Université du Burundi

Dépôt institutionnel officiel **https://repository.ub.edu.bi**

Grenier du Savoir du Burundi Mémoires et Thèses

2023

« Etude Comparative des Solutions Potentielles Pour la Stabilisation des Lits de Cour d'eau en Milieu Urbain : Cas de la Rivière Kanyosha dans la Commune Muha, Bujumbura-Burundi »

Arakaza, Arnaud

UB, FSI

https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1985

Téléchargé depuis le dépôt institutionnel officiel de l'Université du Burundi

République du Burundi

Ministère de l'éducation nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Année - Académique: 2021-2022

ETUDE COMPARATIVE DES SOLUTIONS POTENTIELLES POUR LA STABILISATION DES LITS DE COURS D'EAU EN MILIEU URBAIN :

CAS DE LA RIVIERE KANYOSHA DANS LA COMMUNE MUHA, BUJUMBURA-BURUNDI.

Mémoire

Présenté publiquement par :

Arnaud ARAKAZA

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

Soutenu le 14 /09 /2023 devant le jury composé de *:*

Dr - Ir. NZEYIMANA Joseph	**: Président**
Dr - Ir. MVUYEKUYE Jean Claude	**: Lecteur principal**
Dr - Ir. NIYONGABO Henri	**: Directeur**
Dr-Ir. NIBIGIRA Léonidas	**: Membre**

Bujumbura, Septembre 2023

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Dr - Ir. NZEYIMANA Joseph : Président du jury

Dr - Ir. MVUYEKUYE Jean Claude : Lecteur principal

Dr - Ir. NIYONGABO Henri : Directeur

Dr-Ir. NIBIGIRA Léonidas : Membre

DEDICACE

Ce travail est dédié :

- Aux chercheurs en hydrologie et hydraulique appliquées ;
- A mes Parents, merci pour tout ce que vous avez fait pour moi, je suis tellement reconnaissant de vous avoir comme parents. Que Dieu les protège et la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse les combler de bonheur ;
- A mes chers frères et sœurs : Louis- Marie, Alain, Donald, Huguette, Gloria et Ailène Joy ;
- A toutes mes oncles et tantes
- A toutes mes cousins et cousines
- A tous ceux qui me sont chers, aux personnes qui m'ont aidée et encouragée de près ou de loin, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagnées durant mon chemin d'étude.

REMERCIEMENT

Je voudrais tout d'abord remercier le Tout Puissant, de m'avoir donné la force de surmonter les défis de la vie, j'apprécie tout ce qu'il a fait pour moi, Il était là pendant toutes mes études. J'adresse toute ma reconnaissance à mon Directeur de ce mémoire, Dr-Ir NIYONGABO Henri, qui m'a aidé à développer le thème de ce travail. Sa patience, sa disponibilité et surtout ses conseils, ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier, le conseil scientifique du programme de master en génie civil, Aménagement et maitrises des projets, qui a suivi de près notre état d'avancement ; en particulier Dr- Ir MVUYEKURE Jean - Claude, le responsable de ce dernier.

Un grand remerciement aux services de l'IGEBU, auprès desquels j'ai obtenu respectivement les données pluviométriques et les donnes relatives aux études. Ils m'ont accueilli et servi avec beaucoup de gentillesse.

Enfin Merci également aux membres du jury, ici présent, Pour les investissements dans l'évaluation de ce travail et leurs rétroactions qui vont certainement améliorer la qualité.

RESUME

L'objectif principal du présent mémoire est de mener une étude comparative des solutions potentielles pour la stabilisation des lits de cours d'eau en milieu urbain et de faire un choix bien réfléchi pour le cas de la rivière KANYOSHA.

Le bassin versant de la KANYOSHA est situé à l'ouest de la crête CONGO-NIL ; partiellement dans la région naturelle des MIRWA et en partie dans la plaine de l'IMBO. Il a une forme allongée au Sud-Est et Nord-Ouest. Il est limité comme suit au Nord, par le bassin versant de la rivière MUHA ; au Sud, par le bassin versant de la rivière KIZINGWE et à l'Est, par la crête CONGO-NIL.

Le travail est articulé autour de Cinq chapitres avec une introduction au 1er **chapitre** et une conclusion à la fin du travail,

La revue de la littérature au **2ème Chapitre** et **le 3ème Chapitre** identifie les généralités sur la zone de travail en caractérisant le bassin versant de la rivière KANYOSHA **;** Calcul des débits des crues de la rivière KANYOSHA est développé au **4ème chapitre ;**

L'étude d'impact environnementale est présentée **au 5ème** chapitre.

En fin, pour la solution, on a fait une comparaison des deux méthodes, l'un s'agit de berges maçonnées et radier en béton dans un tronçon de 4 kilomètres, l'autre par gabionnage. Ces solutions coûtent une somme de dix-huit milliard cent quatre -vingt-seize millions sept cent trente-huit mille sept cent cinquante Francs Burundais(**18.196.738.750fb**) et une somme de Vingt -deux milliard neuf cent quatre-vingt-huit millions huit cent sept milles cent trente Francs Burundais (**22 .988 .837 .130**) respectivement.

Mot clés : la rivière, lit, cours d'eau, en amont, en aval, radier,

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to conduct a comparative study of potential solutions for the stabilization of streambeds in urban areas and to make a well-considered choice for the case of the KANYOSHA River.

The KANYOSHA watershed is located west of the Congo-Nile ridge; partly in the MIRWA natural region and partly in the IMBO plain. It has an elongated shape to the southeast and northwest. It is bounded as follows to the north, by the watershed of the MUHA River; to the south, by the catchment area of the KIZINGWE River and to the east, by the CONGO-NIL ridge. The work is structured around five chapters with an introduction to the 1st chapter and a conclusion at the end of the work,

The literature review in Chapter 2 and Chapter 3 identifies generalities about the work area by characterizing the KANYOSHA River watershed; Calculation of flood flows of the KANYOSHA River is developed in the 4th chapter; the environmental impact assessment is presented in Chapter 5.

Finally, for the solution, a comparison was made of the two methods; one is masonry banks and concrete slab in a 4-kilometer section, the other by gabionnage. These solutions cost a sum of eighteen billion one hundred and ninety-six million seven hundred and thirty-eight thousand seven hundred and fifty Burundian francs (18,196,738,750 Bif) and a sum of twenty-two billion nine hundred and eighty-eight million eight hundred and seven thousand one hundred and thirty Burundian francs (22,988, ,837, 130) respectively.

Keywords: river, bed, stream, upstream, downstream, raft,

TABLE DE MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY ..... **i**

DEDICACE ..... **ii**

REMERCIEMENT ..... **iii**

RESUME ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

TABLE DE MATIERES ..... **vi**

LISTE DES TABLEAUX ..... **ix**

LISTE DES FIGURES ..... **x**

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **xi**

AVANT - PROPOS ..... **xii**

CHAPITRE I.INTRODUCTION GENERALE **1**

I.1 Généralités *1*

I.2 Justification du choix de la zone d'étude *2*

I.3 Localisation de la zone critique en mairie de Bujumbura *3*

I.4 Problématique *4*

I.5 Intérêt du sujet *4*

I.6 Objectifs *4*

I.6.1 Objectifs Global 4

I.6.2 Objectifs spécifiques 4

I.7 Méthodologie *5*

I.7.1 Outils de travail 5

I.7.2 Données pluviométriques 5

I.7.3 Analyse des données 5

I.7.4 Traitement et Exploitation des données 5

I.7.5 Difficultés rencontrées 5

I.7.6 La limite d'étude 5

CHAPITRE II.REVUE DE LA LITTERATURE **6**

II.1 Bassin versant *6*

II.1.1 Définitions 6

II.1.2 Caractéristiques d'un bassin versant 7

II.2 Modèle numérique de terrain *10*

II.3 Réseau hydrographique *11*

II.4 Caractéristiques climatiques *11*

II.5 Temps de concentration. *13*

II.6 Les causes et les conséquences de l'instabilité des lits des cours d'eau dans le milieu urbain. *15*

II.7 Mécanismes d'évolution des Berges *18*

II.8 Les conséquences de l'instabilité des lits des cours d'eau dans le milieu urbain. *20*

II.9 Mesures de lutte contre l'érosion hydrique *24*
II.9.1 Milieu rural 24
II.9.2 Milieu urbain 25

II.10 Evolution Morphologique de la Rivière *25*
II.10.1 Calcul des Ecoulements Liquides (Hydraulique) 26
II.10.2 . Collecte des données nécessaires dans l'évolution morphologique 26

II.11 Expertise du transport solide *29*

II.12 Evaluation des Méthodes pour la Stabilisation des Cours d'eau dans un Milieu Urbain. *33*
II.12.1 Stabilisation des lits 33
II.12.2 Stabilisation de berges 35

CHAPITRE III.GENERALITES SUR LA ZONE D'E TUDE 41

III.1 Présentation de la zone d'étude *41*

III.2 Situation géographique de la zone d'étude *42*

III.3 Hydrographie du bassin versant de la rivière KANYOSHA. *46*

III.4 Synthèse des caractéristiques physiques du BV KANYOSHA *47*

III.5 Caractéristiques des ouvrages hydrauliques construits sur la rivière KANYOSHA en Mairie de Bujumbura *47*

CHAPITRE IV.CALCUL DES DEBITS DES CRUES DE LA RIVIERE KANYOSHA 49

IV.1 Etude hydrologique et hydraulique de la zone d'étude *49*

IV.2 Analyse et prétraitement des données disponibles *49*
IV.2.1 Fréquence expérimentale observée 51
IV.2.2 Choix de la période de retour 54
IV.2.3 Equation générale de détermination du quartile d'une période de retour T 55
IV.2.4 Calcul de précipitation du travail pour différentes lois de probabilité utilisées. 55
IV.2.5 Caractéristiques de la série des valeurs expérimentales 57
IV.2.6 Présentation des résultats d'analyse des précipitations. 57
IV.2.7 Analyse des résultats 58

IV.3 Calculs des débits des crues *59*
IV.3.1 Coefficient de pointe (k) 60
IV.3.2 Coefficient de ruissellement (CR) 60
IV.3.3 Dimensionnements des Ouvrages Hydrauliques 61

IV.4 Calcul des Ouvrages Hydrauliques dans un Canal De La Rivière KANYOSHA *71*

IV.5 Devis Quantitatif et Estimatif des Travaux de Stabilisation de la Rivière KANYOSHA sur une Linéaire de 4 km 74

CHAPITRE V.ETUDE D'IMPACT DU TRAVAIL SUR L'ENVIRONNEMENT 78

CONCLUSION GENERALE 80

RECOMMANDATION 81

BIBLIOGRAPHIE 82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification d'indice de pente globale des bassins versants selon orstom (laborde, 2009) 9
Tableau 2: Classe des reliefs en fonction du denivele specifique (ds) 10
Tableau 3 : Hauteur annuelle des précipitations pour différentes stations du burundi 11
Tableau 4 : Nombre de personnes affectees par les inondations et deplacees par commune 21
Tableau 5 : Differences fondamentales entre ces deux types de modele et de donnees necessaire a leur mise en œuvre 27
Tableau 6:Répartition de la surface du bv kanyosha en fonction de l'altitude 45
Tableau 7 : Caracteristiques physiques du bv de la riviere kanyosha 47
Tableau 8: Presente une breve description des ponts sur la douzieme avenue et la rn3 48
Tableau 9 **:** Presentation des donnees pluviometriques utilisees 50
Tableau 10 : Valeurs du parametre « α » selon les differents auteurs. 52
Tableau 11 : Valeurs des probabilites au non depassement et de depassement des precipitations extremes journalieres observees. 53
Tableau 12: Période de recurrence communement utilisee pour les quelques structures hydrauliques 54
Tableau 13 : Caracteristiques de la distribution de la serie des precipitations. 57
Tableau 14 **:** Synthese des resultats d'analyse frequentielle des precipitations. 58
Tableau 15 : Valeurs du coefficient de pointe 60
Tableau 16 : Expression de cr en fonction du sol, de la pente, de la couverture vegetale, et de la nature du reseau hydrographique 60
Tableau 17: Resultats de calcul de debits 61
Tableau 18: Geometrie des sections 66
Tableau 19: Valeurs du coefficient n de manning pour les cours d'eau naturels et canaux artificiels trouvees sur le site internet de l'universite de louvain **(https://sites.uclouvain.be/didacticiel)** 67
Tableau 20 : Résultats de dimensions des ouvrages hydrauliques 71

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Lit kanyosha (a) et zone critique à curer (b)..... 2
Figure 2 : Localisation geographique de la zone d'etude..... 3
Figure 3: Courbe des precipitations en fonction de l'altitude au burundi..... 12
Figure 4: Ajustement lineaire de la fonction p = f(z) au niveau territorial..... 12
Figure 5 : Suspension, saltation, charriage 16
Figure 6: Zone d'extraction du gravier et sable dans la riviere kanyosha a busoro..... 17
Figure 7 : Exemples de zones sensibles a l'erosion : 18
Figure 8: Evolution des zones d'erosion et de depot apres une crue moyenne et apres une crue forte..... 18
Figure 9: Sensibilite d'un talus au glissement 19
Figure 10 : Eboulement d'une berge coherente..... 19
Figure 11: Photos in situ des inondations en mairie de bujumbura a gisyo 20
Figure 12: Carte des localites des personnes affectees 22
Figure 13: Localite de ceceni..... 23
Figure 14 : Illustration du lit de la riviere kanyosha..... 33
Figure 15 : Canal de cours d'eau..... 34
Figure 16 : Lits multiples et simples 35
Figure 17: Glissement de berge..... 35
Figure 18 : Rive et berge 36
Figure 19: Stabilisation par le gabionnage..... 37
Figure 20: Stabilisation par un muret de soutenement en moellon..... 38
Figure 21 : Stabilisation vegetative 39
Figure 22 : Berge maçonnee et radier en enrochement..... 40
Figure 23: Situation administrative du bassin versant de la riviere kanyosha..... 41
Figure 24: Carte des pentes du bassin versant de la riviere kanyosha 42
Figure 25 : Carte topographique du bassin versant de la riviere kanyosha 43
Figure 26 : Carte hypsometrique du bassin versant de la riviere kanyosha..... 43
Figure 27 : Vue partielle de la riviere kanyosha d'un tronçon etudie..... 44
Figure 28 : Courbe hypsometrique du bassin versant de la riviere kanyosha..... 45
Figure 29: Profil en long d'un cours d'eau principal du bassin versant de la riviere kanyosha..... 46
Figure 30 : Profil en long dans le tronçon etudie 46
Figure 31 : Pont kanyosha sur la douzieme avenue et rn3..... 48
Figure 32 : Representation graphique des resultats d'analyse frequentielle des precipitations..... 58
Figure 33: Canal a section trapezoïdale..... 62
Figure 34 : Canal a section rectangulaire..... 63
Figure 35 : Section demi circulaire 63
Figure 36: Canal trapezoïdal et definition des termes..... 65
Figure 37: Profil en **travers** dans la berge maçonnee et le radier en beton..... 72
Figure 38 : Profil en travers en gabions..... 73

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ARB : Agence Routière du Burundi

AS : Apport Sédimentaire

BCG : Bureau de Centralisation de la Géomatique

BV : Bassin Versant

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement

DTM : Volontaire de la Croix Rouge

FQMPH : Les Changements de la Fréquence d'un Débit Morphogène

GPS: Global Positioning System

HRU: Hydrologic Response Unit

IGEBU : Institut Géographique Du Burundi

KM : Kilomètre

MEEATU : Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PGES : Plan de Gestion de l'Environnement et Social

RN : Route Nationale**s**

AVANT - PROPOS

Urbanisation croissante et les changements climatiques exacerbent les défis liés à la gestion des cours d'eau ; en particulier dans les zones urbaines. La rivière KANYOSHA, qui traverse une région densément peuplée, est confrontée à des problèmes d'érosion, des pollutions et des crues fréquentes.

Cet avant - propos présente le contexte de l'étude, soulignant l'importance d'une gestion intégrée des ressources en eau. Il met également en avant la nécessité d'approches innovantes et durables pour la stabilisation des lits de cours d'eau, afin de protéger non seulement l'environnement mais aussi les communautés qui en dépendent. Ce travail s'inscrit **« ETUDE COMPARATIVE DES SOLUTIONS POTENTIELLES POUR LA STABILISATION DES LITS DE COURS D'EAU EN MILIEU URBAIN :** cas de la rivière kANYOSHA dans la commune Muha, Bujumbura-Burundi » dans une volonté de trouver des solutions adaptées aux défis spécifiques rencontrés par la rivière KANYOSHA et d'améliorer la résilience urbaine face aux aléas climatiques.

CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE

I.1 Généralités

Le milieu urbain est formé d'une concentration importante d'habitats et des activités secondaires et tertiaires qui s'y exercent. Les cours d'eau qui y traversent provoquent une perturbation de ces activités au cas où leur stabilisation ne serait pas tenue en compte. Les cours d'eau dont les lits ne sont pas stabilisés causent des éboulements des massifs hébergeant ces cours d'eau. Ces éboulements peuvent s'aggraver jusqu'à devenir des ravins voire même des glissements de l'ensemble. Tous ces phénomènes peuvent être à l'origine de la disparition des vies humaines et animales, de la destruction des ouvrages environnants. Ces derniers temps, on observe des phénomènes climatiques inquiétant, notamment des inondations qui peuvent causer des débordements des rivières, voire des éboulements de terrain. Ces phénomènes peuvent engendrer des pertes énormes dans les milieux où ils s'abattent, notamment dans le milieu urbain, où les dégâts touchent les vies humaines et les infrastructures, donc la vie économique.

Ces phénomènes peuvent empêcher également la circulation et le déroulement des activités dans la ville. On doit nécessairement s'occuper de l'aménagement de cours d'eau en milieu urbain pour atténuer ces dégâts en stabilisant les lits des rivières qui traversent la ville de Bujumbura.
Pour cela, il existe des solutions potentielles qu'on doit analyser et comparer sur base des caractéristiques d'une bonne infrastructure (durabilité, économique et esthétique) afin de choisir celle qui est applicable.

Notamment :

-Génie végétative : cette méthode consiste à consolider le sol par végétation, par exemple : le bambou

- Gabions : méthode qui consiste à retenir le sol par de gros agrégats encaissés par des mailles en fils métalliques ;

- Enrochement sur les berges : méthode qui consiste à stabiliser les berges en les soumettant au poids de roches de différentes tailles ;
- Murs de soutènement en béton ou en moellons sur les berges : consistent à soutenir les terres à l'aide du béton et des moellons ;
- Canalisation du cours d'eau (radier en béton ou en enrochement)
- section entièrement béton armée : matériau de construction constitué d'une armature métallique incorporée dans une masse de béton, de ciment

Dans ce travail, on va étudier comparativement certaines méthodes comme solutions pour la stabilisation des lits dans un milieu urbain.

I.2 Justification du choix de la zone d'étude

La rivière KANYOSHA a été choisi pour la stabilisation en raison de plusieurs facteurs, notamment les problèmes environnementaux et sociaux qui ont affecté la région. Les berges de la rivière KANYOSHA ont été sujettes à des effondrements, menaçant les maisons riveraines et les infrastructures telles que le pont reliant les zones de MUSAGA et KANYOSHA, nécessitant des mesures de stabilisation pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures et conformément à l'objectif spécifique.

Les résultats attendus sont :

- Une réduction sensible des débits de ruissellement montagneux à l'aide de génie végétative ;
- Une réduction sensible du transport solide vers l'aval grâce à des méthodes de stabilisation intercalée sur le lit principal du cours d'eau ;
- Une limitation des glissements des berges par des mécanismes de stabilisation en belge maçonnée ;
- Une amélioration de l'écoulement par élargissement des gorges qui se sont formées sur le lit mineur du cours d'eau.
- Une réduction sensible d'érosion du sol
- Limitation nécessaire de l'affouillement du lit de la rivière KANYOSHA
- Atténuation les inondations répétitives pendant la saison pluvieuse

Lit KANYOSHA (a) Zone critique à curer (b)

Figure 1: Lit KANYOSHA (a) et Zone critique à curer

Trois types d'aménagements sont proposés :

- Ouvrages de régulation comprenant :
  - ✓ Les courbes antiérosives au niveau du bassin versant,
  - ✓ Des murs de soutènement en gabions dans les zones de glissement très actifs
  - ✓ Les bassins de rétention (chute) dans le lit du cours d'eau.
- Élargissement du lit au niveau des gorges ou zones d'étranglement et plantation d'arbustes sur les berges talutées
- Les Pistes d'accès à certains ouvrages sont à curer.

I.3 Localisation de la zone critique en mairie de Bujumbura

Le bassin versant de la rivière KANYOSHA est caractérisée par des pentes raides en amont qui se trouvent entre les altitudes de 1000 et 2000m de l'Est à l'Ouest du pays, au sud de la Capitale BUJUMBURA. Elle s'étend sur les contreforts des MIRWA de la province de BUJUMBURA RURALE. Elle s'étend sur une superficie caractérisée par des pentes fortes et une couverture végétale dominée par des activités agricoles. La rivière KANYOSHA est l'une des rivières torrentielles traversant la ville de BUJUMBURA.

Figure 2 : Localisation géographique de la zone d'étude

I.4 Problématique

la rivière KANYOSHA connait des ruissellements brutaux qui causent de l'érosion du sol, la stabilisation des lits de cours d'eau en milieu urbain, notamment le cas de la rivière KANYOSHA présente l'élargissement des lits qui entraine les conséquences fâcheuses telles que l'affaissement des maisons et la détresse de la population riveraine ,l'impact de l'activité humaine pendant l'extraction de matériaux tels que le moellon ,sable et le gravier aggrave la situation .cette activité conduit une vitesse excessive de l'eau ,détruisant les bordures et élargissant le lit de la rivière .

L'élargissement des lits de cours d'eau en milieu urbain a des répercussions sur les infrastructures, tant publiques que privées, qui ne cessent de s'effondrer en raison de cette situation et des inondations répétitives pendant la saison pluvieuse dans la partie avale de la rivière.

I.5 Intérêt du sujet

L'intérêt principal de l'étude est de présenter aux décideurs et aux partenaires techniques et financiers de l'Etat Burundais une solution permettant de protéger les habitants et ses propriétés du bassin versant de la rivière contre les effets des inondations.

I.6 Objectifs

I.6.1 Objectifs Global

L'objectif global de ce travail est de trouver une solution permettant de stabiliser les lits de la rivière KANYOSHA basée sur les méthodes de Génie civil, hydrauliques et hydrologiques.

I.6.2 Objectifs spécifiques

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

- trouver une solution scientifique durable au problème de l'instabilité des lits et des berges d'un cours d'eau en générale et des rivières qui traversent la Ville de Bujumbura en particulier.
- Evaluer le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la rivière KANYOSHA
- Quantifier l'érosion pour le bassin et les sédiments à l'exutoire du bassin versant de la rivière KANYOSHA (à GISYO) ;
- Proposer des méthodes de gestions de l'érosion.
- Comparer différentes solutions techniques de stabilisations liées aux méthodes de génie civil et hydrauliques des lits de la rivière.
- Calcul les dimensions effectives des lits
- Comparer les devis estimatifs et quantitatifs des ouvrages

I.7 Méthodologie

I.7.1 Outils de travail

Les outils principaux utilisés lors de ce travail sont :

- Revue de la littérature : la documentation dans les différentes bibliothèques ainsi que l'internet
- Logiciels tels que Microsoft Word, Microsoft Excel pour le traitement de texte
- Excel avec macros pour la modélisation de cours d'eau et le calcul hydraulique
- AutoCAD pour et établissement des plans
- ArcGIS pour la délimitation du bassin versant et l'analyse des données
- Descente sur terrain prise des photos in situ et des cordonnes avec GPS essential

I.7.2 Données pluviométriques

Les données pluviométriques utilisées pour l'étude hydrologique ont été fourni par l'institut géographique du Burundi (IGEBU). Il s'agit essentiellement de la pluviométrie annuelle et journalière maximale de la station BUHONGA. Pour la période de 1971 à 2001

I.7.3 Analyse des données

L'analyse des données collectées nous a permis de faire une synthèse des données suffisantes pour l'élaboration du travail.

I.7.4 Traitement et Exploitation des données

Le traitement et l'exploitation des données récoltées ont été réalisés avec respectivement le tableur Excel pour les donnes pluviométriques et la programmation des calculs hydrauliques, et les logiciels ArcGIS pour le dessin des Cartes, des profils et la délimitation du Bassin Versant (BV), et Google Earth pour la cartographie.

I.7.5 Difficultés rencontrées

Les difficultés rencontrées nous pouvons citer, le non disponibilité des données hydrologiques actualisées car la rivière KANYOSHA n'est pas jaugée

I.7.6 La limite d'étude

L'insuffisance de temps pour la réalisation de cette étude, constitue sa principale limite, les études géotechniques n'étaient pas faites ; chose qui aurait permis de pousser les études d'ouvrages surtout dans sa partie fondation.

En dépit des difficultés rencontrées, la méthodologie que nous avons établie pour mener à bon port de travail nous conduit au troisième chapitre qui traitera des généralités du site du travail.

CHAPITRE II. REVUE DE LA LITTERATURE

II.1 Bassin versant

II.1.1 Définitions

Plusieurs définitions du bassin versant ont été proposées dans la littérature :

- Selon le glossaire international d'hydrologie, le bassin versant se définit comme la surface d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac
- **Loup J. ,1974** définit le bassin versant comme la surface réceptrice des eaux qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe, on le définit par sa morphométrie ses caractéristiques climatiques, sa géologie, sa végétation et ses sols.
- **Remanieras G., 1965** définit le bassin versant en un point ou plus précisément dans une section droite d'un cours d'eau comme la totalité de la surface géographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de ladite section.
- Le **dictionnaire français d'hydrologie** définit le bassin versant comme la région délimitée, drainée par un cours d'eau et ses tributaires, dont elle constitue l'aire d'alimentation (Monique Datcharry & Jean Margat, 1995).

Au cours De ce travail, nous allons considérer le bassin versant tel qu'il a été défini par Remanieras G., 1965.

Deux familles de bassin versant existent dans la littérature :

- Le bassin versant topographique ou hydrographique. Il s'agit d'un bassin versant, valable pour le cas du sous-sol imperméable, délimité par les lignes de partage des eaux (lignes de crête) et les lignes de plus grande pente (Laborde, 2009). Il est seulement conditionné par la topographie.
- Le bassin versant hydrogéologique. Il est défini comme le domaine aquifère, simple, dans lequel les eaux s'écoulent vers un même exutoire ou groupe d'exutoire (glossaire international d'hydrologie de 1978). Il est délimité par les lignes de partage d'eaux souterraines. En plus des considérations topographiques, des considérations d'ordre géologiques sont prises en compte pour délimiter ce genre de bassin (Laborde,2009). Dans la suite de ce travail, nous allons nous intéresser au bassin versant topographique.

II.1.2 Caractéristiques d'un bassin versant

II.1.2.1 Caractéristiques de disposition dans le plan.

Les caractéristiques de disposition dans le plan d'un bassin versant font partie des caractéristiques morphométriques. Ces dernières ont pour but de condenser en un certain nombre de paramètres chiffrés, la fonction entre l'altitude (h) et les coordonnées (x, y) d'un point du bassin versant (Laborde, 2009)
Les caractéristiques de disposition dans le plan d'un bassin versant sont :

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

- **Périmètre (P)** : C'est une des caractéristiques des longueurs la plus utilisée. Elle correspond au contour du bassin. Le périmètre n'est généralement pas utilisé directement mais le plus souvent à travers des valeurs qui en dérivent comme la **longueur « L » et la largeur « l » du rectangle équivalent** (Laborde, 2009). Ces deux dernières caractéristiques sont déterminées en résolvant le système suivant

$$A = L * l \qquad (2.1)$$

$$P = 2(L + l) \qquad (2.2)$$

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16A}}{4} \qquad (2.3)$$

$$l = \frac{P - \sqrt{p^2 - 16A}}{4} \qquad (2.4)$$

Avec :

A : Surface

L : Longueur

l : la largeur

p : périmètre

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

- **Coefficient de Gravelius (KC)** : Aussi appelé **coefficient de compacité**, c'est la caractéristique de forme la plus utilisée. Il correspond au rapport du périmètre (P) du bassin à celui d'un cercle (Pc) de même surface (Dictionnaire française d'hydrologie de surface).

$$KC = \frac{p}{p_c} \quad (2.5)$$

A = 57, 51 km^2,

P = 59 ,792 Km

pc =2 ΠR où R = $\sqrt{\frac{A}{\pi}}$

$$KC = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{59,792}{2\sqrt{3.14*57,51}} = 2,22$$

Un KC relativement faible (proche de 1) signifie un bassin versant plus ou moins compact. A la limite, un KC=1 correspondrait à un bassin versant idéalement circulaire. Ainsi, les valeurs de Kc partent de 1 et augmentent au fur et à mesure que les bassins versant deviennent plus allongés. Cela influe énormément sur la forme de hydrogramme de ruissellement.

Les bassins versants à grand coefficient de compacité sont plus allongés et connaissent donc de hydrogramme plus ou moins aplatis, avec des débits de pointe modérés et un temps de concentration relativement élevé (NIBIGIRA L., 2018).

II.1.2.2 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie)

Elles font également partie des caractéristiques morphométriques et sont matérialisées sur une courbe hypsométrique. Cette dernière exprime la fraction de la superficie d'un bassin située au-dessus d'une altitude donnée (Glossaire international d'hydrologie)

Les indices de pentes font également partie des caractéristiques morphométriques d'un bassin versant. On distingue trois indices suivants :

a. Pente moyenne

Soit D, l'équidistance des courbes de niveau ;

Soit dj, la largeur moyenne de la bande « j » comprise entre les lignes de niveau « j » et « j+1 » ;

Soit lj, la longueur moyenne de la bande.

La pente moyenne « n_j » sur cette bande est :

$$\boldsymbol{N_{J=\frac{d}{d_j}}} \quad (2.6)$$

La surface de la bande j est :

$$D_J * Lj = aj \quad (2.7)$$

La pente moyenne I pondérée par les surfaces est donc :

$$I = \frac{\sum n_j a_j}{\sum a_j} = \frac{\sum D d_j l_j}{\sum d_j l_j} = \frac{D \sum L_j}{A} \frac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{l}} \quad (2.8)$$

b. Indice de pente de roche I

Proposée par M. Roche, IP est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces

La pente moyenne i sur la bande j est :

$$I_J = \frac{d}{X_J} \quad (2.9)$$

La surface de cette bande est :

$$LJ = LJ * XJ \quad (2.10)$$

c. Indice de pente globale Ig

C'est le rapport de la dénivelée « D » telle que définie sur la courbe hypsométrique sur la longueur du rectangle équivalent :

$$\mathbf{Ig} = \frac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{l}} \quad (2.11)$$

Sur base de la valeur d'indice de pente globale Ig, l'O.R.S.T.O.M a fait une classification des bassins versants dont la surface est de l'ordre de 57,51km2.

Tableau 1 : Classification d'indice de pente globale des bassins versants selon ORSTOM (Laborde, 2009)

R1	Relief très faible	Ig<0,002
R2	Relief faible	0,002<Ig<0,005
R3	Relief assez faible	0,005<Ig<0,01
R4	Relief modérée	0,01<Ig<0,02
R5	Relief Assez fort	0,02<Ig<0,05
R6	Relief fort	0,05<Ig<0,1
R7	Relief très fort	0,1<Ig

Source : http://www.fao.org /3/2570f/W2570f00.htm

L'indice de pente globale et celui de la roche sont étroitement corrélatifs avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,99 (Laborde, 2009) : $\boldsymbol{Ig} = 8 * I_P{}^2$

DH : la dénivelle entre les points correspondant à 5 % et à 95% de la courbe hypsométrique. A Défaut de courbes de niveau sur l'ensemble du bassin versant, l'indice global des pentes se résume à la pente longitudinale du terrain naturel

L : est la longueur du rectangle équivalent, exprime en km

Soit Ig : DH / L est égal 0, 047

DS : dénivelé spécifique (DS), c'est le produit de l'indice global de pente par la racine carrée de la superficie de BV. Elle s'exprime en m et est indépendante en théorie de l'aire du bassin ; on peut distinguer différentes classes de relief en fonction de DS

$$D_S = I_G * \sqrt{A} \qquad (2.12)$$

D_S =356 m

D'où le relief est fort

Tableau 2: Classe des reliefs en fonction du dénivelé spécifique (DS)

RELIEF FAIBLE	D_S < 50m
RELIEF MODERE	50m< D_S < 100m
RELIEF FORT	100m< D_S

Source : http://www.fao.org /3/2570f/W2570f00.htm

II.2 Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT), en anglais Digital Terrain Model (DTM), est une représentation de la topographie (altimétrie et/ou bathymétrie) d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par ordinateur (Kaspersky J. ,2008).

Il existe différentes modes de représentation de MNT :

- **les courbes de niveau** : courbes iso-altitude définies suivant une équidistance donnée ;
- **les profils parallèles :** représentation de l'altitude par des points cotés situés le long des profils dans une direction horizontale donnée ;

- **le réseau de triangle irréguliers** (Triangular Irregular Network, TIN) : représentation de la topographie par une succession de facettes triangulaires adjacentes, de forme et de tailles variables, construites à partir du nuage de points source ;

- La grille régulière (format dit raster) ou irrégulière

Dans la suite de ce travail, afin de faire une analyse morphométrique du bassin versant de la rivière KANYOSHA, faisant objet de la présente étude, nous nous sommes servis 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.

II.3 Réseau hydrographique

Selon le glossaire international d'hydrologie, un réseau hydrographique est l'ensemble des rivières et autres cours d'eau permanents ou temporaires, ainsi que des lacs et des réservoirs, dans une région donnée.
L'une des caractéristiques du réseau hydrographique est sa hiérarchisation. Elle consiste à chiffrer la ramification du réseau en attribuant à chaque cours d'eau un numéro fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs (Laborde, 2009).

II.4 Caractéristiques climatiques

Le Burundi est un pays à climat tropical chaud tempéré par l'altitude. Cette dernière varie entre 773m et 2670m. La répartition des températures au BURUNDI épouse fidèlement le relief avec une température moyenne annuelle de 23°C dans la plaine de l'IMBO et 10°C sur la crête Congo -Nil.
La différence entre les moyennes de températures du mois le plus chaud et le mois le plus froid n'excède pas 4°C. La variation journalière de température est plus marquée avec l'altitude. Elle est de 11°C à Bujumbura (chaud avec basse altitude) et de 8°C à GISOZI (très frais avec haute altitude).

Notons que notre pays le BURUNDI connaît une alternance de la saison pluvieuse qui s'étend du mois d'Octobre au mois de Mai et de la saison sèche qui s'étend du mois de Juin au mois de Septembre. La pluviométrie annuelle au Burundi se situe entre 850 mm dans la plaine de l'Imbo et 2000mm sur la crête Congo-Nil.
Le tableau ci-dessous montre les répartitions pluviométriques au Burundi en fonction du relief et des facteurs locaux.

Tableau 3 : Hauteur annuelle des précipitations pour différentes stations du Burundi

Régions	Altitude (m)	Précipitations (mm)
IMBO	850	1000
KANYINYA	1398	1095
KUMOSO	1400	1150
NKOMA	2000	1400
INANZERWE	2517	1500
GISOZI	2076	1491
RWEGURA	2317	1545
NDORA	2035	1961
KIBUMBU, GATARA	1850	1400
RUSENGO, KARUZI	1700	1200

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

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

Figure 3: Courbe des précipitations en fonction de l'altitude au Burundi

La courbe obtenue montre que la hauteur des précipitations (*P*) annuelles aux différentes stations croît d'une manière générale avec l'altitude (z). Nous noterons cependant :

- La faiblesse des précipitations au fur et à mesure que la longitude augmente ;
- Des précipitations sont exceptionnellement abondantes à NDORA.

Hormis l'effet de microclimat observable à NDORA (KIBIRA), la fonction P = f(z) s'ajuste convenablement à une fonction linéaire croissante (figure 12).

Figure 4: Ajustement linéaire de la fonction P = f(z) au niveau territorial

II.5 Temps de concentration.

Selon le glossaire international d'hydrologie, le temps de concentration désigne le temps que met le ruissellement d'une averse pour parvenir à l'exutoire depuis le point du bassin pour lequel la durée de parcours est la plus longue. C'est donc le temps mis par la particule d'eau la plus éloignée de l'exutoire pour l'atteindre (Laborde, 2009).

Le temps de concentration « Tc » peut être estimé en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette (efficace) et la fin de ruissellement (fin de l'écoulement de surface) à partir d'un hydrogramme de crue,

Quelques expressions d'évaluation du temps de concentration :

- Formule de PASSINI, établi pour des bassins versant ruraux de surface supérieure à 4000ha

$$\boldsymbol{Tc} = \mathbf{1.44}\ \frac{(\boldsymbol{A} * \boldsymbol{l})^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{\boldsymbol{I}}} \tag{2.13}$$

- Formules de TURAZZA :

$$\boldsymbol{Tc} = \mathbf{6.51}\ (\sqrt{\boldsymbol{A}} \tag{2.14}$$

- Formules de Ventura, établie pour des bassins versants ruraux de surface supérieure à 1000ha :

$$\boldsymbol{Tc} = \mathbf{7.62}\ \sqrt{\frac{A}{I}} \tag{2.15}$$

- Formule de GIANDOTTI :

$$\boldsymbol{Tc} = \mathbf{600}\ \frac{0.04\sqrt{A} + O.0015\ L}{0.8\sqrt{I * L}} \tag{2.16}$$

Cas de bassin versant urbains

Le memento ASTEE (2017) propose d'utiliser le Formule de Kirpich, établie pour le petit bassin versant agricole dont la superficie variait entre 0,4 et 81ha dont le sol était argile, dont la pente moyenne était comprise entre 3 % et 10 %.

$$\boldsymbol{TC} = \mathbf{0,115}\ (\frac{L}{\sqrt{I}})^{0.77} \tag{2.17}$$

Pour toutes ces formules, on utilise les unités suivantes :

Tc = temps de centration en min

A = surface du bassin versant (en hectares)

L = longueur du plus long parcours de l'eau (m)

I = pente moyenne le long du plus long parcours de l'eau (%)

Cette formule est encore souvent majorante

$$\boldsymbol{Tc} = \frac{L}{60\,v} \tag{2.18}$$

V : vitesse moyenne

La vitesse augmente avec la pente du bassin versant mais par des raisons3 techniques

La vitesse moyenne comprise entre 1m /s et 2m/s pour évitera l'érosion et la dégradation des ouvrages

Jean Luc Bertrand -krajewski (2022) a repris les données de Michel Desbordes en utilisant une méthode d'optimisation non linéaire permettant de ne pas privilégier les points extrêmes (les plus grands ou les plus petites valeurs de k)

Une analyse de sensibilité lui a permis de conclure que la meilleure relation était la suivante

$$\boldsymbol{K} = \mathbf{2.436}\, A^{0.455} * C_{IMP}^{-0.57} * I^{-0.127} \tag{2.19}$$

On peut ensuite calculer Tc en fonction de K

$$\boldsymbol{Tc} = \boldsymbol{a.k} \tag{2.20}$$

Avec :

$\boldsymbol{c_{imp=}}$ Coefficient d'imperméabilisation (en rapport c'est-à-dire comprise entre 0 et 1

a : paramètre sans dimension valant 2 pour un réseau linéaire et tendant vers 1 ,5 lorsque le réseaux se développe;

Source :https://wikigeotech.developpement-durable.gou.fr/index .php /temps de concentration

II.6 Les causes et les conséquences de l'instabilité des lits des cours d'eau dans le milieu urbain.

L'instabilité sur les lits de la rivière KANYOSHA est la cause fondamentale de l'érosion

a. Erosion aréolaire

Le ruissellement diffus (Sheets flood des auteurs américains) entraîne une érosion en nappe ou aréolaire. Après le passage d'une pluie, les signes observés ne sont pas très spectaculaires : accumulation de terre derrière les touffes d'herbe, apparition d'éléments grossiers à la surface du sol, accumulation d'éléments fins en bas des pentes.

b. Erosion en rigoles et en griffes

L'érosion aréolaire s'observe rarement seule. L'existence d'une pente, même parfois très faible, et d'une certaine hétérogénéité du terrain (nature du sol, micro-accidents) font que les eaux de ruissellement se concentrent et creusent de petits chenaux qui se rassemblent en rigoles. Le terrain peut alors apparaître comme "griffé".

c. Erosion en ravines

Au-delà des griffes, se manifeste l'érosion en ravines qui incise les couches plus profondes du sol, parfois jusqu'à la roche mère.

d. Erosion linéaire au fond des cours d'eau et sur les berges

- **La charge en suspension**, constituée de matériaux dont la taille et la densité leurs permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. C'est souvent la seule fraction du débit solide qui puisse être mesurée sans trop de difficultés. Fort heureusement, dans la très grande majorité des cas, elle représente quantitativement un pourcentage très important du transport global.

- **La charge de fond**, formée de matériaux trop gros pour être mis en suspension compte tenu de leur densité et de la vitesse du courant. Ils roulent sur le fond ou se déplacent par translation.

Entre le transport par charriage sur le fond et le transport par suspension, on définit parfois le transport par saltation qui correspond à un déplacement des matériaux par bonds successifs

Figure 5 : suspension, saltation, charriage

e. Autres formes d'érosion hydrique

a. Mouvements de masse

L'eau agit non seulement par décapage plus ou moins rapide des couches pédologiques, mais aussi sur toute la profondeur du sol. En provoquant une augmentation de son poids et l'humectation d'un plan de glissement, elle favorise la formation d'écoulements boueux ou de glissements de terrain.

b. Dépôts de sédiments

Terme du cycle de l'érosion, les dépôts de sédiments présentent très souvent un caractère temporaire.

c. La pente

Plus la pente est long, plus le ruissellement se concentre et prend de l'énergie. Alors, l'érosion s'intensifie, car à l'érosion en nappes s'ajoute l'érosion en ravines (énergie de ruissellement cumulée)

d. La nature du sol

L'allure de la courbe hypsométrique caractérise le cycle d'érosion du relief actuel étudié. En effet, une courbe convexe est une caractéristique d'un relief jeune où l'érosion est encore intense, tandis qu'une forme concave est une caractéristique d'un relief vieux relief non rajeuni par les soulèvements tectoniques et où l'érosion est devenue faible.

e. Les actions anthropiques

- Agriculture

L'agriculture consiste à exploiter des zones qui ont une couverture végétale danse et à défricher des zones boisées et forêts. Tout cela, conduit à une dégradation de la couverture du sol qui joue un rôle important sur l'érosion.

- Extraction des carrières

L'extraction des matériaux de constructions modifie la morphologie de la zone d'emprunt ou du lit de la rivière. Elle est souvent à l'origine d'un accroissement important de l'activité des phénomènes d'érosion et de sédimentation mais quand on se faisait selon la loi elle-même il n'y a pas de faute

Cette figure montre la zone d'extraction du gravier et du sable à BUSORO d'où on provoque l'instabilité des berges et l'affouillement du lit de la rivière.

Source : Photo prise à la rivière KANYOSHA, le 20/02/2023

Figure 6: Zone d'extraction du gravier et sable dans la rivière KANYOSHA à BUSORO

- L'absence de végétation à l'amont

La végétation, par son système racinaire, permet de maintenir la structure de la berge.

Lorsqu'elle est absente, la berge devient plus vulnérable à l'action de l'érosion. L'absence de végétation est également source de réchauffement des eaux et explique la disparition d'une faune associée.

- Urbanisation

L'urbanisation consiste à imperméabiliser le sol, la pluie n'est plus capable de s'infiltrer dans sol.

La plus grande partie ou même la totalité de la pluie se ruisselle.

II.7 Mécanismes d'évolution des Berges

Les berges de cours d'eau peuvent se déformer selon trois processus principaux :

- L'érosion due au courant ;
- Le glissement en masse ;
- L'éboulement

Par contre, l'étude du glissement des berges relève de la mécanique des sols. Ce mécanisme concerne aussi tous les talus de remblai ou déblai et les versants naturels.

- **Érosion des berges par le courant**

L'érosion d'une berge est l'enlèvement de grains de matériaux constitutifs de la berge par l'eau de la rivière. Cet enlèvement de particules est possible lorsque les forces d'entraînement dues à la vitesse du courant et sa turbulence sont capables de vaincre le poids des particules, leur frottement l'une sur l'autre et leur cohésion éventuelle.

Figure 7 : Exemples de zones sensibles à l'érosion :

Dans *une courbe (a) ; par courant de retour (b) ; par courant réfléchi dû à un arbre tombé (c) ; par dissipation d'énergie à l'aval d'un seuil (d)*

Figure 8: Évolution des zones d'érosion et de dépôt après une crue moyenne et après une crue forte

- **Glissement des berges**

L'équilibre d'un talus dépend de sa géométrie, des caractéristiques mécaniques des matériaux et de la présence d'eau dans le sol. Lorsque par exemple on augmente la pente d'un remblai, il arrive un moment où il glisse en masse. Les forces motrices dues au poids des terres au-dessus de la surface potentielle de glissement l'ont emporté sur les forces résistantes dues au frottement le long de la surface de rupture.

Lorsque le talus est une berge de cours d'eau, l'eau de la rivière joue un double rôle pendant les hautes eaux

- Elle sature le sol ;
- Elle apporte une poussée stabilisatrice.

Figure 9: Sensibilité d'un talus au glissement

a : rupture circulaire d'un talus instable,

b : rupture circulaire du même talus après une décrue plus forte, et ruptures secondaires.

- **Eboulement des berges (ou effondrement)**

L'effondrement se produit plutôt pendant une crue, alors que le glissement se produit presque toujours pendant une décrue. L'effondrement est une conséquence directe de l'érosion de la berge, alors que le glissement ne l'est pas systématiquement

Figure 10 : Éboulement d'une berge cohérente

II.8 Les conséquences de l'instabilité des lits des cours d'eau dans le milieu urbain.

a. Les inondations

L'inondation est une submersion, rapide ou lente d'une zone habituellement hors d'eau. Ce phénomène peut être dû au débordement d'un cours d'eau, à la remontée de nappes phréatiques, au ruissellement pluvial ou à la submersion d'une zone côtière par la mer.

Cette photo montre l'inondation qui se trouve à GISYO en aval de la rivière KANYOSHA :

Figure 11: Photos in situ des inondations en mairie de Bujumbura à GISYO

Pendant les mois d'avril et mai 2021, la montée des eaux du lac Tanganyika a affecté les provinces de Bujumbura rural (commune de MUTIMBUZI), RUMONGE (commune de BUGARAMA, MUHUTA, RUMONGE), Bujumbura mairie (commune de MUKAZA et MUHA) et MAKAMBA (commune de NYANZA- lac). La majorité des personnes déplacées vit dans la communauté hôte. Dans la province de Bujumbura rural, le site temporaire de KIGARAMANGO a été affecté ; 365 ménages ont été localités dans le site de Sobel (à MARAMVYA) ; parmi les nouveaux ménages déplaces ,772 ménages ont été installés aussi dans le site de sobel.

Tableau 4 : Nombre de personnes affectées par les inondations et déplacées par commune

Province	Commune	Personnes affectées	Personnes déplacées
BUJUMBURA MAIRIE	MUHA	2521	520
	MUKAZA	42	42
BUJUMBURA RURAL	MUTIMBUZI	40 673	13 395
MAKAMBA	NYANZA - LAC	1916	1896
RUMONGE	BUGARAMA	4539	4539
	MUHUTA	1272	1031
	RUMONGE	1219	1157
TOTAL		52 182	22 580

Note : les donnes présentées ont été récoltées par l'équipe d'urgence DTM (volontaire de la croix rouge) à la base d'évaluations faites les informateurs clés et les observations directes dans les lieux affectés et de déplacements

Les populations les plus affectés par les inondations étaient celles qui vivaient dans les collines au long du lac Tanganyika. Bujumbura rural et Rumonge étaient les provinces les plus touchées par les inondations.

Parmi les personnes affectées (52182) ,62% étaient des femmes dont 33% de filles (moins de 18ans) et 29% de femmes adultes (18ans et plus) ,38% étaient des hommes dont 20% de garçons (moins de 18ans) et 18% des hommes adultes (18ans et plus)

La carte montre des localités des personnes affectées :

Source : https ://reliefweb.int/report/burundi/flash-info-inondation-au-burundi-juin-2021

Figure 12: Carte des localités des personnes affectées

b. La perte du capital sol

L'instabilité de cette rivière provoque la perte de parcelle, les gens qui vont de son côté perdent leurs biens et vies ; ils perdent leurs parcelles et vous savez comment les parcelles d'aujourd'hui sont très chers après avoir la stabilisation de la rivière KANYOSHA ; ils vont récupérer leurs parcelles qui ont perdu ; donc la perte du capital sol

Figure 13: Localité de CECENI

Constant : A Titre d'exemple, on a pris la côte de CECENI un tronçon de 50m de la rivière KANYOSHA en utilisant Google Earth. La superficie totale est de 50m * 35.7m égal à 1785m^2 soustrayait La superficie du canal construite est de 50m fois 8m de largeur du canal égal à 400m^2 alors la superficie perdue est de 1385 m^2. On a expliqué que la stabilisation du son lit est nécessaire pour rétablir toute la forme de perte ; imagine tout le long de la rivière KANYOSHA qui ont perdu cette superficie.

II.9 Mesures de lutte contre l'érosion hydrique

La gestion de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la rivière KANYOSHA, comprend généralement la maitrise du ruissellement de surface en tant qu'il est son agent agressif. Pour lutter contre l'érosion hydrique dans le BV KANYOSHA, nous proposons les mesures de préventions selon le milieu (rural ou urbain).

II.9.1 Milieu rural

L'aménagement des bassins versants ruraux visent à réduire les effets ou les conséquences d'érosion. Ces dernières sont entre autres : la détérioration de la fertilité du sol, l'augmentation des débits de ruissellement, la réduction de la rétention du sol, l'envasement des réservoirs, des canaux et des rivières, la destruction des maisons, des routes et les autres réseaux de communication (A. AGPAOA et al. 1976).

Pour mitiger ce phénomène et ses conséquences, l'homme, malgré son implication dans l'accélération des processus d'érosion, a proposé une série de mesures et méthodes pouvant être appliquées en milieu rural. Aux cours des points suivants :

- Campagne de sensibilisation (Educational campaigns) : celle-ci visera à informer la population (surtout en milieu rural) des dangers d'érosion
- Reboisement : il consiste à couvrir la surface de la terre par des végétaux. Le reboisement des sols dégradés protège le sol contre l'érosion et augmente l'évapotranspiration et davantage augmente l'infiltration. L'aide étant de réduire les débits, voire les volumes, qui iront dans le réseau de collecte des eaux pluviales et de stabiliser les berges de la rivière.
- Gestion des eaux de la pluie : réserver des eaux qui proviennent des toits dans les tanks en fin de réduire le ruissellement. Surtout les ouvrages publics et privés (écoles, hôpitaux, les marchés, etc.) sont priés d'utiliser ces eaux pour les sanitaires
- Amélioration des rigoles anti érosifs dans les parcelles ;
- Chaque ménage doit avoir un puits d'infiltration qui accumule la précipitation qui provient du toit.
- Prévention et contrôle des feux de brousse (fire prevention and control) : Cette mesure sera rigoureusement mise en place pendant la saison sèche ;
- Gestion appropriée des prairies naturelles ;
- Restriction sur l'exploitation forestière dans les zones critiques

II.9.2 Milieu urbain

Dans le bassin versant de la rivière KANYOSHA, le milieu urbain (mairie de Bujumbura) est moins sensible à l'érosion hydrique. Mais il subit de plus des contrecoups de l'érosion provenant dans la région de MIRWA sous forme notamment de bouchement des ouvrages d'assainissement, des inondations et de destruction d'ouvrages. Par contre, l'urbanisme consiste à imperméabiliser le sol et par conséquent une augmentation du ruissellement (agent de l'érosion). Alors pour prévenir tout cela, des mesures de préventions sont proposées :

- Perméabilisation des chaussées : la perméabilisation des pistes (secondaires et tertiaires) permet l'eau de percoler à travers la chaussée et de s'infiltrer le sol local enfin de réduire le ruissellement et de contrôler l'érosion ;
- Gestion et amélioration du réseau d'assainissement : un entretien régulier du réseau d'assainissement facilite l'écoulement ;
- Construction en hauteur qu'en surface : la construction en hauteur permet de limiter l'extension de la ville et d'augmenter le temps de la concentration et davantage la diminution du débit de pointe ;
- Gestion des eaux de la pluie : la réserve de l'eau de la toiture dans les réservoirs est un atout non seulement environnemental mais aussi socio-économique ;
- Construction avec toiture terrasse : elle permet de garder quelque quantité de l'eau par évaporation et de ralentir le ruissellement.

II.10 Evolution Morphologique de la Rivière

On présente un outil qui permet de réaliser des prédictions semi-quantitatives sur les réponses morphologiques des rivières en conséquence des altérations sur les principales variables de contrôle.
Cet outil qui doit fonctionner à l'échelle du bassin versant est basé sur un ensemble de modélisations expertes, cas d'études, analyses empiriques, relations conceptuelles, qui sont susceptibles d'être réalisées avec des données réduites.

Le régime hydrologique et la disponibilité des matériaux sédimentaires sont, dans la plupart des cas, les principales variables de contrôle de la morphologie fluviale. Á l'échelle de temps considérée les altérations du régime hydrologique sont traduites par le changement de la fréquence moyenne d'un débit morphogène caractéristique.

Les altérations des apports solides sont évaluées par rapport à un état d'équilibre dynamique non perturbé. On définit l'altération par un vecteur dont les composantes sont les changements des apports sédimentaire (AS) qui provient de l'amont et du bassin intermédiaire et les changements de la fréquence d'un débit morphogène (FQMPH).

II.10.1 Calcul des Ecoulements Liquides (Hydraulique)

La connaissance des écoulements liquides dans une rivière passe Par détermination l'organisation des débits liquides le long du cours d'eau :

- ligne d'eau (relations hauteur/débit)
- champs des vitesses (1D ou 2D plan, 2D vertical -profil en travers-)

On dit d'un écoulement qu'il est **uniforme** sur un tronçon donné lorsque les caractéristiques géométriques et d'écoulement (hauteur, largeur, profondeur, pente, vitesses) restent identiques tout au long du cours d'eau. Cette situation est rarement rencontrée dans la nature (certains canaux artificiels).

II.10.2 . Collecte des données nécessaires dans l'évolution morphologique

II.10.2.1 . Deux grandes catégories de modèles

Les modèles numériques qui permettent de calculer à la fois des conditions de l'écoulement liquide et des transports solides dans les rivières existent depuis plus de 20 ans. Plus les modèles sont complexes et plus les données qu'ils manipulent sont nombreuses.

Les modèles existants travaillent :

Soit en 2D, suivant un plan horizontal-en long et en large de la rivière-avec des Valeurs moyennées sur la profondeur d'eau, Soit en faux 3D, c'est-à-dire en 2D avec de proche en proche, sur quelques profils, le calcul dans le profil-plan 2D vertical)

Les modèles sont généralement classes en deux catégories, selon qu'ils mettent en œuvre des équations de l'un ou l'autre type :

- équation de débit solide",
- -équation de "mouvement de sédiments"

Les modèles dit "de débit solide" sont bien souvent réduit aux formules de débit solide sensu stricto.

Tableau 5 : Différences fondamentales entre ces deux types de modelé et de données nécessaire à leur mise en œuvre

Modèles de débit solide	Modèles de mouvement de sédiments
Nécessite en entrée : -débit et vitesse -rugosité du fond du lit -masse volumique des sédiments -granulométrie de surface du lit	Nécessite en entrée : débit et vitesse -rugosité du fond du lit -masse volumique des sédiments -granulométrie de surface du lit -charge sédimentaire en entrée à l'amont du système -géométrie du lit de la rivière sur les longues distances (plusieurs kilomètres) -granulométrie suivant la profondeur du lit et éventuellement présence de la roche en place
Fournit en sortie : -les conditions d'écoulement de débit de solide à l'équilibre	Fournit en sortie : -les conditions d'écoulement de débit de solide à l'équilibre - les changements de profils du lit induits par la prise en compte des échanges sédiment du lit sédiment transporté
Application seulement au transport des sédiments constituant le lit	Application au transport des sédiments constituant le lit et amenés par écoulement (issus des versants et autres affluents)
	Permet de représenter le comportement du lit d'une rivière graveleuse en présence d'un apport en particules sableuse (charriages) : loi de rechargement d'écoulement et calcul de la nouvelle granulométrie de la surface du lit assurant l'équilibre d'écoulement

II.10.2.2 **Données hydrologiques**

Les données hydrologiques sont par définition les données de débit liquide dans la rivière.

II.10.2.3 **Données hydrauliques**

Ces données sont par nature très variables tout au long d'une rivière. Elles sont représentées par les variables suivantes :

- la ligne d'eau (altimétrie du plan d'eau de la rivière)

-les vitesses de l'eau (vitesse moyenne ou champ des vitesses à travers une section)

Ces variables dépendent de la section considérée de la rivière et du débit liquide.

Les systèmes les plus simples et les moins onéreux sont les échelles à maxima complétés de mires hydrométriques (échelles graduées). Elles permettent de relever :

- après le passage d'une crue, le niveau le plus haut atteint par la rivière

-ou de façon périodique, les niveaux pour différents débits dans la rivière.

II.10.2.4 **Données morphologiques**

Ces données décrivent l'altitude du fond du lit, des berges, du lit majeur. Elles se présentent sous trois formes :

- Un profil en long du fond du lit
- Des profils en travers
- Un plan détaillé du lit majeur avec des courbes de niveau.

Cette dernière permet d'accéder aux deux premières si l'échelle et la précision du levé sont compatibles avec le relief du terrain.

Ces données sont :

- Nécessaires à la modélisation hydraulique (organisation des écoulements dans le lit de la rivière),
- Utiles à l'analyse des évolutions historiques du lit de la rivière.
- Nécessaires au calage des modèles d'évolution du lit ("modèles de mouvements de sédiments")

II.10.2.5 Données sédimentologies

Les données sédimentologiques nécessaire à la mise en œuvre des modèles de débit solide ou de mouvements sédimentaires sont de trois types :

- Caractéristiques des sédiments présents dans le lit de la rivière
- Caractéristiques des sédiments transportés par les écoulements
- Caractéristiques de la charge sédimentaire à l'entrée du "système rivière" modélisé

Selon le type de modèle que l'on souhaite utiliser (du plus simple au plus complet), la nature des caractéristiques sédimentaires à obtenir est variable :

- La densité des sédiments
- Un seul diamètre caractéristique des sédiments (D50 à D90)
- La répartition par classes granulométriques
- La granulométrie des sédiments de surface du lit
- La granulométrie des différentes couches qui composent le fond du lit

Les données sédimentologiques sont celles qui sont généralement les moins bien connues et un effort particulier doit être fait pour les acquérir. Des procédures normalisées (normes internationales) peuvent être utilisés

II.11 Expertise du transport solide

Le transport solide dans les rivières et les processus morphométriques sont parmi les phénomènes les plus complexes et les moins compris dans la nature (M. Mohamed GHARBI, 2016). Plusieurs chercheurs ont tenté de modéliser ce phénomène et nous ont proposés des formules nous permettant d'évaluer le transport solide.

Certaines des formules proposées pour l'évaluation du transport solide tiennent compte des paramètres climatiques et morphométriques du bassin versant. D'autres, plus récentes, font référence à la dispersion granulométrique du lit de la rivière et la morphométrie du lit.

Au cours du présent travail, seul les formules d'évaluation du transport solide par des formules tenant compte des paramètres climatiques et de la morphométrie du bassin versant sont présentées. La non utilisation des formules tenant compte de la granulométrie est due au fait qu'elles requièrent des données sur le débit moyen du cours d'eau en plus de la granulométrie et de la morphométrie du lit. Or, après un entretien au sein des services climatologiques et météorologiques de l'Institut Géographique du Burundi, La rivière KANYOSHA n'est pas jaugée.

Plusieurs expressions ont été établies pour lier les facteurs d'érosion entre eux et quantifier les pertes de sol. On peut citer quelques-unes :

- **Formule de Fournier** : elle détermine l'érosion hydrique en fonction de la précipitation, de l'altitude moyenne et de la superficie de bassin versant. Elle se définit comme suit :

$$\boldsymbol{E} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{36}} * \left(\frac{\boldsymbol{px^2}}{\boldsymbol{pa}}\right)^{\mathbf{2,65}} * \left(\frac{\boldsymbol{h^2}}{\boldsymbol{S}}\right)^{\mathbf{0,46}} \qquad (2.22)$$

D'où :

$\boldsymbol{E}$: Apport solide annuel moyen spécifique ($tonnes/km2/an$) ;

$\boldsymbol{Px}$: pluviométrie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm) ;

$\boldsymbol{Pa}$: Pluviométrie annuelle moyenne (mm) ;

$\boldsymbol{h}$: dénivelée moyenne du bassin versant (m) ou 0,45 $*$ ($hmax$ - $hmin$)

$\boldsymbol{S}$: Superficie du bassin versant (km2)

L'analyse des données pluviométriques à une période de 31ans (1971-2001) à la station de BUHONGA montre que le mois le plus pluvieux est le mois d'avril avec une moyenne de 190,66mm. Sur la même station et la même période d'observation, la pluviométrie moyenne annuelle calculée est de 1373mm

L'analyse des caractéristiques du bassin versant obtenus montre que le bassin versant a une surface de 57.51 m^2. L'hypsométrie du bassin versant montre que la cote maximale (hmax) et celle minimale (hmin)

sont respectivement égales à 2537 m et 759 m. De ces deux côtes, on trouve que la dénivelée moyenne du bassin versant est de 800 .1 m.

Pour quantifier la perte de terre en utilisant le fournier est alors :

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{36} * \left(\frac{190{,}66^2}{1373}\right)^{2{,}65} * \left(\frac{800.10^2}{57.51}\right)^{0{,}46} = 8146022.711\ \boldsymbol{t}/\boldsymbol{k}\text{m}^2\ /\boldsymbol{an}.$$

La perte en terre évaluée selon la formule de Fournier est de 468477766 ,1 tonnes/an. En considérant le poids volumique des matériaux transportés à 2 650kg/m^3, on trouve que le volume total des matériaux transportés est de 176784062 ,6792 m^3/an. Si nous ramenons ce volume à toute la surface du bassin versant, on trouve que la perte en terre moyenne est environ égale à 3073,9708mm/an.

- **Formule de GRAVILOVIC**

Elle est élaborée en Yougoslavie et utilise un indice climatique et des caractéristiques physiques du bassin versant. Selon cette formule, la production annuelle des sédiments est évaluée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{T} * \boldsymbol{P} * \boldsymbol{\pi} * \sqrt{\boldsymbol{z}^3} \qquad (2.23)$$

On a :

D : $Production\ moyenne\ annuelle\ de\ sédiments\ en\ suspension$

$et\ par\ charriage\ m3/km2/an$;

P : $pluie\ moyenne\ annuelle\ en\ mm$;

$T = \sqrt{\left(\frac{to}{10} + \mathbf{0.1}\right)}$ $avec\ to$: $la\ température\ moyenne\ annuelle\ en°C$;

z : $Coefficient\ d'érosion.$

Le coefficient d'érosion z est donné par l'expression suivante :

$$Z = x.\ y.\ (\varphi + \sqrt{I})$$

Avec :

Z:$coefficient\ d'érosion$;

x: $coefficient\ dépendant\ de\ la\ protection\ du\ sol$;

y: $Coefficient\ d'érodabilité\ du\ sol\ dépendant\ de\ la\ structure$

$lithologique\ et\ pédologique\ du\ sol$;

φ: $facteur\ exprimant\ le\ type\ et\ le\ degré\ des\ processus\ d'érosion$

$dans\ le\ bassin\ versant$;

I: $Pente\ moyenne\ du\ bassin\ versant.$

Pour un bassin versant non protéger contre l'érosion, le coefficient x prend les valeurs suivantes :

d'où x est égal :

1,0: $Terrain\ entièrement\ dénudé,\ incultivable$;

0,9: *Champs labourés suivant la pente*;

0,7: *Verges et vignobles sans végétation au sol*;

0,60: *Alpage, forêts dégradées et brouissailles avec le sol érodé*;

0,40: *Prairies, champs de trèfle et d'autres cultures semblables*;

0,05: *Forêts ou brouissailles denses et de bonne structure.*

Le coefficient d'érodibilité « y » prend les valeurs suivantes selon le type de roche du sous-sol :

0,2 à 0,6 : *pour les roches dures, résistantes à l'érosion* ;

0,6 à 1,0 : *pour les roches mi - résistantes à l'érosion* ;

1,0 à 1,3 : *pour les roches friables, stabilisées (éboulis, Schiste, etc.)* ;

1,3 à 1,8 : *pour les sédiments, moraines, argile et autres roches peu résistantes* ;

1,8 à 2,0 : *Sédiments fins et terres, non résistantes à l'érosion.*

Le facteur φ est choisi en fonction du type et degré d'érosion dans le bassin versant :

0,1 à 0,2: *si l'érosion est faible dans le bassin versant*;

0,3 à 0,5: *si l'érosion a lieu en nappes sur* 20 à 50% *du bassin*;

0,6 à 0,7: *érosion en nappes, éboulis et dépots ravinés, l'érosion karstique*;

0,8 à 0,9: *si* 50 à 80% *du bassin est érodé par affouillements et éboulements*;

1,0: *bassin entièrement érodé par affouillement et éboulements.*

Le coefficient d'érosion Z reflète l'intensité et l'extension du phénomène d'érosion d'un bassin. Les valeurs de z sont comme suit :

- Erosion excessive : Z>1,01
- Erosion intense : 0,71-1
- Erosion moyenne : 0,41-0,7
- Erosion faible : 0,20-0,4
- Erosion très faible : Z <0,19

Selon l'auteur de la formule, la capacité de transport des cours d'eau n'est jamais aussi grande que les eaux pourraient emporter la production entière des matériaux érodés. Un certain pourcentage se dépose dans le talweg à l'amont de l'embouchure ainsi que sur les élargissements et les atténuations de la pente longitudinale du lit. De ce fait, l'afflux du débit solide à l'embouchure est réduit.

Le coefficient de réduction ou coefficient d'abrasion « R » est calculé par la relation suivante :

$$\boldsymbol{R_m} = \frac{\sqrt{\boldsymbol{per.Hmoy}}}{\boldsymbol{0,25(L+10)}} \qquad (2.24)$$

Où : Rm : coefficient de rétention de sédiments

Per : périmètre de bassin versant en km

Hmoy : altitude moyenne en km

L : longueur de thalweg principal en km

En intégrant le coefficient d'abrasion « R », l'afflux du débit solide est réduit et la dégradation spécifique « D_S » en m3/Km2/an est donnée par :

$$\boldsymbol{D_S = D.R_m} \qquad (2.25)$$

Comme la formule de Fournier, le modèle de GRAVILOVIC utilise un indice climatique et les caractéristiques physiques du bassin versant pour le calcul du transport solide.

A la station BUHONGA, La température moyenne est estimée de 21 ,9 °C

- **La formule universelle de perte en sol porte le nom de WISCHMEIER ET SMITH**

$$A = R * K * LS * C * P \qquad (2.26)$$

Avec =

A : perte en terre (tonne / ha)

R : indice de pluie. Il représente le nombre d'unité de l'indice d'érosivité

K : indice d'érodibilité du sol

Ls : les facteurs topographiques qui tiennent compte de l'effet de la longueur de la pente (l(m)) et de sa déclivité (s%) sur l'intensité d'érosion

C : indice de culture qui prend en considération l'influence des pratiques culturales et du couvert végétal

P : conservation du sol

Ils ont été développés pour but de prédire la perte en sol.

- **La formule de SOGREAH**

$$AS = 350R^{\alpha} \qquad (2.27)$$

AS : apport solide en t/km^2 /an

R : écoulement moyen annuel (mm/an)

α : Coefficient de la perméabilité du sol

Propose α : 1.5

Ces formules empiriques citées ci - haut ont tous été développés pour leurs raisons spécifiques et permis d'évaluer la quantification d'érosion des bassins versants.

II.12 Evaluation des Méthodes pour la Stabilisation des Cours d'eau dans un Milieu Urbain.

II.12.1 Stabilisation des lits

- **Définition des lits**

Le lit d'un cours d'eau est un fond de vallée ou l'eau provenant du ruissellement est concentrée. Le lit de rivière ou de ruisseau, est la partie d'une eau courante qui limite l'écoulement des eaux vers le bas et vers les côtés.

En fonction de la taille du cours d'eau, un lit de rivière (pour les grands ruisseaux, les rivières, les fleuves) et un lit de ruisseau (pour les petits ruisseaux, les rus) sont souvent différenciés. Il existe un lit majeur de cours d'eau et le lit mineur

Figure 14 : Illustration du lit de la rivière KANYOSHA

- **Canalisation de cours d'eau par une section entièrement en béton armée**

La crue a provoqué des phénomènes de dégradation et d'aggradation du lit des rivières. Cet ajustement naturel permet aux cours d'eau de retrouver éventuellement un état d'équilibre. Cependant, ce retour naturel vers un état d'équilibre dynamique peut s'avérer très long et causer entre temps des pertes considérables de terrain, ce qui retarde d'autant plus l'application des plans de réaménagement des rivières, particulièrement dans les secteurs urbanisés. Les interventions ont consisté à redéfinir le lit des rivières, on peut canaliser le lit de rivière KANYOSHA avec une section entièrement en béton armée, paver, draguer ainsi que démanteler des embâcles.

Figure 15 : Canal de cours d'eau

Avantage :

- A la fois résistant à la compression et à la traction
- Résistant au feu, aux tremperies et catastrophes naturelles

Inconvénients :

- Augmenter du poids de la structure
- Nécessite de mettre hors service l'ouvrages à renforcer pendant la durée de travaux qui est généralement longue
- Transport des matériaux
- Nécessite de coffrages

Redéfinition des tracés des lits

Lors du déluge, l'augmentation de la vitesse du courant et de l'épaisseur de la lame d'eau a provoqué de multiples perturbations du lit des cours d'eau. On peut ainsi faire ressortir trois principaux types de problèmes : élargissement des cours d'eau, déplacement latéral des cours d'eau ou formation de méandres, et formation de lits multiples ou tressés.

La détermination du nouveau lit des rivières a donc été réalisée en tenant compte notamment de l'interaction entre les apports d'eau, la charge sédimentaire du bassin versant, la nature géomorphologique du milieu, les caractéristiques d'écoulement, la pente du cours d'eau, les contrôles hydrauliques existants et prévus et l'utilisation du territoire. La pente du lit des cours d'eau a été redéfinie afin d'obtenir une pente d'équilibre permettant de conserver un lit stable et de limiter la tendance de certains cours d'eau, en particulier à devenir ou à redevenir tressés ou sinueux.

Redéfinition de lit

Figure 16 : lits multiples et simples

II.12.2 Stabilisation de berges

Les berges assurent d'importantes fonctions écologiques. Elles constituent le support de la végétation herbacée et ligneuse, un habitat pour la faune et la flore et un secteur d'échanges entre le lit mineur et le lit majeur.

En matière d'équilibre dynamique, les berges ont deux grandes fonctions :

- la dissipation de l'énergie du cours d'eau en s'érodant,
- la régulation hydraulique en favorisant ou en limitant les débordements du cours d'eau dans son lit majeur.

Source : Photo prise à la rivière KANYOSHA en date du 20/02/2023

Figure 17: Glissement de berge

- **Rive, berge**

Rive et berge sont souvent confondues à tort. La berge est le talus incliné qui sépare le lit mineur et le lit majeur. Sa localisation est donc assez précise. La rive est le milieu géographique qui sépare les milieux aquatique et terrestre. Elle démarre au sommet de la berge et constitue une partie plate plus ou moins étendue qui reste sous l'influence du milieu aquatique.

Figure 18 : Rive et berge

- **Murs de soutènement en Gabionnage**

Le terme « mur de soutènement » signifie à la lettre tout mur ayant pour fonction de soutenir n'importe quel matériau qui peut être du minerai, de l'eau, des céréales, de la terre ; Toutefois, comme des termes plus distinctifs tels que barrages, réservoirs, silo ont été inventés, le bon sens veut que le terme mur de soutènement ne désigne que les murs retenant uniquement de la terre.

Un mur en gabions est constitué de cages à grilles métallique pré- remplies des pierres, de blocs de pierre. Ainsi ; les gabions sont utilisés pour réaliser un mur de soutènement en stabilisant les berges, confectionnées sur leur lieu d'implantation. Leur souplesse leur permet de s'adapter à l'évolution du lit de la rivière. Leur valeur esthétique est faible mais peut être améliorée par végétalisation

Figure 19: Stabilisation par le gabionnage

Avantage :

- Avoir un intérêt pour la biodiversité contrairement au béton
- Limiter l'artificialisation et l'imperméabilisation des sols
- Créer de micro habitant et de microclimat propice à une biodiversité particulière
- Drainant
- Rapide à monter

Inconvénient :

- Prix chère
- Taille : le gabion prend de la place
- Son emplacement n'est pas prédéterminé
- Inesthétique

❖ **Les berges maçonnées et le radier en béton**

Pour construire le muret des soutènements en moellons sont des murs qui peuvent contenir la poussée des terres d'un terrain en pente. Toutes fois le mur en moellon constitué de pierres et mortier de ciment ; ainsi le mur de soutènement peut protéger les routes, les lits et les berges de la rivière comme illustration dans la photo suivante

Photo prise à la rivière NYABAGERE en date du 25 /03 /2023 ; 02h : 00 GMT

Figure 20: Stabilisation par un muret de soutènement en moellon

Avantage :

- Permet de franchir les rivières en basses eaux et qui est submerge en cas des crues
- Permet de soutenir toute la surface
- Procure une meilleure stabilité d'assisse à la construction
- La construction est très technique
- Faciliter une imperméabilisation de la structure et une bonne thermique

Inconvénient :

- Le tassement est le critère le plus défavorable sur un radier
- Brèche et affouillement sous le radier

❖ **Stabilisation par Génie végétative**

Les parties supérieures des talus stabilisés par enrochement ont été complétées, à de nombreux endroits, par des interventions de stabilisation végétale. Cette technique a consisté à stabiliser la partie supérieure du talus au moyen de fagots, matelas de branches, fascines, boutures, plançons, plants en caissette.

De façon générale, la réalisation de chacune de ces techniques a nécessité l'utilisation de parties d'arbustes indigènes localisés à proximité du site des travaux.

Avantage :

- Permet de travail en circuit court car la matière première provient très souvent des berges même de la rivière
- Ne pas perturber les remplissages des nappes phréatiques
- Mêler aux milieux naturels existants
- La conservation de la biodiversité.

Inconvénient :

- Hostilité dans l'urbanisation

Figure 21 : Stabilisation végétative

❖ **Les berges maçonnées et le radier en enrochement**

C'est le type de travaux qui a été effectué le plus fréquemment. Il représente, en effet, 75 % des cas d'intervention.

L'érosion des berges résulte habituellement de l'action d'un certain nombre de facteurs dont l'élévation du niveau des eaux, l'augmentation de la vitesse du courant, l'action des vagues et le déplacement latéral du lit. La nature des matériaux constituant les berges et leur pente sont aussi des paramètres influençant l'érosion. L'intervention la plus souvent retenue pour ce type de problème d'érosion des rives a consisté à mettre en place une protection par enrochement. Cet ouvrage est constitué de pierres naturelles récupérées sur le site des travaux ou de pierres angulaires provenant d'une carrière

Figure 22 : Berge maçonnée et radier en enrochement

Avantage :

- Le tapis d'enrochement est suffisant comme protection
- Moins chère par rapport aux gabions

Inconvénient :

- Modifications de la rugosité du cours d'eau

CHAPITRE III. GENERALITES SUR LA ZONE D'E TUDE

III.1 Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la rivière KANYOSHA est partagé par deux provinces du Burundi à savoir la province de Bujumbura et la province de Bujumbura-Mairie :

- Pour la province de Bujumbura, le bassin versant de la rivière KANYOSHA occupe une partie de la commune KANYOSHA, MUGONGOMANGA, NYABIRABA.
- Pour le cas de la province de Bujumbura -Mairie, il occupe une partie de la commune MUHA en deux zones l'une de la zone KANYOSHA (quartiers : BUSORO en amont, au milieu du quartier MUSAMA, en aval quartier GISYO - lac) l'autre dans la zone MUSAGA qui se trouve un affluent de la rivière KAMESA se jetant dans la rivière KANYOSHA en bas de la quartier KAMESA urbain à l'amont (quartier KINANIRA II, CECENI et KIBENGA en aval) pour lesquelles la rivière KANYOSHA constitue la frontière.

La figure montre la situation administrative du bassin versant de la rivière KANYOSHA

Figure 23: Situation administrative du bassin versant de la rivière KANYOSHA

III.2 Situation géographique de la zone d'étude

La rivière KANYOSHA est une rivière à caractère torrentiel qui coule de l'Est à l'Ouest et se jette dans le lac Tanganyika. Elle draine un bassin versant topographique de 57,51 km^2 inscrit dans un rectangle localisé géographiquement entre 29, 3 39752°de longitude Est et 3 ,432583°de latitude Sud.
La grande partie du bassin versant de la rivière KANYOSHA est montagneuse comme le montre la carte hypsométrique, la carte des pentes et la carte topographique. Ces dernières ont été générées sous ArcGIS 10.3 sur base du modèle numérique de terrain (MNT) fourni par le Bureau de Centralisation Géomatique (BCG) du Burundi.

La partie rurale du bassin versant est très montagneuse avec des pentes généralement très raides (Figure 23) dont la moyenne est de 27%. En témoigne également le rapport qui est très élevé.

Figure 24: carte des pentes du bassin versant de la rivière KANYOSHA

La topographie du bassin versant explique partiellement le caractère torrentiel du cours d'eau.

Figure 25 : carte topographique du bassin versant de la rivière KANYOSHA

La figure montre la carte hypsométrique du bassin versant de la rivière KANYOSHA

Figure 26 : Carte Hypsométrique du Bassin versant de la rivière KANYOSHA

La partie urbaine du bassin versant de la KANYOSHA appartient à l'agglomération de Bujumbura. Elle s'étend sur une superficie totale d'environ 57 ,51 m^2 dont (50% sont constituées de parcelles viabilisées. Dans cette partie basse du cours d'eau se jettent un émissaire (affluent) que part, d'amont vers l'aval :

- *Rivière KAMESA*

Figure 27 : Vue partielle de la rivière KANYOSHA d'un tronçon étudié

Tableau 6:Répartition de la surface du BV KANYOSHA en fonction de l'altitude

zmin	zmax	gridcode	Shape_Area	SURFACE_EN_KM2	% de A	% CUMULE
759	820	1	1664122.766	1.664	0.02894	100.00%
820	900	2	951189.5055	0.951	0.01654	97.11%
900	1000	3	1121514.812	1.122	0.01950	95.45%
1000	1100	4	2199024.576	2.199	0.03824	93.50%
1100	1200	5	2608224.016	2.608	0.04536	89.68%
1200	1300	6	3173843.568	3.174	0.05519	85.14%
1300	1400	7	2235783.057	2.236	0.03888	79.62%
1400	1500	8	2431522.2	2.432	0.04228	75.74%
1500	1600	9	3456144.022	3.456	0.06010	71.51%
1600	1700	10	8447099.768	8.447	0.14689	65.50%
1700	1750	11	4551574.682	4.552	0.07915	50.81%
1750	1800	12	3290587.183	3.291	0.05722	42.89%
1800	1900	13	7357243.931	7.357	0.12794	37.17%
1900	2000	14	4898241.4	4.898	0.08518	24.38%
2000	2100	15	3476227.391	3.476	0.06045	15.86%
2100	2150	16	1388617.222	1.389	0.02415	9.81%
2150	2200	17	1133519.227	1.134	0.01971	7.40%
2200	2300	18	2280415.127	2.280	0.03966	5.43%
2300	2500	19	818992.5985	0.819	0.01424	1.46%
2500	2537	20	21927.86762	0.022	0.00038	0.04%
				57.506		

La figure qui représente la courbe hypsométrique du BV de la rivière KANYOSHA

Figure 28 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière KANYOSHA

III.3 Hydrographie du bassin versant de la rivière KANYOSHA.

Le bassin versant d'étude est celui drainé par la rivière KANYOSHA. Son affluent principal est la rivière KAMESA en amont. De nombreux autres ruisseaux s'y jettent de l'amont à l'aval.

La rivière KANYOSHA est une rivière à caractère torrentiel caractérisé par des pentes brutes à l'amont et diminuant progressivement vers l'aval. De ce fait, l'instabilité des berges dans la partie amont de la rivière est due principalement à l'affouillement causé par des fortes vitesses d'eau de ruissellement. Dans la partie aval, la diminution progressive de la pente (vitesse) fait qu'elle soit une zone de dépôt. Il en résulte un risque imminent d'envasement des ouvrages hydrauliques et débordement du lit.

Pour mettre plus de lumière aux propos qui viennent d'être évoqués dans le précédent paragraphe, le profil en long de la rivière KANYOSHA est présentée sur la figure suivante :

La figure représente le profil en long d'un cours d'eau principal du bassin versant de la rivière KANYOSHA.

Figure 29: Profil en long d'un cours d'eau principal du bassin versant de la rivière KANYOSHA

Le profil en long dans le tronçon étudie de la rivière KANYOSHA

Figure 30 : profil en long dans le tronçon étudie

III.4 Synthèse des caractéristiques physiques du BV KANYOSHA

Le bassin versant présente plusieurs caractéristiques physiques qui influencent sa réponse hydrologique ; notamment le régime des écoulements en période des crues ou étiages. Ces caractéristiques comprennent dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Caractéristiques physiques du BV de la rivière KANYOSHA

Désignation	Symbole	Unité	BV
Surface	A	Km^2	57 .51
Périmètre	P	km	59.792
Indice de Gravelius	K_G	-	2.22
Altitude maximale	Hmx	m	2537
Altitude Minimale	Hmn	m	759
Altitude Moyenne	Hmoy	m	1600
Altitude médiane	Hméd	m	1700
Alt. à 5%	H5%	m	2220
Alt. à 95%	H95%	m	910
Rectangle équivalent	L	Km	27,8275
	l	Km	2,068
Pente du BV	IBV	%	40 ,135
Pente de roche	IP	%	21
Pente globale	IG	%	0.047

III.5 Caractéristiques des ouvrages hydrauliques construits sur la rivière KANYOSHA en Mairie de Bujumbura

En effet, la rivière KANYOSHA traverse un milieu nanti en infrastructure de transport terrestre.

De ce fait, pour la franchir, il a fallu qu'on aménage des ponts routiers. Ces derniers sont construits sur les axes routiers comme la douzième avenue et les routes nationales numéro 3.

Afin d'arriver à déterminer la capacité de transport de ces ponts, les formules empiriques à utiliser obligent d'intégrer les caractéristiques géométriques de ces ouvrages. Les visites effectuées à l'endroit de ces ouvrages nous ont permis de décrire et de mesurer ces ouvrages.

Tableau 8: Présente une brève description des ponts sur la douzième avenue et la RN3

Ouvrage	*Formes*	*Structure*	*Dimensions*
Pont sur la douzième avenue	*Dalot à quatre ouvertures rectangulaires égales*	*Béton armé*	*-largeur à la base par ouverture : 3,5m* *-hauteur de l'ouverture : 5m* *- nombre d'ouverture : 4*
Pont sur la RN3	*Dalot cadre à une ouverture rectangulaire*	*Béton armé*	*Largeur à la base de 10m* *Hauteur de l'ouverture 5m*

Pont KANYOSHA sur la douzième avenue (a) Pont KANYOSHA sur RN3(b)

Figure 31 : Pont KANYOSHA sur la douzième avenue et RN3

CHAPITRE IV. CALCUL DES DEBITS DES CRUES DE LA RIVIERE KANYOSHA

IV.1 Etude hydrologique et hydraulique de la zone d'étude

Les précipitations journalières enregistrées au niveau des stations météorologiques de BUHONGA, ISALE et Aéroport de Bujumbura nous ont été fournies par l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU). Ces précipitations ont fait l'objet d'une analyse suivi d'un traitement statistique pour la détermination de la pluie de la rivière KANYOSHA.

Bien que les données des trois stations météorologiques localisées tout autour de notre zone d'étude nous soient données, compte tenu de la distance (latitude et longitude) et de l'altitude de ces stations par rapport au bassin d'étude, seules les précipitations de la station BUHONGA ont été utilisées pour le présent travail.

Les inondations sont des événements extrêmes dues à des crues extrêmes qui surviennent après une certaine période de retour. Au cours du présent travail, l'analyse statistique des précipitations journalières maximales annuelles a été faite suivant deux lois statistiques de traitement des variables aléatoires. Les lois utilisées sont la loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle et la loi de Pearson III (Wilson).

Les résultats obtenus pour les différentes lois d'analyse ont été comparés aux valeurs expérimentales pour voir la loi qui semble mieux corrélée avec la réalité.
Cette comparaison a été faite par visualisation graphique.

IV.2 Analyse et prétraitement des données disponibles

Les données de la station de BUHONGA ont été analysées, groupées et prétraitées afin de faciliter leurs analyses statistiques et leurs utilisations dans la suite de ce travail. Le tableau suivant présente les résultats de prétraitement :

Tableau 9 **:** Présentation des données pluviométriques utilisées

Années	Nbre de jp	P365	P_{30} Min	P30max	P30	P24 max	Date de p_{24} Max	Pi de 5Jours précédentes p_{24}	Observation
		mm	mm	mm	mm	mm		Mm	
1971	168	1411,3	11.6	253.9	117.61	66.8	05/05/1971	4O.9	P24 complété
1972	152	1543,1	0	277.4	128.59	53.3	27/8/1972	1.4	P24 complété
1973	136	1246,9	0	181.7	103.91	50	28/2/1973	19.3	P24 complété
1974	140	1355	18.8	223.4	112.92	45 .1	07/04/1974	41.1	P24 complété
1975	129	1417,4	0	182.7	118.12	54.9	29/01/1975	35.1	P24 complété
1976	144	1365,5	10	215.1	113.79	46.2	02/04/1976	20.7	P24 complété
1977	154	1569 ,7	2.3	236.3	130.81	51.4	30/01/1977	5.7	P24 complété
1978	141	1378,1	1.4	319.8	114.84	65.7	08/03/1978	31	P24 complété
1979	127	1225,6	0	223.3	102.13	50.3	31/01/1979	7 .4	P24 complété
1980	139	1254 ,7	2.2	194.1	104.56	83.6	04/12/1980	14.8	P24 complété
1981	152	1356 ,8	6.8	202	113 .07	35.6	16/01/1981	10.2	P24 complété
1982	140	1343.6	0	184.2	111.97	54.5	31/03/1982	13.3	P24 complété
1983	147	1478.6	0	232.3	123.22	50.2	30/03/1983	22.3	P24 complété
1984	121	1257.2	0	192.2	104 .77	45 .7	12/12/1984	7.6	P24 complété
1985	142	1410.8	0	272.7	117.56	35.5	20/03/1985	47.9	P24 complété
1986	153		0	262.5	124.09	42	12/10/1986	20.4	Abs p24 dec
1987	147	1411.2	0	230 .4	117.60	52	24/03/1987	1.3	P24 complété
1988	167	1543.1	O	277.4	128.59	52.8	03/10/1988	20.4	P24 complété
1989	141	1359	8.9	2O4.9	113.25	36.4	17/12/1989	41.3	P24 complété
1990	126	1269.5	O	239.8	105.79	44.5	14/O3/1990	20.6	P24 complété
1991	149	1384.1	8.9	211.7	115.34	80.7	29/O5/1991	20.2	P24 complété
1992	124	1077.5	O	162.9	89.79	39.2	17/03/1992	O	P24 complété
1993	117		O	215	118.60	47.8	11/01/1993	50.7	Abs p24 Sept
1994	130		3	262	130.47	39.7	13/03/1994	13.8	Abs p24 oct.
1995	128	1289 .9	O	229.5	107.49	34.4	11/02/1995	5.6	P24 complété
1996	121	1266.9	O	266.4	105.58	34	23/02/1996	28.1	P24 complété
1997	163	1674.5	O	337.4	139.54	31.6	22/11/1997	77.7	P24 complété
1998	152	1529.2	3.2	318.1	127.43	55.6	09/05/1998	4.2	P24 complété
1999	76		O	188	73.94	42.2	04/03/1999	35.6	Abs p24 déc.
2000	95	1183.1	O	331.7	98.59	60.8	28/03/2000	O	P24 complété
2001	120	1468.7	O	310.7	122.39	52.7	17/12/2001	10	P24 complété

Avec :

- JP : jour des pluies ;
- P365 : précipitations annuelles ;
- P30 min : Précipitations mensuelles minimales ;
- P30 max : Précipitations mensuelles maximales ;
- P24 max : Précipitations journalières extrêmes annuelles ;
- P30 : Précipitations mensuelles moyennes ;
- P24 complètes : Précipitation journalières de tous les jours de l'année disponibles ;
- Abs : non disponibilités des données ;
- Sept. : Septembre ;
- Oct. : Octobre ;
- Nov. : Novembre ;
- Déc. : Décembre.

Constant :

Ces données pluviométriques qui sont disponible à l'IGEBU du 1971 à 2001 ; Parce que la rivière KANYOSHA jusqu'aujourd'hui n'est pas jauge.

IV.2.1 Fréquence expérimentale observée

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

$$\boldsymbol{Pm} : \frac{\boldsymbol{m - a}}{\boldsymbol{n + 1 - 2\alpha}} \qquad (4.1)$$

Où :

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

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

Tableau 10 : Valeurs du paramètre « α » selon les différents auteurs.

Auteur	α	Formule finale
Hazen	*0 .5*	$\boldsymbol{Pm :} \frac{m-0.5}{n}$
Weibul	*0*	$\boldsymbol{Pm :} \frac{m}{n+1}$
Chegodayev	*0.3*	$\boldsymbol{Pm :} \frac{m-0.3}{n+0.4}$
Blom	*0 .375*	$\boldsymbol{Pm :} \frac{m-3/8}{n+1/4}$
Tukey	*0.333*	$\boldsymbol{Pm :} \frac{m-1/3}{n+1/3}$
Gringorten	*0.44*	$\boldsymbol{Pm :} \frac{m-0.44}{n+0.12}$
Cunnane	*0.4*	$\boldsymbol{Pm :} \frac{m-0.4}{n+0.2}$

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

$p(X \geq xm) = 1 - p(X \leq Xm)$.

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

$$T_{exp} = \frac{1}{p(X \geq xm)}$$

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

Au cours du présent travail, le coefficient α de Hazen a été adopté.

Le tableau suivant présente les différentes probabilités et périodes de retour expérimental des précipitations extrêmes journalières annuelles observées aux cours des 31 ans de période d'observation.

Tableau 11 : Valeurs des probabilités au non dépassement et de dépassement des précipitations extrêmes journalières observées.

Année	P_{24}max	N°	P_i croissant	P(X≤xi)	P(X≥Xi)	Texp
1971	66,8	1	31,6	0,01	0,98	1,02
1972	53,3	2	34	0,04	0,95	1,05
1973	50	3	34,4	0,08	0,91	1,09
1974	45,1	4	35,5	0,11	0,88	1,13
1975	54,9	5	35,6	0,15	0,85	1,17
1976	46,2	6	36,4	0,18	0,82	1,22
1977	51,4	7	39,2	0,21	0,79	1,27
1978	65,7	8	39,7	0,24	0,75	1,32
1979	50,3	9	42	0,27	0,726	1,38
1980	83,6	10	42,2	0,31	0,69	1,44
1981	35,6	11	44,5	0,34	0,66	1,51
1982	54,5	12	45,1	0,37	0,62	1,59
1983	50,2	13	45,7	0,40	0,59	1,68
1984	45,7	14	46,2	0,44	0,56	1,77
1985	35,5	15	47,8	0,47	0,53	1,88
1986	42	16	50	0,50	0,50	2,00
1987	52,4	17	50,2	0,53	0,46	2,14
1988	52,8	18	50,3	0,57	0,43	2,30
1989	36,4	19	51,4	0,60	0,40	2,48
1990	44,5	20	52,4	0,63	0,37	2,70
1991	80,7	21	52,7	0,66	0,33	2,95
1992	39,2	22	52,8	0,69	0,30	3,26
1993	47,8	23	53,3	0,73	0,27	3,65
1994	39,7	24	54,5	0,76	0,24	4,13
1995	34,4	25	54,9	0,79	0,21	4,77
1996	34	26	55,6	0,82	0,17	5,64
1997	31,6	27	60,8	0,86	0,14	6,89
1998	55,6	28	65,7	0,89	0,11	8,86
1999	42,2	29	66,8	0,92	0,08	12,40
2000	60,8	30	80,7	0,95	0,04	20,67
2001	52,7	31	83,6	0,98	0,01	62,00

Avec les résultats ci-dessus, si on allait extrapoler les valeurs des précipitations de période de retour donnée par interpolation linéaire, nous pouvons remarquer facilement qu'il était impossible de trouver une précipitation maximale journalière qui aurait une période de retour supérieur à 62 ans. Afin d'y arriver, les méthodes d'extrapolation statistiques basées sur des lois de probabilité sont les mieux indiquées. La plupart de ces dernières fait recours à des tables préétablies. Ces dernières étant fastidieuses à être utilisées et, avec l'introduction de l'outil Excel, il est possible de les contourner en passant par l'équation générale.

IV.2.2 Choix de la période de retour

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

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

Tableau 12: Période de récurrence communément utilisée pour les quelques structures hydrauliques

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

Source : https://studylibfr .com/doc/4410802/39 Chapitre4 ---statistique-appliquées à l'hydrologie (vu le 21/03/2023)

La période de récurrence est choisie en fonction de l'importance de l'ouvrage (économie) et du risque hydrologique. Dans ce travail, la probabilité de l'intervalle réel de récurrence est de 100ans.

IV.2.3 Equation générale de détermination du quartile d'une période de retour T

Chaque valeur de la variable x de la série de n variables aléatoires X (x1, x2, …, Xn) peut être exprimée en fonction de la moyenne et de l'écart par rapport à la moyenne par : $x = \bar{x} + \Delta x$

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

L'écart par rapport à la moyenne est une fonction des caractéristiques de dispersion de la distribution : $\Delta x = k.\, s$

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

$x = \bar{x} + k.\, s$

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

$_T = \bar{x} + k_T.\, s$

Chaque loi de probabilité est caractérisée par son facteur de fréquence

IV.2.4 Calcul de précipitation du travail pour différentes lois de probabilité utilisées.

- **Calcul de précipitation du travail avec la loi de Gumbel et Fréchet**

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

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

Si on pose t = $\frac{x-a}{b}$ d'où x = a+ tb, on aura

$$p\ (X \leq x_i) = F(x) = e^{-e^{-t}}$$

T = - ln (- ln (F (x))

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

$x_T = a + u_T.\, b$ Avec : $u_T = -\ln\,[-\ln\,((x_T)]$

⇔ $u_T = -\ln\,[-\ln\,(1 - 1/T)]$

⇔ $u_T = -ln\,[ln\,(\frac{T}{T-1})]$

Pour une série de n variable x_i, les paramètres de position « a » et d'échelle « b » peuvent être déterminé par l'une des quatre méthodes à savoir la méthode graphique (méthode de la droite de régression), la méthode des moments, la méthode de L-moment et la méthode du maximum de vraisemblance.

Afin d'établir l'Equation générale d'un quartile X_T correspondant à une période de retour T, le facteur de fréquence de la loi de Gumbel est calculé à partir des expressions des paramètres « a » et « b » déterminés avec la méthode des moments.

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

$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}.\boldsymbol{\gamma}$

$\boldsymbol{\sigma}^2 = \pi/6 * \boldsymbol{b}^2$ avec $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{0,5772}$ *la constante d'Erreur* (Brunet-Moret, Y., 1969)

$\Leftrightarrow$ $b = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma$

$\Leftrightarrow$ $a = u - \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \boldsymbol{\gamma} * \sigma$

En reportant les valeurs de « a » et « b », on aura :

$X_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.\boldsymbol{\gamma} - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.\ln(\ln(\frac{T}{T-1})$

$\Leftrightarrow$ $X_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.(\boldsymbol{\gamma} + \ln(\ln(\frac{T}{T-1})$

$\Leftrightarrow$ $X_T = \mu - \frac{\sqrt{6}}{\pi}.\sigma.(0,5772 + \ln(\ln(\frac{T}{T-1})$

$\Leftrightarrow$ $X_T = \mu + k_T.\sigma$

Avec : $K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}.(0,5772 + \ln(\ln(\frac{T}{T-1})$

k_T *est le facteur de fréquence de la loi de Gumbel* ;

Alors :

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

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

- **Calcul de précipitation du travail avec la loi de Pearson III (gamma)**

La loi Pearson III est une loi de probabilité à trois paramètres dont la fonction de densité de probabilité s'écrit : $\mathbf{f(x)} = \frac{1}{\lambda\Gamma(\beta)}\left(\frac{x-y}{\lambda}\right)^{\beta-1}.e^{-\frac{(x-y)}{\lambda}}$

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

$\beta = (2/C_s)^2$;

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

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

Où « C_s » est le coefficient d'asymétrie de la distribution et « s » son écart type.

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

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

Le facteur de fréquence k_T de la loi Pearson III est calculé par l'expression suivante : $K_T = \frac{2}{CS}$ { $[\frac{cs}{6}(Z - \frac{cs}{6}) + 1]^3 - 1$}

IV.2.5 Caractéristiques de la série des valeurs expérimentales

Le tableau suivant présente les caractéristiques de distribution de la série des précipitations maximales journalières annuelles à la station de BUHONGA.

Tableau 13 : Caractéristiques de la distribution de la série des précipitations.

Caractéristiques de la distribution		
Moyenne de X	X	49.54
Ecart type de X	S	12.51
Coefficient d'asymétrie	Cs	1.04
Moyenne de y =ln x	y	3.87

IV.2.6 Présentation des résultats d'analyse des précipitations.

Les résultats de l'analyse statistique des précipitations annuelles maximales journalières suivant la loi Gumbel et Pearson-III sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 14 **:** Synthèse des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations.

	P(X>=xi)	P(X<=xi)	Gumbel		Pearson III	
T(ans)	$P(X_T)$	$F(X_T)$	KT	X_T (mm)	K_T	X_T (mm)
1,25	0,8	0,2	-0,82	39,26	-0,85	38,94
2	0,5	0,5	-0,16	47,48	-0,19	47,43
5	0,2	0,8	0,72	58,54	0,79	58,93
10	0,1	0,9	1,31	65,86	1,36	66,24
25	0,04	0,96	2,04	75,12	2,05	75,17
50	0,02	0,98	2,59	81,98	2,56	81,59
100	**0,01**	**0,99**	**3,14**	**88,80**	**3,06**	**87,81**

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

Figure 32 : Représentation graphique des résultats d'analyse fréquentielle des précipitations

IV.2.7 Analyse des résultats

L'observation de deux courbes représentées sur le graphique en haut et les points expérimentaux, on a noté que pour une période de récurrence inférieure ou égale à 10ans, les courbes de la loi de Gumbel et Pearson

III sont à peu près. A Partir de 10ans, les deux courbes commencent à se décaler avec un écart très net pour une période de retour égale à 100 ans (C'est-à dire lorsque T tend vers l'infini).

Il reste à choisir la courbe qui représente mieux la série entre les courbes Gumbel et Pearson III. On note que la période de retour correspondante à la plus grande valeur de précipitation expérimentale se situe sur la courbe Pearson III bien que la valeur précédente lui soit décalée. Pour la suite de ce travail, nous avons jugé bon d'adopter la loi Pearson III comme la loi de probabilité représentant au mieux la série des observations.

IV.3 Calculs des débits des crues

Le choix de la période de retour tient compte du degré de risque admis, du coût du projet et de la durée de vie projetée. Nous avons choisi une période de retour de 100 ans.

Pour ce qui est de la méthode de calcul, il existe plusieurs méthodes de calcul des débits pluviaux sur une superficie à assainir :

- Méthode rationnelle
- Méthode superficielle
- Méthode linéaire

Pour notre étude, nous avons utilisé la méthode rationnelle le plus utilisée en classe pour l'estimation de la crue d'étude.

La méthode rationnelle est basée sur l'hypothèse qu'une pluie constante et uniforme sur l'ensemble d'un bassin versant produit un débit de pointe lorsque toutes les sections du bassin versant contribuent à l'écoulement, soit après un temps égal au temps de concentration.

Utilisation de la méthode rationnelle est la formule suivante :

$$\boldsymbol{Q} = \mathbf{Cr.\ I.\ A} \tag{4.2}$$

$$\boldsymbol{I} = \frac{\boldsymbol{p_{proj}}}{\boldsymbol{t}} \tag{4.3}$$

AVEC :

Q **:** débit de la rivière (m3/S)

Cr : coefficient de ruissellement moyen du bassin versant

P_{projet} : précipitation de projet (mm)

A_{BV} : surface de bassin versant (m2)

t : durée de l'averse (sec)

I : intensité moyenne de la pluie durant le temps de concentration **(en l /s/ha)**

IV.3.1 Coefficient de pointe (k)

Compte tenu des résultats des études de recherche publiées par l'ORSTOM et réalisées sur les bassins versant, le coefficient de pointe **(k)** est plus important en zone de montagne qu'en plaine. Les valeurs moyennes adoptées sont les suivantes :

Tableau 15 : valeurs du coefficient de pointe

Relief du bassin	Superficie en Km^2			
	Inférieur à 5	De 5 à 10		Supérieur à 10
Plaine	1,9	2,2		2,3
Montagne	2,0	2,3		2,5

Source : http://www.fao.org/3/w2570f/w2570f00.htm

IV.3.2 Coefficient de ruissellement (CR)

Le coefficient de ruissellement (CR) qui est l'un des paramètres les plus importants dans la détermination des débits, dépend de la perméabilité du sol, de la pente, de la couverture végétale, et de la nature du réseau hydrographique. Il est déterminé graphiquement ou à l'aide d'un tableau en fonction de la géologie et de la précipitation annuelle (Puech et Chabi-Gonni, 1983).

Tableau 16 : Expression de CR en fonction du sol, de la pente, de la couverture végétale, et de la nature du réseau hydrographique

Catégorie	**Formulation**	**r**	**Nombre**
Granite + gneiss	CR=2300* $pan^{-0,67}$	0,661	72
Grès	CR=300*$pan^{-0,375}$	0,361	18
Sables	CR=2107*$pan^{-2,2}$	0,606	7
Argiles	CR=300*$pan^{-0,3}$	0,376	12
Schistes	CR=370*$pan^{-0,375}$	0,370	24

Source : http://www.fao.org/3/w2570f/w2570f00.htm

Avec :

CR : coefficient de ruissellement

Pan : précipitation moyenne annuelle (mm)

Le débit des crues à prendre en compte pour le projet est le maximum de débits calcules par la méthode rationnelle.

Tableau 17: Résultats de calcul de débits

Désignation	Symbole	Valeur	Unité
Précipitation moyenne annuelle	Pan	87,81	mm
Superficie	A	57 ,51	m2
Durée de l'averse	t	4*3600	Sec
Coefficient de ruissellement	Cr	0.45	_
Débit des crues	Q	157,81	m3 /s
Temps de concentration	Tc	3*3600	Sec

IV.3.3 Dimensionnements des Ouvrages Hydrauliques

- **Canaux à ciel ouvert**

- Profil de débit maximale ou forme de section la plus avantageuse

Pour réduire les coûts d'excavation et de matériaux de construction des canaux, on cherche à trouver pour un canal de pente I_0 et de rugosité n la meilleure forme qui portera un débit maximal ou la forme de section la plus avantageuse.

Le débit d'écoulement dans un canal est donné par l'expression suivant :

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} . A \qquad (4.4)$$

$$R = \frac{A}{p}$$

Or :

Donc R sera maximal pour P minimal.

- **Cas d'un canal trapézoïdal**

Figure 33: Canal à section trapézoïdale

Posons : m = $\frac{1}{tan\alpha}$ tan α = $\frac{h}{x}$ ⇨ = mh

La surface totale A est égale :

$$A = A2 + 2A1 \quad \leftrightarrow \quad A = h\,(l + mh) \qquad (4.5)$$

Le périmètre mouillé est égal à :

$$P = L + 2h\sqrt{1+m^2} \qquad (4.6)$$

Pour avoir la section hydrauliquement favorable, revient à annuler les différentielles totales exactes (h et l variant).

A = h (l +mh) et p = l + 2h $\sqrt{1+m^2}$

- $\begin{cases} ds = (l + 2mh) + hdl = 0 \\ dp = 2\sqrt{1+m^2}dh + dl = 0 \end{cases}$

Ce système admet une solution non triviale si et seulement si le déterminant associé est nul.

L + 2mh – 2h $\sqrt{1+m^2}$ = 0 → $l =$ 2h ($\sqrt{1+m^2}$- m)

La substitution de la valeur l dans les expressions de la section, du périmètre mouillé et du rayon hydraulique, conduit à :

R = $\frac{A}{P}$ = $\frac{h^2\,((\sqrt{1+m^2}-m))}{2h\,(\sqrt{1+m^2}-m}$, R = $\frac{h}{2}$

On obtient $R = \frac{h}{2}$

- **Cas d'un canal rectangulaire**

On peut déduire le rectangle (fig.34) du trapèze en posant α égale $\frac{\pi}{2}$

Figure 34 : Canal à section rectangulaire

$$m = \frac{1}{tan\alpha} = 0$$

Les formules précédemment établies pour la section trapézoïdale donnent en remplaçant m par zéro

$$R = \frac{A}{P} = \frac{h^2}{2h} \rightarrow R = \frac{h}{2}$$

- **Cas d'un canal demi circulaire**

La section et le périmètre mouillé de la section demi-circulaire sont :

Figure 35 : Section demi circulaire

$$A = \frac{\pi r^2}{2} \tag{4.7}$$

$$p = \pi r \tag{4.8}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} \tag{4.9}$$

Donc, le rayon hydraulique est égal : $R = \frac{r}{2}$

- **Comparaison des trois formes précédentes**

Pour les différentes sections, le rayon hydraulique moyen de la section la plus avantageuse conserve la même expression :

La section de forme la plus avantageuse est celle qui pour un débit et une pente donnée, exigera la section minimale, pour une surface de section et une pente donnée. Portera le débit maximal et pour une surface de section et un débit donné, nécessitera la pente minimale.

Le choix du profil de débit maximal est donc toujours avantageux a priori puisque l'aire mouillée et le périmètre P étant minimaux, ce profil correspond au minimum de dépense pour le déblai et éventuellement pour le revêtement.

Dans ce travail, on a apprécié d'utiliser la section de forme trapézoïdale en construisant le muret de soutènement pour stabiliser les lits et berges de la rivière KANYOSHA avec ses caractéristiques de ce bassin versant suivant :

Section (A) : Section normale à la direction de l'écoulement et au travers de laquelle l'eau s'écoule.
Périmètre mouillé (P) : Longueur de la ligne de contact entre le canal et l'eau dans un plan normal à la direction de l'écoulement (L).

Figure 36: Canal trapézoïdal et définition des termes.

Rayon hydraulique (Rh) : Rapport entre la section d'écoulement (A) et le périmètre mouillé (P).

Rh = $\frac{A}{P}$

Profondeur d'écoulement ou hauteur d'eau (y=h) : Épaisseur d'eau dans le cours d'eau au-dessus du fond (L).

Pente des talus (z :1) : La pente d'un talus est le déplacement horizontal pour une élévation unitaire du talus (L/L).

Largeur au fond ou largeur au plafond (b) : Largeur du cours d'eau au bas de la section (L)

Largeur de surface (t = L) : Largeur de la surface libre de l'eau dans le canal (L).

Largeur du canal ou largeur d'ouverture (T=B) : Largeur du canal d'une rive à l'autre (L).

Revanche (yr =h) : Hauteur libre considérée au-dessus du plan d'eau lors du design ou différence entre la profondeur du cours d'eau (d) et la profondeur d'écoulement (L).

Débit à transporter est de 157 ,23478 m^3 /s

Pente de terrain naturel est de 0,0423 = 4,23%

Longueur d'étude est de 4km

Dénivelle total est 200 m

Coefficient de rugosité de Manning : n

Inclinaison des parois latérales : α

Coefficient d'accolement : m

Le tableau montre les formules qui peuvent utiliser dans la section de forme différentes

Tableau 18: Géométrie des sections

					$h = R(1-\cos\delta)$	
Surface S		$S = mh^2$	$S = bh + mh^2$	$S = Bh - \frac{(B-b)^2}{4m}$	$S = \frac{D^2}{4}(\delta - \sin\delta\cos\delta)$	$S = Dh + D^2\left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{2}\right)$
Périmètre mouillé P		$P = 2h\sqrt{1+m^2}$	$P = b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$P = 2h + b + \frac{(B-b)}{m}\left(\sqrt{1+m^2} - 1\right)$	$P = D\delta$	$P = 2h + D\left(\frac{\pi}{2} - 1\right)$
Rayon Hydraulique R_h		$Rh = \frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}}$	$Rh = \frac{bh + mh^2}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$	$Rh = \frac{S}{P}$	$Rh = \frac{D}{4}\left(1 - \frac{\sin\delta\cos\delta}{\delta}\right)$	$Rh = \frac{S}{P}$
Largeur B		$B = 2mh$	$B = b + 2mh$	B	$B = D\sin\delta$	$B = D$
Profondeur hydraulique D_h		$Dh = \frac{h}{2}$	$Dh = \frac{bh + mh^2}{b + 2mh}$	$Dh = \frac{S}{B}$	$Dh = \frac{D(\delta - \sin\delta\cos\delta)}{4\sin\delta}$	$Dh = \frac{S}{B}$
S.yG		$Sy_G = \frac{mh^3}{3}$	$Sy_G = \left(\frac{b}{2} + \frac{mh}{3}\right)h^2$	$Sy_G = \frac{Bh^2}{2} - \frac{h(B-b)^2}{4m} + \frac{(B-b)^3}{24m^2}$	$Sy_G = \frac{D^3}{8}\left(\sin\delta - \frac{\sin^3\delta}{3} - \delta\cos\delta\right)$	$Sy_G = \frac{D}{2}\left(h - \frac{D}{2}\right)^2 + \frac{\pi D^2}{8}\left(h - \frac{D}{2}\right) + \frac{D^3}{12}$

Dans la suite du travail comme dans la majorité des cas pratique de calcul des canaux, nous allons utiliser la formule de Manning.

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \qquad (4.10)$$

En remplaçant l'expression du coefficient de Chézy proposée par Manning dans l'expression de la vitesse moyenne d'écoulement de Chézy, on aura :

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} . \sqrt{R\,I} \qquad (4.11)$$

Dans l'expression, on avait établi la relation entre le débit (Q en m^3/s), la vitesse (V en m/s) et la surface mouillée (A en m^2) :

$$Q = V.A \qquad (4.12)$$

Si on remplace la vitesse v par son expression dans l'équation du débit, on aura :

$$Q == \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} . I ½. A \quad (4.13)$$

Tableau 19: Valeurs du coefficient n de Manning pour les cours d'eau naturels et canaux artificiels trouvées sur le site internet de l'Université de Louvain **(https://sites.uclouvain.be/didacticiel)**

Nature des surfaces	**Etat des parois**			
	Parfait	**Bon**	**Assez bon**	**Mauvais**
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moellons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moellons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1] Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0.030	0,033
Nature des surfaces	**Etat des parois**			
	Parfait	**Bon**	**Assez bon**	**Mauvais**
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.030	0,033	0,035	0,040

3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4] Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7] Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Dans certains manuels, au lieu d'utiliser le coefficient de rugosité de Manning, on a utilisé son inverse désigné $K_{st.}$ Ce dernier est connu sous l'appellation de coefficient de Manning-Strickler.

$$K_{ST} = \frac{1}{n} \tag{4.14}$$

De ce fait, les équations de vitesse et de débit d'écoulement peuvent s'écrire :

$$V = K_{st}.R^{\frac{2}{3}}.I^{\frac{1}{2}} \tag{4.15}$$

$$Q = K_{st}\,.R^{\frac{2}{3}}\,.I^{\frac{1}{2}}\,.A \tag{4.16}$$

$$Q = Kst.\frac{A^{\frac{5}{3}}}{X^{\frac{2}{3}}}\,.I^{\frac{1}{2}} \tag{4.17}$$

Le tableau suivant donne les valeurs usuelles de coefficient de Manning-Strickler (Kst).

Nature des surfaces	**Etat des parois**			
	A	**B**	**C**	**D**
A. Canal artificiel				
Ciment lisse	100	91	83	77
Mortier de ciment	91	83	77	67
Aqueduc en bois raboté	100	83	77	71
Aqueduc en bois non raboté	91	77	71	67
En béton	83	71	63	56
En moellon assemblé au ciment	59	50	40	33
En pierres sèches	40	33	30	29
En moellon dressé	77	71	67	59
Aqueduc métallique demi-circulaire	91	83	77	67
Aqueduc en tôle plissée demi-circulaire	44	40	36	33
Fossé en terre, droit et uniforme	59	50	44	40
Fossé en pierres lisses et uniformes	40	33	30	29
Fossé en pierres, rugueux et irrégulier	29	25	22	-
Canal en terre à larges méandres	44	40	36	33
Canal en terre dragué	40	36	33	30
Lit de pierres rugueuses, herbes sur les rives	40	33	29	25
Canal à fond de terre, cotés avec pierres	36	33	30	29
B. Cours d'eau naturels				
Rives en ligne droite, niveau d'eau le plus haut	40	36	33	30
Rives en ligne droite, H plus haut avec quelques herbes	33	30	29	25
Méandres avec étangs et endroits peu profonds	29	25	22	20

Méandres à l'étiage, pente et sections faibles	25	22	20	18
Méandres avec quelques pierres et herbes	30	29	25	22
Méandres à l'étiage avec pierres	22	20	18	17
Eau coulante lentement, avec fosses très profondes	20	17	14	13
Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	13	10	8	7
A= Parfait B= Bon C= Assez bon D = Mauvais				

Dans mon travail, le coefficient de rugosité de Manning « n » ou de Manning – Stricker « kst » dans l'état des parois « BON » a été adopté

Peu importe la forme du canal, le périmètre mouille x et la section mouille A dépendent de la largeur du canal, de ce fait, la détermination d'un des dimensions du canal revient à résoudre une équation non linéaire. Cette dernière se résout soit par l'une des méthodes numériques itératives ou par la méthode graphique (moins précise). Je propose ici- haut la méthode numérique de point fixe.

IV.4 Calcul des Ouvrages Hydrauliques dans un Canal De La Rivière KANYOSHA

Tableau 20 : Résultats de dimensions des ouvrages hydrauliques

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Cas	Itération	b	h	m	A	P	R	n	I	V	Q calcul	Q proj	r	H	B	
Maçonnerie	1	4	2,166	0,27	9,921	8,485	1,169	0,014	0,04	15,856	157,304	157,235	0,541	2,707	5,451	
	2	4	2,717	0,27	12,846	9,626	1,335	0,014	0,03	12,245	157,295	157,235	0,679	3,396	5,820	
	3	5	2,887	0,27	16,668	10,978	1,518	0,014	0,02	9,436	157,284	157,235	0,722	3,609	6,934	
	4	6	3,161	0,27	21,643	12,545	1,725	0,014	0,01	7,265	157,247	157,235	0,790	3,951	8,117	
	5	7	3,03	0,27	23,670	13,274	1,783	0,014	0,005	6,643	157,242	157,235	0,757	3,787	9,030	
	6	7	3,33	0,27	26,281	13,895	1,891	0,014	0,004	5,984	157,255	157,235	0,832	4,162	9,231	
	7	8	3,442	0,27	30,710	15,127	2,030	0,014	0,003	5,122	157,289	157,235	0,860	4,302	10,306	
	8	8	3,442	0,27	30,710	15,127	2,030	0,014	0,002	5,122	157,289	157,235	0,860	4,302	10,306	Adoptée
	9	10	3,656	0,27	40,141	17,570	2,285	0,014	0,001	3,918	157,283	157,235	0,914	4,570	12,449	
Gabion	1	5	3,258	0,5	21,597	12,285	1,758	0,04	0,04	7,283	157,295	157,235	0,814	4,072	9,072	
	2	5	3,996	0,5	27,964	13,935	2,007	0,04	0,03	5,625	157,293	157,235	0,999	4,995	9,995	
	3	6	4,418	0,5	36,267	15,879	2,284	0,04	0,02	4,336	157,248	157,235	1,104	5,522	11,522	
	4	7	4,962	0,5	47,045	18,095	2,600	0,04	0,01	3,342	157,241	157,235	1,241	6,202	13,203	
	5	8	4,904	0,5	51,257	18,966	2,703	0,04	0,005	3,068	157,244	157,235	1,226	6,130	14,130	Adoptée
	6	8	5,343	0,5	57,018	19,947	2,858	0,04	0,004	2,758	157,252	157,235	1,336	6,679	14,679	
	7	10	5,279	0,5	66,724	21,804	3,060	0,04	0,003	2,357	157,240	157,235	1,320	6,599	16,599	
	8	10	5,279	0,5	66,724	21,804	3,060	0,04	0,002	2,357	157,240	157,235	1,320	6,599	16,599	
	9	12	5,821	0,5	86,794	25,016	3,470	0,04	0,001	1,812	157,257	157,235	1,455	7,276	19,276	

IL s'agira de calculer la vitesse d'entrée d'eau dans l'ouvrage et de vérifier si celle- ci ne dépasse pas la vitesse limite

- La méthode de berge maçonnée et radier en béton est de vitesse de 4m/s à 7m/s ;
- La méthode de muret de soutènement avec gabion est de vitesse de 3m/s à 6m/s

❖ **Profils en travers dans la berge maçonnés et radier en béton**

Figure 37: Profil en **travers** dans la berge maçonnée et le radier en béton

Avec: b = 8m
B= 10.3m
V = 5 .5m/s
d = H = 4. 3m
n = 0 .014

❖ **Profils en travers en gabionnage**

Figure 38 : Profil en travers en gabions

Avec:

b = 8m

B= 14.3m

V: 4m /s

H = 6 .3m

n : 0.04

IV.5 Devis Quantitatif et Estimatif des Travaux de Stabilisation de la Rivière KANYOSHA sur une Linéaire de 4 km

❖ Méthode de la stabilisation par la berge maçonnée et radier en béton

NO	Désignation des travaux	Unité	Quantité	PU HTVA	PT HTVA
I	**TRAVAUX GENERAUX**				
I.1	Installation du chantier	ff	1	5000000	5 000 000
I.2	Implantation du profil et des ouvrages	ff	1	10000000	10 000 000
I.3	Abattage des arbres se trouvant dans l'emprise	ff	1	2000000	2 000 000
I.4	Terrassement général : reprofilage de l'emprise	ff	1	25000000	25 000 000
			SOUS TOTAL 1		**42 000 000**
II	**Lit de la rivière**				
II.1	Travaux préparatoires	ff	1	15000000	15 000 000
II.2	Béton de propreté	m3	1888	350000	660 800 000
II.3	Béton armé pour dalle du fond	m3	7552	900000	6 796 800 000
			SOUS TOTAL 2		**7 472 600 000**
III	**Chutes**				
III.1	Travaux préparatoires	Ff	1	8000000	8 000 000
III.2	Béton de propreté	m3	28,8	350000	10 080 000
III.3	Béton armé pour dalle du fond	m3	115,2	900000	103 680 000
III.4	Parafouilles	m3	86,4	900000	77 760 000
III.5	Maçonnerie des moellons	m3	40,5	220000	8 910 000
III.6	Rejointallage	m^2	101,25	8000	810 000
III.7	Chappe taloché	m^2	16	6000	96 000
			SOUS TOTAL 3		**209 336 000**
IV.	**Déversoirs pour les eaux affluents**				
IV.1	Travaux préparatoires	ff	1	1500000	1 500 000
IV.2	Béton de propreté	m3	0,315	350000	110 250
IV.3	Béton armé pour dalle du fond	m3	1,26	900000	1 134 000
IV.4	Parafouilles	m3	8,175	220000	1 798 500
IV.5	Maçonnerie des moellons	m3	8,175	220000	1 798 500
IV.6	Rejointallage	m3	20,4375	8000	163 500
IV.7	Chappe taloché	m^2	6	6000	36 000
SOUS TOTAL 4					**6 540 750**

V.	**PASSERELLES POUR PIETON**				
V.1	Travaux préparatoires	ff	1	2000000	2 000 000
V.2	Fouille pour fondation des pilles	m3	14,4	15000	216 000
V.3	Semelles en béton armée pour piles	m3	2,4	900000	2 160 000
V.4	Piles en béton armé	m3	56,7	900000	51 030 000
V.5	Béton armé pour tablier	m3	16,8	900000	15 120 000
V.6	Garde-fou en tube métallique	ml	56	80000	4 480 000
SOUS TOTAL 5					**75 006 000**
VI.	**Murs en maçonneries de moellons**				
VI.1	Travaux préparatoires	ff	1	25000000	25 000 000
VI.2	Maçonnerie des moellons	m3	21240	220000	4 672 800 000
VI.3	Rejointaillage	m^2	53100	8000	424 800 000
VI.4	Chappe taloché	m^2	3776	6000	22 656 000
VI.5	Drain de barbacanes	ml	18880	5000	94 400 000
SOUS TOTAL 6					**5 239 656 000**
VII.	**Travaux de protection**				
VII.1	Remblais compactés autour des ouvrages et des Maçonneries	m3	141600	35000	4 956 000 000
VII.2	Végétalisation par des bambous	ff	1	1500000	1 500 000
VII.3	Talutages au-dessus des nouveaux ouvrages	ml	9440	15000	141 600 000
VII.4	Engazonnement	ff	1	2500000	2 500 000
SOUS TOTAL 7					**5 101 600 000**
VIII.	**Nettoyage et replis du chantier**	FF	1	50000000	50 000 000
SOUS TOTAL 8					**50 000 000**
TOTAL GENERAL					**18 196 738 750**

Nous disons une somme de dix-huit milliard cent quatre -vingt-seize millions sept cent trente-huit mille sept cent cinquante Francs Burundais (18.196.738.750)

❖ Méthode de stabilisation par gabions

NO	Désignation des travaux	Unité	Quantité	PU HTVA	PT HTVA
I	**Travaux généraux**				
I.1	Installation du chantier	ff	1	5000000	5 000 000
I.2	Implantation du profil et des ouvrages	ff	1	10000000	10 000 000
I.3	Abattage des arbres se trouvant dans l'emprise	ff	1	2000000	2 000 000
I.4	Terrassement général : reprofilage de l'emprise	ff	1	35000000	35 000 000
	SOUS TOTAL 1				**52 000 000**
II	**Lit de la rivière**				
II.1	Travaux préparatoires	ff	1	15000000	15 000 000
II.2	Béton de propreté	m3	1,6	343550	549 680
II.3	Assise en gabillots	m3	47200	160000	7 552 000 000
	SOUS TOTAL 2				**7 567 549 680**
IV.	**Déversoirs pour les eaux affluant**				
IV.1	Travaux préparatoires	ff	1	1500000	1 500 000
IV.2	Béton de propreté	m3	0,021	350000	7 350
IV.3	Béton armé pour dalle du fond	m3	0,084	900000	75 600
IV.4	Parafouilles	m3	8,175	220000	1 798 500
IV.5	Maçonnerie des moellons	m3	8,175	220000	1 798 500
IV.6	Rejointallage	m3	20,4375	8000	163 500
IV.7	Chappe taloché	m^2	6	6000	36 000
	SOUS TOTAL 4				**5 379 450**
V.	**Passerelles pour piéton**				
V.1	Travaux préparatoires	ff	1	2000000	2 000 000
V.2	Fouille pour fondation des pilles	m3	14,4	15000	216 000
V.3	Semelles en béton armée pour piles	m3	2,4	900000	2 160 000
V.4	Piles en béton armé	m3	33,48	900000	30 132 000
V.5	Béton armé pour tablier	m3	36	900000	32 400 000
V.6	Garde-fou en tube métallique	ml	120	80000	9 600 000
	SOUS TOTAL 5				**76 508 000**
VI.	**Gabillots latérales**				
VI.1	Travaux préparatoires	ff	1	35000000	35 000 000
VI.2	Pose des gabillots	m3	75520	160000	12 083 200 000
SOUS TOTAL 6					**12 118 200 000**

VII.	**Travaux de protection**				
VII.1	Remblai compacté autour des ouvrages et derrières les gabillots	m3	84960	35000	2 973 600 000
VII.2	Végétalisation par des bambous	ff	1	1500000	1 500 000
VII.3	Talutages au-dessus des ouvrages en gabillots	ml	9440	15000	141 600 000
VII.4	Engazonnement	ff	1	2500000	2 500 000
SOUS TOTAL 7					**3 119 200 000**
VIII.	**Nettoyage et replis du chantier**	FF	1	50000000	50 000 000
SOUS TOTAL 8					**50 000 000**
TOTAL GENERAL					**22 988 837 130**

Nous disons une somme de Vingt -deux milliard neuf cent quatre-vingt-huit millions huit cent trente-sept milles cent trente Francs Burundais (22.988.837.130)

Constant :

En comparant les deux méthodes de stabilisation l'une de méthode de stabilisation par la berge maçonnée et le radier en béton est la méthode qu'on voit en bon état et qui a bien esthétisée, elle est intéressante, plus solide et c'est celle qui durera le plus longtemps et aussi moins chère par rapport en utilisant l'autre méthode de soutènement avec le gabionnage.

On avait été prévu de construire des passerelles pour faciliter la circulation des habitants de la rivière.

CHAPITRE V. ETUDE D'IMPACT DU TRAVAIL SUR L'ENVIRONNEMENT

Comme tout travail, la construction des ouvrages de franchissement engendre des impacts positifs comme négatifs. A partir du plan de gestion environnementale et sociale (PGES), nous avons fait le ressortir d'une part les impacts que nous jugeons avoir été engendré par le projet et nous nous sommes évertués à proposer différentes mesures d'atténuation et de compensation de ses derniers.

Cette étude constitue un outil de prévention en ce qui concerne la politique de prévention environnementale.

A. Méthode d'identification

L'analyse des impacts consiste à identifier, décrire et évaluer les impacts potentiels du travail sur les composantes du milieu naturels et humain sur la base de l'information disponible.

La méthode utilisée pour évaluer l'importance probable des impacts repose sur l'identification des sources des impacts et sur les trois critères fondamentaux que sont la durée, étendue et l'intensité de l'impact.

B. Description sommaire des activités de construction de l'ouvrages

La réalisation du travail nécessite l'exécution des tâches suivantes :

- Les travaux des fouilles
- Les travaux de terrassement
- Les travaux de bétonnages
- L'aménagement d'une déviation
- Stabilisations des lits et berges de cette rivière

C. Impact potentiel du travail sur l'environnement

La mise en corrélation des activités associées aux travaux de réalisation de l'ouvrages, les actions pendant la phase d'exploitation avec les éléments de l'environnement ont permis d'identifier les impacts potentiels du travail.

En effet, l'étude a constaté que le travail génère aussi bien des impacts négatifs que positifs dont nous retiendrons l'essentiel.

a. Impacts positifs

Comme impacts positifs potentiels, on peut citer, entre autres :

- La facilitation de la circulation urbaine et l'accès aux services sociaux et passerelles à grande circulations par les populations
- La création des emplois et la réduction de la pauvreté en milieu rural
- La stimulation des activités génératrices de revenus (AGR) le long de la rivière KANYOSHA

- L'amélioration des conditions de vie des populations locales en général

b. Impacts négatifs

- La pollution des sols et des eaux par les déchets solides et liquide de chantiers
- Les risques d'accident (personnels de chantiers et qui sont tout autour de la rivière)
- La perturbation de la circulation pendant les travaux
- Risque de propagation des IST et du VIH/SIDA. Autres maladies hygiéniques et grossesse non désirées

D. Mesure d'atténuation et de compensation

Les mesures d'atténuation et de compensation suivantes :

- Eviter si possible les nocturnes à proximité des habitations et lieux sensibles
- Collecter le déchet solide et liquide
- Préparer psychologiquement les populations affectées avant le début des travaux
- Mener des campagnes de sensibilisations pour le personnel de chantier sur les IST et le VIH /SIDA
- Informer et sensibiliser les populations locales du déroulement des travaux et les risques d'accident qu'y sont associés
- Signaler adéquatement le chantier
- Imposer une limitation de vitesse de circulation aux engins de chantier
- Doter la main d'œuvre d'équipement de protection adéquate
- Contourner les lieux fréquents
- Promouvoir les activités génératrices de revenus (AGR)
- Eviter la profanation des lieux sacres

CONCLUSION GENERALE

Etant fortement préoccupés par la stabilisation des lits des cours d'eau en milieu urbain, il est remarquable que les dégâts causés par les cours d'eau sont énormes et il est primordiale de mettre en place des techniques nécessaires pour faire face à ce chaos qui se répète souvent en milieu urbain.

Au regard de l'importance de la problématique du choix du méthode de génie civil répondant techniquement et économiquement aux besoins réels pour stabiliser les lits des cours d'eau , nous avons choisi de consacrer ce mémoire de fin de cycle à l'étude comparative des solutions potentielles pour la stabilisation des lits de cours d'eau en milieu urbain.

L'étude de l'ouvrage s'est faite en plusieurs étape telles que :

- L'étude topographique qui a permis de faire le calage et l'implantation d'ouvrages
- L'étude hydrologique qui a permis de déterminer la crue
- L'étude hydraulique qui a permis de choisir deux méthodes d'ouvrages, l'un de la berge maçonnée et le radier en béton, l'autre en gabion
- L'étude comparative technico- économique qui a permis de choisir la méthode la plus adoptée au contexte de l'étude aussi bien sur le plan technique qu'économique.
- L'étude d'impact du travail sur l'environnement

La solution finale adoptée a été la méthode de construction en utilisant la méthode en berge maçonnée et le radier en béton.

Cette méthode s'avère être la plus économique au point de vue technique, elle convient mieux avec un coût de réalisation estimé une somme de dix-huit milliard cent quatre -vingt-seize millions sept cent trente-huit mille sept cent cinquante Francs Burundais (18.196.738.750)

La stabilisation des lits de cours d'eau en milieu urbain à l'aide de méthodes de génie civil est un processus complexe qui nécessite une approche intégrée prenant en compte à la fois les aspects techniques, environnementaux et urbains pour assurer la durabilité et la fonctionnalité des infrastructures tout en préservant l'équilibre écologique.

De toutes les façons, les différentes techniques de stabilisation des lits peuvent être combinées de l'aval à l'amont pour donner les meilleurs résultats.

RECOMMANDATION

À la fin des travaux, il est nécessaire de revégétaliser les berges pour stabiliser le sol en place.

Il s'agit de semer, de planter des arbustes ou de faire du bouturage dans le milieu rural

L'entretien des ouvrages de roches ou de pierres est nécessaire si l'on veut en prolonger la durée de vie ;

➢ Inspecter fréquemment l'ouvrage, surtout après un violent orage. Vérifier si des pierres se sont déplacées ou si des vides se sont créés.

➢ Surveiller les déplacements de la base ou des fondations, normalement causés par un matériau filtrant mal placé ou endommagé.

➢ Entretenir les ouvrages de protection situés en amont et en aval, afin d'éviter tout affouillement qui risquerait de provoquer la défaillance de l'enrochement.

Le gouvernement devrait commander une étude pluridisciplinaire où se trouveraient les ingénieurs, les géographes ; les économistes, les environnementalistes.

En demandant au gouvernement d'effectuer les études d'aménagement avant de faire des travaux de grande envergure comme la viabilisation des terrains ou la construction des infrastructures.

BIBLIOGRAPHIE

A. Ouvrages spéciaux

- André Musy, 1998, Hydrologie appliquée. Edition HGA, Bucarest
- ARMANDO L'encastre : hydraulique générale : Eyrolles, paris 19
- BRIERE. F.G distribution et collecte des eaux, deuxième Edition ; école polytechnique de Montréal ,2000
- ESKENAZI E. Eléments d'hydrologie ; université de liège ; LHCN 1991
- GRAF W.H hydraulique fluviale PPUR LAUSANE 2000
- REMENIERAS G ... hydrologie de l'ingénieur, Eyrolles, paris 180
- PIROTTON M et al hydraulique appliquée ; université de liège, liégé 2005

NIYONGABO H. intégration de l'enjeu social et quantitatif pour la maitrise de l'assainissement liquide en Afrique tropicale : application à la ville de Bujumbura. Thèse de doctorat ; université de liège juin 2006

B. Mémoire

- MPAWENAYO Régis « régulation et stabilisation des cours d'eau torrentiel de la ville Bujumbura : cas de ruisseau GISHORA en république du Burundi » université du Burundi, Bujumbura 2008

- SAHABO Salvator « avant – projet de stabilisation des berges du ruisseau GIHOSHA – GIKUNGU Pour la Protection du site de l'hôpital militaire de KAMENGE et son environnement » Université du Burundi, Bujumbura 2005

- NDENZAKO Dieudonné « Maitrise de la dynamique de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et d'un modelé agro – hydrologique de SWAT : cas du bassin versant de la rivière KANYOSHA en république du Burundi » université du Burundi, Bujumbura 2022

- BIGIRIMANA Diallo « Contribution à l'évaluation de l'impact de l'aménagement des bassins versants sur la dynamique des cours d'eau : cas du bassin versant de la rivière MUHA en république du Burundi. » université du Burundi, Bujumbura 2022