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

Contribution à l'amélioration des études d' aménagement hydrauliques par la production de la carte nationale des isohyètes extrêmes : Cas de la région Centre-Est du Burundi

Niyonkuru, Léonard; Sous la direction de : Dr. Ir. Nzeyimana Joseph

2024
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1928

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



Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur **Année Académique: 2021-2022**

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

Cas de la région Centre – Est combinant les provinces « Gitega, Ruyigi, Rutana et Cankuzo »

Mémoire

Présenté publiquement par :

NIYONKURU Léonard

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences de l'Ingénieur

Option: Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets.

Soutenu le 20 /Juillet/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

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

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

DEDICACES

Je dédie ce travail :

- A Dieu Tout Puissant;
- A mon père NDARUZANIYE Pie;
- A ma regrettée mère SINDAKIRA Marcienne;
- A mes frères et leurs familles ;
- A toute la famille ;
- A tous ceux qui me sont chers.

REMERCIEMENTS

Depuis le commencement de mes études de master, de nombreuses personnes ont rendu possible l'avancement de ce travail de mémoire qu'il m'est aujourd'hui difficile de n'en oublier aucune.

- Je pris donc les personnes que j'aurais oubliées de bien vouloir m'excuse. C'est avec un enthousiasme certain que je profite de ces quelques lignes pour exprimer ma sincère gratitude envers toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail.
- Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur Dr Ir NZEYIMANA Joseph qui fut pour moi un directeur de mémoire attentif et disponible malgré ses nombreuses charges. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris. Il a été et restera un moteur pour mon travail. Je le remercie pour sa gentillesse, sa patience et ses précieux conseils.
- J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de lire et d'examiner mon travail.
- Je remercie tous les professeurs de l'université du Burundi qui ont contribués dans ma formation, principalement ceux de master en Génie civil, aménagement et maitrise des projets ;
- Mes vifs remerciements s'adressent également à tous mes collègues de master en génie civil, aménagement et maitrise des projets, 3 ème promotion pour leur soutien et entraide.
- J'aimerais également remercier à l'Institut géographique du Burundi qui m'a accueilli et m'a fourni les données en vue de la réalisation de ce travail.
- J'adresse également tous mes remerciements à mes grands frères, principalement Abbé NGENDAKUMANA Zéphyrin pour votre soutien financier, les importants conseils durant mes études depuis l'école primaire jusqu'aujourd'hui.
- Enfin, j'ai une pensée spéciale pour mon père NDARUZANIYE Pie et ma regrettée mère SINDAKIRA Marcienne qui m'ont encouragé et m'ont donné la force nécessaire pour atteindre cet objectif de ma vie.

RESUME

L'amélioration des services météorologiques, hydrologiques et climatiques est essentiel pour renforcer la résilience climatique et celle aux catastrophes naturelles. Les services sont nécessaires pour créer un environnement favorable pour inciter les secteurs privés et publics à investir, pour un développement durable et réduire la pauvreté.

Les études hydrologiques sont alors nécessaires pour l'évaluation de la quantité de ressource en eau disponible pour assurer les usages comme l'alimentation en eau potable, l'aménagement urbain ou rural, le dimensionnement des ouvrages hydrotechniques comme les digues, les barrages d'irrigation ou hydroélectrique et les ponts. Malheureusement, les données de base sont indisponibles, insuffisantes ou même difficiles à traiter pour quelques – uns en demandant une grande capacité professionnelle dans le domaine.

C'est pour cette raison que le présent travail a été fait pour traiter des données hydrométéorologiques des stations disponibles en élaborant des cartes modèles de 0,1% ; 0,2% ; 0,5% ; 1% ; 2% qui serviront des hydrauliciens ou d'autres domaines de génie civil et institutions comme l'institut géographique du Burundi dans l'évaluation hydraulique lors de leurs activités.

Le travail a été commencé par l'analyse des données recueillies au sein de l'IGEBU et la résolution des problèmes de disparités de ces dernières par l'homogénéisation faite par extension.

Nous avons continué par la comparaison des résultats d'analyse fréquentielle suivant la loi normale, la loi de Gumbel ou exponentielle et la loi de Pearson III afin de juger quelle loi applicable pour notre étude.

Enfin, nous avons calculé la courbe de fréquence en utilisant la loi de Pearson III, station par station, qui nous a permis de trouver la valeur des précipitations maximales que nous avons mises dans le logiciel approprié pour l'interpolation ArcGIS afin de tracer les isohyètes qui est l'objectif de notre travail.

Mots clés : Bassin versant, homogénéisation, Précipitation, Isohyètes.

ABSTRACT

Improving meteorological, hydrogical and climate services is essential to build climate resilience and resilience to natural disasters. Services are needed to create an enabling environment to incentivize private and public sectors to invest, for sustainable development and poverty reduction.

Hydrological studies are then necessary for the evaluation of the quantity of water resources available to ensure uses such as the supply of drinking water, urban or rural development; the dimensioning of hydrotechnical works such us as dykes, dams watering orhydroelectricity and bridges. Unfortunately, basic data is unavailable, insufficient or even difficult to process for some, requiring great professional capacity in the field.

It is this reason that the present work has been done to process hydrometeorological data from the available stations by elaborating model maps of 0.1%; 0.2%; 0.5%; 1% and 2% that will come from water engineers or other fields and institutions like the geographical institute of Burundi in the hydraulic evaluation during their activities.

The work was started with the analysis of the data collected within the IGEBU and the resolution of the problems of disparities of the latter by the homogenization made by extension.

We continued by comparing the results of frequency analysis according to the normal distribution, Gumbel or exponential distribution, and Pearson III distribution to determine which distribution is applicable for our study.

Finally, we calculated the frequency curve using the Pearson III distribution, station by station, which allowed us to find the value of maximum precipitation that we inputted into the appropriate software for ArcGIS interpolation to plot the isohyets, which is the objective of our work.

Keywords: Watershed, homogenization, precipitation, isohyets.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY I

DEDICACES II

REMERCIEMENTS III

RESUME IV

ABSTRACT V

TABLE DES MATIERES VI

LISTE DES TABLEAUX VIII

LISTE DES FIGURES X

SIGLES ET ABREVIATIONS XII

AVANT-PROPOS XIII

CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GENERALE 1

0.1 Contexte, Problématique et Justification du sujet 1
0.2 Objectif global 2
0.3 Objectifs spécifiques 2
0.4 Méthodologie de travail 2
0.5 Résultats attendus 2
0.6 Délimitation du sujet et de la zone d'étude 3
0.7 Matériels et outils utilisés 6

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE 7

I.1 Introduction 7
I.2 Définitions des concepts 7
I.2.1 L'hydrologie 7
I.2.2 Cycle hydrologique 7
I.3 Connaissances fondamentales sur les cours d'eau 9
I.4 Le bassin versant 11
I.4.1 Délimitation du bassin versant 11
I.4.2 Caractéristiques d'un bassin versant 12
I.5 Précipitations 16
I.5.1 Classification des précipitations 16
I.5.2 Notion sur l'écoulement des eaux pluviales 18

I.5.3 Méthodes de distribution spatio-temporelle de la pluie 19
I.6 Homogénéisation des séries de précipitation 21
I.6.1 Homogénéisation par extension des données 22
I.6.2 Analyse fréquentielle 23
I.7 Les lois statistiques 26
I.7.1 Loi Normale ou de Gauss. 26
I.7.2 Loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle 27
I.7.3 La loi de Pearson III 28
I.8 Initiation au logiciel d'interpolation des données 29
I.8.1 Présentation d'ArcGIS 29
I.8.2 Les grands types de données géographiques 30
I.8.3 Les méthodes d'interpolation 31
I.9 Conclusion 32

CHAPITRE II : TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSION DES RESULTATS. 33

II.1 Introduction 33
II.2 Présentation des données pluviométriques à l'état brute 33
II.2.1 Homogénéisation des précipitations 35
II.3 Comparaison de la lois normale, Gumbel et Pearson III sur base d'analyse fréquentielle. 38
II.3.1 Commentaire 47
II.4 Calcul de la courbe de fréquence des précipitations 48
II.4.1 Analyse statistique des données des précipitations de la station Cankuzo 49
II.4.2 Analyse statistique des données des précipitations de la station Kinyinya 52
II.4.3 Analyse statistique des données des précipitations de la station Ruyigi 55
II.4.4 Analyse statistique des données des précipitations de la station Muriza 58
II.4.5 Analyse statistique des données des précipitations de la station Giheta 61
II.4.6 Analyse statistique des données des précipitations de la station Gitega aérodrome 64
II.4.7 Analyse statistique des données des précipitations de la station Musongati 67
II.4.8 Analyse statistique des données des précipitations de la station Musasa 70
II.4.9 Analyse statistique des données des précipitations de la station Ruvyironza 73
II.5 Discussion des résultats 76

CHAPITRE III : REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ISOHYETES EXTREMES 77

III.1 Généralité 77

CHAPITRE IV : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 83

IV.1 Conclusion 83
IV.2 Recommandations 84

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 :Les grands fleuves du globe 9
Tableau I-2 :Période de récurrence communément utilisée pour les quelques structures hydrauliques 24
Tableau I-3 : Valeurs du paramètre « α » selon les différents auteurs 25
Tableau II-1 :Présentation des données disponibles 34
Tableau II-2 :Présentation des résultats d'homogénéisation des précipitations de la station de RUYIGI 36
Tableau II-3 :Valeurs des coefficients α et β 36
Tableau II-4 :Présentation finale des données utilisées pour le présent travail 37
Tableau II-5 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations 38
Tableau II-6 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station KINYINYA 39
Tableau II-7 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station RUYIGI 40
Tableau II-8: Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station MURIZA 41
Tableau II-9 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations 42
Tableau II-10 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station GITEGA AERODROME 43
Tableau II-11 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station MUSONGATI 44
Tableau II-12 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station MUSASA 45
Tableau II-13 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station RUVYIRONZA 46
Tableau II-14 :Analyse statistique des données recueillies à la station Cankuzo 49
Tableau II-15 :Les valeurs caractéristiques 50
Tableau II-16 :Tableau des coefficients et calcul de la hauteur des précipitations extrêmes 50
Tableau II-17 : Analyse statistique des données recueillies à la station Kinyinya 52
Tableau II-18 :Les Valeurs caractéristiques 53
Tableau II-19 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes 53
Tableau II-20 : Analyse statistique des données recueillies à la la station RUYIGI 55
Tableau II-21 :Les Valeurs caractéristiques 56
Tableau II-22 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes 56
Tableau II-23 : Analyse statistique des données recueillies à la station Muriza 58
Tableau II-24 :Les Valeurs caractéristiques 59

Tableau II-25 :Détermination des coefficients et le calcul de la hauteur des précipitations extrêmes 59
II-26 : Analyse statistique des données recueillies à la station Giheta.....61
Tableau II-27 : Les Valeurs caractéristiques.....62
Tableau II-28 :Calcul de la hauteur des précipitations extrêmes 62
Tableau II-29 : Analyse statistique des données recueillies à la station Gitega aérodrome.....64
Tableau II-30 :Les Valeurs caractéristiques.....65
Tableau II-31 :Tableaux des coefficients des crues 65
Tableau II-32 :Tableau de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes.....65
Tableau II-33 : Analyse statistique des données recueillies à la station Musongati 67
Tableau II-34 :Les Valeurs caractéristiques.....68
Tableau II-35 :Tableau des coefficients et de calcul des précipitations extrêmes 69
Tableau II-36 : Analyse statistique des données recueillies à la station Musasa 70
Tableau II-37 :Les Valeurs caractéristiques.....71
II-38 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes.....72
Tableau II-39 : Analyse statistique des données recueillies à la station Ruvyironza.....73
Tableau II-40 :Les Valeurs caractéristiques.....74
Tableau II-41 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des crues 75

LISTE DES FIGURES

Figure 0-1 : Délimitation de la zone d'étude....4
Figure 0-2 : Carte de la situation climatique de la zone d'étude....5
Figure I-1 :Cycle hydrologique (http://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/) 8
Figure I-2 :Classification des réseaux fluviaux....10
Figure I-3 : La ligne de partage des eaux....11
Figure I-4 :Distinction du bassin versant réel et du bassin versant topographique....12
Figure I-5 :Exemples de la délimitation de l'aire par la ligne de partage des eaux....12
Figure I-6 :Indice de Gravélius et caractérisation de la forme des bassins versants (Musy, 2005) 14
Figure I-7 : Précipitations de convection....17
Figure I-8 :Précipitations orographiques....17
Figure I-9 :Ecoulement hypodermique....19
Figure I-10 : La méthode du polygone de Thiessen....20
Figure I-11 :Les isohyètes d'une averse donnée....21
Figure I-12 :Types de données géographiques....30
Figure I-13 : Représentation de la méthode d'interpolation utilisée....32
Figure II-1 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Cankuzo....38
Figure II-2 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Kinyinya....39
Figure II-3 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Ruyigi.....40
Figure II-4 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Ruyigi....41
Figure II-5:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Giheta....42
Figure II-6:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Gitega Aérodrome....43
Figure II-7:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Musongati....44
Figure II-8:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Musasa....45
Figure II-9:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Ruvyironza....46
Figure II-10 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Cankuzo....51
Figure II-11 : Courbe de fréquence pour la station CANKUZO....51
Figure II-12 : Représentation graphique de la corrélation au points de la station Kinyinya....54

Figure II-13 : Courbe de fréquence pour la station Kinyinya 54
Figure II-14 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station RUYIGI 57
Figure II-15 :Courbe de fréquence pour la station Ruyigi 57
Figure II-16 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Muriza.....60
Figure II-17 :Courbe de fréquence pour la station Muriza.....60
Figure II-18 : Représentation graphique de la corrélation au points de la station Giheta.....63
Figure II-19 :Courbe de fréquence pour la station Giheta 63
Figure II-20 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Gitega Aérodrome 66
Figure II-21 : Courbe de fréquence pour la station Gitega Aérodrome 67
Figure II-22 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Musongati 69
Figure II-23 :Courbe de fréquence pour la station Musongati 70
Figure II-24 :Représentation graphique de la corrélativité au points de la station Musasa 72
Figure II-25 :Courbe de fréquence pour la station Musasa.....73
Figure II-26 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Ruvyironza.....75
Figure II-27 :Courbe de fréquence pour la station Ruvyironza 76
Figure III-1 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 0,1%.....78
Figure III-2 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 0,2%.....79
Figure III-3 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 0,5%.....80
Figure III-4 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 1%.....81
Figure III-5:Carte des isohyètes extrêmes pour P = 2%.....82

SIGLES ET ABREVIATIONS

A	:	Surface totale du bassin
Ai	:	Superficie du polygone associée à la station i
ai	:	Aire comprise entre deux courbes de niveau consécutives i et i+1 en km2
Cs	:	Coefficient d'asymétrie de la distribution
C_s	:	Le coefficient d'asymétrie de la distribution
Cv	:	Coefficient de variation
C_v	:	Coefficient de variation
di	:	Dénivelé entre deux altitudes successives
hi	:	Altitude de la courbe de niveau i en m
IDW	:	Inverse Distance Weighted
IGEBU	:	Institut Géographique du Burundi
i_m	:	Pente moyenne du bassin (m/m)
Ir	:	Indice de pente de roche
Ir	:	Indice de pente de roche
KG	:	Indice de compacité de Gravélius
KH	:	Indice de compacité de Horton
Kp	:	Coefficient des crues
kp	:	Coefficient des crues
l	:	Largeur du rectangle équivalent en km
L	:	Longueur du rectangle équivalent en km
OMM	:	Organisation météorologique mondiale
P	:	Périmètre du bassin en km
P	:	Précipitation
P	:	Probabilité
P_{24}	:	Précipitations journalières extrêmes annuelles
Pi	:	Moyenne des isohyètes consécutives i et i+1
Pm	:	Précipitation moyenne annuelle du bassin en mm
s	:	Ecart type du coefficient d'asymétrie
SIG	:	Système d'information géographique
t_c	:	Temps de concentration

AVANT-PROPOS

L'étude des précipitations ne représente pas une fin en soi pour l'hydrologie. Elle ne constitue qu'une étape préalable à la plupart des applications développées dans cette discipline, à savoir, l'étude quantitative et qualitative des eaux de ruissellement, l'étude de la gestion de ces eaux afin de satisfaire les objectifs à savoir la lutte contre les inondations pluviales, la maîtrise des impacts des rejets pluviaux urbains sur les milieux récepteurs et l'intégration de l'eau dans la ville pour l'hydrologie urbaine et généralement, le garanti de la sécurité et la rentabilité des ouvrages.

Par conséquent, à l'heure actuelle, faute de connaissances et de mesures suffisantes, de nombreuses études sont fondées sur une prise en compte très simplifiée et parfois très incertaine des phénomènes de pluie ; les précipitations ne sont analysées qu'à travers des séries d'observations disponibles de longueurs parfois assez courtes par rapport aux informations que l'on y recherche. Leur dimension spatiale est bien souvent négligée, de même que leur dynamique. La connaissance spatio-temporelle serait alors bénéfique lors de l'étude et du dimensionnement hydraulique.

C'est dans ce cadre alors que le présent travail de contribution à l'amélioration des études hydrauliques et d'aménagement par la production d'une carte nationale des isohyètes extrêmes est né en élaborant des cartes modèles pour garantir, disponibiliser et faciliter l'estimation de la quantité des précipitations en assurant leur fiabilité à base de la statistique, en tentant de la rapprocher de celle des lames d'eaux extrêmes de pluie sur une zone voulue.

CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GENERALE

0.1 Contexte, Problématique et Justification du sujet

Les progrès scientifiques de l'homme ont été dérivés de sa réflexion basée sur ses observations. L'une des avantages de l'homme sur d'autres espèces, c'est que à partir de l'observation et de l'étude du passé, il peut déceler de leçons pour le futur.

Ainsi l'homme peut prédire l'impact nocif d'éléments en se basant sur l'étude statistique de leur occurrence dans le passé.

Néanmoins, la fiabilité de ces techniques dépend de la qualité et de la quantité des observations de base de calcul. Si les observations ne sont pas étalées sur une période suffisamment longue, les prédictions pour le futur perdent de leur qualité. Avec le développement des infrastructures supportant la vie de l'homme, l'homme-ingénieur se voit en besoin de prédire non seulement la fréquence mais aussi l'intensité de certains aléas, comme les précipitations, la neige, le vent, etc. Comme ces aléas sont d'une période intermittente, pour prédire leur intensité, il est nécessaire d'avoir encore plus de données temporellement étroits. La collecte de ces données requiert des investissements importants en matériel et en ressources humaines.

C'est le même cas dans notre pays. Au Burundi, la fiabilité et la disponibilité de certaines données hydrologiques est l'une des principales contraintes auxquelles font face certains ingénieurs au moment où ils veulent des études nécessitant des données hydrologiques plus ou moins précises, car la non disponibilité de ces données très utiles a causé des dommages liés à certaines erreurs de conception et de dimensionnement des ouvrages hydrauliques qui avaient une lourde importance sur la société.

On rappellera tous les cas publiquement connus comme : le barrage d'irrigation de Kajeke, le barrage hydroélectrique de Mpanda et autres qui, le manque de l'information sur la pluviométrie de leurs zones d'influence pourrait être l'une des causes de la perturbation des activités.

Pour remédier à cette situation et donner aux ingénieurs des études hydrauliques et d'aménagement les informations utiles et fiables pour leurs études, le présent mémoire s'est donné le travail d'exploiter les données disponibles de l'IGEBU, pour garantir le bon fonctionnement des ouvrages hydrauliques basé sur les informations hydrologiques utiles et fiables ; et sont représentées sous forme des isohyètes extrêmes dans 4 provinces de ma zone d'étude.

0.2 Objectif global

L'objectif du présent travail est de contribuer à l'amélioration des études hydrauliques et d'aménagement en produisant une carte nationale des isohyètes extrêmes.

0.3 Objectifs spécifiques

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

- ☞ Collecter les données hydrologiques à l'IGEBU à savoir les P_{24} sur les stations pluviométriques se trouvant dans la zone d'étude ;
- ☞ Faire l'analyse statistique détaillée des données recueillies, station par station ;
- ☞ Produire les courbes de fréquences des précipitations afin de recevoir les crues à chaque période de retour;
- ☞ Analyser et discuter les résultats obtenus ;
- ☞ Elaborer des cartes modèles des isohyètes des précipitations extrêmes pour la période de retour P = 0,1% ; 0,2% ; 0,5% ; 1% et 2%.
- ☞ Etc.

0.4 Méthodologie de travail

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

- ✓ La documentation faite dans la bibliothèque et sur des sites internet pour faire une revue de la littérature sur les processus, les modèles hydrologiques et hydrauliques pour les bassins versants et ses caractéristiques ;
- ✓ Collecte des données aux seins de l'IGEBU ;
- ✓ Analyse et traitement des données recueillies :
  - Par homogénéisation des séries incomplètes ;
  - Comparaison des lois statistiques ;
  - Calcul de la courbe de fréquence Discussion sur les résultats obtenus ;
- ✓ L'utilisation du logiciel Arcgis (10.3) ;
- ✓ Conclusions et recommandations.

0.5 Résultats 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 discutés et disponibles ;
- ✓ Les cartes modèles des isohyètes pour les périodes de retour P = 0 ,1% ; 0,2% ; 0,5% ; 1% et 2%.

0.6 Délimitation du sujet et de la zone d'étude

A base de l'hydrologie et de la statistique, notre étude vise à élaborer une carte qui permettra à l'acquisition des données utiles pour les études hydrologiques dès la conception à l'exploitation des ouvrages hydrauliques dans n'importe quel endroit du pays mais par défaut du temps, nous avons jugé bon de travailler sur les provinces de Gitega, Cankuzo, Ruyigi, Rutana comme le montre la figure 0-1 située sur la page suivante.

La zone d'étude se situe au centre-Est du pays et forme un quadrilatère situé à une latitude de 2°55' au nord et de 4°10' au sud et à une longitude de 29°45' à l'Est et à 30°45' de l'Ouest comme le montre la figure 0-1

Quant au climat, elle se situe dans la dépression de l'est et les plateaux centraux et dans une partie de la crête Congo Nil; l'altitude est comprise entre 1320 et 1500 m et des températures élevées, mais surtout une sècheresse plus marquée, caractérisent cette zone. Les températures moyennes annuelles avoisinent 20°C. La pluviométrie annuelle dépasse rarement 1100 mm, pouvant descendre aux environs de 600mm. L'humidité atmosphérique n'est jamais très élevée, la moyenne annuelle s'établissant entre 65 et 70%. (**source : Etat des lieux des services hydrologiques et météorologiques du Burundi 11204561-002-ZWS-002, version 1.0, 11 Novembre 2020)**

Elle est représentée sur la figure **0-2**.

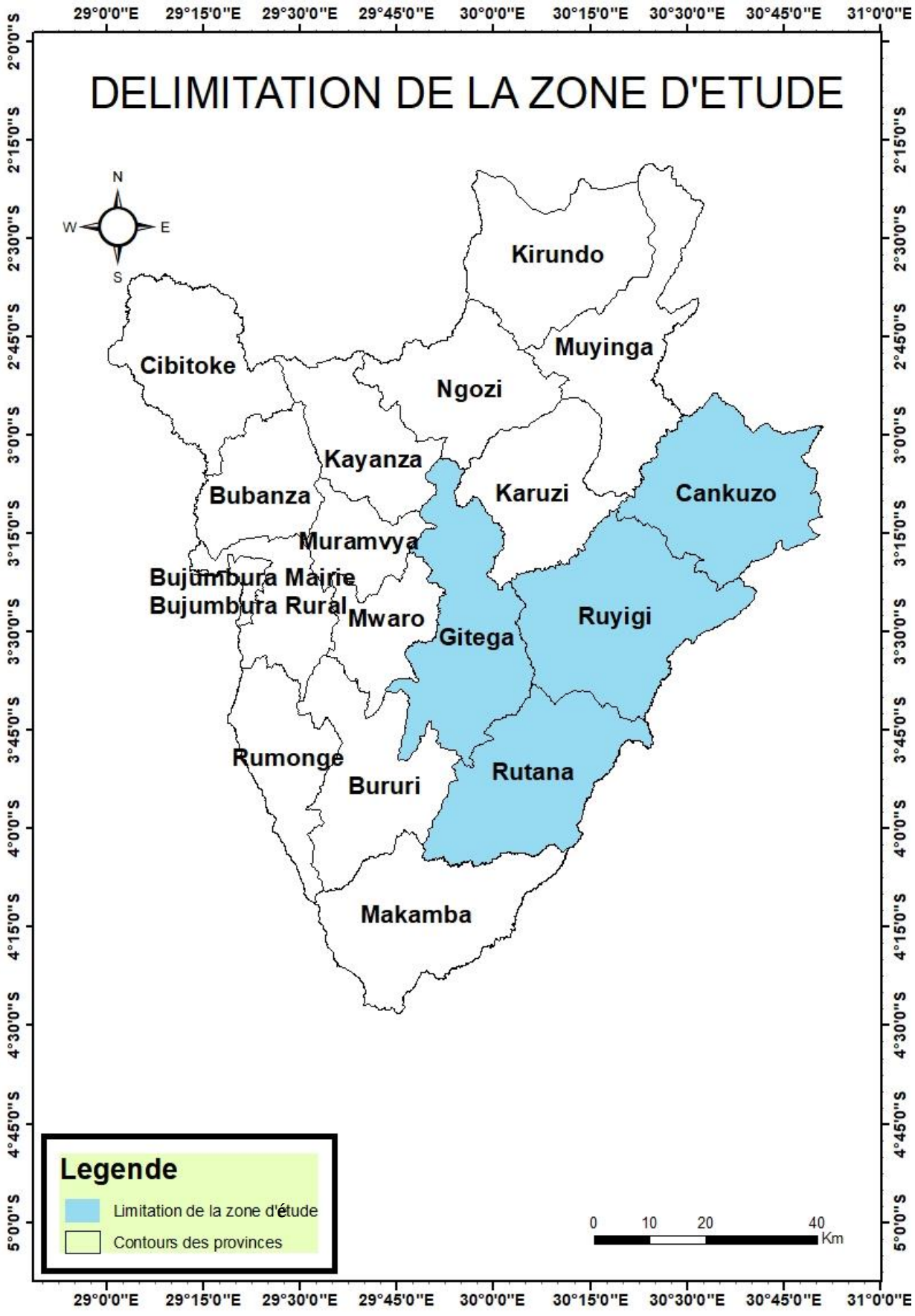


Figure 0-1 : Délimitation de la zone d'étude

La carte suivante montre la situation climatique de la zone d'étude

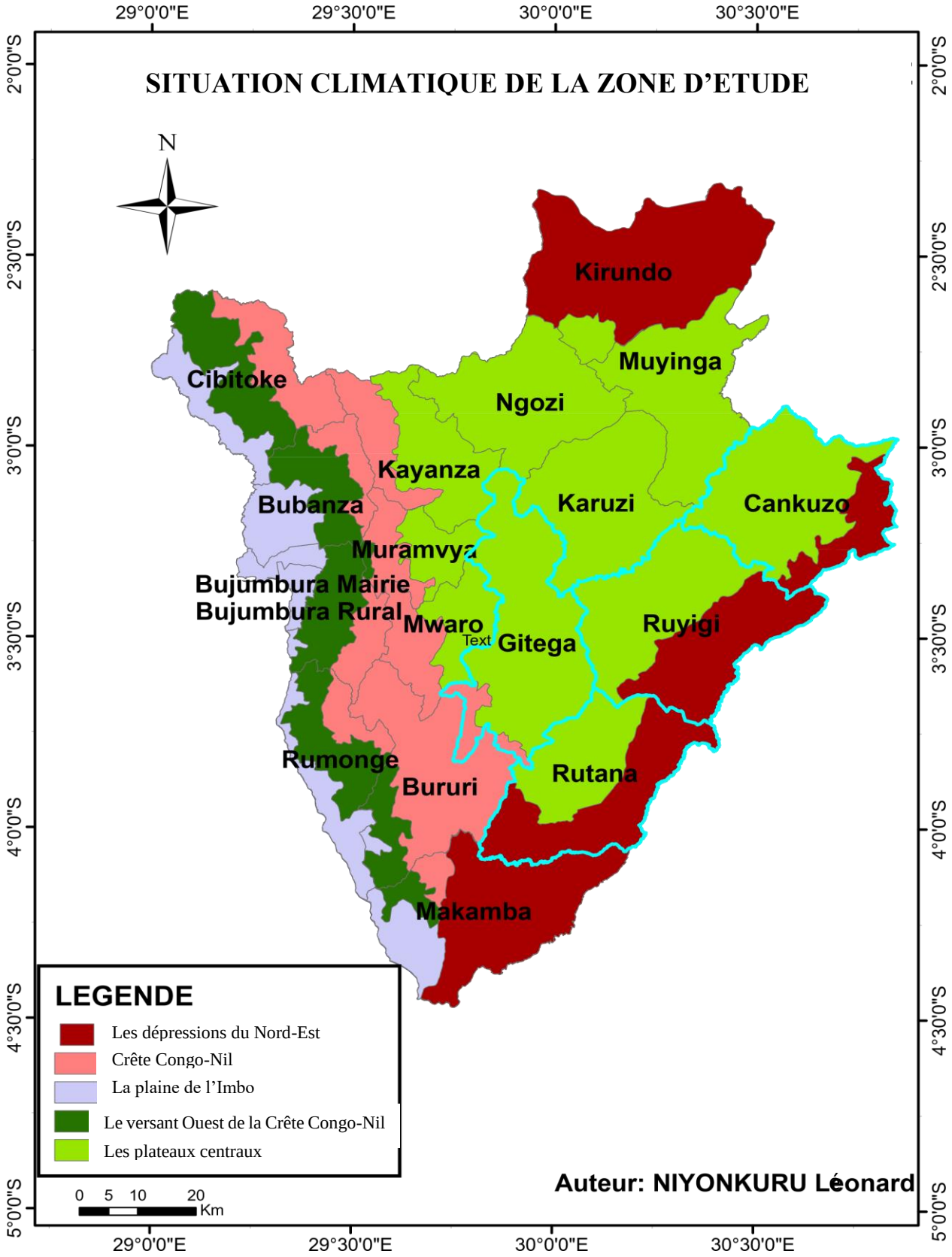


Figure 0-2 : Carte de la situation climatique de la zone d'étude

0.7 Matériels et outils utilisés

Pour atteindre les objectifs spécifiques de ce travail, on s'est servi de :

- ✓ Un ordinateur
- ✓ Microsoft office
- ✓ Arcgis

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

I.1 Introduction

Les études hydrologiques sont fondées sur plusieurs paramètres qui dépendent des données météorologiques et hydrométriques ou des caractéristiques physiques du bassin versant.

Concernant le réseau des stations, le service météorologique du Burundi dispose d'un faible réseau d'observation, il ne peut pas couvrir l'ensemble du bassin versant, l'estimation spatio-temporelle des précipitations devient un peu difficile.

La connaissance sur l'hydrologie et la prévision hydrologique bien que fortement liée à la simulation hydrologique, se tourne vers l'évolution future des précipitations du bassin versant à partir de l'instant présent.

Dans certains endroits du Burundi, les installations actuellement en place, notamment les stations météorologiques et les stations hydrométriques, sont soit défectueuses, soit inactives ou simplement non disponibles **(IGEBU, 2010)**.

I.2 Définitions des concepts

I.2.1 L'hydrologie

D'une manière générale, l'hydrologie peut se définir comme la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature, l'évolution de celle-ci à la surface de la terre et dans le sous-sol sous ses 3 états : gazeux, liquide et solide.

L'hydrologie d'une façon restreinte, est une science qui traite des eaux fluviales, de leur origine, de leur écoulement et de leur action.

I.2.2 Cycle hydrologique

Le cycle hydrologique, appelé aussi cycle de l'eau, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau accompagnes de changements d'état et qui s'effectuent dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Il traduit le phénomène naturel de circulation perpétuelle de l'eau sur la terre, sous la terre et dans l'atmosphère.

Il est régi par l'énergie solaire qui est à la base de l'évaporation de l'eau de surface. De cette évaporation et de la transpiration des plantes, la vapeur d'eau s'élève dans l'atmosphère et par refroidissement, elle se transforme en fines gouttelettes d'eau (et en cristaux des glaces), c'est la condensation.

Ces gouttelettes d'eau se rassemblent ensuite, deviennent lourdes et tombent sous forme des précipitations. Dans sa chute, l'eau peut être interceptée par la végétation, ruisseler à la surface du sol, s'infiltrer dans le sous-sol et tomber directement dans les océans et les autres réservoirs d'eau.

L'eau interceptée retourne dans l'atmosphère par évaporation. L'eau de ruissellement est recueillie dans le réseau de drainage (naturel ou artificiel) qui l'achemine vers les masses d'eau de surface (et les océans). Une partie de l'eau infiltrée à faibles profondeurs est absorbée par les racines des plantes et rejetée dans l'atmosphère via la transpiration des feuilles.

Une autre partie peut atteindre la nappe souterraine, et émerger à la surface à travers les sources et rejoindre le ruissellement de surface. L'eau à la surface de la terre est évaporée vers l'atmosphère et le cycle hydrologique se poursuit. Il n'y a ainsi pas de départ ni de fin identifiés pour le cycle dont les nombreux processus se produisent continuellement.

Le cycle hydrologique naturel est illustré sur la figure I-1 suivante :

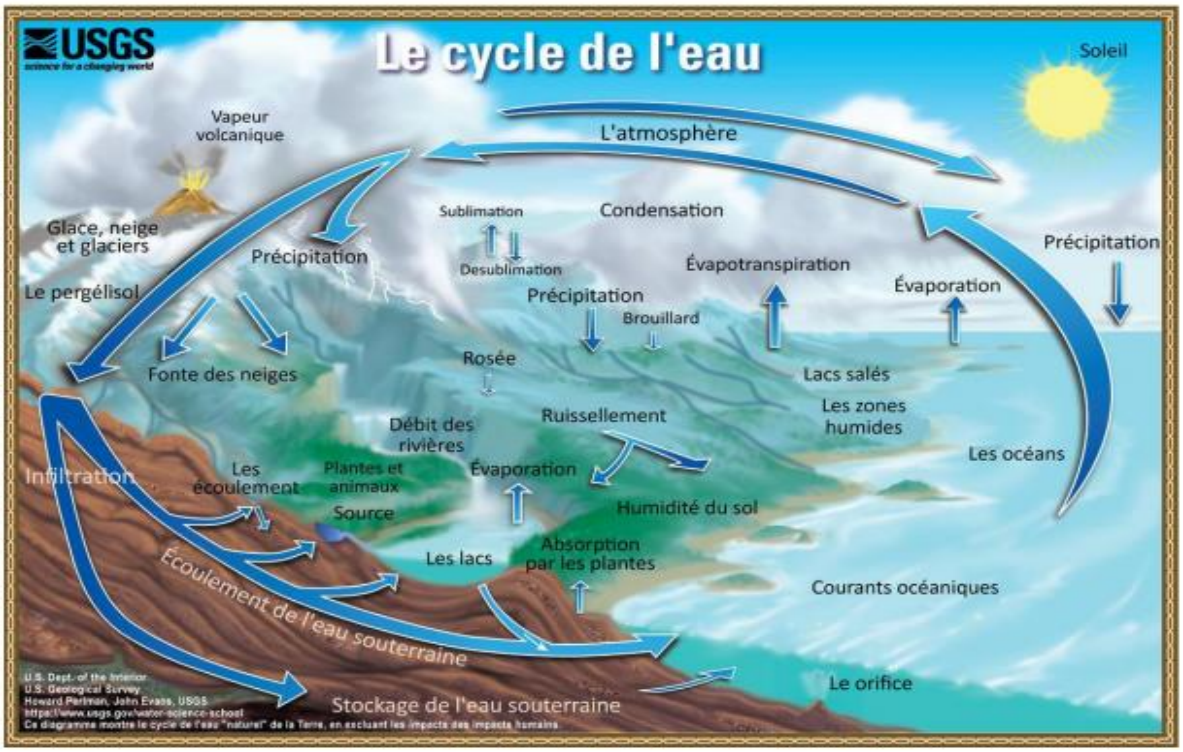


Figure I-1 :Cycle hydrologique (http://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/)

Schématiquement, les états et les situations de l'eau dans le cycle étaient représentés dans le tableau ci-dessous :

Etats	Principaux stocks	Phénomènes de transport
Vapeur, nuage	Humidité atmosphérique, évapotranspiration	évaporation
Liquide	Océans, mers, lacs, eaux souterraines	Pluie, cours d'eau, nuages, circulations souterraines
Solide	Glaciers, manteaux neigeux	Neige, écoulement des glaciers

I.3 Connaissances fondamentales sur les cours d'eau

❖ La rivière

La rivière est une piste naturelle dans laquelle l'eau coule.

1. Classification d'une rivière

Les plus grandes rivières du globe sont représentées dans le tableau ci –dessous :

Tableau I-1 :Les grands fleuves du globe

Nom	**Supérficie $10^6 km^2$**	**Longueur km**	**Teneur en sable (mg/ l)**
Amazone	7.0	6280	290
Mississipi	3.9	6260	530
Fleuve Congo	3.7	4640	50
Nil	2.9	6670	630
Yang-Tsé	1.8	6300	1400
Fleuve Jaune	0.77	5460	15000

2. Caractéristiques spécifiques d'une rivière

A. La longueur

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

B. Le profil

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

C. La chute

C'est la différence d'altitude calculée entre la source et l'exutoire, donc sur les 2 bouts de la rivière.

D. La pente

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

On écrit:

$$\mathbf{I= \frac{H}{L} x\ 100/1000} \qquad \mathbf{(I\text{-}1)}$$

E. Le réseau fluvial

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

Chaque affluent est classé suivant :

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

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

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

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

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

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

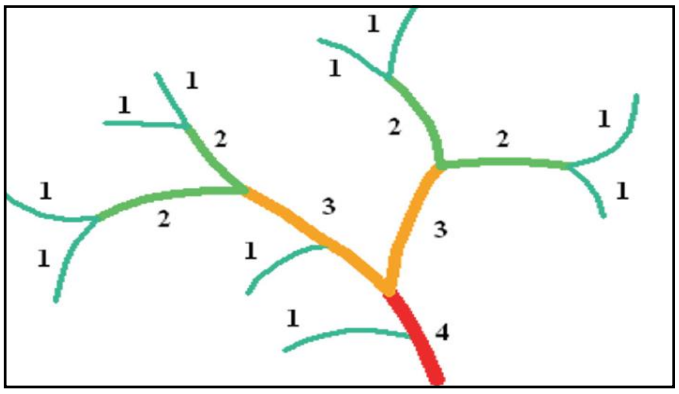


Figure I-2 :Classification des réseaux fluviaux

I.4 Le bassin versant

Le bassin versant en un point d'un cours d'eau est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont du point considéré. Il est délimité par la ligne de partage des eaux. (**Source : Remenieras G.,1965**)

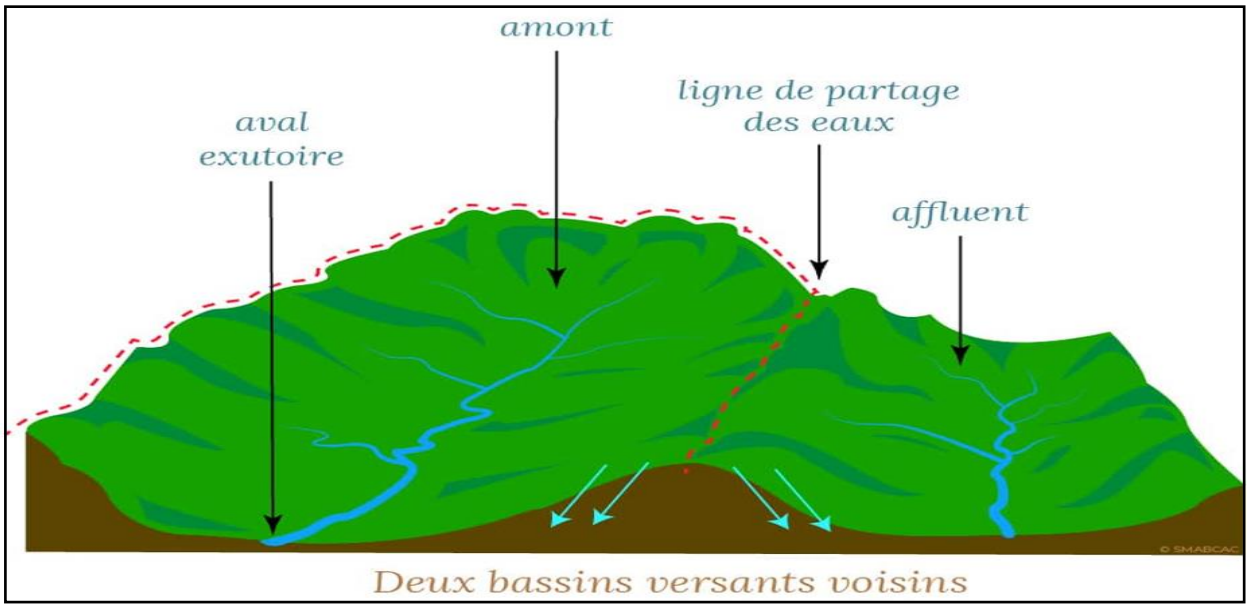


Figure I-3 : La ligne de partage des eaux

I.4.1 Délimitation du bassin versant

Le bassin versant est limité par des lignes de partages des eaux. S'il n'y a pas d'écoulement souterrains, en général, la ligne de partage correspond à la ligne de crête ; le cheminement de l'eau n'est déterminé que par la topographie, On parle alors de **bassin versant topographique**.

Le bassin versant hydrologique est alors confondu avec le bassin versant topographique que l'on peut déterminer à partir d'une carte topographique. Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique.

Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines. Il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infiltre puis sorte du bassin par le sous-sol (ou inversement).

Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie. La géologie du bassin est prise en considération pour sa délimitation. On parle dans ce cas de bassin versant réel ou bassin versant hydrogéologique. (**D'après Roche – Hydrologie de surface, Ed. Gauthier – Villars, Paris 1963)**

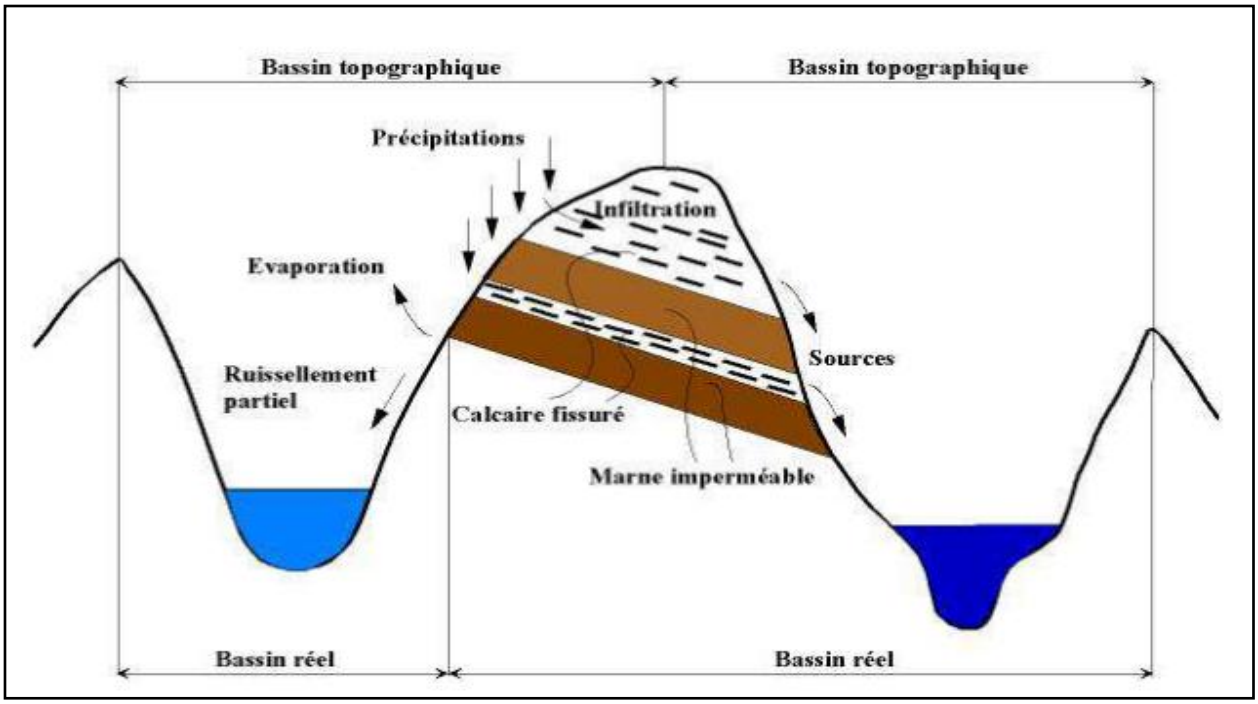


Figure I-4 :Distinction du bassin versant réel et du bassin versant topographique

Autrefois, lorsque l'on s'intéresse au ruissellement, la délimitation du bassin versant doit aussi tenir compte des activités humaines pouvant créer des barrières artificielles (routes, chemins de fer, barrage, imperméabilisation pour la protection contre les inondations agriculture, etc.).

I.4.2 Caractéristiques d'un bassin versant

1. **La Supérficie**

C'est l'aire délimitée par la ligne de partage des eaux par rapport au point d'exutoire considéré.

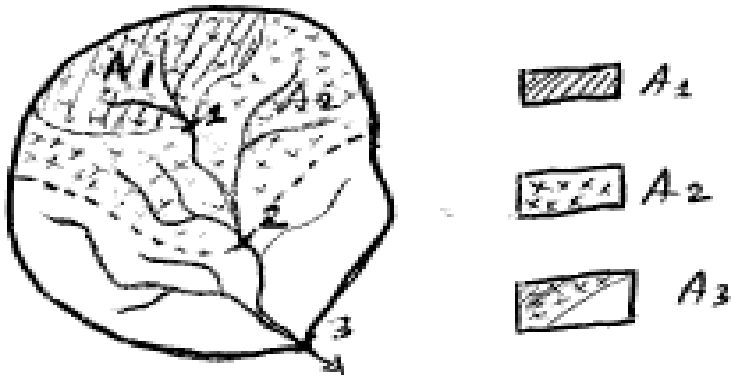


Figure I-5 :Exemples de la délimitation de l'aire par la ligne de partage des eaux

On a :

- Pour l'exutoire 1, le bassin correspondant est A1
- Pour l'exutoire 2, le bassin correspondant est A2
- Pour l'exutoire 3, le bassin correspondant est A3 (tout le bassin)

2. La densité du réseau

C'est le quotient de la longueur totale du réseau (affluents + cours principal) et la superficie totale du bassin.

On note:

$$\mathbf{D = \sum li/A \quad (km/km^2)} \qquad \textbf{(I-2)}$$

3. Le coefficient morphologique R_f

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

On note :

$$\mathbf{R_f = A/L^2} \qquad \textbf{(I-3)}$$

Remarque

Si R_f est grand pour une même superficie, cela signifie que le bassin tend vers la forme circulaire".

4. La pente moyenne du bassin

C'est la moyenne des pentes remarquables du réseau fluvial du bassin.

5. Le coefficient K

C'est le quotient de la surface cultivable et la superficie totale du bassin. On l'exprime en pourcentage et on note :

$$\mathbf{K = \frac{\alpha}{A} \ x\ 100\%} \qquad \textbf{(I-4)}$$

Où : α = Surface cultivable

A = Superficie totale du bassin

6. L'indice de Gravélius

Il est défini comme étant le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même superficie. Il est appelé aussi le coefficient de compacité (« compactness coefficient »)

$$\mathbf{K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28\ \frac{P}{\sqrt{A}}} \qquad \textbf{(I-5)}$$

Avec :

K_G = Indice de Gravélius ;

P= périmètre du bassin en km mesuré au curvimètre ;

A= aire du bassin en km^2 mesurée au planimètre ou par les techniques de digitalisation.

Le coefficient K_G de Gravélius est supérieur à 1 lorsque la forme du bassin est allongée, et proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire.

$1,5 < K_G < 1,8$: Bassin de forme allongée.

$1,0 < K_G < 1,15$: Bassin de forme ramassée.

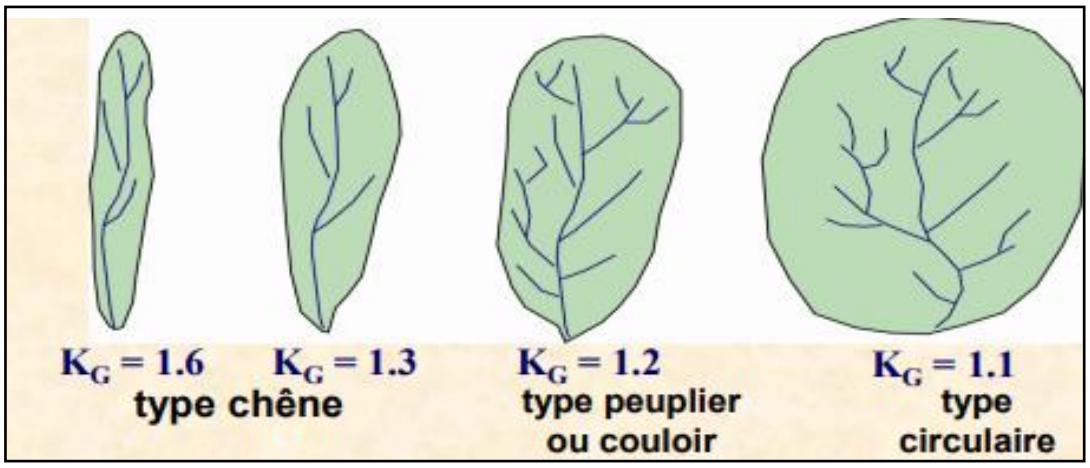


Figure I-6 :Indice de Gravélius et caractérisation de la forme des bassins versants (Musy, 2005)

7. Le relief

Le relief a une influence évidente sur les paramètres hydrométéorologiques (température, précipitation). Il est déterminé par les indices suivants : La courbe hypsométrique, les altitudes caractéristiques, le rectangle équivalent, indice de pente.

8. Les altitudes caractéristiques

De nombreux paramètres hydrométéorologiques (températures, précipitation) varient en fonction de l'altitude.

- L'altitude maximale : C'est l'altitude la plus forte relevée au cours de la limitation du bassin (point culminant).
- L'altitude minimale : Se situe à l'exutoire du bassin.
- L'altitude moyenne : Elle se définit comme l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique et correspond au rapport de l'aire sous la courbe à la surface du bassin. Elle peut être estimée à partir de la relation suivante :

$$\mathbf{E = \frac{1}{A} \sum_i a_i \frac{(h_i + h_{i+1})}{2}} \qquad \textbf{(I-6)}$$

Avec :

- E : altitude moyenne en m ;
- A : aire du bassin en km^2 ;

- a_i : aire comprise entre deux courbes de niveau consécutives i et i+1 en km^2 ;
- h_i : altitude de la courbe de niveau i en m.
  - L'altitude médiane : Elle correspond au point d'abscisse 50% sur la courbe hypsométrique.
  - La pente moyenne du bassin : La pente moyenne est une caractéristique importante dans le ruissellement. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct et donc sur le temps de concentration t_c. Elle influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

La pente moyenne peut être estimée à partir de la courbe hypsométrique.

$$\mathbf{S = \frac{2E}{L}} \qquad \textbf{(I-7)}$$

Avec :

E : Altitude moyenne du bassin en m

L : longueur du cours d'eau principal en km

S est exprimée en %

9. Le rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent permet de comparer le comportement hydrologique des bassins versants entre eux. Il s'agit d'une transformation géométrique qui assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même surface. Les courbes de niveau deviennent ainsi des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. L'exutoire se situe à l'un de ses petits côtés.

Si L et l représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, alors :
Le périmètre du rectangle équivalent vaut :

$$\mathbf{P = 2.(L + l)} \qquad \textbf{(I-8)}$$

Selon le cours d'hydrologie de l'ingénieur, On définit les grandeurs L et l représentantes respectivement la longueur et la largeur du triangle équivalent :

$$\mathbf{L = \frac{1}{2} K_G \sqrt{\pi A}.\left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}.K_G}\right)^2}\right]} \qquad \textbf{(I-9)}$$

$$\mathbf{l = \frac{1}{2} K_G \sqrt{\pi A}.\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}.K_G}\right)^2}\right]} \qquad \textbf{(I-10)}$$

Avec:

K_G: Coefficient de Gravélius

L : Longueur du rectangle équivalent

l : largeur

A : Superficie

I.5 Précipitations

On appelle précipitations, les chutes d'eau (liquide ou solide) provenant de la condensation de la vapeur contenue dans l'atmosphère. Dans les régions tropicales, la pluie tombe en gouttes d'un diamètre assez important (diamètre de 0,5 – 3mm).

En d'autre terme, on définit les précipitations comme toutes les eaux météoriques, ou hydrométéoriques, qui tombent à la surface de la terre, tant sous forme liquide (pluie) que solide (neige, grêle, grésil). **(Source : Hydrologie de l'Ingénieur, Dr-Ir N. Joseph)**

I.5.1 Classification des précipitations

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

1. Précipitations de convection;
2. Précipitations orographiques ;
3. Précipitations cycloniques ou de front.

1. Les précipitations de convection

Lorsque par temps calme, l'air saturé ou non, au voisinage du sol, est chauffé par les radiations solaires (directement mais surtout indirectement par l'intermédiaire de ce dernier) il se dilate et s'élève. Au cours de son ascension, il se refroidit suivant le gradient de 0.6°C par 100 mètres, et atteint son point de condensation à une altitude dite "niveau de condensation".

Il y a alors à partir de ce niveau de formation de nuages (cumulus) et, si le courant de convection vertical initial est intense et peut se poursuivre suffisamment longtemps, on conçoit que le système nuageux ainsi formé puisse atteindre une zone où règne une température assez basse ou un degré de turbulence assez fort pour déclencher la pluie.

Ces précipitations, dites de "convection", résultent donc d'un temps chaud; elles peuvent être accompagnées d'éclairs, de coups de foudre et de vents locaux; elles consistent entièrement en pluie et occasionnellement en grêle.

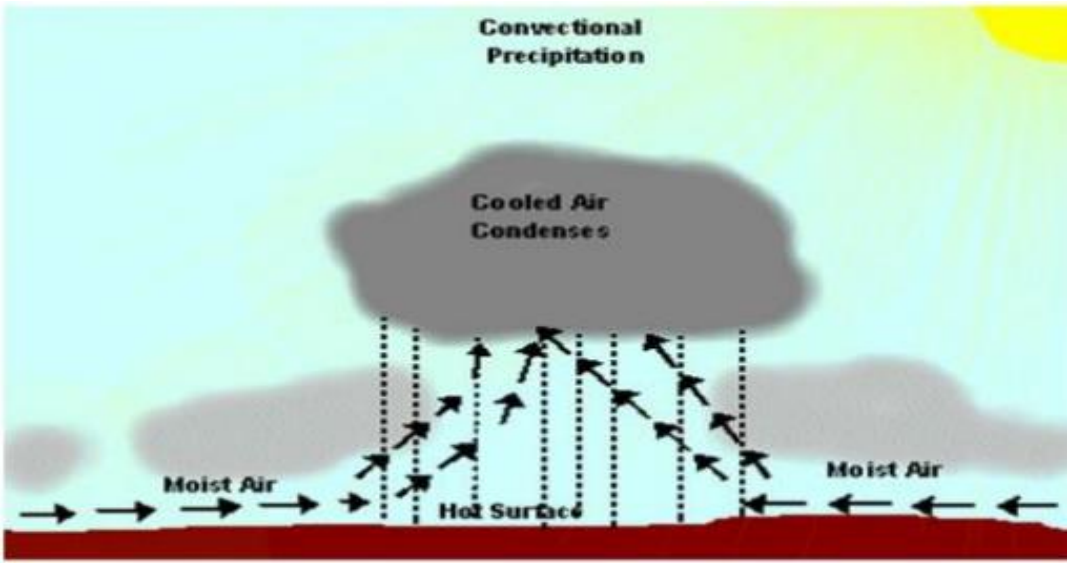


Figure I-7 : Précipitations de convection

2. **Les précipitations orographiques**

Lorsque les vents chargés d'humidité - soufflant ordinairement des océans vers les terres abordent une barrière montagneuse, les masses d'air humides ont tendance à s'élever et la détente qui en résulte produit un refroidissement qui peut entretenir la formation d'une couverture nuageuse et déclencher des précipitations.

Ces précipitations, dites "orographiques", se présentent sous forme de pluie ou de neige et sont fort irrégulières en importance et en localisation. Elles restent sous la dépendance des grandes perturbations cycloniques.

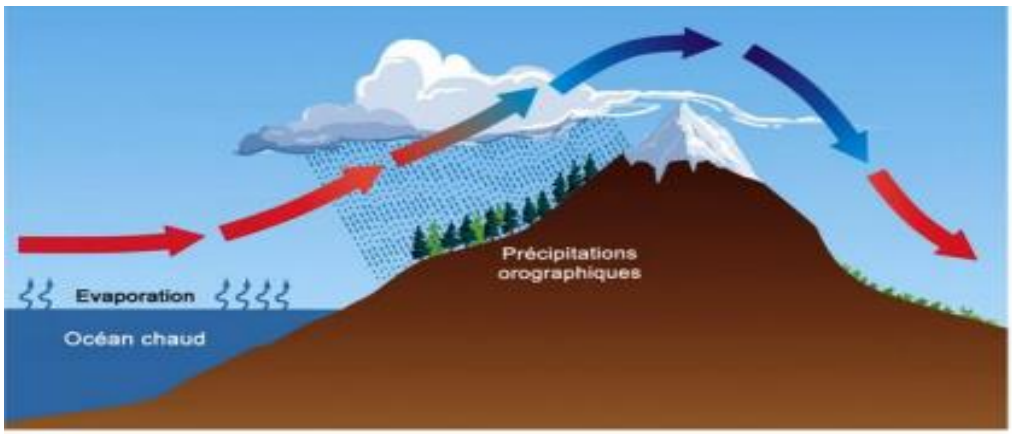


Figure I-8 :Précipitations orographiques

3. **Les précipitations cycloniques**

Ces précipitations sont associées aux surfaces de contact (fronts) entre des masses d'air de température et d'humidité différentes. Les masses d'air les plus chaudes (donc les plus légères) et les plus humides sont poussées vers les hautes altitudes. Il en résulte un refroidissement et une

condensation qui peuvent produire des précipitations importantes et prolongées.

I.5.2 Notion sur l'écoulement des eaux pluviales

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On distingue dans un premier temps deux grands types d'écoulements, à savoir : les écoulements *« rapides »* et par opposition, les écoulements souterrains qualifiés de *« lents »* qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires.

Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface et écoulement de subsurface.

Les eaux provenant des précipitations atteignent le lit du cours d'eau par 4 voies :

- Le ruissellement
- L'écoulement hypodermique
- L'écoulement souterrain
- L'eau tombant directement sur les nappes d'eau libre.

1. Le ruissellement

Le ruissellement est l'écoulement par gravité, à la surface du sol, suivant la pente du terrain et dans le réseau hydrographique ; des eaux qui ont échappé à l'infiltration et au stockage superficiel.

2. L'écoulement hypodermique

Une partie des précipitations infiltrée chemine quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre, à la rencontre d'un chenal d'écoulement. Cette eau qui peut contribuer rapidement au gonflement de la crue est désignée sous le terme d'écoulement de subsurface (aussi appelé, dans le passé, écoulement hypodermique ou retardé).

L'importance de la fraction du débit total qui emprunte la voie subsuperficielle dépend essentiellement de la structure du sol. La présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce genre d'écoulement. Les caractéristiques du sol déterminent l'importance de l'écoulement hypodermique qui peut être important.

Cet écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogramme.

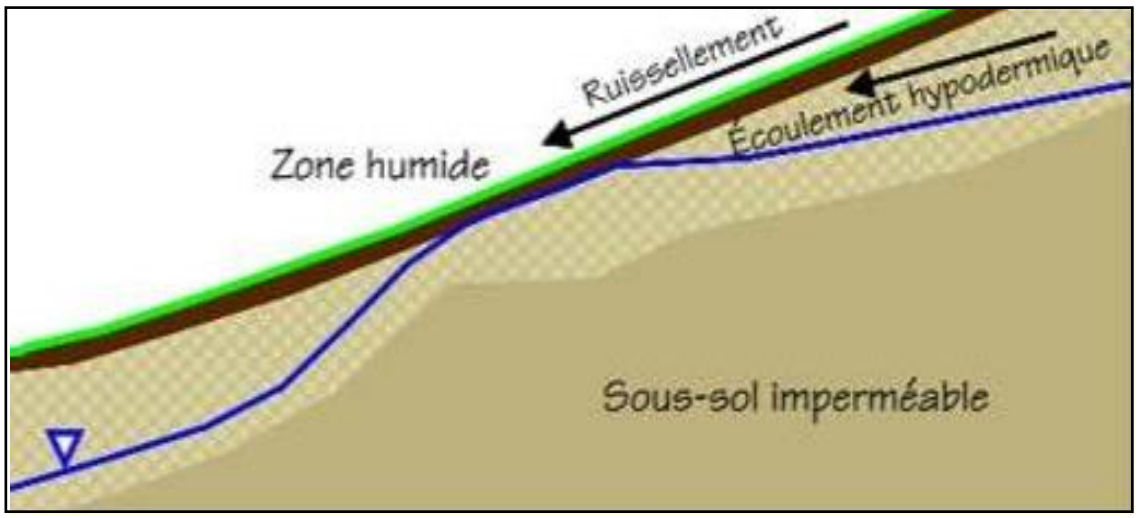


Figure I-9 :Ecoulement hypodermique

3. L'écoulement souterrain

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

4. Précipitations tombant directement sur les nappes d'eau libre

Cette composante de l'écoulement apporte sa pleine contribution au débit du cours d'eau dès le début de l'averse, et elle est parfois prise en compte dans le calcul de la capacité à donner aux évacuateurs de crues.

I.5.3 Méthodes de distribution spatio-temporelle de la pluie

Ce point présente quelques méthodes utilisées pour distribuer la pluie sur un bassin versant. La distribution de la pluie peut être faite de manière spatiale ou spatio-temporelle sur un bassin versant.

Les méthodes les plus usuelles sont celles basées sur des calculs des moyennes arithmétiques ou moyennes pondérées, comme celles présentées ci-dessous. Avec ces méthodes, il est possible de calculer la pluie moyenne sur un bassin versant à partir de données ponctuelles obtenues par plusieurs stations pluviométriques sur le bassin étudié ou à proximité.

Le choix de la méthode de calcul dépend du nombre de données disponibles sur le bassin versant étudié. En utilisant une de ces méthodes, il est possible d'obtenir une structure de la pluie distribuée dans l'espace et uniforme dans le temps.

Les méthodes traditionnelles d'interpolation sont les suivantes **(Musy, 2005)**:

1. La méthode de la moyenne arithmétique

La méthode de la moyenne arithmétique s'applique seulement si les stations de mesures sont uniformément distribuées et si le relief du bassin est homogène. L'équation des précipitations moyennes sur le bassin est la suivante :

$$\mathbf{P_m} = \frac{\sum P_i}{n} \qquad \textbf{(I-11)}$$

Où : n est le nombre de stations de mesure et Pi correspond aux précipitations à la station i.

2. La méthode du polygone de THIESSEN

Elle consiste à pondérer les données des stations en tenant compte de la distance qui les sépare. Sur une carte, on relie par des lignes chaque station avec les stations les plus proches. Sur ces lignes, on trace les médiatrices qui forment ainsi un polygone autour de chaque station.

$$\mathbf{P_m = \sum A_i . P_i / A \ ,} \qquad \textbf{(I-12)}$$

Avec :

P_m = précipitation moyenne du bassin

P_i = Précipitation à la station i

A_i = superficie du polygone associée à la station i.

A : surface totale du bassin ($\sum$ Ai).



Figure I-10 : La méthode du polygone de Thiessen

Si p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 et p_6 sont les quantités mesurées sur les stations, alors la moyenne sera :

$$\mathbf{P_m = (A_1 p_1 + A_2 p_2 + ... + A_6 p_6) / A} \qquad \textbf{(I-13)}$$

Avec:

A : la superficie totale

3. La méthode des isohyètes

Lorsque les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$P_m = \sum A_i \cdot P_i / A \quad \textbf{(I-14)}$$

$$P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \quad \textbf{(I-15)}$$

Avec :

P_m = précipitation moyenne du bassin

P_i: la moyenne des isohyètes consécutives i et i+1

A_i = superficie du polygone associée à la station **i**.

A : surface totale du bassin ($\sum$ Ai).

On peut représenter la répartition spatiale par des isohyètes comme ci-dessous :

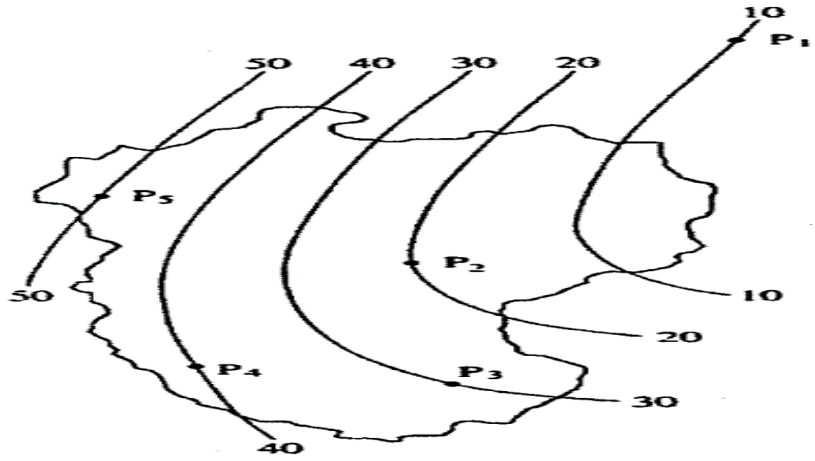


Figure I-11 :Les isohyètes d'une averse donnée

I.6 Homogénéisation des séries de précipitation

Par définition, l'homogénéisation est un procédé qui consiste à détecter, puis à corriger les variations des données dans le temps et dans l'espace. Elle répond au problème de traitement de données lorsqu'on possède sur un bassin les pluies annuelles relevées à N stations, mais pour des périodes différentes. On dégage une période commune, la plus longue possible, en comblant avec le moins de risque possible d'erreur les relevés manquants pour les stations comportant les périodes d'observation les plus courtes.

Diverses techniques ont été développées pour accommoder différents types de facteurs tels que la variable à homogénéiser, la variabilité spatiale et temporelle des données selon l'endroit où les stations sont situées, la longueur des séries et le nombre de données manquantes, les métadonnées disponibles et la densité du réseau d'observations **(Aguilar E. et al., 2003)**

L'homogénéisation porte sur les périodes d'observations des séries homogènes, ou rendues homogènes, de relevés aux postes pluviométriques.

Certains postes sont observés plus longtemps que d'autres, certains présentent des lacunes de plusieurs années. L'homogénéisation doit s'efforcer de combler les lacunes ou 'l'insuffisance d'observations de certaines stations en prenant en considération les observations sans lacune et de longue durée effectuées en d'autres stations. **(Dubreuil, 1974).**

En faisant l'homogénéisation, on compare souvent les données d'une certaine station avec celles des stations voisines pour éviter qu'un changement climatique soit interprété comme une inhomogénéité.

La série dont on veut vérifier l'homogénéité est appelée série de base et les séries voisines à la série de base sont supposées être climatiquement similaires.

I.6.1 Homogénéisation par extension des données

L'extension des données hydrométriques ou climatologiques est souvent indispensable, préalablement aux calculs hydrologiques. En effet, outre la possibilité de données défectueuses ou sujettes à caution, il arrive fréquemment qu'une station climatologique (ou hydrométrique) présente des interruptions dans les relevés, rendant difficile l'utilisation de la station. Il convient par conséquent de remplacer les données anormales et de compléter les données manquantes.

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

1. On se rassure de la fiabilité des données météorologiques,
2. On vérifie 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.

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

$$X_A = \alpha x_B + \beta \qquad \textbf{(I-16)}$$

$$\text{Avec } \boldsymbol{\alpha} = \frac{\sum \mathbf{X_{Ai}X_{Bi}} - \bar{\mathbf{X}}_\mathbf{B} \sum \mathbf{X_{Ai}}}{\sum \mathbf{X_{Bi}^2} - \bar{\mathbf{X}}_\mathbf{B} \sum \mathbf{X_{Bi}}} \qquad \textbf{(I-17)}$$

$$\boldsymbol{\beta = \bar{X}_A - \alpha \bar{X}_B} \qquad \textbf{(I-18)}$$

Avec :

$\bar{X}_A$: moyenne des X_{Ai}

$\bar{X}_B$: moyenne des X_{Bi}

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

$$\mathbf{r^2 = \alpha^2 \frac{\sum(X_{Bi} - \bar{X}_B)^2}{\sum(X_{Ai} - \bar{X}_B)^2}} \qquad \textbf{(I-19)}$$

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

I.6.2 Analyse fréquentielle

La recherche d'un modèle de fréquence des hauteurs de pluies journalières revêt une grande importance en hydrologie opérationnelle. Elle constitue la base de calcul de la crue de projet associée à une probabilité d'occurrence donnée. L'approche la plus connue et la plus courante est l'approche statistique connue sous l'appellation d'analyse fréquentielle.

Cette dernière consiste à rechercher une loi de probabilité qui s'ajuste le mieux aux valeurs observées de la variable aléatoire. Le choix de la loi 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**).

Aux cours du présent travail, l'analyse fréquentielle est utilisée pour étudier la variable aléatoire précipitation journalière maximale annuelle

A. Choix de la période de retour

Dans les projets du génie civil portant sur diverses structures hydrauliques, on se réfère couramment aux débits ayant une période de récurrence donnée. Cette dernière étant la période moyenne en année durant laquelle on s'attend à ce qu'un certain débit soit égalé ou dépassé.

La période de récurrence communément utilisée dans les projets de diverses structures hydrauliques est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau I-2 :Période de récurrence communément utilisée pour les quelques structures hydrauliques

Types d'ouvrages	**Période de récurrence (T)**
Déversoirs de barrage	500 à 1000 ans
Ponts sur les :	
Autoroutes	100 ans
Routes principales	50 ans
Routes secondaires	25 ans
Digues	100 ans
Plaines inondables	100 ans
Egouts pluvieux, fosses de drainage	5 à 10 ans
Egouts pluvieux de moindre importance	1 à 2 ans

(Source :http://studylibfr.com/doc/4410802/39-chapitre-4---statistiques-appliquées-à-l…)

Le choix de la période de récurrence se fait en fonction de l'importance de l'ouvrage (économie) et du risque hydrologique. Ce dernier représente la probabilité qu'un critère de conception soit dépassé au moins une fois pendant la période de retour (T) calculée.

B. Fréquence expérimentale observée

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 :

$$\mathbf{P_m = \frac{m-a}{n+1-2a}} \qquad \textbf{(I-20)}$$

Avec :

-P_m : probabilité de non dépassement de la même valeur ;

- m : rang qu'occupe la valeur ;

- n : nombre total d'observations ;

- α : Paramètre (qui varie selon l'auteur).

Le tableau ci-dessous présente quelques valeurs du paramètre α proposées par les différents auteurs :

Tableau I-3 : Valeurs du paramètre « α » selon les différents auteurs

Auteur	α	Formule finale
Hazen	0,5	Pm = $\frac{m-0,5}{n}$
Weibul	0	Pm = $\frac{m}{n+1}$
Chegodayev	0,3	Pm = $\frac{m-0,3}{n+0,4}$
Blom	0,375	Pm = $\frac{m-3/8}{n+1/4}$
Tukey	0,333	Pm = $\frac{m-1/3}{n+1/3}$
Gringorten	0,44	Pm = $\frac{m-0,44}{n+0,12}$
Cunnane	0,4	Pm = $\frac{m-0,4}{n+0,2}$

La probabilité de dépassement de la variable X se trouvant au rang m est :

$$P(X \geq Xm) = 1 - P(X \leq Xm) \quad \textbf{(I-21)}$$

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

$$T_{exp} = \frac{1}{P(X \geq x_m)} \quad \textbf{(I-22)}$$

Avec :

T_{exp} : la période de retour en années.

C. Equation générale de détermination du quartile d'une période de retour T

Chaque valeur de la variable x de la série de n variables aléatoires X (x_1, x_2, …, X_n) peut être exprimée en fonction de la moyenne et de l'écart par rapport à la moyenne par :

$$X = \bar{x} + \Delta x \quad \textbf{(I-23)}$$

Ou $\bar{x}$ est la moyenne et Δx est l'écart par rapport à la moyenne.

L'écart par rapport à la moyenne est une fonction des caractéristiques de dispersion de la distribution :

$$\Delta x = k.s \quad \textbf{(I-24)}$$

Où « k » est un facteur de fréquence et « s » est l'écart type de la série des variables aléatoires.

$$x = \bar{x} + k.s \quad \textbf{(I-25)}$$

Pour un quartile de période de retour T, la valeur correspondante (XT) est déterminée par l'expression générale suivante :

$$x_T = \bar{x} + k_T.s \quad \textbf{(I-26)}$$

Chaque loi de probabilité est caractérisée par son facteur de fréquence.

Valeur de kT pour différentes lois de probabilité utilisées dans le présent travail.

I.7 Les lois statistiques

I.7.1 Loi Normale ou de Gauss.

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

$$\mathbf{F(x)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \textbf{(I-27)}$$

Avec :

- $(x)\ est\ la\ fonction\ de\ la\ densité\ de\ probabilité$;
- $\sigma\ est\ l'\ écart\ type\ de\ la\ population\ estimé\ par\ s$;
- $\mu\ est\ la\ moyenne\ de\ la\ population\ estimée\ par\ \bar{x}$.

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

$$(X \leq xi) = \mathbf{F\ (x)} = \int_{-\infty}^{xi} f(x)dx \quad \textbf{(I-28)}$$

$$\mathbf{F(x)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \mathbf{dx} \quad \textbf{(I-29)}$$

En posant Z = $\frac{X-\mu}{\sigma}$, un paramètre de réduction, on aura :

$$(z \leq zi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_i} e^{-\frac{1}{2}z^2} \mathbf{dz} \quad \textbf{(I-30)}$$

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 :

$$x_T = \mu + z_T.\sigma \quad \textbf{(I-31)}$$

I.7.2 Loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle

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

$$p(X \leq xi) = F(x) = e^{-e^{-\frac{x-a}{b}}} \quad \textbf{(I-32)}$$

Si on pose,

$$u = \frac{x-a}{b} \quad \textbf{(I-33)}$$

et

$$x = a + u.\,B; \quad \textbf{(I-34)}$$

On aura :

$$p(X \leq x_i) = F(x) = e^{-e^{-u}} \quad \textbf{(I-35)}$$

$$u = -\ln[-\ln(F(x)] \quad \textbf{(I-36)}$$

Pour un quartile X_T de période de retour T, on aura :

$$X_T = a + U_T.\,b \quad \textbf{(I-37)}$$

Avec:

$$U_T = -\ln[-\ln(F(X_T)] \quad \textbf{(I-38)}$$

$$U_T = -\ln[-\ln(1-1/T) \quad \textbf{(I-39)}$$

$$U_T = -\ln[\ln(\frac{T}{T-1}) \quad \textbf{(I-40)}$$

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

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

$$\mu = a + b.\gamma \quad \textbf{(I-41)}$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2}{6} * b^2 \quad \textbf{(I-42)}$$

Avec γ = 0,5772 la constante d'Erreur **(Brunet-Moret, Y., 1969)**

$$b = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\,.\,\sigma \quad \textbf{(I-43)}$$

$$a = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.\,\gamma \quad \textbf{(I-44)}$$

En reportant les valeurs de « a » et « b » dans les équations 3 et 4, on aura :

$$X_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.\gamma - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.\ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right] \quad \textbf{(I-45)}$$

$$X_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.(\gamma + \ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right] \quad \textbf{(I-46)}$$

$$X_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.(0{,}5772 + \ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right] \quad \textbf{(I-47)}$$

$$X_T = \mu + k_T . \sigma \quad \textbf{(I-48)}$$

Avec :

$$k_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}(0{,}5772 + \ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right] \quad \textbf{(I-49)}$$

Avec :

k_T : le facteur de fréquence de la loi de Gumbel ;

σ : l'écart type de la population estimé par s ;

μ : la moyenne de la population estimée par $\bar{x}$.

I.7.3 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 :

$$f(x) = \frac{1}{\lambda\Gamma(\beta)}\left(\frac{X-\gamma}{\lambda}\right)^{\beta-1}.e^{\frac{-(x-\gamma)}{\lambda}} \quad \textbf{(I-50)}$$

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

$$\beta = (2/C_S)^2 ; \quad \textbf{(I-51)}$$

$$\lambda = \frac{S}{\sqrt{\beta}} ; \quad \textbf{(I-52)}$$

$$\gamma = \bar{x} + s\sqrt{\beta} \quad \textbf{(I-53)}$$

Où « C_s » 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 :

$x_T = \bar{x} + k_T .s$

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

$kt = \frac{2}{C_S}\{[\frac{C_S}{6}(z - \frac{C_S}{6}) + 1]^3 - 1\}$

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

D. Expressions de calcul des différentes caractéristiques de la distribution

- La moyenne :

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad \textbf{(I-54)}$$

- La variance:

$$Var(x) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \quad \textbf{(I-55)}$$

- L'écart type:

$$s = \sqrt{var(x)} \quad \textbf{(I-56)}$$

- Coefficient d'asymétrie:

$$c_s = \frac{n}{(n-1)*(n-2)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^3}{s^3} \quad \textbf{(I-57)}$$

- Coefficient de variation :

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad \textbf{(I-58)}$$

Dans ces expressions :

n désigne l'effectif total de la population,

$\bar{x}$ désigne la moyenne des séries des précipitations.

I.8 Initiation au logiciel d'interpolation des données

I.8.1 Présentation d'ArcGIS

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques.

En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographique (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias.

Les SIG sont considérés comme une des technologies de l'information les plus performantes car elle vise à intégrer des connaissances provenant de sources multiples et crée un environnement pluri-secteurs idéal pour la collaboration.

Les SIG proposent 3 volets pour afficher et manipuler les informations géographiques dont le géotraitement, géovisualisation et le géodatabase.

La version la plus simple du logiciel « ArcGIS desktop », « ArcView », ainsi que l'extension « Spatial Analyst ».

1. **ArcGIS Desktop**

ArcGIS Desktop (littéralement « ArcGIS de bureau ») et comprend une suite d'applications intégrées les unes aux autres :

- **ArcCatalog** facilite l'organisation et la gestion de toutes les données SIG (cartes, jeux de données, modèles, etc)

- **ArcMap** est l'application centrale d'ArcGIS Desktop. Elle se subdivise en deux interfaces : visualisation et traitement (analyse, édition, etc) des données géographiques dans la fenêtre « data view » et mise en page de cartes dans la fenêtre « layout view ».
- **ArcGlobe**, est similaire à ArcMap mais permet une visualisation 3D des données sur lesquelles vous travaillez.
- **ArcToolbox,** (littéralement, la « boite à outils » d'ArcGIS), regroupe l'ensemble des outils de géotraitement utiles pour réaliser des opérations sur les données géographiques.

I.8.2 Les grands types de données géographiques

Il existe 2 grands types de données géographiques dans les SIG : les « Matrices » et les « Vecteurs »

a. Les « Matrices »

Les « matrices », plus souvent appelées « Raster », correspondent à des grilles composées de cellules. Chaque cellule contient une valeur qui, souvent, représente un phénomène géographique, par exemple, l'altitude ou l'occupation du sol. Ce peut être une carte scannée, une photographie aérienne, une image satellite, une photo numérique, …

b. Les « vecteurs »

Les « vecteurs » sont composés de points, lignes ou polygones.

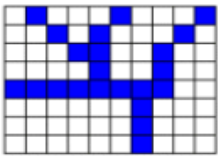
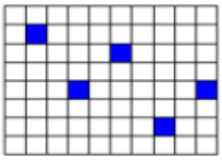
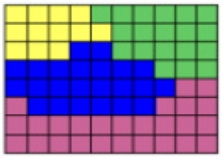
Vecteur	Matrice ou Raster	Exemple dans la réalité
		**Données linéaires** : cours d'eau, routes,…
		**Données ponctuelles** : arbres, stations météo, points GPS,…
		**Données polygonales** : lacs, limites administratives (frontières de pays, limites de communes, etc.), parcs naturels,…

Figure I-12 :Types de données géographiques

I.8.3 Les méthodes d'interpolation

Les méthodes d'interpolation sont basées sur le principe de l'autocorrélation spatiale, qui suppose que, plus les points sont proches, plus ils se ressemblent. Elles sont généralement classées en deux catégories : Les méthodes locales et les méthodes globales.

- Les méthodes locales prédisent la valeur d'un point sur la base des valeurs des points dans le voisinage

Les méthodes locales les plus utilisées sont :

- La méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW),
- La méthode du voisin naturel,
- Les méthodes de base radiales (spline).

- Les méthodes globales, telles que les fonctions d'interpolation polynomiale, utilisent tous les points d'échantillonnage disponibles pour générer des prévisions pour un point particulier.

Toutes ces méthodes sont aussi dites déterministes par opposition aux méthodes géostatistiques.

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 pondéré par l'inverse de la distance au point calculé : plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte, elle estime que les points plus proches de l'emplacement à calculer auront plus d'influence.

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 de valeurs utilisées.

C. 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.

C'est la méthode utilisée dans notre travail.

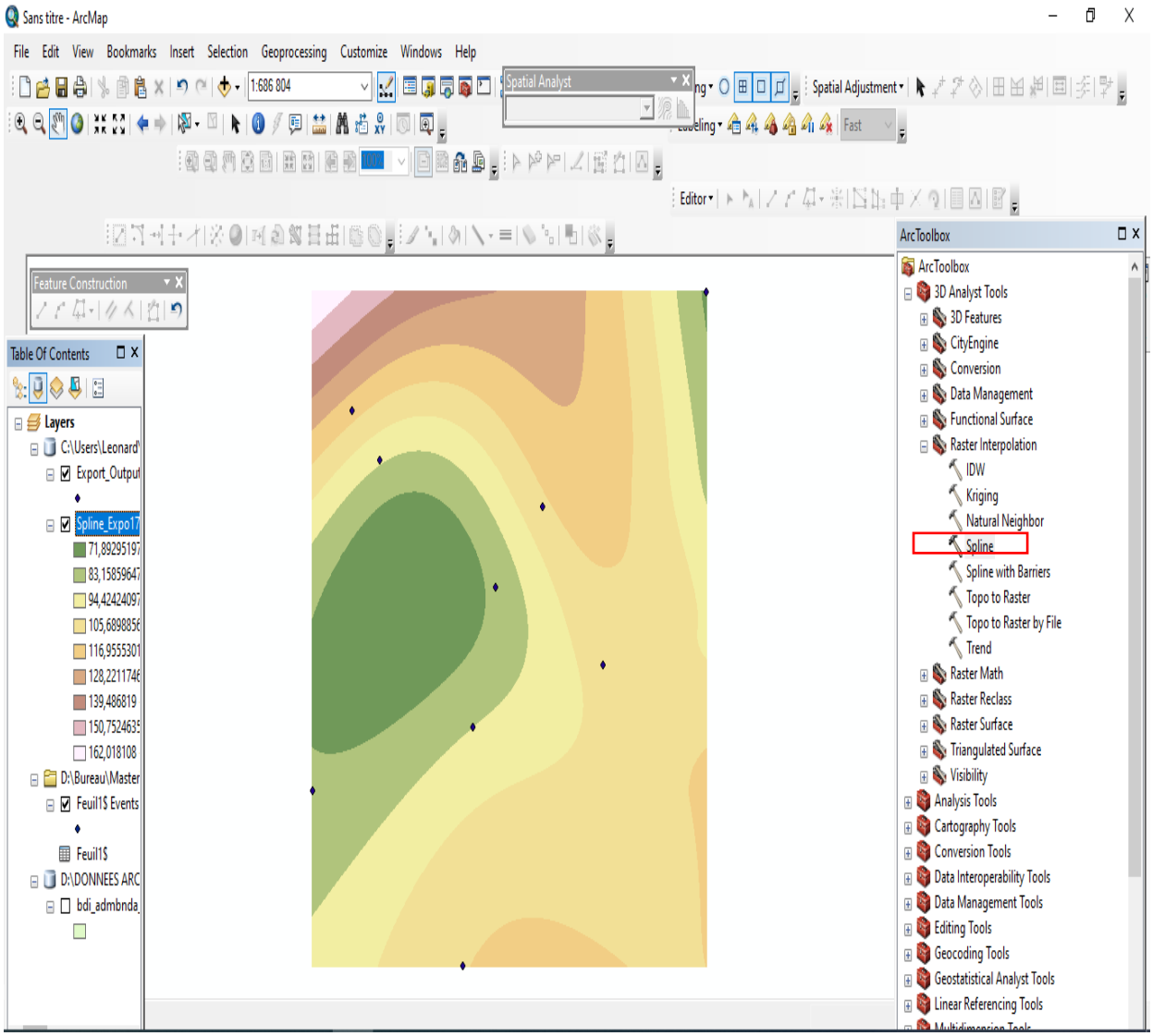


Figure I-13 : Représentation de la méthode d'interpolation utilisée

I.9 Conclusion

Comme notre travail a pour objectif principal de produire une carte des isohyètes extrêmes, nous optons d'utiliser pour la suite du développement du travail les méthodes suivantes :

1. **Pour le traitement des données :**
   - Homogénéisation des séries des Précipitations pour la station Ruyigi par les données de la station Muriza qui est la plus proche ;
   - Analyse fréquentielle en utilisant la loi de Pearson III.
2. **Pour tracer les isohyètes :**
   - Utilisation de la méthode d'interpolation des isohyètes spline vu qu'elle diminue la courbure de surface.

CHAPITRE II : TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSION DES RESULTATS

II.1 Introduction

Le présent travail vise à déterminer une précipitation extrême pouvant aider au dimensionnement des différents ouvrages hydrauliques dans la zone d'étude.

Les données recueillies auprès de l'IGEBU, pour les différentes stations météorologiques de cette zone d'étude ne sont pas observées pour les mêmes périodes en conséquence ne sont pas de même durée d'observation ; ce qui nécessite une homogénéisation de ces dernières.

II.2 Présentation des données pluviométriques à l'état brute

Le tableau suivant montre les résultats des données pluviométriques a l'état brute (non homogénéisées) :

Tableau II-1 :Présentation des données disponibles

	Cankuzo	Kinyinya	Ruyigi	Muriza	Giheta	Gitega	Musongati	Musasa	Ruvyironza
Année	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24
1990	74	51,8	**Abs**	75,4	55	50,2	60,7	50,2	76,8
1991	48,2	80,5	**Abs**	53,2	71,6	62,7	64,3	62,4	55,5
1992	40,5	66,4	**Abs**	84	43,5	39,9	43,8	50,5	67,9
1993	56,9	72	**Abs**	39,5	44	38,6	75,6	59,4	36,8
1994	46,5	31,2	**Abs**	79,6	42	92,6	52,6	50,9	45,1
1995	62,6	86,4	**Abs**	60	64	44,3	55,4	74,6	90
1996	45,5	80,6	**Abs**	70	61,8	62,1	75	77,8	64,4
1997	58,8	82,5	**Abs**	54,4	71	47,8	44,9	76,1	50,3
1998	63,1	67,9	**Abs**	55,3	105	64,5	44,9	70,8	55,6
1999	49,8	54	**Abs**	59,8	54	85,8	30,5	53,8	66,4
2000	38,7	47,5	**Abs**	42,7	39,6	67,7	40,2	51,5	41,2
2001	59,8	49,7	**Abs**	51,5	44,7	52,8	41,7	54,4	54,5
2002	47,5	57,2	**Abs**	49,2	44,4	73,2	**Abs**	70,8	54,8
2003	35,5	30,2	**Abs**	51,6	48,7	66,5	54,6	74	58
2004	47,4	29,9	46,2	80	70	69,7	60	63	72,4
2005	48,2	18,4	37,0	59,4	40,9	40,7	86,3	48	38,4
2006	60,6	27,4	84,7	51,4	72,3	97,7	75,4	55,8	67,8
2007	64,2	47	48,3	42,8	133	52,5	70,3	88	72
2008	60,7	49	51,8	63,7	69,5	55,9	58,8	48,2	71,6
2009	45,6	40	60,6	59,7	66,7	53	62,6	60	40,3
2010	67,4	63,6	63,5	70,7	46,1	48	76,4	50	38,4
2011	78,7	65	76,4	55,3	45,2	75,3	58,4	39,8	46,7
2012	48,2	118	73,7	44,1	68	49,7	62,6	57	68,9
2013	52,6	88,2	108,6	68,9	63,7	58,2	51,6	52	54,5
2014	52	70	107,2	61,6	44,7	48,1	**Abs**	67,7	65,5
2015	80,6	58,6	65,6	49	54,3	41	58,9	115	54,8
2016	47,7	74	55,8	59,8	46	57,3	98	49	62,5
2017	54,8	51,4	72,0	42,8	51,5	39	53	56,7	58,7
2018	55,8	61	92,3	59,2	59,3	61,2	72	66,6	59,4
2019	38	63,8	63,5	70,6	72,2	56,2	80	96	59,4
2020	63,4	101	64,8	75,5	62,1	60,2	33	94	63,9
2021	45,8	54,6	111,7	43,3	63,5	44	**Abs**	81	66,2

Avec :

- P_{24} : Précipitations journalières extrêmes annuelles ;
- Abs : non disponibilité des données.

Remarque

On constate la disparité des données pour les stations de Ruyigi de 1990 à 2003 et Musongati pour les années 2002, 2014 et 2021. C'est pour cette raison que pour arriver à trouver des résultats, nous avons fait recours à l'homogénéisation qui nous a servie d'estimer les données restantes de la station de Ruyigi.

Mais quant à la station de Musongati, les 30 observations sont estimées suffisantes pour que les résultats soient acceptables.

II.2.1 Homogénéisation des précipitations

Pour notre travail, nous avons utilisés les précipitations maximales annuelles journalières des 32 observations, (C'est-à-dire des années 1990 à 2021) enregistrées au niveau des stations météorologiques Cankuzo, Kinyinya, Ruyigi, Muriza, Giheta, Gitega Aérodrome, Musongati, Musasa et Ruvyironza ont été fournies par l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU). Ces précipitations ont fait l'objet d'une analyse suivi d'un traitement statistique pour la détermination de la pluie du projet.

Partant de la formule **(I-17),** voici les résultats trouvés après l'homogénéisation :

Tableau II-2 :Présentation des résultats d'homogénéisation des précipitations de la station RUYIGI

X_{Bi}	X_{Ai}	$X_{Bi}-\bar{x}_B$	$X_{Ai}-\bar{x}_A$	$(x_{Ai}-\bar{x}_A)^2$	$(x_{Bi}-\bar{x}_B)(x_{Ai}-\bar{x}_A)$
80	46,2	21,2	-25,1	450,9	-533,3
59,4	37	0,6	-34,3	0,4	-21,7
51,4	84,7	-7,4	13,4	54,3	-98,6
42,8	48,3	-16,0	-23,0	254,9	367,5
63,7	51,8	4,9	-19,5	24,3	-96,3
59,7	60,6	0,9	-10,7	0,9	-10,0
70,7	63,5	11,9	-7,8	142,4	-93,3
55,3	76,4	-3,5	5,1	12,0	-17,6
44,1	73,7	-14,7	2,4	215,1	-35,0
68,9	108,6	10,1	37,3	102,7	377,8
61,6	107,2	2,8	35,9	8,0	101,7
49	65,6	-9,8	-5,7	95,4	55,8
59,8	55,8	1,0	-15,5	1,1	-16,0
42,8	72	-16,0	0,7	254,9	-10,9
59,2	92,3	0,4	21,0	0,2	9,1
70,6	63,5	11,8	-7,8	140,0	-92,5
75,5	64,8	16,7	-6,5	280,0	-109,0
43,3	111,7	-15,5	40,4	239,2	-624,6
$\bar{x}_B$=58,77	$\bar{x}_A$=71,32			2276,74	-846,96

Avec :

X_A : précipitations maximales annuelles de la station pluviométrique de Ruyigi

X_B : précipitations maximales annuelles de la station pluviométrique de Muriza

Avec les formules ((I-17) et (I-18), on en déduit les valeurs α et β dans le tableau suivant :

Tableau II-3 :Valeurs des coefficients α et β

α	β
-0,372	93,178

Cette fois-ci, nous pouvons représenter les données qui vont nous servir pour le travail.

Tableau II-4 :Présentation finale des données utilisées pour le présent travail

	Cankuzo	Kinyinya	Ruyigi	Muriza	Giheta	Gitega	Musongati	Musasa	Ruvyironza
Année	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24	P24
1990	74	51,8	65,1	75,4	55	50,2	60,7	50,2	76,8
1991	48,2	80,5	73,4	53,2	71,6	62,7	64,3	62,4	55,5
1992	40,5	66,4	61,9	84	43,5	39,9	43,8	50,5	67,9
1993	56,9	72	78,5	39,5	44	38,6	75,6	59,4	36,8
1994	46,5	31,2	63,6	79,6	42	92,6	52,6	50,9	45,1
1995	62,6	86,4	70,9	60	64	44,3	55,4	74,6	90
1996	45,5	80,6	67,1	70	61,8	62,1	75	77,8	64,4
1997	58,8	82,5	72,9	54,4	71	47,8	44,9	76,1	50,3
1998	63,1	67,9	72,6	55,3	105	64,5	44,9	70,8	55,6
1999	49,8	54	70,9	59,8	54	85,8	30,5	53,8	66,4
2000	38,7	47,5	77,3	42,7	39,6	67,7	40,2	51,5	41,2
2001	59,8	49,7	74,0	51,5	44,7	52,8	41,7	54,4	54,5
2002	47,5	57,2	74,9	49,2	44,4	73,2	54,6	70,8	54,8
2003	35,5	30,2	74,0	51,6	48,7	66,5	60	74	58
2004	47,4	29,9	46,2	80	70	69,7	86,3	63	72,4
2005	48,2	18,4	37,0	59,4	40,9	40,7	75,4	48	38,4
2006	60,6	27,4	84,7	51,4	72,3	97,7	70,3	55,8	67,8
2007	64,2	47	48,3	42,8	132,8	52,5	58,8	88	72
2008	60,7	49	51,8	63,7	69,5	55,9	62,6	48,2	71,6
2009	45,6	40	60,6	59,7	66,7	53	76,4	60	40,3
2010	67,4	63,6	63,5	70,7	46,1	48	58,4	50	38,4
2011	78,7	65	76,4	55,3	45,2	75,3	62,6	39,8	46,7
2012	48,2	118	73,7	44,1	68	49,7	51,6	57	68,9
2013	52,6	88,2	108,6	68,9	63,7	58,2	58,9	52	54,5
2014	52	70	107,2	61,6	44,7	48,1	98	67,7	65,5
2015	80,6	58,6	65,6	49	54,3	41	53	114,8	54,8
2016	47,7	74	55,8	59,8	46	57,3	72	49	62,5
2017	54,8	51,4	72,0	42,8	51,5	39	80	56,7	58,7
2018	55,8	61	92,3	59,2	59,3	61,2	33	66,6	59,4
2019	38	63,8	63,5	70,6	72,2	56,2		96	59,4
2020	63,4	100,6	64,8	75,5	62,1	60,2		94	63,9
2021	45,8	54,6	111,7	43,3	63,5	44		81	66,2

II.3 Comparaison de la lois normale, Gumbel et Pearson III sur base d'analyse fréquentielle

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

A. Station Cankuzo

Tableau II-5 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt Normale	Kt	Xt Gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	44,870	-0,822	45,096	-0,856	44,711
2	0,5	0,5	0	54,347	-0,164	52,496	-0,097	53,259
5	0,8	0,2	0,842	63,824	0,720	62,453	0,799	63,349
10	0,9	0,1	1,282	68,778	1,305	69,045	1,326	69,279
25	0,96	0,04	1,751	74,061	2,045	77,374	1,934	76,125
50	0,98	0,02	2,054	77,473	2,594	83,552	2,353	80,845
100	0,99	0,01	2,326	80,543	3,138	89,686	2,748	85,295
250	0,996	0,004	2,652	84,211	3,855	97,761	3,244	90,873
500	0,998	0,002	2,878	86,757	4,397	103,86	3,603	94,916
1000	0,999	0,001	3,09	89,145	4,938	109,95	3,951	98,838

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

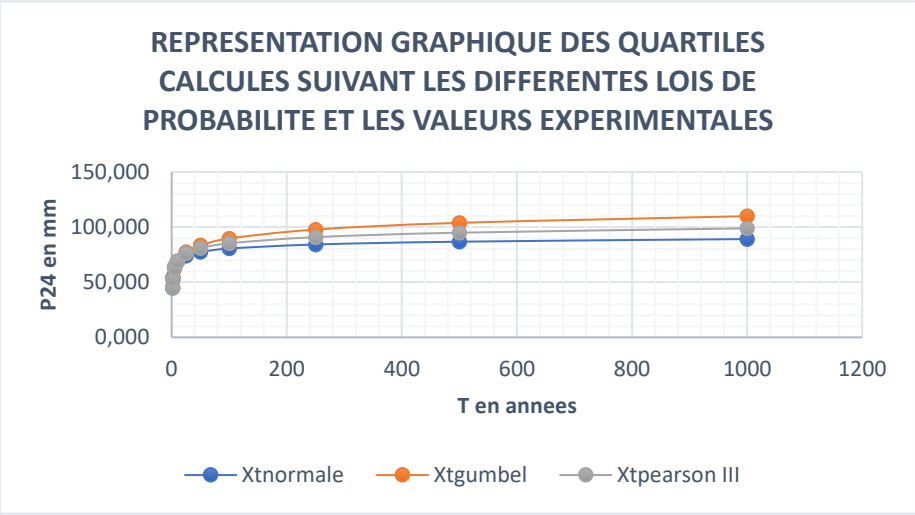


Figure II-1 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Cankuzo

B. Station Kinyinya

Tableau II-6 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station KINYINYA

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt Normale	Kt	Xt Gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	42,05	-0,82	42,49	-0,854	34,11
2	0,5	0,5	0,00	60,58	-0,16	56,96	-0,060	58,72
5	0,8	0,2	0,84	79,10	0,72	76,42	0,819	85,96
10	0,9	0,1	1,28	88,79	1,31	89,31	1,313	101,29
25	0,96	0,04	1,75	99,12	2,04	105,60	1,868	118,49
50	0,98	0,02	2,05	105,79	2,59	117,68	2,242	130,08
100	0,99	0,01	2,33	111,79	3,14	129,67	2,589	140,84
250	0,996	0,004	2,65	118,97	3,86	145,46	3,017	154,10
500	0,998	0,002	2,88	123,94	4,40	157,38	3,323	163,58
1000	0,999	0,001	3,09	128,61	4,94	169,29	3,616	172,67

Graphiquement, on a :

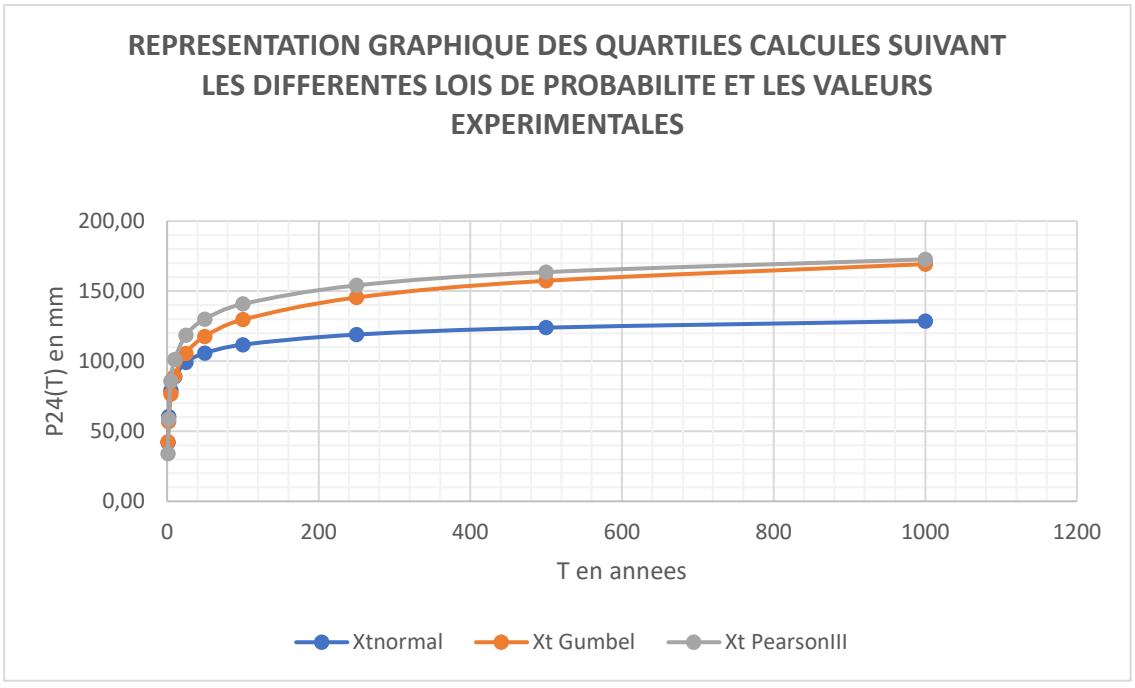


Figure II-2 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Kinyinya

C. Station Ruyigi

Tableau II-7 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station RUYIGI

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt Normale	Kt	Xt Gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	57,29	-0,82	57,63	-0,855	57,07
2	0,5	0,5	0,00	71,28	-0,16	68,55	-0,116	69,36
5	0,8	0,2	0,84	85,26	0,72	83,24	0,788	84,36
10	0,9	0,1	1,28	92,57	1,31	92,96	1,330	93,38
25	0,96	0,04	1,75	100,37	2,04	105,25	1,966	103,94
50	0,98	0,02	2,05	105,40	2,59	114,37	2,409	111,31
100	0,99	0,01	2,33	109,93	3,14	123,42	2,830	118,30
250	0,996	0,004	2,65	115,34	3,86	135,34	3,362	127,14
500	0,998	0,002	2,88	119,10	4,40	144,34	3,750	133,59
1000	0,999	0,001	3,09	122,62	4,94	153,33	4,129	139,88

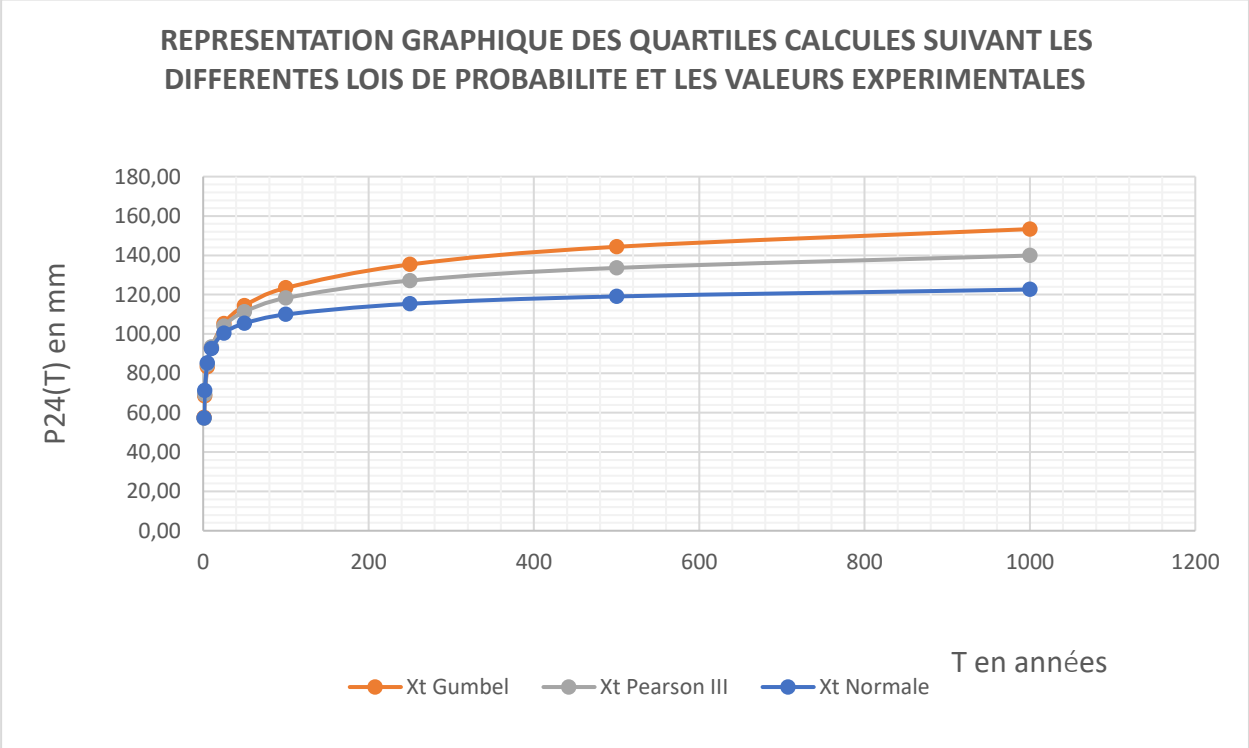


Figure II-3 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Ruyigi.

D. Station Muriza

Tableau II-8: Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station MURIZA

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt normale	Kt	Xt gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	48,58	-0,82	48,82	-0,85	48,43
2	0,5	0,5	0	58,88	-0,16	56,86	-0,06	58,16
5	0,8	0,2	0,842	69,17	0,72	67,68	0,82	68,90
10	0,9	0,1	1,282	74,55	1,31	74,84	1,31	74,94
25	0,96	0,04	1,751	80,29	2,04	83,89	1,87	81,70
50	0,98	0,02	2,054	84,00	2,59	90,60	2,24	86,26
100	0,99	0,01	2,326	87,34	3,14	97,27	2,58	90,49
250	0,996	0,004	2,652	91,32	3,86	106,04	3,01	95,70
500	0,998	0,002	2,878	94,09	4,40	112,67	3,31	99,42
1000	0,999	0,001	3,09	96,68	4,94	119,29	3,61	102,98

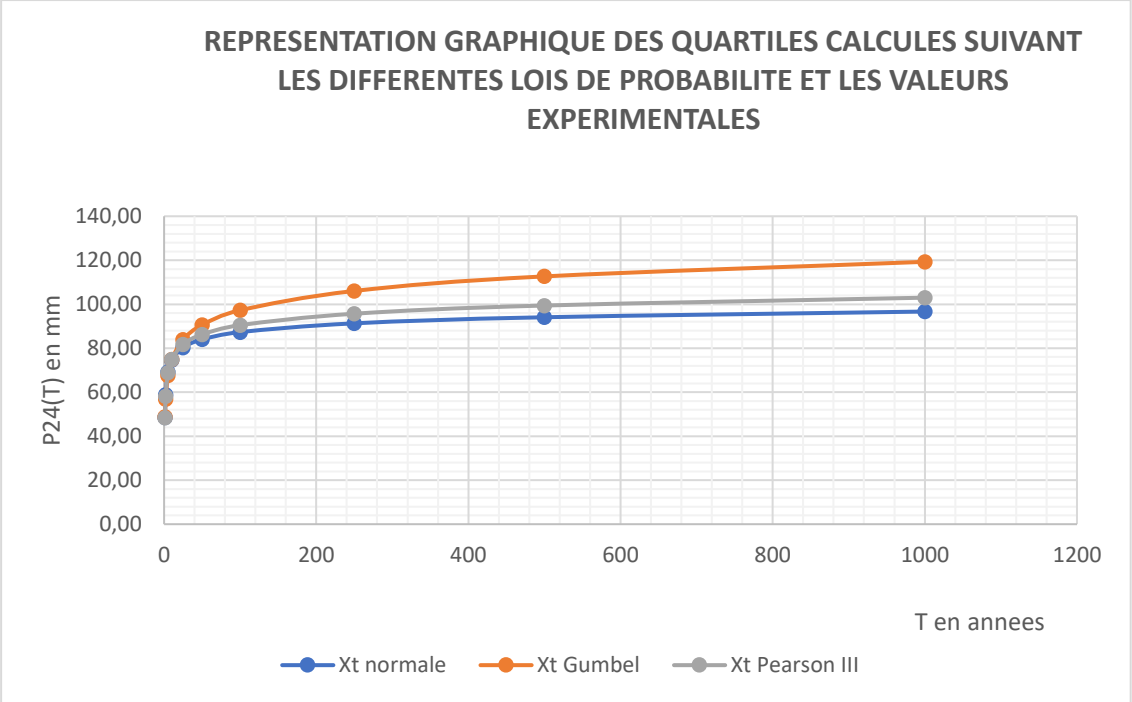


Figure II-4 :Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitations pour la station Ruyigi

E. Station Giheta

Tableau II-9 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt normale	Kt	Xt gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	43,747	-0,822	44,135	-0,763	45,263
2	0,5	0,5	0	59,941	-0,164	56,778	-0,310	53,981
5	0,8	0,2	0,842	76,134	0,7198	73,790	0,580	71,093
10	0,9	0,1	1,282	84,598	1,3052	85,054	1,267	84,326
25	0,96	0,04	1,751	93,625	2,0449	99,285	2,200	102,271
50	0,98	0,02	2,054	99,456	2,5936	109,843	2,924	116,192
100	0,99	0,01	2,326	104,701	3,1383	120,322	3,662	130,405
250	0,996	0,004	2,652	110,968	3,8554	134,121	4,661	149,628
500	0,998	0,002	2,878	115,318	4,3969	144,539	5,434	164,486
1000	0,999	0,001	3,09	119,398	4,938	154,951	6,219	179,606

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

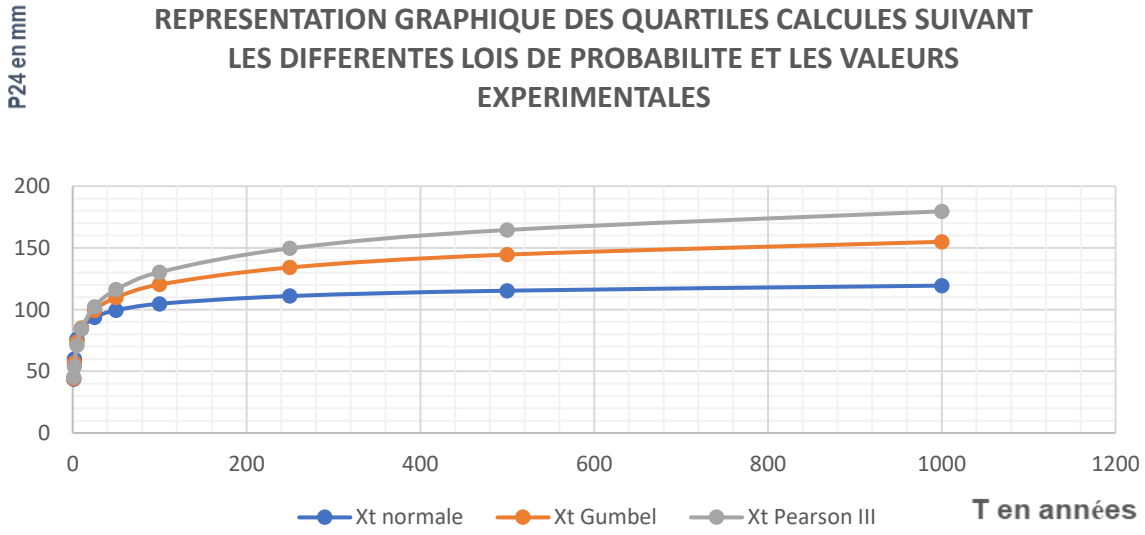


Figure II-5:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Giheta

F. Station Gitega aérodrome

Tableau II-10 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station GITEGA AERODROME

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt Normale	Kt	Xt Gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	45,33	-0,82	45,64	-0,85	45,22
2	0,5	0,5	0	58,01	-0,16	55,54	-0,16	55,61
5	0,8	0,2	0,842	70,69	0,72	68,86	0,76	69,40
10	0,9	0,1	1,282	77,32	1,31	77,68	1,33	78,12
25	0,96	0,04	1,751	84,39	2,04	88,82	2,03	88,67
50	0,98	0,02	2,054	88,95	2,59	97,08	2,53	96,20
100	0,99	0,01	2,326	93,06	3,14	105,29	3,02	103,48
250	0,996	0,004	2,652	97,96	3,86	116,09	3,64	112,83
500	0,998	0,002	2,878	101,37	4,40	124,25	4,10	119,75
1000	0,999	0,001	3,09	104,57	4,94	132,40	4,55	126,57

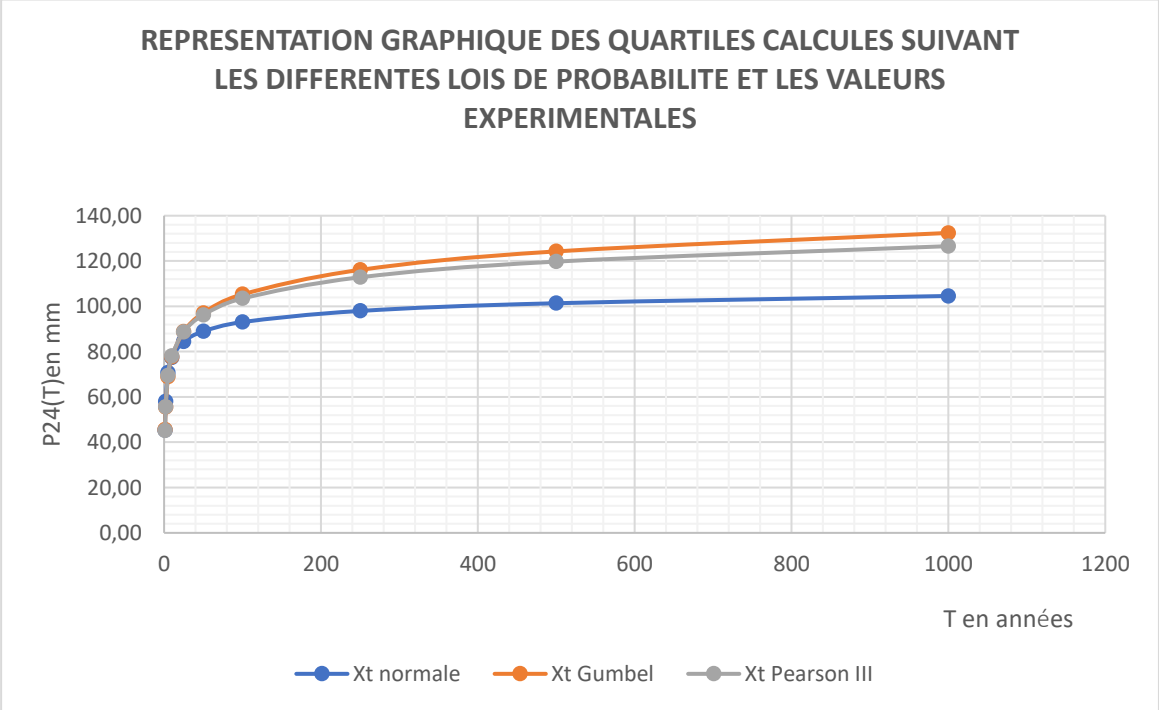


Figure II-6:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Gitega Aérodrome

G. Station Musongati

Tableau II-11 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station MUSONGATI

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt Normale	Kt	Xt Gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,842	44,36	-0,82	44,69	-0,85	37,60
2	0,5	0,5	0	58,09	-0,16	55,41	-0,06	56,60
5	0,8	0,2	0,842	71,83	0,72	69,84	0,82	77,72
10	0,9	0,1	1,282	79,01	1,31	79,39	1,31	89,64
25	0,96	0,04	1,751	86,66	2,04	91,46	1,87	103,04
50	0,98	0,02	2,054	91,61	2,59	100,41	2,25	112,09
100	0,99	0,01	2,326	96,05	3,14	109,30	2,60	120,50
250	0,996	0,004	2,652	101,37	3,86	121,00	3,03	130,87
500	0,998	0,002	2,878	105,06	4,40	129,84	3,34	138,29
1000	0,999	0,001	3,09	108,52	4,94	138,67	3,64	145,42

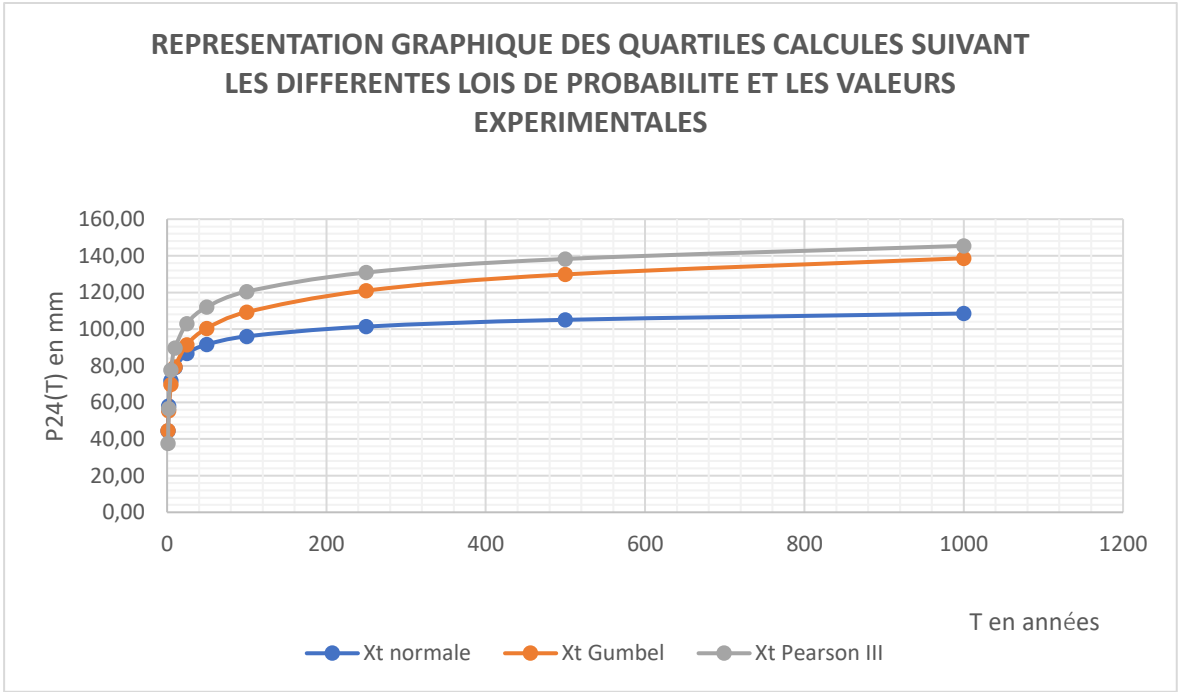


Figure II-7:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Musongati

H. Station Musasa

Tableau II-12 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station MUSASA

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt Normale	Kt	Xt Gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	50,36	-0,82	50,69	-0,84	47,69
2	0,5	0,5	0	64,53	-0,16	61,76	-0,19	60,81
5	0,8	0,2	0,84	78,69	0,72	76,64	0,73	79,19
10	0,9	0,1	1,28	86,10	1,31	86,50	1,33	91,19
25	0,96	0,04	1,75	94,00	2,04	98,95	2,07	105,97
50	0,98	0,02	2,05	99,10	2,59	108,19	2,61	116,69
100	0,99	0,01	2,33	103,69	3,14	117,36	3,13	127,14
250	0,996	0,004	2,65	109,17	3,86	129,43	3,81	140,70
500	0,998	0,002	2,88	112,98	4,40	138,55	4,31	150,82
1000	0,999	0,001	3,09	116,55	4,94	147,66	4,82	160,85

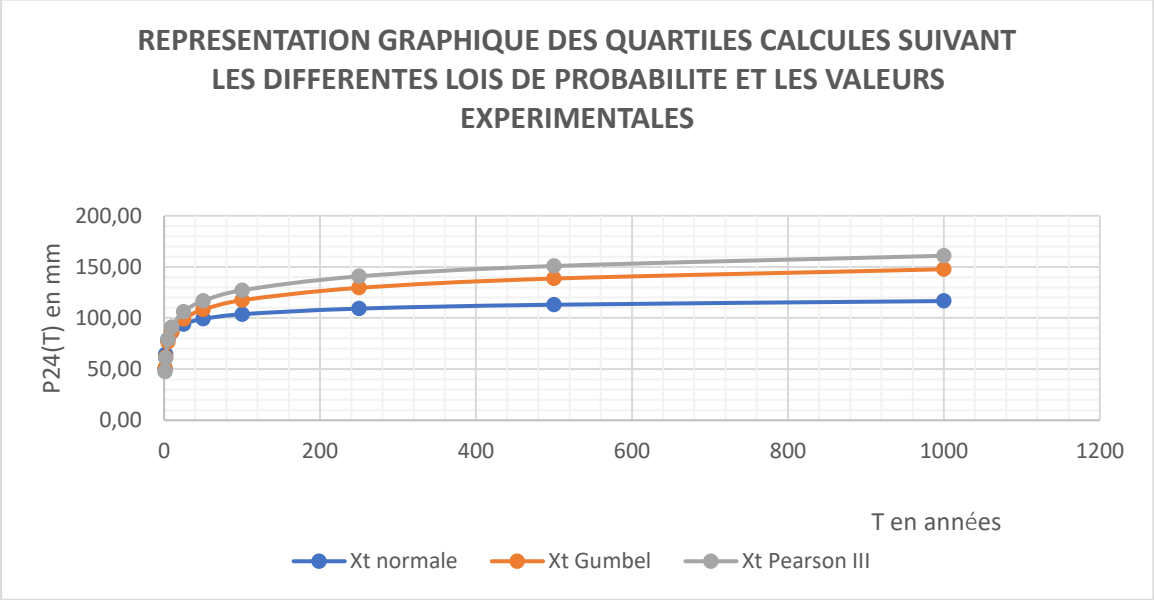


Figure II-8:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Musasa

I. Station Ruvyironza

Tableau II-13 : Comparaison des lois d'analyse fréquentielle des précipitations de la station RUVYIRONZA

			Normale		Gumbel		Pearson III	
T(ans)	P(X<=xi)	P(X>=xi)	Kt=Zt	Xt Normale	Kt	Xt Gumbel	Kt	Xt Pearson III
1,25	0,2	0,8	-0,84	42,0452	-0,82	42,49	-0,85	31,55
2	0,5	0,5	0	60,575	-0,16	56,96	-0,06	58,54
5	0,8	0,2	0,842	79,1048	0,72	76,42	0,82	88,42
10	0,9	0,1	1,282	88,7907	1,31	89,31	1,31	105,23
25	0,96	0,04	1,751	99,1195	2,04	105,60	1,87	124,09
50	0,98	0,02	2,054	105,792	2,59	117,68	2,24	136,80
100	0,99	0,01	2,326	111,794	3,14	129,67	2,59	148,59
250	0,996	0,004	2,652	118,965	3,86	145,46	3,02	163,13
500	0,998	0,002	2,878	123,943	4,40	157,38	3,32	173,52
1000	0,999	0,001	3,09	128,612	4,94	169,29	3,61	183,48

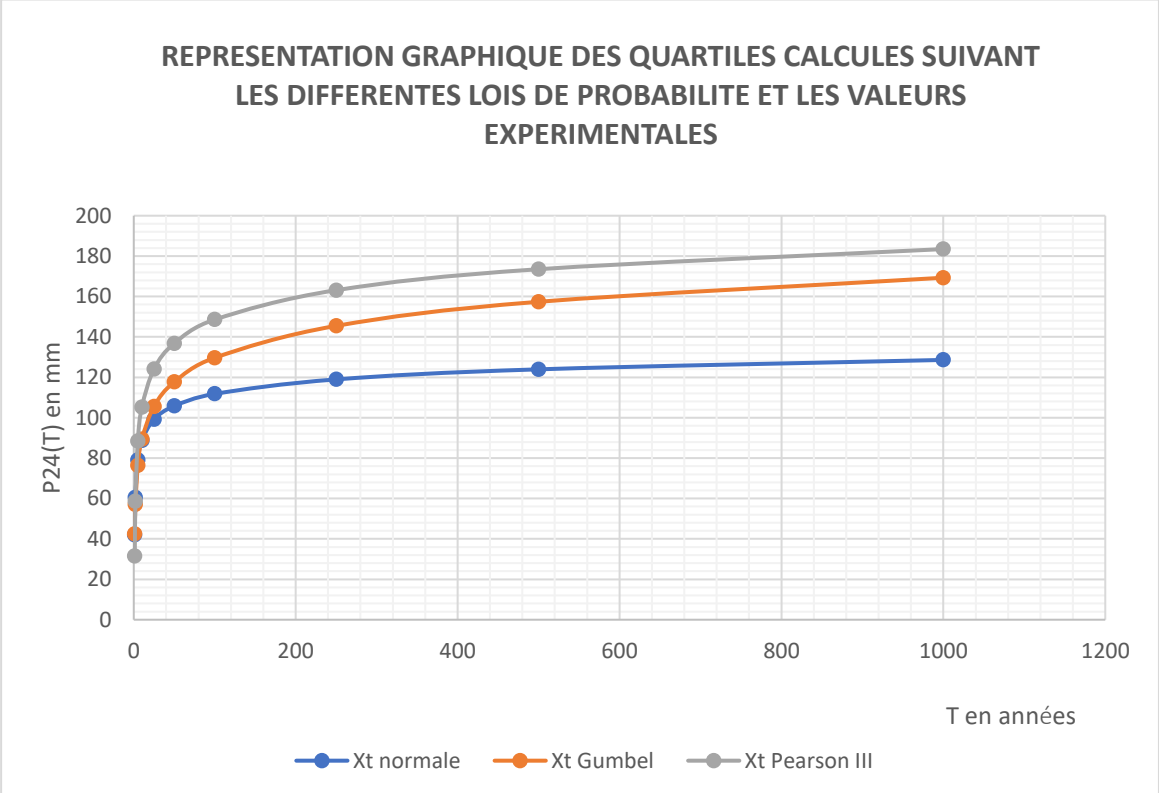


Figure II-9:Représentation graphique d'analyse des résultats fréquentielle des précipitation pour la station Ruvyironza

II.3.1 Commentaire

Si on observe les courbes représentées sur les graphiques ci-dessus et les autres en annexe ainsi que leurs points expérimentaux, on remarque que pour une période de récurrence inférieure ou égale à 10ans, les courbes de la loi de Gumbel, loi normale et Pearson III sont presque confondues. Au-delà de 20ans, les trois courbes commencent à se décaler avec un écart très net pour une période de retour égale à 1000ans (C'est-à-dire lorsque T tend vers l'infini).

En d'autre terme, la grande valeur s'observe sur la courbe Gumbel pour quelques stations météorologiques mais en majorité des cas, c'est la loi de Pearson III qui nous donne la grande valeur, donc elle apporte plus de sécurité.

Pour la suite de ce travail, nous avons jugé bon d'adopter la loi Pearson III comme la loi de probabilité représentant au mieux la série des observations.

II.4 Calcul de la courbe de fréquence des précipitations

Pour calculer la courbe de fréquence, nous avons procédé comme suit :

- Triage des P_{24} du plus petit au plus grand
- Ranger les P_{24} triées sur une colonne
- Calcul du P en %
- Calcul du Pi

Avec:

$$\mathbf{P = \frac{m}{n+1} *100\%} \qquad \textbf{(II-1)}$$

m :numéro d'ordre

n :nombre total d'échantillon

- Calcul du coefficient de divergence

Avec :

$$\mathbf{Cv = \sqrt{\frac{\sum(k_i-1)^2}{n-1}}} \qquad \textbf{(II-2)}$$

- Calcul du coefficient d'asymétrie

Avec :

$$\mathbf{Cs = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^3}{(n-3)(Cv^3*\bar{x}^3)}} \qquad \textbf{(II-3)}$$

- Après l'obtention du Cv et du Cs, on détermine leur rapport qui nous permet de trouver la valeur de Xp sur le tableau de Pearson III correspondant à chaque période de retour.
- Tracer la courbe de corrélation aux points de la station pluviométrique;
- Tracer la courbe de fréquence pour chaque station pluviométrique.

II.4.1 Analyse statistique des données des précipitations de la station Cankuzo

Tableau II-14 :Analyse statistique des données recueillies à la station Cankuzo

Année	P24	m	P_{24} trié	P%	Z	Ki	Ki - 1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{x}$)^3
1990	74	1	80,6	3,03	-1,88	1,48	0,48	0,23	18094,351
1991	48,2	2	78,7	6,06	-1,55	1,45	0,45	0,20	14443,222
1992	40,5	3	74	9,09	-1,34	1,36	0,36	0,13	7590,928
1993	56,9	4	67,4	12,12	-1,17	1,24	0,24	0,06	2224,045
1994	46,5	5	64,2	15,15	-1,03	1,18	0,18	0,03	956,581
1995	62,6	6	63,4	18,18	-0,91	1,17	0,17	0,03	741,986
1996	45,5	7	63,1	21,21	-0,80	1,16	0,16	0,03	670,640
1997	58,8	8	62,6	24,24	-0,70	1,15	0,15	0,02	562,154
1998	63,1	9	60,7	27,27	-0,60	1,12	0,12	0,01	256,426
1999	49,8	10	60,6	30,30	-0,52	1,12	0,12	0,01	244,507
2000	38,7	11	59,8	33,33	-0,43	1,10	0,10	0,01	162,157
2001	59,8	12	58,8	36,36	-0,35	1,08	0,08	0,01	88,307
2002	47,5	13	56,9	39,39	-0,27	1,05	0,05	0,00	16,642
2003	35,5	14	55,8	42,42	-0,19	1,03	0,03	0,00	3,068
2004	47,4	15	54,8	45,45	-0,11	1,01	0,01	0,00	0,093
2005	48,2	16	52,6	48,48	-0,04	0,97	-0,03	0,00	-5,331
2006	60,6	17	52	51,52	0,04	0,96	-0,04	0,00	-12,926
2007	64,2	18	49,8	54,55	0,11	0,92	-0,08	0,01	-94,002
2008	60,7	19	48,2	57,58	0,19	0,89	-0,11	0,01	-232,254
2009	45,6	20	48,2	60,61	0,27	0,89	-0,11	0,01	-232,254
2010	67,4	21	48,2	63,64	0,35	0,89	-0,11	0,01	-232,254
2011	78,7	22	47,7	66,67	0,43	0,88	-0,12	0,01	-293,665
2012	48,2	23	47,5	69,70	0,52	0,87	-0,13	0,02	-320,979
2013	52,6	24	47,4	72,73	0,60	0,87	-0,13	0,02	-335,250
2014	52	25	46,5	75,76	0,70	0,86	-0,14	0,02	-483,159
2015	80,6	26	45,8	78,79	0,80	0,84	-0,16	0,02	-624,341
2016	47,7	27	45,6	81,82	0,91	0,84	-0,16	0,03	-669,204
2017	54,8	28	45,5	84,85	1,03	0,84	-0,16	0,03	-692,420
2018	55,8	29	40,5	87,88	1,17	0,75	-0,25	0,06	-2654,944
2019	38	30	38,7	90,91	1,34	0,71	-0,29	0,08	-3830,741
2020	63,4	31	38	93,94	1,55	0,70	-0,30	0,09	-4368,217
2021	45,8	32	35,5	96,97	1,88	0,65	-0,35	0,12	-6694,499
								∑=1,33	∑=24278,66

Tableau II-15 :Les valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\bar{x}$	54,347
Cv	0,207
Cv^3*$\bar{x}$^3	1427,870
Cs	0,586
Cs/Cv	2,830

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,21 et celle d'asymétrie est égale à 0,59. Cela nous conduit à en déduire leur rapport de 2,83.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P en faisant l'interpolation de la valeur trouvée pour Cs = 2,5 Cv et celle pour Cs = 3 Cv.

Le rapport C_s/ C_v nous a permis de trouver la valeur Kp, coefficient des crues qui nous sert de trouver la valeur des crues pour chaque probabilité

Ayant le rapport C_s/C_v = 2,83, nous avons besoin Cs = 2,8Cv. Pour y arriver, on a fait recours à l'interpolation.

Tableau II-16 :Tableau des coefficients et calcul de la hauteur des précipitations extrêmes

		Cs = 2,5Cv	**Cs = 3 Cv**	**Cs = 2,8Cv**	
Z	**p%**	**Kp**	**Kp**	**Kp**	**X Projet**
-3,72	0,01	2,03	2,08	2,04	113,04
-3,09	0,1	1,81	1,84	1,81	100,00
-2,88	0,2	1,74	1,76	1,74	95,65
-2,72	0,33	1,69	1,71	1,69	92,93
-2,58	0,5	1,65	1,67	1,65	90,76
-2,33	1	1,57	1,58	1,57	85,87
-2,05	2	1,49	1,5	1,49	81,52
-1,64	5	1,37	1,38	1,37	75,00
-1,28	10	1,28	1,28	1,28	69,56
-0,84	20	1,17	1,17	1,17	63,59
0,00	50	0,98	0,98	0,98	53,26
0,67	75	0,85	0,85	0,85	46,19
1,28	90	0,75	0,75	0,75	40,76
1,64	95	0,69	0,7	0,69	38,04
2,33	99	0,6	0,61	0,6	33,15

La figure suivante nous montre la représentation graphique de la corrélation de la courbe aux points de la station Cankuzo:

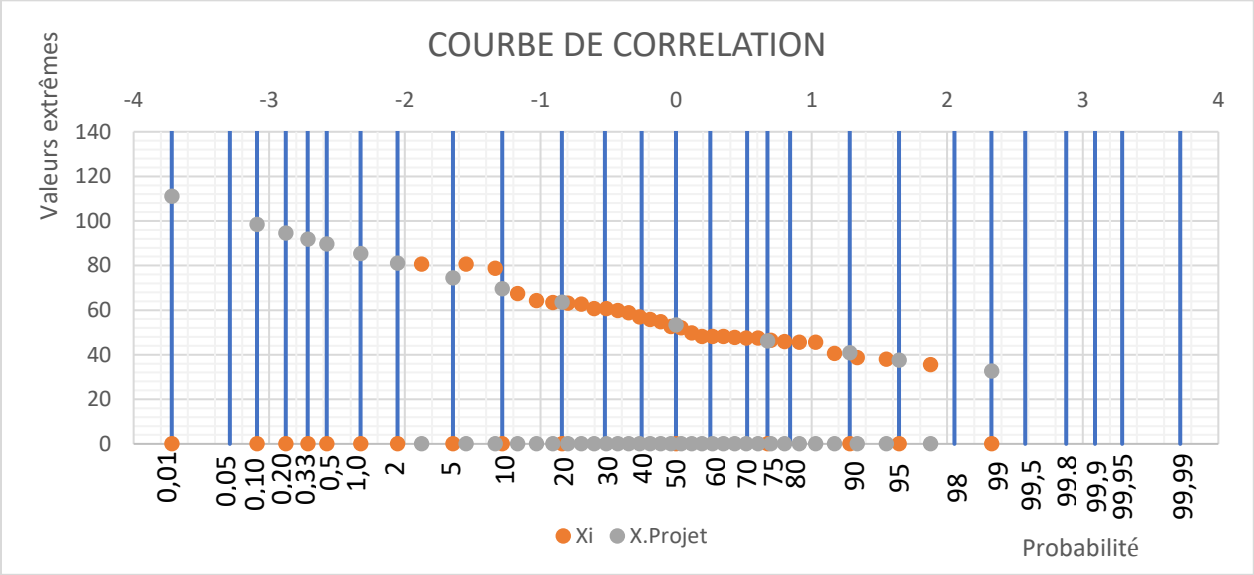


Figure II-10 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Cankuzo

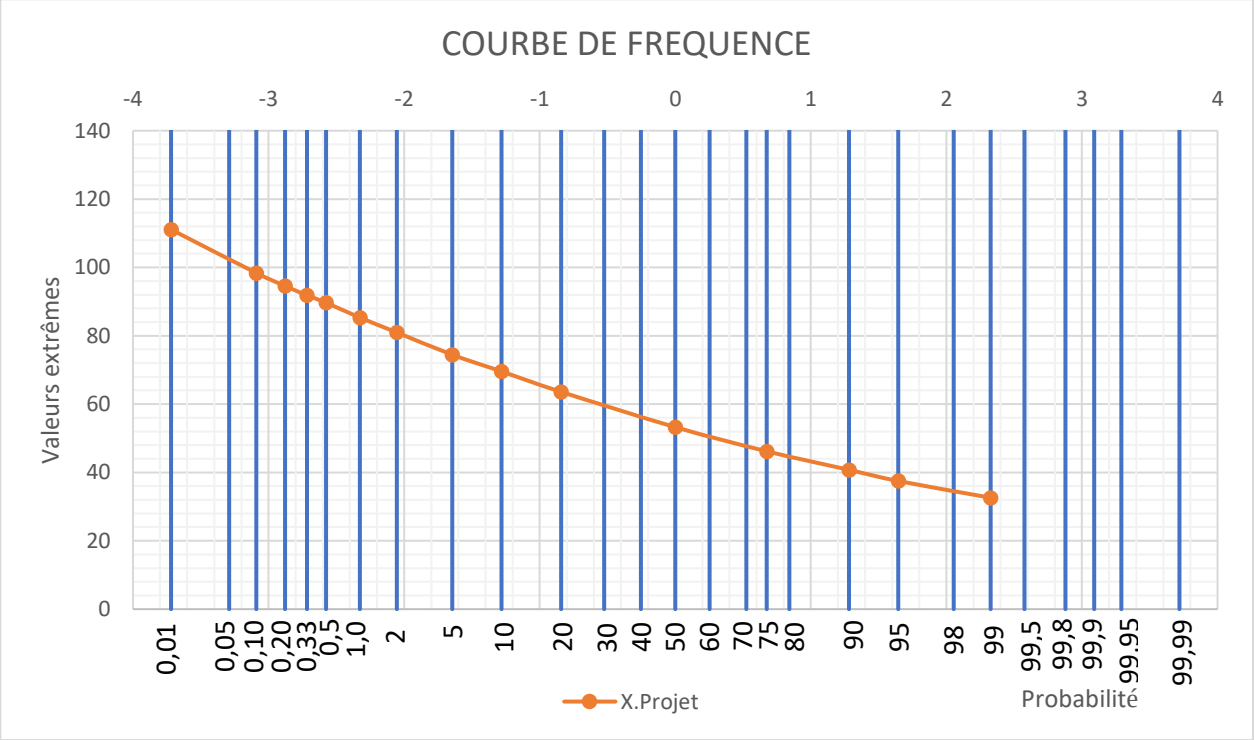


Figure II-11 : Courbe de fréquence pour la station CANKUZO

II.4.2 Analyse statistique des données des précipitations de la station Kinyinya

Tableau II-17 : Analyse statistique des données recueillies à la station Kinyinya

Année	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{x}$)^3
1990	51,8	1	118	3,03	1,95	0,95	0,90	189366,44
1991	80,5	2	100,6	6,06	1,66	0,66	0,44	64120,08
1992	66,4	3	88,2	9,09	1,46	0,46	0,21	21081,76
1993	72	4	86,4	12,12	1,43	0,43	0,18	17223,48
1994	31,2	5	82,5	15,15	1,36	0,36	0,13	10539,47
1995	86,4	6	80,6	18,18	1,33	0,33	0,11	8030,04
1996	80,6	7	80,5	21,21	1,33	0,33	0,11	7910,34
1997	82,5	8	74	24,24	1,22	0,22	0,05	2419,60
1998	67,9	9	72	27,27	1,19	0,19	0,04	1491,31
1999	54	10	70	30,30	1,16	0,16	0,02	837,23
2000	47,5	11	67,9	33,33	1,12	0,12	0,01	393,03
2001	49,7	12	66,4	36,36	1,10	0,10	0,01	197,65
2002	57,2	13	65	39,39	1,07	0,07	0,01	86,64
2003	30,2	14	63,8	42,42	1,05	0,05	0,00	33,54
2004	29,9	15	63,6	45,45	1,05	0,05	0,00	27,68
2005	18,4	16	61	48,48	1,01	0,01	0,00	0,08
2006	27,4	17	58,6	51,52	0,97	-0,03	0,00	-7,70
2007	47	18	57,2	54,55	0,94	-0,06	0,00	-38,44
2008	49	19	54,6	57,58	0,90	-0,10	0,01	-213,31
2009	40	20	54	60,61	0,89	-0,11	0,01	-284,24
2010	63,6	21	51,8	63,64	0,86	-0,14	0,02	-675,68
2011	65	22	51,4	66,67	0,85	-0,15	0,02	-772,36
2012	118	23	49,7	69,70	0,82	-0,18	0,03	-1286,14
2013	88,2	24	49	72,73	0,81	-0,19	0,04	-1550,83
2014	70	25	47,5	75,76	0,78	-0,22	0,05	-2235,24
2015	58,6	26	47	78,79	0,78	-0,22	0,05	-2501,61
2016	74	27	40	81,82	0,66	-0,34	0,12	-8710,03
2017	51,4	28	31,2	84,85	0,52	-0,48	0,24	-25347,41
2018	61	29	30,2	87,88	0,50	-0,50	0,25	-28025,21
2019	63,8	30	29,9	90,91	0,49	-0,51	0,26	-28863,81
2020	100,6	31	27,4	93,94	0,45	-0,55	0,30	-36511,76
2021	54,6	32	18,4	96,97	0,30	-0,70	0,48	-75017,96
							∑= 4,10	∑=111716,61

Tableau II-18 :Les Valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\bar{x}$	60,575
Cv	0,36
Cv^3*$\bar{X}$^3	10672,41
Cs	0,36
Cs/ Cv	1,0

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,36 et celle d'asymétrie est égale à 0,36. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 1.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P sur le tableau de Pearson III pour Cs = Cv.

Tableau II-19 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes

Cs = Cv			
p%	**Z**	**K pi**	**Pi extrêmes**
0,01	-3,72	2,62	158,71
0,1	-3,09	2,3	139,32
0,2	-2,88	2,19	132,66
0,33	-2,72	2,12	128,42
0,5	-2,58	2,05	124,18
1	-2,33	1,93	116,91
2	-2,05	1,8	109,04
5	-1,64	1,63	98,74
10	-1,28	1,47	89,05
20	-0,84	1,3	78,75
50	0,00	0,98	59,36
75	0,67	0,75	45,43
90	1,28	0,55	33,32
95	1,64	0,45	27,26
99	2,33	0,26	15,75

Ici en bas, sont représentées les courbes de corrélation et de fréquence.

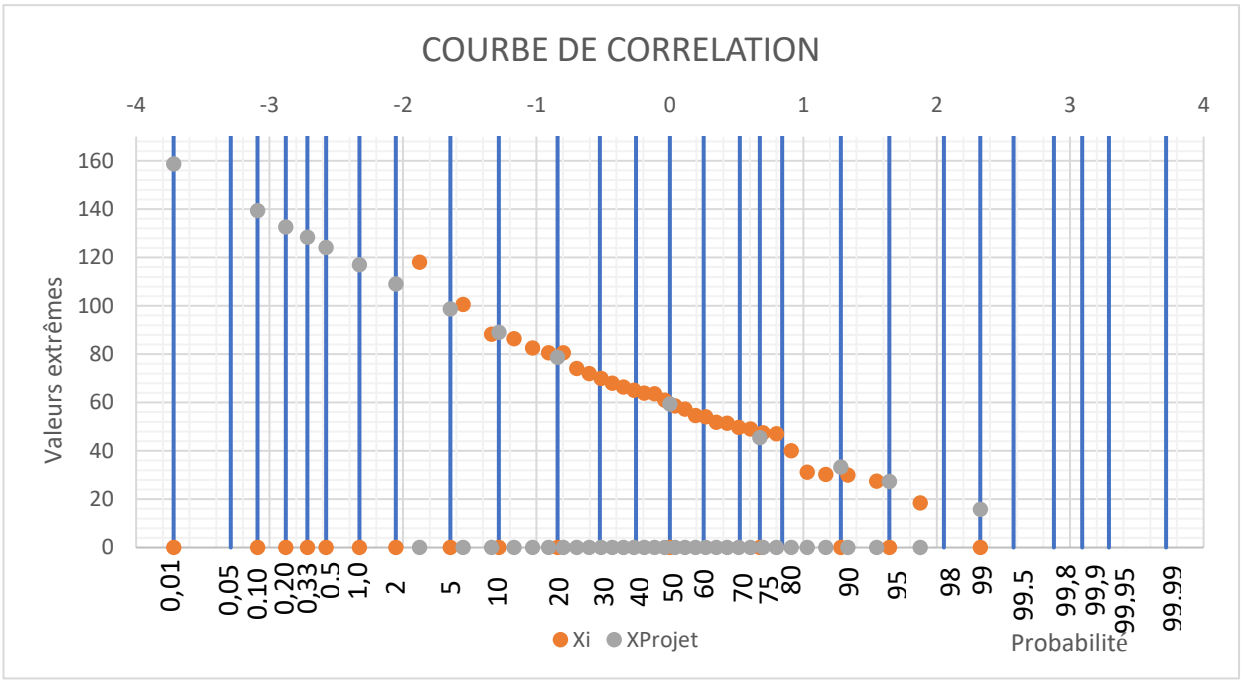


Figure II-12 : Représentation graphique de la corrélation au points de la station Kinyinya

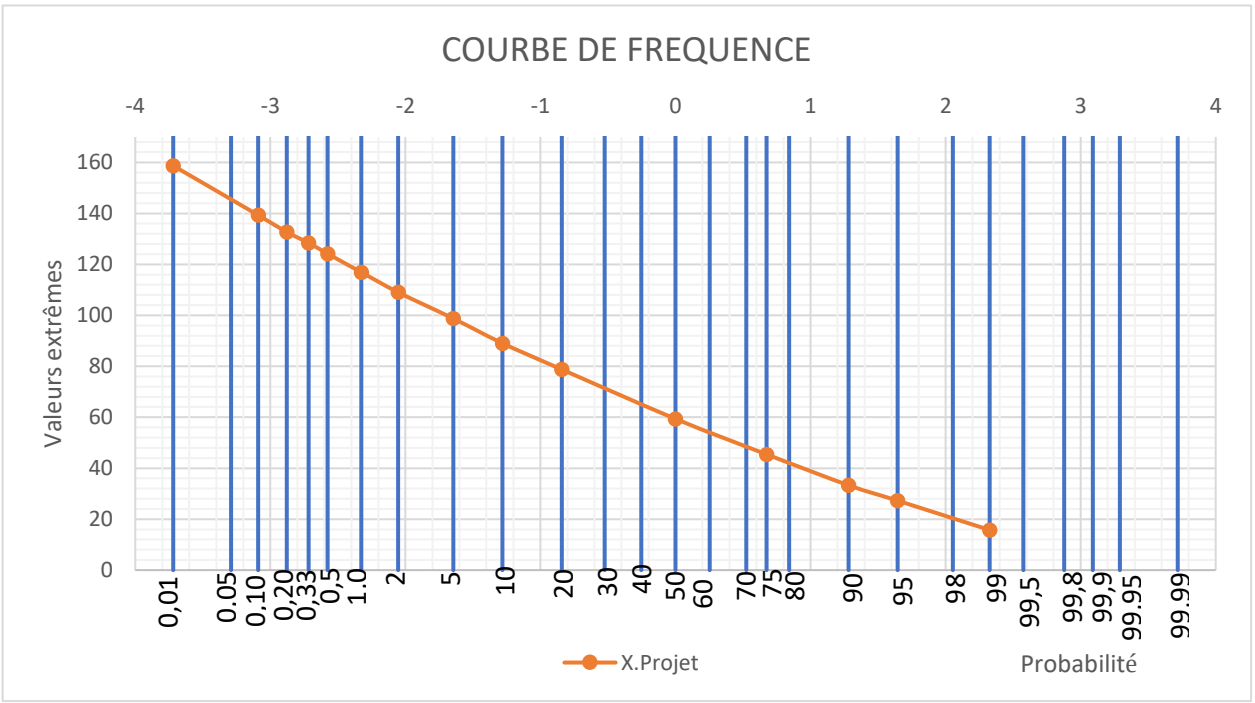


Figure II-13 : Courbe de fréquence pour la station Kinyinya

II.4.3 Analyse statistique des données des précipitations de la station Ruyigi

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

Année	P24	m	Xi trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{x}$)^3
1990	65,1	1	111,70	3,03	1,57	0,57	0,32	66055,055
1991	73,4	2	108,60	6,06	1,52	0,52	0,27	51993,825
1992	61,9	3	107,20	9,09	1,50	0,50	0,25	46359,718
1993	78,5	4	92,30	12,12	1,29	0,29	0,09	9292,303
1994	63,6	5	84,70	15,15	1,19	0,19	0,04	2418,858
1995	70,9	6	78,48	18,18	1,10	0,10	0,01	374,432
1996	67,1	7	77,29	21,21	1,08	0,08	0,01	217,862
1997	72,9	8	76,40	24,24	1,07	0,07	0,01	134,504
1998	72,6	9	74,88	27,27	1,05	0,05	0,00	46,623
1999	70,9	10	74,02	30,30	1,04	0,04	0,00	20,651
2000	77,3	11	73,98	33,33	1,04	0,04	0,00	19,822
2001	74,0	12	73,70	36,36	1,03	0,03	0,00	14,236
2002	74,9	13	73,39	39,39	1,03	0,03	0,00	9,409
2003	74,0	14	72,94	42,42	1,02	0,02	0,00	4,613
2004	46,2	15	72,61	45,45	1,02	0,02	0,00	2,352
2005	37	16	72,00	48,48	1,01	0,01	0,00	0,379
2006	84,7	17	70,93	51,52	1,00	0,00	0,00	-0,041
2007	48,3	18	70,86	54,55	0,99	-0,01	0,00	-0,073
2008	51,8	19	67,14	57,58	0,94	-0,06	0,00	-70,884
2009	60,6	20	65,60	60,61	0,92	-0,08	0,01	-182,899
2010	63,5	21	65,13	63,64	0,91	-0,09	0,01	-232,313
2011	76,4	22	64,80	66,67	0,91	-0,09	0,01	-271,640
2012	73,7	23	63,57	69,70	0,89	-0,11	0,01	-458,281
2013	108,6	24	63,50	72,73	0,89	-0,11	0,01	-470,251
2014	107,2	25	63,50	75,76	0,89	-0,11	0,01	-470,251
2015	65,6	26	61,93	78,79	0,87	-0,13	0,02	-816,520
2016	55,8	27	60,60	81,82	0,85	-0,15	0,02	-1216,943
2017	72	28	55,80	84,85	0,78	-0,22	0,05	-3706,867
2018	92,3	29	51,80	87,88	0,73	-0,27	0,07	-7387,947
2019	63,5	30	48,30	90,91	0,68	-0,32	0,10	-12129,531
2020	64,8	31	46,20	93,94	0,65	-0,35	0,12	-15768,624
2021	111,7	32	37,00	96,97	0,52	-0,48	0,23	-40270,249
							∑=1,68	∑=93511,326

Tableau II-21 :Les Valeurs caractéristiques

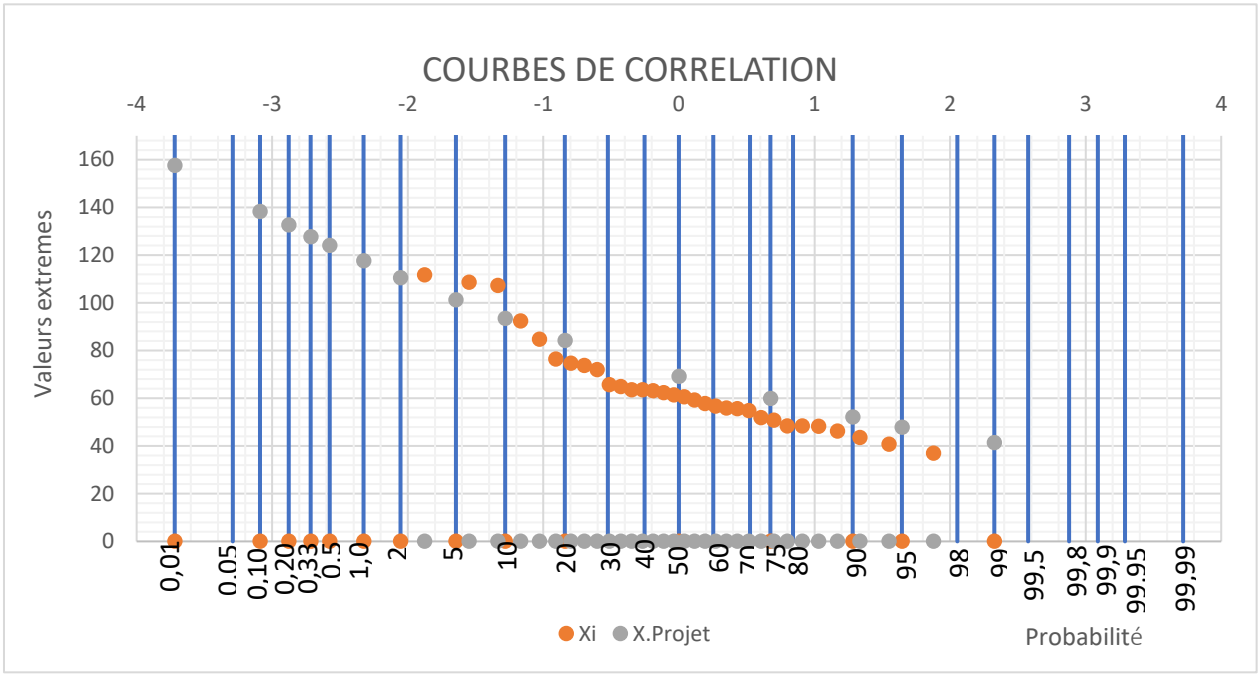
Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\overline{x}$	71,276
Cv	0,23
Cv^3*$\overline{X}$^3	4587,66
Cs	0,70
Cs/Cv	3,0

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,23 et celle d'asymétrie est égale à 0,70. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 3.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P en lisant dans le tableau de Pearson III pour Cs = 3 Cv.

Tableau II-22 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes

Cs = 3Cv			
p%	**Z**	**Kp**	**X projet**
0,01	-3,72	2,21	157,52
0,1	-3,09	1,94	138,28
0,2	-2,88	1,86	132,57
0,33	-2,72	1,79	127,58
0,5	-2,58	1,74	124,02
1	-2,33	1,65	117,61
2	-2,05	1,55	110,48
5	-1,64	1,42	101,21
10	-1,28	1,31	93,37
20	-0,84	1,18	84,11
50	0,00	0,97	69,14
75	0,67	0,84	59,87
90	1,28	0,73	52,03
95	1,64	0,67	47,76
99	2,33	0,58	41,34



Représentation de la courbe de fréquence

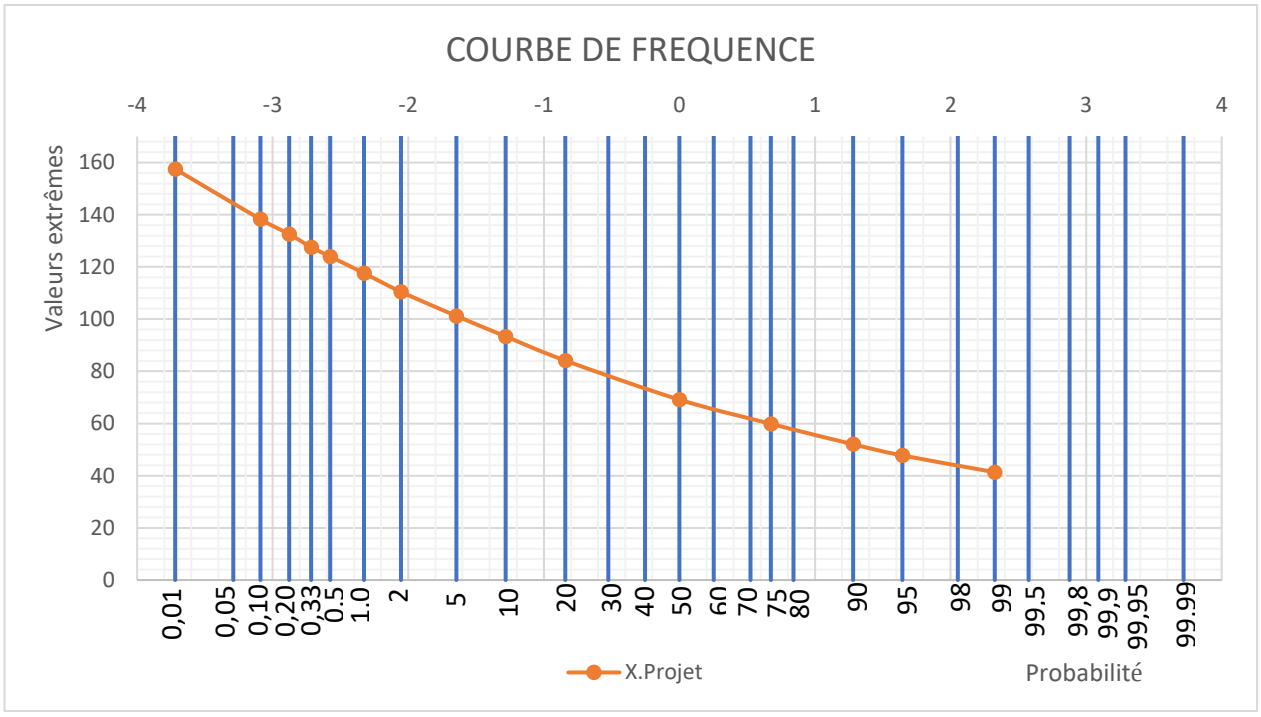


Figure II-15 :Courbe de fréquence pour la station Ruyigi

II.4.4 Analyse statistique des données des précipitations de la station Muriza

Tableau II-23 : Analyse statistique des données recueillies à la station Muriza

Année	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{x}$)^3
1990	75,4	1	84	3,03	1,43	0,43	0,18	15860,55
1991	53,2	2	80	6,06	1,36	0,36	0,13	9427,36
1992	84	3	79,6	9,09	1,35	0,35	0,12	8901,92
1993	39,5	4	75,5	12,12	1,28	0,28	0,08	4594,99
1994	79,6	5	75,4	15,15	1,28	0,28	0,08	4512,57
1995	60	6	70,7	18,18	1,20	0,20	0,04	1653,50
1996	70	7	70,6	21,21	1,20	0,20	0,04	1611,90
1997	54,4	8	70	24,24	1,19	0,19	0,04	1376,89
1998	55,3	9	68,9	27,27	1,17	0,17	0,03	1007,52
1999	59,8	10	63,7	30,30	1,08	0,08	0,01	112,33
2000	42,7	11	61,6	33,33	1,05	0,05	0,00	20,23
2001	51,5	12	60	36,36	1,02	0,02	0,00	1,42
2002	49,2	13	59,8	39,39	1,02	0,02	0,00	0,79
2003	51,6	14	59,8	42,42	1,02	0,02	0,00	0,79
2004	80	15	59,7	45,45	1,01	0,01	0,00	0,56
2005	59,4	16	59,4	48,48	1,01	0,01	0,00	0,14
2006	51,4	17	59,2	51,52	1,01	0,01	0,00	0,03
2007	42,8	18	55,3	54,55	0,94	-0,06	0,00	-45,69
2008	63,7	19	55,3	57,58	0,94	-0,06	0,00	-45,69
2009	59,7	20	54,4	60,61	0,92	-0,08	0,01	-89,61
2010	70,7	21	53,2	63,64	0,90	-0,10	0,01	-182,77
2011	55,3	22	51,6	66,67	0,88	-0,12	0,02	-385,03
2012	44,1	23	51,5	69,70	0,87	-0,13	0,02	-401,13
2013	68,9	24	51,4	72,73	0,87	-0,13	0,02	-417,67
2014	61,6	25	49,2	75,76	0,84	-0,16	0,03	-905,63
2015	49	26	49	78,79	0,83	-0,17	0,03	-962,97
2016	59,8	27	44,1	81,82	0,75	-0,25	0,06	-3225,39
2017	42,8	28	43,3	84,85	0,74	-0,26	0,07	-3778,19
2018	59,2	29	42,8	87,88	0,73	-0,27	0,07	-4153,87
2019	70,6	30	42,8	90,91	0,73	-0,27	0,07	-4153,87
2020	75,5	31	42,7	93,94	0,73	-0,27	0,08	-4231,88
2021	43,3	32	39,5	96,97	0,67	-0,33	0,11	-7273,19
							∑=1,34	∑=18830,93

Tableau II-24 :Les Valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\overline{x}$	58,875
Cv	0,208
Cv^3*X^3	1830,993
Cs	0,355
Cs/Cv	1,71

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,21 et celle d'asymétrie est égale à 0,35. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 1,71.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P en faisant l'interpolation de la valeur trouvée pour Cs = 2 Cv et celle pour Cs = 3 Cv pour déterminer celle de Cs = 1,71 Cv.

Tableau II-25 :Détermination des coefficients et le calcul de la hauteur des précipitations extrêmes

		Cs = Cv	**Cs = 2 Cv**	**Cs =1,71 Cv**	
p%	**Z**	**Kp**	**Kp**	**Kp**	**X Projet**
0,01	-3,72	1,88	1,98	1,90	111,69
0,1	-3,09	1,72	1,78	1,73	101,87
0,2	-2,88	1,66	1,71	1,67	98,23
0,33	-2,72	1,61	1,67	1,62	95,39
0,5	-2,58	1,58	1,62	1,59	93,42
1	-2,33	1,52	1,55	1,53	89,79
2	-2,05	1,46	1,48	1,46	86,16
5	-1,64	1,36	1,37	1,36	80,17
10	-1,28	1,28	1,28	1,28	75,36
20	-0,84	1,18	1,17	1,18	69,37
50	0,00	0,99	0,98	0,99	58,19
75	0,67	0,85	0,85	0,85	50,04
90	1,28	0,74	0,74	0,74	43,57
95	1,64	0,67	0,68	0,67	39,55
99	2,33	0,54	0,58	0,55	32,19

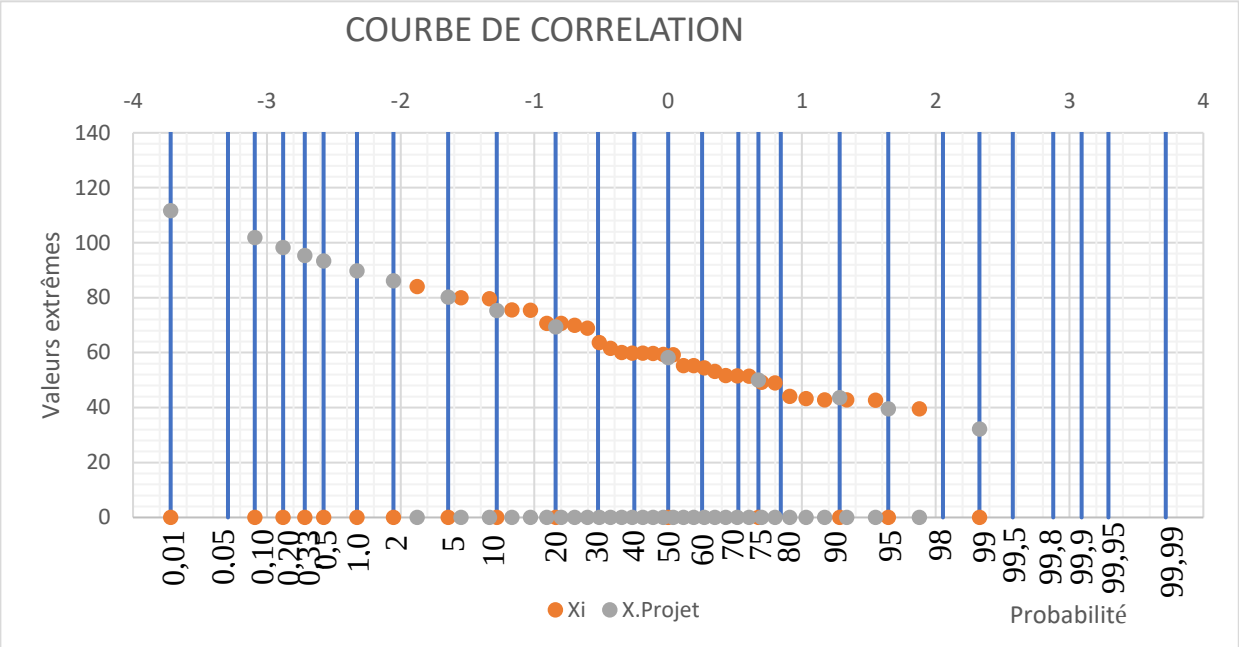


Figure II-16 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Muriza

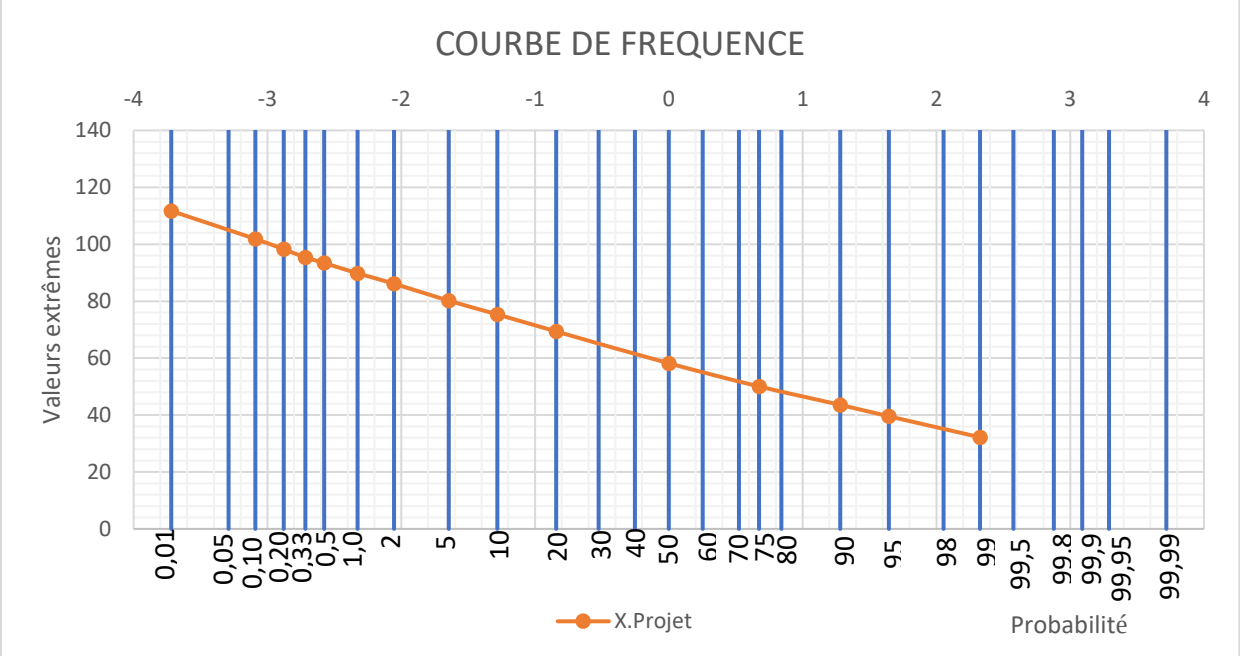


Figure II-17 :Courbe de fréquence pour la station Muriza

II.4.5 Analyse statistique des données des précipitations de la station Giheta

II-26 : Analyse statistique des données recueillies à la station Giheta

ANNEE	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{X}$)^3
1990	55	1	132,8	3,03	2,22	1,22	1,48	386773,16
1991	71,6	2	105	6,06	1,75	0,75	0,57	91486,18
1992	43,5	3	72,3	9,09	1,21	0,21	0,04	1887,95
1993	44	4	72,2	12,12	1,20	0,20	0,04	1842,49
1994	42	5	71,6	15,15	1,19	0,19	0,04	1584,99
1995	64	6	71	18,18	1,18	0,18	0,03	1352,67
1996	61,8	7	70	21,21	1,17	0,17	0,03	1017,92
1997	71	8	69,5	24,24	1,16	0,16	0,03	873,55
1998	105	9	68	27,27	1,13	0,13	0,02	523,48
1999	54	10	66,7	30,30	1,11	0,11	0,01	308,83
2000	39,6	11	64	33,33	1,07	0,07	0,00	66,89
2001	44,7	12	63,7	36,36	1,06	0,06	0,00	53,13
2002	44,4	13	63,5	39,39	1,06	0,06	0,00	45,09
2003	48,7	14	62,1	42,42	1,04	0,04	0,00	10,07
2004	70	15	61,8	45,45	1,03	0,03	0,00	6,43
2005	40,9	16	59,3	48,48	0,99	-0,01	0,00	-0,26
2006	72,3	17	55	51,52	0,92	-0,08	0,01	-120,60
2007	132,8	18	54,3	54,55	0,91	-0,09	0,01	-179,47
2008	69,5	19	54	57,58	0,90	-0,10	0,01	-209,65
2009	66,7	20	51,5	60,61	0,86	-0,14	0,02	-601,35
2010	46,1	21	48,7	63,64	0,81	-0,19	0,04	-1420,27
2011	45,2	22	46,1	66,67	0,77	-0,23	0,05	-2651,35
2012	68	23	46	69,70	0,77	-0,23	0,05	-2709,24
2013	63,7	24	45,2	72,73	0,75	-0,25	0,06	-3202,93
2014	44,7	25	44,7	75,76	0,75	-0,25	0,06	-3540,04
2015	54,3	26	44,7	78,79	0,75	-0,25	0,06	-3540,04
2016	46	27	44,4	81,82	0,74	-0,26	0,07	-3753,23
2017	51,5	28	44	84,85	0,73	-0,27	0,07	-4050,57
2018	59,3	29	43,5	87,88	0,73	-0,27	0,08	-4443,80
2019	72,2	30	42	90,91	0,70	-0,30	0,09	-5774,48
2020	62,1	31	40,9	93,94	0,68	-0,32	0,10	-6903,09
2021	63,5	32	39,6	96,97	0,66	-0,34	0,12	-8415,75
							∑= 3,19	∑=436316,71

Tableau II-27 : Les Valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\bar{x}$	59,941
Cv	0,3
Cv^3*$\bar{X}$^3	7122,7
Cs	2,1
Cs/ Cv	6,6

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,3 et celle d'asymétrie est égale à 2,1. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 6,6.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P dans le tableau de Pearson III pour Cs = 6 Cv

Tableau II-28 :Calcul de la hauteur des précipitations extrêmes

Cs = 6Cv			
p%	**Z**	**kp**	**X projet**
0,01	-3,72	3,95	236,77
0,1	-3,09	3,11	186,42
0,2	-2,88	2,87	172,03
0,33	-2,72	2,68	160,64
0,5	-2,58	2,53	151,65
1	-2,33	2,28	136,66
2	-2,05	2,03	121,68
5	-1,64	1,69	101,30
10	-1,28	1,45	86,91
20	-0,84	1,21	72,53
50	0,00	0,89	53,35
75	0,67	0,76	45,55
90	1,28	0,7	41,96
95	1,64	0,68	40,76
99	2,33	0,67	40,16

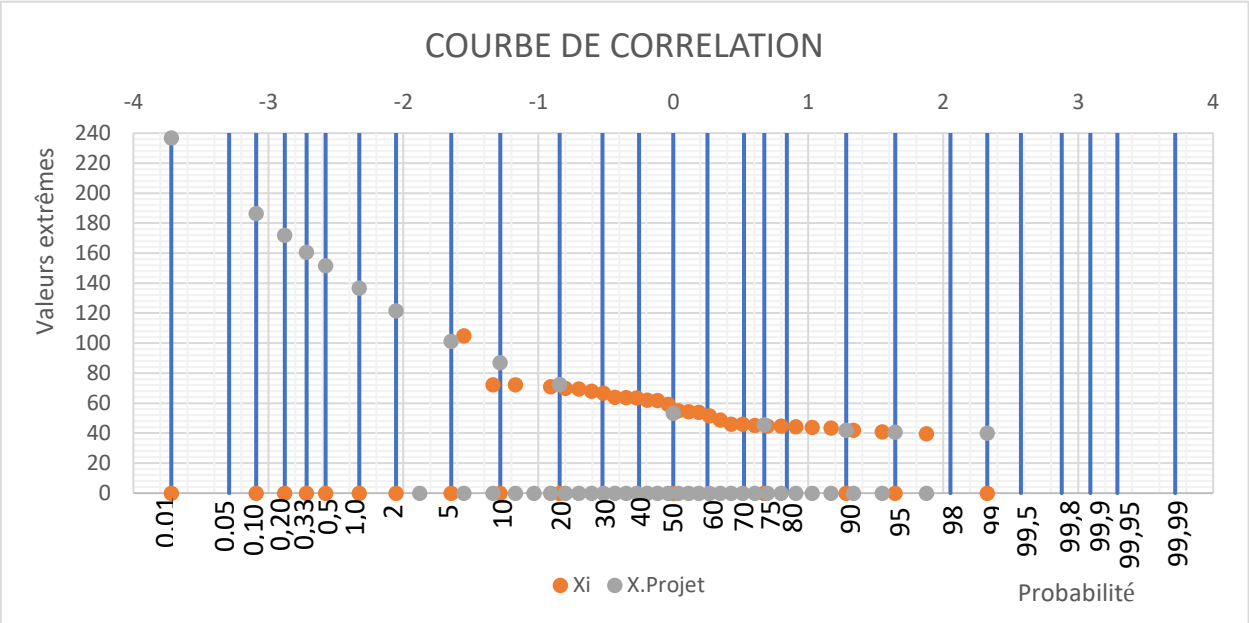


Figure II-18 : Représentation graphique de la corrélation au points de la station Giheta

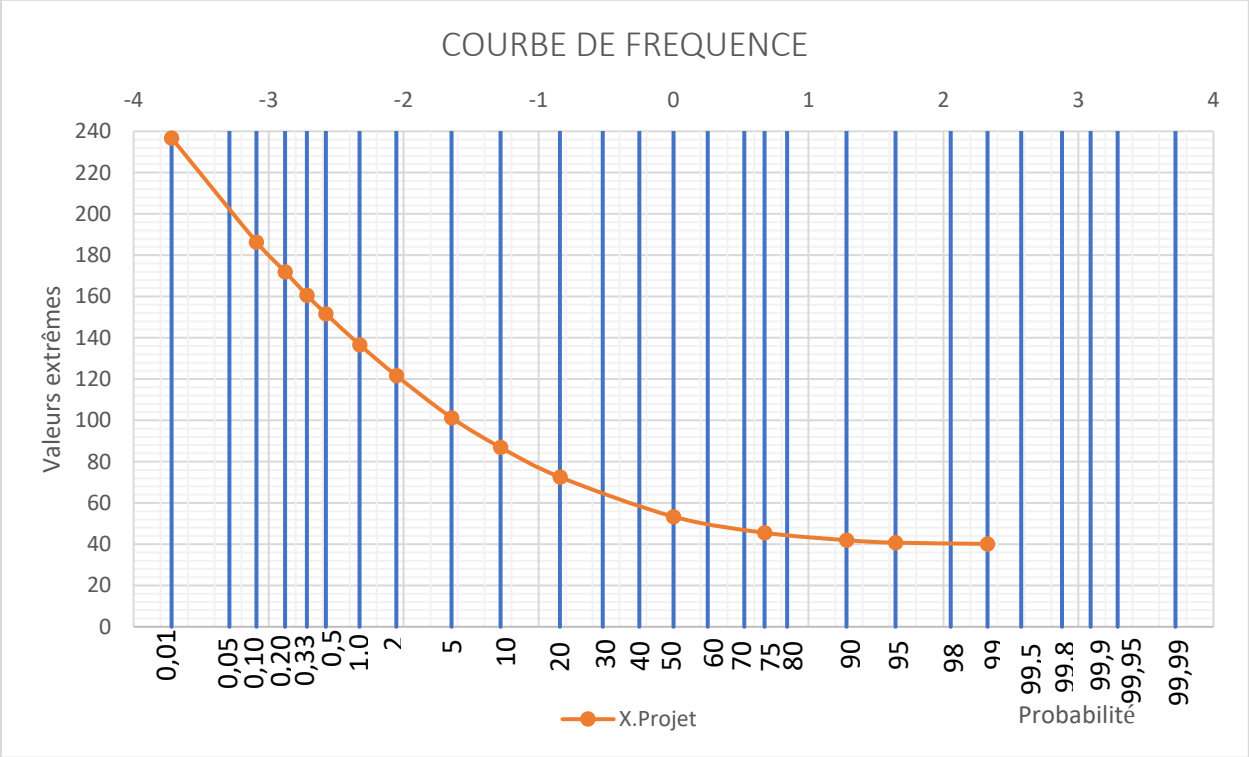


Figure II-19 :Courbe de fréquence pour la station Giheta

II.4.6 Analyse statistique des données des précipitations de la station Gitega aérodrome

Tableau II-29 : Analyse statistique des données recueillies à la station Gitega aérodrome

ANNEE	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{X}$)^3
1990	50,2	1	97,7	3,03	1,68	0,68	0,47	62511,69
1991	62,7	2	92,6	6,06	1,60	0,60	0,36	41376,86
1992	39,9	3	85,8	9,09	1,48	0,48	0,23	21455,98
1993	38,6	4	75,3	12,12	1,30	0,30	0,09	5166,50
1994	92,6	5	73,2	15,15	1,26	0,26	0,07	3503,15
1995	44,3	6	69,7	18,18	1,20	0,20	0,04	1596,49
1996	62,1	7	67,7	21,21	1,17	0,17	0,03	909,15
1997	47,8	8	66,5	24,24	1,15	0,15	0,02	611,42
1998	64,5	9	64,5	27,27	1,11	0,11	0,01	273,04
1999	85,8	10	62,7	30,30	1,08	0,08	0,01	103,00
2000	67,7	11	62,1	33,33	1,07	0,07	0,00	68,29
2001	52,8	12	61,2	36,36	1,05	0,05	0,00	32,39
2002	73,2	13	60,2	39,39	1,04	0,04	0,00	10,47
2003	66,5	14	58,2	42,42	1,00	0,00	0,00	0,01
2004	69,7	15	57,3	45,45	0,99	-0,01	0,00	-0,36
2005	40,7	16	56,2	48,48	0,97	-0,03	0,00	-5,95
2006	97,7	17	55,9	51,52	0,96	-0,04	0,00	-9,43
2007	52,5	18	53	54,55	0,91	-0,09	0,01	-125,94
2008	55,9	19	52,8	57,58	0,91	-0,09	0,01	-141,62
2009	53	20	52,5	60,61	0,90	-0,10	0,01	-167,51
2010	48	21	50,2	63,64	0,87	-0,13	0,02	-476,84
2011	75,3	22	49,7	66,67	0,86	-0,14	0,02	-574,37
2012	49,7	23	48,1	69,70	0,83	-0,17	0,03	-973,98
2013	58,2	24	48	72,73	0,83	-0,17	0,03	-1003,75
2014	48,1	25	47,8	75,76	0,82	-0,18	0,03	-1065,11
2015	41	26	44,3	78,79	0,76	-0,24	0,06	-2578,40
2016	57,3	27	44	81,82	0,76	-0,24	0,06	-2751,36
2017	39	28	41	84,85	0,71	-0,29	0,09	-4923,85
2018	61,2	29	40,7	87,88	0,70	-0,30	0,09	-5188,95
2019	56,2	30	39,9	90,91	0,69	-0,31	0,10	-5942,03
2020	60,2	31	39	93,94	0,67	-0,33	0,11	-6872,55
2021	44	32	38,6	96,97	0,67	-0,33	0,11	-7315,51
							∑=2,09	∑=97500,91

Tableau II-30 :Les Valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\overline{x}$	58,013
Cv	0,26
Cv^3*$\overline{X}$^3	3418,70
Cs	0,98
Cs/Cv	3,78

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,26 et celle d'asymétrie est égale à 0,98. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 3,78.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P en faisant l'interpolation de la valeur trouvée pour Cs = 3,5 Cv et celle pour Cs = 4 Cv.

Tableau II-31 :Tableaux des coefficients des crues

	Cs = 3,5Cv	**Cs = 3,78Cv**	**Cs = 4Cv**
p%	**Kp**	**Kp**	**Kp**
0,01	2,5	2,527	2,57
0,1	2,14	2,159	2,19
0,2	2,04	2,051	2,07
0,33	1,96	1,971	1,99
0,5	1,89	1,901	1,92
1	1,77	1,778	1,79
2	1,65	1,658	1,67
5	1,48	1,484	1,49
10	1,35	1,350	1,35
20	1,2	1,200	1,2
50	0,96	0,960	0,96
75	0,81	0,810	0,81
90	0,7	0,704	0,71
95	0,65	0,654	0,66
99	0,57	0,581	0,6

Tableau II-32 :Tableau de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes

Cs = 3,78Cv			
p%	**Z**	**Kp**	**X projet**
0,01	-3,72	2,53	146,57
0,1	-3,09	2,16	125,25
0,2	-2,88	2,05	119,00
0,33	-2,72	1,97	114,36
0,5	-2,58	1,90	110,30
1	-2,33	1,78	103,12
2	-2,05	1,66	96,16
5	-1,64	1,48	86,08
10	-1,28	1,35	78,32
20	-0,84	1,20	69,62
50	0,00	0,96	55,69
75	0,67	0,81	46,99
90	1,28	0,70	40,83
95	1,64	0,65	37,93
99	2,33	0,58	33,73

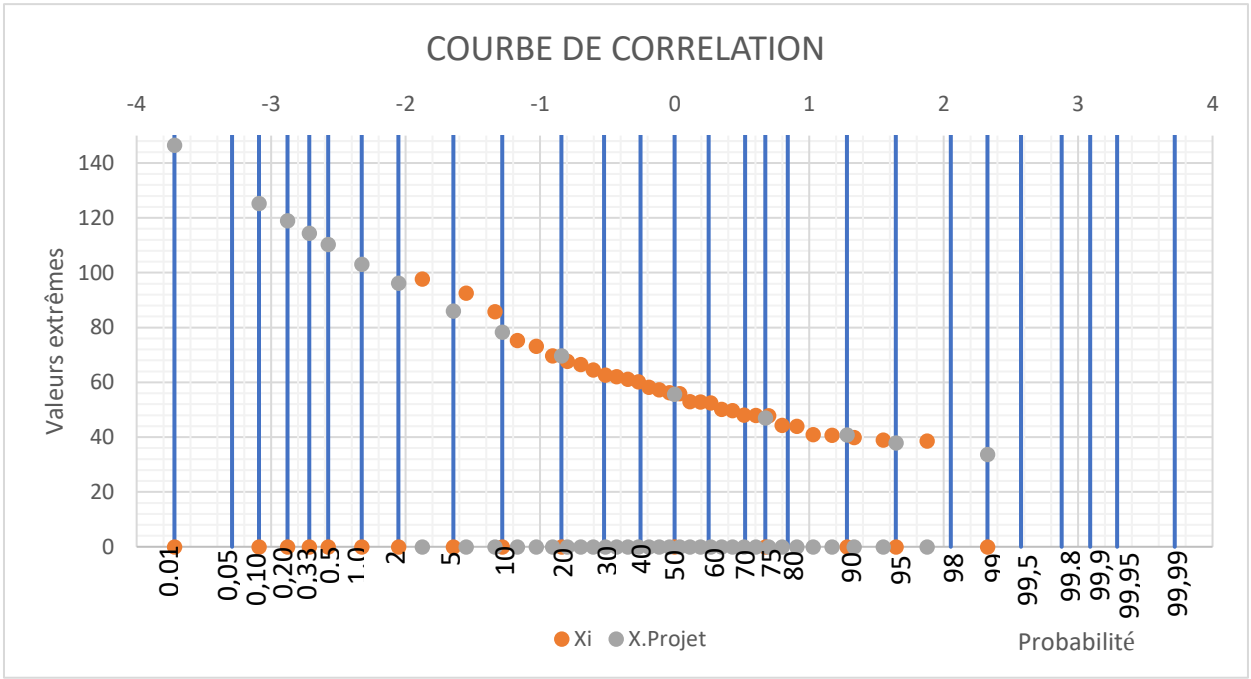


Figure II-20 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Gitega Aérodrome

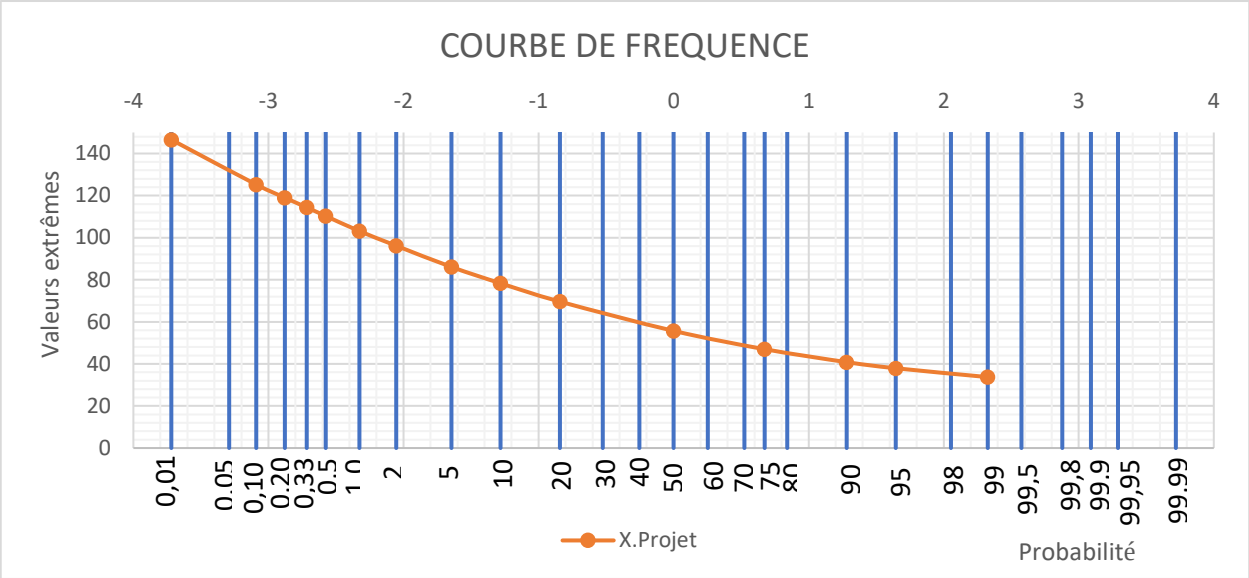


Figure II-21 : Courbe de fréquence pour la station Gitega Aérodrome

II.4.7 Analyse statistique des données des précipitations de la station Musongati

Tableau II-33 : Analyse statistique des données recueillies à la station Musongati

ANNEE	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{X}$)^3
1990	60,7	1	98	3,33	1,63	0,63	0,40	54648,24
1991	64,3	2	86,3	6,67	1,44	0,44	0,19	18084,33
1992	43,8	3	80	10,00	1,33	0,33	0,11	7938,09
1993	75,6	4	76,4	13,33	1,27	0,27	0,07	4369,34
1994	52,6	5	75,6	16,67	1,26	0,26	0,07	3758,78
1995	55,4	6	75,4	20,00	1,26	0,26	0,07	3615,59
1996	75	7	75	23,33	1,25	0,25	0,06	3340,21
1997	44,9	8	72	26,67	1,20	0,20	0,04	1705,75
1998	44,9	9	70,3	30,00	1,17	0,17	0,03	1076,35
1999	30,5	10	64,3	33,33	1,07	0,07	0,01	76,67
2000	40,2	11	62,6	36,67	1,04	0,04	0,00	16,55
2001	41,7	12	62,6	40,00	1,04	0,04	0,00	16,55
2003	54,6	13	60,7	43,33	1,01	0,01	0,00	0,27
2004	60	14	60	46,67	1,00	0,00	0,00	0,00
2005	86,3	15	58,9	50,00	0,98	-0,02	0,00	-1,53
2006	75,4	16	58,8	53,33	0,98	-0,02	0,00	-1,96
2007	70,3	17	58,4	56,67	0,97	-0,03	0,00	-4,51
2008	58,8	18	55,4	60,00	0,92	-0,08	0,01	-100,66
2009	62,6	19	54,6	63,33	0,91	-0,09	0,01	-162,03
2010	76,4	20	53	66,67	0,88	-0,12	0,01	-350,66

ANNEE	P24	m	Xi	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{X}$)^3
2011	58,4	21	52,6	70,00	0,88	-0,12	0,02	-413,78
2012	62,6	22	51,6	73,33	0,86	-0,14	0,02	-603,72
2013	51,6	23	44,9	76,67	0,75	-0,25	0,06	-3478,45
2015	58,9	24	44,9	80,00	0,75	-0,25	0,06	-3478,45
2016	98	25	43,8	83,33	0,73	-0,27	0,07	-4292,38
2017	53	26	41,7	86,67	0,69	-0,31	0,09	-6180,60
2018	72	27	40,2	90,00	0,67	-0,33	0,11	-7823,38
2019	80	28	33	93,33	0,55	-0,45	0,20	-19796,34
2020	33	29	30,5	96,67	0,51	-0,49	0,24	-25807,65
							∑=1,96	∑=26150,599

Tableau II-34 :Les Valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\bar{x}$	60,052
Cv	0,3
Cv^3*$\bar{X}$^3	4009,9
Cs	0,25
Cs/Cv	1

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,26 et celle d'asymétrie est égale à 0,25. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 1.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P dans le tableau de Pearson III pour Cs = Cv.

Tableau II-35 :Tableau des coefficients et de calcul des précipitations extrêmes

Cs =Cv			
p%	**Z**	**kp**	**X projet**
0,01	-3,72	2,12	127,31
0,1	-3,09	1,9	114,10
0,2	-2,88	1,83	109,89
0,33	-2,72	1,77	106,29
0,5	-2,58	1,73	103,89
1	-2,33	1,65	99,09
2	-2,05	1,57	94,28
5	-1,64	1,44	86,47
10	-1,28	1,34	80,47
20	-0,84	1,22	73,26
50	0,00	0,99	59,45
75	0,67	0,82	49,24
90	1,28	0,67	40,23
95	1,64	0,59	35,43
99	2,33	0,45	27,02

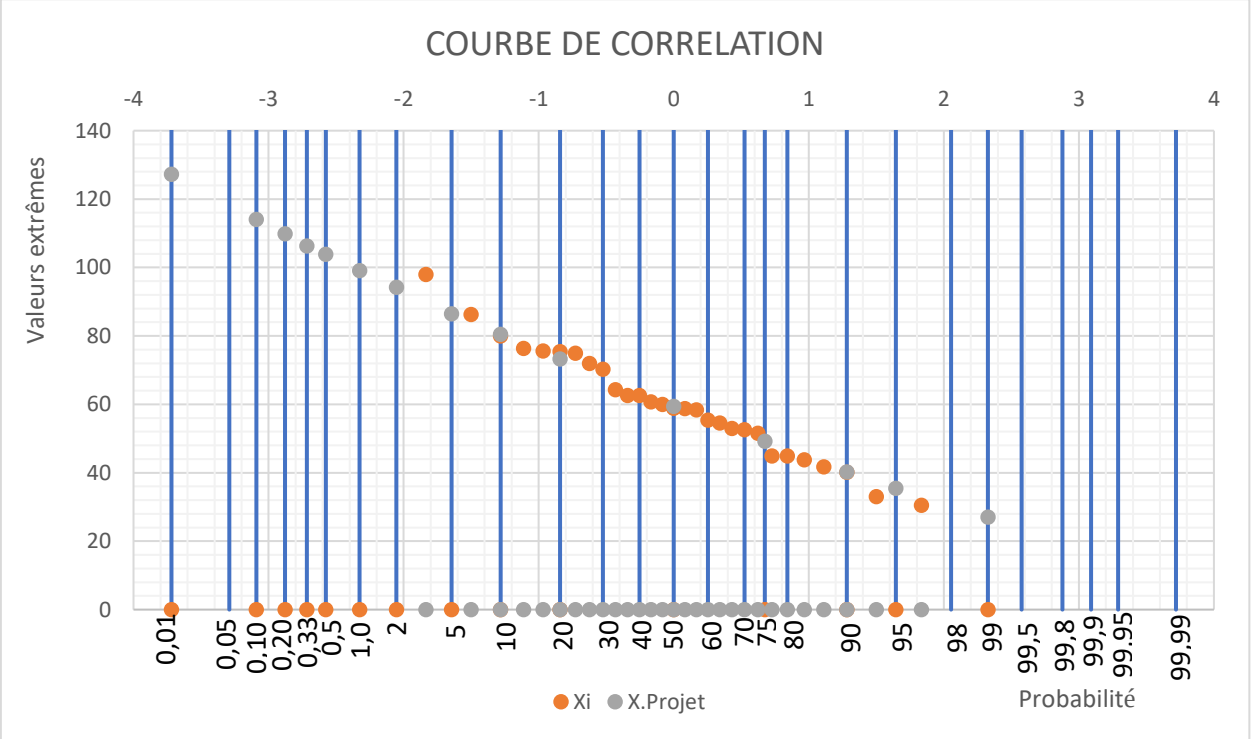


Figure II-22 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Musongati

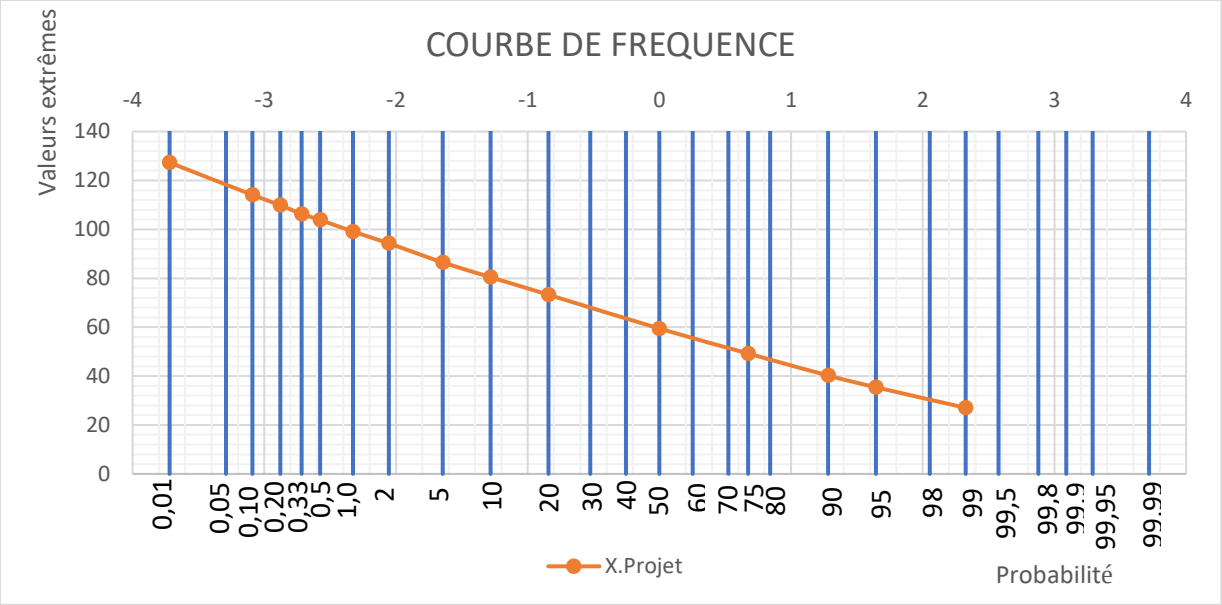


Figure II-23 :Courbe de fréquence pour la station Musongati

II.4.8 Analyse statistique des données des précipitations de la station Musasa

Tableau II-36 : Analyse statistique des données recueillies à la station Musasa

ANNEE	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Z	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{X}$)^3
1990	50,2	1	114,8	3,03	-1,88	1,78	0,78	0,61	127073,86
1991	62,4	2	96	6,06	-1,55	1,49	0,49	0,24	31181,52
1992	50,5	3	94	9,09	-1,34	1,46	0,46	0,21	25607,16
1993	59,4	4	88	12,12	-1,17	1,36	0,36	0,13	12936,50
1994	50,9	5	81	15,15	-1,03	1,26	0,26	0,07	4471,74
1995	74,6	6	77,8	18,18	-0,91	1,21	0,21	0,04	2339,40
1996	77,8	7	76,1	21,21	-0,80	1,18	0,18	0,03	1550,83
1997	76,1	8	74,6	24,24	-0,70	1,16	0,16	0,02	1022,67
1998	70,8	9	74	27,27	-0,60	1,15	0,15	0,02	850,62
1999	53,8	10	70,8	30,30	-0,52	1,10	0,10	0,01	247,08
2000	51,5	11	70,8	33,33	-0,43	1,10	0,10	0,01	247,08
2001	54,4	12	67,7	36,36	-0,35	1,05	0,05	0,00	32,01
2002	70,8	13	66,6	39,39	-0,27	1,03	0,03	0,00	8,93
2003	74	14	63	42,42	-0,19	0,98	-0,02	0,00	-3,55
2004	63	15	62,4	45,45	-0,11	0,97	-0,03	0,00	-9,60
2005	48	16	60	48,48	-0,04	0,93	-0,07	0,00	-92,65
2006	55,8	17	59,4	51,52	0,04	0,92	-0,08	0,01	-134,61
2007	88	18	57	54,55	0,11	0,88	-0,12	0,01	-426,11
2008	48,2	19	56,7	57,58	0,19	0,88	-0,12	0,01	-479,13
2009	60	20	55,8	60,61	0,27	0,86	-0,14	0,02	-664,20

ANNEE	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Z	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{X}$)^3
2010	50	21	54,4	63,64	0,35	0,84	-0,16	0,02	-1037,97
2011	39,8	22	53,8	66,67	0,43	0,83	-0,17	0,03	-1233,65
2012	57	23	52	69,70	0,52	0,81	-0,19	0,04	-1964,87
2013	52	24	51,5	72,73	0,60	0,80	-0,20	0,04	-2209,70
2014	67,7	25	50,9	75,76	0,70	0,79	-0,21	0,04	-2529,35
2015	114,8	26	50,5	78,79	0,80	0,78	-0,22	0,05	-2758,73
2016	49	27	50,2	81,82	0,91	0,78	-0,22	0,05	-2939,57
2017	56,7	28	50	84,85	1,03	0,77	-0,23	0,05	-3064,42
2018	66,6	29	49	87,88	1,17	0,76	-0,24	0,06	-3741,92
2019	96	30	48,2	90,91	1,34	0,75	-0,25	0,06	-4350,70
2020	94	31	48	93,94	1,55	0,74	-0,26	0,07	-4512,57
2021	81	32	39,8	96,97	1,88	0,62	-0,38	0,15	-15115,03
								∑= 2,11	∑=160301,07

Tableau II-37 :Les Valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\bar{x}$	64,525
Cv	0,26
Cv^3*$\bar{X}$^3	4771,6
Cs	1,2
Cs/Cv	4,4

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,26 et celle d'asymétrie est égale à 1,2. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 4,4.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P en faisant l'interpolation de la valeur trouvée pour Cs = 4 Cv et celle pour Cs = 5 Cv.

II-38 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des précipitations extrêmes

	Cs = 4Cv		Cs =5Cv	Cs = 4,4CV	
Z	**p%**	**kp**	**kp**	**Kp**	**X projet**
-3,72	0,01	2,92	3,13	3,01	194,43
-3,09	0,1	2,44	2,57	2,50	161,17
-2,88	0,2	2,3	2,4	2,34	151,27
-2,72	0,33	2,18	2,27	2,22	143,24
-2,58	0,5	2,1	2,17	2,13	137,51
-2,33	1	1,94	2	1,97	126,90
-2,05	2	1,79	1,82	1,80	116,36
-1,64	5	1,57	1,58	1,57	101,59
-1,28	10	1,4	1,4	1,40	90,34
-0,84	20	1,22	1,21	1,22	78,43
0,00	50	0,94	0,93	0,94	60,37
0,67	75	0,78	0,78	0,78	50,33
1,28	90	0,68	0,69	0,68	44,16
1,64	95	0,63	0,66	0,64	41,51
2,33	99	0,56	0,62	0,59	37,85

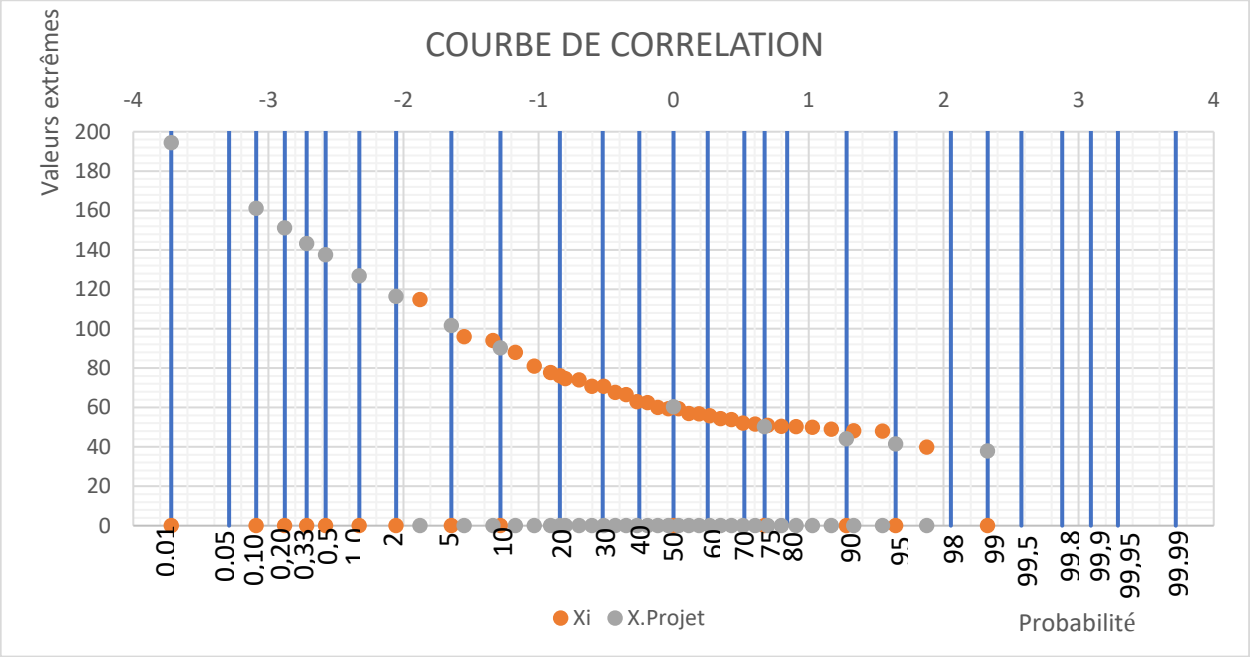


Figure II-24 :Représentation graphique de la corrélativité au points de la station Musasa

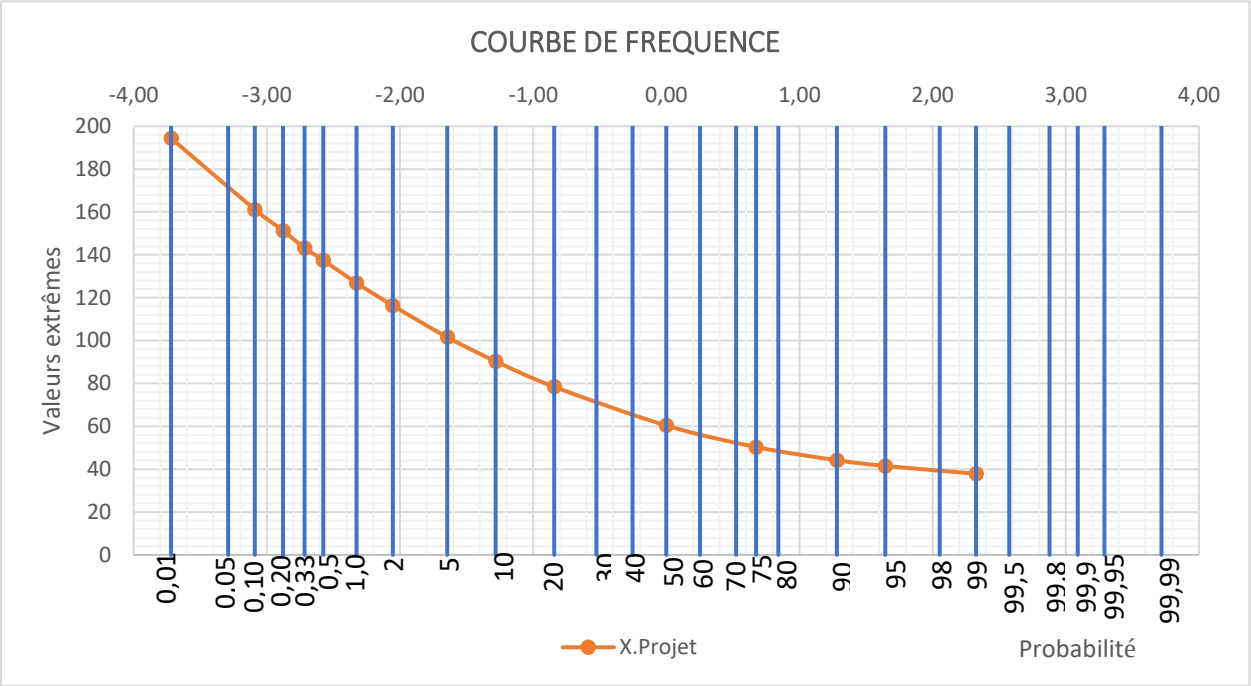


Figure II-25 :Courbe de fréquence pour la station Musasa

II.4.9 Analyse statistique des données des précipitations de la station Ruvyironza

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

Année	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2	(Xi-$\bar{X}$)^3
1990	76,8	1	90	3,03	1,53	0,53	0,284	30636,75
1991	55,5	2	76,8	6,06	1,31	0,31	0,095	5920,53
1992	67,9	3	72,4	9,09	1,23	0,23	0,054	2566,08
1993	36,8	4	72	12,12	1,23	0,23	0,051	2347,67
1994	45,1	5	71,6	15,15	1,22	0,22	0,048	2142,01
1995	90	6	68,9	18,18	1,17	0,17	0,030	1058,28
1996	64,4	7	67,9	21,21	1,16	0,16	0,025	776,31
1997	50,3	8	67,8	24,24	1,15	0,15	0,024	751,24
1998	55,6	9	66,4	27,27	1,13	0,13	0,017	454,87
1999	66,4	10	66,2	30,30	1,13	0,13	0,016	420,29
2000	41,2	11	65,5	33,33	1,12	0,12	0,013	313,13
2001	54,5	12	64,4	36,36	1,10	0,10	0,009	184,28
2002	54,8	13	63,9	39,39	1,09	0,09	0,008	139,85
2003	58	14	62,5	42,42	1,06	0,06	0,004	54,47
2004	72,4	15	59,4	45,45	1,01	0,01	0,000	0,33
2005	38,4	16	59,4	48,48	1,01	0,01	0,000	0,33
2006	67,8	17	58,7	51,52	1,00	0,00	0,000	0,00
2007	72	18	58	54,55	0,99	-0,01	0,000	-0,36

ANNEE	P_{24}	m	P_{24} trié	P%	Z	Ki	Ki-1	(Ki-1)^2
2008	71,6	19	55,6	57,58	0,95	-0,05	0,003	-30,06
2009	40,3	20	55,5	60,61	0,95	-0,05	0,003	-33,06
2010	38,4	21	54,8	63,64	0,93	-0,07	0,004	-59,75
2011	46,7	22	54,8	66,67	0,93	-0,07	0,004	-59,75
2012	68,9	23	54,5	69,70	0,93	-0,07	0,005	-74,59
2013	54,5	24	54,5	72,73	0,93	-0,07	0,005	-74,59
2014	65,5	25	50,3	75,76	0,86	-0,14	0,021	-594,69
2015	54,8	26	46,7	78,79	0,80	-0,20	0,042	-1732,05
2016	62,5	27	45,1	81,82	0,77	-0,23	0,054	-2520,66
2017	58,7	28	41,2	84,85	0,70	-0,30	0,089	-5367,99
2018	59,4	29	40,3	87,88	0,69	-0,31	0,098	-6239,03
2019	59,4	30	38,4	90,91	0,65	-0,35	0,120	-8377,02
2020	63,9	31	38,4	93,94	0,65	-0,35	0,120	-8377,02
2021	66,2	32	36,8	96,97	0,63	-0,37	0,139	-10516,95
							∑=1,39	∑=3708,86

Tableau II-40 :Les Valeurs caractéristiques

Les valeurs caractéristiques de distribution	
$\bar{X}$	58,709
Cv	0,21
Cv^3*$\bar{X}$^3	1915,09
Cs	0,07
Cs/ Cv	0,32

La valeur du coefficient de variation est égale à 0,21 et celle d'asymétrie est égale à 0,07. Cela nous conduit en en déduire leur rapport de 0,32.

Nous pouvons déterminer la valeur de K_P dans le tableau de Pearson III pour Cs = 1Cv.

Tableau II-41 :Tableau des coefficients et de calcul de la hauteur des crues

Cs = Cv			
p%	**Z**	**kp**	**X projet**
0,01	-3,72	1,88	110,37
0,1	-3,09	1,72	100,98
0,2	-2,88	1,66	97,46
0,33	-2,72	1,61	94,52
0,5	-2,58	1,58	92,76
1	-2,33	1,52	89,24
2	-2,05	1,46	85,72
5	-1,64	1,36	79,84
10	-1,28	1,28	75,15
20	-0,84	1,18	69,28
50	0,00	0,99	58,12
75	0,67	0,85	49,90
90	1,28	0,74	43,44
95	1,64	0,67	39,34
99	2,33	0,54	31,70

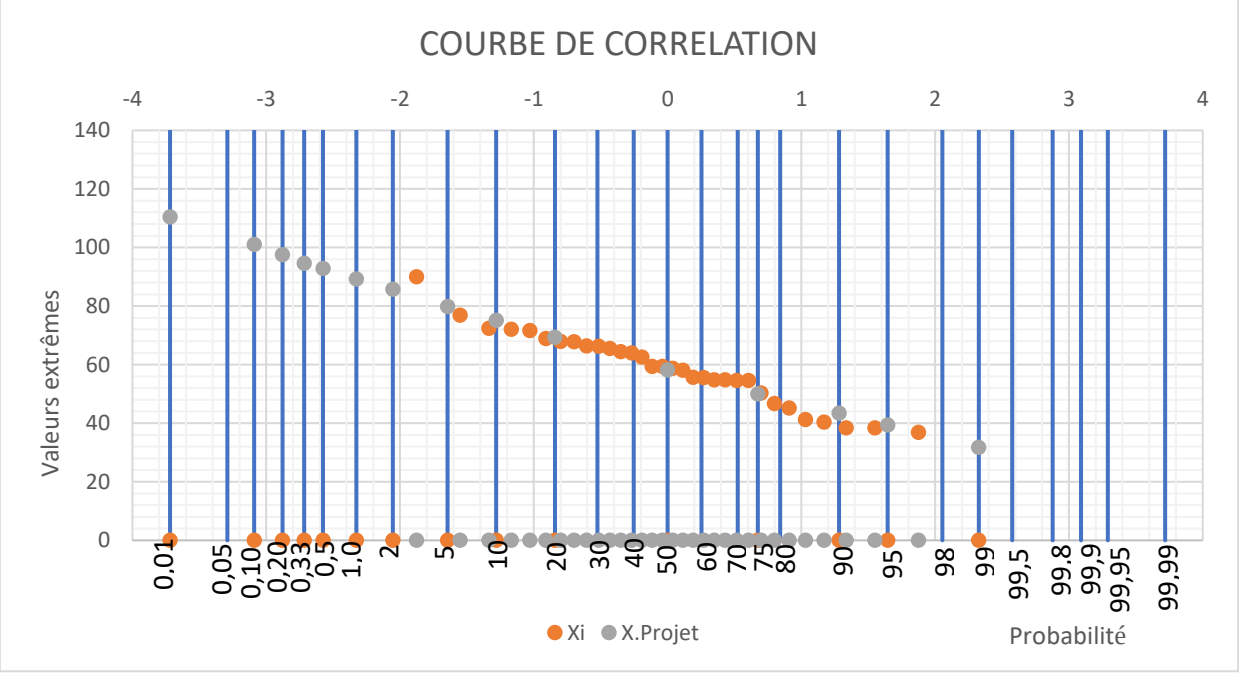


Figure II-26 :Représentation graphique de la corrélation au points de la station Ruvyironza

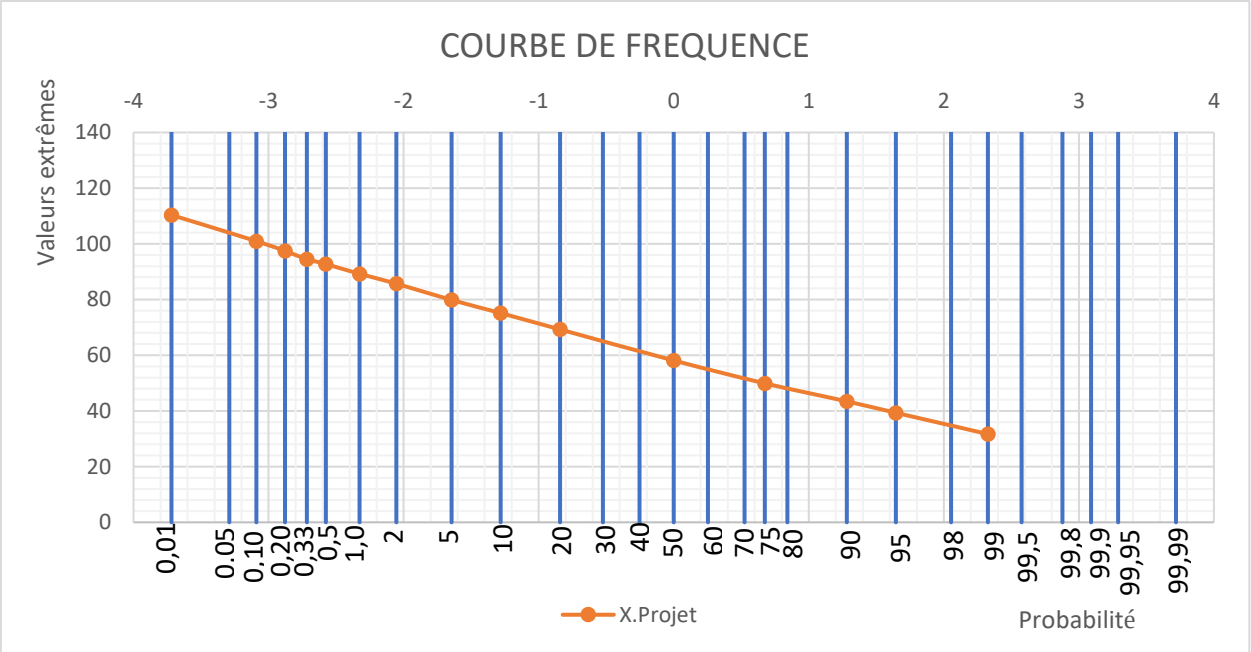


Figure II-27 :Courbe de fréquence pour la station Ruvyironza

II.5 Discussion des résultats

L'analyse fréquentielle est l'un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes.

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

La vérification de la corrélation de la courbe aux points de chaque station nous a permis de remarquer si réellement il y a l'exactitude dans nos calculs de traitement.

Quant à la courbe de fréquence, nous pouvons faire la lecture facilement de la valeur des précipitations extrêmes pour n'importe période de retour, cela va nous permettre aussi d'élaborer nos cartes.

CHAPITRE III : REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ISOHYETES EXTREMES

III.1 Généralité

Le présent mémoire a choisi plus utile d'élaborer une carte nationale des isohyètes extrêmes pour les différentes probabilités montrées sur la courbe de fréquence. Pour notre cas, il s'agit des isohyètes pour les probabilités p=0.1%, p=0.2%, p=0.5%, p=1% et p=2%

Les autres isohyètes pouvant être facilement élaborées par la même méthode suivant les valeurs des crues montrées sur les courbes de fréquences déjà calculée dans ce mémoire.

Pour un temps de retour T correspondant à une fréquence $P(_T)$, le présent mémoire donne des données pluviométriques des crues les plus fiables correspondantes et cela pour chaque station. Ces sont ces données calculées sur chaque station dont avec le processus d'ArcGIS donnent des cartes appelées cartes des isohyètes extrêmes représentées sur les pages suivantes.

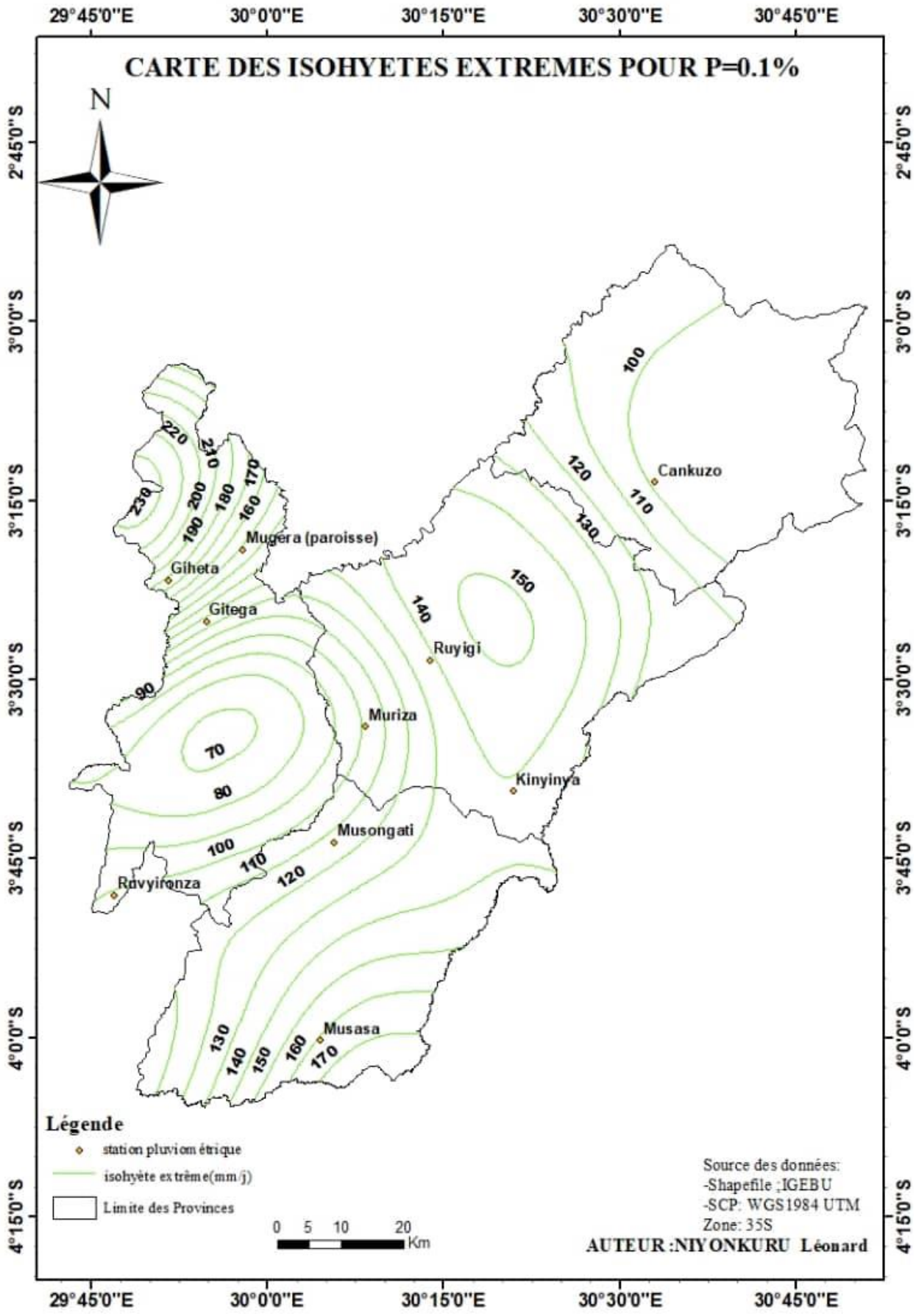


Figure III-1 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 0,1%

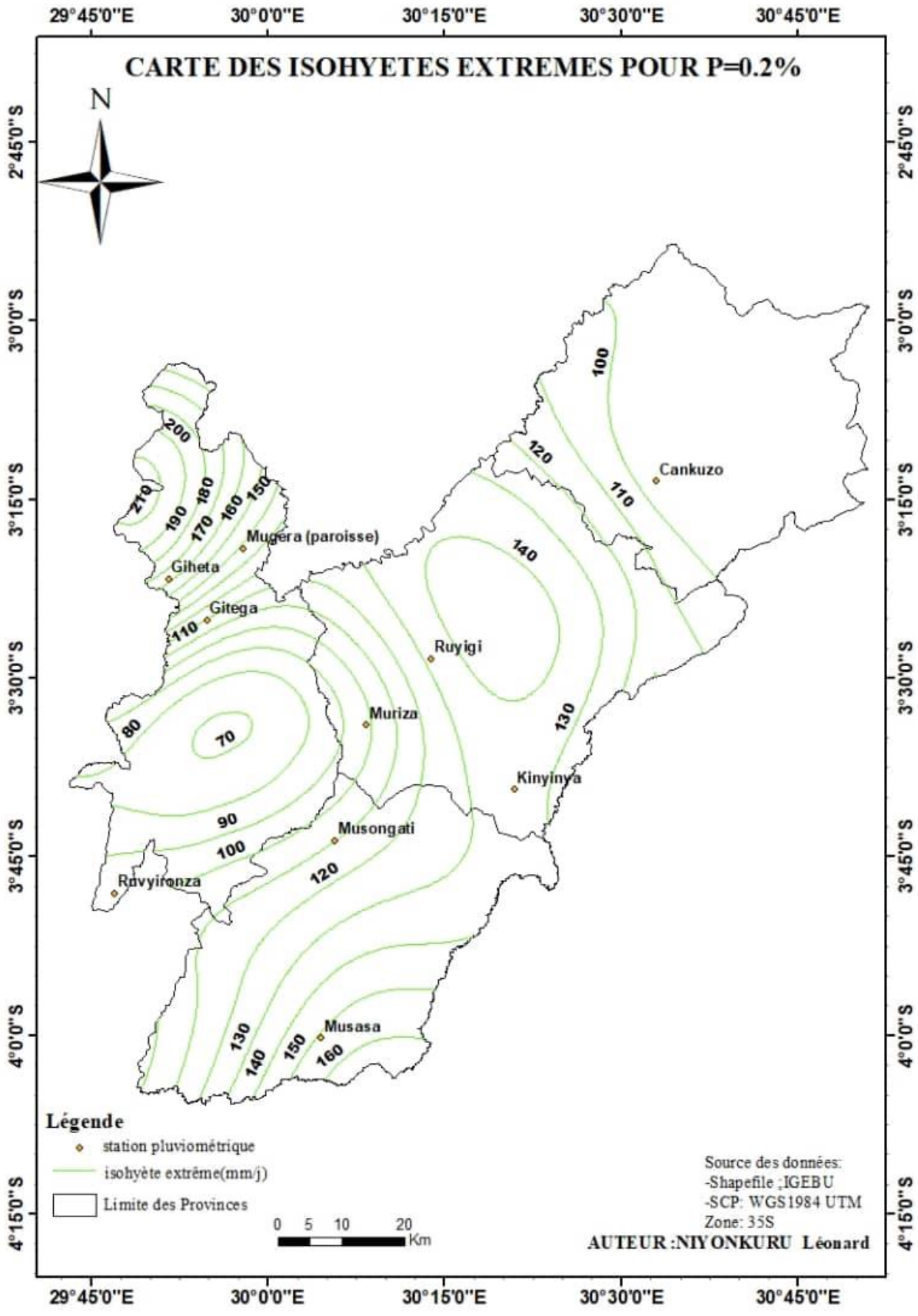


Figure III-2 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 0,2%

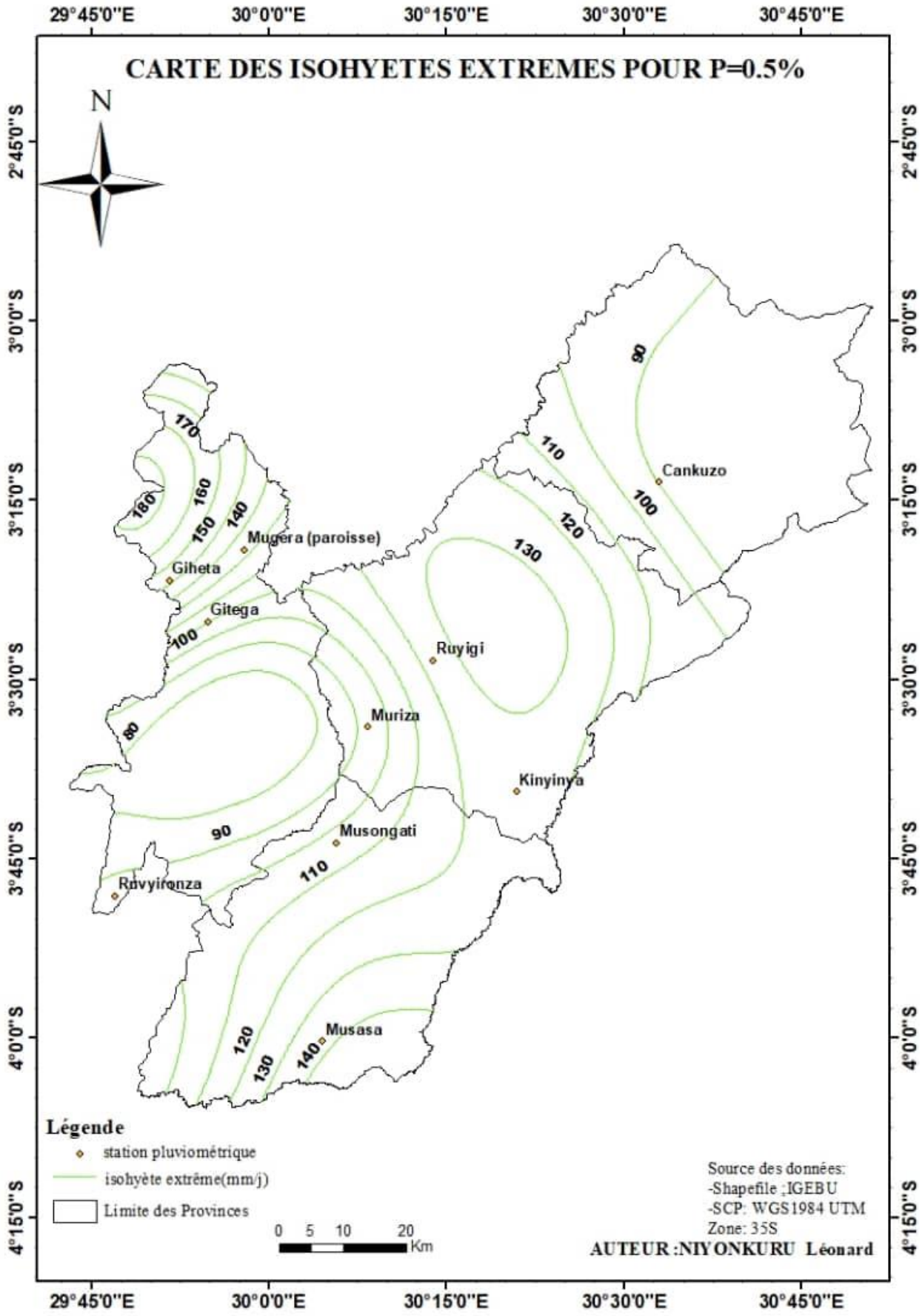


Figure III-3 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 0,5%

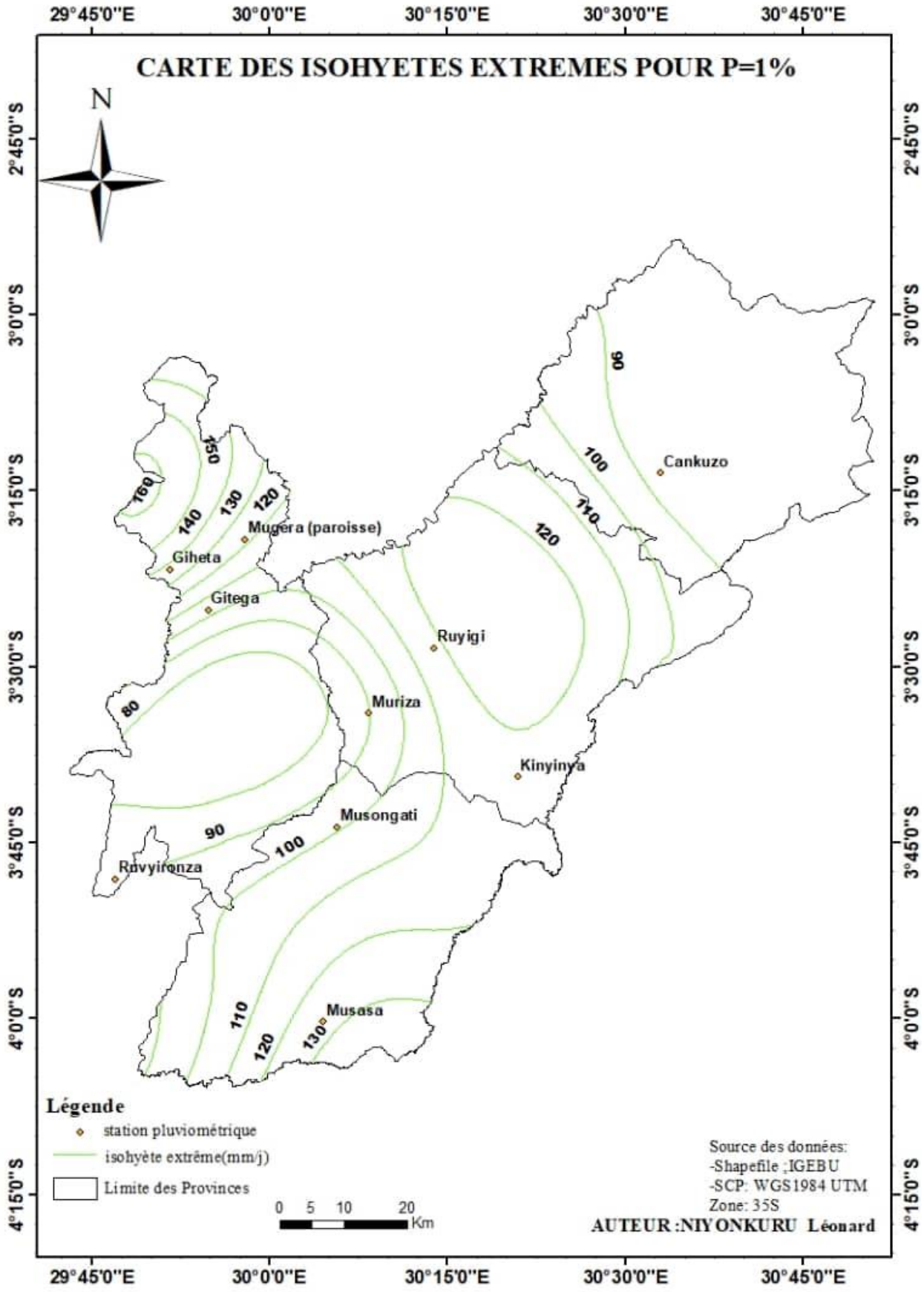


Figure III-4 :Carte des isohyètes extrêmes pour P = 1%

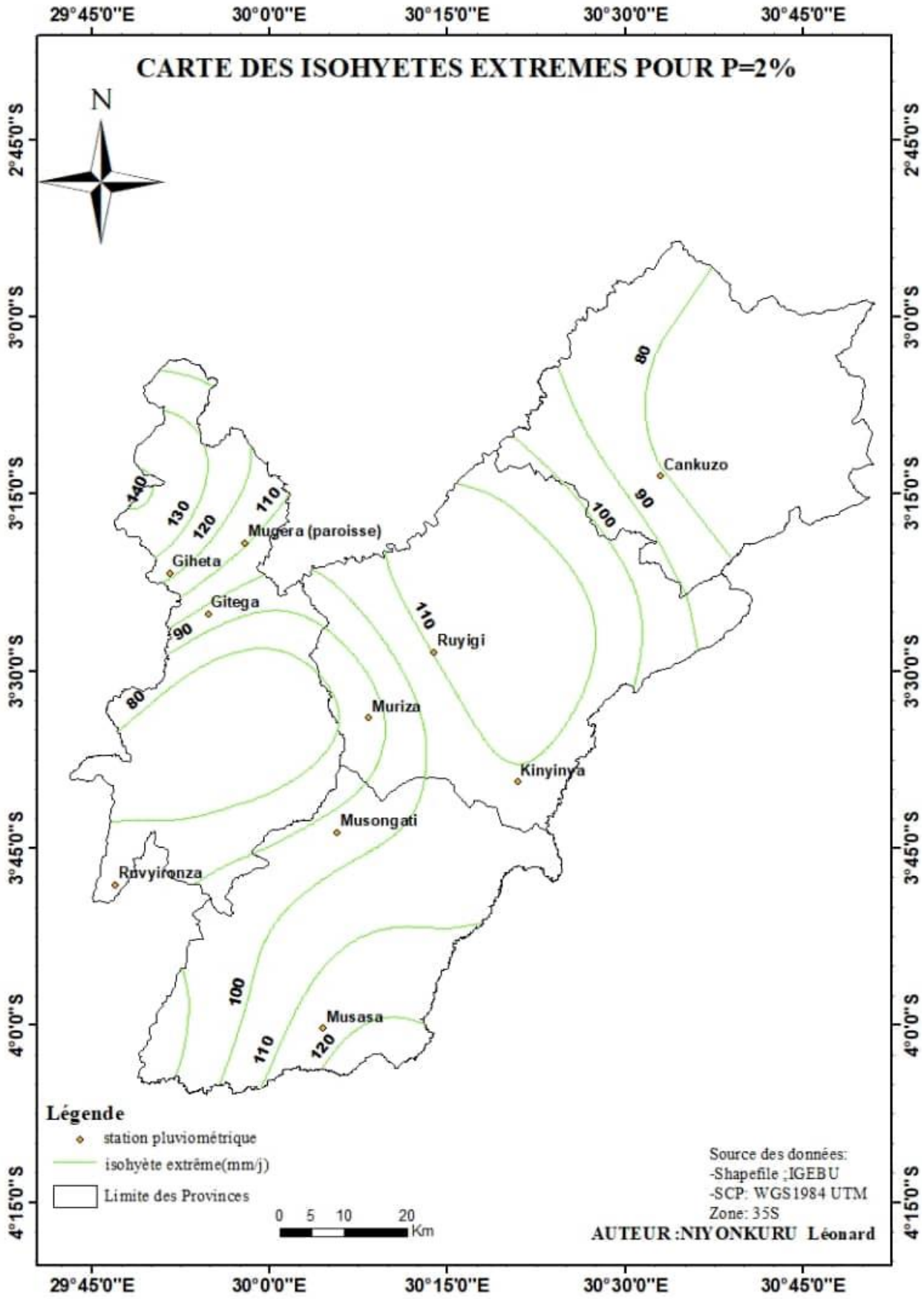


Figure III-5:Carte des isohyètes extrêmes pour P = 2%

CHAPITRE IV : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

IV.1 Conclusion

Le présent mémoire avait comme objectif 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 Recommandations

Après le temps passé sur ce travail, les difficultés que nous avons rencontrées et les résultats obtenus nous ont poussé à faire des recommandations aux gens qui suivent :

- ☞ A l'IGEBU, de rendre disponible les données aux étudiants de l'université du Burundi après qu'ils ont montrés les documents attestant leurs statuts estudiantins, de prendre soin de ce travail et de le publier aux ingénieurs qui en auront besoins ;
- ☞ Aux chercheurs hydrologues, de produire d'autres informations selon les autres périodes de retour afin que le pays reçoive les cartes nécessaires pour n'importe quel ouvrage voulu concevoir ;
- ☞ A l'université du Burundi avec son centre de recherche, de prendre ce travail avec l'ambition de le publier vu que ça a une utilité importante dans tous les domaines de génie civil ;
- ☞ Au ministère de l'éducation, d'accompagner des étudiants dans la préparation de leurs travaux de fin d'études par des moyens financiers, en plus des moyens matériels ;
- ☞ Au gouvernement du Burundi, de donner la valeur de cette carte comme les autres connues et de la conserver dans le patrimoine pour la publier en cas de nécessité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Aguilar E. et al.** (2003). Guidelines on climatemetadata and homogenization. World Meteorological Organization, Geneva.
2. **Antoine Denis(2016),** Initiation aa ArcGis
3. **Brunet-Moret, Y. (1969)**, « Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. », Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie
4. **Dubreuil, P. (1974)**. Initiation à l'analyse hydrologique. Paris: Masson et Cie.
5. **Ed. Gauthier – Villars, Paris 1963,** Hydrologie de surface
6. **Habibi et al., 2013**, Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales
7. I**GEBU. (2010).** Rapport Hydrologique annuel du Burundi. Gitega.
8. **Laborde, J.P (2009).** « Eléments d'hydrologie de surface. Université de Nice-Sophia Antipolis » France.
9. **Msc. NTIBWUNGUKA Sylvestre,2019** : Troisième Communication Nationale sur les changements climatiques4
10. O**MM-N°168. (2014).** Guide des pratiques hydrologiques, (éd. 6ème édition, Vol. volume II).
11. **OMM-N°169. (1994).** Guide des paratiques hydrologiques.
12. **Ramona Georgeta Receanu, 2013**: Simulation fine des précipitations et des crues extrêmes. Application aux petits bassins versants alpins non glaciaires, Université de Lausanne
13. **ST-HILAIRE A. 2005**. Analyse fréquentielle des précipitations des stations de Montréal et Shawinigan.
14. **Yann L'HOTE (1993),** mesure et étude des précipitations en hydrologie

Autres documents :

1. Centre d'Echange d'Informations du Burundi,2012.
2. Professeur J. M SABUSHIMIKE, Mai 2017, Changement climatique du Burundi
3. Etat des lieux des services hydrologiques et météorologiques du Burundi 11204561-002-ZS-0012, Version 1.0, 11 November 2020)
4. Dr Ir Joseph NZEYIMANA ,Cours de l'hydrologie de l'Ingénieur

Sites internet :

- Https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00704177, visité le 11/10/2022
- http://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school, Visité le 14/10/2022
- https://echo2.epfl.ch/e-drologie /chapitres/chapitre5/chapitre5.html, visité le 5/11/2022
- https://f2school.com/wp -content/uploads/2020/04/Bassin-versant -Cours-01.pdf, visité le 5/11/2022
- https://studylibfr.com/doc/4410802/39-chapitre-4---statistiques-appliquées, visité, le 20/12/2022
- http://studylibfr.com/doc/4410802/39-chapitre-4---statistiques-appliquées-à-l… visité, le 20/12/2022