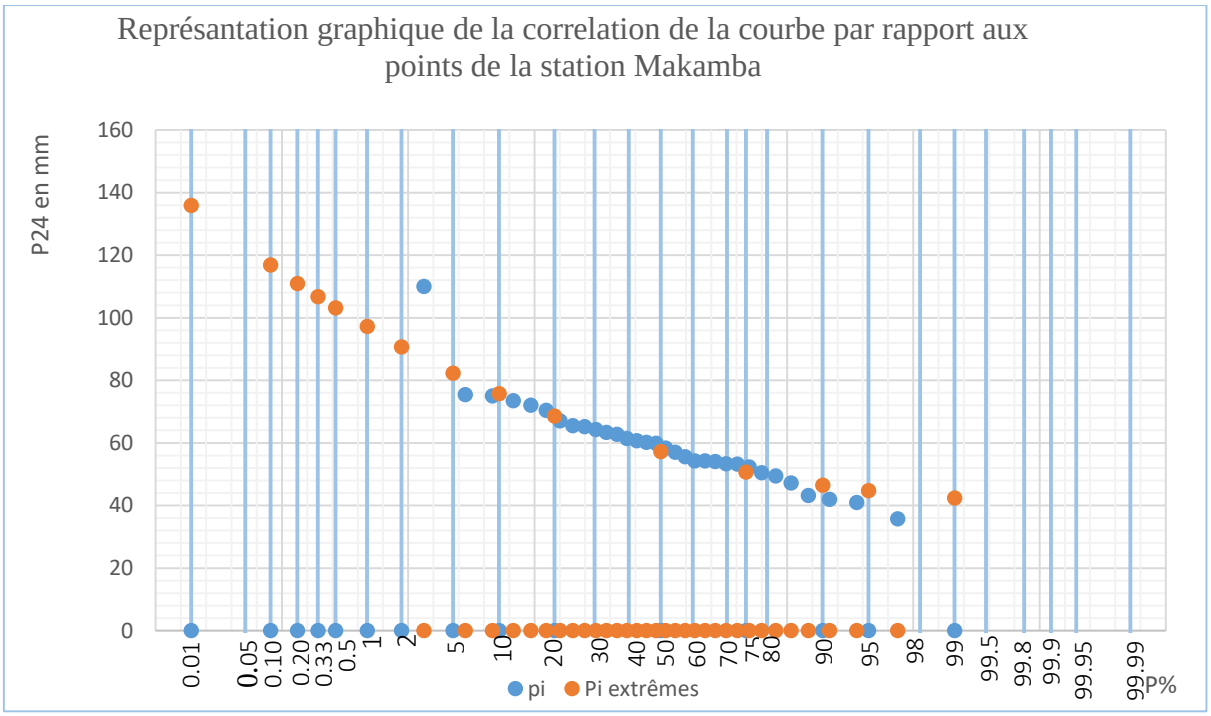


Figure II-13 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Makamba

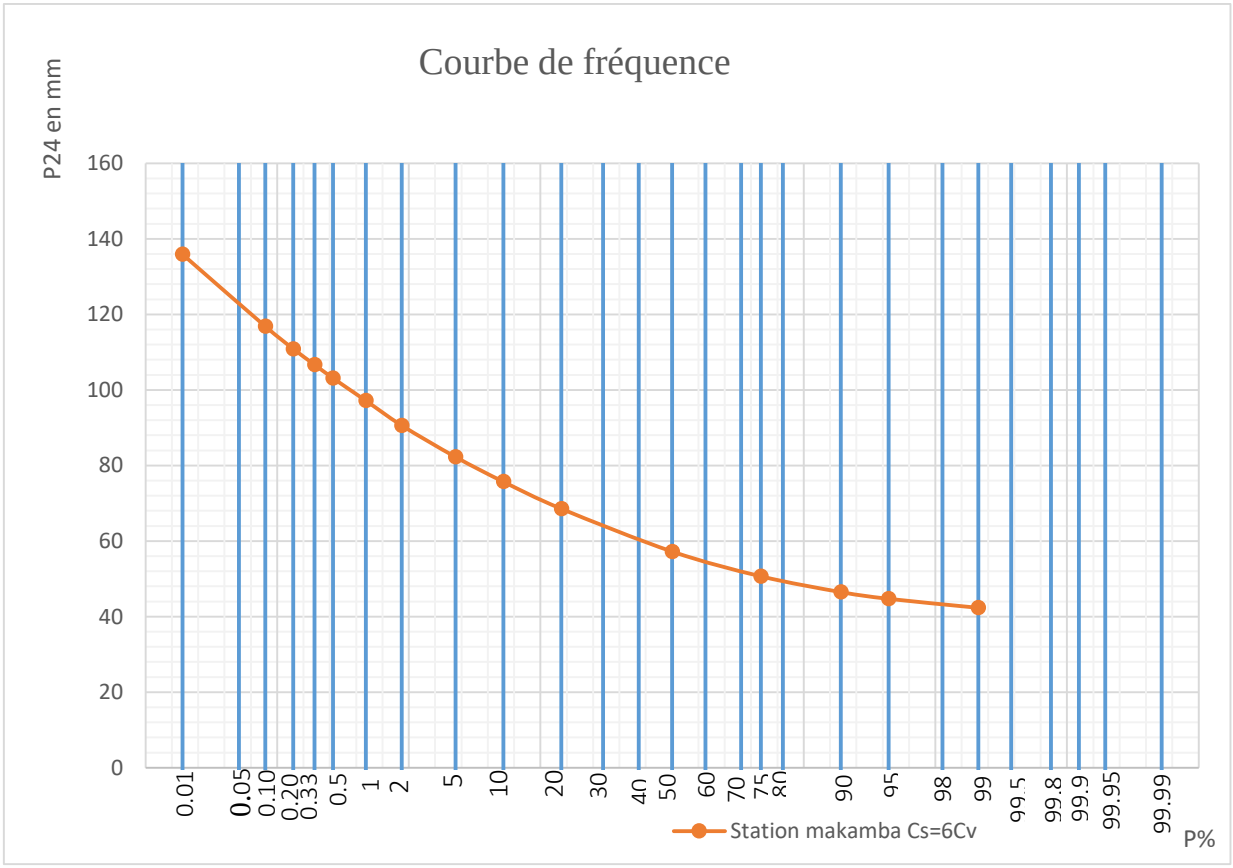


Figure II-14 : La courbe de fréquences des crues (station Makamba)

Tableau II-31 : Analyse statistique des données recueillies à la station Gisozi

Station Gisozi									
Année	P24	N°	P_{24} trié	P%	zi	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990	72,5	1	87,3	3,226	-1,849	1,455	0,455	0,207	20346,417
1991	46,3	2	79,5	6,452	-1,518	1,325	0,325	0,106	7414,875
1992	44,7	3	76,3	9,677	-1,300	1,272	0,272	0,074	4330,747
1993	41,8	4	72,5	12,903	-1,131	1,208	0,208	0,043	1953,125
1994	46,3	5	72,2	16,129	-0,989	1,203	0,203	0,041	1815,848
1995	69,1	6	70	19,355	-0,865	1,167	0,167	0,028	1000,000
1996	53,2	7	69,1	22,581	-0,753	1,152	0,152	0,023	753,571
1997	66	8	66	25,806	-0,649	1,100	0,100	0,010	216,000
1998	79,5	9	65,2	29,032	-0,552	1,087	0,087	0,008	140,608
1999	64	10	64	32,258	-0,460	1,067	0,067	0,004	64,000
2000	-	11	64	35,484	-0,372	1,067	0,067	0,004	64,000
2001	63,7	12	64	38,710	-0,287	1,067	0,067	0,004	64,000
2002	46,5	13	63,8	41,935	-0,204	1,063	0,063	0,004	54,872
2003	65,2	14	63,7	45,161	-0,122	1,062	0,062	0,004	50,653
2004	52,3	15	61,1	48,387	-0,040	1,018	0,018	0,000	1,331
2005	49,3	16	59,9	51,613	0,040	0,998	-0,002	0,000	-0,001
2006	53	17	59,4	54,839	0,122	0,990	-0,010	0,000	-0,216
2007	52	18	58,7	58,065	0,204	0,978	-0,022	0,000	-2,197
2008	64	19	58,2	61,290	0,287	0,970	-0,030	0,001	-5,832
2009	70	20	53,2	64,516	0,372	0,887	-0,113	0,013	-314,432
2010	39,7	21	53	67,742	0,460	0,883	-0,117	0,014	-343,000
2011	76,3	22	52,3	70,968	0,552	0,872	-0,128	0,016	-456,533
2012	87,3	23	52	74,194	0,649	0,867	-0,133	0,018	-512,000
2013	-	24	49,3	77,419	0,753	0,822	-0,178	0,032	-1225,043
2014	63,8	25	46,5	80,645	0,865	0,775	-0,225	0,051	-2460,375
2015	58,7	26	46,3	83,871	0,989	0,772	-0,228	0,052	-2571,353
2016	72,2	27	46,3	87,097	1,131	0,772	-0,228	0,052	-2571,353
2017	64	28	44,7	90,323	1,300	0,745	-0,255	0,065	-3581,577
2018	61,1	29	41,8	93,548	1,518	0,697	-0,303	0,092	-6028,568
2019	59,9	30	39,7	96,774	1,849	0,662	-0,338	0,114	-8365,427
2020	59,4								
2021	58,2								
							∑	1,0813556	9832,14

Tableau II-32 : Les valeurs caractéristiques d'analyses (station Gisozi)

les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{X}$	60
coefficient de divergence	Cv	0,19
coefficient d'asymétrie	Cs	0,2
	Cs/Cv	1,2

- **Calcul des précipitations extrêmes sur les données recueillies à la station Gisozi**

Les valeurs de coefficient kp correspondant à Cs= 1.2 Cv ont été trouvées par interpolation de coefficient kp respectivement associé aux valeurs de Cs=Cv et Cs =2 Cv.

Tableau II-33: Les valeurs de coefficient K_P

		Cs=Cv	Cs=2Cv
p%	Zi	K_{pi}	K_{pi}
0,01	-3,719	1,79	1,87
0,1	-3,090	1,64	1,69
0,2	-2,878	1,59	1,63
0,33	-2,716	1,55	1,59
0,5	-2,576	1,52	1,56
1	-2,326	1,47	1,49
2	-2,054	1,41	1,43
5	-1,645	1,32	1,33
10	-1,282	1,25	1,25
20	-0,842	1,16	1,16
50	0,000	0,99	0,99
75	0,674	0,87	0,87
90	1,282	0,76	0,77
95	1,645	0,70	0,71
99	2,326	0,59	0,61

Le tableau suivant présente les valeurs de coefficient K_p pour Cs égal 1.2 Cv, ainsi que les valeurs des précipitations extrêmes correspondantes à chaque probabilité.

Tableau II-34 : Précipitations extrêmes calculées à la station Gisozi

Cs= 1.2Cv			
p%	Zi	K_{pi}	Pi extrême
0,01	-3,719	1,80	107,98
0,1	-3,090	1,65	98,76
0,2	-2,878	1,59	95,69
0,33	-2,716	1,55	93,29
0,5	-2,576	1,52	91,49
1	-2,326	1,47	88,35
2	-2,054	1,41	84,75
5	-1,645	1,32	79,27
10	-1,282	1,25	75,00
20	-0,842	1,16	69,60
50	0,000	0,99	59,40
75	0,674	0,87	52,20
90	1,282	0,76	45,67
95	1,645	0,70	42,07
99	2,326	0,59	35,55

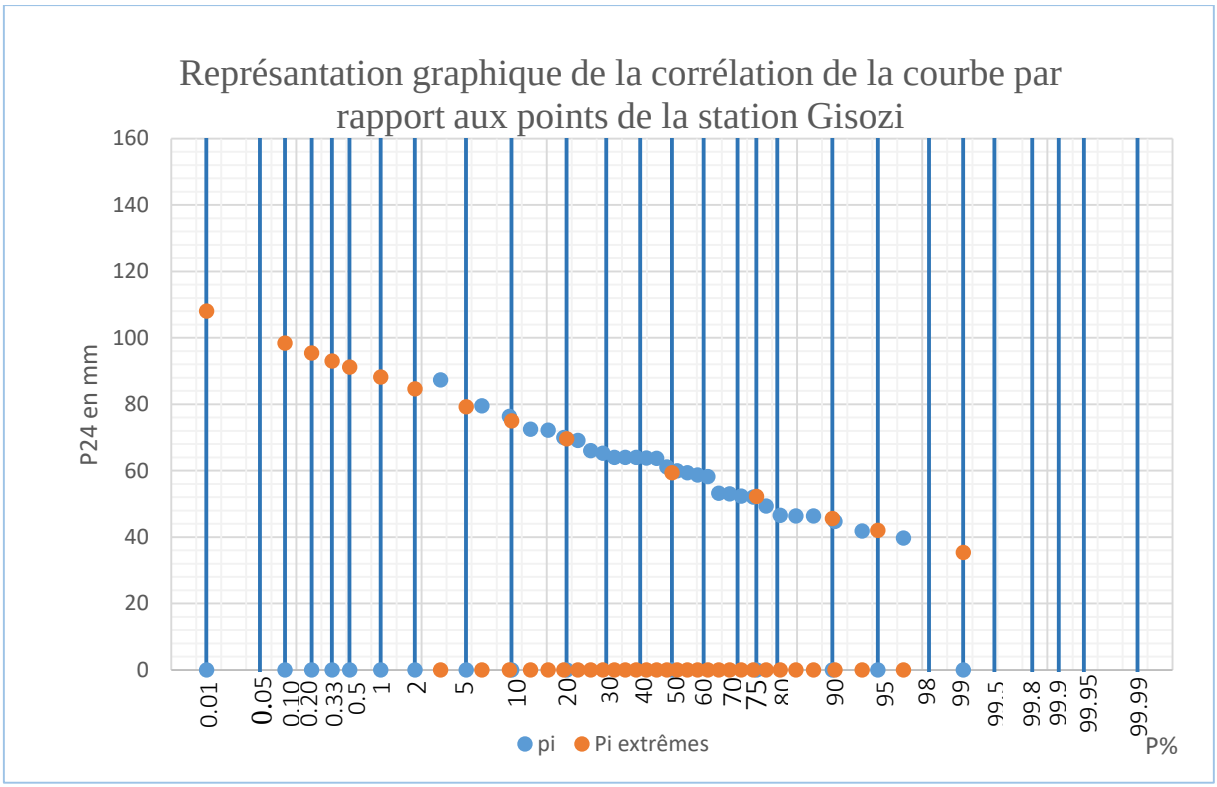


Figure II-15 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Gisozi

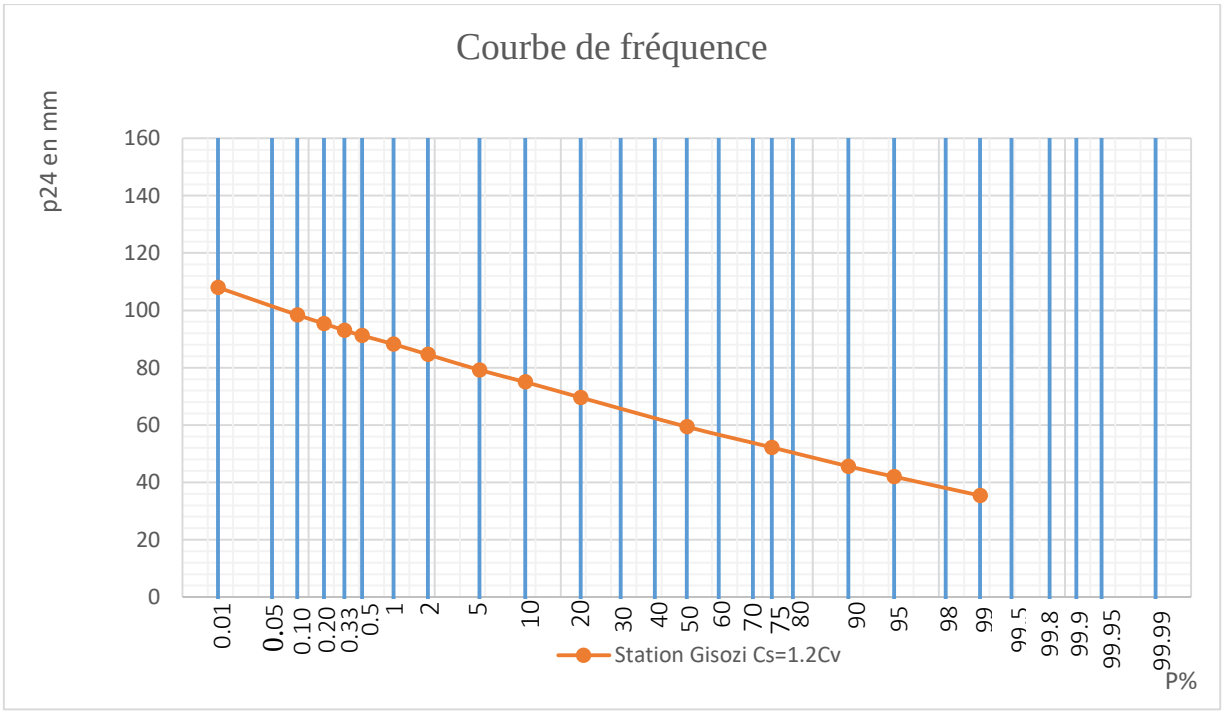


Figure II-16 : La courbe de fréquences des crues (station Gisozi)

Tableau II-35 : Analyse statistique des données recueillies à station Mpota Tora

Station Mpota Tora									
Année	P24	N°	P_{24} trié	P%	zi	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990	65,7	1	80,2	3,03	-1,88	1,463	0,463	0,215	16381,016
1991	58,6	2	77	6,06	-1,55	1,405	0,405	0,164	10936,428
1992	58,5	3	70,9	9,09	-1,34	1,294	0,294	0,086	4170,851
1993	36,4	4	67,3	12,12	-1,17	1,228	0,228	0,052	1951,661
1994	62,1	5	66,7	15,15	-1,03	1,217	0,217	0,047	1683,832
1995	41,5	6	65,7	18,18	-0,91	1,199	0,199	0,040	1293,915
1996	49,7	7	65,5	21,21	-0,80	1,195	0,195	0,038	1223,970
1997	50	8	64,6	24,24	-0,70	1,179	0,179	0,032	940,292
1998	47,4	9	62,1	27,27	-0,60	1,133	0,133	0,018	388,518
1999	70,9	10	60,3	30,30	-0,52	1,100	0,100	0,010	166,092
2000	48,6	11	58,6	33,33	-0,43	1,069	0,069	0,005	54,737
2001	43	12	58,5	36,36	-0,35	1,067	0,067	0,005	50,525
2002	40	13	55,5	39,39	-0,27	1,013	0,013	0,000	0,338
2003	48,7	14	55,3	42,42	-0,19	1,009	0,009	0,000	0,123
2004	47,5	15	54,9	45,45	-0,11	1,002	0,002	0,000	0,001
2005	39,2	16	54,3	48,48	-0,04	0,991	-0,009	0,000	-0,127
2006	66,7	17	53,7	51,52	0,04	0,980	-0,020	0,000	-1,342
2007	65,5	18	53,4	54,55	0,11	0,974	-0,026	0,001	-2,762
2008	48,8	19	50	57,58	0,19	0,912	-0,088	0,008	-110,808
2009	53,7	20	49,7	60,61	0,27	0,907	-0,093	0,009	-132,895
2010	80,2	21	48,8	63,64	0,35	0,890	-0,110	0,012	-216,338
2011	67,3	22	48,7	66,67	0,43	0,889	-0,111	0,012	-227,330
2012	54,9	23	48,6	69,70	0,52	0,887	-0,113	0,013	-238,689
2013	55,5	24	47,6	72,73	0,60	0,869	-0,131	0,017	-373,734
2014	55,3	25	47,5	75,76	0,70	0,867	-0,133	0,018	-389,517
2015	60,3	26	47,4	78,79	0,80	0,865	-0,135	0,018	-405,738
2016	40,8	27	43	81,82	0,91	0,785	-0,215	0,046	-1644,338
2017	53,4	28	41,5	84,85	1,03	0,757	-0,243	0,059	-2354,296
2018	64,6	29	40,8	87,88	1,17	0,744	-0,256	0,065	-2745,838
2019	54,3	30	40	90,91	1,34	0,730	-0,270	0,073	-3243,846
2020	47,6	31	39,2	93,94	1,55	0,715	-0,285	0,081	-3798,698
2021	77	32	36,4	96,97	1,88	0,664	-0,336	0,113	-6232,679
							∑	1,26	17123,32

Tableau II-36 : Les valeurs caractéristiques d'analyses (station Mpota tora)

les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{X}$	54,80
coefficient de divergence	Cv	0,20
coefficient d'asymétrie	Cs	0,44
	Cs/Cv	2,2

- **Calcul des précipitations extrêmes sur les données recueillies à la station Mpota Tora**

Les valeurs de coefficient kp correspondant à Cs= 2.2 Cv ont été trouvées par interpolation de coefficient kp respectivement associé aux valeurs de Cs=2Cv et Cs =2.5 Cv.

Tableau II-37: Les valeurs de coefficient K_p

		Cs=2Cv	Cs=2,5Cv
p%	Zi	K_{pi}	K_{pi}
0,01	-3,719	1,92	1,97
0,1	-3,090	1,73	1,76
0,2	-2,878	1,67	1,7
0,33	-2,716	1,63	1,65
0,5	-2,576	1,59	1,61
1	-2,326	1,52	1,54
2	-2,054	1,45	1,46
5	-1,645	1,35	1,35
10	-1,282	1,26	1,26
20	-0,842	1,16	1,16
50	0,000	0,99	0,98
75	0,674	0,86	0,86
90	1,282	0,75	0,76
95	1,645	0,70	0,7
99	2,326	0,59	0,61

Le tableau suivant présente les valeurs de coefficient K_p pour Cs égal 2.2 Cv, ainsi que les valeurs des précipitations extrêmes correspondantes à chaque probabilité.

Tableau II-38 : Précipitations extrêmes calculées à la station Mpota tara

Cs=2,2Cv			
p%	Zi	K_{pi}	Pi extrêmes
0,01	-3,719	1,93	105,820
0,1	-3,090	1,74	95,168
0,2	-2,878	1,68	91,880
0,33	-2,716	1,63	89,568
0,5	-2,576	1,59	87,376
1	-2,326	1,52	83,540
2	-2,054	1,45	79,584
5	-1,645	1,35	73,984
10	-1,282	1,26	69,052
20	-0,842	1,16	63,572
50	0,000	0,99	54,135
75	0,674	0,86	47,131
90	1,282	0,75	41,222
95	1,645	0,70	38,362
99	2,326	0,59	32,573

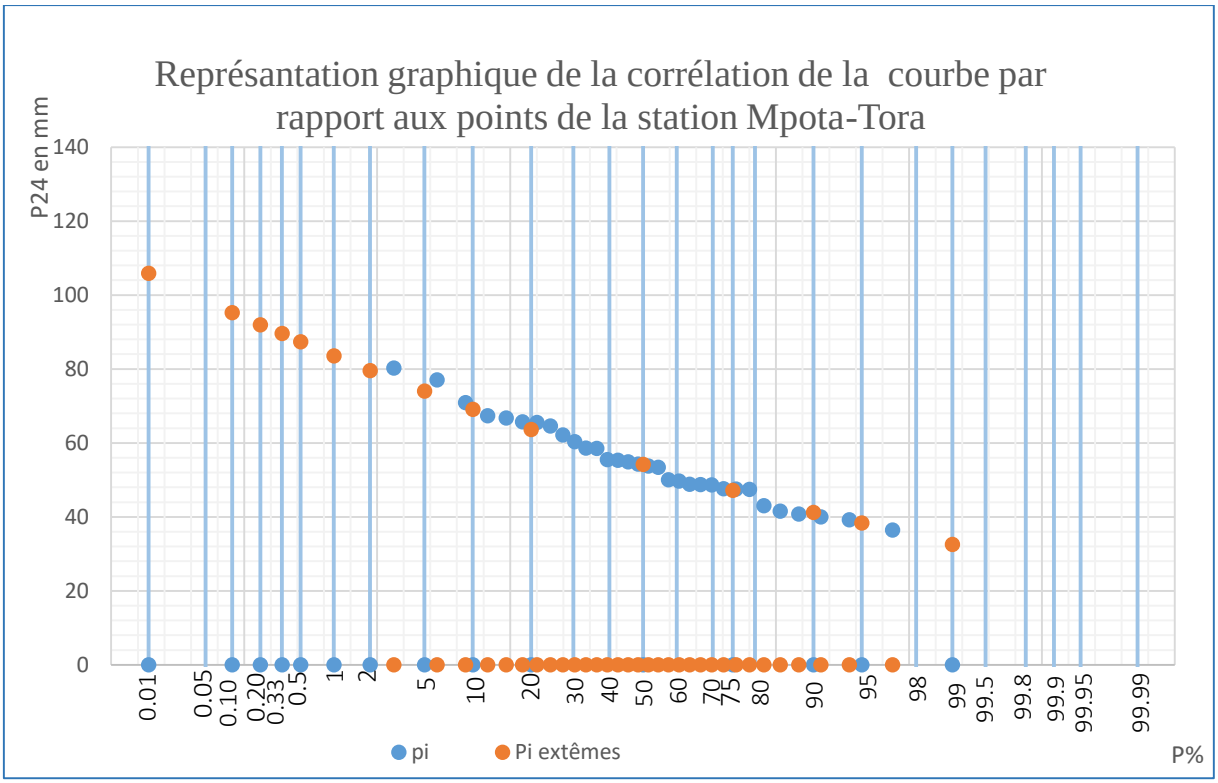


Figure II-17 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Mpota-Tora

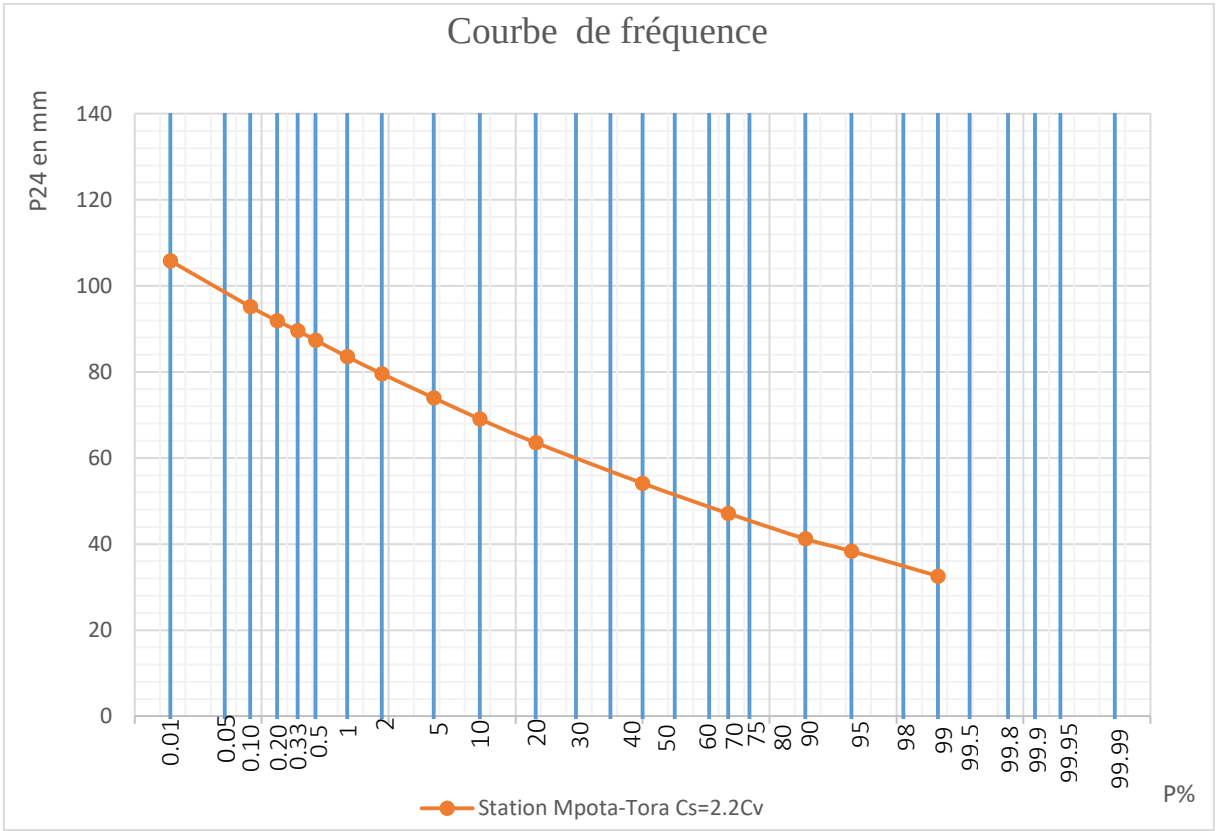


Figure II-18 : La courbe de fréquences des crues (Mpota Tora)

Tableau II-39 : Analyse statistique des données recueillies à la station Vyanda-Rweza

Vyanda-Rweza									
Année	P24	N°	P_{24} trié	P%	zi	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990	59	1	71,4	3,13	-1,86	1,265	0,265	0,070	3357,611
1991	61,4	2	69,4	6,25	-1,53	1,230	0,230	0,053	2183,942
1992	56,2	3	66,3	9,38	-1,32	1,175	0,175	0,031	962,731
1993	63,9	4	66	12,50	-1,15	1,170	0,170	0,029	877,620
1994	66,3	5	66	15,63	-1,01	1,170	0,170	0,029	877,620
1995	58,9	6	63,9	18,75	-0,89	1,132	0,132	0,018	417,535
1996	58,5	7	61,9	21,88	-0,78	1,097	0,097	0,009	164,044
1997	71,4	8	61,4	25,00	-0,67	1,088	0,088	0,008	123,074
1998	44,8	9	60,9	28,13	-0,58	1,079	0,079	0,006	89,566
1999	51,2	10	59	31,25	-0,49	1,046	0,046	0,002	17,058
2000	54	11	59	34,38	-0,40	1,046	0,046	0,002	17,058
2001	50,4	12	58,9	37,50	-0,32	1,044	0,044	0,002	15,146
2002	51,2	13	58,5	40,63	-0,24	1,037	0,037	0,001	8,924
2003	61,9	14	57,3	43,75	-0,16	1,015	0,015	0,000	0,668
2004	54,5	15	57	46,88	-0,08	1,010	0,010	0,000	0,189
2005	69,4	16	57	50,00	0,00	1,010	0,010	0,000	0,189
2007	47,1	17	56,4	53,13	0,08	1,000	0,000	0,000	0,000
2008	56,4	18	56,2	56,25	0,16	0,996	-0,004	0,000	-0,012
2009	57,3	19	54,5	59,38	0,24	0,966	-0,034	0,001	-7,142
2010	60,9	20	54	62,50	0,32	0,957	-0,043	0,002	-14,275
2011	51	21	51,2	65,63	0,40	0,907	-0,093	0,009	-142,712
2012	44,3	22	51,2	68,75	0,49	0,907	-0,093	0,009	-142,712
2013	57	23	51	71,88	0,58	0,904	-0,096	0,009	-159,732
2014	49,2	24	50,8	75,00	0,67	0,900	-0,100	0,010	-178,055
2015	59	25	50,4	78,13	0,78	0,893	-0,107	0,011	-218,799
2016	66	26	49,2	81,25	0,89	0,872	-0,128	0,016	-377,276
2017	45,2	27	49	84,38	1,01	0,868	-0,132	0,017	-409,478
2018	66	28	47,1	87,50	1,15	0,835	-0,165	0,027	-811,072
2019	49	29	45,2	90,63	1,32	0,801	-0,199	0,040	-1414,662
2020	50,8	30	44,8	93,75	1,53	0,794	-0,206	0,042	-1571,337
2021	57	31	44,3	96,88	1,86	0,785	-0,215	0,046	-1782,920
							∑	0,50	1882,79

Tableau II-40 : Les valeurs caractéristiques d'analyse (station Vyanda-Rweza)

les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{X}$	56,43
coefficient de divergence	Cv	0,13
coefficient d'asymétrie	Cs	0,17
	Cs/Cv	1,3

- **Calcul des précipitations extrêmes sur les données recueillies à la station Vyanda-Rweza**

Le rapport Cs/Cv =1.3 les valeurs correspondantes de coefficient kp pour les courbes de fréquences de Pearson III sont trouvés par l'interpolation entre Cs=Cv et Cs=2Cv

Tableau II-41: Les valeurs de coefficient K_p

		Cs=Cv	**Cs=2Cv**
p%	**zi**	**kp**	**kp**
0,01	-3,719	1,52	1,57
0,1	-3,090	1,43	1,46
0,2	-2,878	1,39	1,42
0,33	-2,716	1,37	1,39
0,5	-2,576	1,35	1,37
1	-2,326	1,32	1,33
2	-2,054	1,28	1,29
5	-1,645	1,22	1,22
10	-1,282	1,17	1,17
20	-0,842	1,11	1,11
50	0,000	1	0,99
75	0,674	0,92	0,91
90	1,282	0,84	0,84
95	1,645	0,8	0,8
99	2,326	0,71	0,73

Le tableau suivant présente les valeurs de coefficient K_p pour Cs égal 1.3 Cv, ainsi que les valeurs des précipitations extrêmes correspondantes à chaque probabilité.

Tableau II-42 : Précipitations extrêmes calculées à la station Vyanda -Gweza

Cs=1,3Cv			
p%	zi	K_{pi}	Pi extrême
0,01	-3,719	1,53	86,1
0,1	-3,090	1,43	80,9
0,2	-2,878	1,39	78,7
0,33	-2,716	1,37	77,5
0,5	-2,576	1,35	76,3
1	-2,326	1,32	74,6
2	-2,054	1,28	72,3
5	-1,645	1,22	68,8
10	-1,282	1,17	66,0
20	-0,842	1,11	62,6
50	0,000	1,00	56,3
75	0,674	0,92	51,8
90	1,282	0,84	47,4
95	1,645	0,80	45,1
99	2,326	0,71	40,2

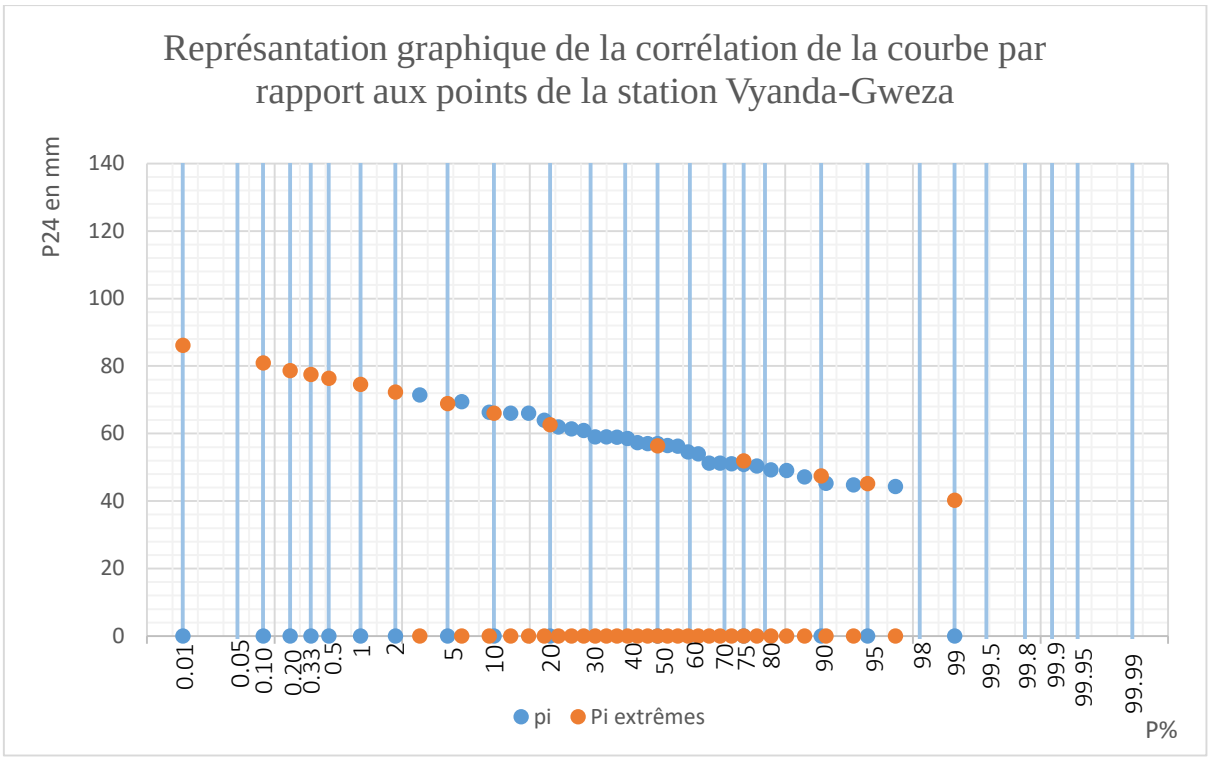


Figure II-19 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Vyanda-Gweza

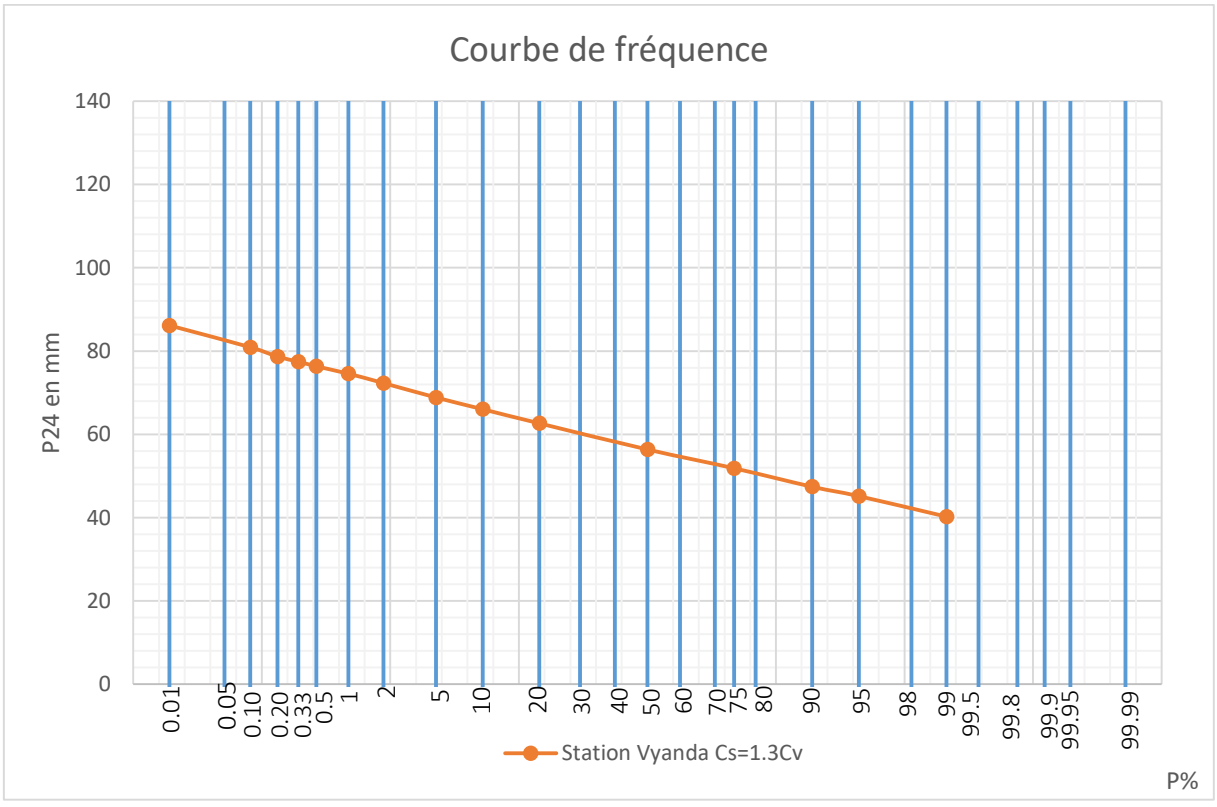


Figure II-20 : La courbe de fréquences des crues (Vyanda-Rweza)

Tableau II-43 : Analyse statistique données recueillies à station Nyanza-Lac

Station Nyanza Lac									
ANNEE	P24	N°	P_{24} trié	P%	zi	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990		1	121,4	3,13	-1,86	1,674	0,674	0,454	116629,597
1991	121,4	2	110,9	6,25	-1,53	1,529	0,529	0,280	56437,797
1992	89,5	3	108,9	9,38	-1,32	1,501	0,501	0,251	48062,047
1993	70	4	93	12,50	-1,15	1,282	0,282	0,080	8562,363
1994	63	5	89,5	15,63	-1,01	1,234	0,234	0,055	4876,732
1995	66	6	87	18,75	-0,89	1,199	0,199	0,040	3022,251
1996	39,5	7	80	21,88	-0,78	1,103	0,103	0,011	414,838
1997	74,1	8	78	25,00	-0,67	1,075	0,075	0,006	162,598
1998	80	9	75	28,13	-0,58	1,034	0,034	0,001	14,852
1999	63	10	75	31,25	-0,49	1,034	0,034	0,001	14,852
2000	66	11	74,1	34,38	-0,40	1,021	0,021	0,000	3,782
2001	75	12	72,2	37,50	-0,32	0,995	-0,005	0,000	-0,040
2002	68	13	70	40,63	-0,24	0,965	-0,035	0,001	-16,425
2003	78	14	69,6	43,75	-0,16	0,959	-0,041	0,002	-25,462
2004	75	15	69,1	46,88	-0,08	0,953	-0,047	0,002	-40,776
2005	65	16	68	50,0	0,00	0,937	-0,063	0,004	-93,696
2006	93	17	67,7	53,13	0,08	0,933	-0,067	0,004	-113,516
2007	87	18	67,7	56,25	0,16	0,933	-0,067	0,004	-113,516
2008	61,9	19	67,2	59,38	0,24	0,926	-0,074	0,005	-152,439
2009	67,7	20	66	62,50	0,32	0,910	-0,090	0,008	-279,975
2010	56,2	21	66	65,63	0,40	0,910	-0,090	0,008	-279,975
2011	72,2	22	65	68,75	0,49	0,896	-0,104	0,011	-428,991
2012	108,9	23	63	71,88	0,58	0,868	-0,132	0,017	-868,779
2013	61,7	24	63	75,00	0,67	0,868	-0,132	0,017	-868,779
2014	69,1	25	61,9	78,13	0,78	0,853	-0,147	0,022	-1205,208
2015	56	26	61,7	81,25	0,89	0,851	-0,149	0,022	-1274,443
2016	67,7	27	60,9	84,38	1,01	0,840	-0,160	0,026	-1577,886
2017	45,3	28	56,2	87,50	1,15	0,775	-0,225	0,051	-4364,259
2018	110,9	29	56	90,63	1,32	0,772	-0,228	0,052	-4526,463
2019	60,9	30	45,3	93,75	1,53	0,624	-0,376	0,141	-20216,868
2020	69,6	31	39,5	96,88	1,86	0,545	-0,455	0,207	-36074,177
2021	67,2						$\sum$	1,78	165680,04

Tableau II-44:Les valeurs caractéristiques d'analyse (station Nyanza lac)

les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{X}$	72,54
coefficient de divergence	Cv	0,24
coefficient d'asymétrie	Cs	1,07
	Cs/Cv	4,4

Calcul des précipitations extrêmes sur les données recueillies sur la station Nyanza lac

Les valeurs de coefficient k_p correspondant à Cs= 4.4 Cv ont été trouvées par interpolation de coefficient k_p respectivement associé aux valeurs de Cs=4Cv et Cs =5 Cv.

Tableau II-45: Les valeurs de coefficient K_p

		Cs=4Cv	**Cs=5Cv**
p%	Zi	K_{pi}	K_{pi}
0,01	-3,719	2,41	2,63
0,1	-3,090	2,07	2,22
0,2	-2,878	1,97	2,1
0,33	-2,716	1,89	2
0,5	-2,576	1,83	1,93
1	-2,326	1,72	1,8
2	-2,054	1,61	1,66
5	-1,645	1,45	1,48
10	-1,282	1,32	1,34
20	-0,842	1,18	1,18
50	0,000	0,96	0,95
75	0,674	0,82	0,81
90	1,282	0,73	0,84
95	1,645	0,68	0,69
99	2,326	0,61	0,65

Le tableau suivant présente les valeurs de coefficient K_p pour Cs égal 4.4 Cv, ainsi que les valeurs des précipitations extrêmes correspondantes à chaque probabilité.

Tableau II-46 : Précipitations extrêmes calculées sur la station Nyanza- lac

Cs=4,4Cv			
p%	zi	K_{pi}	Pi extrême
0,01	-3,719	2,551	185,08
0,1	-3,090	2,169	157,38
0,2	-2,878	2,055	149,08
0,33	-2,716	1,966	142,64
0,5	-2,576	1,896	137,56
1	-2,326	1,778	128,95
2	-2,054	1,649	119,61
5	-1,645	1,474	106,95
10	-1,282	1,340	97,21
20	-0,842	1,186	86,01
50	0,000	0,956	69,32
75	0,674	0,816	59,17
90	1,282	0,720	52,23
95	1,645	0,679	49,24
99	2,326	0,622	45,12

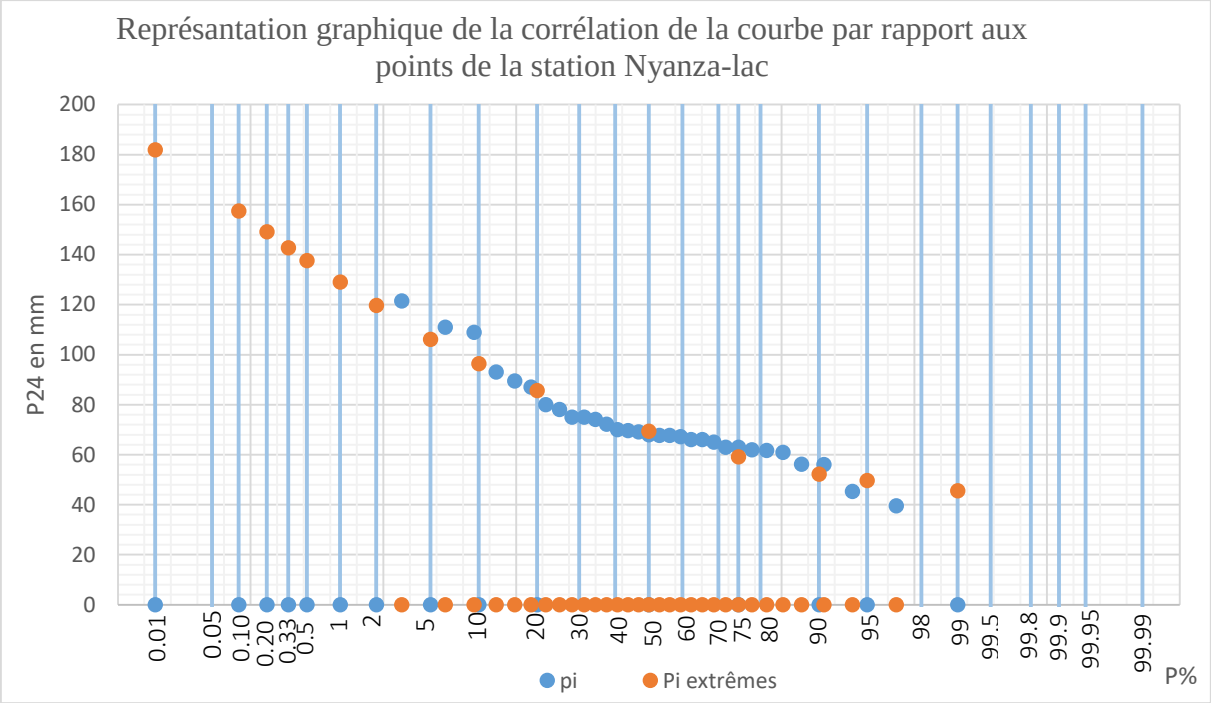


Figure II-21 : La corrélation de la courbe par rapport aux points la station Nyanza- lac

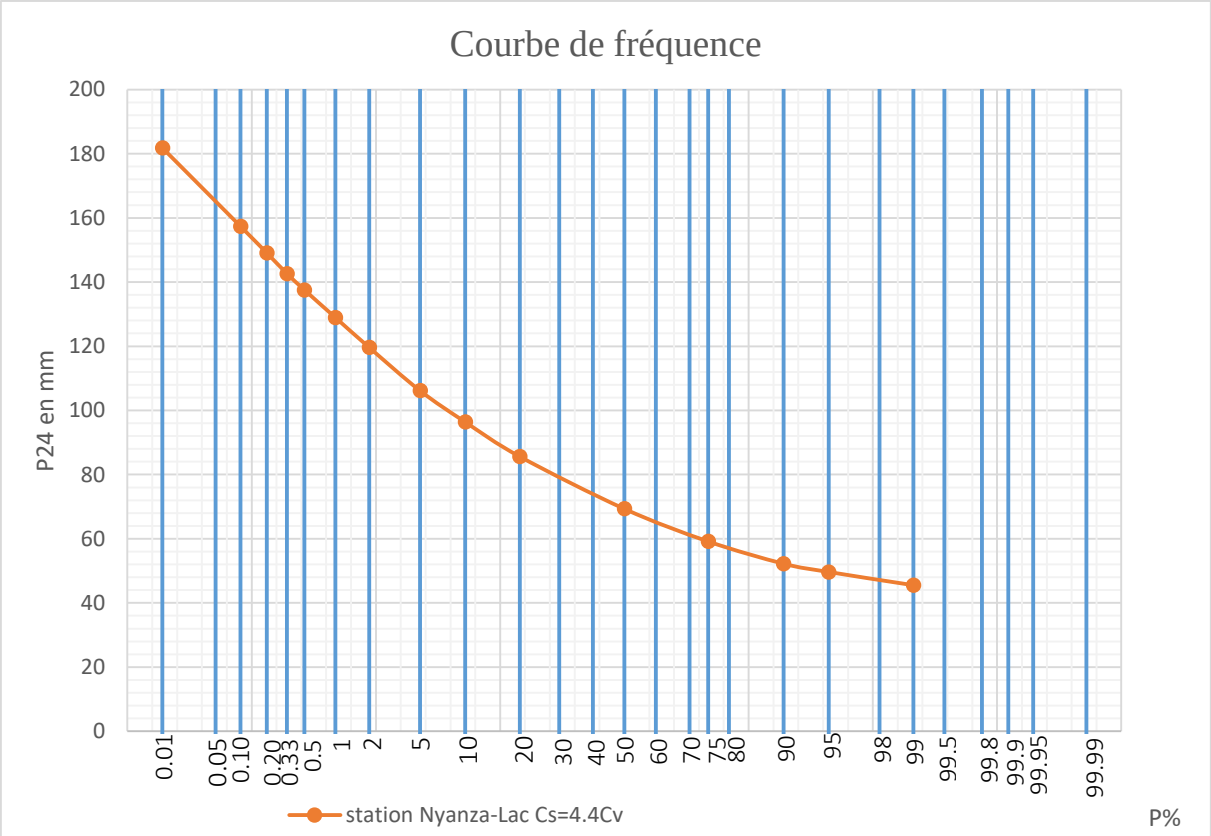


Figure II-22 : La courbe de fréquences des crues (Nyanza-lac)

Tableau II-47 : Analyse statistique données recueillies à la station Bugarama

ANNEE	P24	N°	P_{24} trié	P%	zi	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(xi-$\bar{x}$)^3
1990	60,2	1	117	3,45	-1,82	2,11	1,11	1,22	231758,41
1991	34,6	2	81,8	6,90	-1,48	1,47	0,47	0,22	18036,26
1992	62,1	3	67,1	10,34	-1,26	1,21	0,21	0,04	1530,82
1993	55,7	4	66,1	13,79	-1,09	1,19	0,19	0,04	1165,91
1994	38,5	5	65,5	17,24	-0,94	1,18	0,18	0,03	977,67
1995	42,3	6	64,8	20,69	-0,82	1,17	0,17	0,03	785,05
1996	50,8	7	62,1	24,14	-0,70	1,12	0,12	0,01	277,81
1997	40,5	8	62	27,59	-0,60	1,12	0,12	0,01	265,23
1998	62	9	60,4	31,03	-0,49	1,09	0,09	0,01	112,33
1999	117	10	60,2	34,48	-0,40	1,08	0,08	0,01	98,93
2000	33,9	11	60,2	37,93	-0,31	1,08	0,08	0,01	98,93
2001	60,4	12	58,4	41,38	-0,22	1,05	0,05	0,00	22,55
2002	67,1	13	57,6	44,83	-0,13	1,04	0,04	0,00	8,30
2003	50,2	14	55,7	48,28	-0,04	1,00	0,00	0,00	0,00
2004	35,2	15	54,6	51,72	0,04	0,98	-0,02	0,00	-0,93
2005	38,5	16	53,7	55,17	0,13	0,97	-0,03	0,00	-6,59
2006	50,9	17	50,9	58,62	0,22	0,92	-0,08	0,01	-102,18
2007	58,4	18	50,9	62,07	0,31	0,92	-0,08	0,01	-102,18
2008	53,7	19	50,8	65,52	0,40	0,91	-0,09	0,01	-108,87
2009	66,1	20	50,2	68,97	0,49	0,90	-0,10	0,01	-155,29
2010	54,6	21	42,6	72,41	0,60	0,77	-0,23	0,05	-2184,35
2011	42,6	22	42,3	75,86	0,70	0,76	-0,24	0,06	-2339,40
2012	50,9	23	40,5	79,31	0,82	0,73	-0,27	0,07	-3425,88
2013	60,2	24	38,5	82,76	0,94	0,69	-0,31	0,09	-4978,31
2014	81,8	25	38,5	86,21	1,09	0,69	-0,31	0,09	-4978,31
2015	57,6	26	35,2	89,66	1,26	0,63	-0,37	0,13	-8458,49
2016	64,8	27	34,6	93,10	1,48	0,62	-0,38	0,14	-9227,96
2017	-	28	33,9	96,55	1,82	0,61	-0,39	0,15	-10183,04
2018	-						∑	2,47	208886,43
2019	65,5								
2020	-								
2021	-								

Tableau II-48 : Les valeurs caractéristiques d'analyse (station Bugarama)

les valeurs caractéristiques de la distribution		
Moyenne de x	$\bar{X}$	55,58
coefficient de divergence	Cv	0,30
coefficient d'asymétrie	Cs	1,8
	Cs/Cv	6

- **Calcul des précipitations extrêmes sur les données recueillies à la station Bugarama**

Comme le rapport Cs/Cv=6, les valeurs de coefficient K_p pour les courbes de fréquence de Pearson III sont lus sur le tableau CS=6CV.

Tableau II-49 : Précipitations extrêmes calculées à la station Nyanza- lac

Cs=6Cv			
p%	zi	K_{pi}	Pi extrême
0,01	-3,719	3,33	185,06
0,1	-3,090	2,69	149,50
0,2	-2,878	2,5	138,94
0,33	-2,716	2,36	131,16
0,5	-2,576	2,24	124,49
1	-2,326	2,05	113,93
2	-2,054	1,86	103,37
5	-1,645	1,59	88,36
10	-1,282	1,4	77,81
20	-0,842	1,19	66,13
50	0,000	0,92	51,13
75	0,674	0,78	43,35
90	1,282	0,72	40,01
95	1,645	0,69	38,35
99	2,326	0,67	37,24

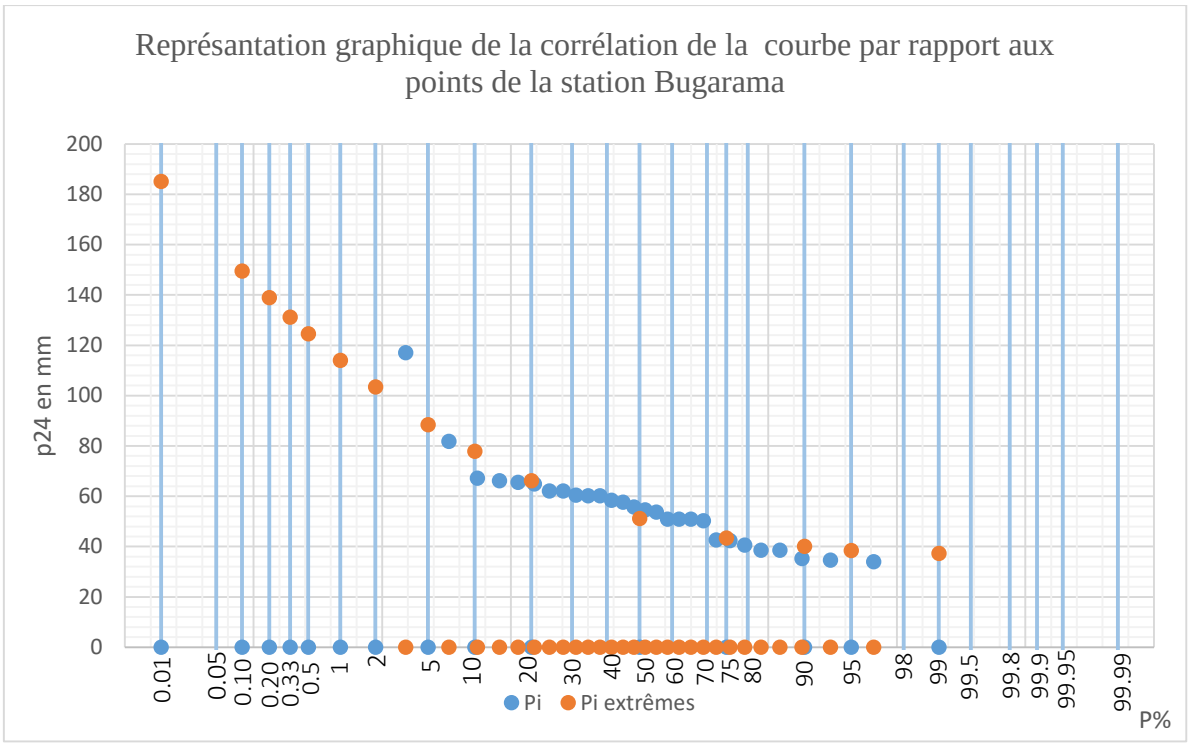


Figure II-23 : La corrélation de la Courbe par rapport aux points de la station Bugarama

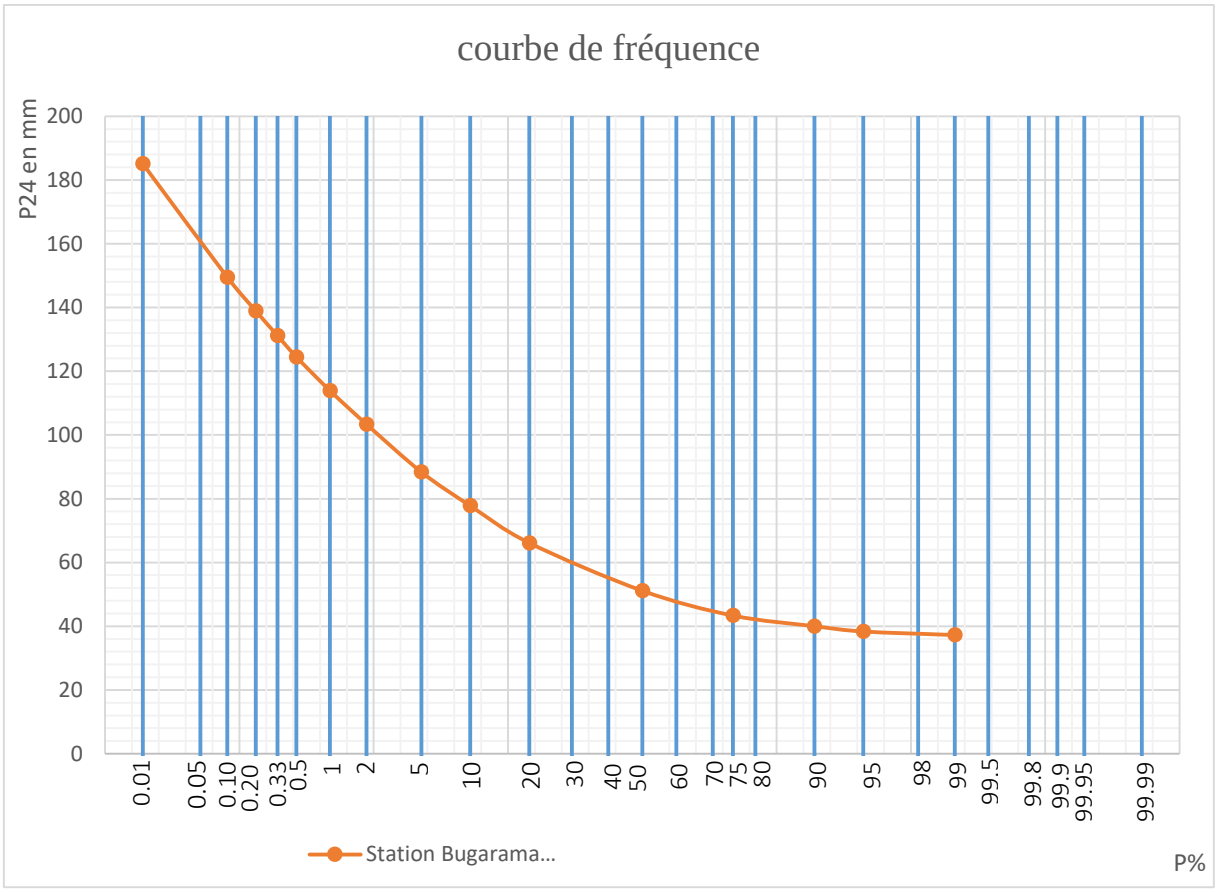


Figure II-24 : La courbe de fréquences des crues (Bugarama)

II.3 Discussion des résultats

La loi de Pearson III, celle choisie comme pouvant plus ou moins prédire avec exactitude les précipitations extrêmes correspondantes à chaque période de retour, suite à la corrélation remarquée sur les représentations graphiques des courbes de fréquences des précipitations pour chaque station météorologique.

De plus les résultats des précipitations extrêmes obtenu après l'analyse fréquentielle ont confirmé la logique disant que pour la valeur de la probabilité d'apparition est inversement proportionnelle aux valeurs des précipitations extrêmes.

Afin de s'assurer du niveau de fiabilité des résultats obtenus, nous avons mené une étude comparative entre les précipitations extrêmes observées sur chaque station pour une probabilité d'apparition de 99% et les précipitations n'ayant pas connu aucun traitement. Le résultat de cette étude a été que les deux valeurs comparées sont de plus en plus proches ce qui rend les cartes produites exploitables.

CHAPITREIII: REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ISOHYETES EXTREMES

III.1 Généralité

L'objectif principal du présent travail étant de produire une carte nationale des isohyètes pour différentes probabilités nous conduisant à savoir les cas les plus extrêmes issues de la courbe de fréquence. Il s'agit donc des cartes correspondantes à des probabilités suivantes : p=0.1%, p=0.2%, p=0.5%, p=1%, p=2%.

Les cartes des isohyètes correspondants à d'autres probabilités pourront être facilement élaborées partant de la même méthode suivant les valeurs des crues montrées sur les courbes de fréquences existantes dans le présent travail.

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. Ce sont ces données calculées sur chaque station à l'aide de l'outil informatique ARCGIS, qui produiront des cartes des isohyètes extrêmes représentées sur les pages suivantes.

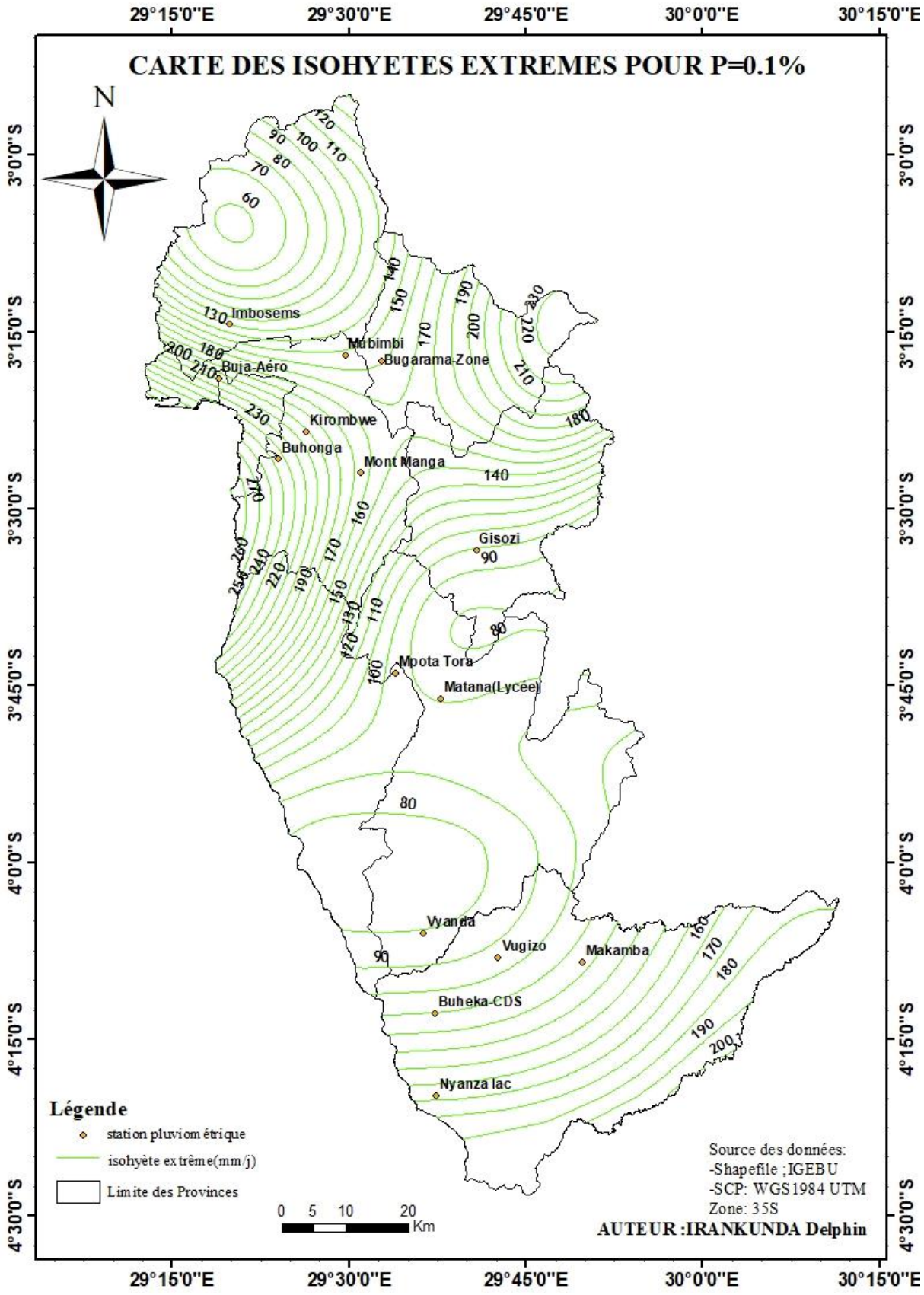


Figure III-1: Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 0.1%

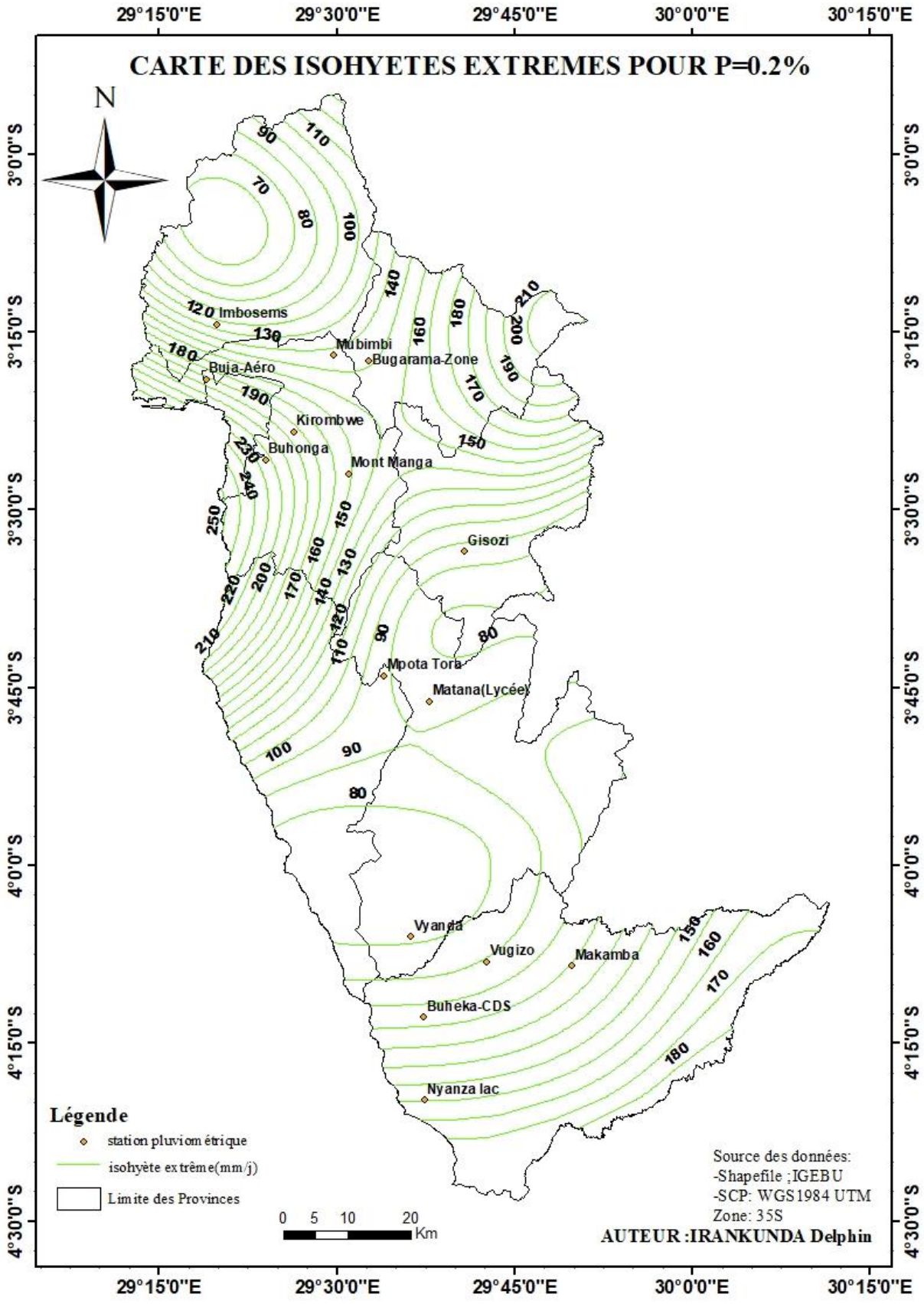


Figure III-2:Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 0.2%

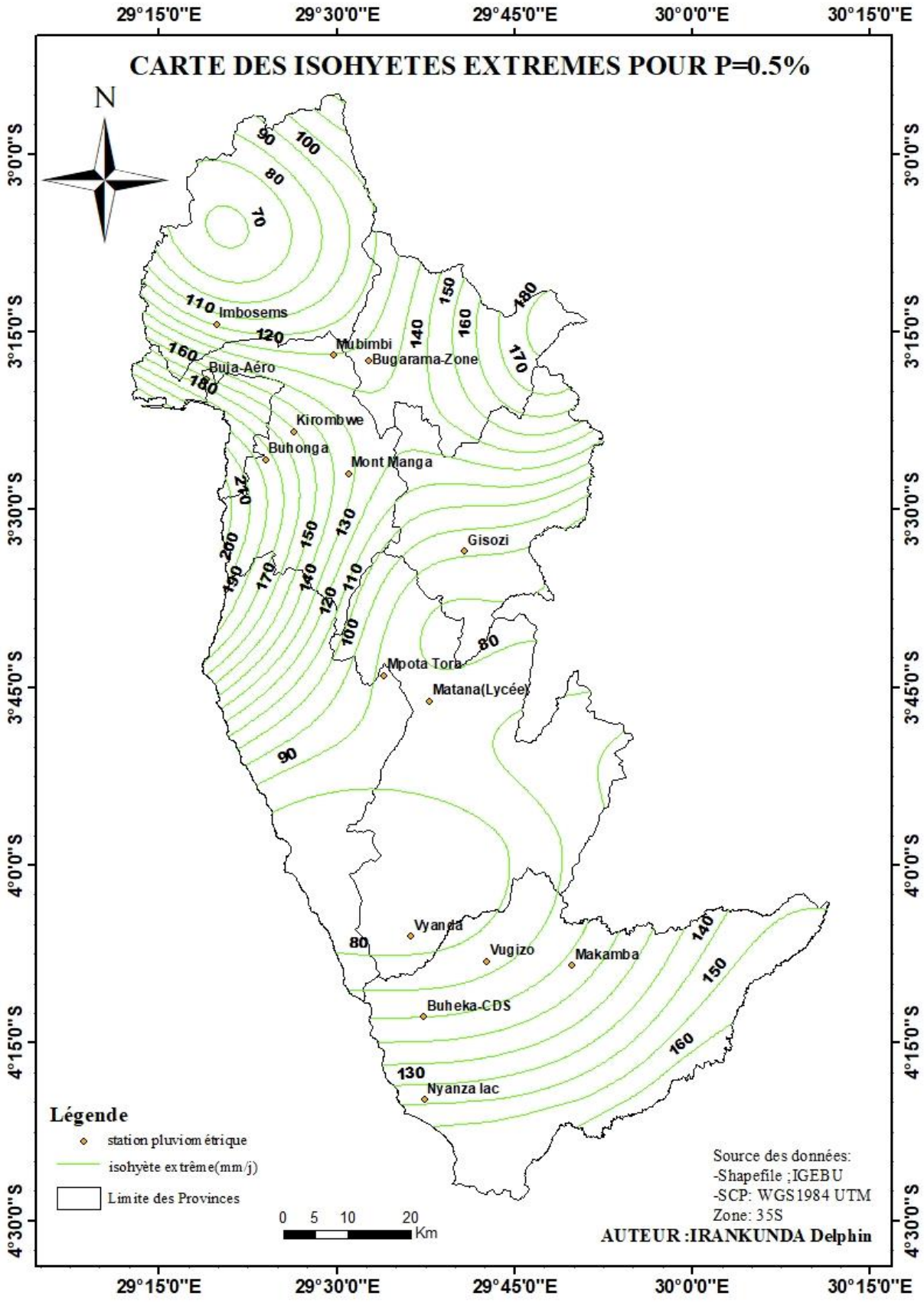


Figure III-3 : Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 0.5%

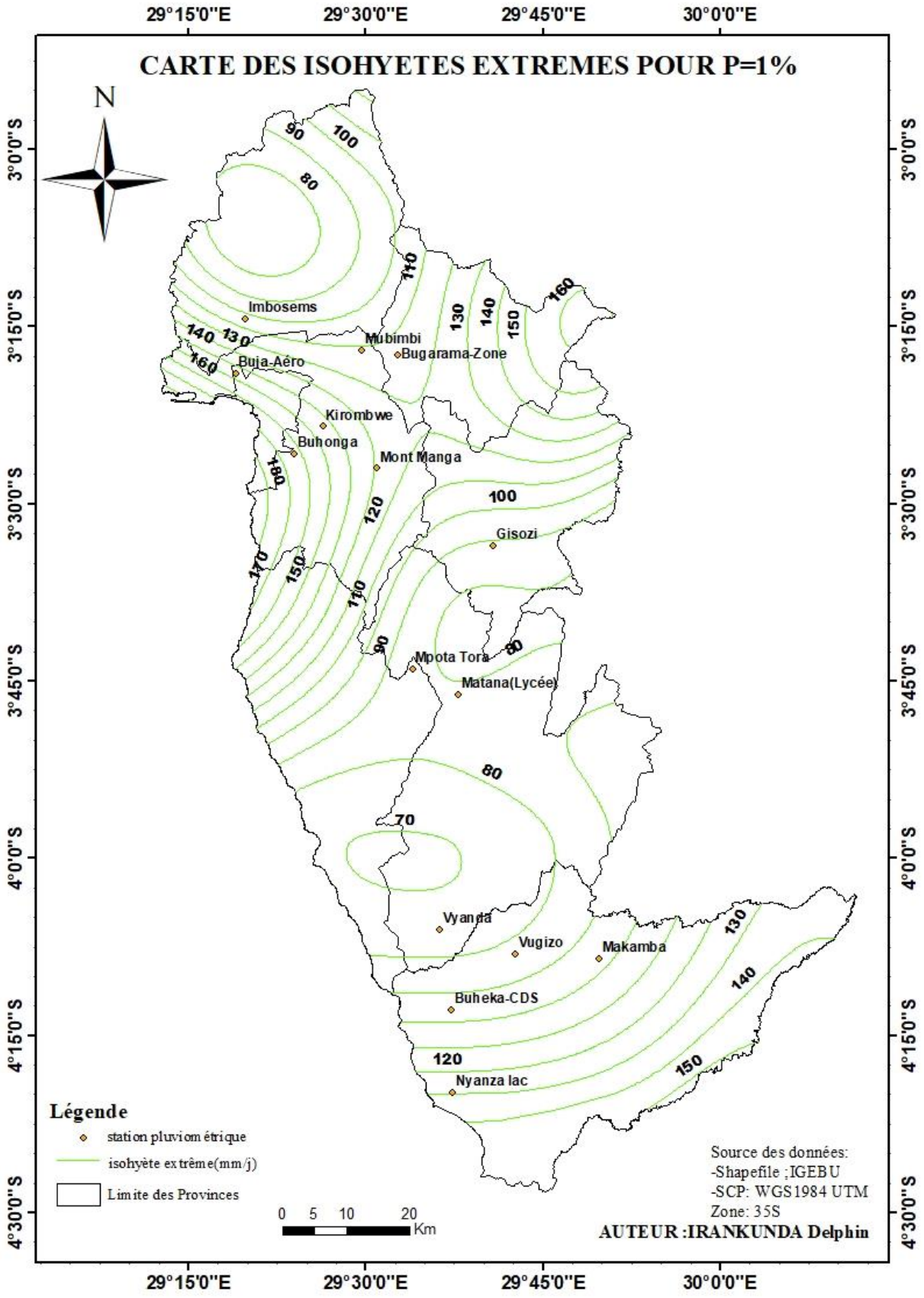


Figure III-4 : Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 1%

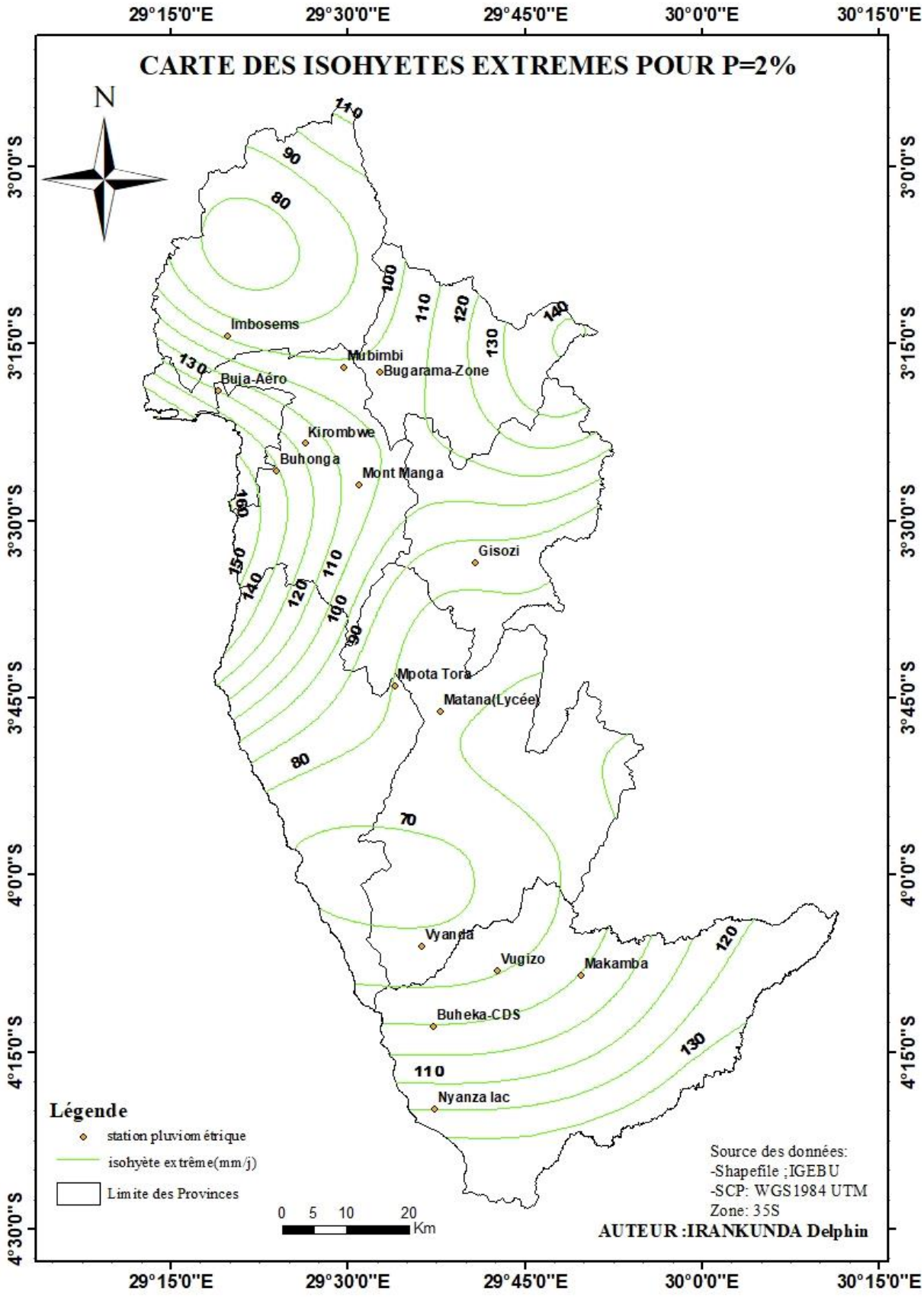


Figure III-5 : Carte des isohyètes extrêmes pour la probabilité de 2%

CHAPITREIV: CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

IV.1 Conclusion

Les caractéristiques statistiques des précipitations ont une certaine structure spatiale. Ainsi avoir une vue d'ensemble sur la variabilité spatiale et temporelle des précipitations est très importante en hydrologie ce qui demande une représentation cartographique.

Le présent mémoire vient de faire un pas dans la solution du problème de non exploitation des données de l'IGEBU pour donner des informations utiles aux études faites dans des domaines variés , en l'occurrence le domaine de l'agriculture, le domaine d'assainissement, le domaine de la production d'énergie etc.

La carte nationale des isohyètes extrêmes est une nouvelle information, 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.

En effet, avec la carte nationale des isohyètes extrêmes, pour un site donné, il suffira de choisir le temps de retour de la crue du projet, et consulter directement l'isohyète qui 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 arrêté sur 5 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

Ce travail ne peut être achevé sans signaler quelques recommandations aux différentes personnes physiques ou morales ayant un intérêt direct ou indirect en rapport avec ce sujet :

- Au gouvernement du Burundi de remplacer les stations météorologiques et hydrométriques qui ne sont plus fonctionnelles et densifier le réseau de ces stations tout en les équipant des appareils modernes automatiques pour pallier aux absences de lectures.
- A l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU), nous le recommandons de faciliter l'accès aux données hydrométéorologiques et les rendre disponibles pour ceux qui veulent faire des recherches.
- Aux futurs chercheurs intéressés par le domaine ou IGEBU, d'élaborer les autres cartes des isohyètes extrêmes pour les autres probabilités restantes.
- A l'université du Burundi, nous aimerions demander l'accompagnement des étudiants lors de la préparation des travaux de fin d'études par des moyens financiers en plus des moyens matériels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Dubreuil, P.** (1974). Initiation à l'analyse hydrologique. Paris: Masson et Cie.
- **IGEBU**. (2010). Rapport Hydrologique annuel du Burundi. Gitega.
- **Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme**. (2010). Deuxième Communication Nationale sur les Changements Climatiques "DCNCC". Bujumbura, 2010.
- **Musy, André et Higy, Christophe**. (1998). Hydrologie appliquée. Bucarest : H*G*A, 1998.
- **NDIKUBWAYO, Ernest**. (2019). Contribution de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain de la partie Nord de la Mairie de Bujumbura, Burundi. Liège : Université Catholique de Louvain (UCL).
- **ST-HILAIRE, A**. (2007). Analyse fréquentielle des précipitations de la station Assomption.
- **Claudie Beaulieu**. (2009). Homogénéisation des Séries de Précipitations : Identification des Techniques les Plus Prometteuses et nouveaux développements.
- **LABORDE, J.P, 2009**. Eléments d'hydrologie de surface.
- **ST-HILAIRE, A**. (2005). Analyse fréquentielle des précipitations des stations de Montréal et Shawinigan.
- **DAVTIAN**, **G.** (1998). Analyse Des Données Et Cartographie Automatique : Application Aux Principales Variables Climatiques Du Versant Méditerranéen Du Maghreb.
- **CHAMANI, R.** (2020). Etude de l'Occurrence des Précipitations et des Sécheresses Extrêmes en Afrique au Nord de l'Équateur : Estimation des Périodes de Retour et des Niveaux de Retour.
- **Salima GUECHI**. (2017). Cartographie des Pluies extrêmes du Nord-Est Algérien.
- **Brunet-Moret, Y**. (1969). Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie.
- **Gray D.M**. méthodes statistiques-analyses de régression des courbes de fréquences ajustées.
- **Habibi B & al**. (2013), Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales : Cas du Bassin Chott -Chergui. Nature&Technology.

- **FRANCOU.J.et RODIER.J-A., F**. (1967). . Essai de classification des crues maximales observées dans le monde. , (Vol. Vol. IV ,no3 1967). Cah. O.R.S.T.0. M. sér. Hydrol.
- **OMM-N°168**. (2014). Guide des pratiques hydrologiques, (éd. 6ème édition, Vol. volume II).
- **Nguyen VAN TUU**. (1981).Hydraulique routière..