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

Contribution à l'évaluation des effets d'aménagement des bassins versants sur la dynamique des crues et d' érosion hydrique : « Cas du bassin versant de la rivière Ruvyironza en République du Burundi »

Dusabe, Jean Pâques; Sous la Direction de : Dr. Ir. Niyonzima Nestor

2023
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1860

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

République du Burundi

Ministère de l'éducation nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Année Académique: 2022-2023

CONTRIBUTION A L'EVALUATION DES EFFETS D'AMENAGEMENT DES BASSINS VERSANTS SUR LA DYNAMIQUE DES CRUES ET D'EROSION HYDRIQUE : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE RUVYIRONZA EN REPUBLIQUE DU BURUNDI

Mémoire
Présenté publiquement par :

DUSABE Jean Pâques

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

Soutenu le 15 / 09 / 2023 devant le jury composé de :

Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph	**: Président**
Dr. Ir. NIYONGABO Henri	**: Lecteur principal**
Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor	**: Directeur**

Bujumbura, Septembre 2023

Contribution à l'évaluation des effets d'aménagement des bassins versants sur la dynamique des crues et d'érosion hydrique : « Cas du bassin versant de la rivière Ruvyironza en République du Burundi »

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

- Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph : Président
- Dr. Ir. NIYONGABO Henri : Lecteur principal
- Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor : Directeur

DEDICACES

A mes chers parents ;

A mes frères et sœurs ;

A toute ma famille ;

A toutes mes connaissances ;

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENT

A l'issue de ce travail, je suis extrêmement heureux d'exprimer ma sincère gratitude à tous ceux qui ont contribué matériellement, spirituellement et scientifiquement à sa réalisation.

Une mention particulière de reconnaissance est réservée au directeur du présent travail **Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor**, qui malgré ses multiples obligations, a accepté de guider mes premiers pas dans la réalisation de mon mémoire. Ses conseils pertinents, ses recommandations éclairées et sa rigueur scientifique m'ont permis de m'épanouir pleinement dans mon travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail.

Ma profonde gratitude s'adresse surtout à tout le personnel de l'Université du Burundi, spécialement à tous les professeurs de la faculté des sciences de l'ingénieur, particulièrement ceux de master en Génie Civil, Aménagement et Maitrise des projets pour la formation de qualité dont j'ai bénéficié.

J'exprime mes sincères remerciements à mes adorables parents, pour le soutien et l'amour qu'ils m'ont apporté tout au long de mes études.

RESUME

La présente étude est consacrée à l'évaluation des crues et d'érosion hydriques qui constituent une menace dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza afin d'évaluer les effets de ces dernières si les différentes techniques d'aménagement sont appliquées.

Ce travail est reparti en cinq chapitres dont le premier est consacré à une étude bibliographique; le second porte sur la présentation et la caractérisation de la zone d'étude ; le troisième est consacré à la quantification de perte en terres dues à l'érosion hydrique, le quatrième quant à lui fait une évaluation des crues et sa régulation lorsque les scénarios des techniques d'aménagement (Aménagement avec barrage de retenue en lit de la rivière et aménagement par des fosses antiérosives dans les versants) sont mises en place. Le dernier chapitre présente une conclusion et des recommandations basées sur les résultats de cette étude.

A l'issue de ce travail, la quantification des pertes en terre causées par l'érosion hydrique a été réalisée par l'intégration et traitement des données des différents facteurs de l'équation Universelle révisée des pertes en terre (RUSLE) dans le Système d'informations géographiques (SIG) avec ArcGIS 10.3 et les crues ont été évaluées pour une averse de période de retour de 100 ans par la méthode d'hydrogramme unitaire du SCS-CN. Après avoir évalué les pertes en terres et les crues fréquentielles, deux scénarios d'aménagements comprenant un aménagement en lit par un barrage de retenue et un aménagement en versant à travers des fosses antiérosives ont été évalués pour analyser leur impact sur les crues et l'érosion.

Les résultats obtenus par la modélisation hydrique après le croisement des cartes flux des différents facteurs de l'équation RUSLE furent une subdivision du bassin en unités distinctes de surface possèdant chacune des valeurs homogènes des pertes en terre avec **277.88,** une perte en terre moyenne de tous les pixels de l'unité exprimée **en tonnes/ha/an** soit une perte de couche arable de **3.02 mm/an et** les résultats issus de la modélisation hydrologique sont une crue centenaire de **188.57 m3/s** avec une superficie inondable de **5,02km2**.

Quant au régulation des crues, le débit entrant de **188.57 m3/s** a été laminé jusqu'à **27.18 m3/s** pour le scenario d'aménagement en lit de la rivière, soit une capacité de rétention de **85.87%** associée à un rabaissement de **76.09 %** de la superficie inondable; et pour le scenario de l'aménagement du bassin dans les versants avec les fosses antiérosives, les déclins des crues seront de l'ordre de **26.95%,36.72%,52.28**% et **63.57%** pour les dimensions transversales des fosses antiérosives respectivement de **50x60cm^2 ,60x70cm^2 ,70x90cm^2 et 80x100cm^2.**

Mots clés : Rivière Ruvyironza, Crues, érosion hydrique, Aménagement du bassin versant, Laminage des crues.

ABSTRACT

The present study is devoted to the assessment of floods and water erosion that constitute a threat in the watershed of the Ruvyironza River in order to assess the effects of the latter if the different development techniques are applied.

This work is divided into five chapters, the first of which is devoted to a bibliographical study ; the second concerns the presentation and characterization of the study area ; the third is devoted to the quantification of land loss due to water erosion, the fourth relates to the assessment of floods and their regulation when the scenarios of development techniques (Development with a retaining dam in the bed of the river and development by anti-erosion pits in the slopes) are put in place. The last chapter presents a conclusion and recommendations based on the results of this study.

At the end of this work, the quantification of soil losses caused by water erosion was carried out by integrating and processing data from the various factors of the Revised Universal Land Loss Equation (RUSLE) in the System (GIS) with ArcGIS 10.3 and floods were assessed for a 100-year return period storm by the unit hydrograph method of SCS-CN. After having evaluated land loss and frequential floods, two development scenarios including development in a bed by a retaining dam and development by pouring through anti-erosion pits were evaluated to analyze their impacts on floods and the erosion.

The results obtained by the water modeling after crossing the flow maps of the different factors of the RUSLE equation were a subdivision of the basin into distinct surface units, each having homogeneous values of soil losses with **277.88**, an average soil loss of all the pixels of the unit expressed in **tonnes/ha/year** ie a loss of topsoil of **3.02 mm/year** and the results from the hydrological modeling are a centenary flood of **259.84 m3/s** with a floodable area of **5.02 km2**.

As for flood regulation, the inflow of **188.57 m3/s** was reduced to **27.18 m3/s** for the development scenario in the river bed, i.e. a retention capacity of **85.87%** associated with a **76.09%** lowering of the area flood; and for the scenario of the development of the basin in the slopes with the anti-erosion pits, the declines of the floods will be of the order of **26.95%,36.72%, 52.28%** and **63.57%** for the transverse dimensions of the anti-erosion pits respectively of **50x60cm2, 60x70cm2, 70x90cm2 and 80x100cm2.**

Keywords: Ruvyironza River, floods, water erosion, watershed management, flood lamination.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACES ..... **ii**
REMERCIEMENT ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ..... **viii**
LISTE DES FIGURES ..... **x**
SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **xii**
AVANT PROPOS ..... **xiii**
INTRODUCTION GENERALE **1**
0.1. Contexte, problématique et intérêt du sujet **1**
0.1.1. Contexte et problématique 1
0.1.2. Intérêt du sujet 2
0.2. Objectifs **2**
0.2.1Objectif Global 2
0.2.2. Objectifs spécifiques 2
0.3. Délimitation du sujet et Méthodologie adoptée **3**
0.3.1. Délimitation du sujet 3
0.3.2. Méthodologie adoptée 3
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE **4**
I.1. Le cycle de l'eau **4**
I.2. Bassin versant **4**
I.2.1. Généralités 4
I.2.2. Délimitation du bassin versant 5
I.2.3. Caractéristiques physiographiques d'un bassin versant 5
I.3.Modélisation de l'érosion hydrique **17**
I.3.1. Définition 17
I.3.2. Processus de l'érosion hydrique 17
I.3.3. Estimation de l'érosion par le modèle RUSLE 18
I.4. Modélisation hydrologique et hydraulique **23**
I.4.1. Modélisation hydrologique pluie-débit 23
I.4.2. Modélisation hydraulique 31
I.5.Conclusion du premier chapitre **34**
CHAPITRE II : PRESENTATION ET CARACTERISATION ET DE LA ZONE D'ETUDE **34**
II.1. Situation administrative de la zone d'étude **34**
II.2. Situation géographique de la zone d'étude **35**
II.2. 1.Le climat 36
II.2.2. Relief 38
II.2.3. Réseaux hydrographiques 42

II.3. Collecte et traitement des données du sol 42
II.4. Détermination du temps de concentration du Bassin versant de la Ruvyironza 49
II.5. Synthèses de quelques caractéristiques du Bassin versant de la Ruvyironza 49
II.6. Conclusion du deuxième chapitre 50
CHAPITRE III : ETUDE DE L'EROSION HYDRIQUE 51
III.1. Introduction 51
III.2. Quantification des pertes en terre par l'érosion hydrique 51
III.2.1. L'érosivité de la pluie (Facteur R) 52
III.2.2. L'érodibilité du sol (Facteur K) 54
III.2.3. Le Facteur topographique (Facteur LS) 55
III.2.4. Le Facteur du couvert végétal (Facteur C) 60
III.2.5. Le Facteur des pratiques anti érosif où cultural (Facteur P) 62
III.2.6. Estimation de perte en terre (A) dans le bassin versant de la Ruvyironza 64
III.3. Conclusion du troisième chapitre 68
CHAPITRE IV : EVALUATION ET REGULATION DES CRUES 69
IV.1. Evaluation hydrologique 69
IV.1.1. Analyse climatologique 69
IV.1.2. Analyse fréquentielle des précipitations 70
IV.1.3. Détermination de la pluie nette 72
IV.1.4. Répartition de la pluie nette 72
IV.1.5. Hydrogramme unitaire 75
IV.1.6. Hydrogramme des crues 77
IV.2. Evaluation de la zone inondable 79
IV.3. Régulation des crues 80
IV.3. 1.Laminage des crues par retenue en lit de la rivière 81
IV.3.2. Régulation des crues et d'érosion par aménagement des fosses antiérosives en versant 89
IV.4. Conclusion du chapitre quatre 92
CHAPITRE V : CONCLUSION GENERAL ET RECOMMANDATIONS 94
V.1. Conclusions 94
V.2. Recommandations 95
BIBLIOGRAPHIE 97
ANNEXES 100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: classification des reliefs selon Ig (laborde,2000)....11
Tableau I-2: classification des reliefs selon Ds (laborde,2000)....12
Tableau I-3: classification du sol suivant les diamètres des grains....15
Tableau I-4: Classification de l'indice de susceptibilité des sols....21
Tableau I-5: Classes de valeur de C pour chaque type de couverture **(Renard et al,1997)**....22
Tableau I-6: Valeurs de facteur P selon la pente (**Shin, 1999).**....23
Tableau I-7: Relations des lois de distribution....27
Tableau I-8 : distribution d'une pluie de 24h et 6h selon la méthode SCS....27
Tableau I-9: Coordonnées de l'hydrogramme unitaire synthétique du NRCS....30
Tableau II-1: Répartition de la pluviométrie et température de la zone d'étude....37
Tableau II-2: répartition des surfaces du bassin versant en fonction des classes des altitudes. 39
Tableau II-3: Occupation du sol....43
Tableau II-4: Répartition de différents types du sol....44
Tableau II-5: Curver number CNII....48
Tableau II-6: Temps de concentration....49
Tableau II-7: Caractéristiques du bassin versant de la rivière Ruvyironza....49
Tableau III-1: Classes du risque d'érosion pluviale d'après ISSS (1996)....51
Tableau III-2: Distribution des valeurs du facteur dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza....52
Tableau III-3: Distribution des valeurs du facteur K dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza....54
Tableau III-4: Répartition des classes des longueurs des pentes (L)dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza....56
Tableau III-5: Répartition des classes de raideur des pentes (S)dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza....57
Tableau III-6: Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza....59
Tableau III-7: Distribution des classes du facteur C dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza....61
Tableau III-8: Valeurs de facteur P selon la pente (**Shin, 1999).**....63
Tableau III-9: Répartition de facteur antiérosif(P) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza 63
Tableau III-10: Répartition des pertes en terre (A) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza 64
Tableau III-11: Répartition des pertes dans le bassin versant selon les classes d'érosion....66
Tableau III-12: Présentation des résultats des pertes en terres selon les groupes hydrologique du sol du bassin versant de la rivière Ruvyironza....67
Tableau IV-1: Hauteurs maximale annuelles des précipitations entre les années (1992-2021)....69
Tableau IV-2: Hauteurs annuelles des précipitations entre les années (1992-2021)....70
Tableau IV-3: Hauteurs maximale selon les différentes périodes de retour....71
Tableau IV-4: Hauteurs de la pluie nette pour les différentes périodes de retour....72
Tableau IV-5: Répartition de la pluie totale pour une période de retour de 100 ans....72
Tableau IV-6: Répartition de la pluie nette pour une période de retour de 100 ans....74
Tableau IV-7: Valeurs des paramètres de l'hydrogramme unitaire....75
Tableau IV-8: Calculs de l'hydrogramme unitaire....76

Tableau IV-9: Débits des crues pour les différentes périodes de retour 77
Tableau IV-10: Répartition de la pluie nette pour une période de retour de 100 ans 77
Tableau IV-11: Résultats de calculs de l'hydrogramme des crues pour une période de retour de 100 ans 77
Tableau IV-12: Surface inondée et volume de retenue en fonction de la hauteur 82
Tableau IV-13: Résultat de calcul de la relation rétention -débit sortant pour le barrage de la rivière Ruvyironza. 84
Tableau IV-14: Résultat de calcul de de calcul des débits sortant 87
Tableau IV-15: Résultats de dénivelée entre deux fosses antiérosives 90
Tableau IV-16: Lame d'eau intercepté pour les différentes sections des fosses antiérosifs 90
Tableau IV-17: Synthèses d'évaluation de la pluie nette et débit des crues résultante de l'aménagement des fosses antiérosives dans la zone rurale du bassin versant pour les différentes sections des fosses antiérosifs 91

LISTE DES FIGURES

Figure 0-1: Inondation dans le central hydroélectrique de la Rivière Ruvyironza en 2016 1
Figure 0-2: débordement de la Rivière Ruvyironza en 2023 à Giheta, colline Korane 2
Figure I-1: Le processus du système hydrologique, ... 4
Figure I-2: Bassin versant 5
Figure I-3: courbe hypsométrique (Laborde,2000) 8
Figure I-4: calcul d'indice de pente équivalent 10
Figure I-5: calcul de l'indice de roche 10
Figure I-7: Méthode de la création d'une carte du risque d'érosion basée sur l'équation RUSLE 19
Figure I-8 : Pluie totale, pluie brute, pluie nette 24
Figure I-9 : Méthode du SCS. 25
Figure I-10: Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue 29
Figure I-11: Définitions des caractéristiques de l'hydrogramme unitaire 30
Figure II-1 : Carte de situation administrative du bassin versant de la rivière Ruvyironza 35
Figure II-2: P24 max sur la station de Mahwa 36
Figure II-3 : P24 max sur la station de Gitega 37
Figure II-4 : Comparaison des P24 pour deux stations. 37
Figure II-5 : Carte éco climatiques du bassin versant de la Ruvyironza 38
Figure II-6 : Courbe hypsométrique 39
Figure II-7: Carte hypsométrique 40
Figure II-8 : Carte de relief 40
Figure II-9: Carte topographique 41
Figure II-10: Carte des pentes 41
Figure II-11: Carte de réseau hydrographique 42
Figure II-12: Carte d'occupation du sol 43
Figure II-13: Type de sol sur une profondeur(0-5cm) du BV de la Ruvyironza 45
Figure II-14: Type de sol sur une profondeur((5-15cm) du BV de la Ruvyironza 45
Figure II-15: Type de sol sur une profondeur(15-30cm) du BV de la Ruvyironza 46
Figure II-16: Type de sol sur une profondeur(30-60cm) du BV de la Ruvyironza 46
Figure II-17: Type de sol sur une profondeur(60-100cm) du BV de la Ruvyironza 47
Figure II-18: Type de sol sur une profondeur(100-200cm) du BV de la Ruvyironza 47
Figure III-1: Classes des valeurs de R dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza 53
Figure III-2: Distribution des valeurs du facteur R dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza 53
Figure III-3 : Classes des valeurs de K dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza 54
Figure III-4: Distribution des valeurs du facteur K dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza 55
Figure III-5: Répartition des classes des longueurs(L) des pentes dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza 56
Figure III-6 : Carte des classes de longueurs de pentes(L) dans le bassin versant de la rivière R Ruvyironza 57
Figure III-7: Répartition des classes de raideur des pentes (S)dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza 58

Figure III-8 : Carte des classes de raideur des pentes(S) dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza 58
Figure III-9: Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza 59
Figure III-10: Carte des classes du facteur LS dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza. 60
Figure III-11 : Distribution du facteur C dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza 61
Figure III-12 : Carte du facteur C dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza ..... …….62
Figure III-13: Répartition de facteur antiérosif(P) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza 63
Figure III-14: Carte de facteur antiérosif(P) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza..... 64
Figure III-15 : Répartition des pertes en terre (A) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza 65
Figure III-16 : Carte des pertes en terre (A) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza 66
Figure III-17: répartition des classes d'érosion dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza ... 67
Figure IV-1: Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations 71
Figure IV-2 : Répartition de la pluie totale pour une période de retour de 100 ans..... 73
Figure IV-3 : Répartition de la pluie nette pour une période de retour de 100 ans..... 75
Figure IV-4 : Hydrogramme unitaire..... 76
Figure IV-5 : Hydrogramme des crues pour T=100 ans 79
Figure IV-6: zones inondables pour une crues de 259.84 m3/sec 80
Figure IV-7 : Emplacement du barrage dans le lit de la rivière Ruvyironza 81
Figure IV-8: Courbe capacité-hauteur du site de l'emplacement du barrage 83
Figure IV-9: Courbe surface-hauteur du site de l'emplacement du barrage..... 83
Figure IV-10 : Relation rétention-débit sortant..... 86
Figure IV-11 : L'hydrogramme du débit entrant 87
Figure IV-12 : Laminage des crues..... 89
Figure IV-13 : Lame d'eau intercepté pour les différentes sections des fosses antiérosifs 91
Figure IV-14: Débits de crues avec les FA et Sans FA pour une période de retour de 100 ans 92

SIGLES ET ABREVIATIONS

BV : **B**assin **V**ersant

CN : **C**urve **N**umber

Cr : **Coefficient** de **r**ruissellement

FA : **F**osse **A**ntiérosive

FAO : **Food** for **A**griculture **O**rganizations

FA : **F**ossé **A**ntiérosifs

HU : **H**ydrogramme Unitaire

IGEBU : **I**nstitut **G**éographique du **B**urundi

MNT : **M**odèle **N**umérique de **T**errain

MNA : **M**odèle **N**umérique de l'**A**ltitude

MINNATE : **Mini**stère de l'**A**ménagement du **T**erritoire, du **T**ourisme et de l'**E**nvironnement

RUSLE : **R**evised **U**niversal **S**oil **L**oss **E**quation

SCS-CN : **S**oil Conservation Service- Curve Number

SIG : **S**ystème d'**I**nformation **G**éographique

USLE : **U**niversal **S**oil **L**oss **E**quation

RUSLE : **R**evised **U**niversal **S**oil **L**oss **E**quation

UTM : **U**niversal **T**ransverse **M**ercator

WGS 1984 : **W**orld **G**eodetic **S**ystem 1984

AVANT PROPOS

Les inondations et l'érosion hydrique sont des phénomènes naturels qui peuvent se produire dans les zones rurales. Ces événements météorologiques peuvent causer des dommages importants.
Les inondations surviennent généralement lors des fortes pluies et peuvent causer des dommages importants aux terres agricoles, aux infrastructures, aux bâtiments et mêmes aux personnes ainsi qu'aux zones de bas-fond qui sont particulièrement vulnérables.

L'érosion hydrique quant à elle, survient lorsqu'un excès d'eau ruisselant érode le sol et emporte la couche du sol ainsi que les nutriments nécessaires à la croissance des plantes. L'érosion affecte la qualité des terres agricoles, cela réduit le rendement agricole et causer des pertes économiques pour les populations locales.

Au Burundi certaines rivières font partie du réseau des eaux du bassin du Nil. Les vallées et les zones de bas-fond sont constamment menacées par les eaux de ruissellement et les éboulements causés par l'érosion des bassins versants, ce qui cause notamment l'inondation dans les marais et les zones de bas-fond surtout dans la saison de grande pluie**.**
Mais certains problèmes causés par les phénomènes cités ci-haut peuvent être réduits à l'aide des différentes techniques d'atténuation.
Le présent travail intitulé « **contribution à l'évaluation des effets d'aménagement des bassins versants sur la dynamique des crues et d'érosion hydrique : Cas du bassin versant de la rivière Ruvyironza en République du Burundi »** s'inscrit dans le cadre de résolution des problèmes d'inondation et de l'érosion hydrique, mais aussi dans le cadre du programme LVEMP II phase II : « **Ensemble pour la protection du fleuve Nil** » et dans le plan National sur le développement **« Burundi pays émergent en 2040 et développé en 2060 ».**

Au cours de ce travail, les pertes en terre et les débits des crues dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza ont été évalués. Il a été également question d'évaluer les techniques d'aménagement des versants et en lit de la rivière pour les atténuer.

INTRODUCTION GENERALE

0.1. Contexte, problématique et intérêt du sujet

0.1.1. Contexte et problématique

L'envasement causé par l'érosion menace la rivière Ruvyironza et ses affluents dont Waga qui entraine les débordements directs des cours d'eau dans ses lits majeurs (inondations). Celles-ci sont aussi d'autre part causées par l'accumulation des eaux de ruissellement suite à des épisodes de fortes précipitations abondantes surtout dans la saison de grande pluie.

Ces phénomènes ont des impacts sur la diminution de la fertilité des sols ce qui entraînant ainsi une baisse de la production agricole, la destruction des ouvrages hydroagricoles, hydrauliques et hydroélectriques.

A titre d'exemple, la pluie de la nuit du 24 janvier 2016 a inondé la centrale hydroélectrique du barrage Ruvyironza. Le chef de la production d'électricité dans cette centrale fait savoir que l'endommagement de 2 pièces a automatiquement occasionné l'arrêt de la centrale en question. (https://isanganiro.org/2016/01/25/la-centrale-hydroelectrique-de-ruvyironza-endommagee/

Aussi, d'après les études des risques d'érosion faites pour l'ensemble du territoire du Burundi (**RISHIRUMUHIRWA, 1997**), monsieur Théodore RUSHIRUMUHIRWA a montré que les risques d'érosion pour les zones éco-climatiques de la crête Congo Nil et Plateau central sont respectivement de l'ordre de **100 et 200 t/ha/an**. Cela montre que la zone d'étude est très exposée à l'érosion.

La troisième communication nationale pour le changement climatique de 2019 montre que la centrale hydroélectrique de Ruvyironza a été endommagée par l'inondation en 2014, 2016 et 2018.

La figure ci-dessous illustre les dégâts causés par les inondations de la rivière Ruvyironza.



***Figure 0-1**: Inondation dans le central hydroélectrique de la Rivière Ruvyironza en 2016*



Figure 0-2*: Débordement de la Rivière Ruvyironza en 2023 à Giheta, colline Korane*

0.1.2. Intérêt du sujet

Le sujet abordé est crucial car il vise à améliorer la sécurité et la qualité de vie de la population vivant dans la zone d'étude et réduire les dégâts importants aux ouvrages hydrauliques, aux cultures et à l'environnement, ce qui a un impact direct sur leur bien-être économique et social.

Donc, notre sujet vient pour appuyer de manière considérable la possibilité d'adaptation aux changements climatiques afin d'atténuer les défis causés par ce dernier, soutenir le plan National sur le développement « Burundi pays émergent en 2040 et développé en 2060 » et dans le programme LVEMP II phase II : « Ensemble pour la protection du fleuve Nil ».

0.2. Objectifs

0.2.1Objectif Global

L'objectif global est d'évaluer les impacts d'aménagement du bassin versant sur les crues et les pertes en terres, afin d'étudier les possibilités d'atténuer leurs effets négatifs.

0.2.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont :

- Evaluer les pertes en terres dans le bassin versant la rivière Ruvyironza ;
- Etudier et évaluer le comportement hydrologique de la rivière Ruvyironza et son bassin versant ;
- Evaluer les zones inondables dans le bassin versant la rivière Ruvyironza ;
- Examiner la possibilité d'atténuer les effets des crues et d'érosion par les techniques d'aménagement du bassin versant dans des zones rurales.

0.3. Délimitation du sujet et Méthodologie adoptée

0.3.1. Délimitation du sujet

Le présent travail est consacré à atténuer les inondations et l'érosion par des techniques d'aménagement des versants et des lits des rivières dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza, afin d'alerter les décideurs du pays dans la prise de décisions.

0.3.2. Méthodologie adoptée

Afin d'arriver au bout de l'objectif de la présente étude, la démarche méthodologique suivante a été utilisée :

- ♣ Une revue de la littérature ;
- ♣ Collecte des données :
  - ✓ In situ : Relevé des coordonnées avec GPS Essential ;
  - ✓ Dans les différentes institutions (BCG, IGEBU, BPAE) ;
  - ✓ Téléchargement des données sur les différents sites internautiques ;
- ♣ Aanalyse et traitement des données recueillies ;
- ♣ Analyse et interprétation des résultats ;
- ♣ Conclusion et recommandations.

CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est un mouvement continu de l'eau dans le globe, la quantité en déplacement étant constante, c'est donc la répartition de cette quantité lors de ces déplacements qui est irrégulière. Lors de ses déplacements, l'eau peut changer son état (Gaz, Liquide et Solide), cela passe par des phénomènes qu'on appelle les composants du cycle hydrologique. Les mouvements de l'eau consomment de l'énergie, d'où le rôle déterminant de l'énergie solaire dans ce cycle, il est considéré comme le moteur du cycle.

La Figure I-1 montre le processus du système hydrologique,

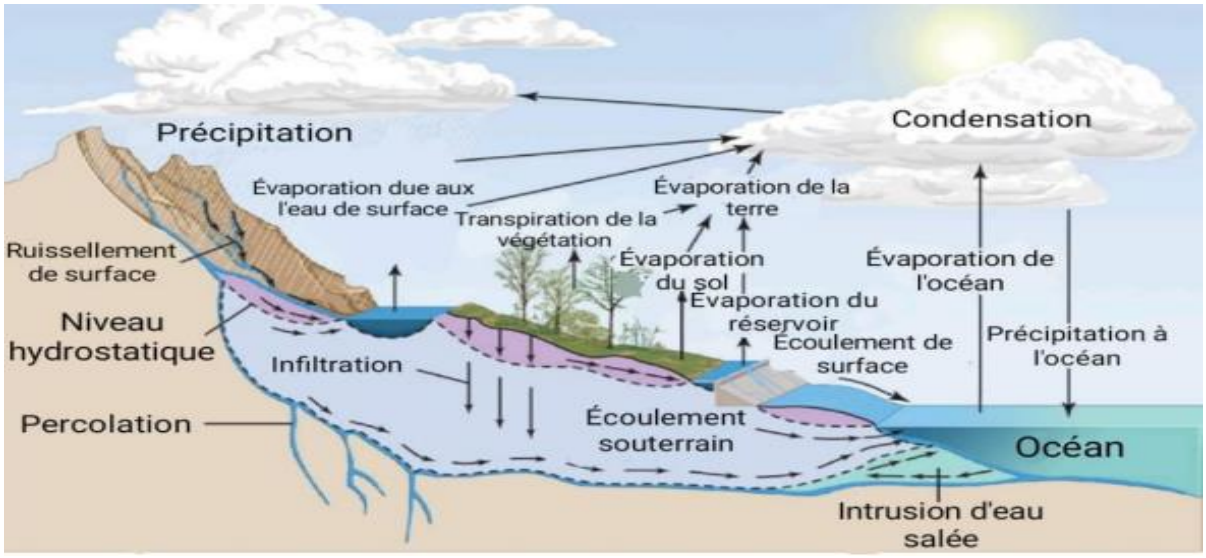


Figure I-1: *Schéma illustratif de processus du système hydrologique,*

I.2. Bassin versant

I.2.1. Généralités

Un bassin versant constitue l'ensemble du territoire drainé par un cours d'eau principal et ses tributaires, lesquels s'écoulent et convergent vers un même point de sortie appelé exutoire. Il a des frontières naturelles qu'on appelle lignes de partage des eaux ou lignes de crêtes et qui suivent la crête des montagnes, comme l'indique la Figure I-2 .

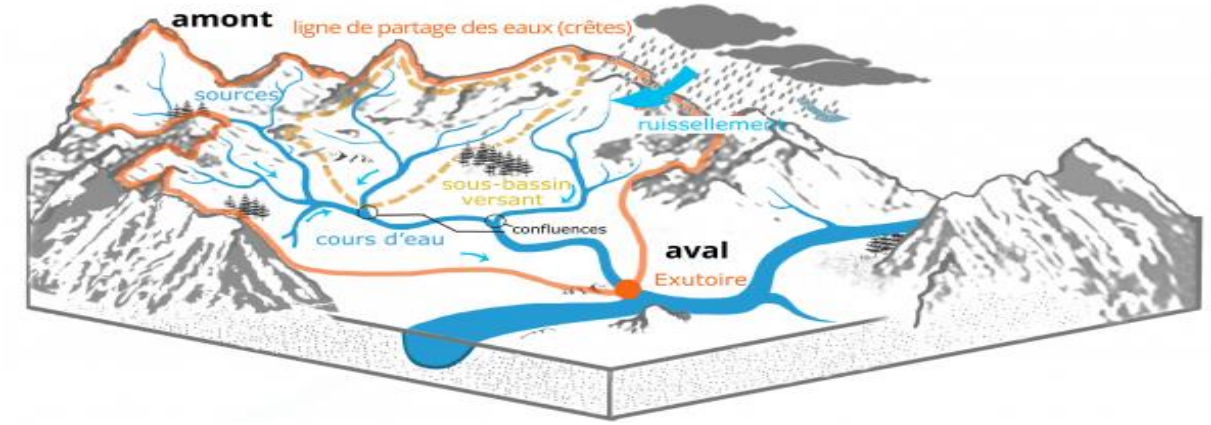


Figure I-2: Schéma illustratif du Bassin versant

Le bassin versant transforme la pluie en débit de rivière. Cette transformation est :

- ✓ Non linaire.
- ✓ Varie pour un même bassin versant au cours de l'année, d'une saison à l'autre, d'une crue à l'autre ;
- ✓ Varie d'un bassin versant à un autre selon les conditions géologique, pédologique, climatique et selon l'occupation du sol.

I.2.2. Délimitation du bassin versant

Les terrains géologiques qui forment le bassin sont en totalité ou en partie perméables. Une partie des eaux de précipitation peut s'infiltrer et alimenter souterrainement à travers la frontière avec un autre bassin sous forme de source. Dans ce cas la délimitation du bassin ne se base pas uniquement sur la topographie mais tient aussi compte des limites réelles d'alimentation basées sur la nature géologique du terrain et le sens des écoulements souterrains.

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

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

- ✓ **Bassin versant hydrogéologique** : Dans le cas d'une région au sous-sol perméable, il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infiltre puis sorte souterrainement du bassin.

I.2.3. Caractéristiques physiographiques d'un bassin versant

La détermination des caractéristiques physiographiques est nécessaire pour déterminer et analyse le comportement hydrologique d'un bassin versant (lame d'eau précipité, débit de la rivière, bilan, etc.).

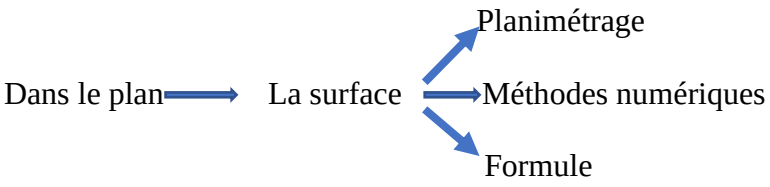
Les différents paramètres morphométriques d'un bassin (Superficie, Altitude, formes des unités hydrologiques, pente, relief, etc..) interviennent, et souvent de façon combinée, dans

les modèles de l'écoulement. Leur utilisation a pour but de condenser en un certain nombre de paramètres chiffrés, la fonction h = f (x, y) à l'intérieur du bassin versant (h altitude, x et y coordonnées d'un point du bassin versant).

I.2.3.1 Disposition en Plan

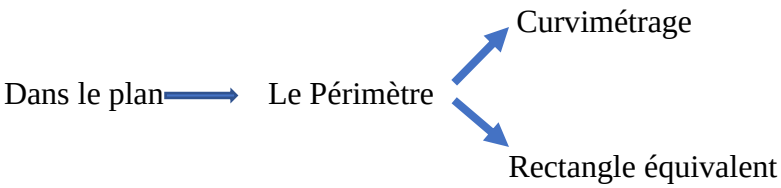
A. La surface

La surface constitue l'aire de réception des précipitations qui alimentent un cours d'eau par écoulement. Le débit du cours d'eau a l'exutoire dépend donc en partie de la surface. La surface peut être mesurée en Km^2 par l'utilisation d'un planimètre en superposant la superficie à une grille dessinée sur papier transparent, par méthodes numériques ou par l'intermédiaire de formules.



B. Le périmètre et Rectangle équivalent

Le périmètre est la caractéristique de longueur la plus utilisée. Le périmètre peut être mesuré directement sur la carte topographie par curvimétrage ou de manière indirecte en utilisant la longueur du rectangle équivalent.



Le rectangle équivalent est la rectangle L et la largeur l qui a la même surface et périmètre que le bassin versant :

$$P = 2(L + 1) \quad \text{(I-1)}$$

$$A = L * l \quad \text{(I-2)}$$

Avec :

- P : périmètre du bassin versant(km),
- L : longueur du rectangle équivalent (km),
- l : largeur du rectangle équivalent (km),
- A : surface du bassin versant (km^2).

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de

compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit cote du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

$$L = \frac{kG \times \sqrt{A}}{1.12} \times \left[1\sqrt{1 - \frac{1.12^2}{kG}}\right] \qquad \text{(I-3)}$$

C. La forme

- Dans le plan ⟶ La forme ⟶ coefficient de Gravelius (K_G)

Sachant que le coefficient de kG de Gravelius = Coefficient de compacité

La forme du bassin versant à une grande influence dure l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée, cette caractéristique est donnée par Douglas W.Rae qui a proposé en 1974 le coefficient de compacité (compactness coefficient) défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface :

$$kG = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28\frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{(I-4)}$$

Avec :

- P : périmètre en Km
- A : aire en Km^2

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

1.5 < kG <1.8 : Pour les bassins des formes allongée

1.0 < kG <1.15 : Pour les bassins des formes ramassée

- Dans le plan ⟶ La forme ⟶ Indice de forme de Horton

Il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal (Horton,1932)

$$K_H = \frac{A}{L^2} \qquad \text{(I-5)}$$

Où :

- K_H : Indice de Horton sans dimension,
- A : Surface du bassin versant (Km^2)
- L : Longueur du cours d'eau principal (Km)
- K_H <1 : Pour les bassins des formes allongée

- K_H >1 : Pour les bassins des formes ramassée

I.2.3.2. L'altitude

La plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont en fonction de l'altitude.

- **La courbe hypsométrique**

La courbe hypsométrique traduit la répartition des altitudes à l'intérieur du bassin versant et permet, en outre, de déterminer les altitudes caractéristiques.

L'altitude est décrite par la courbe hypsométrique qui représente la surface en Km^2(ou le pourcentage de la surface) en fonction des altitudes supérieures à une cote Z donnée.

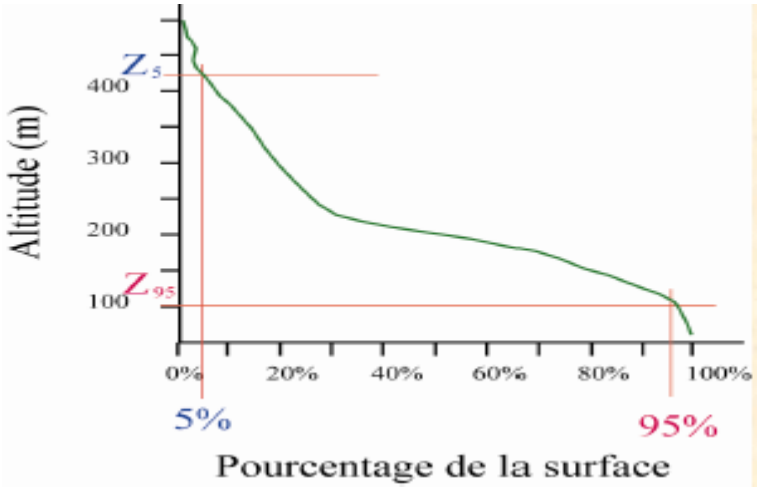


***Figure I-3**: Schéma illustratif courbe hypsométrique (Laborde,2000)*

$$D = Z_a\,\% - Z_b\,\% \qquad \text{(I-6)}$$

Où :

- D : dénivelé c'est la différence entre Z_a % et Z_b%
- Z_a % : altitude élevée supérieur à une hauteur donnée qui représente a% (Z_5) de la surface du bassin
- Z_b % : altitude basse supérieur à une hauteur donnée qui représente b% (Z_{95}) de la surface du bassin

Cette courbe est établie en planimétrant pour différentes altitudes les surfaces situées au-dessus de la courbe, en maillage carré.

Dans le plan ⟶ La surface ⟶ -Planimétrage
La surface ⟶ -Maillage

- **Les altitudes caractéristiques :**

✓ **Les altitudes maximales et minimales**

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

✓ **L'altitude moyenne**

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

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i h_i}{A} \qquad \text{(I-7)}$$

Avec :

- H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m]
- A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km^2]
- h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]
- A : superficie totale du bassin versant [km^2]

✓ **L'altitude médiane**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

I.1.3.3. Indices des pentes

Leur connaissance est d'une grande importance car il est évident que les eaux ruissellent d'autant plus que la pente des versants est grande, c'est ainsi qu'en montagne ou rencontre, pour une averse donnée, des crues plus importantes qu'en plaine ou les pentes sont beaucoup plus faibles.

- **La pente moyenne**

Cet indice se calcule à partir du rectangle équivalent

La pente moyenne $n_j = \frac{D}{d_j}$

La surface de la bande j est $d_j l_j = a_j$

$$i_{pmoy} = \frac{\sum n_j a_j}{a_j} = \frac{\sum \frac{D d_j l_j}{d_j}}{d_j l_j} = \frac{D \sum l_j}{A} \qquad (I\text{-}8)$$

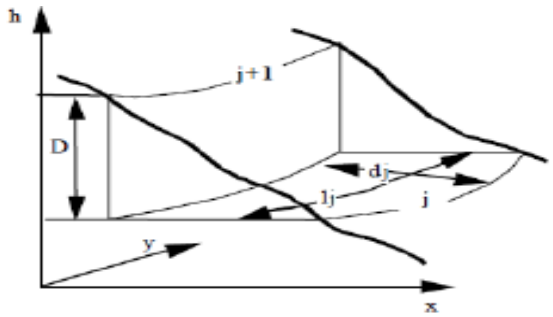


***Figure I-4**. Schéma illustratif de calcul d'indice de pente équivalent*

- $I_{éq}$: indice de pente moyen en (%)
- $L_{éq}$: Longueur du rectangle équivalent (Km)
- $l_{éq}$: Longueur équivalente
- x_l : distance qui sépare les deux courbes sur le rectangle (m)largeur étant constante.
- d : distance entre deux courbes de niveau successives(m).
- d/x_l : pente d'élément

- **Indice de pente de Roche**

Le calcul de l'indice de pente I_r de roche nécessite :

- ✓ Le rectangle équivalent,
- ✓ La courbe hypsométrique

La pente de roche I_r exprimé par la moyenne de la racine carrée des pentes, mesurées sur le rectangle équivalent et pondérées par les surfaces.

$$I_r = \frac{1}{\sqrt{L_{éq}}} \sum_i^n \sqrt{a_i} * d_i \qquad (I\text{-}9)$$

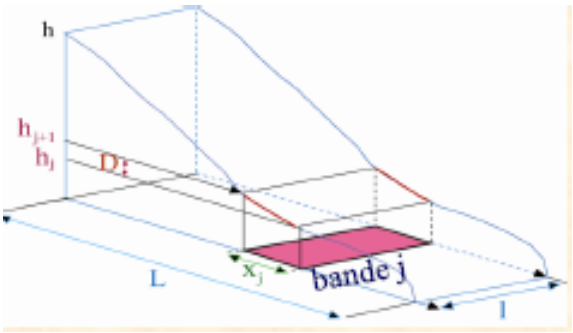


***Figure I-5**: Schéma illustratif de calcul de l'indice de roche*

- D : Dénivelé utile(m)
- $L_{éq}$: Longueur équivalente
- $l_{éq}$: Longueur équivalente
- X_j : distance qui sépare les deux courbes sur le rectangle équivalent.

- **Indice de pente globale**

L'indice de pente global de pente c'est le rapport de dénivelée « D » telle que défini**e** sur la courbe hypsométrique sur la longueur du rectangle équivalent :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

(I-10*)*

Avec :

- D : Dénivelée Za% - Zb% définie sur la courbe hypsométrique entre 5% et 95%ou à l'œil sur la carte topographique ;
- L : Longueur du rectangle équivalent.

Sur base de la valeur d'indice de pente globale le tableau ci-dessous montre la Classification des bassins versants.

Tableau I-1: *classification des reliefs selon Ig (laborde,2000)*

Relief très faible	$I_{g,} < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_{g,} < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_{g,} < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_{g,} < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_{g,} < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_{g,} < 0.1$
Relief très fort	$0.1 < I_{g,}$

Pour un même bassin, l'indice global I_g décroît lorsque la surface augmente. Il existe une relation entre l'indice global et l'indice de Roche (avec un coefficient de corrélation de 0.99)

$$I_g = 0.8\, I_r^2 \qquad (\text{I-11})$$

- **Les indices de pente et Dénivelée spécifiques**

A la différence de l'indice global I_g, la dénivelée spécifique Ds est indépendante de la surface et permet alors de comparer des bassins de tailles différentes.

$$D_s = I_g\sqrt{A} \qquad (I\text{-}12)$$

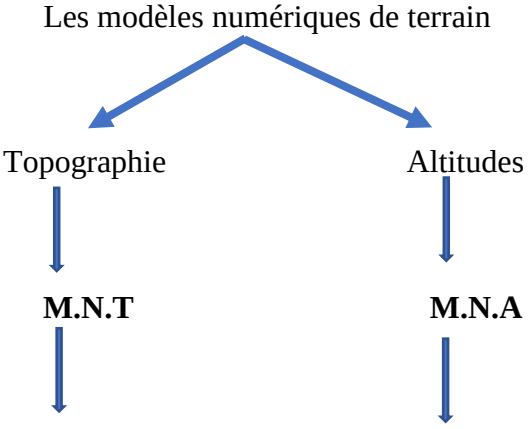
La dénivelée spécifique D_S est indépendante de la surface et permet alors de comparer des bassins de tailles différentes.

Tableau I-2: Classification des reliefs selon D_S (laborde,2000)

Relief très faible	$D_S < 10m$
Relief faible	$10m < D_S < 25m$
Relief assez faible	$25m < D_S < 50m$
Relief modéré	$50 < D_S < 100m$
Relief assez fort	$100 < D_S < 250m$
Relief fort	$250m < D_S < 500m$
Relief très fort	$500m < D_S$

I.1.3.4. Modèles numériques de terrain

Il existe actuellement un ensemble de programmes informatiques qui permettent de développer des modèles numériques de terrain. Les modèles numériques de terrain traitent la topographie c'est le M.N.T. (au sens strict) et traitent également les altitudes aux nœuds d'un maillage régulier couvrant une région donnée c'est le M.N.A. (modèle numérique d'altitude). Ces modèles permettent de calculer automatiquement tous les paramètres morphométriques d'un bassin versant.



Calculons automatiquement de tous les paramétriques d'un bassin versant

Dans ce présent travail, afin de déterminer tous les paramètres du Bassin versant de la Ruvyironza, faisant objet de la présente étude, nous nous sommes servi des données de type raster (grilles). Ces dernières nous ont été fournies par le Bureau de Centralisation Géomatique (BCG) et sont traitées par le logiciel ArcGIS.

I.2.3.5. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires qui drainent les eaux d'un bassin versant vers l'exutoire. La description d'un réseau hydrographique nécessite la détermination de plusieurs paramètres.

♣ **Quelques paramètres du réseau hydrographique sont notamment** :

- ✓ Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau ;
- ✓ La structure du réseau et ordre des cours d'eau.

- **Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau :**

- ✓ **La longueur d'un bassin versant** est la distance curviligne mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à un point représentant la projection du centre de gravité du bassin sur un plan (**Snyder, 1938).**

- ✓ **La longueur du cours d'eau principal** est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

- ✓ **Le profil en long du cours d'eau** représente la variation de l'altitude du cours d'eau en fonction de sa longueur. Le profil en long d'un cours d'eau permet aussi de définir sa pente moyenne.

- ✓ **La pente moyenne d'un cours d'eau** détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin, donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment

utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} \quad \text{(I-13)}$$

Où :

- P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;
- ΔH_{max} : dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;
- L : longueur du cours d'eau principal [km].

- **Courbe aire-distance**

A partir de données sur un bon nombre des bassins versants **(Hack, 1957),** une relation a pu être établie entre la longueur *L* [km] de la rivière et l'aire *A* [km^2] du bassin versant :

$$L = 1{,}4 \times A^{0.6} \quad \text{(I-14)}$$

On peut aussi définir la courbe aire-distance, qui met en relation la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre u donné et l'aire tributaire moyenne des cours d'eau du même ordre u, et ceci ordre par ordre. Cette courbe permet de visualiser la répartition des superficies du bassin par rapport à l'exutoire ou par rapport au point de mesure du débit. Cette répartition affecte en effet la concentration du ruissellement et donc influence la réponse hydrologique du bassin versant.

- **La densité de drainage**

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{\sum Li}{A} \quad \text{(I-15)}$$

Avec :

- D_d : densité de drainage [km/km^2] ;
- L_i : longueur de cours d'eau [km] ;
- A : surface du bassin versant [km^2].

I.1.3.6. Caractéristiques agro-pédo-géologique

Les caractéristiques agro-pédo-géologiques sont celles qui se rapportent au type de couverture végétale, à la nature du sol et à la géologie du substrat au sein d'un bassin versant.

- **La couverture du sol**

La couverture végétale et le type de sol sont intimement liés et leurs actions influencent singulièrement l'écoulement en surface. Le couvert végétal retient une proportion importante de l'eau de pluie. La forêt par exemple intercepte une partie de l'averse par sa frondaison. Elle exerce une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. Elle régularise le débit de cours d'eau et amortit les crues de faible amplitude (**Larras, 1965 ; Musy & Higy, *2004*)*.*

A l'inverse, le sol nu, de faible capacité de rétention favorise un ruissellement très rapide. L'érosion de la terre va généralement de pair avec l'absence de couverture.

La couverture végétale protège le sol de l'érosion et influence considérablement l'écoulement de surface.

- **La nature du sol**

L'étude pédologique d'un bassin versant est d'une importance capitale car elle renseigne sur le type du sol et donc sur les risques d'érosion dans le bassin. La nature du sol renseigne sur la dimension des particules et l'érodibilité de ce sol (**Roose et al. 2000 ; Musy & Higy, 2004).**

La dimension des particules constituant les matériaux est le facteur déterminant des phénomènes d'infiltration. On dira que plus les particules sont d'une taille importante, plus le terrain sera perméable c'est-à-dire favorable à l'infiltration (**Roose et al., 2000**). La vitesse d'infiltration de l'eau influe sur le risque de ruissellement. Elle dépend de la perméabilité du sol c'est-à-dire de sa porosité sous dépendance de la structure, de la faune du sol, de la texture, de la pierrosité.

Tableau I-3*: classification du sol suivant les diamètres des grains*

Nature du sol	**Diamètre des grains(D)**
Gravier	D > 2 mm
Sable grossier	0,2mm<D< 2 mm
Sable fin	0,02mm <D< 0,2 mm
Limon :	0,002 mm<D< 0,02 mm
Argile :	D<0,002 mm

L'érodibilité exprime la sensibilité d'un sol à l'action agressive de la pluie ou la résistance de différents sols aux actions érosives de la pluie ou du ruissellement. C'est donc l'aptitude des particules du sol à la détachabilité et celle à être transportée. La résistance d'un sol à la dégradation dépend de sa texture, de sa structure, de sa teneur en matière organique (complexe argilo-humique).

I.2.3.7. Temps de concentration

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire.

Plusieurs approches empiriques pour la détermination du temps de concentration dans le bassin versant, on peut citer :

- ✓ **Formule de Giandoti**

$$T_c = \frac{4A^{0.4}+1.5L}{0.8*h^{0.5}} \quad \text{(I-16)}$$

Avec :

- A : Surface du bassin versant (km^2) ;
- L : longueur du cours d'eau principal (km) ;
- h : différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle à l'exutoire (m) ;
- Tc : temps de concentration (heures),

- ✓ **Formule de Ventura**

$$T_c = 76.3\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{I}} \quad \text{(I-17)}$$

Avec :

- Tc : temps de concentration (min) ;
- A : superficie u bassin versant (km^2) ;
- : pente moyenne du bassin (%),

- ✓ **Formule de Turaza**

$$T_c = 1.662\ Sbv^{0.5} \quad \text{(I-18)}$$

Avec :

- Tc : temps de concentration (min) ;
- $Svb^{0.5}$: superficie u bassin versant (Ha).

I.3.Modélisation de l'érosion hydrique

I.3.1. Définition

L'érosion hydrique est un phénomène complexe causé généralement par l'action combiné de pluie et de ruissellement qui ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol.

L'érosion peut être définie comme un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité **(Girard et al., 2005)**. C'est un phénomène naturel caractérisé par des processus de détachement des particules du sol par les précipitations et le ruissellement, leur transport par les eaux superficielles qui ruissellent et leur dépôt le long du trajet suivi par les eaux superficielles sur les versants et dans les cours d'eau (**Foster et Meyer, 1972).**

L'érosion des sols en termes réels met en danger la sécurité alimentaire, la productivité subsistance du sol, la surface stockage de l'eau, la qualité de l'eau de surface, la beauté du paysage et l'équilibre écologique naturel. Sa solution réside dans l'adaptation des pratiques de conservation **(Toumi, 2013).**

I.3.2. Processus de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est le résultat de trois principaux mécanismes : le **détachement** des particules, leur **transport** et leur **sédimentation.**

- **Le détachement**

Le détachement des particules du sol se produit sous l'action de deux agents érosifs : **la pluie** et **le ruissellement.**

- ✓ **La pluie,** qui est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols **(Ellison, 1944 ; Ekeren, 1950).** L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface (**Boiffin, 1976 ; Le Bissonnais, 1988**)

Le potentiel érosif de la pluie est désigné par le terme général **d'érosivité (Bergsma et al.1996).** Qui dépend de l'intensité et des caractéristiques des gouttes de pluie comme la taille et la vitesse. L'impact des gouttes de pluies sur la surface de sol provoque le détachement des particules de sol qui seront éjectés de la surface et transportés, avant de se déposer à la surface. Ce rejaillissement d'eau et de sol est désigné par le terme de splash.

- ✓ Le ruissellement est un moteur essentiel de l'érosion, il détache, transporte et exporte des fragments de sol (**Leguédois, 2003**).

Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement.

- **Le transport**

Les particules de sols détachés sont transportées vers le bas des pentes sous l'action des écoulements de surface par suspension, saltation et traction sur des distances plus ou moins importantes.

Quand la charge en sédiments est inférieure à la capacité de transport de l'écoulement, les particules de sol peuvent être ainsi transportées. Quand la charge est supérieure à la capacité de transport, les sédiments en excès se déposent. L'exportation des sédiments par le ruissellement est grandement influencée par le fait que la lame d'eau soit soumise ou non à l'impact des gouttes de pluie. Pour un écoulement en nappe peu épais (érosion diffuse), la pluie tend à augmenter la concentration et la granulométrie de la charge solide exportée (**Chaplot & Le Bissonnais, 2000 ; Beuselinck et al, 2002**).

Il existe d'autres facteurs moins importants qui favorisent le déplacement et le transport des particules de sol tels que la gravité et le vent.

- **La sédimentation**

La sédimentation est le mécanisme qui contrôle et peut limiter la quantité de sédiments exportés. Elle se produit quand la capacité de transport de l'écoulement est dépassée. Cette troisième phase du processus d'érosion hydrique apparaît donc par exemple lors du ralentissement du ruissellement. Les particules les plus grossières sont les premières à sédimenter, les plus fines étant transportées plus loin. On parle de tri granulométrique (**Kaurak Leite 1990**).

I.3.3. Estimation de l'érosion par le modèle RUSLE

I.3.3.1. Méthodes d'évaluation de l'érosion

Plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer les risques d'érosion des sols. Ainsi, deux modèles de prédiction de perte en sol ou de l'érosion peuvent être utilisés compte tenu de leur adaptation universelle. Il s'agit entre autres du modèle R.U.S.L.E (**Revised Universal Soil Loss équation : Équation Universelle Révisée des Pertes en Sol**) et du modèle de Gravilovic (**Erosion**) pour prédire, respectivement, les pertes en sol au niveau des versants et la production de sédiments au niveau de l'exutoire des sous bassins versants.

Dans la présente étude, seul le modèle RUSLE sera étudié pour la quantification des pertes en sol au niveau du bassin versant de la RUVYIRONZA.

L'approche utilisée a consisté dans un premier temps, à détecter les facteurs déclenchant l'érosion et à les spatialiser en utilisant les images satellitaires Landsat. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisées pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. La modélisation prédictive dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion. Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrées et sont entrées dans une base de données SIG, après quoi elles seront spatialement modélisées pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage choisi.

Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre du modèle RUSLE et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation en utilisant le logiciel ArcGIS. Toutes couches ont été projetées en UTM zone 35S en utilisant le WGS 1984. La méthodologie adoptée pour réaliser cette étude est représentée sur la figure suivante :

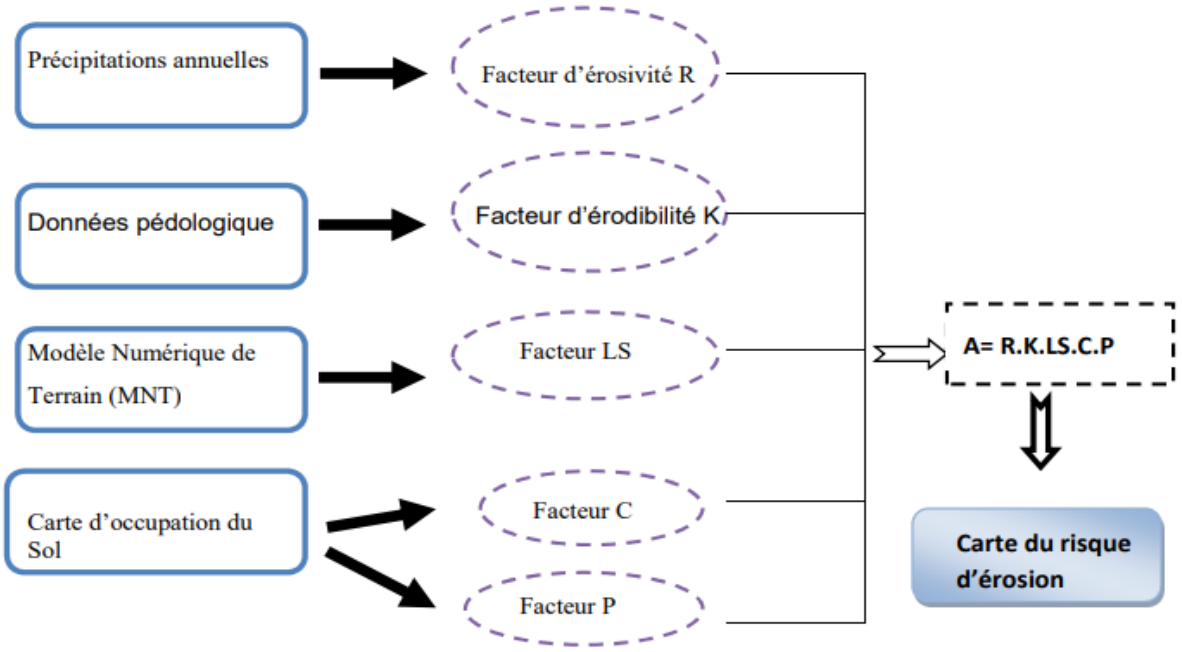


***Figure I-6**: Méthode de la création d'une carte du risque d'érosion basée sur l'équation RUSLE*

I.3.3.2. Le modèle RUSLE

Le modèle RUSLE est le développement de l'équation USLE. Cette dernière est largement adaptée à toutes les échelles. Fondamentalement, elle a l'avantage de fournir des estimations à long terme sur les pertes moyennes annuelles en sol à partir de petites zones, et elle est considérée comme un "bon modèle" si le but de la modélisation est d'arriver à des estimations globales de l'érosion des sols.

Le modèle RUSLE se présente sous forme d'une équation mathématique qui utilise les facteurs d'érosion comme entrées, pour estimer les pertes moyennes annuelles en sols, ré sultantes de l'érosion en nappe et en rigole. Ce modèle ne prend pas en considération les processus d'érosion comme le détachement, le transport et le dépôt. Il conserve la même forme que l'équation utilisée dans le modèle RUSLE, et que se présente sous la relation suivante.

$$A = R * K * LS * C * P \qquad \text{(I-19)}$$

Où :

- A : est le taux annuel des pertes en sol (t/(ha.an)) ;
- R : est le facteur de l'érosivité des pluies, il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie ((MJ·mm) /(ha·an)) ;

- K : est l'érodibilité des sols, et dépend de la granulométrie, de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol ((t.h.ha. ha) /(MJ.ha.mm)) ;
- LS : est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m) ;
- C : est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale ;
- P : est un facteur sans dimension, rapport qui tient compte des techniques culturales antiérosives, tel que, le labour en courbes de niveau.

Cette équation révisée de Wischmeier est combinée avec les techniques de SIG pour évaluer le taux de perte de sol brut et la distribution spatiale des taux de perte de sols sur les différentes occupations des sols.

I.2.3.2.1 Facteur d'érosivité des pluies (R)

La pluie est l'un des principaux facteurs de l'érosion des sols, ceci se produit lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol et arrachent les particules du sol en emportant des particules **(Le Bissonnais et al., 2002).** Ainsi, le rôle du facteur R est de caractériser la force érosive des précipitations sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations. L'érosivité de la pluie est définie par La formule la plus utilisée pour calculer le facteur R en n'utilisant que les précipitations moyenne annuelles est celle de **Renard et Freimund (1997**), modifiée par Sharma, dont l'expression est :

$$\begin{cases} P_i < 850mm \\ R = 0.0483.P_i^{1.6}.0{,}1 \end{cases} \quad \text{(I-20)}$$

$$\begin{cases} P_i > 850mm \; R = (587.8 - 1.219P_i + 0.004105.P_i^2).0{,}1 \end{cases} \quad \text{(I-20)}$$

Avec Pi qui représente les précipitations moyennes annuelles en (mm).

I.2.3.2.2 Le facteur d'érodibilité du sol (K)

L'érodibilité d'un sol se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau. Les paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture) contribuent largement à influencer la sensibilité des sols à l'érosion (**Roose et Sarrailh, 1990).**

Le facteur K est fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et la perméabilité du sol. Les données pour le bassin versant de RUVYIRONZA ont été télécharger sur le site de FAO : Webarcive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-world-soil-databest/HTML/.

Il s'agit des données de type raster et d'un document Microsoft Access qui indique les pourcentages de sable, de limon, d'argile et de matière organique pour chaque élément présent dans la typologie des données de type raster et par après on a obtenu une carte thématique d'érodibilité des sols de la zone à l'étude, numérisée par la suite dans le SIG.

Bolline et Rousseau (1978) ont établi la classification, dans le tableau ci-dessous interprétant l'indice de susceptibilité des sols.

***Tableau I-4**: Classification de l'indice de susceptibilité des sols*

Érodibilité (K)	Type de sols
K < 0,10	Sols très résistants à l'érosion
0,10 à 0,25	Sols assez résistants à l'érosion
0,25 à 0,35	Sols moyennement sensibles à l'érosion
0,35 à 0,45	Sols assez sensibles à l'érosion
>0,45	Sols très sensibles à l'érosion

I.3.3.2.3. Le facteur de la topographie (LS)

Le facteur topographique regroupe les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison (S) de la pente sur l'érosion. La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle. Les facteurs L (longueur de pente) et S (angle de la pente en %) sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel LS afin de définir l'effet de l'érosion **(Payet, 2012).**

Plusieurs formules ont été développées pour calculer le facteur LS. La méthode USPED (Unit Stream Power - based Erosion and Deposition) **de Jim Pelton et al, en 2012**, a été utilisé du fait que cela soit une des plus récentes, ainsi que de sa facilité de mise en œuvre pour les calculs. Cette méthode propose deux équations pour L et S :

$$L = (m+1)(\frac{\lambda_A}{22.13})^m \quad \text{(I-21)}$$

Avec :

- L : Longueur de pente ;
- λA : surface d'écoulement supérieur [m^2] ;
- m : Variable dépendant de la susceptibilité du sol à l'érosion ;
- 22,13 : Longueur de parcelle élémentaire.

$$S = (\frac{sin(0{,}1745.\theta dég)}{0{,}09})^n \quad \text{(I-22)}$$

Avec :

- S : Raideur de la pente ;
- θdeg : Pente en degré ;
- n = Variable dépendant de la susceptibilité du sol à l'érosion.

Dans le SIG, ces équations deviennent :

- F=(sin(''slope-degree ''*0.01745)/0.0896/(3*Power(''Slope_degree ''*0.01745),0.8+0.56))
- m = "F" / (1 + "F")
- L = Power (("FlowAcc" + 625), ("m" + 1)) – Power ("FlowAcc", ("m" + 1)) / Power (25, ("m" +2)) * Power (22.13,"m"))
- S = Con (Tan ("slope_degree" * 0.01745) < 0.09, (10.8 * Sin ("slope_degree" * 0.01745) + 0.03), (16.8 * Sin ("slope_degree" * 0.01745) - 0.5))

I.3.3.2.4. Facteur de la couverture végétale C

Le couvert végétal protège les sols et assure l'amortissement des gouttes de pluie, le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. Ainsi, pour une végétation basse, les pertes de sols diminuent avec l'augmentation du couvert végétal **(Soutter et al., 2007).** Le facteur C est défini comme le rapport entre les pertes en sols nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sols correspondants aux sols sous système d'exploitation **(Wischmeier et Smith, 1978 in El Garouani et al., 2008)**. Une typologie des différents types d'occupation du sol a donc été réalisée à partir des donnés téléchargées gratuitement sur **sentinel2-land use cover/land cover** (résolution de **10m**) avec le lien : https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/.

Ces dernières nous permettront d'attribuer la valeur de facteur C en utilisant le tableau ci-dessous de (**RSULE hand book (Renard et al,1997)** à chaque type de couverture.

Tableau I-5*: Classes de valeur de C pour chaque type de couverture* ***(Renard et al,1997)***

Classes	Noms des classes	Facteur C
1	Eau	0.000
2	Végétation dense	0.025
3	Herbes	0.020
4	Végétation inondée	1.000
5	Zone des cultures	0.050
6	Végétation Pauvre	0.400
7	Zone bâtie	1.000
8	Sol nu	1.000
9	Neige	0.000

I.3.3.2.5. Pratique anti- érosive (P)

Le facteur P tient compte de l'efficacité antiérosive des pratiques de soutien, de couverture végétale et de gestion, des pratiques qui réduiront la quantité des eaux de ruissellement en modifiant la configuration de l'écoulement, l'inclinaison ou la direction du ruissellement de surface et, par conséquent, réduit l'intensité de l'érosion. (**Jaoued, 2007**).

Les cultures en courbes de niveau, les plantations en banquettes sont des pratiques très efficaces de conservation des eaux et des sols. Selon **WISHMEIER W.H. et SMITH 0.0. (1965)**

Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée. Les valeurs de P varient selon la pente **(Shin, 1999**).

Tableau I-6*: Valeurs de facteur P selon la pente (**Shin, 1999).*

N°	Classes des Pentes en %	Facteur P
1	0-7	0.55
2	7-11.3	0.6
3	11.3-17.6	0.8
4	17.6-26.8	0.9
5	>26.8	1

I.4. Modélisation hydrologique et hydraulique

I.4.1. Modélisation hydrologique pluie-débit

En hydrologie, on utilise souvent ces termes pour désigner les modèles hydrologiques mis en œuvre pour représenter la transformation pluie-débit sur un bassin versant. Pour schématiser ce processus, les hydrologues le décomposent souvent en deux fonctions, supposées successives et indépendantes dans le cas des modèles globaux.

Ces deux fonctions sont la fonction **de production** et la fonction **de transfert.**

I.3.1.1. Fonction de production

La fonction de production permet de définir la partie de la pluie précipitée (**pluie brute**) qui va effectivement s'écouler à l'exutoire du bassin versant. Le résultat de cette première transformation est un hyétogramme de **pluie nette**.

La pluie nette est calculée par différence entre la pluie brute et les pertes au ruissellement (évaporation, interception par la végétation, rétention en surface, infiltration, stockage moteur nécessaire pour que s'engage leprocessus de ruissellement).

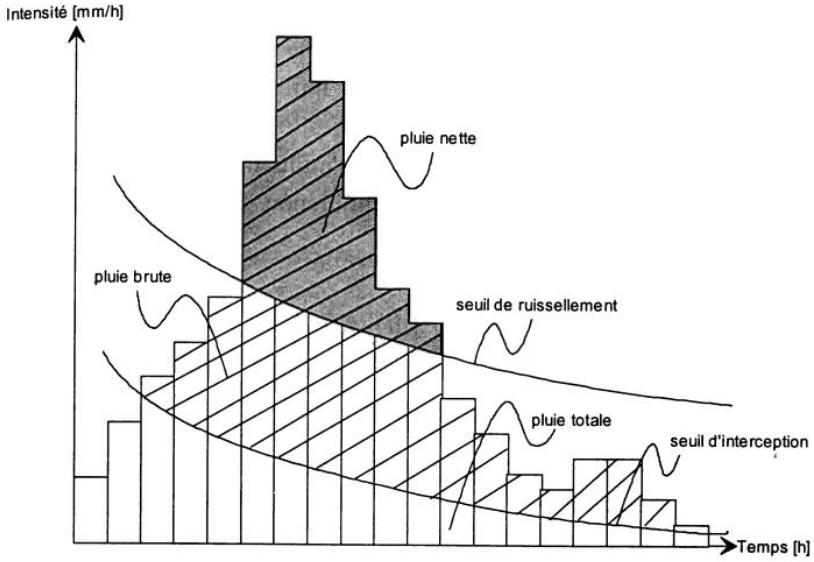


Figure I-7 : Schéma illustratif de Pluie totale, pluie brute, pluie nette

Source : Hydrologie Appliqué. (**Musy, et al., 1998**)

Pour le présent travail la méthode SCS a été choisie dans des plusieurs méthodes pour déterminer la pluie nette en permettant le passage d'une pluie brute à une pluie nette.

La pluie nette est ensuite exprimée sous la forme d'un débit de pluie nette en multipliant l'intensité instantanée de pluie nette par la surface totale du bassin versant. Voir également : Coefficient de ruissellement.

- **Développement de la méthode de SCS**

On définit tout d'abord les grandeurs suivantes :

- P = Précipitation totale (Pluie brute).
- Pn (Q) = Pluie nette (Précipitation participant au ruissellement).
- Ia = Pertes initiales.
- P – Pn-Ia = Pertes additionnelles. Ce sont les précipitations infiltrées après le début du ruissellement.
- S = Pertes maximales potentielles.

On a de suite la situation suivante ci-dessous

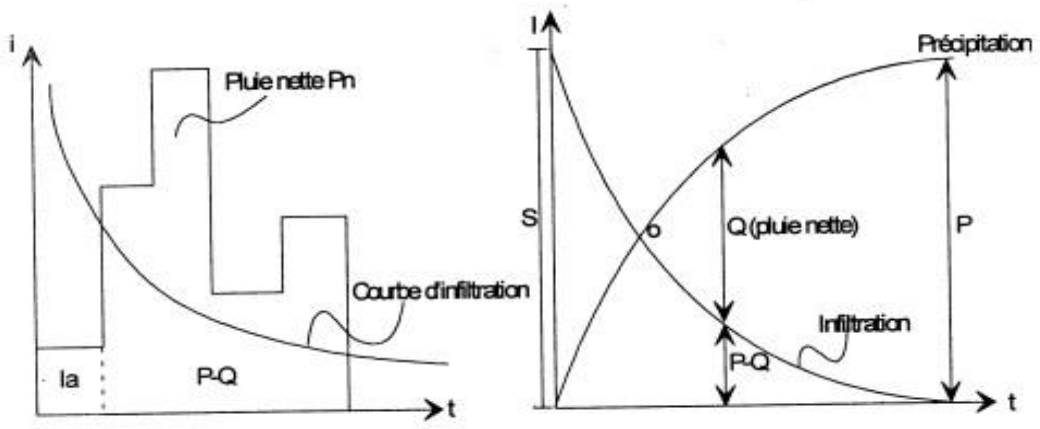


***Figure I-8** : Schéma illustratif de Méthode du SCS.*

Source : Hydrologie Appliqué. (Musy, et al., 1998)

II s'agit des courbes "précipitation" et "infiltration" représentées sur la partie droite de la figure.

En appliquant les règles de la géométrie élémentaire relatives aux triangles semblables issus de cette figure, on peut écrire simplement :

$$\frac{Q(Pn)}{P} = \frac{P-Q(Pn)}{S} \qquad \text{(I-23)}$$

Et le ruissellement **Q** s'exprime par :

$$Q = \frac{P^2}{P+S} \qquad \text{(I-24)}$$

En introduisant les pertes initiales I_a, le terme P devient P -I_a et l'équation précédente s'écrit :

$$Q(Pn) = \frac{(P-I_a)^2}{P+I_aS} \qquad \text{(I-25)}$$

Après avoir effectué de nombreuses expériences, le SCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant les pertes initiales aux pertes maximales potentielles :

$$Q = 0.2.S \qquad \text{(I-26)}$$

Et l'expression de la pluie nette s'écrit :

$$Q(Pn) = \frac{(P-0.2.S)^2}{P+0.8.S} \qquad \text{(I-27)}$$

Afin de standardiser les courbes représentant la pluie nette en fonction de la pluie brute, le SCS a introduit un paramètre sans dimension se nommant "Curve Number" (CN). Ce paramètre est norme tel que : 0 < CN < 100 et rapporté en unités métriques.
Compte tenu des expériences réalisées, il est possible de définir plusieurs paramètres ensuivant les conditions antécédentes d'humidité. On a ainsi :

- ✓ **Conditions normales :**

$$CN(II) = \frac{25400}{S+254} \quad \text{(I-28)}$$

- ✓ **Conditions sèches :**

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10-0.058CN(II)} \quad \text{(I-29)}$$

- ✓ **Conditions humides :**

$$CN(II) = \frac{23CN(II)}{10+0.13CN(II)} \quad \text{(I-30)}$$

Il est encore possible, sur la base des relations précédemment développées, d'établir l'expression du taux d'infiltration. L'infiltration cumulative F peut en effet s'écrire :

$$F = P - I_a - Q(Pn) \quad \text{(I-31)}$$

Ainsi :

$$Q(Pn) = P - I_a - F \quad \text{(I-32)}$$

En introduisant cette relation dans l'équation de **F**, on obtient après simplifications :

$$F = \frac{S.(P-I_a)}{P-I_a+S} \quad \text{(I-33)}$$

- **Pluie de projet**

Pour estimer la pluie de projet, on utilise les données historiques des précipitations pour un endroit donné. On fait le traitement de ces dernières pour estimer les hauteurs des précipitations qui correspondent à une période de retour donnée.

La formule générale d'estimation d'un quartile hydrologique XT (intensité, hauteur, débit, etc.) d'une période de retour T donnée s'écrit :

$$X_T = \mu + K_T\sigma \qquad (I\text{-}34)$$

Où :

- $\mathbf{K_T}$: un facteur de fréquence qui dépend de la période de retour et de la loi de distribution utilisée ;
- **μ** : respectivement la moyenne de la série enregistrée ;
- **σ** : l'écart-type de la série enregistrée.

Pour ce présent travail, Les lois de distribution utilisées sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

***Tableau I-7**: Relations des lois de distribution*

Loi de distribution	Relation	Légende
Loi de Gumbel	$\boldsymbol{K_T} = \frac{\sqrt{6}}{C_S}.\left(0.57 + ln\left[ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right]\right)$	T : Période de retour
Loi de Pearson III	$\mathbf{K_T} = \frac{2}{C_S}\left\{\left[\frac{C_S}{6}\left(\left(Z_T - \frac{C_S}{6}\right)\right) + 1\right]^3 \middle\| -1\right\}$	$\mathbf{C_S}$: Coefficient d'asymétrie $\boldsymbol{C_S} = \frac{\boldsymbol{n}}{(\boldsymbol{n-1})(\boldsymbol{n-2})} . \frac{\sum_i^n (\boldsymbol{xi} - \boldsymbol{\mu})^3}{\boldsymbol{\sigma^3}}$
Loi normale :	**KT=ZT**=LOI.NORMALE. STANDARD.INVERSE. N(F(T))	-F(T) : probabilité de non dépassement ; -ZT : Variable réduite

Hyétogramme de projet

Dans la présente étude projet, après avoir trouvé la hauteur maximale des précipitations du projet, sa répartition temporelle reste indispensable notamment dans les études des inondations. Plusieurs techniques sont développées pour déterminer l'hyétogramme de projet à savoir : méthode du NRCS (SCS), la méthode de l'hyétogramme triangulaire, la méthode de Huff, la méthode ABM (Alternative Block Method) et la méthode de la pluie de Chicago.

Hauteur maximale des précipitations est répartie suivant la méthode du NRCS (SCS) [distribution du type IA] dont les développements des principes se situe dans le livre de Musy ,1998.

***Tableau I-8** : distribution d'une pluie de 24h et 6h selon la méthode SCS*

Précipitation de 24heures				**Précipitation de 6heures**
		Pt/P24		

Heur e	t/24	Type I	Type IA	Type II	Type III
0	0	0	0	0	0
2,0	0,083	0,035	0,050	0,022	0,020
4,0	0,167	0,076	0,116	0,048	0,043
6,0	0,250	0,125	0,206	0,080	0,072
7,0	0,292	0,156	0,268	0,098	0,089
8,0	0,333	0,194	0,425	0,120	0,115
8,5	0,354	0,219	0,480	0,133	0,130
9,0	0,375	0,254	0,520	0,147	0,148
9,5	0,396	0,303	0,550	0,163	0,167
9,75	0,406	0,362	0,564	0,172	0,178
10,0	0,417	0,515	0,577	0,181	0,189
10,5	0,438	0,583	0,601	0,204	0,216
11,0	0,459	0,624	0,624	0,235	0,250
11,5	0,479	0,654	0,645	0,283	0,298
11,75	0,489	0,669	0,655	0,357	0,339
12,0	0,500	0,682	0,664	0,663	0,500
12,5	0,521	0,706	0,683	0,735	0,702
13,0	0,542	0,727	0,701	0,772	0,751
13,5	0,563	0,748	0,719	0,799	0,785
14,0	0,583	0,767	0,736	0,820	0,811
16,0	0,667	0,830	0,800	0,880	0,886
20,0	0,833	0,926	0,906	0,952	0,957
24,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Heure	t/6	P_t/P_6
0	0.	0
0,60	0,10	0,04
1,20	0,20	0,10
1,50	0,25	0,14
1,80	0,30	0,19
2,10	0,35	0,31
2,28	0,38	0,44
2,40	0,40	0,53
2,52	0,42	0,60
2,64	0,44	0,63
2,76	0,46	0,66
3,00	0,50	0,70
3,30	0,55	0,75
3,60	0,60	0,79
3,90	0,65	0,83
4,20	0,70	0,86
4,50	0,75	0,89
4,80	0,80	0,91
5,40	0,90	0,96
6,00	1,0	1,00

Source :(U. S. Dept. Of Agriculture. Soil Conservation Service. 1973, 1986)

I.3.1.2. Fonction de transfert

La fonction de transfert va transformer le débit de pluie nette en débit à l'exutoire. Il s'agit là d'un opérateur conservatif (le volume de l'hydrogramme de pluie nette est le même que celui de l'hydrogramme à l'exutoire). Son seul but est de représenter les transformations de la forme de l'onde de débit lors de son passage à travers le bassin versant (amortissement, décalage temporel).

On parle parfois de modèle de ruissellement ou de modèle hydrologique. Il est préférable de réserver ces mots à l'ensemble fonction de production + fonction de transfert. Voir par exemple Réservoir linéaire, Hydrogramme unitaire, Isochrones (méthode des courbes).

La figure I-10 ci-dessous illustre la transformation de pluie brute en hydrogramme de crues.

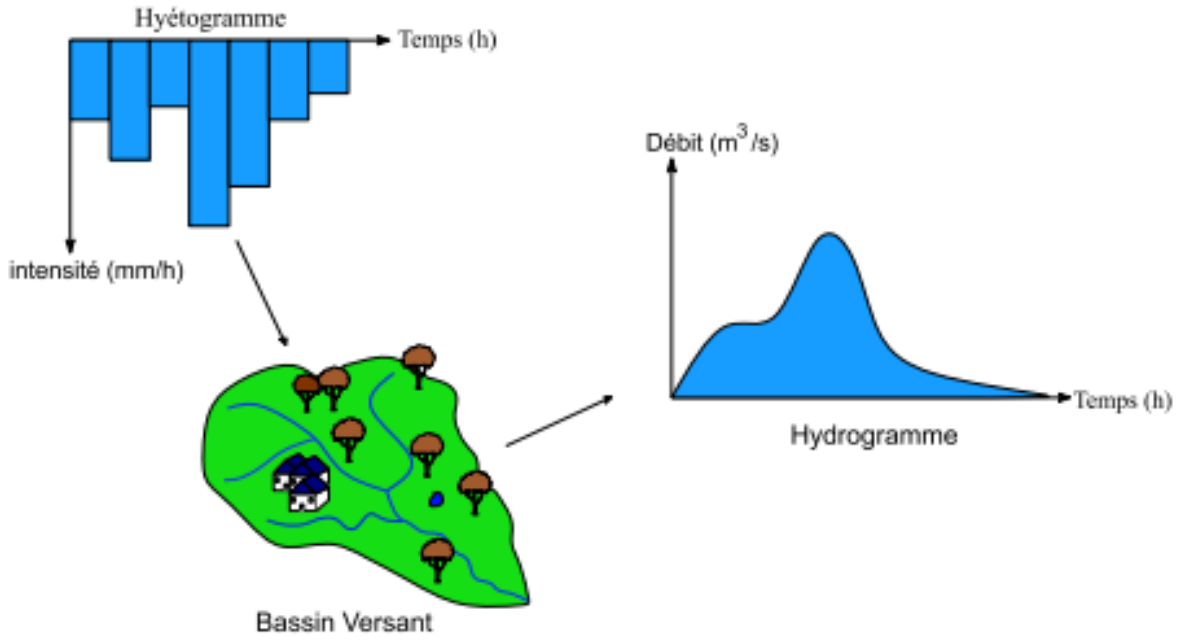


***Figure I-9**: Schéma illustratif de Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue*

❖ **Hydrogramme unitaire**

L'hydrogramme unitaire (HU) d'un bassin versant est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, d'une durée de référence (D), suffisamment longue pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin.

On observe ainsi des données intéressantes, qui renseignent sur la réponse hydrologique d'un bassin versant donné par rapport aux précipitations liquides, notamment sur :

- **Le temps de montée :** intervalle de temps correspondant à l'augmentation du débit du cours d'eau, lié à la courbe de crue ;

- **Le temps de réponse ou lag** : intervalle de temps entre le pic de pluie et le pic de crue ;

- **Le temps de concentration** : est le temps nécessaire à une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant atteigne l'exutoire, cela veut dire qu'à ce moment-là et si la pluie continue à tomber, tout le bassin participe à l'écoulement. Il dépend du chemin et de la vitesse d'écoulement, or la vitesse est fonction de la pente et le parcours dépend de la superficie du bassin ;

- **Le temps de base** : intervalle de temps regroupant la courbe de crue et la courbe de décrue.

La fig. II- 11 explique les caractéristiques ci-haut cité de l'hydrogramme unitaire.

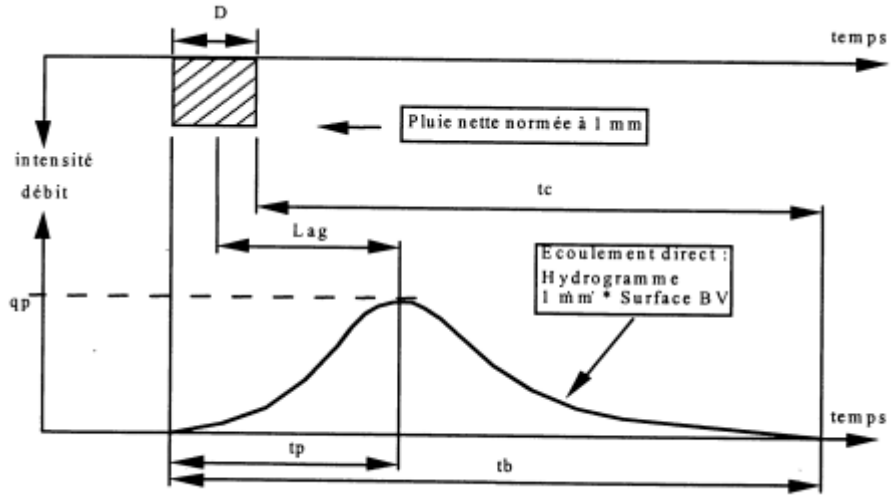


***Figure I-10**: Schéma illustratif de définitions des caractéristiques de l'hydrogramme unitaire*

Source : Hydrologie Appliqué. **(Musy, et al., 1998)**

- Les formules utilisées pour calculer les caractéristiques de l'hydrogramme unitaire sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Durée de référence D ou temps unitaire tu	Temps de montée tp	Débit de pointe q_p
Formules	$D = t_u = \frac{2}{15} t_C$	$t_p = \frac{2}{3} t_C$	$q_{p=(\frac{0.75}{360} * A)/t_c}$

- **Hydrogramme Unitaire synthétise**

Le Soil Conservation Service (SCS) a effectué la synthèse d'un grand nombre d'HU identifiés sur des bassins versants de tailles et de régions différentes des Etats-Unis **(Soil Conservation Service, 1975).**

Pour pouvoir comparer ces **HU**, il faut ramener les ordonnées et les abscisses à des grandeurs adimensionnelles, en divisant les débits par le débit de pointe **qp** et le temps par le temps de montée **tp**.

***Tableau I-9**: Coordonnées de l'hydrogramme unitaire synthétique du NRCS*

t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p
0,0	0,00	1,1	0,99	2,4	0,147
0,1	0,03	1,2	0,93	2,6	0,107
0,2	0,10	1,3	0,86	2,8	0,077
0,3	0,19	1,4	0,78	3,0	0,055

0,4	0,31	1,5	0,68	3,2	0,040
0,5	0,47	1,6	0,56	3,4	0,029
0,6	0,66	1,7	0,46	3,6	0,021
0,7	0,82	1,8	0,39	3,8	0,015
0,8	0,93	1,9	0,33	4,0	0,011
0,9	0,99	2,0	0,28	4,5	0,005
1,0	1,00	2,2	0,207	5,0	0,000

Source :(**U. S. Dept. Of Agriculture. Soil Conservation Service. 1973, 1986**)

I.4.2. Modélisation hydraulique

La fonction d'acheminement, également connue sous le nom de fonction de transfert déjà décrite en I.2.1.2., est un élément clé de la modélisation hydraulique des cours d'eau. Cette fonction décrit la relation entre la pluie qui participe au ruissellement à partir d'une pluie totale et l'hydrogramme de ruissellement à l'entrée d'un point considéré.

Elle est liée aussi au débit de crue car elle permet de calculer l'hydrogramme de crue à partir de l'hydrogramme de ruissellement. Cette dernière constitue l'entrée du système et l'hydrogramme achemine sa sortie.

Pour le présent travail, l'effet de laminage par une retenue a été étudié.

I.4.2.1. Laminage des crues

I.4.2.1. 1.Géneralités

Le laminage des crues est une technique de gestion des crues qui consiste à réduire l'écoulement de l'eau en amont des zones à risque. Cette technique permet de réduire les effets néfastes des crues en réduisant les pics de crue, ce qui permet de réduire la vitesse de l'eau et de limiter les dommages causés par les inondations.

- **Quelques techniques les plus utilisées pour le laminage des crues dans le milieu rural sont** :
  - **Les bassins de retenue**
  - **Les digues**
  - **Les barrages**
  - **Les retenues collinaires**
  - **Les haies**
  - **Les fosses antiérosives**

Il existe aussi d'autres méthodes comme paillage, création des zones humides, plantation d'arbres, banquettes, changements d'occupation du sol, l'aménagement des fosses d'infiltration avec des diguettes de contour en aval, l'aménagement des bandes de contour circulaire, etc.

Parmi les différentes techniques d'aménagement en versant et en lit de rivière ci-haut cité, on va se servir de la méthode des barrages **(laminage des crues par retenue**) et **la méthode fosses antiérosives.**

I.4.2.1. 1.Laminage des crues par retenu

Le laminage par retenue est une méthode de lutte contre les crues qui consiste à construire une retenue pour stocker l'eau de la crue et la libérer progressivement dans le cours d'eau en aval.
Un barrage crée un laminage positif sur les crues : la pointe de crue en aval d'un barrage (en l'absence de manœuvre de ses organes hydrauliques) est toujours inférieure (au moins faiblement) à la pointe de crue en amont de sa retenue.
On a intérêt à évaluer l'effet de laminage du fait qu'il puisse réduire le risque d'inondation et garantir la sécurité des ouvrages pouvant être endommagé. Elle peut aussi diminuer le risque d'inondation.

L'effet de laminage de crue dépend de la forme de l'hydrogramme de la crue entrant dans la retenue, de la capacité d'évacuation du déversoir de crue et de la forme de la partie supérieur de la retenue.
Le mécanisme de laminage peut être traduit par l'équation différentielle suivante :

$$\boldsymbol{Q_e(t)dt = Q_s(z)dt + A(z)dz}$$

Élément de Volume entrant — Élément de Volume sortant — Variation de volume dans la retenue

Où :

- t :temps ;
- Z :côte du plan d'eau (hauteur déversante) ;
- Q_e :débit de crue entrant dans la retenue ;
- Q_s : débit sortant dans la retenue par l'évacuateur de crue ;
- A(z) : aire du plan d'eau à la cote z.

Sous forme discrète (valeurs moyennes sur l'intervalle Δt)
On a:

$$\frac{Q_{e,i}+Q_{e,i+1}}{2} - \frac{Q_{s,i}+Q_{s,i+1}}{2} = \frac{S_{i+1}-S_i}{2} \qquad \text{(I-35)}$$

Avec S : stock
En regroupant les termes connus et inconnus

$$Q_{s,i} = 2\frac{S_{i+1}}{\Delta t} = Q_{e,i} + Q_{e,i+1} + \left[\frac{2S_{i+1}}{\Delta t} + Q_{s,i}\right] - 2Q_{s,i} \qquad \text{(I-36)}$$

I.4.2.1. 2. Dimensionnement des Fosses antiérosives

Il existe plusieurs approches pour le dimensionnement des fosses antiérosives. Les approches les plus courantes sont basées sur la formule de Saccardy et la formule de Ramser pour déterminer la dénivelée entre deux fosses antiérosives.

- **La formule de SACCARDY (Algérie) :**

$$H = \sqrt[3]{260P \pm 10} \quad \text{(I-37)}$$

Avec :

- H est la dénivelée entre deux fosses antiérosives consécutives
- P la pente du terrain.

- **Formule de RAMSER (USA) :**

$$H = 0.305(a + \frac{P}{b})$$

(I-38)

Avec :

- H : dénivelée entre deux fosses antiérosives consécutives en m ;
- a et b : constantes régionales ;
- P : pente du terrain en pourcentage.

Bernard Leblond et Laurent Guerin, dans leur ouvrage intitulé : « Travaux de conservations des sols : L'étude des projets et leur réalisation par des techniques à haute intensité de main d'œuvre », nous fournissent les valeurs des coefficients régionaux pouvant être utilisés.

Pour l'Afrique tropicale, a=2 et b=4.

- **La formule utilisée dans la région humide des USA est :**

$$\begin{cases} H = 7.5\,P + 0.6 & ssi\ P < 3\%; \\ H = 9P + 0.6 & ssi\ \ 3\% \leq P \leq 8\%\ ; \\ H = 10P + 0.6 & ssi\ P > 8\%. \end{cases} \quad \text{(I-39)}$$

Avec :

- H est la dénivelée entre deux fosses antiérosives consécutives ;
- P est la pente du terrain

- **Formule de BUGGEAT (Tunisie)**

$$H = 2.2 + P \quad \text{(I-40)}$$

Avec :

- H est la dénivelée entre deux fosses antiérosives consécutives ;
- P la pente du terrain

I.5.Conclusion du premier chapitre

Ce chapitre a eu comme objectif de fournir une synthèse des connaissances, des concepts, des théories et des techniques clés qui ont été développés dans le passé sur la caractérisation du BV ; la complexité et la modélisation de l'érosion hydrique ainsi que les modèles hydrologiques et hydrauliques qui ont été utilisés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II : PRESENTATION ET CARACTERISATION ET DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Situation administrative de la zone d'étude

Le Bassin versant de la rivière Ruvyironza est partagé par trois provinces du Burundi à savoir Gitega situé au centre du pays, Mwaro situé au centre-ouest et Bururi au sud-ouest.

- Une partie de la province de Gitega a **58.15%** dans la superficie du bassin versant de la Ruvyironza, reparti sur quelques localités de neuf communes dont Bugendana, Buraza, Bukirasazi, Gitega, Giheta, Gishubi, Makebuko, Nyarusange et Ryansoro.
- La province de Mwaro quant à elle prend **23.98%** dans la superficie du bassin versant de la Ruvyironza, touchant certains endroits de six communes dont Bisoro Ndava, Nyabihanga, Gisozi, Kayokwe et Rusaka.

- La superficie restante du bassin versant de la rivière Ruvyironza est occupée par une partie de la province de Bururi et touche sur certaines localités de 4 communes dont Mugamba, Matana, Songa et Rutovu.

La situation administrative de la zone d'étude drainée par la rivière Ruvyironza est présentée sur la figure II-1 suivante :

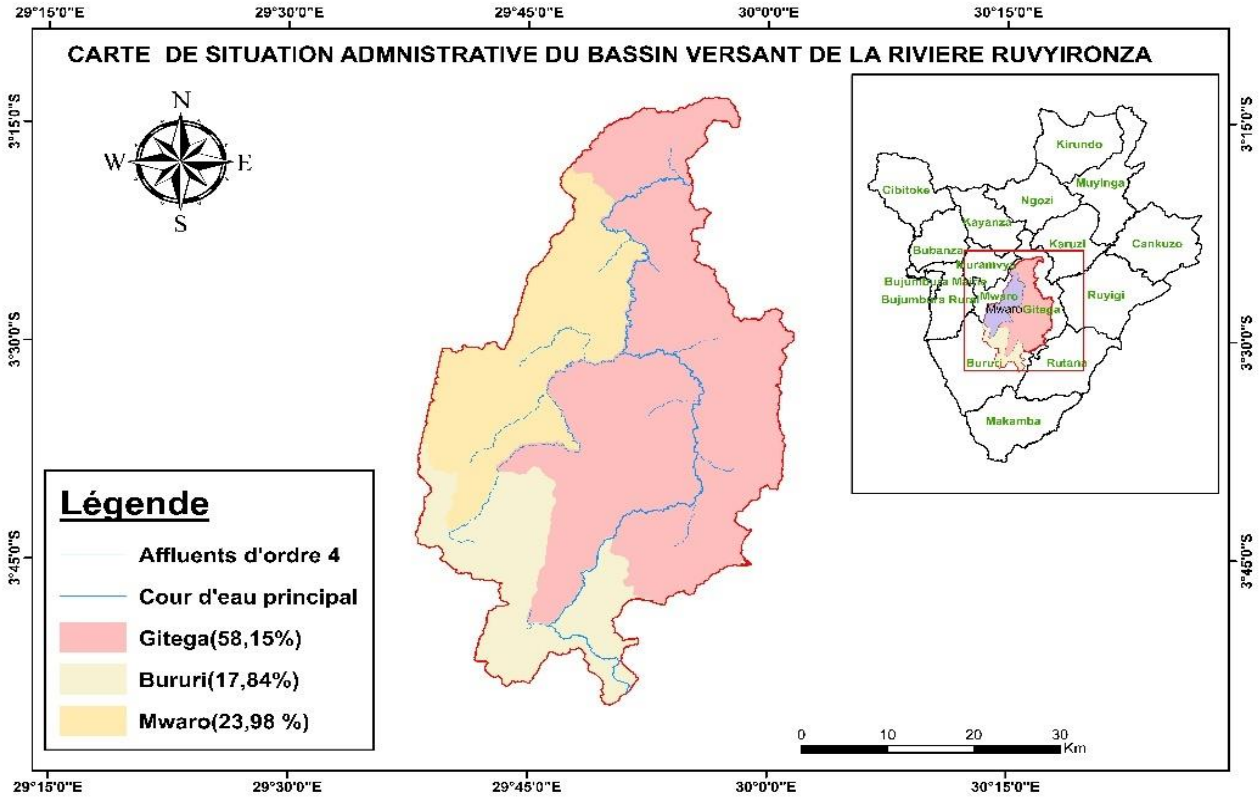


***Figure II-1** : Carte de situation administrative du bassin versant de la rivière Ruvyironza*

II.2. Situation géographique de la zone d'étude

Le bassin versant de la rivière Ruvyironza est aux coordonnées géographiques de référence latitude et longitude respectivement de -3,449531° et 29,910673° à Gitega ; -3,506665° et 29,719947° à Mwaro et de -3,87246 et 29,612935 à Bururi.

La Ruvyironza est une rivière du Burundi considérée par certains comme une des sources les plus éloignées du Nil. Elle prend sa source sur le mont Gikizi à Rutovu au Burundi, et est un

affluent de la rivière Ruvubu qui se jette ensuite dans la rivière Kagera en Tanzanie puis de là dans le lac Victoria.

II.2. 1.Le climat

Le bassin versant de la Ruvyironza couvre 2 régions éco climatiques à savoir le plateau central qui occupe 66.63 % de la superficie totale de la zone d'étude et la Crête Congo-Nil qui occupe33.37 %. Le climat est tropical humide influencé par l'altitude qui varie entre 1350 m et 2500 m. Il est caractérisé par une alternance de la saison pluvieuse qui s'étend généralement du mois d'octobre à mai et de la saison sèche qui va de juin à septembre.

La température moyenne annuelle de l'air diminue au fur et à mesure que l'altitude augmente, contrairement aux précipitations. La température moyenne annuelle est de 17.6°C pour le bassin versant de la Ruvyironza.

Les Précipitations moyennes annuelles enregistrées dans la zone d'étude pour les stations métrologiques de Mahwa et de Gitega sont respectivement de 1373,8 mm avec précipitation journalière max. de 90mm et 1136.5mm avec précipitation journalière max. de 97.7mm.

Les figures II-2 et II-3 montrent les variations des précipitations journalières max pour une période allant de 1992 à 2021.

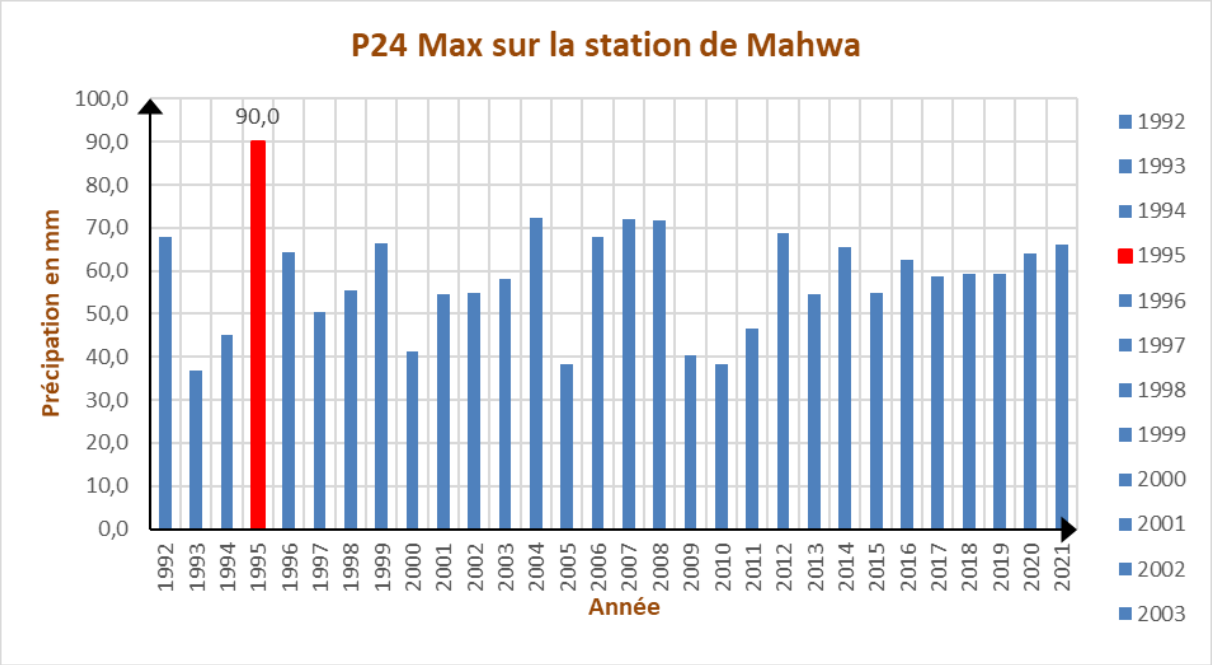


***Figure II-2**: P24 max sur la station de Mahwa*

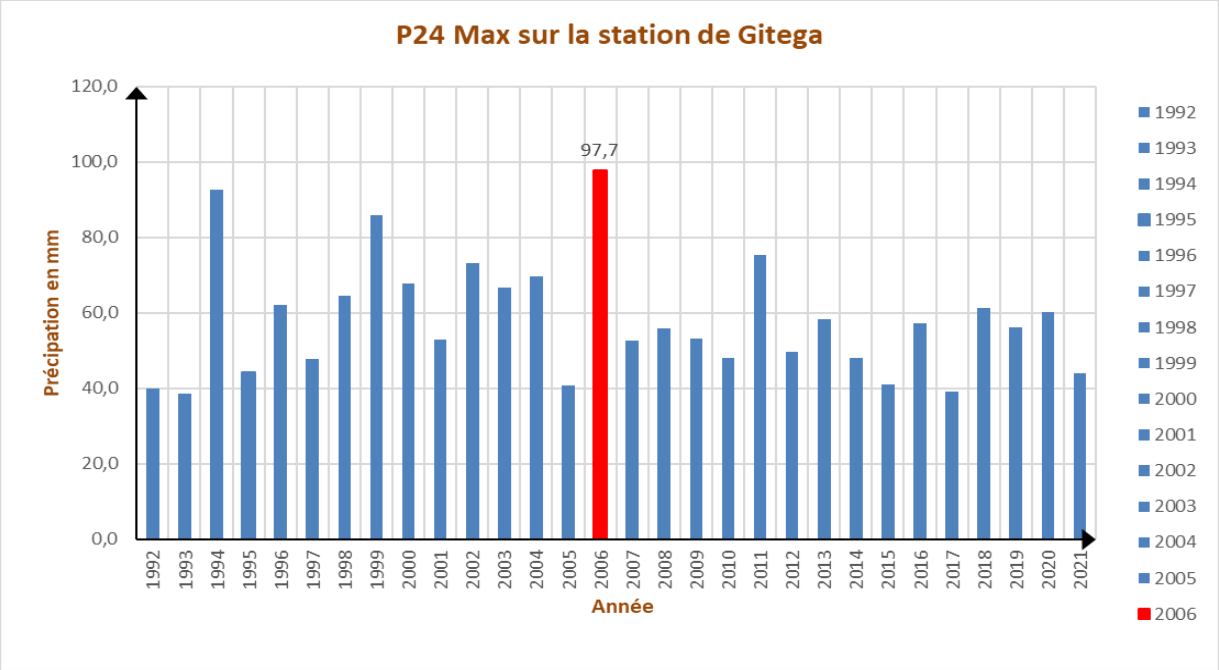


Figure II-3 *: P24 max sur la station de Gitega*

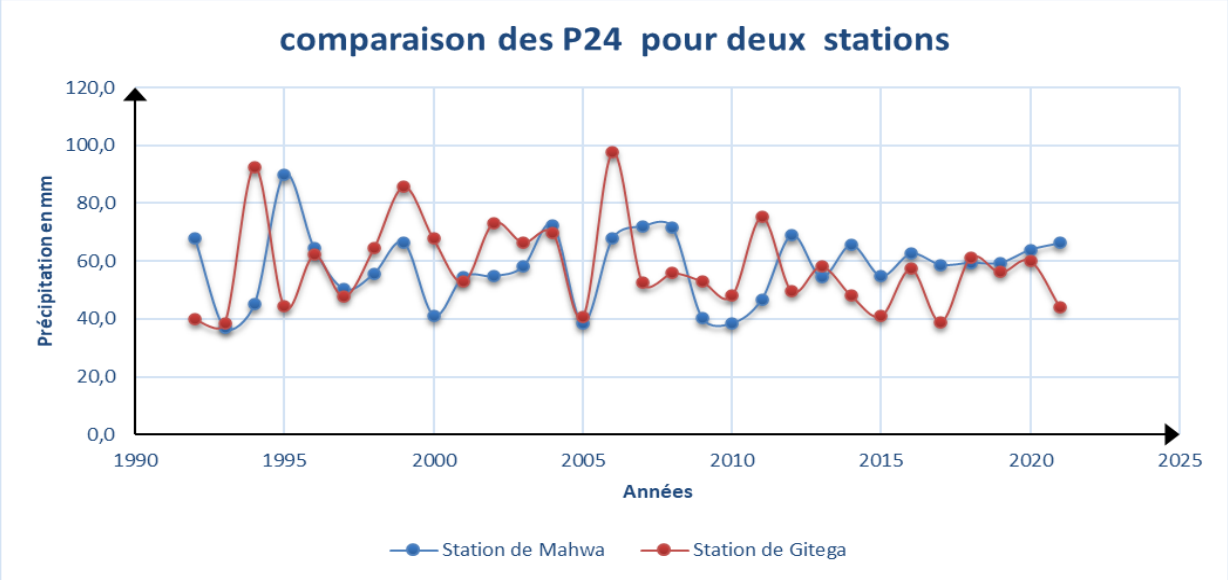


Figure II-4 *: Comparaison des P24 pour deux stations.*

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

Régions éco climatiques	**Altitude (en mètre)**	**Ttempérature moyenne annuelle (°C)**	**Pluie moyenne annuelle (en mm)**
Plateau central	1350 – 2000	17°C – 20°C	1200 – 1500
Crête Congo-Nil	1700 – 2500	14°C -15°C	1300 – 2000

Source : MINATTE, 2005

La figure II-5 ci-dessous représente la carte Eco climatique du bassin versant de la rivière Ruvyironza

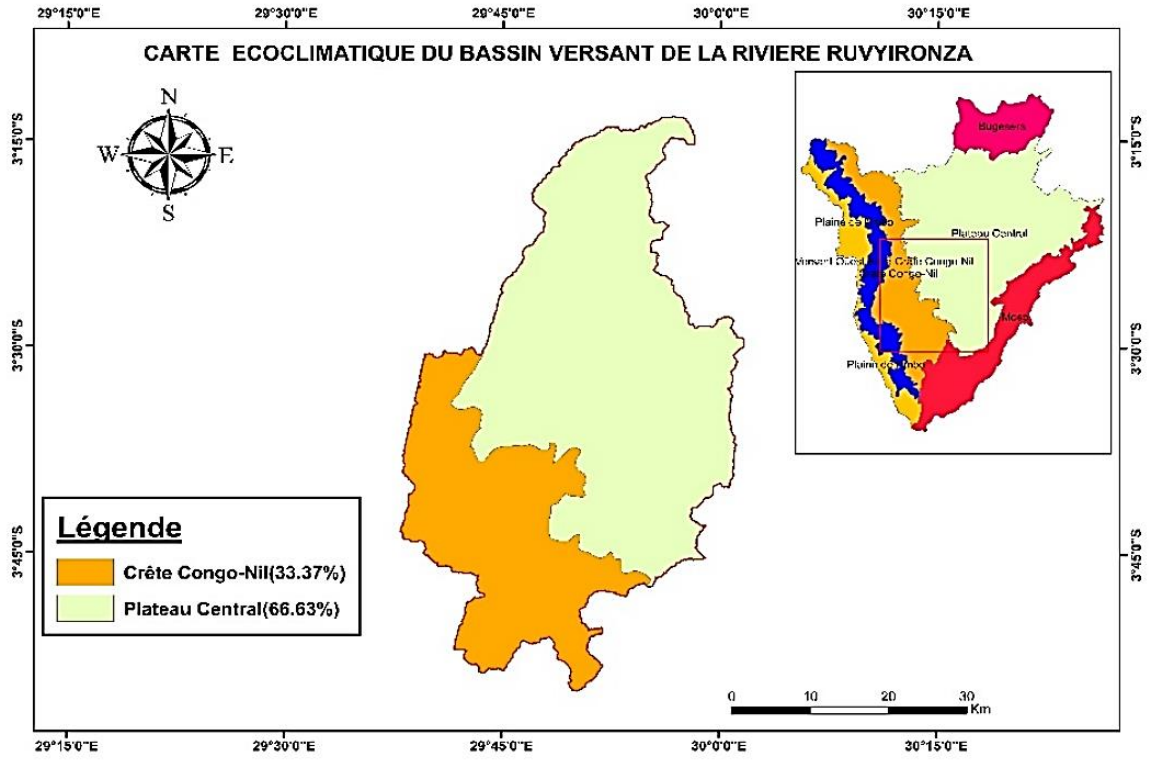


***Figure II-5** : Carte éco climatiques du bassin versant de la Ruvyironza*

II.2.2. Relief

L'ensemble de ce relief forme un complexe de 2 zones géomorphologiques assez diversifiées comprenant :

- Les hautes terres occidentales formant la crête Congo Nil et situées entre **1000** et plus de **2600 m** d'altitude qui couvrent plus de **30%** de la superficie du bassin ;
- Le plateau central couvrant la plus grande partie du bassin est situé entre **1470** et **2000 m** d'altitude.

L'étude d'ensemble de la morphologie du BV a été générée sous ArcGIS 10.3 sur base du modèle numérique de terrain (MNT) de résolution de 10m fourni par le Bureau de Centralisation Géomatique (BCG) du Burundi.

L'étude hypsométrique du bassin montre la dominance de la classe d'altitude 1800m à 2000m avec **49 %** (**933,7km²**) de la superficie totale et une classe mineure entre **2100** et **2250** m avec **1 %** (**14.21km²**) de la superficie totale.

Le tableau II-2 et les figures II-6, II-7, II-8 et II-9 montrent respectivement la répartition des surfaces du bassin versant en fonction des classes des altitudes, la courbe hypsométrique, la carte hypsométrique, la carte du relief, la carte topographique et la carte des pentes du Bassin versant de la Rivière Ruvyironza.

***Tableau II-2**: répartition des surfaces du bassin versant en fonction des classes des altitudes.*

	Classes des altitudes(m)	Surface élémentaire (Km^2)	Fraction de surface (%)	Surface Cumulée (Km^2)	Surface cumulée (%)
B.V Ruvyironza	1470-1600	188,33	10	188,33	10
	1600-1800	933,7	49	1122,03	59
	1800-2000	673,69	35	1795,72	94
	2000-2100	88,8	5	1884,52	99
	2100-2250	14,21	1	1898,73	100

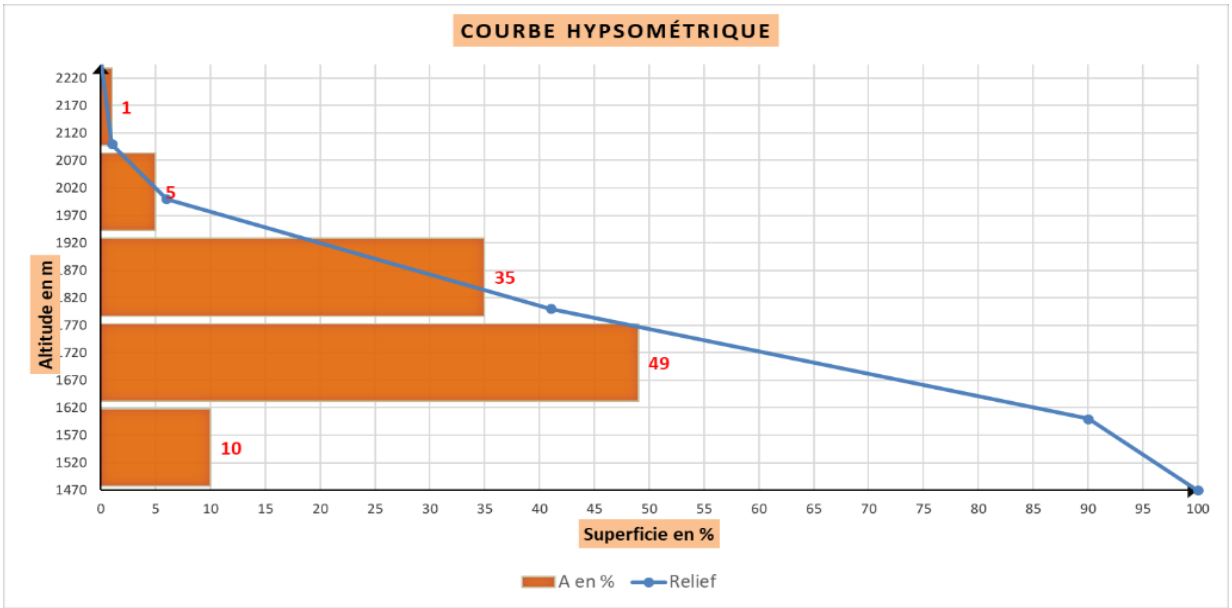


***Figure II-6** : Courbe hypsométrique*

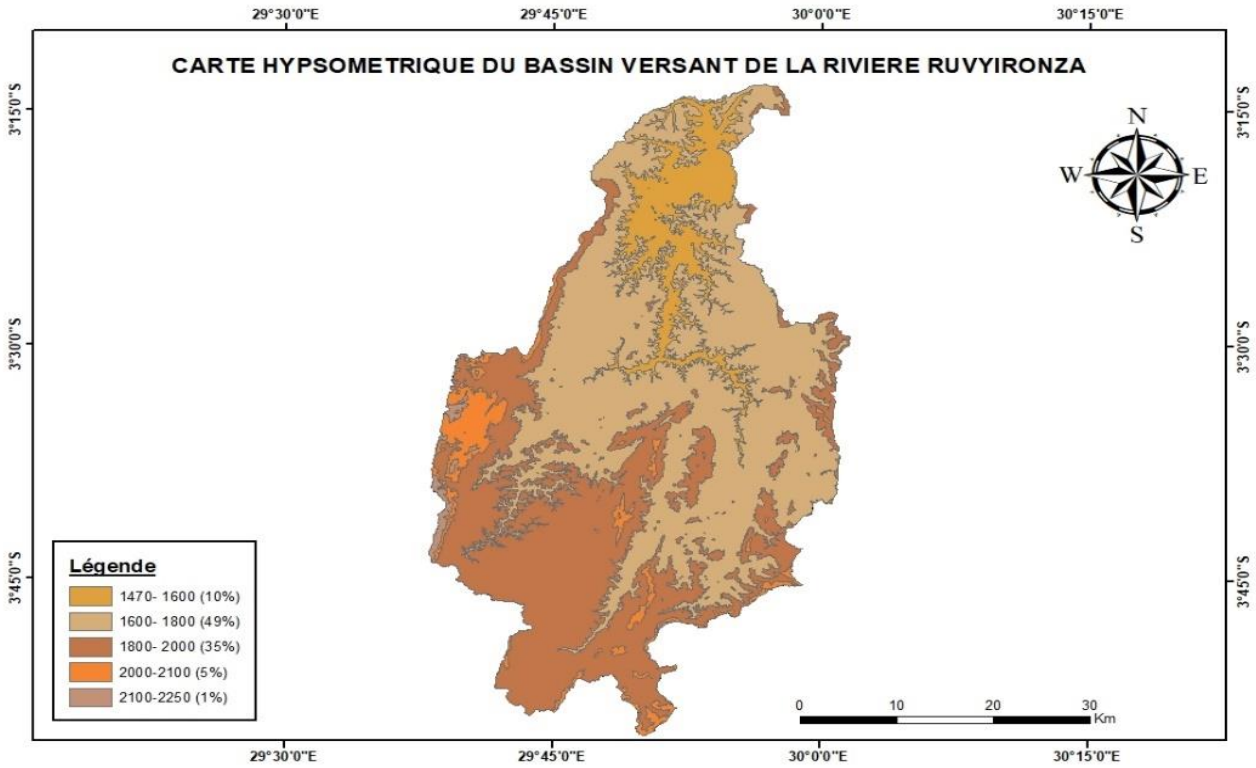


***Figure II-7**: Carte hypsométrique*

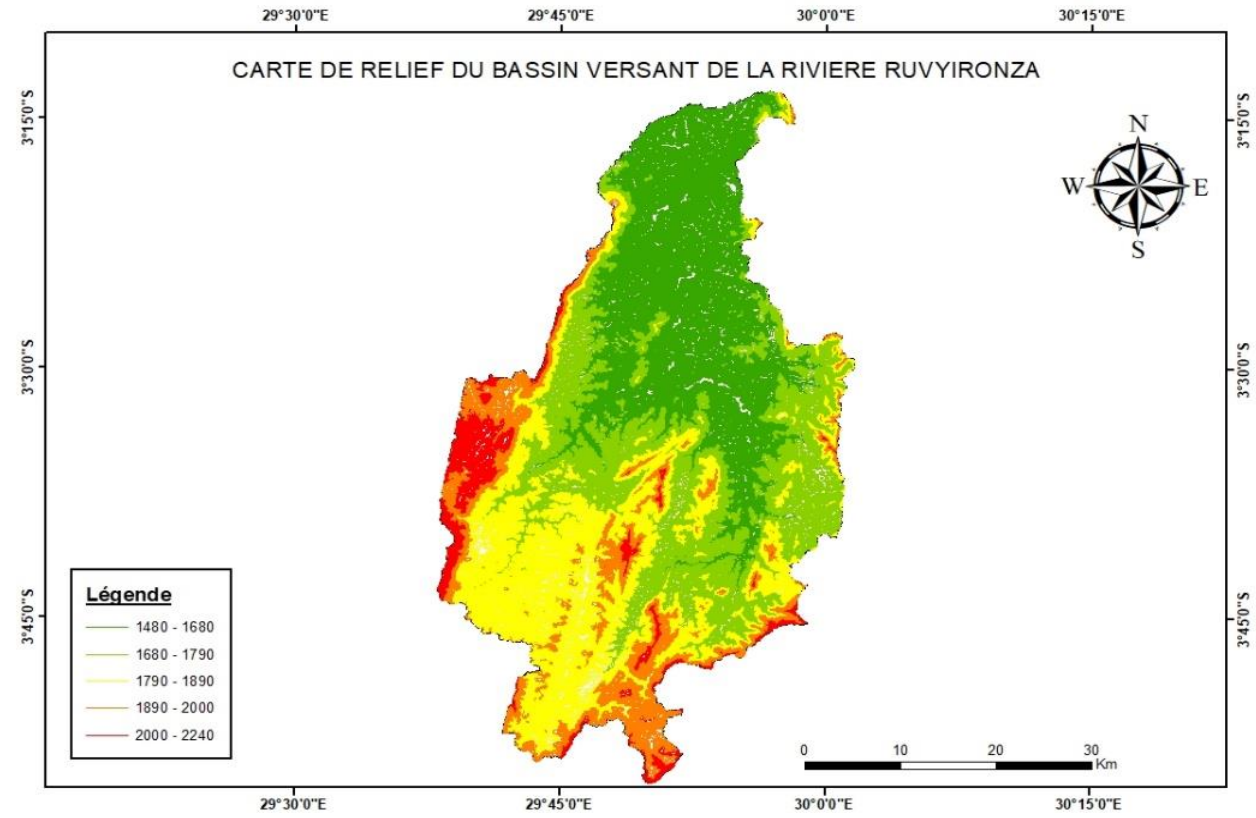


***Figure II-8 :** Carte de relief*

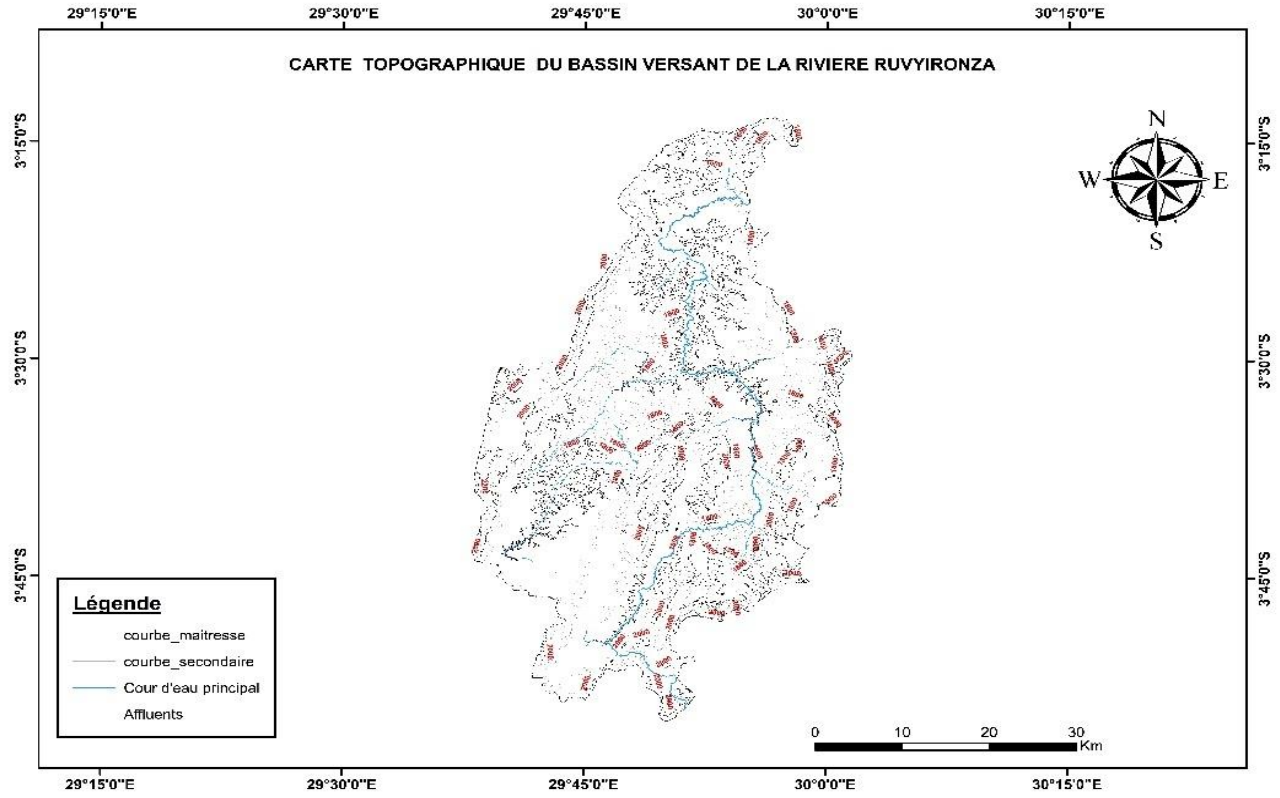


Figure II-9: Carte topographique

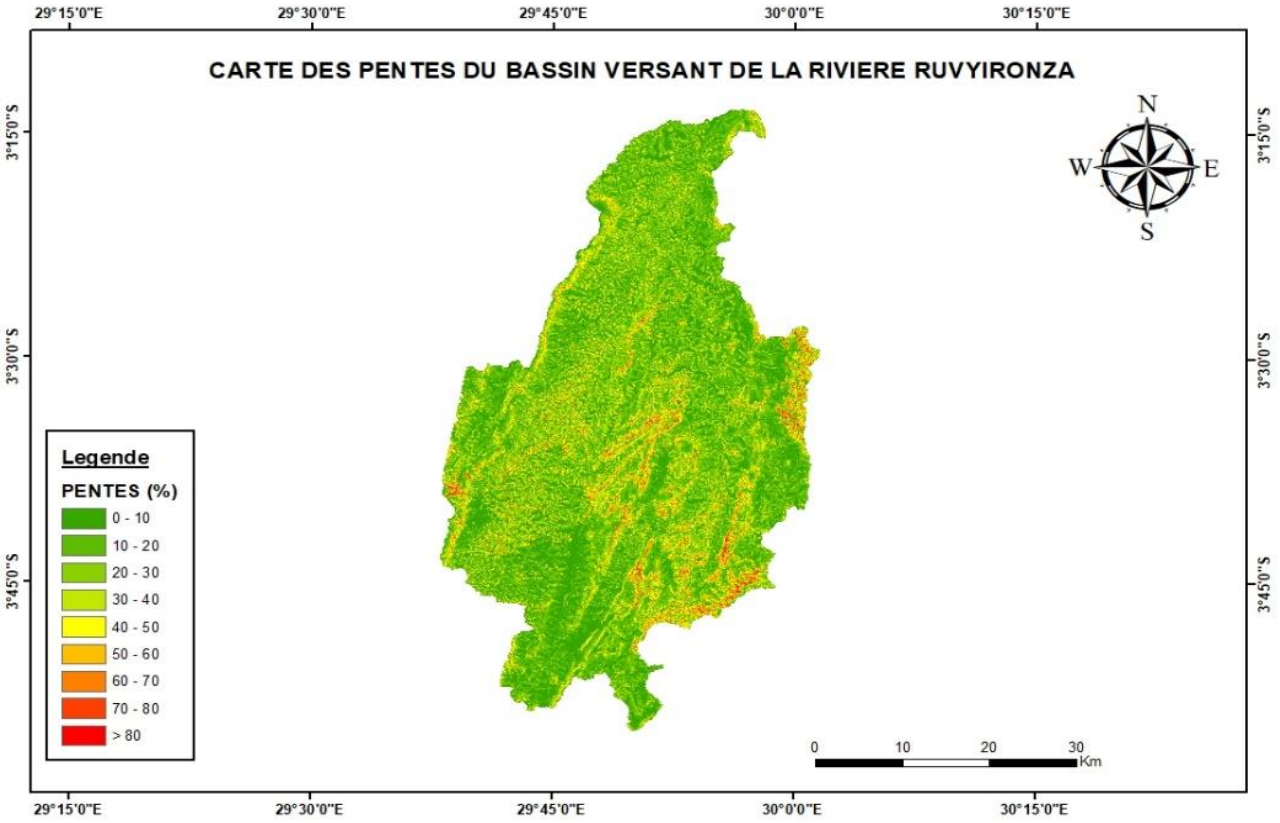


Figure II-10*: Carte des pentes*

II.2.3. Réseaux hydrographiques

Le pays en général est réparti en deux grands bassins hydrographiques :

Le bassin du Nil qui comprend d'une part, la Ruvubu et ses affluents et d'autre part Kanyaru, affluents de la Kagera. L**e bassin du Congo** est constitué de deux sous-bassins : le sous- bassin situé à l'Ouest de la crête Congo Nil formé par la Rusizi et ses affluents, et par le sous-bassin du Kumoso situé à l'Est du pays où coulent la Malagarazi et ses affluents.

La rivière de Ruvyironza drainant le bassin versant faisant objet de l'étude est un affluent principal de la rivière Ruvubu. Les uns des affluents de la rivière Ruvyironza sont entre autres **Mucunda, Mushwabura, Mabonwe, Ndeberi et Waga** qui est considérée comme le principal.

Le bassin versant est sillonné par un réseau très dense de rivières et de cours d'eau qui découpent sa surface en une multitude de collines de tailles variées qui sont souvent séparées par des vallées larges à fond plat. La figure II-11 montre le réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Ruvyironza.

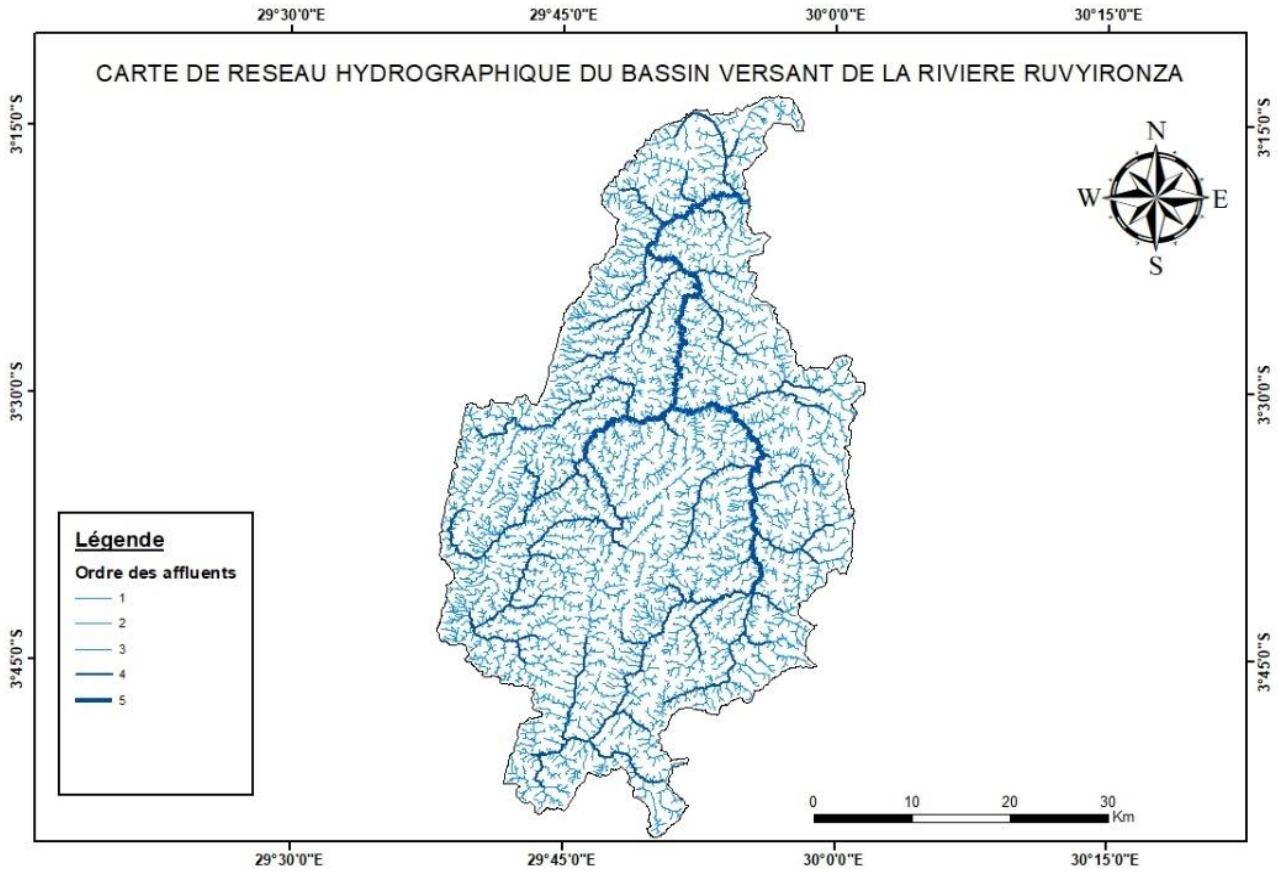


***Figure II-11**: Carte de réseau hydrographique*

II.3. Collecte et traitement des données du sol

Les principales données du sol utilisées dans la présente étude sont :

- **Les données d'occupation du sol** :

Elles ont une influence considérable sur l'érosion et l'écoulement de surface

- **Les données des groupes hydrologiques** :

Elles ont un rôle de permettre une caractérisation générale de la susceptibilité des sols au ruissellement à partir de leurs propriétés naturelles.

Donc avec les données de couverture végétale et des groupes hydrologiques on en déduit le paramètre ‘‘curver Numbers’’ CNII.

❖ **Les données d'occupation du sol**

Les données utilisées dans cette étude ont été établies à base des données téléchargées gratuitement sur **sentinel2-land use cover/land cover** (résolution de **10m**) avec le lien : https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/.

La fig. II-12 montre la carte d'occupation du sol qui a été produite à base des données téléchargées sur le lien ci-haut cité et traité avec le logiciel ArcGIS 10.3 et le tableau II-1 montre respectivement la carte d'occupation du sol du bassin versant de la Ruvyironza et la superficie occupée par chaque activité.

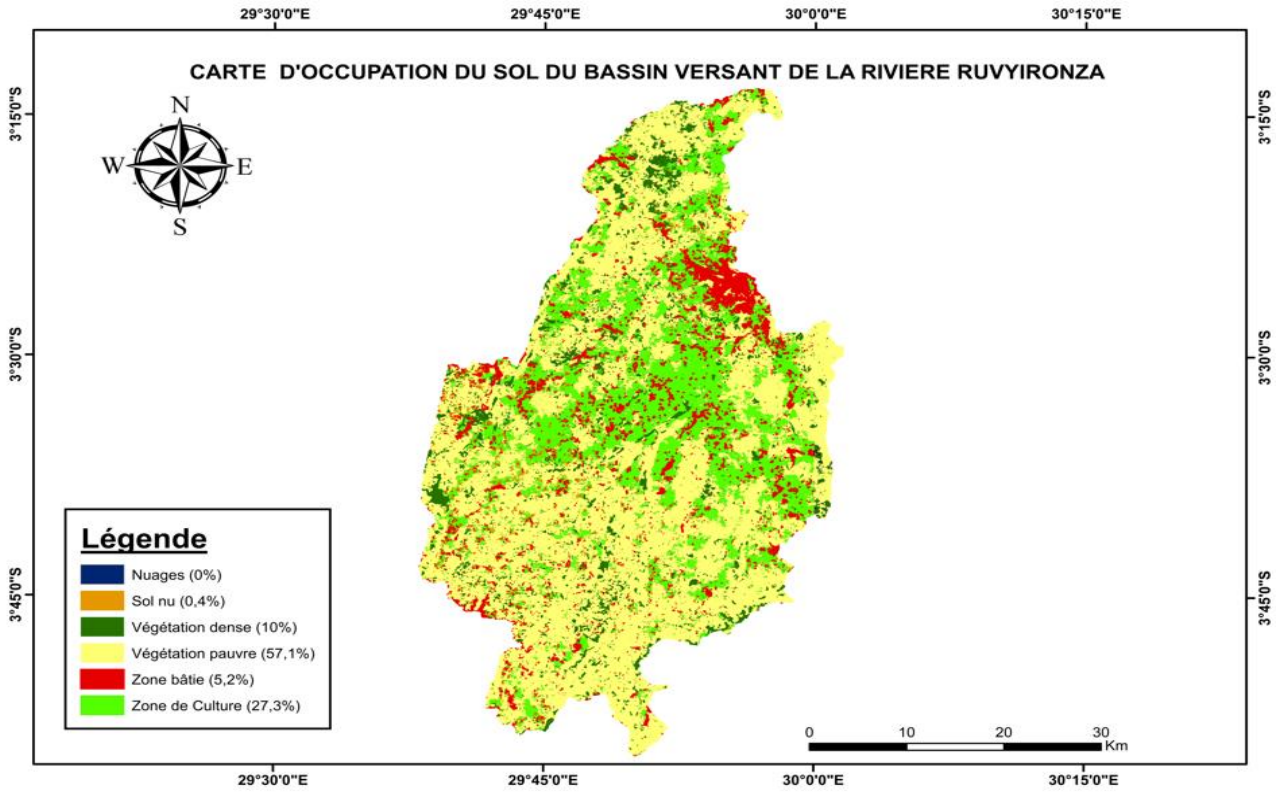


Figure II-12*: Carte d'occupation du sol*

Tableau II-3: Occupation du sol

Occupation du sol	% de superficie
Végétation dense	10,00%
Végétation pauvre	57,10%
Zone de culture	27,30%
Zone bâtie	5,20%
Terrain nu	0,40%
Total	**100%**

- **Les données des groupes hydrologiques de sol**

Le traitement et la production des cartes des groupes hydrologiques du sol de la zone d'étude indiqués sur les figures ci-dessous ont été produits avec le logiciel ArcGis 10.3 à base des données téléchargées gratuitement sur le lien https://livingatlas.arcgis.com/landcover/ .

Ces données sont de type raster avec des paquets de six intervalles de profondeurs dont :(0-5cm), (5-15cm), (15-30cm), (30-60cm), (60-100cm), (100-200cm). Elles se trouvent dans base des données Africa Soil Profiles établies par le projet de cartographie des propriétés des sols de l'Afrique.

Six types des sols (argile, argile sableuse, limon argileux, limon argilo-sableux, terreau, limon sableux) réparties en quatre groupes pédologiques de sol (HSG), à savoir A, B, C et D.

Dans la zone d'étude quatre types des sols répartis dans deux grands groupes ont été identifiés à savoir D et C. Le tableau II-4 montre la répartition des différents types du sol dans le BV Ruvyironza sur les six intervalles des profondeurs.

Tableau II-4: Répartition de différents types du sol

	Groupes hydrologiques des sols				
	Groupe D			**Groupe C**	
Profondeur (cm)	**Types de sol**			**Types de sol**	
	Argile (%)	**Argile sableuse (%)**	**Limon argileux (%)**	**Limon argileux sableux (%)**	**Total (%)**
0-5	4,43	22,91	13,09	59,57	100
5-15	10,98	24,35	14,37	50,39	100
15-30	25,22	29,73	14,2	30,89	100
30-60	62,46	21,41	10,72	5,45	100
60-100	69,09	16,13	10,7	4,12	100
100-200	71,28	11,86	11,93	4,96	100

Les figures III-4, III-5,-III-6, III-7, III-8 et III-9 ci-dessous montrent successivement les différents types de sol dans le BV Ruvyironza pour les profondeurs de (0-5cm), (5-15cm), (15-30cm), (30-60cm), (60-100cm) et (100-200cm).

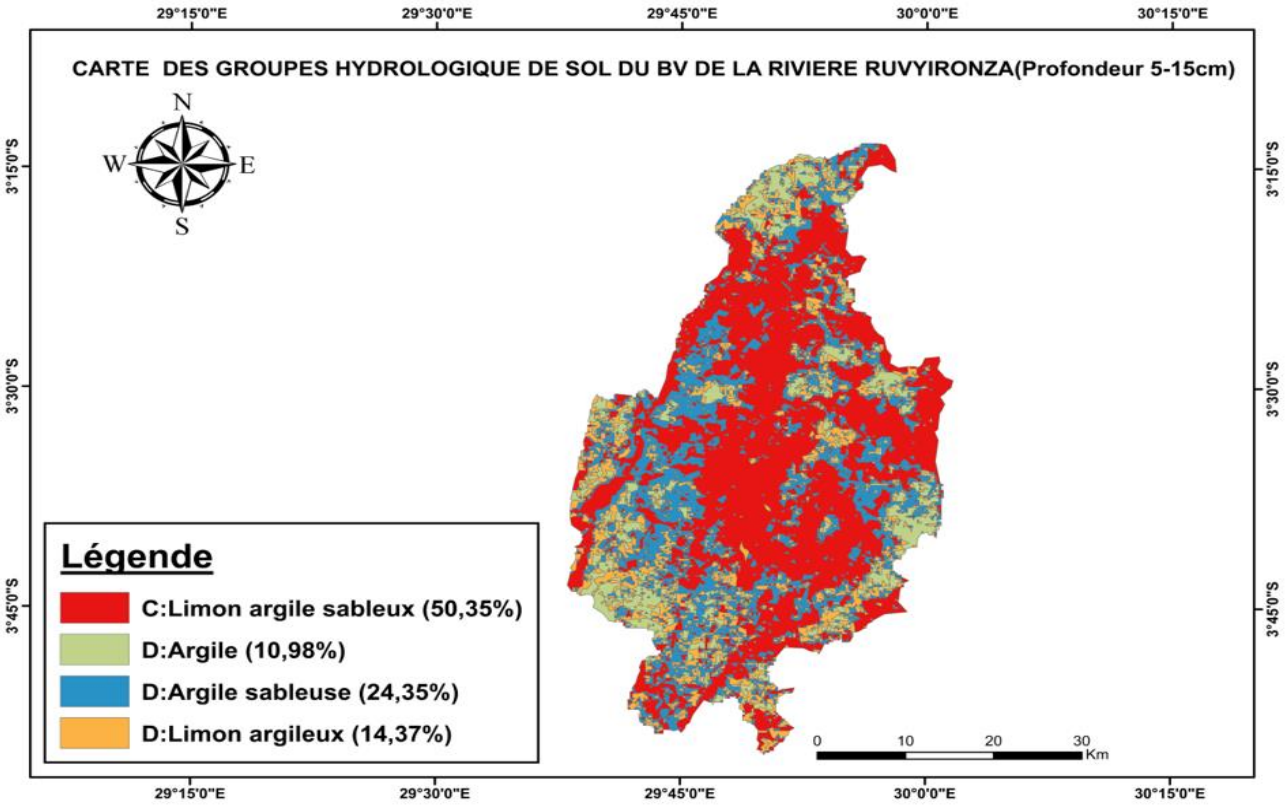


***Figure II-13**: Type de sol sur une profondeur (0-5cm) du BV de la Ruvyironza*

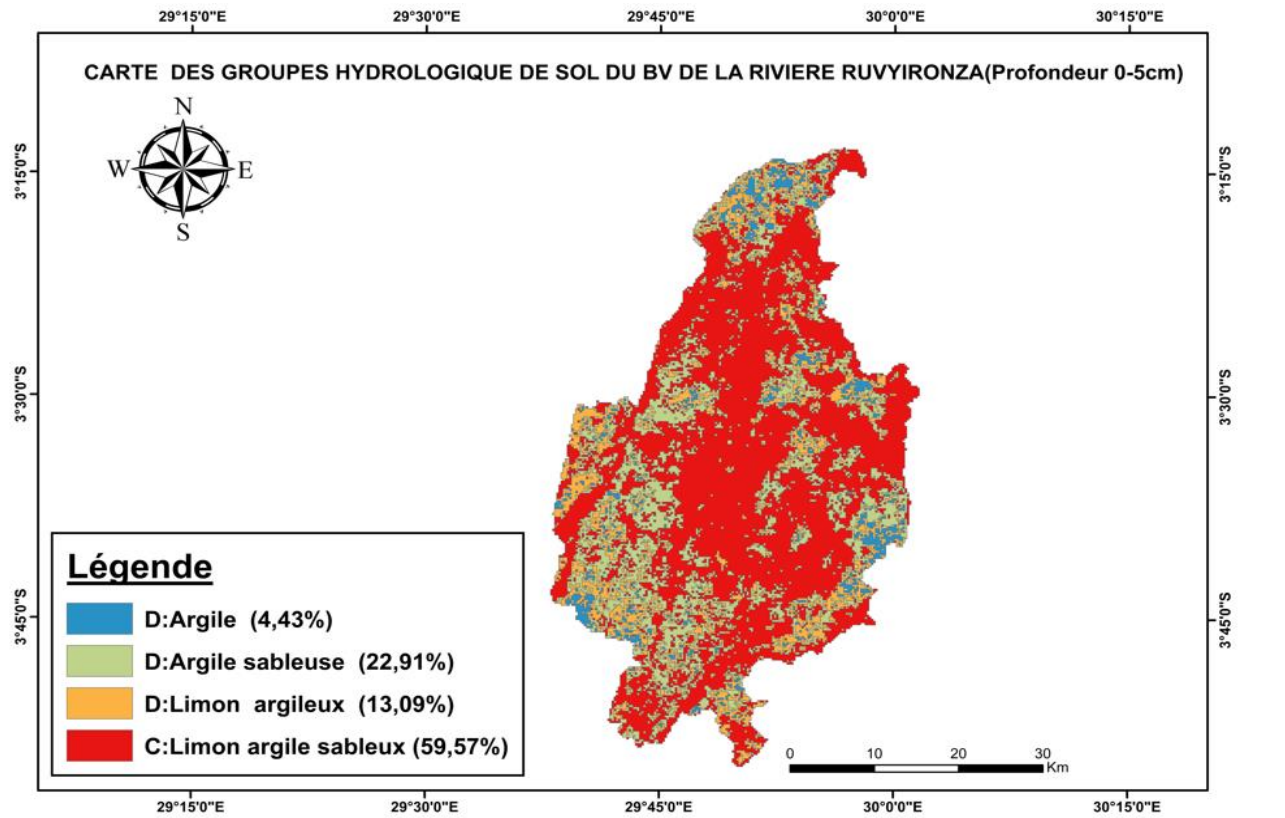


***Figure II-14**: Type de sol sur une profondeur ((5-15cm) du BV de la Ruvyironza*

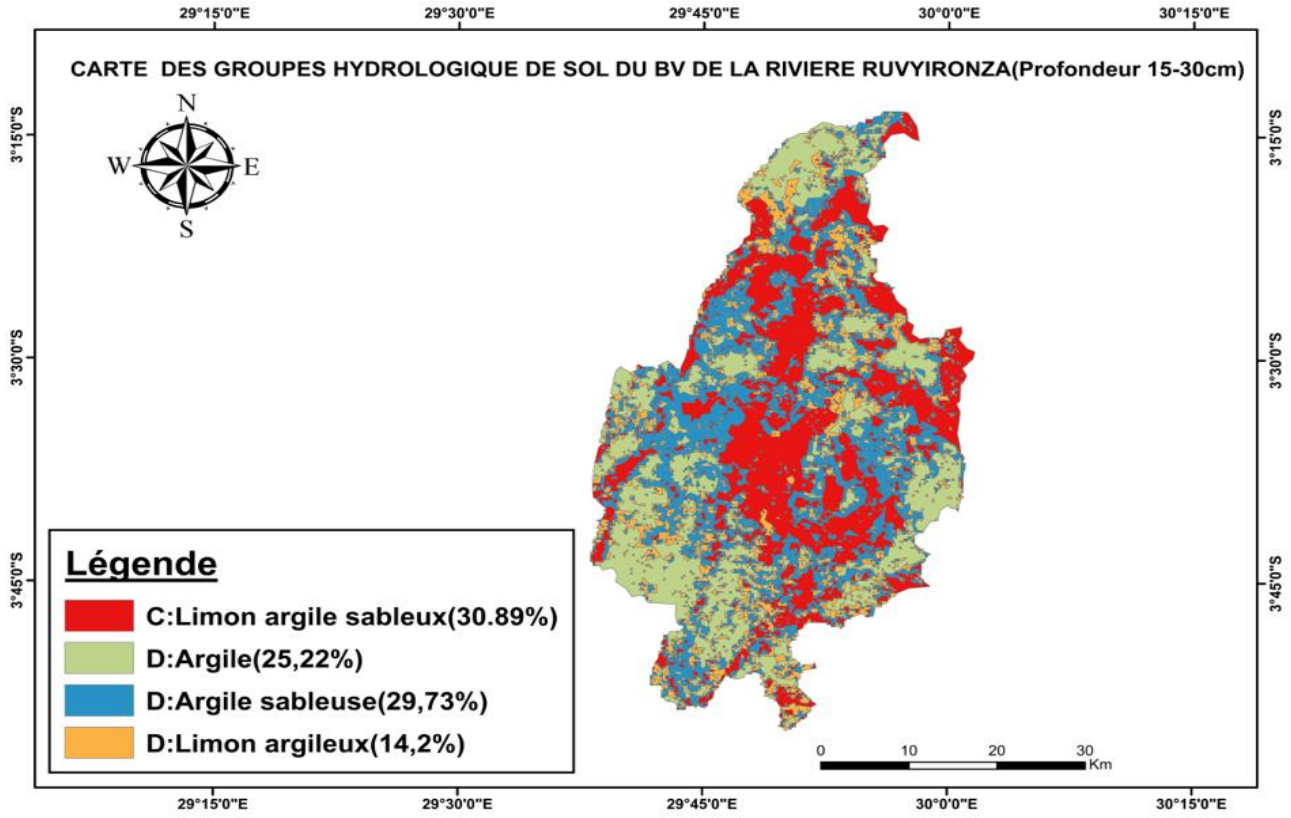


Figure II-15*: Type de sol sur une profondeur (15-30cm) du BV de la Ruvyironza*

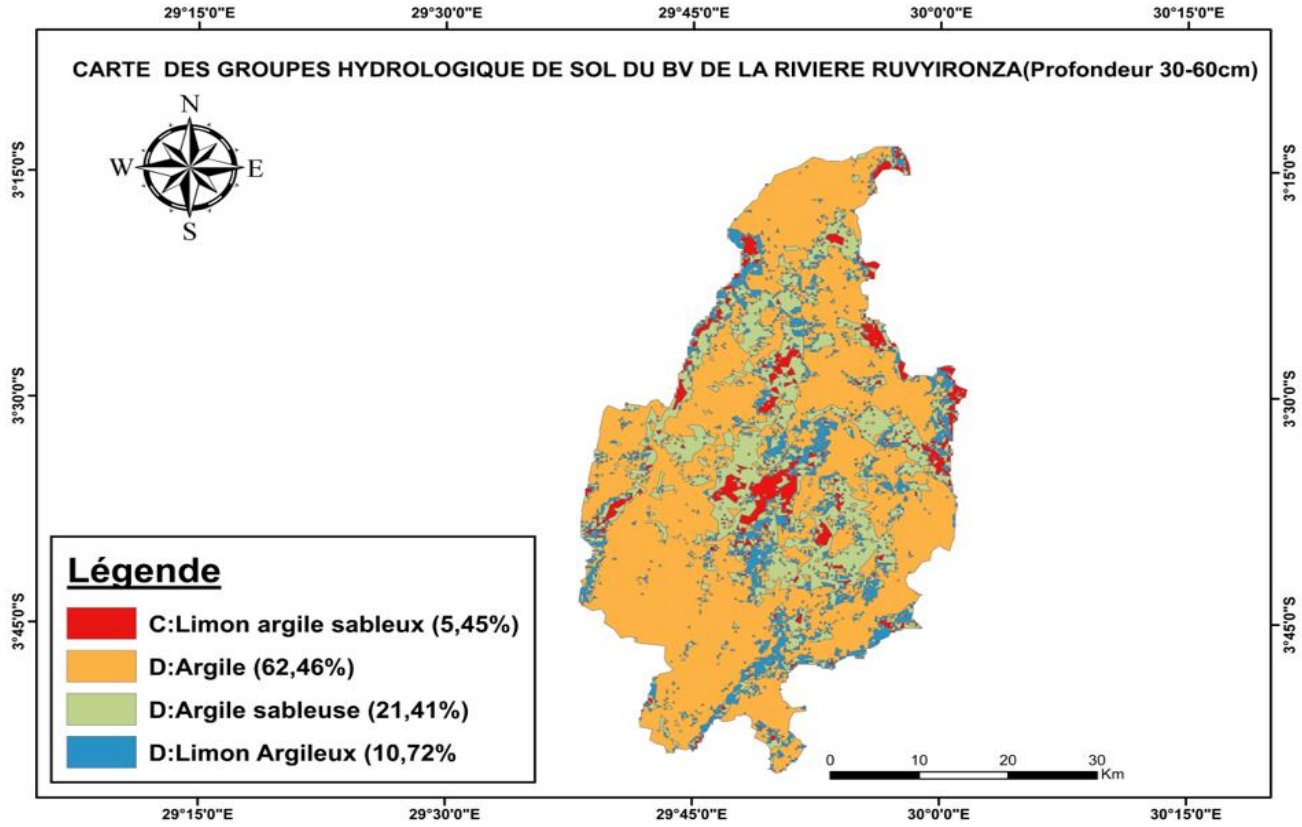


Figure II-16*: Type de sol sur une profondeur (30-60cm) du BV de la Ruvyironza*

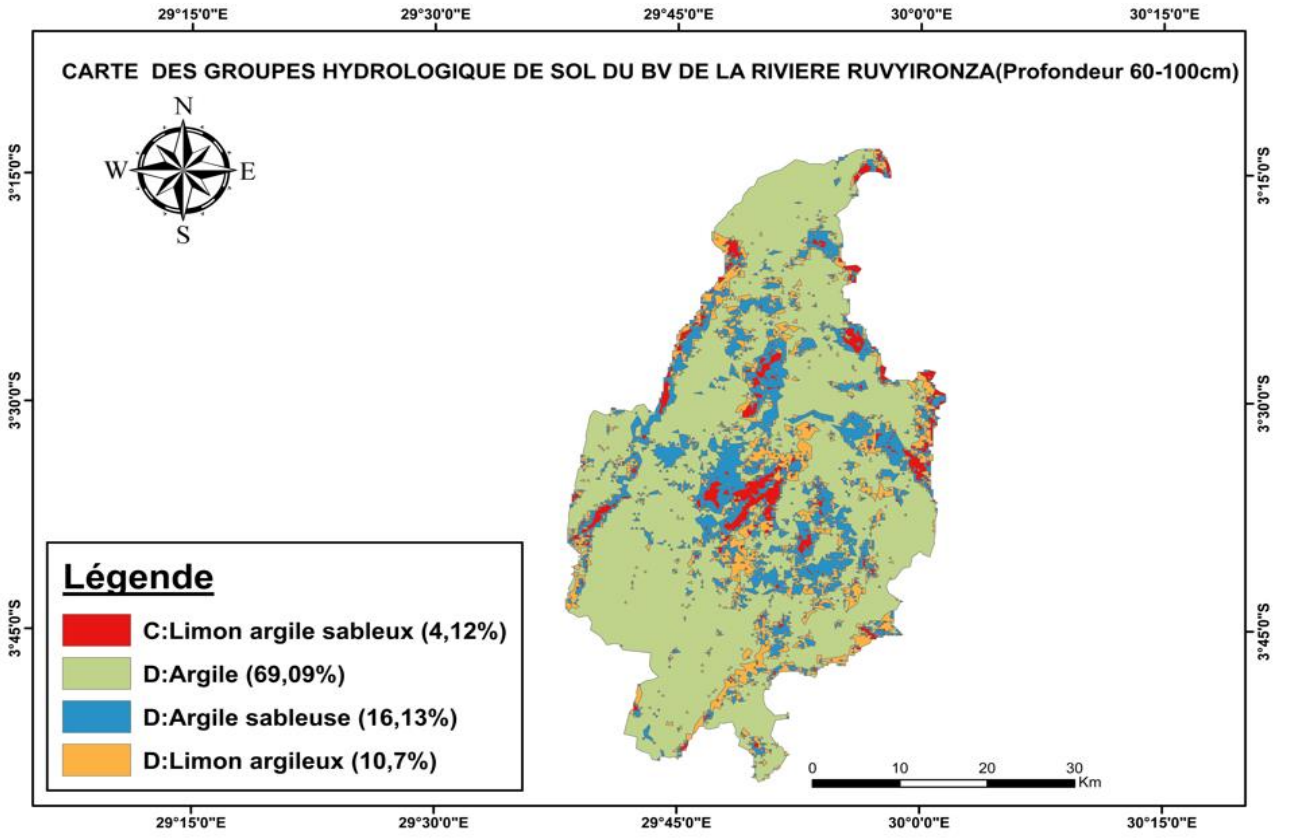


Figure II-17: Type de sol sur une profondeur (60-100cm) du BV de la Ruvyironza

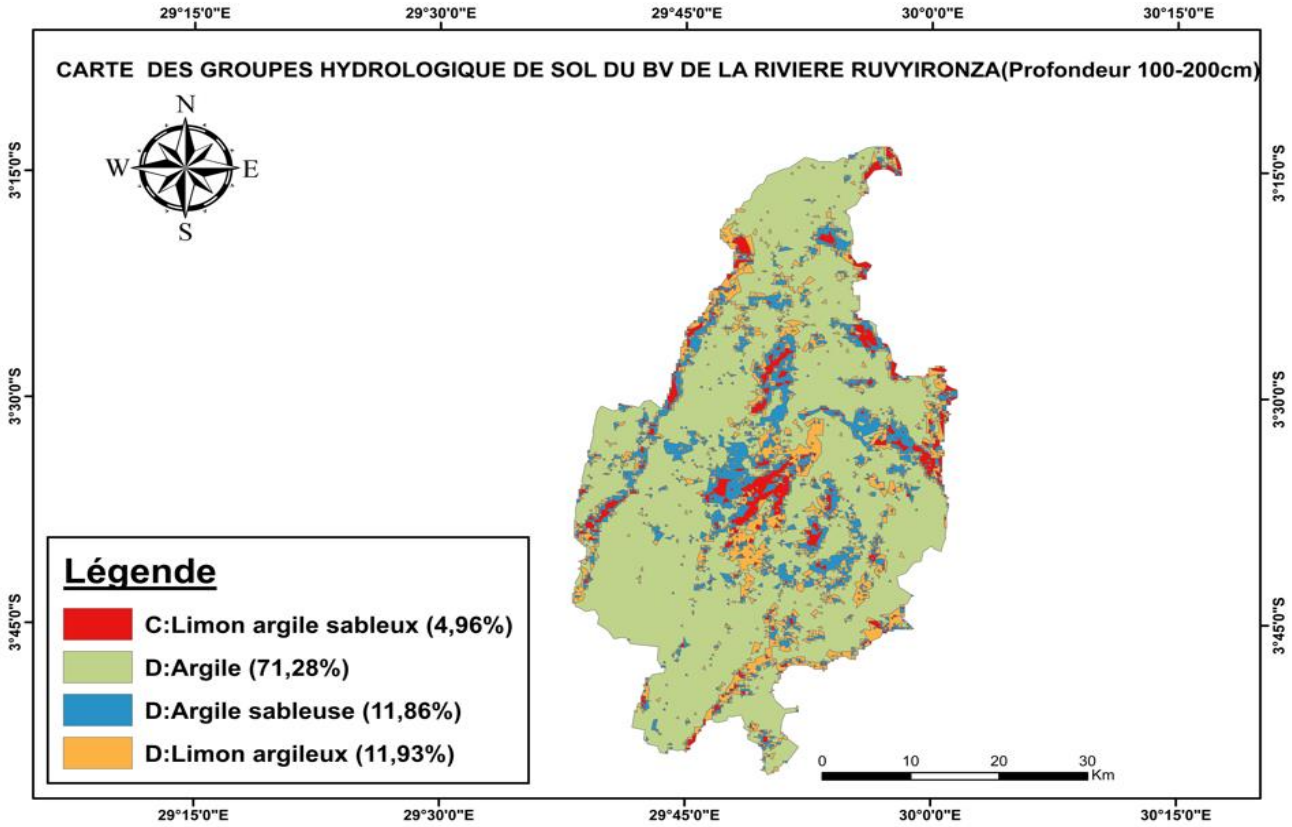


***Figure II-18*:** Type de sol sur une profondeur (100-200cm) du BV de la Ruvyironza

Avec la disponibilité des données des groupes hydrologiques de sol et de l'occupation du sol, on peut déterminer la curver number normal (CNII). Le tableau III-5 montre le calcul de CNII avec les données ci-haut présentées.

Tableau II-5: Curver number CNII

Superficie totale du bassin versant de la Ruvyironza		**1898,70 km²**				**C**	**D**
		% de superficie des groupes				59,57%	40,43%
		Superficie des groupes en km²				1131,06	767,64
Occupation du sol	**% de superficie**	CN (II) A	CN (II) B	CN (II) C	CN (II) D		
Végétation dense	10,00%	32	58	72	79	8 143,60	6 064,39
Végétation pauvre	57,10%	43	65	76	82	49 083,29	35 942,65
Zone de culture	27,30%	39	61	74	80	22 849,59	16 765,35
Zone bâtie	5,20%	59	74	82	86	4 822,82	3 432,91
Terrain nu	0,40%	77	86	91	94	411,70	288,63
Total	**100%**					85 311,00	62 493,93
				CN(II) par groupe		75,43	81,41
				CN (II) pondérée		**77,85**	

Le CN (II) pondérée du bassin versant est obtenue avec l'expression suivante :

$$CN(II) = \frac{\sum A_i \, CN\ II}{\sum A_i} \qquad \text{(II-1)}$$

Avec la CN II, on déduit la condition sèches et la condition humide :

- **Conditions sèches :**

$$\mathrm{CN(I)} = \frac{4.2\mathrm{CN(II)}}{10-0.058\mathrm{CN(II)}} = \mathbf{59,61}$$

- **Conditions humides :**

$$CN(II) = \frac{23CN(II)}{10+0.13CN(II)} = \mathbf{88.98}$$

II.4. Détermination du temps de concentration du Bassin versant de la Ruvyironza

Il existe de nombreuses formules empiriques pour calculer le temps de concentration d'un bassin. Le présent travail a abordé les formules tabulées dans le tableau II-6.

***Tableau II-6**: Temps de concentration*

Auteurs	**Turaza**	**Giandoti**	**Ventura**
Minutes	724,2	1766,7	1455,9

Le temps de concentration de **1300 min** utilisé dans la présente étude est la moyenne des résultats de ces trois formules ci-hauts cité.

Donc Tc=1300min soit 21.6 heures.

II.5. Synthèses de quelques caractéristiques du Bassin versant de la Ruvyironza

En résume les résultats des caractéristiques obtenus après les calculs sont tabulés dans le tableau II-7.

Tableau II-7: Caractéristiques du bassin versant de la rivière Ruvyironza

Caractériques	**Symboles**	**Valeur**	**Unité**
Surface	A	1898.70	km²
Périmètre	P	283.78	km
Compacité de Gravelius	Kc	1.82	sans
Longueur du rectangle équivalent	L	126.93	km
Largeur du rectangle équivalent	l	14.96	km
Altitude maximale	Altmax	2250.00	m
Altitude minimale	Altmin	1470.00	m
Altitude moyenne	Hmoy	1774.55	m
Altitude médiane	Altmed	1755.00	m
Pente moyenne du bassin versant	im	5.21	%
Pente moyenne du bassin versant	im	0.05	m/m
Altitude à 5 %	Z5%	2020.00	m
Altitude à 95 %	Z95%	1530.00	m

Pente Global	Ig	3.86	m/km
Indice de pente	ip	22.48	%
Altitude (cours d'eau principal)	-	2133.00	m
Altitude (exécutoire)kibaya	-	1483.00	m
Longueur du cours d'eau	L	151959.36	m
ΔHmax	km	650.00	m
Différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle de l'exécutoire	h	291.55	m
Pente moyenne d'un cours d'eau	Pmoy	4.28	m/km
Densité de drainage	Dd	1.91	Km/km²
Temps de concentration	Tc	1300.00	min
Curver number	CN		
Conditions normales	CNII		sans
Conditions sèches	CNI		sans
Conditions humides	CNIII		sans

II.6. Conclusion du deuxième chapitre

Le bassin versant de la zone est de l'ordre 3, il a une forme allongée, reflétant le temps de concentration plus long obtenu, un réseau hydrologique dense et une précipitation moyenne annuelle abondante de 1200 à 2000mm qui traduit la force érosive des précipitations sur le sol. Il convient de noter que la zone d'étude est caractérisée par un relief assez élevé et une végétation pauvre couvrant plus de la moitié de la superficie totale, ce qui a un impact important sur le risque d'accru d'érosion et des inondations.

CHAPITRE III : ETUDE DE L'EROSION HYDRIQUE

III.1. Introduction

La dégradation des sols se définit comme étant un processus qui réduit le potentiel de production des sols ou la qualité des ressources naturelles. L'érosion hydrique constitue le principal facteur de la dégradation de la ressource sol.

L'étude de l'érosion a pour but de classifier les risques d'érosion hydrique dans le Bassin versant.

Dans le présent travail la classification du risque d'érosion **de Houghton et Charman (1986) repris par ISSS (1996)** présente dans le tableau ci-dessous a été utilisée.

Tableau III-1: Classes du risque d'érosion pluviale d'après ISSS (1996)

Classe	**Perte en terre (t/ha/an)**	**Implications**
Très faible	0 - 5	Il n'y aura pas de dégâts d'érosion appréciables par rapport à l'utilisation actuelle des terres ; les mesures antiérosives les plus simples peuvent limiter les pertes en terre.
Faible	5-12	
Modéré	12 - 25	Les pertes en terre seront significatives pour réduire la productivité des terres mais des méthodes de lutte courantes peuvent les réduire à court et à long terme.
Élevé	25 - 60	L'érosion est significative, de simples mesures de conservation peuvent minimiser l'érosion à court terme mais des mesures intensives doivent être utilisées pour la réduire à long terme.
Très élevé	60 - 150	L'érosion sera significative même avec des mesures de lutte intensive ; il faudra donc trouver l'équilibre économique entre les dommages probables et le maintien des structures antiérosives.
Extrêmement élevé	Plus de 150	L'érosion sera si importante que l'utilisation économique des méthodes de lutte conventionnelle sera impraticable. Seules les méthodes faisant appel au génie civil et à la géotechnique pourront être possibles

III.2. Quantification des pertes en terre par l'érosion hydrique

La quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique a été réalisée avec l'Équation Universelle Révisée des Perte en Sol (RUSLE) : A = R. K. LS. C. P.

Avec :

- A : est le taux annuel de pertes en sol en t/ha/an,
- R : est le facteur de l'érosivité des pluies,

- K : est l'érodibilité des sols,
- LS : est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m),
- C : est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale,
- P : est aussi un facteur sans dimension qui tient compte des techniques culturales antiérosives telles que le labour en courbes de niveau.

Les résultats que nous présentés dans ce travail se rapportent aux observations et analyses de l'intégration de ces différents facteurs influençant le processus de l'érosion hydrique dans un système d'information géographique. Les différentes cartes thématiques permettront d'évaluer le taux d'érosion en appliquant la formule Universelle.

III.2.1. L'érosivité de la pluie (Facteur R)

A partir des données pluviométriques enregistrées au niveau de deux stations (Gitega et Ruvyironza) pendant la période de 29 ans (1992-2021), on a déterminé les valeurs du facteur R à l'aide des formules de Renard et Freimund (1997).

La répartition du facteur d'érosivité R dans le bassin versant de la Ruvyironza a été calculée à partir des données issues de 2 stations pluviométriques ci-haut cité avec le logiciel ArcGis.

L'examen de carte de répartition du facteur R (Fig. III-10) montre que les valeurs les plus élevées se localisent principalement au niveau de la station de Gitega.

***Tableau III-2**: Distribution des valeurs du facteur dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

Facteur R	**Superficie en Km2**	**% de superficie**
568-588	601,89741	31,7
588-614	248,73363	13,1
614-641	269,61966	14,2
641-667	294,30315	15,5
667-686	484,17615	25,5
Total	**1898,73**	**100**

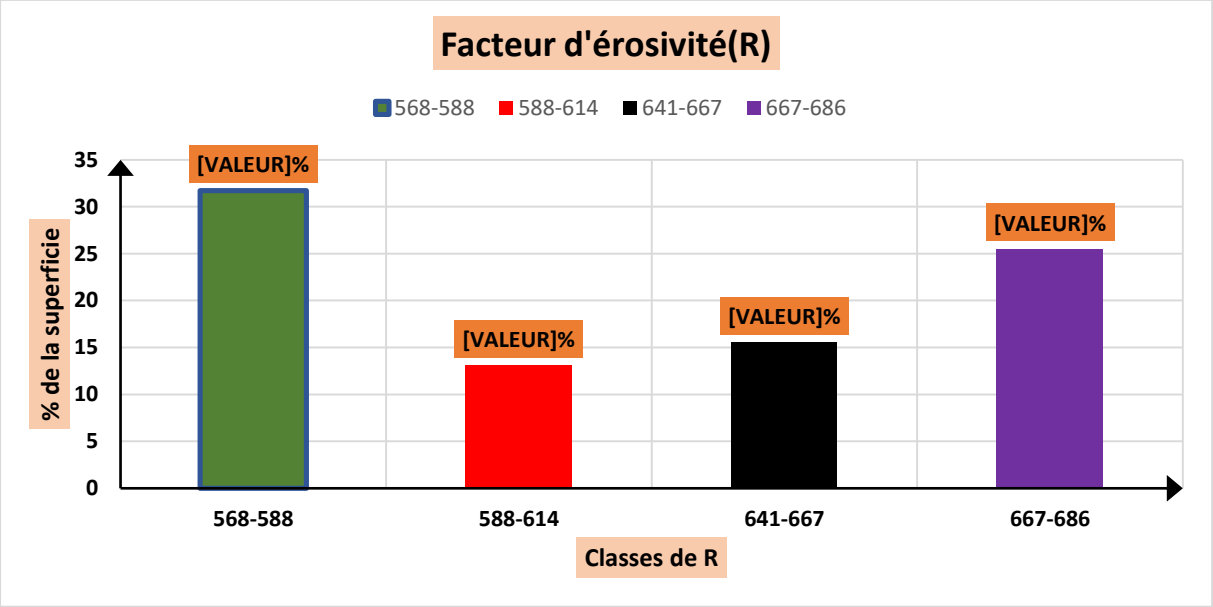


Figure III-1: *Classes des valeurs de R dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza*

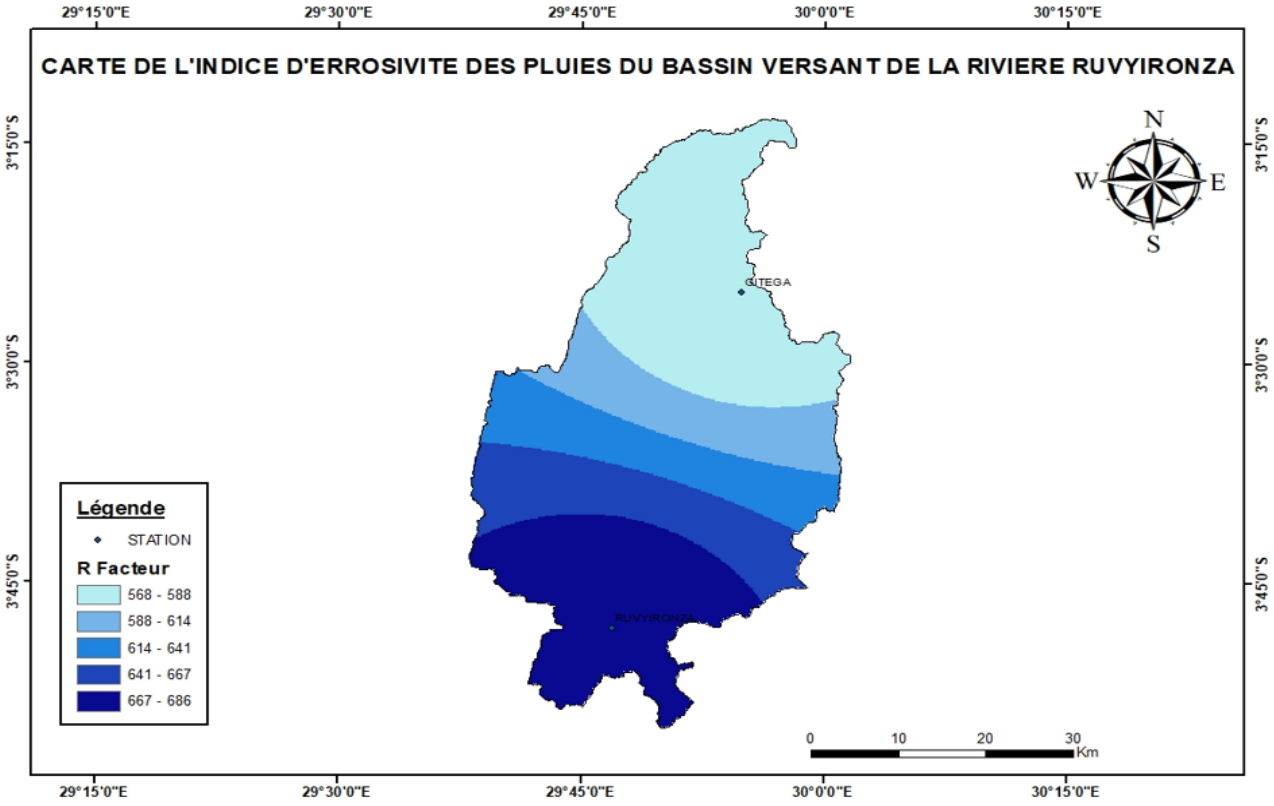


***Figure III-2**: Distribution des valeurs du facteur R dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

Plus de 25 % de la superficie du bassin versant de la rivière Ruvyironza a subi au cours de la période considérée, une agressivité climatique variant de 667 à -686 Mj.mm/ha/h et plus de 31 % de la superficie du bassin a subi une agressivité climatique variant de 568 à 588 Mj.mm/ha/h (Tableau III-2 et Figure III-2).

III.2.2. L'érodibilité du sol (Facteur K)

L'érodibilité d'un sol peut se définir comme étant sa vulnérabilité ou sa susceptibilité à l'érosion. En d'autres termes, elle est le contraire de sa résistance à l'érosion (Hudson, 1981).

Le facteur K est fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et la perméabilité du sol. Les données pour le bassin versant de la Ruvyironza ont été extraites à partir des données téléchargées sur le site de FAO : Webarcive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-world-soil-databest/HTML/ et traitées dans le SIG avec logiciel ArcGIS 10.3 et nous avons attribué le facteur d'érodabilité K respectif à chaque type de sol.

Les résultats obtenus montrent que 3.6 % et 51.9 % qui représentent plus de la moitié de la zone d'étude sont successivement résistants à l'érosion et assez résistants à l'érosion et 15.9 % et 29.1 % du bassin versant sont respectivement sensibles à l'érosion. Le tableau III-3 ci-dessous montre la distribution des valeurs de l'érodibilité des sols dans le BV Ruvyironza sur les six intervalles de profondeurs.

***Tableau III-3**: Distribution des valeurs du facteur K dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

Classe d'érodibilité(K)	Facteur K	Superficie en Km2	% de superficie
Peu érodable	<0,15	68,35428	3,6
Faiblement érodable	0,15-0,25	985,44087	51,9
Moyennement érodable	0,25-0,35	292,40442	15,4
Fortement érodable	0,35-0,45	552,53043	29,1
	Total	**1898,73**	**100**

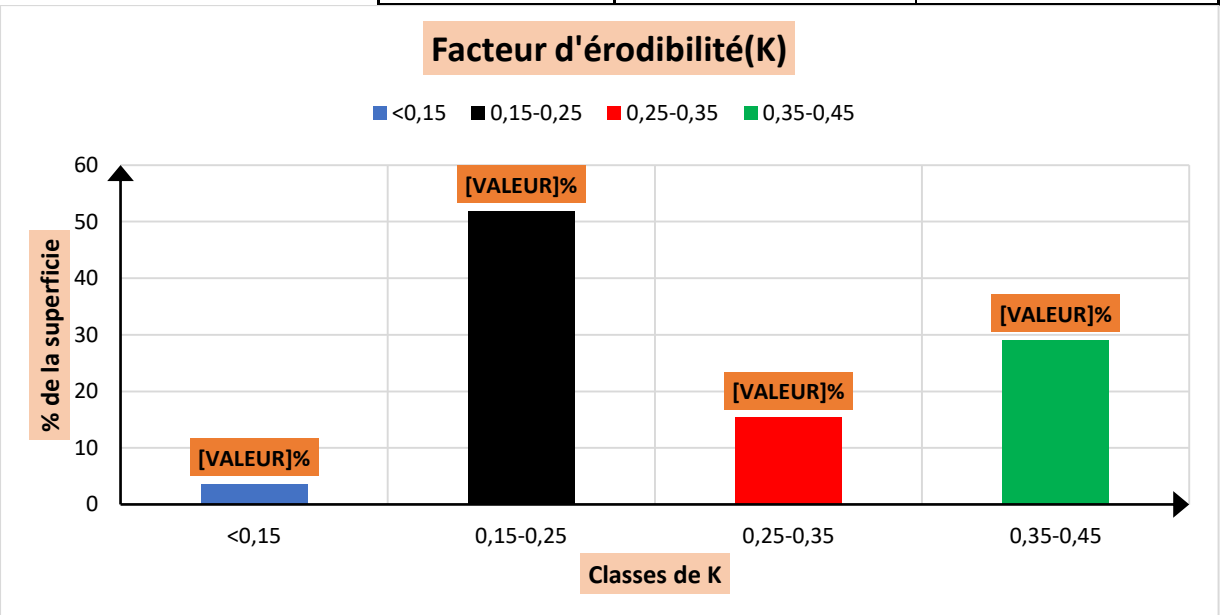


***Figure III-3** : Classes des valeurs de K dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza*

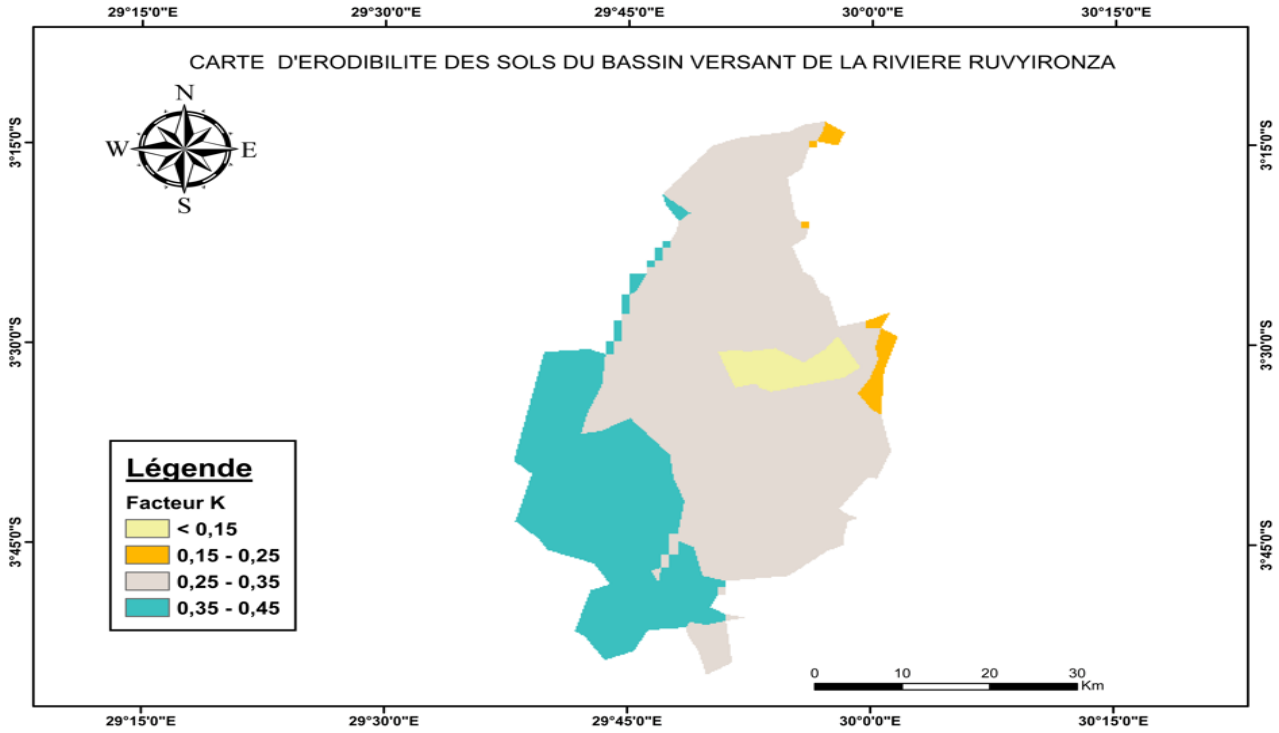


***Figure III-4**: Distribution des valeurs du facteur K dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

III.2.3. Le Facteur topographique (Facteur LS)

Le facteur topographique a été calculé en regroupant les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison où raideur (S) de la pente sur l'érosion. La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle.

Le calcul et la spatialisation des facteurs L et S ont été établis à partir du MNT (Modèle Numérique du Terrain), à résolution spatiale de 10 mètres fournis par BCG du Burundi et la méthode USPED (Unit Stream Power - based Erosion and Deposition) de Jim Pelton et al, en 2012.

Avec ces données trois étapes de prétraitement en utilisant les fonctions d'analyse spatiale en mode raster ont été faites dont :

- La première étape était la création d'un raster de direction des écoulements à partir de chaque cellule vers son voisin de plus faible altitude. Cette détermination de la direction des flux du réseau hydrographique théorique permet ensuite de calculer la longueur de pente, tout d'abord pour une cellule et ensuite, pour chaque cellule.
- La seconde étape était de calculer les raideurs des pentes en degrés pour chaque cellule.
- La dernière étape était de croiser les calculs de L et S, le résultat final est ensuite divisé par 100.

❖ Les résultats obtenus pour les longueurs des pentes (L) montrent que la majeure partie du bassin versant de la Ruvyironza (plus de 98 %) a des longueurs des pentes qui sont comprises entre 0 à 175 m comme le tableau III-4 le montre.

***Tableau III-4**: Répartition des classes des longueurs des pentes (L) dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

L	Superficie en Km2	% de superficie
0-179	1875,94524	98,8
179-835	17,08857	0,9
835-1969	5,69619	0,3
1969-3382	3,987333	0,21
3382-5073	1,89873	0,1
Total	**1898,73**	**100**

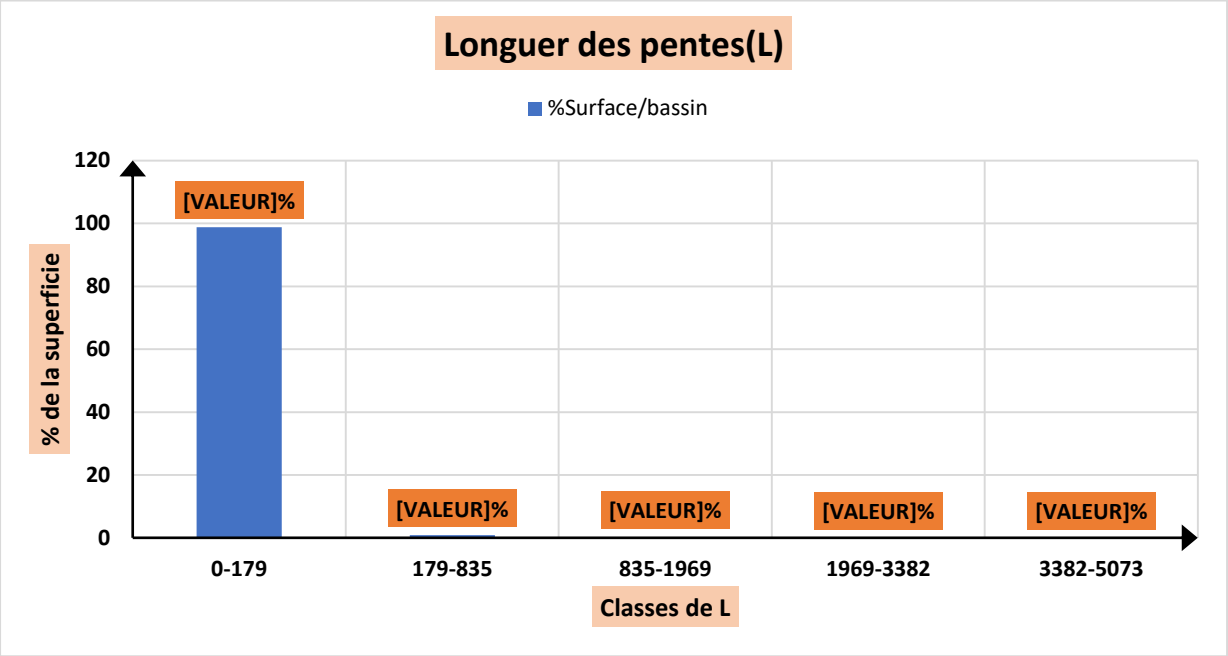


***Figure III-5**: Répartition des classes des longueurs(L) des pentes dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

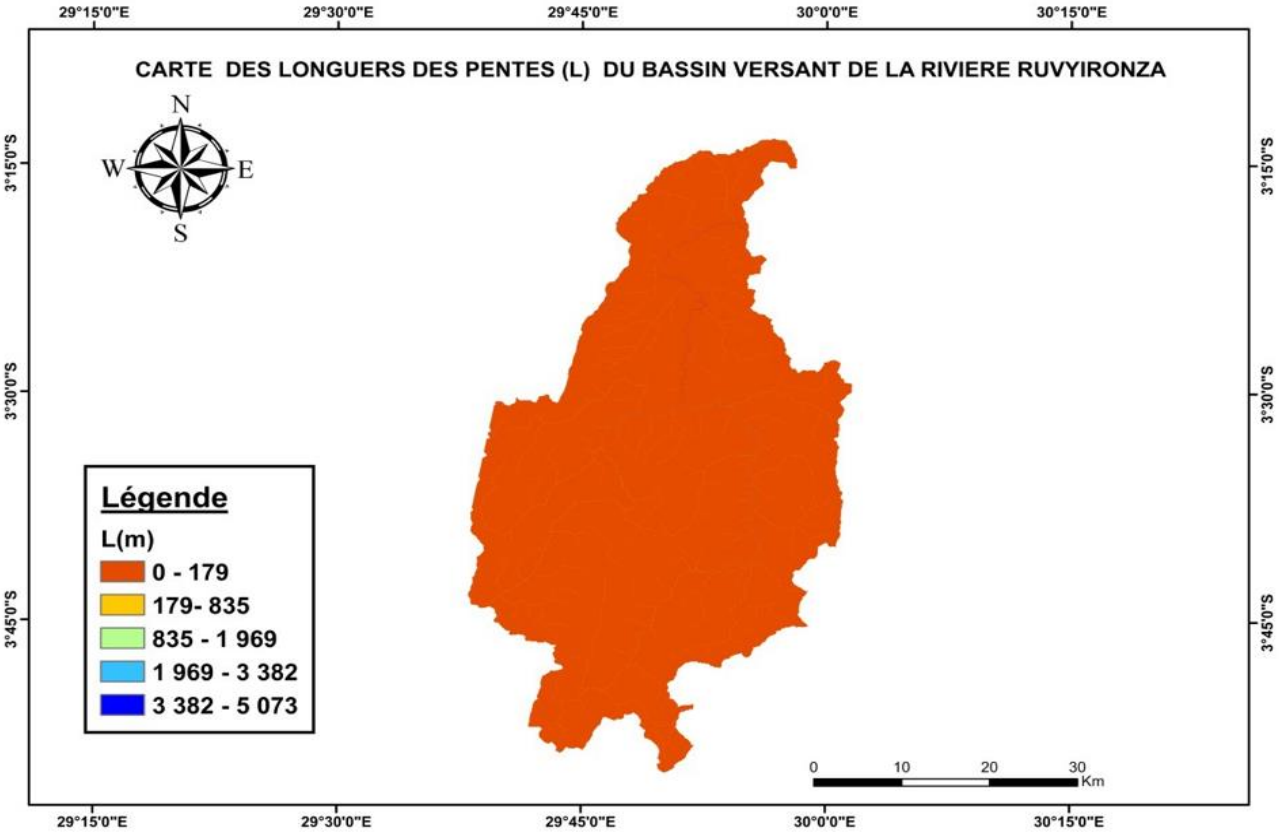


***Figure III-6** : Carte des classes de longueurs de pentes(L) dans le bassin versant de la rivière R Ruvyironza*

- Les résultats obtenus pour le calcul et la spatialisation de raideur des pentes montrent que plus de 60 % sont classés de 0 à 3 et de 3 à 6. Le tableau III-11 montre les classes de raideur des pentes.

***Tableau III-5**: Répartition des classes de raideur des pentes (S)dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

S	Superficie en Km2	% de superficie
0-3	664,5555	35
3-6	562,02408	29,6
6-10	374,04981	19,7
10-15	201,26538	10,6
15-22,8	96,83523	5,1
Total	**1898,73**	**100**

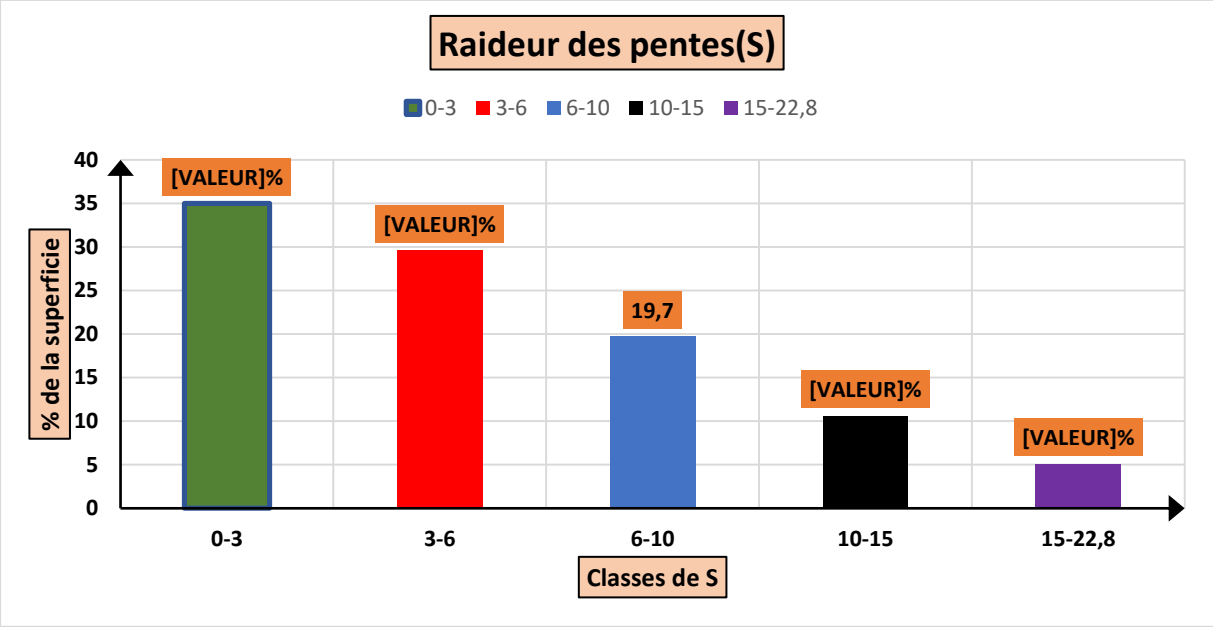


***Figure III-7**: Répartition des classes de raideur des pentes (S) dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

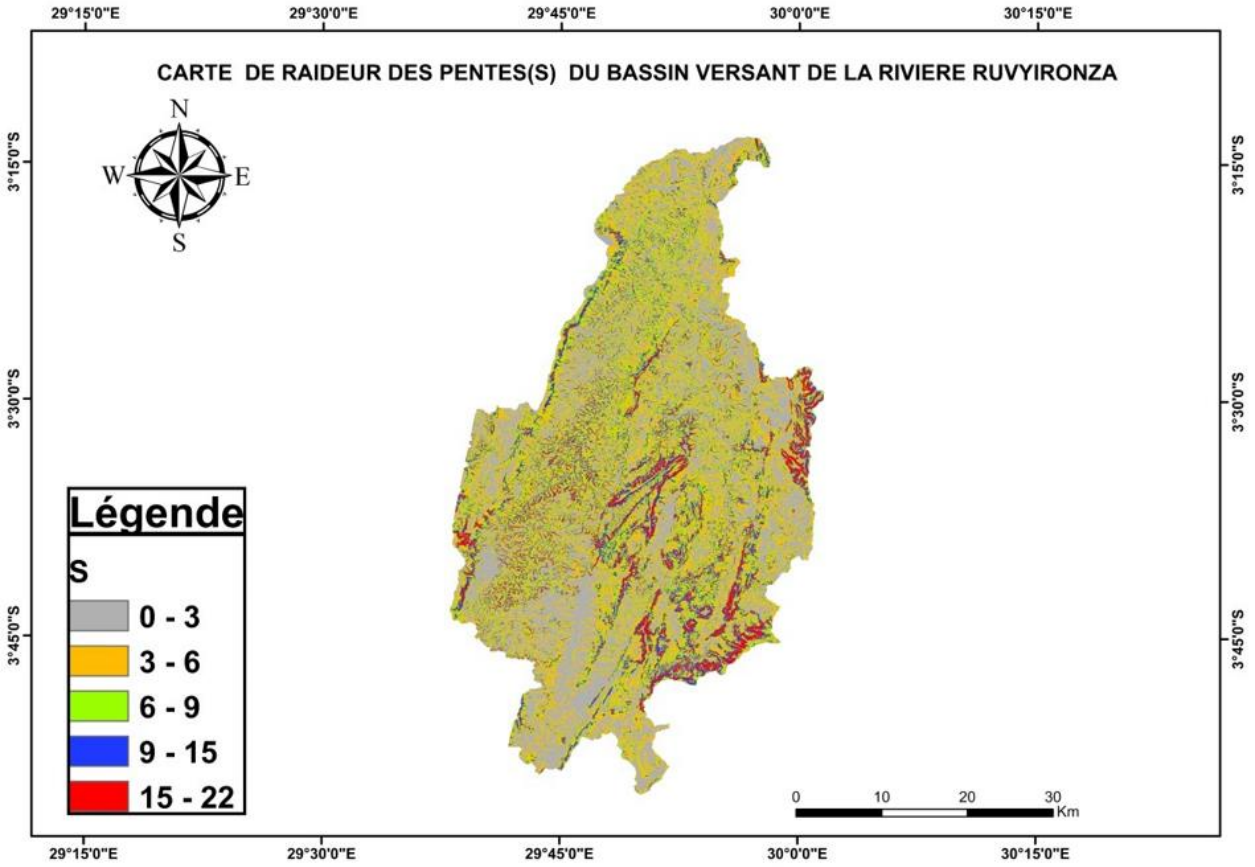


***Figure III-8** : Carte des classes de raideur des pentes(S) dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza*

❖ Après le croisement des résultats obtenus pour l'indice des longueurs des pente (L) et l'indice de raideur des pentes, nous avons obtenu dans le bassin versant des unités de surface en moyenne de Kilomètre carré de facteur LS, ces différentes unités en trois classes (Figure III-9 et Tableau III-6).

***Tableau III-6**: Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

Facteur LS	Superficie en Km2	% de superficie
0-10	1881,64143	99,1
10-45	15,18984	0,8
>45	1,89873	0,1
Total	**1898,73**	**100**

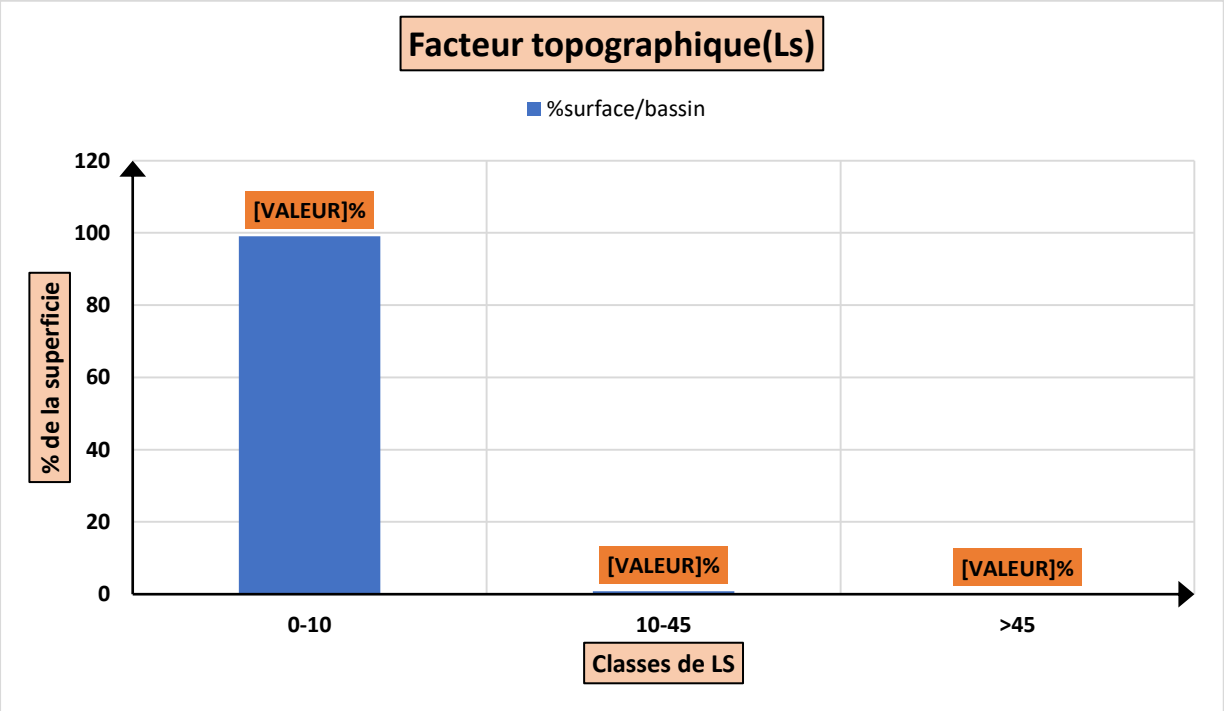


***Figure III-9**: Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

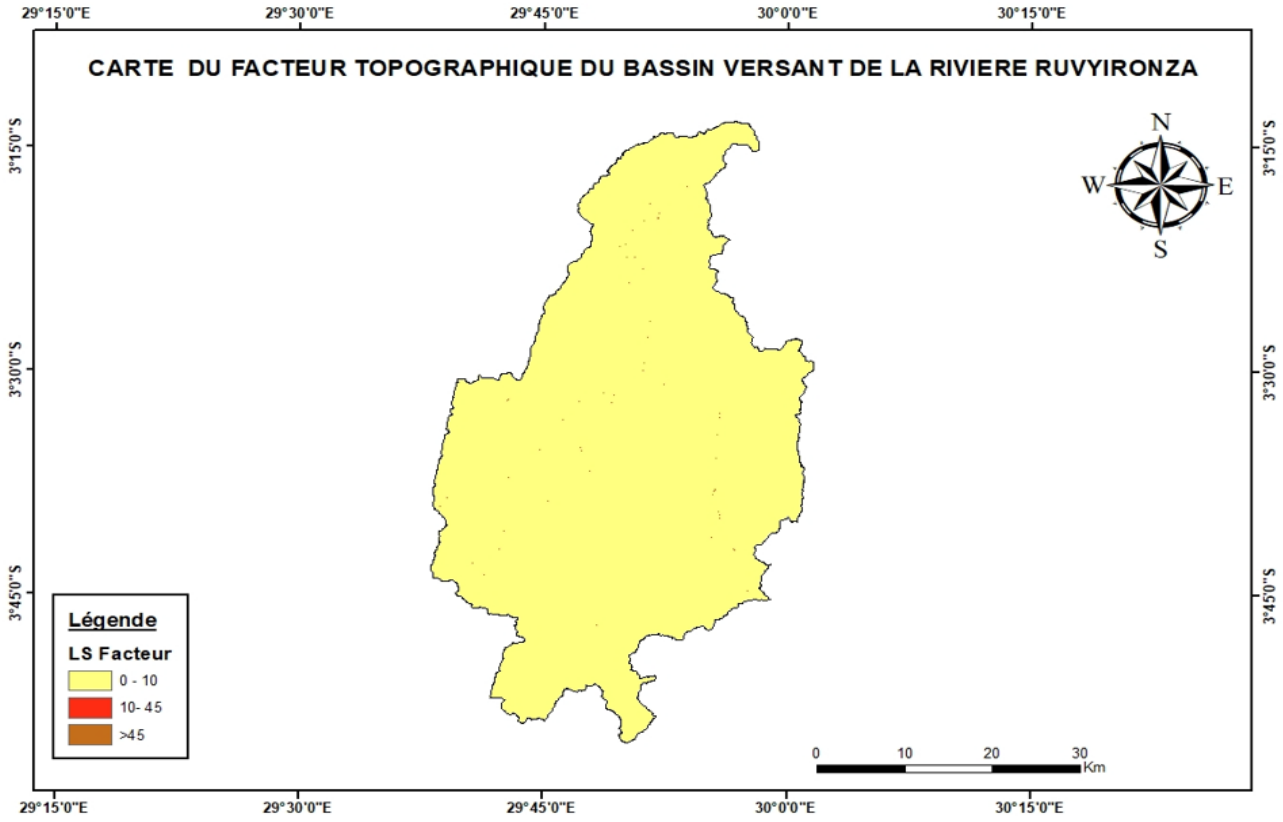


***Figure III-10**: Carte des classes du facteur LS dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

La distribution du facteur topographique (LS) montre que 99.1 % de la superficie du bassin versant fait partie de la classe 0 à 10 (Fig. III-10).

III.2.4. Le Facteur du couvert végétal (Facteur C)

La détermination du facteur C repose sur la densité de la couverture de la surface du sol par la végétation et sur la hauteur des strates végétales.

Il s'agit ici d'exprimer l'effet du couvert végétal présent dans la zone d'étude, la valeur attribuée est de 0.025 pour les végétations denses, 0.05 pour les zones de cultures, 0.4 pour la végétation pauvre et 1 pour le sol nu et les zones bâties comme l'indique le tableau II-7.

Pour simplifier la lecture des résultats, la représentation graphique ainsi que pour la confrontation du facteur C avec les autres facteurs, nous avons réparti les valeurs de C en 5 classes (Tableau III-13).

***Tableau III-7**: Distribution des classes du facteur C dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

Facteur C	Superficie en Km2	% de superficie
0	7,59492	0,4
0,025	191,77173	10,1
0,05	495,56853	26,1
0,4	1103,16213	58,1
1	100,63269	5,3
Total	**1898,73**	**100**

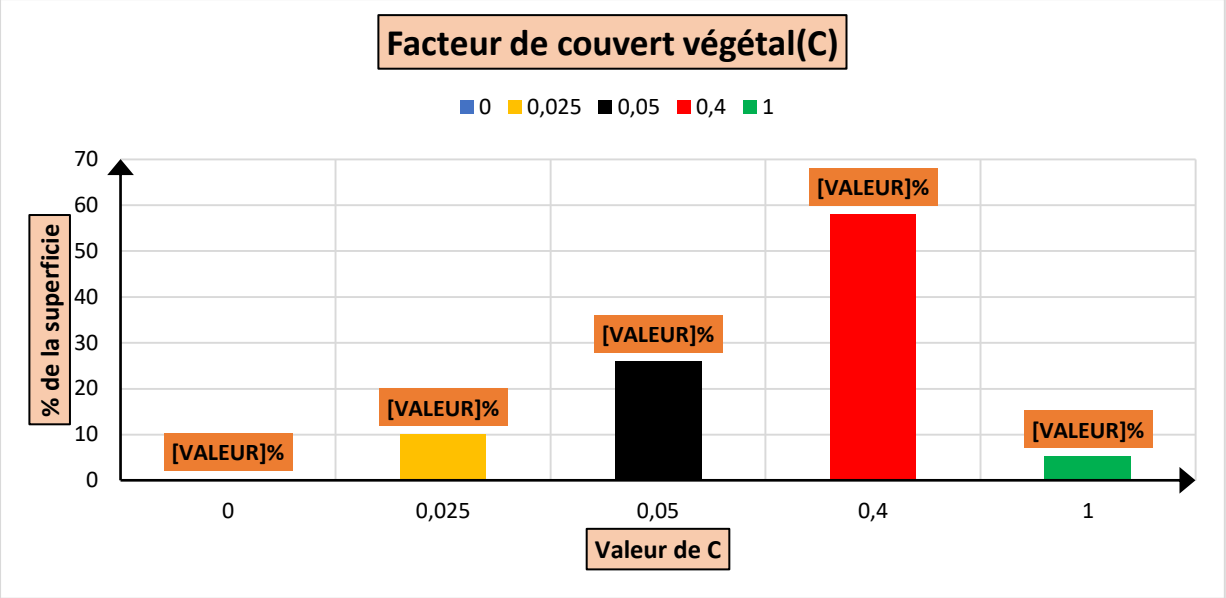


***Figure III-11** : Distribution du facteur C dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

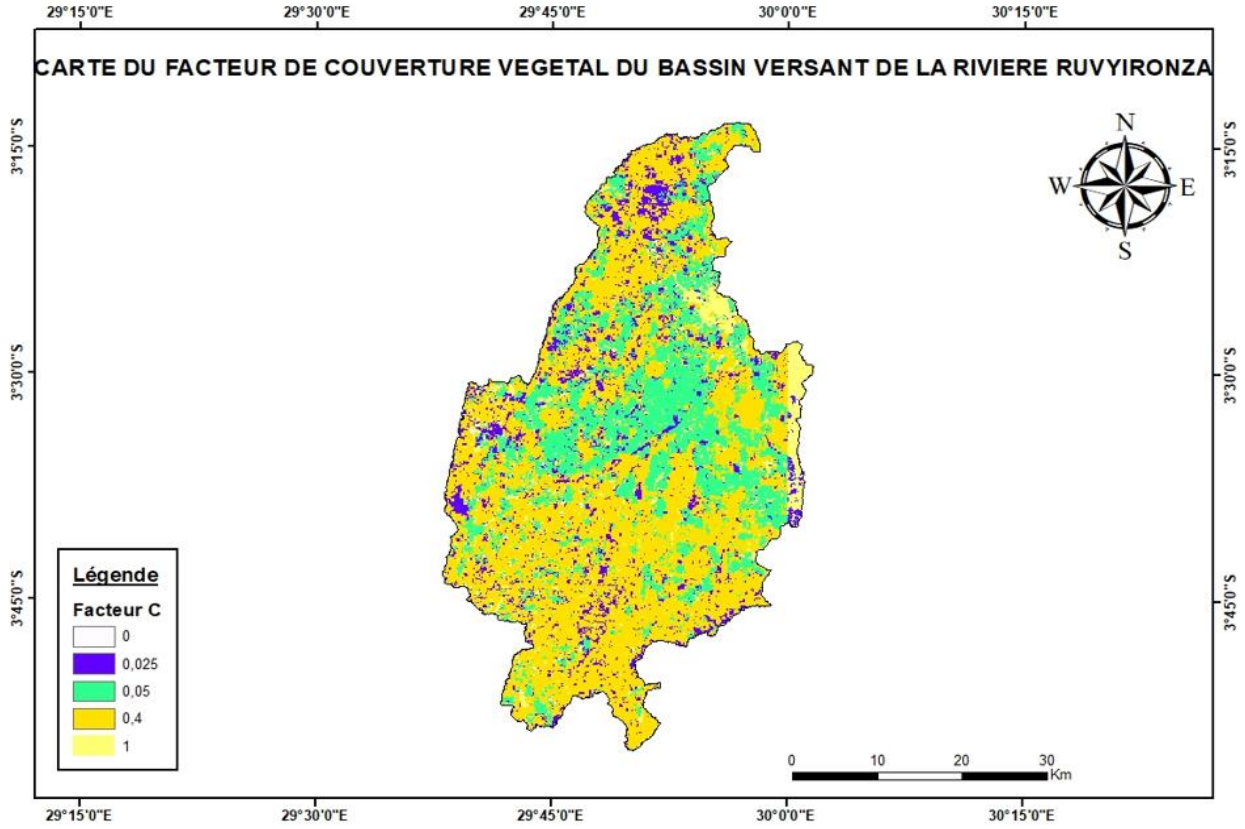


***Figure III-12** : Carte du facteur C dans le bassin versant de la rivière de la Ruvyironza*

Les résultats ci-haut présentés montrent respectivement que 63.4 % de la superficie du bassin présente un taux de couverture végétale très faible et seulement 10.1 % de cette superficie est bien protégée.

III.2.5. Le Facteur des pratiques anti érosif où cultural (Facteur P)

Ce facteur est généralement considéré comme étant le rapport de perte en sol entre une parcelle traitée par des structures de conservation des sols et d'une autre plantée en rangées orientées dans le sens de la pente.

Les structures de conservation sont généralement représentées par la culture en contour, la culture en bandes alternées et les terrasses. En fonction de la longueur et du degré de pente, la valeur de P pour chacune de ces structures est donnée par la FAO (1977), Wischmeier et Smith (1978)

Donc, pour déterminer le facteur (P), il suffit de superposer la carte des pentes à celle des aménagements en CES du périmètre à l'étude.

Comme dans notre pays on ne dispose pas la carte d'aménagements en CES, les valeurs de P établies par **Shin, 1999** qui varient en fonction de la pente ont été utilisées.

***Tableau III-8**: Valeurs de facteur P selon la pente (**Shin, 1999**).*

N°	Classes des Pentes en %	Facteur P
1	0-7	0.55
2	7-11.3	0.6
3	11.3-17.6	0.8
4	17.6-26.8	0.9
5	>26.8	1

La carte des pentes et le tableau III-14 nous ont permis d'obtenir les valeurs du facteur des techniques antiérosives pour la zone d'étude. Le tableau III-15 montre la répartition des facteur antiérosifs dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza.

***Tableau III-9**: Répartition de facteur antiérosif(P) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza*

Facteur P	Superficie en Km2	% de superficie
0,55	13,29111	0,7
0,55-0,6	590,50503	31,1
0,6-0,8	444,30282	23,4
0,8-1	850,63104	44,8
Total	**1898,73**	**100**

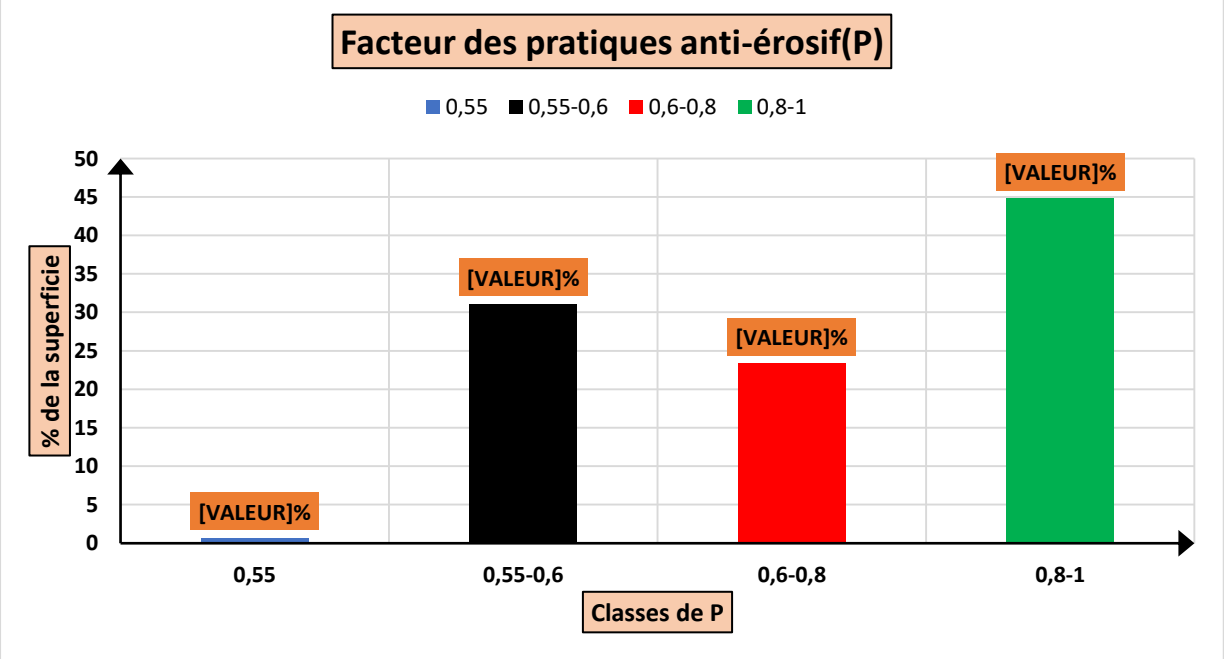


***Figure III-13**: Répartition de facteur antiérosif(P) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza*

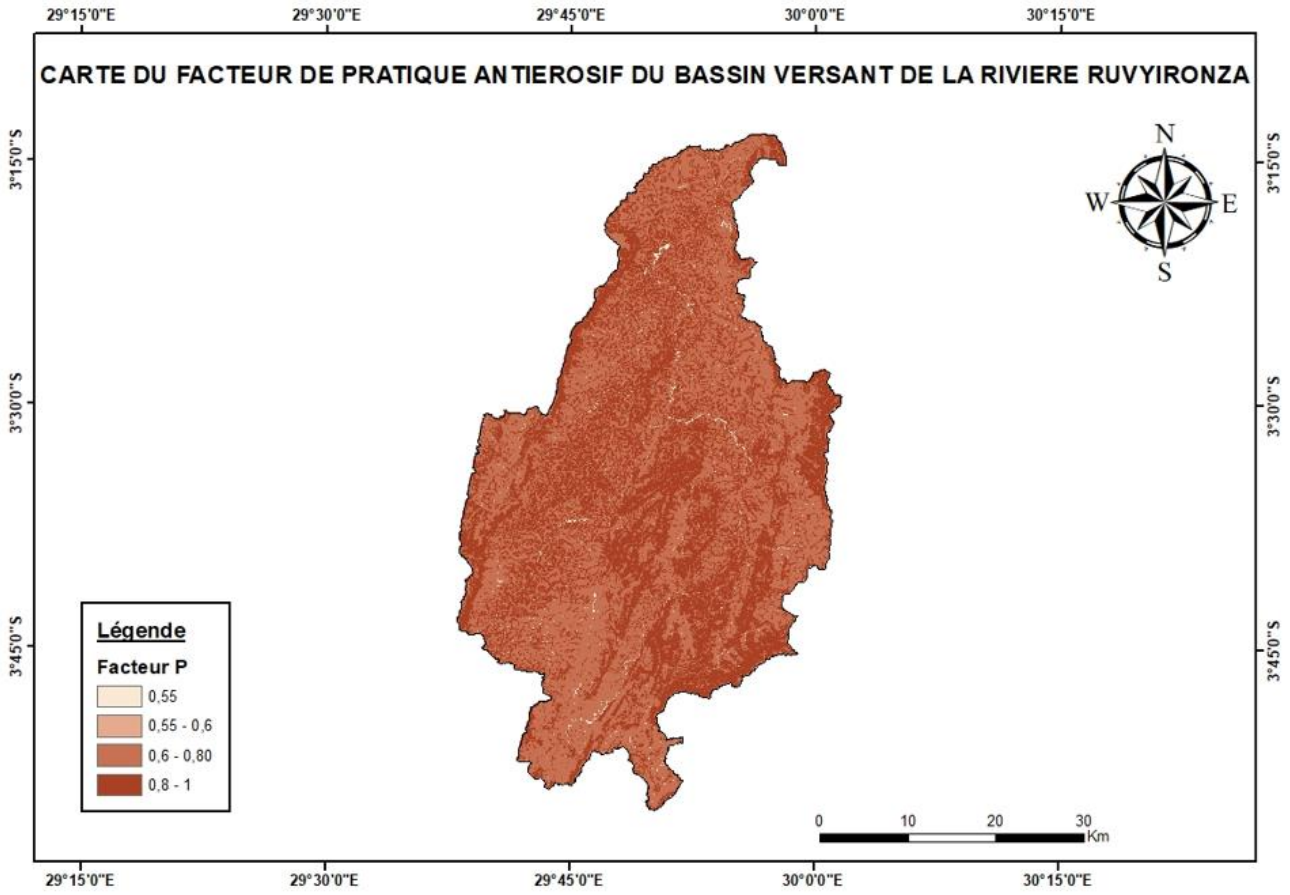


***Figure III-14**: Carte de facteur antiérosif(P) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza*

III.2.6. Estimation de perte en terre (A) dans le bassin versant de la Ruvyironza

Le croisement des cartes des principaux facteurs (R, K, LS, C et P) intervenant dans l'érosion hydrique des sols permet d'établir la carte de pertes en terre. Cette carte des pertes en terre, par l'érosion hydrique a été obtenue par la superposition des cartes des facteurs de l'érosion hydrique à l'aide du SIG (ArcGIS 10.3) et l'application de l'équation universelle de perte de terre (RUSLE).

Les résultats obtenus montrent que les pertes en terre dans le bassin versant de la Ruvyironza de l'ordre de **0 - 7.1 T/ha/an** couvrent plus de la moitié, soit **53%,** ordre de **7.1-40.1 T/ha/an** occupent **39 %** de la superficie totale et le reste est soumis à une perte de l'ordre **40 .1-764.8 T/ha**. La répartition de ces classes dans le bassin versant est représentée sur la carte de pertes (Figure III-16) et les proportions de chaque classe sont rangées dans le tableau (III-10).

***Tableau III-10**: Répartition des pertes en terre (A) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza*

Pertes en terre(T/ha/an)	Superficie en Km2	% de superficie
0-0,71	1006,3269	53
7,1-21,4	366,45489	19,3
21,4-40,2	381,64473	20,1
40,1-151,6	134,80983	7,1

151,6-347,26	5,69619	0,3
347,27-764,8	2,278476	0,12
>764,9	1,518984	0,08
Total	**1898,73**	**100**

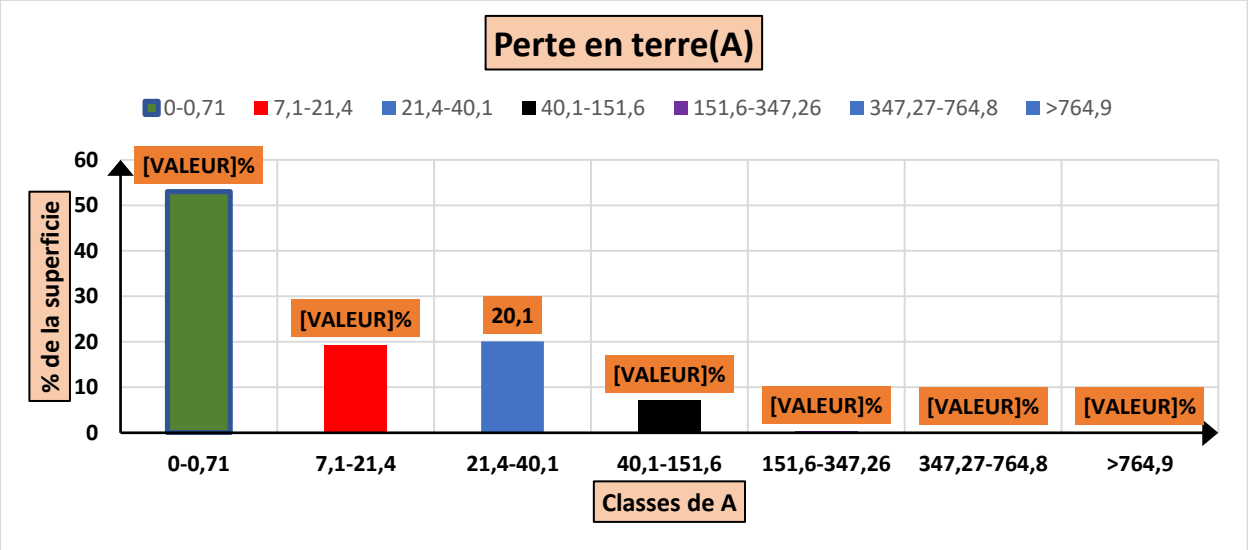


***Figure III-15** : Répartition des pertes en terre (A) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza*

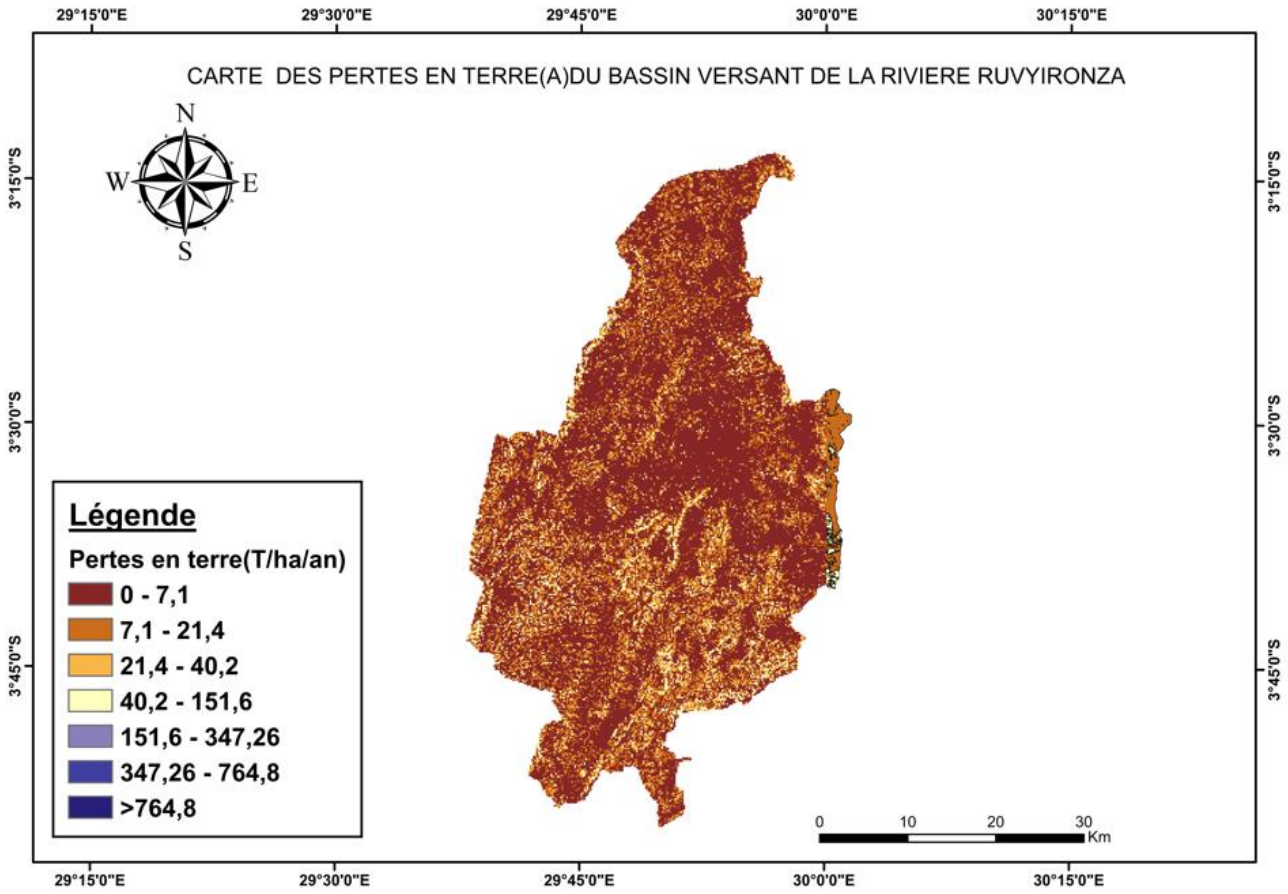


Figure III-16 : *Carte des pertes en terre (A) dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza*

III.2.3.1. Analyse des résultants

En se référant à cette classification de l'érosion pluviale d'après ISSS (1996), nous avons classé les résultats obtenus de la perte en sol dans le bassin versant en 5 classes :

- ♣ Classe 1 (Erosion faible) : Perte comprise entre 0-7.1(T/ha/an)
- ♣ Classe 2 (Erosion modère) : Perte comprise entre 7.1-21.4 (T/ha/an)
- ♣ Classe 3 (Erosion élevé) : Perte comprise entre 21.4-40.1 (T/ha/an)
- ♣ Classe 4 (Erosion très élevé) : Perte comprise entre 40.1-151.6 (T/ha/an)
- ♣ Classe 4 (Erosion extrêmement élevé) : Perte supérieur à151.6 (T/ha/an)

Le tableau III-18 montre la répartition de ces classes dans le bassin versant et les proportions de chaque classe.

Tableau III-11: *Répartition des pertes dans le bassin versant selon les classes d'érosion*

Pertes en terre(T/ha/an)	**Classe**	**Superficie en Km2**	**% de superficie**
0-0,71	Érosion faible	1006,3	53
7,1-21,4	Érosion modéré	366,5	19,3
21,4-40,1	Érosion élevé	381,6	20,1

40,1-151,6	Érosion très élevé	134,8	7,1
151,6-347,26	Érosion Extrêmement élevé	5,7	0,3
347,27-764,8	Érosion Extrêmement élevé	2,3	0,12
>764,9	Érosion Extrêmement élevé	1,5	0,08
Total		**1898,73**	**100**

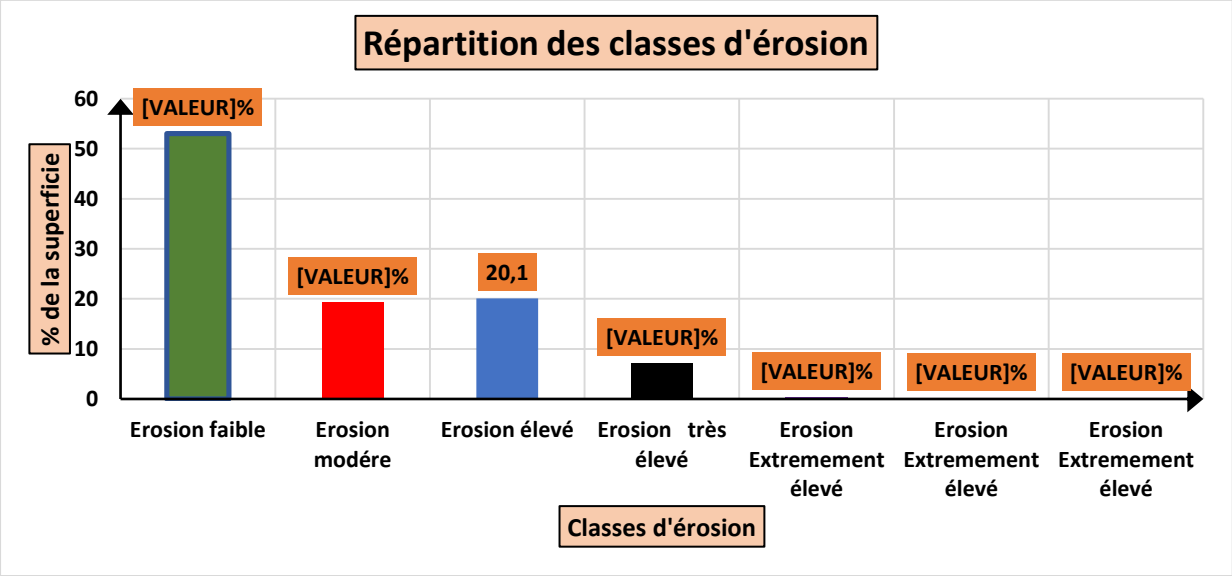


***Figure III-17**: répartition des classes d'érosion dans le bassin versant de la rivière de Ruvyironza*

Ensuite, les différents facteurs de l'équation Universelle ont été calculés et spatialisés afin d'obtenir la carte du flux des pertes en terre en tout point du bassin versant. Les résultats furent une subdivision du bassin en des unités distinctes de surface qui possèdent chacune des valeurs homogènes des cinq facteurs de l'USLE, avec **277.88** une perte en sol, moyenne de tous les pixels de l'unité exprimée **en tonnes/ha/an** et une perte en terre totale du bassin versant de **7 953 212** exprimée **en tonnes/an** soit une perte de **3.02 mm/an.**

***Tableau III-12**: Présentation des résultats des pertes en terres selon les groupes hydrologique du sol du bassin versant de la rivière Ruvyironza*

N°	Types des sols	Superficie(m2)	% de superficie	Masse volumique (Kg/m3)	Volume des terres en m3/an	Perte du sol en mm/an
1	Argile	84113739	4,43	1250	197303,2833	2,35
2	Argile sableuse	434999043	22,91	1340	1359761,843	3,13
3	Limon argileux	248543757	13,09	1300	800827,2698	3,22
4	Limon argile sableux	1131073461	59,57	1400	3384091,706	2,99
		1898730000	**100**			**3,02**

III.3. Conclusion du troisième chapitre

Le chapitre trois a été consacré à l'évaluation et à la classification des risques d'érosion dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza.

La quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique a été réalisée avec l'Équation Universelle Révisée des Perte en Sol (RUSLE) combinée avec les techniques de SIG pour évaluer le taux de perte de sol brut et la distribution spatiale des taux de perte de sols sur les différentes occupations des sols.

Les résultats obtenus montrent que la classe de l'érosion faible couvre plus de la moitié de la superficie totale du bassin versant de la rivière Ruvyironza soit **53 %** et le reste est soumis à l'érosion des classes modéré, élevées et extrêmement élevées qui couvrent successivement **19.7%,20.1%,7.6 %** de la superficie totale du bassin versant de la zone d'étude. La perte totale moyenne du bassin versant est de **277.88 tonnes/ha/an s**oit une perte de couche arable de **3.02 mm/an.**

Avec les résultats dans cette étude et les 21 objectifs stratégiques qui couvrent les cinq piliers qui ont été fixés dans le Forum National sur le développement du Burundi pour la vision Burundi pays émergent en 2040 et développé en 2060 (cfr https://forum-developpement.bi/upload_programme/Vision_BDI%202040_2060.pdf), dans son objectif numéro 3 « Le développement d'une agriculture créatrice de richesse et catalyseur de la sécurité alimentaire », c'est écrit que l'agriculture mérite une attention particulière pour moderniser et augmenter la productivité du secteur agricole, impulser les liens des secteurs agricole et industriel afin de capitaliser la création de richesse de tous les maillons de la chaîne des valeurs.

Donc, si on ne fait rien sur la protection ou la conservation de terre du bassin versant de la rivière Ruvyironza, on peut garantir que ça ne sera pas possible d'atteindre l'objectif numéro 3 ci-haut évoqué, puisqu'en **2040** les pertes en terre totale cumulée seront de **51.34 mm** de la couche arable et de **111.74 mm** en **2060** dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza.

Les pertes en terre peuvent avoir plusieurs effets néfastes sur l'environnement dont la baisse de la fertilité des sols dans les versants, les débordements des cours d'eau (inondation) causés par l'envasement, etc... Le chapitre suivant traite l'évaluation et la régulation des crues.

CHAPITRE IV : EVALUATION ET REGULATION DES CRUES

IV.1. Evaluation hydrologique

L'objectif de cette évaluation est de déterminer le débit de pointe ainsi que l'hydrogramme des crues du bassin versant de la rivière Ruvyironza.

Les précipitations journalières enregistrées au niveau des stations météorologiques de Gitega et Ruvyironza nous ont été fournies par l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU). Ces précipitations ont fait l'objet d'une analyse suivie d'un traitement statistique.

IV.1.1. Analyse climatologique

Alors que nous disposons des données des deux stations météorologiques localisées dans la zone d'étude, pour la présente étude, seules les précipitations de la station de Gitega ont été utilisées compte tenu de la distance (latitude et longitude) et de l'altitude de ces stations par rapport au bassin d'étude.

Ces données émanant de l'IGEBU sont les précipitations journalières ($P_{24)}$ d'une période allant de 1992 à 2021 soit 29ans, ces dernières ont été traitées dans Excel afin d'en dégager les précipitations journalières max annuelles et les précipitations annuelles.

Tableau IV-1: Hauteurs maximale annuelles des précipitations entre les années (1992-2021)

Date	**Hmax(mm)**	**Date**	**Hmax(mm)**
03/04/1992	39,9	01/02/2007	52,5
11/04/1993	38,6	10/02/2008	55,9
21/02/1994	92,6	20/01/2009	53,0
15/05/1995	44,3	22/01/2010	48,0
12/01/1996	62,1	17/12/2011	75,3
18/01/1997	47,8	30/10/2012	49,7
19/01/1998	64,5	30/03/2013	58,2
27/02/1999	85,8	17/01/2014	48,1
19/10/2000	67,7	29/04/2015	41,0
05/01/2001	52,8	08/03/2016	57,3
29/04/2002	73,2	23/01/2017	39,0
02/01/2003	66,5	06/03/2018	61,2
24/04/2004	69,7	20/12/2019	56,2
23/12/2005	40,7	19/04/2020	60,2
28/02/2006	97,7	28/12/2021	44,0

Tableau IV-2: Hauteurs annuelles des précipitations entre les années (1992-2021)

Années	H(mm)	Années	H(mm)
1992	1079,7	2007	1076,1
1993	899,2	2008	1017,3
1994	1163,4	2009	1210,5
1995	1011,5	2010	1141,5
1996	1097,6	2011	1217,6
1997	1532,2	2012	1003,7
1998	1179,7	2013	1040,9
1999	1240,3	2014	1282,6
2000	813,2	2015	1264,2
2001	1205,9	2016	1141,6
2002	1183,1	2017	927,0
2003	941,3	2018	1038,8
2004	1220,6	2019	1169,3
2005	794,8	2020	1219,3
2006	1544,5	2021	1437,7

IV.1.2. Analyse fréquentielle des précipitations

Pour le présent travail, les lois de distribution de Gumbel, Pearson III et Loi Normal ont été utilisées lors de l'analyse fréquentielle.

Pour estimer la probabilité d'apparition d'un évènement hydrométéorologique, on dispose d'une série de débits ou de séries pluviométriques sur une période d'observation Pobs. (**Dègla Herve KOUMASSI, et al., 2014**).

Les hauteurs maximales illustrées dans le tableau IV-1 selon les périodes de retour différentes ont été trouvées grâce à des hauteurs maximales de précipitations (cfr tableau IV-1) et les formules développées au niveau du point I.3.1.1. (Cfr tableau I-7)

				X(T) Loi normale	Pearson III		Gumbel		
T	P(T) (dépassement)	F(T) (non dépassement)	Z(T) (Variable réduite)	Précipitation	K(T)	Précipitations	K(T)	Précipitation	Précipitation moyenne
2	0.50	0.50	0.0000	58.117	0.000	58.113	0.2858	62.54	59.590
5	0.20	0.80	0.8416	71.147	0.842	71.146	1.1695	76.22	72.839
10	0.10	0.90	1.2816	77.959	1.282	77.961	1.7546	85.28	80.401
15	0.07	0.93	1.5011	81.358	1.501	81.362	2.0847	90.39	84.371

20	0.05	0.95	1.6449	83.584	1.645	83.59	2.3159	93.97	87.049
25	0.04	0.96	1.7507	85.222	1.751	85.23	2.4939	96.73	89.060
30	0.03	0.97	1.8339	86.511	1.834	86.519	2.6387	98.97	90.667
35	0.03	0.97	1.9022	87.568	1.903	87.578	2.7608	100.9	92.003
40	0.03	0.98	1.9600	88.462	1.961	88.473	2.8664	102.5	93.144
45	0.02	0.98	2.0099	89.235	2.011	89.246	2.9593	103.9	94.139
50	0.02	0.98	2.0537	89.914	2.055	89.926	3.0423	105.2	95.020
100	0.01	0.99	2.3263	94.135	2.327	94.151	3.5867	113.6	100.645
1000	0.00	1.00	3.0902	105.962	3.092	105.99	5.3856	141.5	117.818

***Tableau IV-3**: Hauteurs maximale selon les différentes périodes de retour*

Les hauteurs maximales à des périodes de retour de **2ans**,**5ans** ,**25ans** ,**50ans** et **100 ans** ont été considéré dans la suite.

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

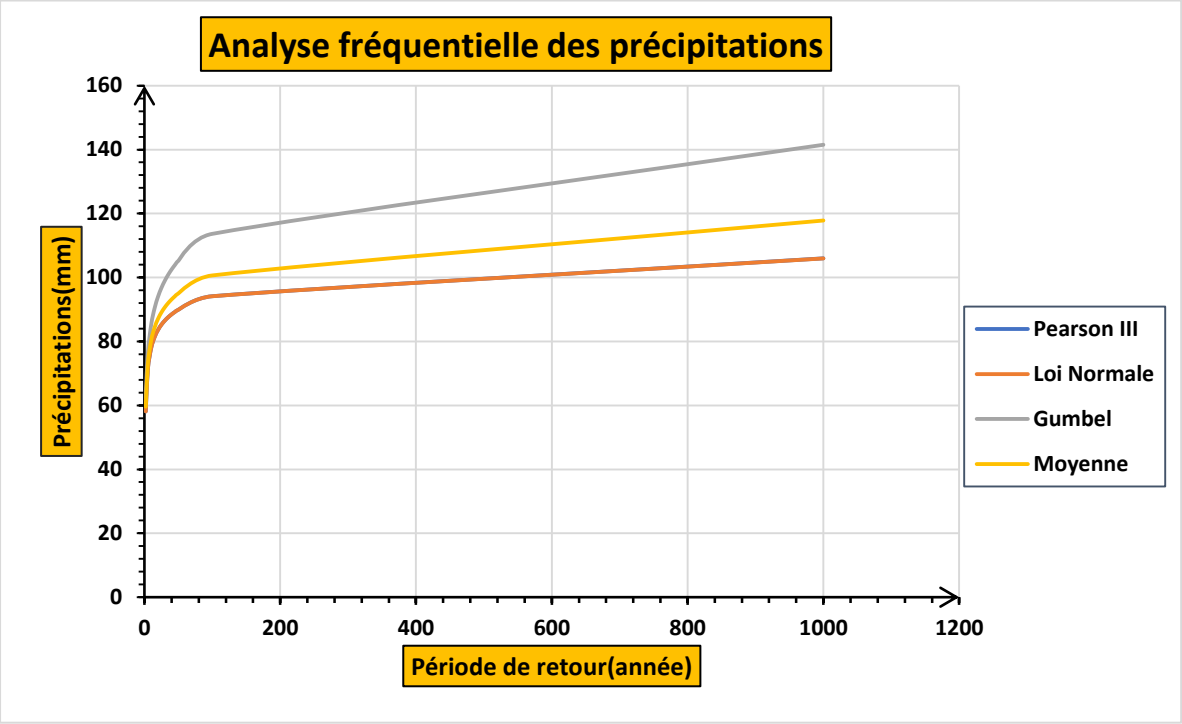


***Figure IV-1*:** Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations

Des quatre courbes représentées sur le graphique ci-dessus et les points expérimentaux, on peut remarquer que pour une période de retour inférieure ou égale à 25ans, les courbes de la loi de Gumbel, log-normale et Pearson III sont presque confondues, aussi pour toutes les périodes de retour, la loi normale et la moyenne sont presque confondues.

IV.1.3. Détermination de la pluie nette

La détermination de la pluie nette (ou lame nette) a été calculée par la méthode SCS en fonction de la pluie brute avec l'expression I-27.

Avec la pluie totale des périodes de retour considérées et les conditions d'humidité, on a trouvé les hauteurs de la pluie nette illustrées dans le tableau IV-4 ci-dessous.

***Tableau IV-4**: Hauteurs de la pluie nette pour les différentes périodes de retour*

Période de retour	**2ans**	**5ans**	**25ans**	**50ans**	**100ans**
Pluie totale P (mm)	59,59	72.84	89,06	95.02	100.65
Pluie nette Pn (mm)	**0.62**	**7.01**	**6.32**	**8.08**	**9.89**
Pertes initiales Ia (mm)	47.16	47.16	47.16	47.16	47.16
Infiltration cumulée F (mm)	11.810	31.406	37,23	39,787	43.598

IV.1.4. Répartition de la pluie nette

Après avoir réparti la pluie totale avec la méthode SCS, la pluie nette ci-haut calculée dans le tableau IV-4 a été répartie en se basant sur les données de distribution de pluie type IA de 24h.

Pour la présente étude, une durée de pluie de 480min soit 8heures a été considérée.

***Tableau IV-5**: Répartition de la pluie totale pour une période de retour de 100 ans*

Temps (min)	**t/tr**	**h/ht**	**Pluie cumulée (mm)**	**Pluie partielle (mm)**
0	0.000	0.000	0.00	0.00
20	0.042	0.025	2.53	2.53
40	0.083	0.050	5.03	2.51
60	0.125	0.083	8.35	3.32
80	0.167	0.116	11.67	3.32
100	0.208	0.161	16.19	4.51
120	0.250	0.206	20.73	4.55
140	0.292	0.268	26.97	6.24
160	0.333	0.425	42.77	15.80
180	0.375	0.520	52.34	9.56
200	0.417	0.577	58.07	5.74
220	0.458	0.623	62.73	4.66

240	0.500	0.664	66.83	4.10
260	0.542	0.701	70.55	3.72
280	0.583	0.736	74.07	3.52
300	0.625	0.768	77.30	3.22
320	0.667	0.800	80.52	3.22
340	0.708	0.826	83.17	2.66
360	0.750	0.853	85.85	2.68
380	0.792	0.880	88.53	2.68
400	0.833	0.906	91.18	2.66
420	0.875	0.930	93.56	2.38
440	0.917	0.953	95.92	2.36
460	0.958	0.977	98.28	2.36
480	1.000	1.000	100.65	2.36
			Totale	**100.65**

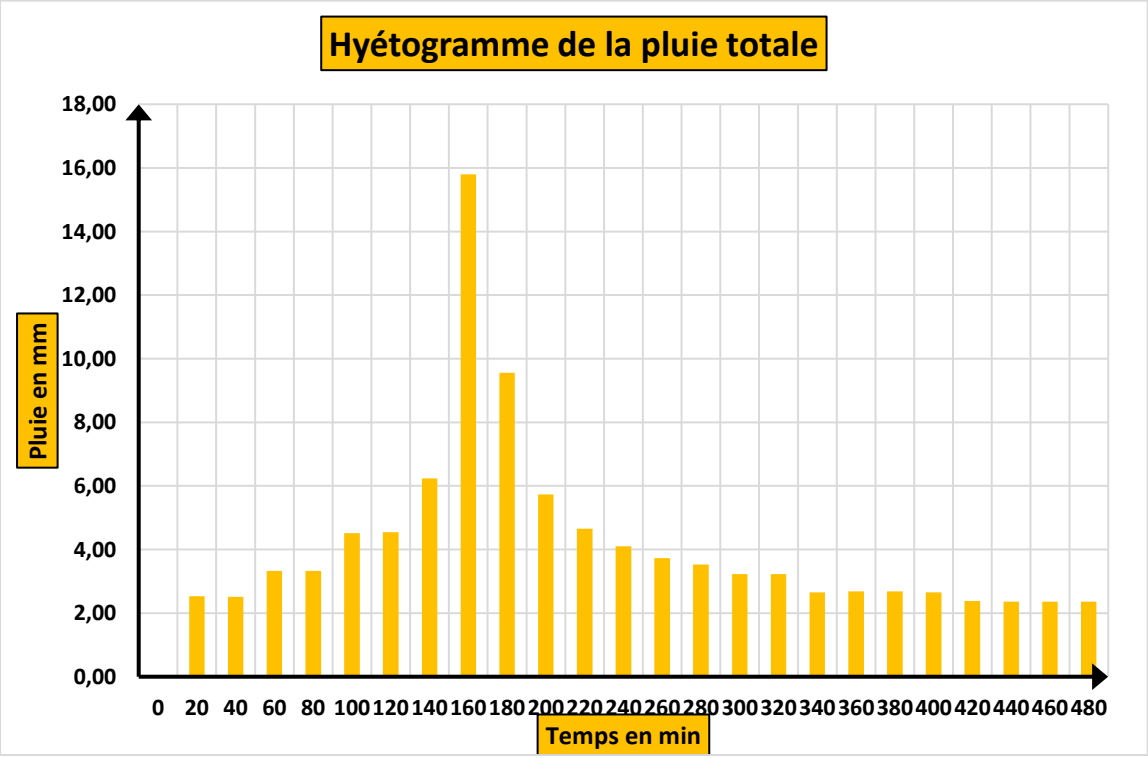


***Figure IV-2** : Répartition de la pluie totale pour une période de retour de 100 ans*

Partant de la pluie totale partielle (cfr tableau IV-4) et la hauteur totale de la pluie nette (cfr tableau IV-5), la répartition de la pluie nette calculée a été présentée dans le tableau IV-6.

***Tableau IV-6**: Répartition de la pluie nette pour une période de retour de 100 ans*

Temps (min)	Pluie totale partiel	Pluie totale cumulée	Pertes initiales cumulées	Infiltration cumule	Lame nette cumulée	Pluie nette	Pluie totale-Pluie nette	HUN
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
20	2.53	2.53	2.53	0.00	0.00	0.00	2.53	
40	2.51	5.03	5.03	0.00	0.00	0.00	2.51	
60	3.32	8.35	8.35	0.00	0.00	0.00	3.32	
80	3.32	11.67	11.67	0.00	0.00	0.00	3.32	
100	4.51	16.19	16.19	0.00	0.00	0.00	4.51	
120	4.55	20.73	20.73	0.00	0.00	0.00	4.55	**0.000**
140	6.24	26.97	26.97	0.00	0.00	0.00	6.24	
160	15.80	42.77	42.77	0.00	0.00	0.00	15.80	
180	9.56	52.34	47.16	5.07	0.11	0.11	9.45	
200	5.74	58.07	47.16	10.43	0.48	0.37	5.37	
220	4.66	62.73	47.16	14.61	0.96	0.48	4.18	
240	4.10	66.83	47.16	18.16	1.51	0.55	3.55	**1.51**
260	3.72	70.55	47.16	21.28	2.11	0.60	3.13	
280	3.52	74.07	47.16	24.16	2.76	0.65	2.88	
300	3.22	77.30	47.16	26.72	3.42	0.66	2.56	
320	3.22	80.52	47.16	29.22	4.13	0.72	2.50	
340	2.66	83.17	47.16	31.24	4.77	0.64	2.02	
360	2.68	85.85	47.16	33.24	5.45	0.68	2.00	**3.94**
380	2.68	88.53	47.16	35.20	6.18	0.72	1.96	
400	2.66	91.18	47.16	37.10	6.93	0.75	1.90	
420	2.38	93.56	47.16	38.77	7.63	0.70	1.68	
440	2.36	95.92	47.16	40.41	8.36	0.73	1.63	
460	2.36	98.28	47.16	42.02	9.11	0.75	1.61	
480	2.36	100.65	47.16	43.60	9.89	0.78	1.58	**4.44**
					Totale	**9.89**		

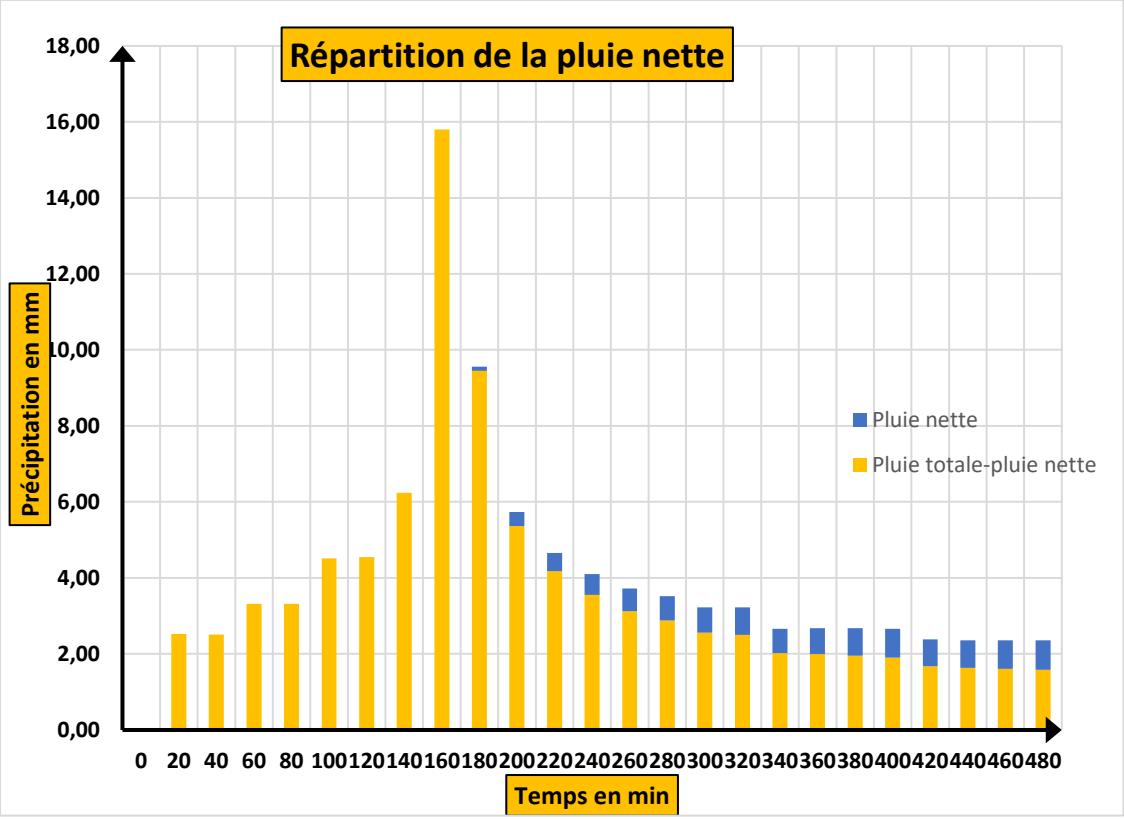


***Figure IV-3** : Répartition de la pluie nette pour une période de retour de 100 ans*

IV.1.5. Hydrogramme unitaire

L'hydrogramme unitaire est déterminé sur bases des paramètres qui sont en fonction de la superficie du bassin versant et du temps de concentration, ces paramètres sont les mêmes pour toutes les conditions d'humidité et les périodes de retour, les tableaux III-25 et III-26 montrent successivement les valeurs des paramètres de l'hydrogramme et les calculs de l'hydrogramme unitaire.

***Tableau IV-7**: Valeurs des paramètres de l'hydrogramme unitaire*

Paramètres	Durée de référence D ou temps unitaire tu	Temps de montée tp	Débit de pointe q_p
Valeurs	116.95 min	877.10 min	18.94 m^3/sec

***Tableau IV-8**: Calculs de l'hydrogramme unitaire*

T(min)	T/TP	Q/QP	Q(m3/s) pour Hn=1mm	T(min)	T/TP	Q/QP	Q(m3/s) pour Hn=1mm
0.00	0.00	0.000	0.00	1491.07	1.70	0.460	8.71
87.71	0.10	0.030	0.57	1578.78	1.80	0.390	7.39
175.42	0.20	0.100	1.89	1666.49	1.90	0.330	6.25
263.13	0.30	0.190	3.60	1754.20	2.00	0.280	5.30
350.84	0.40	0.310	5.87	1929.62	2.20	0.207	3.92
438.55	0.50	0.470	8.90	2105.04	2.40	0.147	2.78
526.26	0.60	0.660	12.50	2280.46	2.60	0.107	2.03
613.97	0.70	0.820	15.53	2455.88	2.80	0.077	1.46
701.68	0.80	0.930	17.62	2631.30	3.00	0.055	1.04
789.39	0.90	0.990	18.75	2806.72	3.20	0.040	0.76
877.10	1.00	1.000	18.94	2982.14	3.40	0.029	0.55
964.81	1.10	0.990	18.75	3157.56	3.60	0.021	0.40
1052.52	1.20	0.930	17.62	3332.98	3.80	0.015	0.28
1140.23	1.30	0.860	16.29	3508.40	4.00	0.011	0.21
1227.94	1.40	0.780	14.77	3946.96	4.50	0.005	0.09
1315.65	1.50	0.680	12.88	4385.51	5.00	0.000	0.00
1403.36	1.60	0.560	10.61				

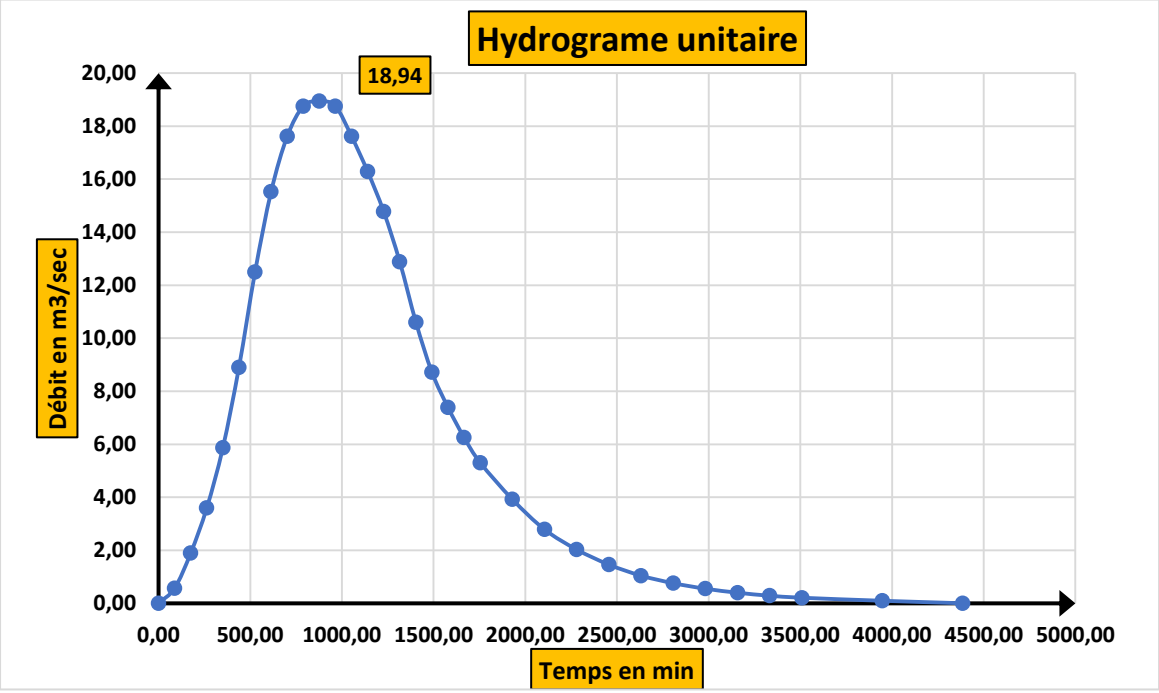


Figure IV-4 : Hydrogramme unitaire

IV.1.6. Hydrogramme des crues

Connaissant l'hydrogramme unitaire et la hauteur de la pluie nette, on trouve l'hydrogramme des débits des crues par la multiplication de ces deux données tout en appliquant le principe de linéarité et de superposition de l'hydrogramme unitaire. Les débits des crues selon les périodes de retour de 2ans, 5ans, 25ans, 50ans et 100 ans sont illustrés dans le tableau IV-9.

Tableau IV-9*: Débits des crues pour les différentes périodes de retour*

	Période de retour				
	2ans	**5ans**	**25ans**	**50ans**	**100ans**
Débits des crues m3/s	18.52	135.72	123.98	155.80	188.57

Avec le temps de l'averse de 480 min et temps unitaire de 116 min, on trouve 4 parties dont la hauteur est trouvée à partir de la répartition de la pluie nette, les tableaux IV-10 et IV-11 et figure IV-5 montrent les détails de l'hydrogramme des crues pour une période de retour de 100 ans.

Tableau IV-10*: Répartition de la pluie nette pour une période de retour de 100 ans*

hu1(mm)	**hu2(mm)**	**hu3(mm)**	**hu4(mm)**	**Pluie nette totale(mm)**
0.00	1.51	3.940	4.44	13.98

Tableau IV-11*: Résultats de calculs de l'hydrogramme des crues pour une période de retour de 100 ans*

Q(m3//s)	T(min)	hu1	hu2	hu3	hu4	Qo	Qe(m3/s)
0.00	0	0.00				6.84	6.84
0.57	110	0.00				6.84	6.84
1.89	220	0.00	0.00			6.84	6.84
3.60	330	0.00	0.86			6.84	7.70
5.87	440	0.00	2.87	0.00		6.84	9.71
8.90	550	0.00	5.45	2.24		6.84	14.53
12.50	660	0.00	8.89	7.46	0.00	6.84	23.20
15.53	770	0.00	13.48	14.18	2.52	6.84	37.02
17.62	880	0.00	18.94	23.13	8.40	6.84	57.31
18.75	990	0.00	23.53	35.07	15.96	6.84	81.40
18.94	1100	0.00	26.68	49.25	26.05	6.84	108.82
18.75	1210	0.00	28.40	61.19	39.49	6.84	135.92
17.62	1320	0.00	28.69	69.40	55.45	6.84	160.38
16.29	1430	0.00	28.40	73.88	68.89	6.84	178.02
14.77	1540	0.00	26.68	74.62	78.14	6.84	186.28
12.88	1650	0.00	24.67	73.88	83.18	6.84	188.57
10.61	1760	0.00	22.38	69.40	84.02	6.84	182.64

8.71	1870	0.00	19.51	64.18	83.18	6.84	173.70
7.39	1980	0.00	16.07	58.21	78.14	6.84	159.25
6.25	2090	0.00	13.20	50.74	72.25	6.84	143.04
5.30	2200	0.00	11.19	41.79	65.53	6.84	125.35
3.92	2310	0.00	9.47	34.33	57.13	6.84	107.77
2.78	2420	0.00	8.03	29.10	47.05	6.84	91.03
2.03	2530	0.00	5.94	24.63	38.65	6.84	76.05
1.46	2640	0.00	4.22	20.89	32.77	6.84	64.72
1.04	2750	0.00	3.07	15.45	27.73	6.84	53.08
0.76	2860	0.00	2.21	10.97	23.52	6.84	43.54
0.55	2970	0.00	1.58	7.98	17.39	6.84	33.79
0.40	3080	0.00	1.15	5.75	12.35	6.84	26.08
0.28	3190	0.00	0.83	4.10	8.99	6.84	20.77
0.21	3300	0.00	0.60	2.98	6.47	6.84	16.90
0.09	3410	0.00	0.43	2.16	4.62	6.84	14.06
0.00	3520	0.00	0.32	1.57	3.36	6.84	12.08
	3630	0.00	0.14	1.12	2.44	6.84	10.54
	3740	0.00	0.00	0.82	1.76	6.84	9.43
	3850		0.00	0.37	1.26	6.84	8.47
	3960		0.00	0.00	0.92	6.84	7.76
	4070		0.00		0.42	6.84	7.26
	4180		0		0	6.84	6.84
	4290					6.84	6.84

La Fig. III-21 ci-dessous montre que l'hydrogramme des crues pour un averse de période de retour de **100 ans**, le débit de pointe est de **188.57 m3/s** qui se produisent autour de **1650 min.**

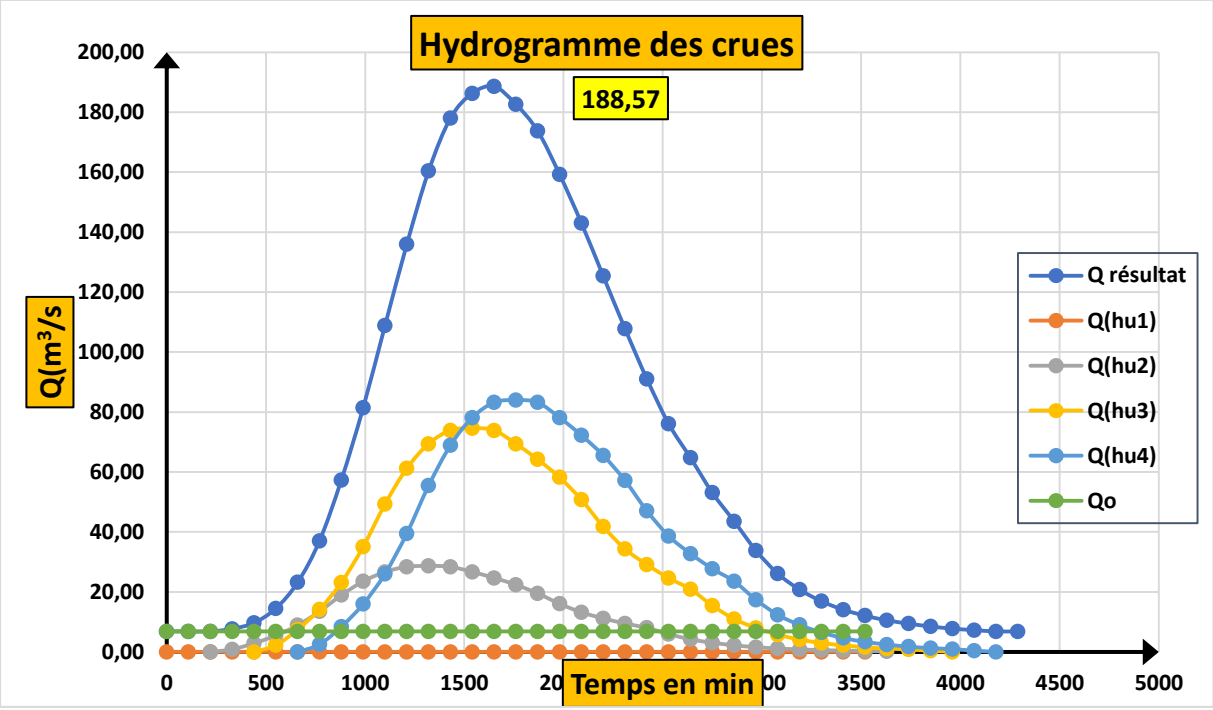


Figure IV-5 : Hydrogramme des crues pour T=100 ans

Observation :

La crue centennale de **188.57m3/sec** trouvée par le modèle hydrologique de transformation pluie-débit est largement supérieure à celle trouvée par l'analyse statistique selon la loi de Gumbel à partir des données hydrométriques de période de 25ans de la station de Kibaya (**cf. annexe3**).

Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs, à savoir :

- ☞ Le modèle hydrologique utilisé dans cette étude a été calibré à d'autres bassins versants dont les caractéristiques hydrologiques ne ressemblent pas à celles de la zone d'étude ;
- ☞ Les lacunes dans la collecte des données hydrométriques au niveau de la station, etc...

IV.2. Evaluation de la zone inondable

La superficie des zones inondables a été délimitée par l'utilisation combinée du logiciel HEC-RAS 5.05 et ArcGis 10.3.

Les échanges entre ces deux programmes étant assurés par une extension développée aussi par HEC, le corps des ingénieurs de l'armée américaine : HEC- GEORAS, dédié à fonctionner sous ARCGIS.

HEC-GeoRAS a été utilisé pour le traitement des données géospatiales dans ArcGIS en utilisant une interface utilisateur graphique. Il a permis d'une part, la préparation des données géométriques à exporter vers HEC-RAS, et la récupération des résultats de simulation effectuée par HEC-RAS d'autre part. L'élaboration du fichier de la géométrie à exporter, est basée sur un modèle numérique de terrain qui doit être de préférence sous forme de TIN.

La modélisation hydraulique réalisé par l'utilisation d'HEC-RAS et HEC GEORAS du tronçon de la zone souvent actuellement menacée par les inondations a permis de reproduire l'état de la zone naturelle à l'état numérique. La superficie totale des zones susceptibles d'être inondées par la simulation est de **5.29** km2.

La fig. IV-6 ci-dessous montre les zones inondables du tronçon étudié dans la zone d'étude.

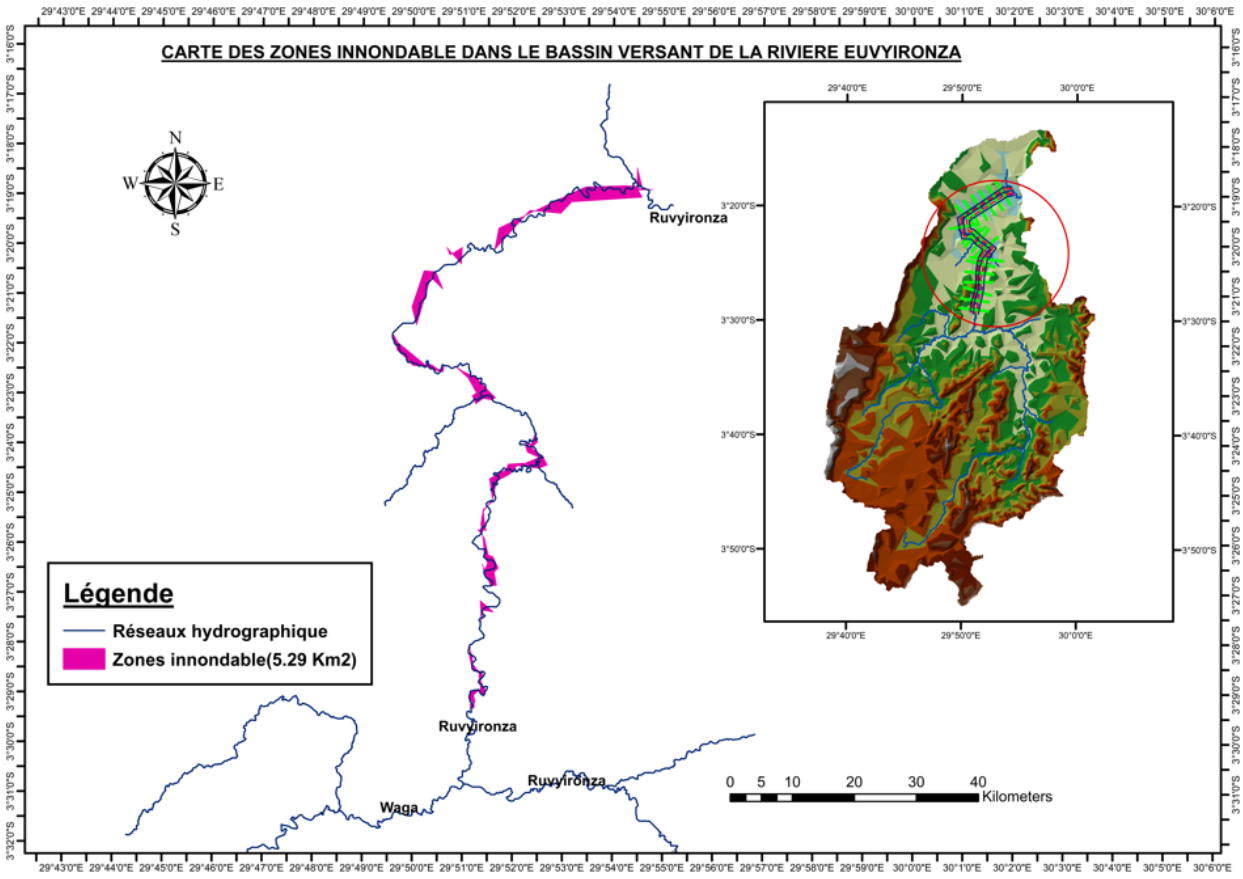


Figure IV-6: *zones inondables pour une crues de 259.84 m3/sec*

IV.3. Régulation des crues

La régulation des crues consiste à limiter les effets négatifs des fortes précipitations sur les cours d'eau et les terres environnantes. Il existe deux approches principales pour régulariser les crues à savoir :

- ❖ Régulation en lit de la rivière
- ❖ Régulation dans les versants

Les deux types de régulation sont importants pour minimiser les risques de crues, protéger les populations et les biens, et préserver l'écosystème des rivières.

Parmi les techniques de régulation où de laminage des crues dans le milieu rural évoqué antérieurement dans le point **I.3.2.1. 1**., seulement deux méthodes ont été utilisées dans cette étude. Il s'agit du :

- ❖ Laminage des crues par retenu en lit de la rivière
- ❖ Laminage des crues par l'aménagement des fosses antiérosives dans les versants

IV.3. 1.Laminage des crues par retenue en lit de la rivière

Dans ce point l'objectif principal est d'établir par le laminage en réservoir (barrage) l'hydrogramme de crues en aval(sortie) à partir de l'hydrogramme de crues des apports (entrée) tout en tenant en considération les critères de choix du site d'emplacement du barrage.

Dans la présente étude, seulement le critère de la topographie et apports du bassin versant a été considéré afin d'évaluer la superficie inondée et le volume de stockage du site d'emplacement. La fig. IV-6 montre l'emplacement du barrage dans le lit de la rivière Ruvyironza.

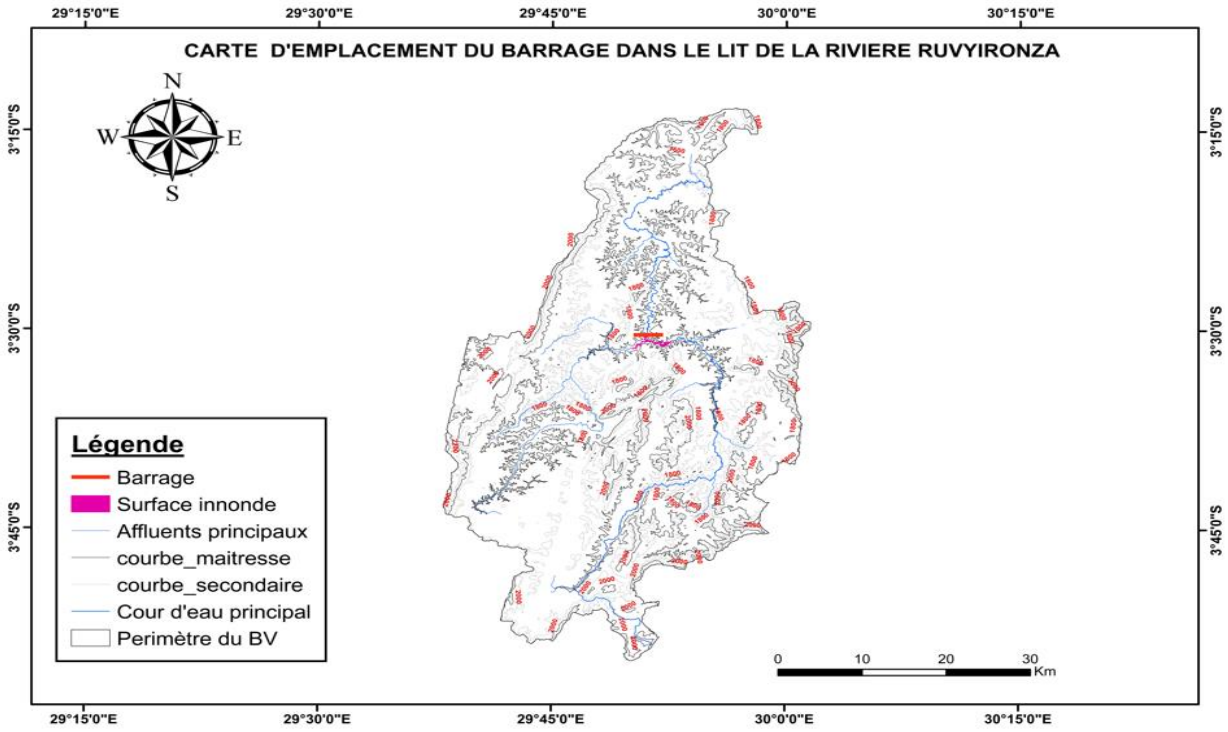


***Figure IV-7** : Emplacement du barrage dans le lit de la rivière Ruvyironza*

Le lieu d'emplacement du barrage a été choisi en regardant l'endroit qui dispose d'un volume de retenu grand avec une hauteur abordable et une surface inondée moins grande.

IV.3. 1.1. Courbe caractéristique de la retenue

Les caractéristiques (hauteur-surface-volume) du réservoir d'un endroit d'emplacement du barrage choisi ont été estimées pour différentes altitudes à partir du traitement topographique effectué avec le logiciel ArcGIS 10.3 et les formules suivantes :

$$V_{n=}V_{n-1} + \left(\frac{S_{n-1+}S_n}{2}\right).\Delta h_n \qquad \text{(IV-1)}$$

$$V_{1=}\frac{2}{3}.S_1\Delta h_n \qquad (IV\text{-}2)$$

Avec :

- S_n : Surface du plan d'eau correspondant à la courbe de niveau h_n, en m² ;
- S_{n-1} : Surface du plan d'eau correspondant à la courbe de niveau h_{n-1}, en m² ;
- Δh_n : Différence d'altitude entre les deux courbes de niveau successives ;
- V_n : Volume d'eau correspondant à la courbe de niveau h_n, en m^3.

Les données topographiques traitées nécessaires pour la construction des courbes bathymétriques se trouvent dans le tableau IV-12.

***Tableau IV-12**: Surface inondée et volume de retenue en fonction de la hauteur*

N°	Altitude(m)	Surface inondé(m2)	Δh(m)	Volume(m3)
1	1560	454895.8328	1	303263.888
2	1561	514763.8992	1	788093.754
3	1562	574631.9656	1	1332791.687
4	1563	634500.032	1	1937357.686
5	1564	694368.0984	1	2601791.751
6	1565	754236.1647	1	3326093.882
7	1566	814104.2311	1	4110264.080
8	1567	873972.2975	1	4954302.345
9	1568	933840.3639	1	5858208.675
10	1569	993708.4303	1	6821983.072
11	1570	1053576.497	1	7845625.536
12	1571	1146352.215	1	8945589.892
13	1572	1239127.933	1	10138329.970
14	1573	1331903.652	1	11423845.760
15	1574	1424679.37	1	12802137.270
16	1575	1517455.088	1	14273204.500
17	1576	1600230.806	1	15837047.450
18	1577	1623006.525	1	17493666.110
19	1578	1795782.243	1	19243060.490
20	1579	1888557.961	1	21085230.600
21	1580	1981333.68	1	23020176.420
22	1581	2066658.395	1	25044172.450
23	1582	2151983.11	1	27153493.210
24	1583	2237307.825	1	29348138.670
25	1584	2322632.541	1	31628108.860
26	1585	2407957.256	1	33993403.760
27	1586	2493281.971	1	36444023.370
28	1587	2578606.686	1	38979967.700
29	1588	2663931.401	1	41601236.740

30	1589	2749256.117	1	44307830.500
31	1590	2834580.832	1	47099748.970

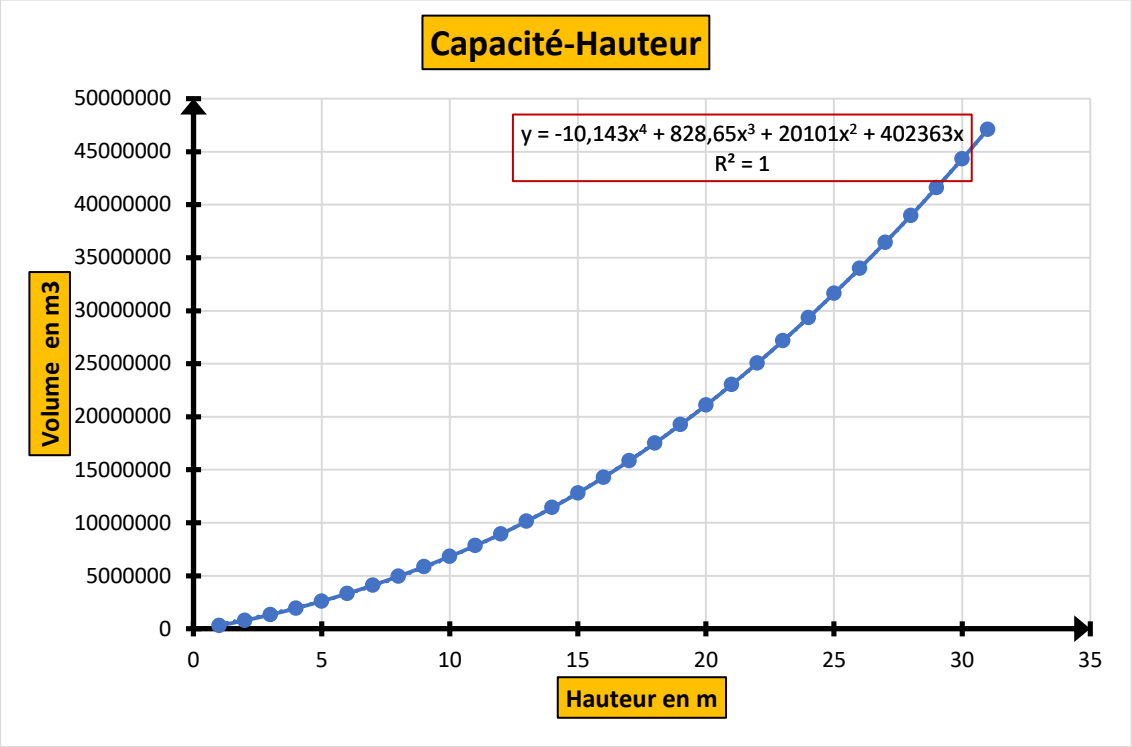


***Figure IV-8**: Courbe capacité-hauteur du site de l'emplacement du barrage*

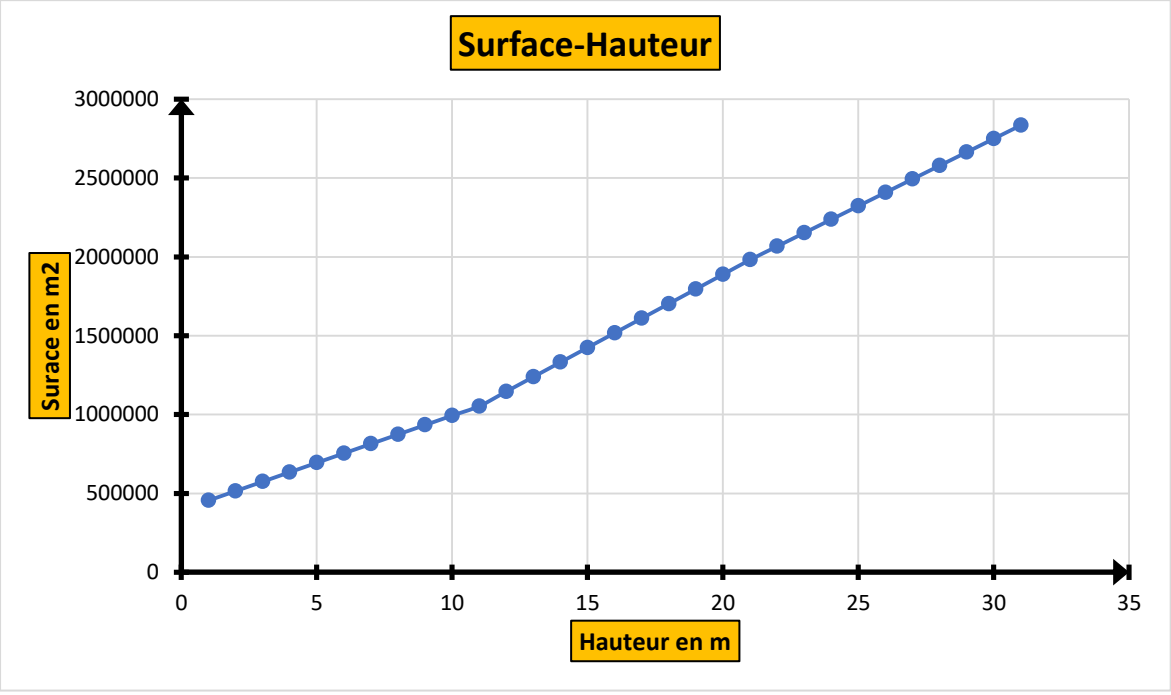


***Figure IV-9:** Courbe surface-hauteur du site de l'emplacement du barrage*

IV.3. 1.2. Relation rétention et débit sortant

Les débits sortants à travers le déversoir b pour chaque lame hd ont été calculés par la formule suivante :

$$Q.sortant = m.b.\sqrt{2g}.h_d^{2/3} \qquad \text{(IV-3)}$$

Avec :

- Débit sortant en m3/sec
- m : Coefficient de débit ;
- b : : Largeur de déversoir en m ;
- h : Hauteur d'eau sur le déversoir en m.

Le tableau III-32 représente des résultats de la relation rétention -débit sortant pour le barrage de la rivière Ruvyironza.

***Tableau IV-13**: Résultat de calcul de la relation rétention -débit sortant pour le barrage de la rivière Ruvyironza*.

Relation RETENTION-DEBIT SORTANT							
h	**z**	**V**	**S**	**2S/Dt**	**2S/Dt - Qs**	**2S/Dt + Qs**	**Qs**
0.00	18.00	17 511 509.23	-	-	0.00	0.00	0.00
0.1	18.10	17 681 248.24	169 739.01	51.44	51.08	51.79	0.35
0.2	18.20	17 851 888.25	340 379.02	103.15	102.15	104.14	0.99
0.3	18.30	18 023 429.81	511 920.58	155.13	153.30	156.95	1.83
0.4	18.40	18 195 873.43	684 364.20	207.38	204.57	210.20	2.81
0.5	18.50	18 369 219.62	857 710.39	259.91	255.98	263.84	3.93
0.6	18.60	18 543 468.83	1 031 959.59	312.72	307.55	317.88	5.17
0.7	18.70	18 718 621.51	1 207 112.27	365.79	359.28	372.30	6.51
0.8	18.80	18 894 678.08	1 383 168.84	419.14	411.19	427.10	7.96
0.9	18.90	19 071 638.93	1 560 129.70	472.77	463.27	482.26	9.49
1	19.00	19 249 504.45	1 737 995.22	526.67	515.55	537.78	11.12
1.1	19.10	19 428 274.97	1 916 765.73	580.84	568.01	593.67	12.83
1.2	19.20	19 607 950.81	2 096 441.58	635.29	620.67	649.90	14.62
1.3	19.30	19 788 532.28	2 277 023.05	690.01	673.53	706.49	16.48

1.4	19.40	19 970 019.65	2 458 510.42	745.00	726.58	763.42	18.42
1.5	19.50	20 152 413.16	2 640 903.93	800.27	779.85	820.70	20.43
1.6	19.60	20 335 713.05	2 824 203.82	855.82	833.32	878.32	22.50
1.7	19.70	20 519 919.52	3 008 410.29	911.64	886.99	936.28	24.65
1.8	19.80	20 705 032.73	3 193 523.50	967.73	940.88	994.59	26.85
1.9	19.90	20 891 052.85	3 379 543.62	1 024.10	994.98	1053.22	29.12
2	20.00	21 077 980.00	3 566 470.77	1 080.75	1049.30	1112.20	31.45
2.1	20.10	21 265 814.28	3 754 305.05	1 137.67	1103.83	1171.51	33.84
2.2	20.20	21 454 555.78	3 943 046.55	1 194.86	1158.58	1231.15	36.28
2.3	20.30	21 644 204.54	4 132 695.31	1 252.33	1213.55	1291.12	38.78
2.4	20.40	21 834 760.60	4 323 251.37	1 310.08	1268.74	1351.42	41.34
2.5	20.50	22 026 223.97	4 514 714.74	1 368.10	1324.14	1412.05	43.95
2.6	20.60	22 218 594.62	4 707 085.39	1 426.39	1379.77	1473.00	46.61
2.7	20.70	22 411 872.51	4 900 363.28	1 484.96	1435.63	1534.29	49.33
2.8	20.80	22 606 057.58	5 094 548.35	1 543.80	1491.71	1595.90	52.10
2.9	20.90	22 801 149.74	5 289 640.51	1 602.92	1548.01	1657.83	54.91
3	21.00	22 997 148.87	5 485 639.64	1 662.32	1604.54	1720.09	57.78
3.1	21.10	23 194 054.82	5 682 545.59	1 721.98	1661.30	1782.67	60.69
3.2	21.20	23 391 867.44	5 880 358.21	1 781.93	1718.28	1845.58	63.65
3.3	21.30	23 590 586.54	6 079 077.31	1 842.14	1775.49	1908.80	66.66
3.4	21.40	23 790 211.90	6 278 702.67	1 902.64	1832.93	1972.34	69.71
3.5	21.50	23 990 743.28	6 479 234.05	1 963.40	1890.60	2036.21	72.81
3.6	21.60	24 192 180.43	6 680 671.20	2 024.45	1948.50	2100.39	75.95
3.7	21.70	24 394 523.06	6 883 013.83	2 085.76	2006.63	2164.90	79.13
3.8	21.80	24 597 770.86	7 086 261.63	2 147.35	2064.99	2229.72	82.36
3.9	21.90	24 801 923.49	7 290 414.26	2 209.22	2123.58	2294.85	85.64
4	22.00	25 006 980.59	7 495 471.36	2 271.35	2182.40	2360.31	88.95
4.1	22.10	25 212 941.79	7 701 432.55	2 333.77	2241.46	2426.08	92.31

4.2	22.20	25 419 806.66	7 908 297.43	2 396.45	2300.75	2492.16	95.71
4.3	22.30	25 627 574.79	8 116 065.56	2 459.41	2360.27	2558.56	99.14
4.4	22.40	25 836 245.71	8 324 736.48	2 522.65	2420.03	2625.27	102.62
4.5	22.50	26 045 818.95	8 534 309.71	2 586.15	2480.01	2692.30	106.14
4.6	22.60	26 256 293.99	8 744 784.76	2 649.93	2540.24	2759.63	109.70
4.7	22.70	26 467 670.31	8 956 161.08	2 713.99	2600.69	2827.28	113.29

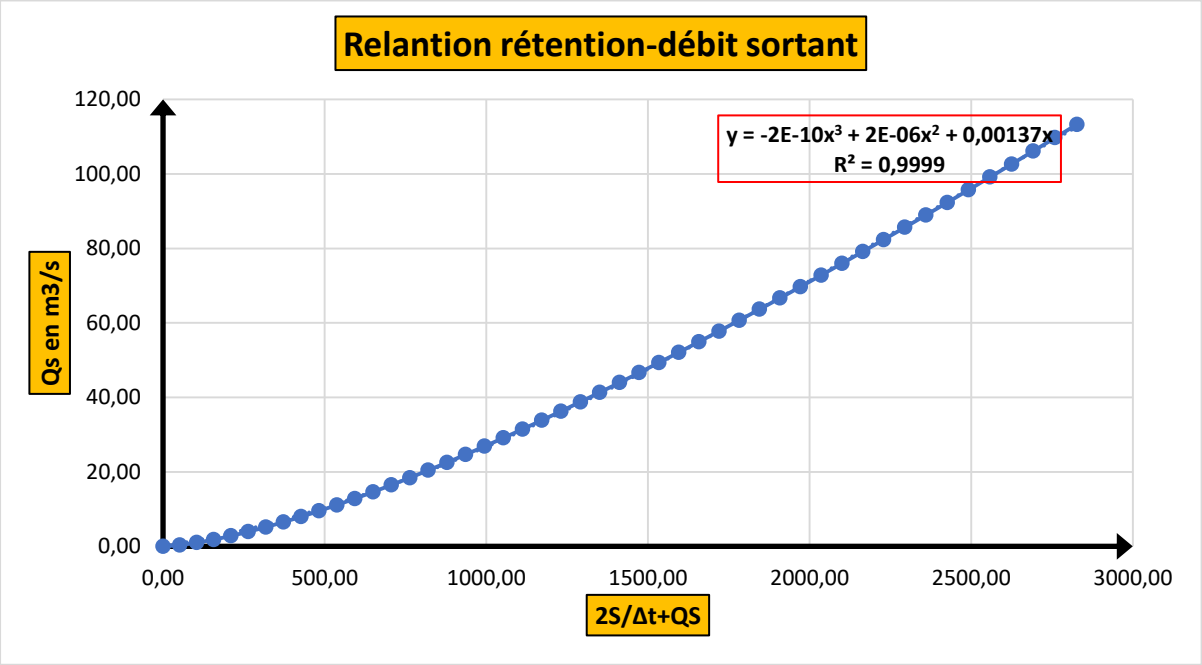


***Figure IV-10** : Relation rétention-débit sortant*

IV.3. 1.3. Calcul du débit sortant

Le débit sortant a été calculé par la méthode modified pulls avec l'équation I-39.

La Fig.IV-5 de l'hydrogramme du débit entrant trouvé dans le tableau IV-11 a été utilisé dans ce point.

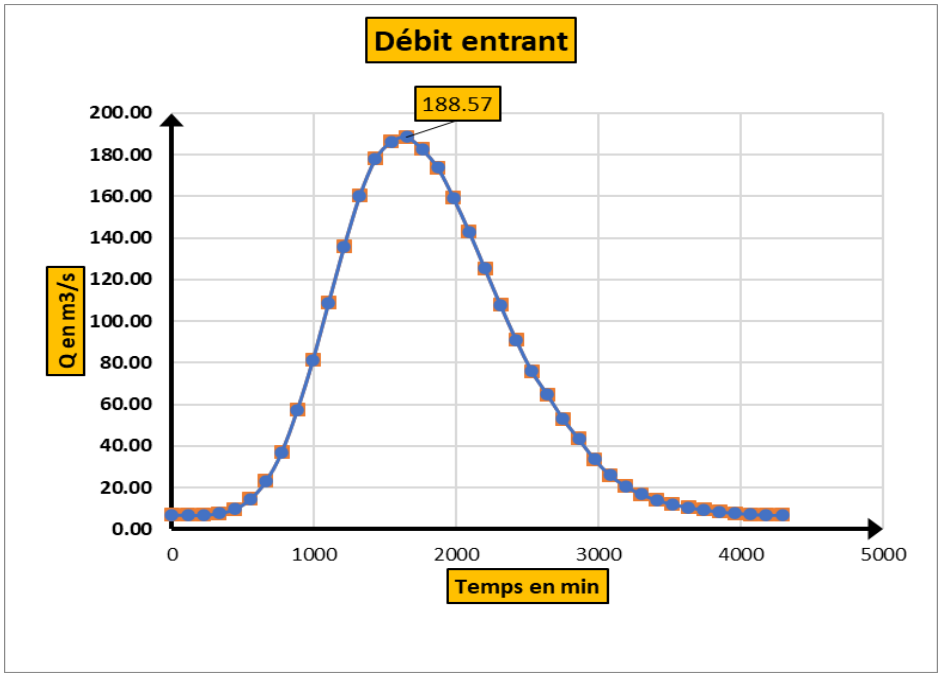


***Figure IV-11** : L'hydrogramme du débit entrant*

Le tableau IV-14 représente des résultats de calcul des débits sortants pour le barrage de la rivière Ruvyironza.

Tableau IV-14: Résultat de calcul des débits sortants

Temps	$Q_{e,i}$	$Q_{e,i+1}$	$Q_{e,i} + Q_{e,i+1}$	$2S_i/\Delta t - Q_{s,i}$	$2S_i/\Delta t + Q_{s,i}$	$Q_{s,i}$	hd
0	6.84	6.84	13.68			0	0.00
110	6.84	6.84	13.68	0.00		0	0.00
220	6.84	7.70	14.54	13.64	13.68	0.01911537	0.01
330	7.70	9.71	17.41	28.10	28.18	0.04019406	0.01
440	9.71	14.53	24.24	45.38	45.51	0.06647521	0.02
550	14.53	23.20	37.73	69.41	69.62	0.1050028	0.03
660	23.20	37.02	60.22	106.80	107.13	0.16948472	0.04
770	37.02	57.31	94.34	166.45	167.02	0.28367027	0.05
880	57.31	81.40	138.71	259.81	260.78	0.48974552	0.08
990	81.40	108.82	190.22	396.82	398.52	0.85095101	0.11
1100	108.82	135.92	244.74	584.14	587.04	1.45302288	0.16
1210	135.92	160.38	296.31	824.09	828.88	2.39575573	0.23
1320	160.38	178.02	338.40	1112.87	1120.40	3.76423275	0.31
1430	178.02	186.28	364.30	1440.09	1451.27	5.58926043	0.40
1540	186.28	188.57	374.85	1788.77	1804.39	7.80868589	0.50
1650	188.57	182.64	371.21	2143.02	2163.62	10.3009833	0.60
1760	182.64	173.70	356.34	2488.41	2514.23	12.9084963	0.70
1870	173.70	159.25	332.95	2813.79	2844.75	15.4782121	0.79

1980	159.25	143.04	302.29	3110.98	3146.74	17.8832315	0.86
2090	143.04	125.35	268.39	3373.22	3413.26	20.0237627	0.93
2200	125.35	107.77	233.12	3597.90	3641.61	21.8531106	0.99
2310	107.77	91.03	198.79	3784.31	3831.02	23.3565614	1.03
2420	91.03	76.05	167.08	3934.00	3983.10	24.5485655	1.07
2530	76.05	64.72	140.77	4050.16	4101.08	25.4611056	1.09
2640	64.72	53.08	117.80	4138.64	4190.93	26.1475559	1.11
2750	53.08	43.54	96.63	4203.15	4256.44	26.6428388	1.13
2860	43.54	33.79	77.34	4245.84	4299.78	26.9679378	1.14
2970	33.79	26.08	59.88	4268.89	4323.18	27.1425774	1.14
3080	26.08	20.77	46.85	4274.40	4328.77	27.1842219	1.14
3190	20.77	16.90	37.66	4267.00	4321.25	27.1282374	1.14
3300	16.90	14.06	30.95	4250.65	4304.66	27.0044354	1.14
3410	14.06	12.08	26.14	4227.94	4281.60	26.831881	1.13
3520	12.08	10.54	22.62	4200.83	4254.08	26.6250955	1.13
3630	10.54	9.43	19.96	4170.66	4223.45	26.3940191	1.12
3740	9.43	8.47	17.90	4138.34	4190.63	26.145263	1.11
3850	8.47	7.76	16.24	4104.47	4156.24	25.8834321	1.11
3960	7.76	7.26	15.02	4069.48	4120.71	25.6117162	1.10
4070	7.26	6.84	14.10	4033.84	4084.51	25.3336511	1.09
4180	6.84	6.84	13.68	3997.84	4047.94	25.0515598	1.08
4290	6.84	6.84	13.68	3961.98	4011.52	24.7694402	1.07
4400	6.84	0.00	6.84	3926.68	3975.66	24.4906359	1.07

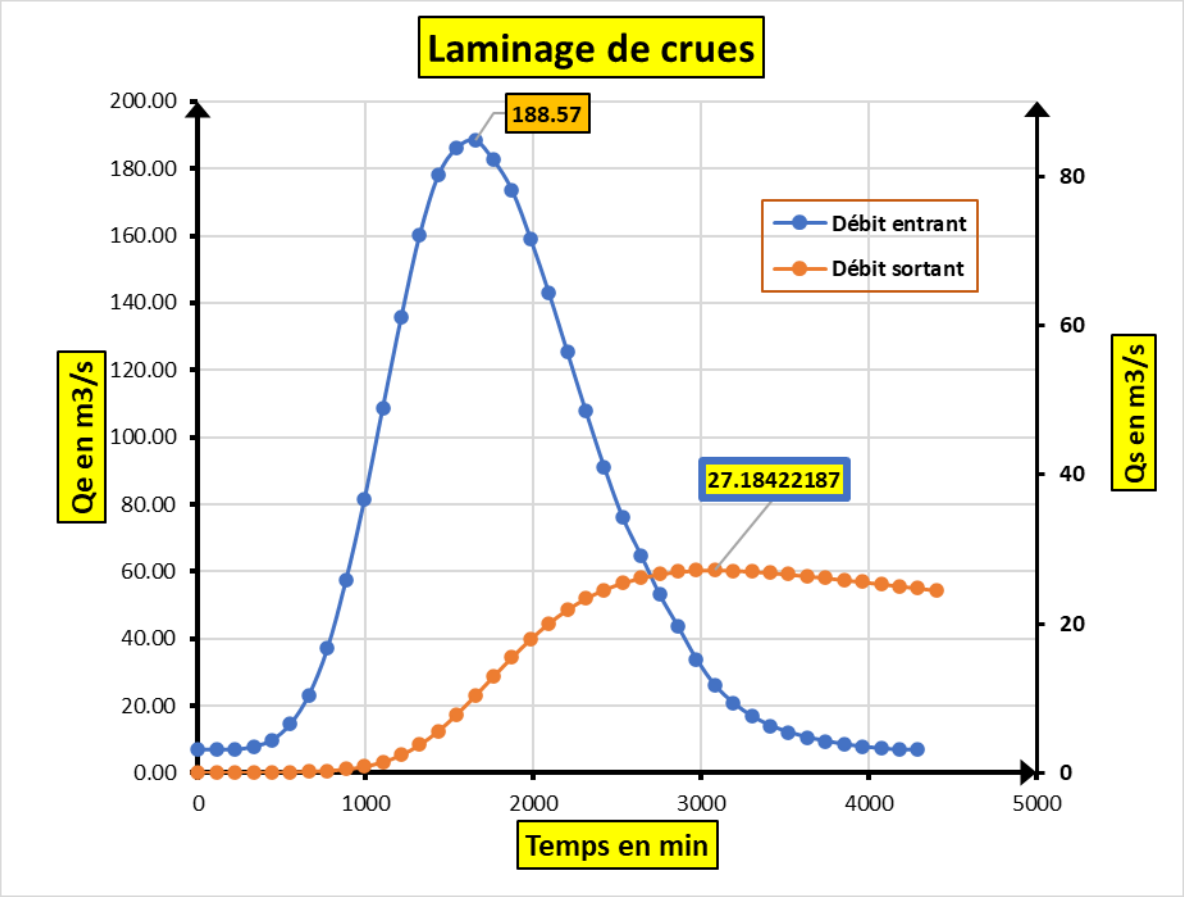


***Figure IV-12** : Laminage des crues*

IV.3.2. Régulation des crues et d'érosion par aménagement des fosses antiérosives en versant

L'aménagement des fosses antiérosives est une technique simple et efficace pour limiter les risques des inondations qui se produisent dans le lit de la rivière et l'érosion en même temps.

Leur fonctionnement est basé sur le principe de la rétention d'eau. Lorsqu'il pleut, l'eau est retenue dans les fosses, permettant ainsi une infiltration lente et progressive dans le sol en réduisant leur énergie de frappe, empêchant ainsi l'érosion.

En fin, l'aménagement des fosses antiérosives peut être réalisé à différents niveaux en fonction de la taille et de l'emplacement des zones à risque. Des fosses volumineuses peuvent être créées pour les grandes pentes, tandis que des fosses plus petites peuvent être utilisées pour les zones moins exposées au risque de l'érosion.

IV.3.2.1. Evaluation de la lame d'eau intercepté par des fosses antiérosif

IV.3.2.1.1. Calcul de la dénivelée entre deux fosses antiérosives consécutifs

Il existe plusieurs approches pour le dimensionnement des fosses antiérosives. Les approches utilisées dans la présente étude sont basées sur la formule de Saccardy et la formule de Ramser développe dans le point pour déterminer la dénivelée entre deux fosses antiérosives. Le tableau IV-15 montre les résultats de dimensionnement selon les différentes approches.

Tableau IV-15*: Résultats de dénivelée entre deux fosses antiérosives*

Désignation	**Unité**	**Valeur**
Pente moyenne du bassin versant	%	5,21
Évaluation de la dénivelée entre deux fosses		
Formule de RAMSER	m	1,01
Formule utilisée dans la région des USA	m	1,07
Formule de SACCARDY (Algérie) : H1	m	8,00
Formule de SACCARDY (Algérie) : H2	m	2,00
Formule de BUGEAT (Tunisie) : H	m	2,617
Dénivelée considérée entre des fosses consécutives : H	**m**	**4,50**

IV.3.2.1.2. Evaluation de la pluie interceptée par les fosses antiérosives

La quantité de l'eau interceptée dépendra de la taille, de la forme et de la longueur des fosses ainsi que la quantité de pluie qui tombe. Plus la fosse est grande et profonde, plus elle pourra intercepter beaucoup d'eau. En général les fosses antiérosives peuvent intercepter20% à 50% de l'eau qui tombe sur la zone de protection.

Donc, partant de la dénivelée entre deux fosses considérées (cfr tableau IV-15), le logiciel ArcGIS 10.3 nous a permis de trouver la longueur totale développée par tous les fossés. Ensuite le volume pouvant être intercepté par les fosses a été calculé en multipliant la longueur totale par les sections transversale d'une fosse. Les résultants de la lame d'eau interceptée pour les différentes sections sont présentés dans le tableau IV-16 et Fig.IV-12.

Tableau IV-16*: Lame d'eau intercepté pour les différentes sections des fosses antiérosifs*

Section des fosses antiérosifs			**50x60cm²**	**60x70cm²**	**70x90cm²**	**80x100cm²**
Désignation	Symbole	Unité	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur
Dénivelle entre deux courbes	H	m	4,50	4,500	4,5	4,50
Largeur de fond	B	m	0,50	0,60	0,70	0,80
Hauteur	H	m	0,60	0,70	0,90	1,00
Altitude de la fosse la plus basse	Z_{min}	m	1500,0	1500,00	1500,00	1500,00
Longueur totale développée par les courbes de niveau équidistant de 4,5m	∑Li	m	94281902,90	94281902,90	94281902,90	94281902,90
Taux d'exécution	Ƭ		0,600	0,60	0,60	0,60
Longueur totale considérée	Lt	m	56569141,73	56569141,73	56569141,7	56569141,73

Volume d'eau interceptée	V	m^3	16970742,52	23759039,53	35638559,29	45255313,38
Surface totale du BV	A	m^2	1898700000	1898700000	1898700000	1898700000
Lame d'eau interceptée	I_{add}	mm	**8,94**	**12,51**	**18,77**	**23,83**

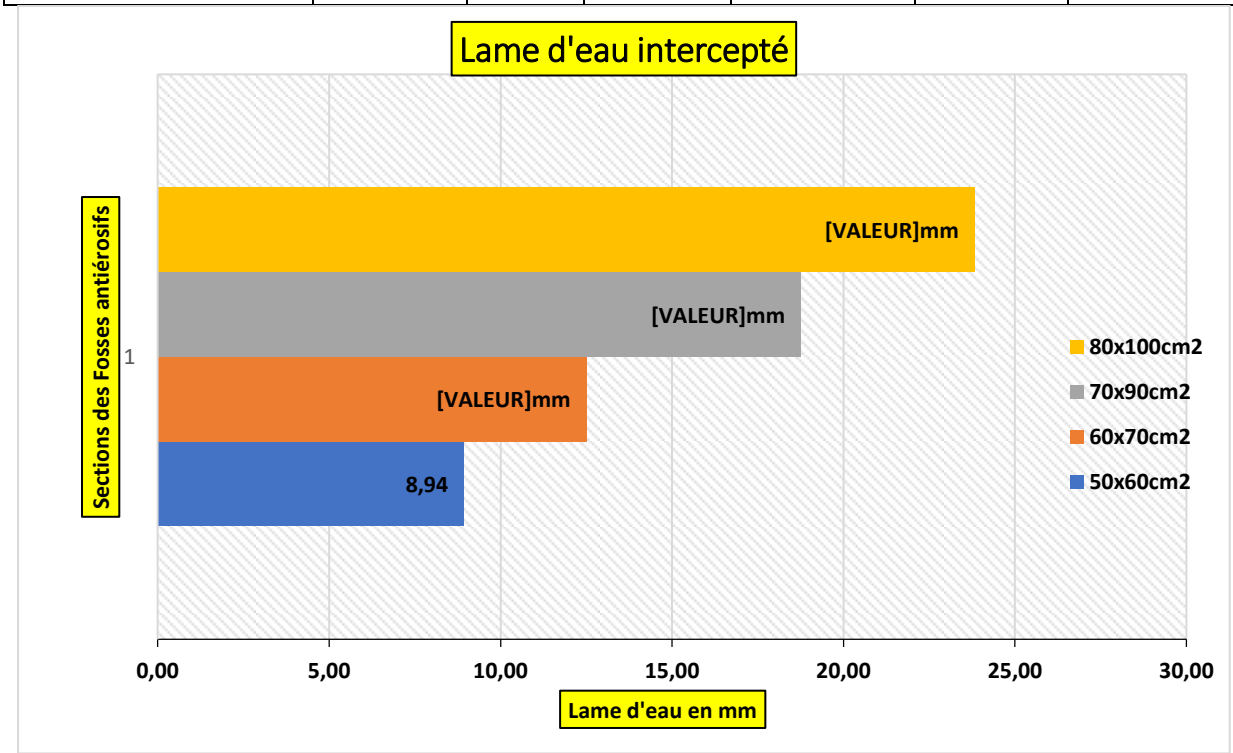


***Figure IV-13** : Lame d'eau intercepté pour les différentes sections des fosses antiérosif*

IV.3.2.1.3. Evaluation de la pluie nette

Les résultats des lames d'eau interceptée pour les différentes sections des fosses antiérosives ci-haut présente (cfr fig. IV-12), nous a permis d'évaluer la pluie nette et débit de crues de pointe pour chaque section de ces derniers pour une période de retour de 100 ans, les résultats sont présentés dans le tableau IV-17 ci-dessous.

***Tableau IV-17**: Synthèses d'évaluation de la pluie nette et débit des crues résultante de l'aménagement des fosses antiérosives dans la zone rurale du bassin versant pour les différentes sections des fosses antiérosifs*

N°	Fosses antiérosifs	Pluie nette(mm)	Débit de pointe (m^3/s)
1	50X60cm^2	10.27	137.74
2	60X70cm^2	8.93	119.31
3	70X90cm^2	6.76	89.87
4	80X100cm^2	5.19	68.81

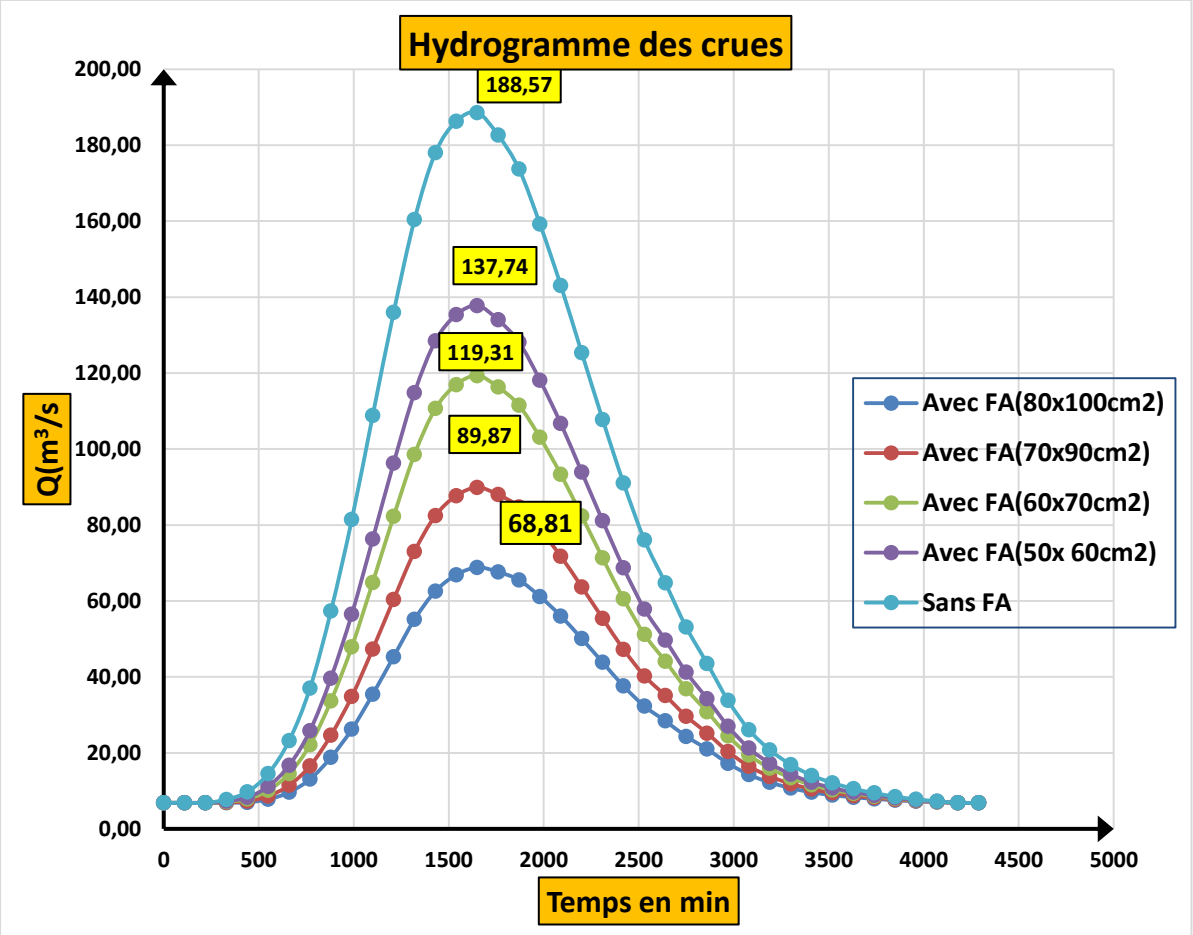


***Figure IV-14**: Débits de crues avec les FA et Sans FA pour une période de retour de 100 ans*

IV.4. Conclusion du chapitre quatre

Le quatrième chapitre est consacré à l'évaluation d'une crue centennale par le modèle hydrologique de transformation pluie-débit dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza et de la zone pouvant être inondable afin d'atténuer les effets de cette dernière par les scénarios d'aménagement (aménagement en lit de la rivière et en versants du bassin de la zone d'étude).

Les résultats de ce chapitre montrent que la situation actuelle du bassin versant résulte d'un débit de crues de pointe centennale de **188.57 m3/s** associée à une zone inondable **de 5.02 km2** dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza.

Pour le scenario d'aménagement dans les versants, les résultats montrent que si on prévoit l'aménagement du bassin versant de la rivière Ruvyironza avec les fosses antiérosives actuellement recommandées au Burundi depuis 2016 de section transversale de **50x60cm^2** équidistant à une dénivelée de 4.5m pour la taux d'exécution de **60% ;** le débit de pointe sera de **137.74 m^3/s** soit un laminage de **26.95% ;** avec les fosses antiérosives des sections transversales de **60x70cm^2**, **70x90cm2 et 80x100cm^2,** les débits de pointe seront successivement de **119.31 m^3/s, 89.87 m^3/s** et **de 68.81 m^3/s soit** les laminages de **36.72%,52.28%** et de **63.57%.**

Quant au scenario d'aménagement en lit de la rivière avec un barrage de retenue ; le débit entrant de **188.57 m3/s** sera régulé jusqu' à **27.18m3/s s**oit un laminage de crues de **85.58 % et** la superficie inondable passera **de 5.02 km2 à 1.62 km2.**

Signalons que le bassin versant faisant objet de l'étude est très exposé au risque d'érosion avec perte en sols moyenne du bassin versant de **277.188 tonne/han/an ou 3.02mm/an;** l'aménagement des versants avec des fosses antiérosives maitriseront l'érosion en interceptant l'eau de pluie avant qu'elle ne puisse emporter les particules du sol, réduisant la vitesse de l'eau et empêchant l'érodabilité du sol dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza.

CHAPITRE V : CONCLUSION GENERAL ET RECOMMANDATIONS

V.1. Conclusions

L'objectif de cette étude était d'évaluer les impacts d'aménagement du bassin versant sur les crues et les pertes en terres, afin d'étudier les possibilités d'atténuer leurs effets négatifs, en particulier les inondations des bas-fonds et des marais pendant la saison de grande pluie dite saison B.

L'étude s'est basée sur la modélisation de l'érosion hydrique avec l'équation universelle de perte en terres (RUSLE) intégrée dans un système d'information géographique (SIG) à l'aide du logiciel ArcGIS version 10.3.

La modélisation hydrologique de transformation pluie-débit a été faite avec la méthode dite méthode d'hydrogramme unitaire afin de dégager les débits des crues ; le laminage de ces derniers a été fait par la modélisation hydraulique avec la méthode de Pulls modifiée (Pulls modified method).

La superficie des zones inondables a été délimitée par l'utilisation combinée du logiciel HEC-RAS 5.05 et ArcGis 10.3.

Les laminages des crues ont été calculés à base de deux scénarios dont l'aménagement en versant par les différentes dimensions des fosses antiérosives et aménagement en lit de la rivière par un ouvrage de retenue.

Tous ces deux scénarios ont été faits dans le but d'examiner leurs impacts sur la réponse hydrologique ainsi que sur l'érosion hydrique.

Les résultats qui ont été obtenus dans cette étude montrent pour les pertes en terre, que la classe de l'érosion faible couvre plus de la moitié de la superficie totale du bassin versant de la rivière Ruvyironza soit **53 %** et le reste est soumis à l'érosion des classes modérée, élevée et extrêmement élevée qui couvrent successivement **19.7%,20.1%,7.6 %** de la superficie totale du bassin versant de la zone d'étude avec à une perte en terres totale moyenne du bassin versant de **277.188 tonne/han/an** soit une perte de **3.02mm/an,** et pour l'évaluation des crues, une crue centennale de **de 188.57 m3/s** associé à une zone inondable de **5.02km2** a été trouvée.

Les résultats obtenus lors de l'atténuation des crues montrent que l'aménagement des versants du bassin versant de la rivière Ruvyironza avec les fosses antiérosives équidistant à un dénivelé de **4.5m** des dimensions transversales de **50x60cm^2 ,** le débit de pointe sera de **137.74 m^3/s** soit une laminage de **26.95% ;** et avec les fosses antiérosifs des sections transversales de **60x70cm^2 ,70x90cm^2 et 80x100cm^2** auront une réduction des crues respectivement de de **119.31 m^3/s, 89.87 m^3/s** et **de 63.57 m^3/s,** soit les laminages de **36.72%,52.28 %** et de **63.57%.**

L'aménagement des versants avec ces fosses antiérosives maitriseront l'érosion en interceptant l'eau de pluie avant qu'elle ne puisse emporter les particules du sol, réduisant la

vitesse de l'eau et empêchant l'érodabilité du sol dans le bassin versant de la rivière Ruvyironza.

Quant à l'aménagement en lit de la rivière, les résultats se sont limités sur une analyse topographique pour déterminer l'emplacement idéal d'un barrage de retenue avec une surface inondée moins importante et un volume de retenue plus important pouvant être exploitée dans les différentes activités notamment en pisciculture et en irrigation, etc. Ces résultats montrent que la topographie de l'emplacement exige une hauteur utile de **18 m** pour avoir un volume **17493666.11m3**, une surface inondée de **1623006.525 m2**.

Le débit de crues entrant de **188.57 m3/s** sera régulé jusqu' à **27.18m3/s s**oit un laminage de crues de **85.87 % et** la superficie inondable passera **de 5.02 km2 à 1.62 km2.**

Avec les résultats de ce travail, on peut garantir que ça ne sera pas possible d'atteindre l'objectif numéro 3 ci-haut évoqué qui faisant l'un des objectifs de la vision du pays, puisque en **2040** les pertes en terres totale cumulé seront de **51.34 mm** de la couche arable et de **111.74 mm** en **2060.**

Il est important de porter cette situation à l'attention des décideurs du pays afin qu'ils puissent prendre les mesures suggérées dans ce document ou d'autres pour protéger la zone et éviter des conséquences catastrophiques afin de préserver les objectifs du pays pour l'avenir puisque

V.2. Recommandations

Partant des résultats obtenus et des problèmes rencontrés lors de la réalisation du présent travail, les recommandations suivantes ont été formulées :

Aux décideurs du pays de :

- Créer un organe indépendant et spécialisé chargé de la consultation et de l'analyse des résultats des diverses études et mémoires pertinents, afin que les décisions futures puissent être prises de manière éclairée et sur base des informations les plus récentes et les plus fiables.
- Investir dans des études et recherches pour mieux comprendre les processus hydrologiques et sédimentologiques dans tous les bassins versants du pays.
- Eduquer, sensibiliser et encourager la population sur les pratiques agricoles plus durables, qui favorisent la conservation des sols, la réduction de l'érosion et la préservation de la qualité de l'eau.
- Maintenir et assurer la mise en œuvre et suivi effectif du projet « Ewe Burundi urambaye » dans la zone d'étude dont plus de la moitié de la superficie est couverte d'une végétation pauvre.

Au Bureau de centralisation géomatique (BCG) de :

- Mettre à jour leur base de données notamment le niveau de résolution des données rasteurs et les limites administratives des différentes localités.

A l'institut géographique du Burundi (IGEBU) de :

- Faciliter l'acquisition des données bien traitées et des longues périodes aux étudiants lors des travaux de recherche.

A l'office Burundais pour la protection de l'environnement (OBPE) que :

- Les efforts soient investis dans l'amélioration de la communication entre les institutions pour faciliter la collecte des données et la collaboration future.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages spéciaux

- **FAO. (2018),** L'aménagement des bassins versant en action-leçons tirées des projets de terrain de la FAO », Rome.186pp.
- **Hicintuka C. & Bararwandika A. (2016),** « Directive et bonnes pratiques de gestion durable des terres au Burundi », Ministère de l'eau, de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme & Ministère de l'agriculture et de l'élevage, Bujumbura
- **Laborde, J.P (2000).** « Éléments d'hydrologie de surface. Université de Nice-Sophia Antipolis » France.
- **Musy, André et Higy, Christophe. 1998.** Hydrologie appliquée. Bucarest : H*G*A, 1998.
- **M. Roche, 1963**, Hydrologie de surface. Gauthier - villars, Paris
- **Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme .2016**(directives et bonnes pratiques de gestion durable des terres au Burundii).
- **Musy, A., & Higy, C. (2003).** Hydrologie. Une science naturelle. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires Romandes.
- **Mockus, V. (1949).** Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms. Exhibit A of appendix B. Interim Survey Report. Grand (Neosho) River Watershed. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture.
- **Musy, A., & Randin, N. (1999).** Hydrologie-crues-inondations, chapitre 9.

- **Mministère de l'environnement, de l'agriculture et de l'élevage.2019** (troisième communication nationale sur les changements climatiques (Tc cc))2019
- **Wischmeier and D.D. Smith,** Predicting rainfall erosion losses - a guide for conservation planning Science, U.S. Dept. Of Agriculture. Agric. Handbook, Washington, D.C., 1978, 537p.
- **AUBERT.G. 1965**.classification des sols : tableux des classes, sous -classes, groupe et sous-groupe de sol utilisés par la section de pédologie de l'O.R.S.T.O.M, 1965, 272, 274, 279, 284 p.ISN 27184
- **Payet, E. Dumas, P., et Pennober, G. 2012**.Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, vol. 11, n° 3, 2012, P 6 et 8.

Mémoires et Thèses

- **Kheira, M. (2012).** Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued boumessaoud (tafna nw-algerien). Mémoire de magister, option, université abou bekr belkaid–tlemcen.
- **Thédomir RUSHIRUMUHIGWA. 1997.**Ecole polytechnique fédérale de lausane.1997(Rôle de bananier dans le fonctionnement des exploitation agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (Application au cas de la région de KIRIMIRO-BURUNDI).
- **S. BENAMAR**, Quantification de l'Érosion au Niveau du Bassin de Tigriga par l'Équation Universelle de Perte en Sol, Mémoire de Master en sciences des sols et environnement, Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès, 84p, 2009.
- **Yjjou**, **2009.**Modélisation de l'érosion hydrique via le SIG et l'équation universelle de perte en sol au niveau du bassin versant d'Oum ErRbia, Mémoire de Master en sciences des sols et environnement, Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès, 104p, 2009.
- **CHABAAN Chayma. Janvier 2016** (modélisation de l'érosion hydrique par le modèle SEAGIS. Cas du bassin versant du barrage siliana)
- **Jaoued Moez. 2007**. Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du KEBIR-MELLIANE et gestion des eaux du barrage Bir M'cherga (Tunisie septentrionale. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunisie, p104, 105.
- **Dialo Bigirimana. 2021**.contribution a l'évaluation de l'impact de l'aménagement des bassins versants sur la dynamique des cours d'eau : cas du bassin versant de la rivière Muha en république du BUrundi, mémoire de Mastère en sciences de l'ingénieur, Université du Burundi.
- **Eugenie Twagirayezu.2021.** Contribution a l'étude de la gestion intégrée des ressources en eau pour une irrigation optimisée et une lutte contre les inondations : cas du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en république du Burundi, Mémoire de Mastère en sciences de l'ingénieur, Université du Burundi.
- **Dieudonne Ndezako.2021**. Maitrise de la dynamique de l'érosion hydrique a l'aide de la télédétection et d'un modèle agro-hydrologique de SWAT : cas du bassin versant de la rivière Kanyosha en république du Burundi, Mémoire de Mastère en sciences de l'ingénieur, Université du Burundi.
- **Zahar Y.1994.** Modélisation spatiale et temporelle des précipitations extrêmes et érosives en Tunisie centrale, en vue de l'aménagement des petits bassins hydrologiques. Thèse de Doctorat. Université de Nice Sophia Antipolis, France.

Articles

- **Abdellah El Hmaidi .03 septembre.2014**(Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia)
- **A. Sadiki, S. Bouhlassa, J. Auajjar, A. Faleh and J. Macaire**, Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 26, 2004, 69-79
- **Foster et Meyer, 1972.**Present and Prospective technology for predicting sediment yield and sources.

Sites internet

- (https://isanganiro.org/2016/01/25/la-centrale-hydroelectrique-de-ruvyironza-endommagee/
- https://bi.chm-cbd.net/sites/bi/files/2020-09/Cadr-fonction-proj-resto-resil-paysa-bi.pdf
- http://physchileborgne.free.fr/cours/3.2.bassin_versant.pdf
- https://forum-developpement.bi/upload_programme/Vision_BDI%202040_2060.pdf
- Webarcive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-world-soil-databest/HTML/
- https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/
- https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/
- https://livingatlas.arcgis.com/landcover/
- https://www.google.bi/books/edition/Bulletin_de_la_Soci%C3%A9t%C3%A9_belge_d_%C3%A9tudes/DQUlAQAAMAAJ?hl=fr&gbpv=0&bsq=Bolline%20et%20Rousseau%20(1978)
- https://www.google.bi/search?q=%28Le+Bissonnais+et+al.%2C+2002%29.+&tbm=bks&hl=fr&gl=bi&ei=9X7HZMKRFK6Wxc8P7fyI8A8&ved=0ahUKEwiC4OuH0biAAxUuS_EDHW0-Av4QsJ4FCAM
- https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/066/47066765.pdf
- https://doi.org/10.1002/hyp.1098
- https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.1098
- https://earthexplorer.usgs.gov/

ANNEXES

Annexes 1 : Détails des calculs des crues pour une période de retour de 25 ans

Répartition de la pluie nette pour T=25ans

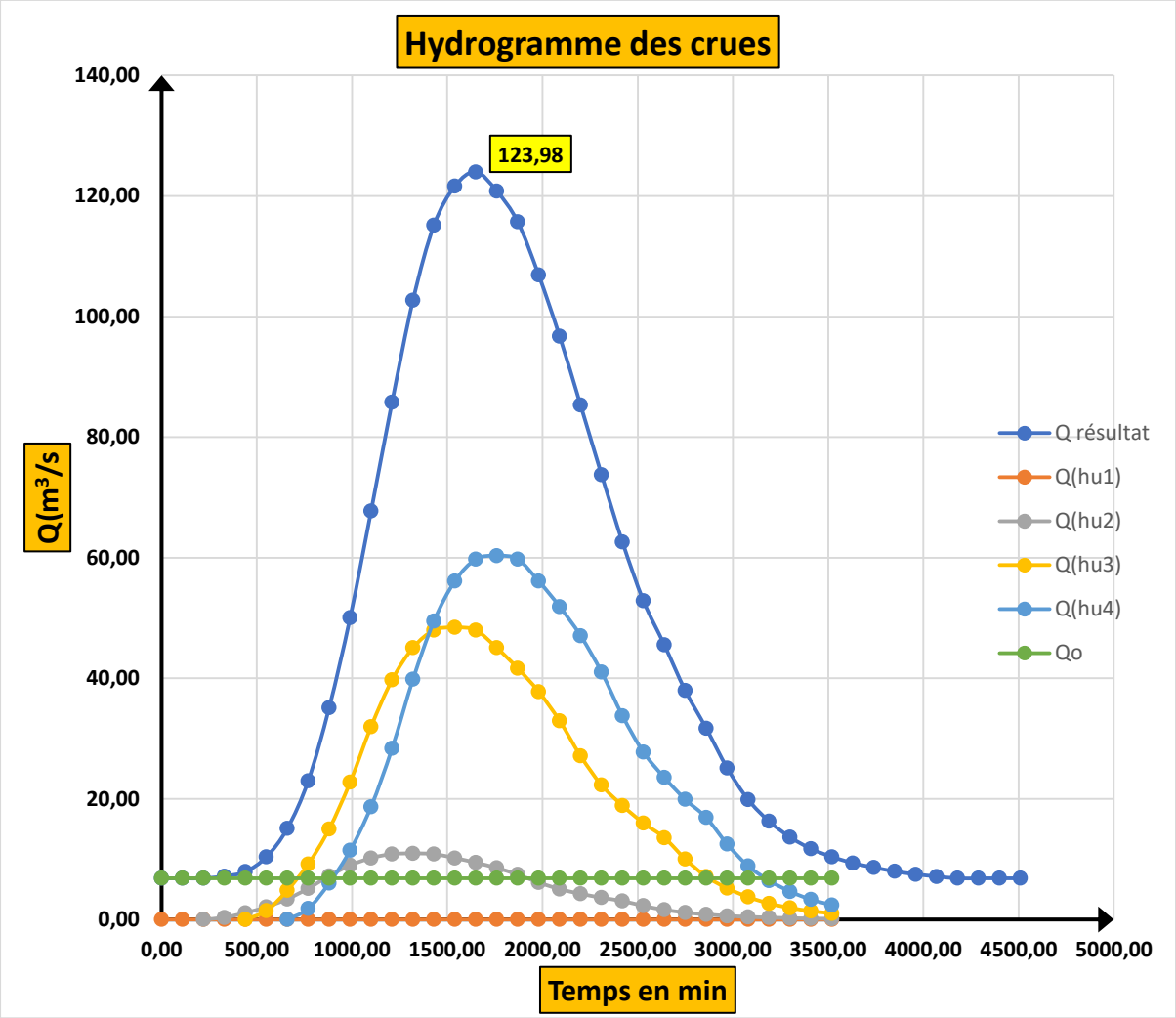
hu1	hu2	hu3	hu4	Pluie nette totale
0.00	0.58	2.558	3.19	6.32

Résultats de calcul de l'hydrogramme des crues pour T=25ans

Q(m3//s)	T(min)	hu1	hu2	hu3	hu4	Qo	Qe(m3/s)
0.00	0.00	0.00				6.84	6.84
0.57	110.00	0.00				6.84	6.84
1.89	220.00	0.00	0.00			6.84	6.84
3.60	330.00	0.00	0.33			6.84	7.17
5.87	440.00	0.00	1.10	0.00		6.84	7.94
8.90	550.00	0.00	2.08	1.45		6.84	10.38
12.50	660.00	0.00	3.40	4.85	0.00	6.84	15.09
15.53	770.00	0.00	5.16	9.21	1.81	6.84	23.01
17.62	880.00	0.00	7.24	15.02	6.03	6.84	35.13
18.75	990.00	0.00	9.00	22.77	11.47	6.84	50.07
18.94	1100.00	0.00	10.20	31.98	18.71	6.84	67.73
18.75	1210.00	0.00	10.86	39.73	28.36	6.84	85.79
17.62	1320.00	0.00	10.97	45.06	39.83	6.84	102.70
16.29	1430.00	0.00	10.86	47.97	49.48	6.84	115.15
14.77	1540.00	0.00	10.20	48.45	56.12	6.84	121.62
12.88	1650.00	0.00	9.43	47.97	59.74	6.84	123.98
10.61	1760.00	0.00	8.56	45.06	60.35	6.84	120.80
8.71	1870.00	0.00	7.46	41.67	59.74	6.84	115.71
7.39	1980.00	0.00	6.14	37.79	56.12	6.84	106.90
6.25	2090.00	0.00	5.05	32.95	51.90	6.84	96.73
5.30	2200.00	0.00	4.28	27.13	47.07	6.84	85.32
3.92	2310.00	0.00	3.62	22.29	41.04	6.84	73.78
2.78	2420.00	0.00	3.07	18.90	33.79	6.84	62.60
2.03	2530.00	0.00	2.27	15.99	27.76	6.84	52.86
1.46	2640.00	0.00	1.61	13.57	23.54	6.84	45.55
1.04	2750.00	0.00	1.17	10.03	19.91	6.84	37.96
0.76	2860.00	0.00	0.84	7.12	16.90	6.84	31.70
0.55	2970.00	0.00	0.60	5.18	12.49	6.84	25.12
0.40	3080.00	0.00	0.44	3.73	8.87	6.84	19.88
0.28	3190.00	0.00	0.32	2.66	6.46	6.84	16.28
0.21	3300.00	0.00	0.23	1.94	4.65	6.84	13.66
0.09	3410.00	0.00	0.16	1.41	3.32	6.84	11.73

0.00	3520.00	0.00	0.12	1.02	2.41	6.84	10.39
	3630.00	0.00	0.05	0.73	1.75	6.84	9.37
	3740.00	0.00	0.00	0.53	1.27	6.84	8.64
	3850.00		0.00	0.24	0.91	6.84	7.99
	3960.00		0.00	0.00	0.66	6.84	7.50
	4070.00		0.00		0.30	6.84	7.14
	4180.00		0		0	6.84	6.84

Hydrogramme des crues pour T=25ans



Annexes 2 : Détails des calculs des crues pour une période de retour de 50ans

Répartition de la pluie nette pour T=50ans

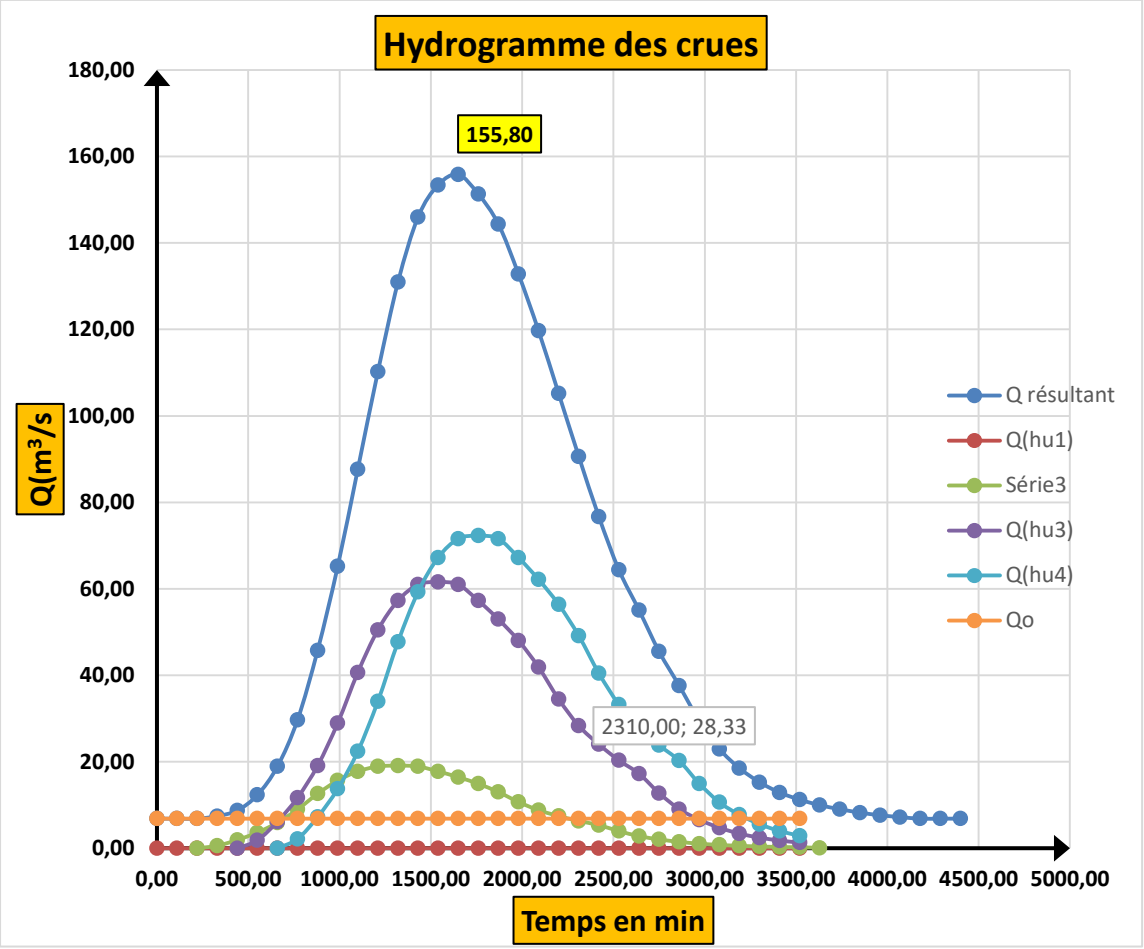
hu1	hu2	hu3	hu4	Pluie nette totale
0.00	1.01	3.251	3.82	8.08

Résultats de calcul de l'hydrogramme des crues pour T=50ans

Q(m3//s)	T(min)	hu1	hu2	hu3	hu4	Qo	Qe(m3/s)
0.00	0.00	0.00				6.84	6.84
0.57	110.00	0.00				6.84	6.84
1.89	220.00	0.00	0.00			6.84	6.84
3.60	330.00	0.00	0.57			6.84	7.41
5.87	440.00	0.00	1.91	0.00		6.84	8.75
8.90	550.00	0.00	3.63	1.85		6.84	12.32
12.50	660.00	0.00	5.92	6.16	0.00	6.84	18.92
15.53	770.00	0.00	8.98	11.70	2.17	6.84	29.69
17.62	880.00	0.00	12.61	19.09	7.23	6.84	45.77
18.75	990.00	0.00	15.67	28.94	13.73	6.84	65.19
18.94	1100.00	0.00	17.77	40.64	22.41	6.84	87.67
18.75	1210.00	0.00	18.92	50.50	33.97	6.84	110.23
17.62	1320.00	0.00	19.11	57.27	47.71	6.84	130.93
16.29	1430.00	0.00	18.92	60.97	59.27	6.84	146.00
14.77	1540.00	0.00	17.77	61.58	67.23	6.84	153.42
12.88	1650.00	0.00	16.43	60.97	71.56	6.84	155.80
10.61	1760.00	0.00	14.91	57.27	72.29	6.84	151.30
8.71	1870.00	0.00	12.99	52.96	71.56	6.84	144.36
7.39	1980.00	0.00	10.70	48.03	67.23	6.84	132.80
6.25	2090.00	0.00	8.79	41.88	62.17	6.84	119.67
5.30	2200.00	0.00	7.45	34.49	56.38	6.84	105.16
3.92	2310.00	0.00	6.31	28.33	49.15	6.84	90.63
2.78	2420.00	0.00	5.35	24.02	40.48	6.84	76.69
2.03	2530.00	0.00	3.96	20.32	33.25	6.84	64.37
1.46	2640.00	0.00	2.81	17.24	28.19	6.84	55.08
1.04	2750.00	0.00	2.04	12.75	23.85	6.84	45.49
0.76	2860.00	0.00	1.47	9.05	20.24	6.84	37.60
0.55	2970.00	0.00	1.05	6.59	14.96	6.84	29.44
0.40	3080.00	0.00	0.76	4.74	10.63	6.84	22.97
0.28	3190.00	0.00	0.55	3.39	7.73	6.84	18.52
0.21	3300.00	0.00	0.40	2.46	5.57	6.84	15.27
0.09	3410.00	0.00	0.29	1.79	3.98	6.84	12.89

0.00	3520.00	0.00	0.21	1.29	2.89	6.84	11.23
	3630.00	0.00	0.10	0.92	2.10	6.84	9.96
	3740.00	0.00	0.00	0.68	1.52	6.84	9.04
	3850.00		0.00	0.31	1.08	6.84	8.23
	3960.00		0.00	0.00	0.80	6.84	7.64
	4070.00		0.00		0.36	6.84	7.20
	4180.00		0		0	6.84	6.84

Hydrogramme des crues pour T=50ans



Annexes 3 : **Détails de calculs des débits de crues par l'analyse statistiques pour les différentes périodes de retour avec les données de station de Ruvyironza-Kibaya**

			X(T) Loi normale		Pearson III		Gumbel	
T	**P(T) (dépassement)**	**F(T) (non dépassement)**	**Z(T) (Variable réduite)**	**Débit(m3/sec)**	**K(T)**	**Débit(m3/sec)**	**K(T)**	**Débit(m3/sec)**
2	0.500	0.50	0	61.7473	-0.00041	61.7368	0.285769	69.0415
5	0.200	0.80	0.8416212	83.2296	0.841501	83.2265	1.1694984	91.5986
10	0.100	0.90	1.2815516	94.4587	1.281815	94.4655	1.7546042	106.533
15	0.067	0.93	1.5010859	100.062	1.5016	100.075	2.084716	114.959
20	0.050	0.95	1.6448536	103.732	1.645554	103.75	2.3158517	120.859
25	0.040	0.96	1.7506861	106.433	1.751534	106.455	2.4938869	125.403
30	0.033	0.97	1.8339146	108.558	1.834885	108.583	2.6387236	129.1
35	0.029	0.97	1.9022165	110.301	1.903292	110.329	2.7608201	132.217
40	0.025	0.98	1.959964	111.775	1.961131	111.805	2.8663582	134.911
45	0.022	0.98	2.0098748	113.049	2.011123	113.081	2.959298	137.283
50	0.020	0.98	2.0537489	114.169	2.055071	114.203	3.0423291	139.402
100	0.010	0.99	2.3263479	**121.127**	2.32816	**121.173**	3.5867216	**153.298**
1000	0.001	1.00	3.0902323	140.625	3.093745	140.715	5.3855647	199.213

Annexes 5 : Débits d'étiage moyenne de la rivière Ruvyironza

			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
	F(x)	U(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	Q(x)	MOYENNE
Ann.Séche	0.2	-0.475	7.689	9.002	10.5	11.3	8.7	5.1	4.218	4.67	4.3962	4.3918	5.3290	6.732122	**6.849**