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

Influence de l’urbanisation anarchique sur le risque d’ inondation : cas du bassin versant de la rivière Mutimbuzi

Iradukunda, Xavier

2023-07
UB,FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/345

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

République du Burundi

Ministère de l'éducation nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Année Académique: 2021-2022

INFLUENCE DE L'URBANISATION ANARCHIQUE SUR LE RISQUE D'INONDATION : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE MUTIMBUZI

Mémoire

Présenté par :

IRADUKUNDA Xavier

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

Soutenu le 20 / 07 /2023 devant le jury composé de :

Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor	**: Président**
Dr. Ir. NIBIGIRA Léonidas	**: Directeur**
Dr. Ir. MVUYEKURE Jean Claude	**: Lecteur principal**
Prof. HABONIMANA Bernadette	**: Membre**

Bujumbura, Juillet 2023

IDENTIFICATION DU JURY

Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor : Président

Dr. Ir. NIBIGIRA Léonidas : Directeur

Dr. Ir. MVUYEKURE Jean Claude : Lecteur principal

Prof. HABONIMANA Bernadette : Membre

DÉDICACES

A mon Père BIDOVORI Charles

A ma Mère BUCENCURE Eugenie

A Toi, ma très chère Epouse NIJIMBERE Fidès

A nos Enfants : IRADUKUNDA Santa Esther, NTUNGA Abdiel et MUGISHA Shérébi Caroll

A mes Frères et Sœurs

A la Famille NTIBANDETSE Balthazar

IRADUKUNDA Xavier

REMERCIEMENTS

Au terme de notre travail, il sied bien d'exprimer dans ces lignes, nos sincères remerciements envers l'Eternel Dieu Tout Puissant pour ses bénédictions et sa protection. C'est aussi pour nous une précieuse occasion d'exprimer notre profonde gratitude envers les institutions et les personnes tant physiques que morales qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Qu'il nous soit permis d'adresser nos sincères remerciements à l'endroit de la Force de Défense Nationale du Burundi pour avoir assuré, sans relâche, le financement de notre formation de Master. Nous nous en voudrions si nous passions sous silence le support matériel et social de l'Institut Supérieur des Cadres Militaires (ISCAM). Son soutien indéfectible nous a permis la finalisation de notre mémoire dans des conditions plus sereines.

Les justes mots nous manquent pour exprimer notre gratitude envers Dr-Ir NIBIGIRA Léonidas, Directeur Général de la Régie Militaire de Construction (RMC), qui a bien voulu diriger notre travail. C'est grâce à ses conseils, ses observations, ses encouragements, ses orientations et sa disponibilité tout au long de ce parcours, malgré son agenda combien chargé, que nous avons pu avancer et préciser certaines approches. Il va sans doute rester une référence pour la suite de notre parcours professionnel.

Notre respectueuse reconnaissance va également à l'endroit de ceux qui nous ont fait honneur en acceptant de faire partie du jury de ce mémoire. Nous nous en voudrions de terminer sans remercier tout le corps enseignant du Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets dans la Faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'Université du Burundi pour la qualité de la formation reçue.

Enfin, nous remercions vivement les directeurs de l'IGEBU et du BCG pour leurs données hydrologiques, météorologiques et d'élévation (MNT) qu'ils nous ont apportées.

RESUME

La ville de Bujumbura qui est à l'Ouest du Burundi, avec la population qui connaît un taux de croissance de 6 à 7 % suite aux taux de natalité élevé du Burundi et l'exode rural, enregistre une expansion rapide du bâti associée à la régression du couvert végétal. A partir d'une interprétation des images de Landsat de 2000, 2016 et 2022 pour le bassin versant de la rivière Mutimbuzi, la dynamique de l'occupation du sol a été mise en évidence à travers une classification supervisée. Il en ressort que la surface bâtie dans le bassin versant de la Rivière Mutimbuzi a augmenté de 0.32 % de 2000 à 2016, de 2.46 % de 2000 à 2022 et de 2.14 % pour l'intervalle de 2016 à 2022.

Afin de promouvoir la protection de l'environnement, notre travail comporte quatre chapitres. Le premier contextualise l'influence de l'urbanisation anarchique sur le risque d'inondation. Le deuxième chapitre est consacré à la revue bibliographique. Le troisième chapitre présente les caractéristiques morphologiques, climatologiques et hydrologiques du bassin versant de la rivière Mutimbuzi. Quant au quatrième chapitre, il est question d'évaluer l'influence de l'urbanisation anarchique sur le risque d'inondation à l'aide des logiciels HEC-HMS et HEC-RAS.

L'urbanisation progresse dans les montagnes qui surplombent la ville de Bujumbura. En utilisant le logiciel HEC-HMS, nous évaluons les débits dans le bassin versant de la Rivière Mutimbuzi correspondant aux pluies de périodes de retour variables pour différentes situations de l'occupation du sol : la situation en 2000, la situation en 2016, la situation en 2022, la situation supposant une urbanisation jusqu'à l'altitude 1000 m (A1000) , la situation supposant une urbanisation jusqu'à l'altitude 1250 m (A1250) et la situation supposant une urbanisation jusqu'à l'altitude 1500 m (A1500). Les résultats montrent que la situation A1500, pour une pluie d'une période de retour de 25 ans, donne un débit supérieur à celui fourni par la situation 2000 pour une pluie centennale. Cela met en évidence la rigueur du risque d'inondation conséquente à une urbanisation vers les hauteurs de la ville de Bujumbura.

En analysant les résultats trouvés par HEC-RAS en ArcGIS, nous avons proposé de limiter l'urbanisation à une altitude de 1000 m afin de permettre à la rivière Mutimbuzi d'évacuer un débit de crues d'une période de retour de 20 ans avec possibilité de limiter le risque d'inondation.

Mots clés : Bassin versant de la rivière Mutimbuzi, Urbanisation anarchique, Risque d'inondation, HEC-HMS, HEC-RAS.

ABSTRACT

With a population which has a growth rate of 6 to 7 %, due to the high birth rate of Burundi and the rural exodus, the city of Bujumbura in the western part of Burundi records a rapid build-up expansion associated with the regression of its land cover. Based on the analysis of Landsat images of 2000, 2016 and 2022; land cover dynamics were highlighted through supervised classification. Data show that the built-up area of Mutimbuzi river watershed recorded an increase of 0.32% between 2000 and 2016, 2.46 % between 2000 and 2022 and 2.14% between 2016 and 2022.

In order to promote environmental protection, our work has four chapters. The first contextualizes the influence of uncontrolled urbanization on flood risk. The second chapter is devoted to the bibliographical review; The third chapter presents the morphological, climatological and hydrological characteristics of the Mutimbuzi river watershed. As for the fourth chapter, it is a question of evaluating the influence of uncontrolled urbanization on the risk of flooding using the HEC-HMS and HEC-RAS software.

Urbanization is spreading toward the mountainous area located in the eastern part of the city. Using the HEC-HMS software, we assess the flow rates of runoff floods in the Mutimbuzi river watershed considering variable rains' return periods for different land use situations: the situation in 2000, the situation in 2016, the situation in 2022, the situation assuming urbanization up to an altitude 1000m (A1000), the situation assuming urbanization up to an altitude 1250 m (A1250) and the situation assuming urbanization up to an altitude 1500m (A1500). The results show that the situation A1500 for a rainfall with a return period of 25 years leads to a higher flow than the one generated by the situation 2000 for a hundred- year rainfall. This highlights the rigor of the risk of flooding resulting from an urbanization towards the heights of Bujumbura city.

By entering peak flows data into the HEC-RAS model, we determined the areas of floodplains and assessed the vulnerability to the risk of flooding for communities living downstream. By analyzing with ArcGIS the results found in HEC-RAS, we proposed to limit urbanization to an altitude of 1000 m in order to allow the Mutimbuzi river to evacuate a flood of a return period of 20 years with possibility to limit the risk of flooding. In the same way, the urbanization up to 1250 m of altitude will greatly increase the flood zone, as a ten-year flood flow will be able to generate overflows.

Keywords: Mutimbuzi river Watershed, Anarchic urbanization, Risk of flooding, HEC-HMS, HEC-RAS.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DU JURY i
DÉDICACES ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DES MATIERES vi
LISTE DES TABLEAUX x
LISTE DES FIGURES xii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS xiv
AVANT-PROPOS xvi
CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE 1
I.0. Contexte 1
I.1. Problématique 2
I.2. Objectifs 5
I.3. Hypothèses 6
I.4. Démarche méthodologique 6
I.5. Résultats attendus 7
CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE 8
II.0. Introduction 8
II.1. Processus hydrologiques de générations des écoulements 8
II.1.1. Précipitations directes à la surface libre du cours d'eau 8
II.1.2. Ecoulement de surface 8
II.1.3. Ecoulements de subsurface ou Ecoulement hypodermique 9
II.1.4. Ecoulement souterrain 10
II.2. Inondations 11
II.3. Détermination de certains paramètres morphologiques 14
II.3.1. Indice de compacité de Gravelius 14
II.3.2. Le rectangle équivalent 14
II.4. Climat du Bassin Versant de la rivière Mutimbuzi 14
II.4.1. Précipitations 15
II.5. Théories de calcul des modèles HEC-HMS et HEC-RAS 17
II.5.1. Modèle HEC-HMS 17

II.5.1.1. Pluie de projet 17
II.5.1.2. Hyétogrammes de projet 18
II.5.1.3. Fonction de production 18
II.5.1.4. Fonction de transfert 18
II.5.1.5. Temps de concentration 22
II.5.1.6. Curver Number (CN) 23
II.5.2. Modèle HEC-RAS 25
II.6. Urbanisation anarchique 29
II.6.1. Historique de l'aménagement de la ville de Bujumbura 29
II.6.2. Evolution de la ville de Bujumbura 32
II.7. Occupation du sol 34
II.7.1. Choix des images 34
II.7.2. Prétraitement des images 34
II.7.3. Traitement des images 35
II.7.3.1. Réalisation de la classification supervisée 35
II.7.3.2. Validation de la classification 36
II.7.4. Documents de planification urbaine 36
II.7.5. Aperçu sur l'habitat 36
II.8. Inondation dans la zone d'étude 37
II.8.1. Ouvrages Hydrauliques sur les affluents de la rivière Mutimbuzi 38
II.8.2. Paramètres du risque d'inondation dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi 41
II.8.2.1. Aléa d'inondation dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi 41
II.8.2.2. Enjeux 41
II.9. Conclusion 42
CHAPITRE III. ANALYSE DE LA SITUATION GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET DES DONNEES UTILISEES 44
III.0. Introduction 44
III.1. Localisation géographique 44
III.2. Population 45
III.3. Relief de la Zone d'étude 48
III.3.1. Détermination de certains paramètres morphologiques du Bassin Versant de la rivière Mutimbuzi 49

III.3.2. Détermination du temps de concentration de la zone d'étude 50
III.3.3. Temps de pluie de projet 51
III.4. Hydrographie de la zone d'étude 52
III.5. Sols du bassin versant de la rivière Mutimbuzi 53
III.6. Occupation du sol 55
III.7. Conclusion 57
CHAPITRE IV : OCCUPATION DU SOL ET SES IMPACTS HYDROLOGIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE MUTIMBUZI 58
IV.0. Introduction 58
IV.1. Impacts de l'urbanisation sur le cycle de l'eau 58
IV.2. Approche méthodologique 59
IV.3. Classification supervisée dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi 60
IV.4. Evaluation des débits par HEC-HMS 65
IV.4.1. Données d'entrée du modèle 65
IV.4.1.1. Modèle numérique de terrain (MNT) 65
IV.4.1.2. Carte d'occupation du sol 65
IV.4.1.3. Carte des sols 65
IV.4.1.4. Lag du bassin versant 68
IV.4.1.5. Hyétogrammes de projet 68
IV.4.2. Evaluation des crues fréquentielles 72
IV.4.3. Justification du choix de HEC-HMS 73
IV.4.4. Construction du modèle hydrologique 73
IV.4.4.1. Modèle du bassin versant 73
IV.4.5. Modules de HEC-HMS 75
IV.4.5.1. Module météorologique 75
IV.4.5.2. Spécification de contrôle 76
IV.4.6. Paramètres du modèle 77
IV.4.6.1. Infiltration 77
IV.4.6.2. Fonction de transfert 77
IV.4.6.3. Atténuation 77
IV.4.7. Sorties du modèle hydrologique calé 79
IV.4.8. Scenarii simulés dans le modèle 80
IV.4.9. Changements d'occupation du sol 80

IV.4.10. Résultats et Discussions 80
IV.4.10.1. Résultats 80
IV.4.10.2. Discussion des résultats 82
IV.5. Application du modèle HEC-RAS 82
IV.5.1. Données nécessaires 82
IV.5.1.1. Données topographiques 82
IV.5.1.2. Coefficient de Manning 82
IV.5.2. Modélisation des tronçons des cours d'eau de la partie avale de la RN9 83
IV.5.2.1. Données géométriques 86
IV.5.3. Débits et conditions limites 86
IV.5.3.1. Débits 86
IV.5.3.2. Conditions limites 86
IV.5.4. Résultats 86
IV.5.5. Discussion des résultats 88
CHAPITRE V : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS 91
V .1. Conclusion générale **91**
V.2. Recommandations **93**
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 94
ANNEXES 99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1 : Classes de classification des seuils de vulnérabilité aux inondations 13
Tableau II. 2: Répartition de la pluviométrie et la température de la zone d'étude 15
Tableau II.3 : Maxima Journaliers annuels 16
Tableau II. 4 : Hydrogramme unitaire synthétique du NRCS 21
Tableau II.5 : Formules de calcul du temps de concentration 22
Tableau II.6 : Valeurs du paramètre de poli k pour la formule d'Agroskine. 28
Tableau II.7: Croissance spatiale des quatre secteurs d'Usumbura- Bujumbura de 1925 à 2002 31
Tableau II.8 : Quelques inondations historiques dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi 37
Tableau III.1 : Projections communales de la population dans les communes du bassin versant de la rivière Mutimbuzi 47
Tableau III.2 : Temps de concentration des sous bassins de la rivière Mutimbuzi 51
Tableau III.3 : Durées des types d'averses de projet utilisées 52
Tableau III.4: Textures des sols hydrologiques 54
Tableau IV. 1: Points de validation de la classification 60
Tableau IV. 2: Matrice de confusion pour les images de 2000 60
Tableau IV. 3 : Matrice de confusion pour les images de 2016 61
Tableau IV. 4: Matrice de confusion pour les images de 2022 61
Tableau IV. 5: Curve Number des classes d'occupation du sol en fonction des sols hydrologiques 65
Tableau IV. 6: CN des sous bassins du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2000 et 2022 67
Tableau IV. 7 : Paramètres de la loi de Gumbel 69
Tableau IV. 8 : Précipitations journalières extrêmes des différentes périodes de retour 69
Tableau IV. 9. Intensités moyennes (mm/h) des averses de projet 70
Tableau IV. 10 : Débits de base mensuels des affluents de la rivière Mutimbuzi 72
Tableau IV. 11 : Débits des affluents de la rivière Mutimbuzi 79
Tableau IV. 12 : Débits de pointe (en m^3/s) trouvés par le modèle HEC HMS 81
Tableau IV. 13:Taux d'augmentation des débits de la rivière Mutimbuzi 81
Tableau IV. 14 : Coefficients de Manning en fonction de la nature des parois 83

Tableau IV. 15: Résultats par HEC-RAS sur le profil en travers de 8546.82 pour les différents débits considérés des situations étudiées. 87
Tableau IV. 16: Les surfaces inondables hors lits majeurs des rivières en km^2 87
Tableau IV. 17. Personnes projetées dans la zone inondée 88

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Population urbaine et rurale du monde..... 2
Figure I.2 : Près de la Gare du Nord à Kamenge, une route est barrée le 10 Février 2014. 4
Figure I.3. Dégâts causés par la rivière Cari en 2019 4
Figure I.4: Evolution future dans la fréquence des inondations et nombre de personnes affectéesannuellement……5
Figure II.1. Principaux processus de genèse de débits dans les bassins versants 10
Figure II.2: Hydrogramme de crues en trois composantes : Ecoulement de surface, écoulement de subsurface (hypodermique) et écoulement souterrain, en coordonnées semi- logarithmiques par des droites de pentes différentes permettant de les séparer 11
Figure II.3 : Courbes et classes du risque d'inondation. 12
Figure. II.4 : Courbes IDF de la station météorologique de l'Aéroport International Melchior Ndadaye..... 16
Figure II. 5 : Hydrogramme unitaire synthétique du NRCS 21
Figure II.6: Séparation de la pluie en ruissellement, pertes initiales et pertes par rétention.... 24
Figure II.7 : Représentations des limites dans l'équation d'énergie 26
Figure II.7: Evolution de la ville de Bujumbura 32
Figure II.8 : Augmentation de la surface bâtie dans le site Kagerure……..33
Figure II.9: Photos illustrant les dégâts causés par la rivière Mutimbuzi dans la zone de Buterere en 2018 38
Figure II.10 : Les ponts de la RN 9 sur les affluents de la rivière Mutimbuzi……..... 38
Figure II.11 : Etat des berges à l'aval des ponts de la RN 9…….39
Figure II.12 : Les ouvrages d'irrigation dans la partie avale du Bassin versant de la rivière Mutimbuzi 40
Figure II.13 : Localisation de la zone inondable de la rivière Mutimbuzi 42
Figure III. 1 : Localisation de la zone d'étude…… 45
Figure III. 2 : Population communale dans la zone d'étude selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008..... 46
Figure III. 3 : Relief du Bassin Versant Mutimbuzi 48
Figure III.4. Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière Mutimbuzi…… 49
Figure III. 5: Sous bassins du bassin versant de la rivière Mutimbuzi……..... 50
Figure III.6: Réseau hydrographique de la rivière Mutimbuzi……..... 52
Figure III. 7 : Sols de la Zone d'étude en raster..... 54

Figure III.8 : Sols hydrologiques du Bassin versant de la Rivière Mutimbuzi……..... 56
Figure III. 9 : Photos illustrant l'occupation du sol par le bâti au détriment de l'espace agricole……..... 57
Figure IV. 1: Approche méthodologique 59
Figure IV. 2: Pourcentages des différentes classes dans le Bassin en fonction du temps …... 61
Figure IV.3 : Occupation du sol du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2000……..... 62
Figure IV.4: Occupation du sol du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2016……..... 63
Figure IV.5 : Occupation du sol du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2022……..... 64
Figure IV.6 : Hyétogrammes des averses utilisées dans le modèle HEC-HMS 71
Figure IV.7 : Modèles des bassins versants des affluents de la rivière Mutimbuzi 74
Figure IV.8 : Configuration de la jauge pluviométrique de l'averse de 50 minutes pour une période de retour de 10 ans. 76
Figure IV.9: Stockage d'un tronçon d'une rivière 78
Figure IV.10 : Modèle de Mutimbuzi et ses affluents en aval de la RN 9 85
Figure IV.11: Limite de la zone bâtie de la situation A1000 89
Figure IV. 12 : Evolution des surfaces inondables pour les situations simulées. 90

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

BCG : Bureau de Centralisation Géomatique

CAH : Conditions Antécédentes d'Humidité

CN : Curve Number

CRED : Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

ETM : Enhanced Thematic Mapper

GPS : Global Positionning System.

HEC-HMS : Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System.

HEC-RAS : Hydrologic Engineering Center-River Analysis System

HU : Hydrogramme Unitaire

IDF : Intensité – Durée – Fréquence

IGEBU : Institut Géographique du Burundi

INSBU : Institut National de la Statistique du Burundi

ISCAM : Institut Supérieur des Cadres Militaires

ISTEEBU : Institut des Statistiques et des Etudes Economiques du Burundi (actuel INSBU)

LiDAR : Light Detection and Ranging

MNT : Modèle Numérique de terrain

MPBGP : Ministère à la Présidence chargé de la Bonne Gouvernance et du Plan

NEPAD-PDDAA : Nouveau Partenariat pour le Développement de l'Afrique–Programme Détaillé pour le Développement de l'Agriculture Africaine

NRCS : Natural Ressources Concervation Service (ex SCS)

OLI : Operational Land Image

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

RGPH : Recensement Général de la population et de l'Habitat

RMC : Régie Militaire de Construction

RN : Route Nationale

SCS : Soil Conservation Service

SDAU	: Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme
SIG	: Système d'Informations Géographiques
TIN	: Triangulated Irregular Network
UNISDR	: United Nations International Strategy for Disaster Reduction
USACE	: United States Corps of Engineers
USDA	: United States Department of Agriculture

AVANT-PROPOS

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un Mémoire de Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets. Dans le domaine de Génie Civil et d'Aménagement, on y rencontre des travaux de constructions et d'Assainissement pour rendre viables les zones aménagées.

En effet, la ville de Bujumbura fait face à une urbanisation incontrôlée ou anarchique qui engendre des conséquences néfastes sur l'environnement comme l'augmentation du risque d'inondation. Dans ce travail, en se servant des images de LandSat du bassin versant de la rivière Mutimbuzi, nous avons proposé la ligne rouge constituée par une altitude à laquelle l'urbanisation anarchique ne doit pas dépasser pour limiter le risque d'inondation dans la partie avale de la ville de Bujumbura.

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

I.0. Contexte

Dès sa création en 1871, suite à l'exploration du site par David Livingston et Sir Henri Morton Stanley, la ville de Bujumbura qui s'appelait alors Usumbura n'était qu'un petit village, lorsque le Burundi est devenu une partie de l'Afrique de l'Est allemande au cours du 19 ème Siècle. A partir de 1898, la ville d'Usumbura est devenue un grand Camp militaire et puis le centre administratif, après la deuxième guerre mondiale sous le mandat belge de la Ligue des Nations au Rwanda-Urundi. Usumbura a été changé en Bujumbura, avec l'accession du Burundi à l'indépendance en 1962 [République du Burundi & PNUD, 2014].

Avec environ 321000 habitants en 1999, la ville de Bujumbura comptait en 2008 un demi-million d'habitants [ISTEEBU, 2008]. Ce chiffre, en pleine croissance, est projeté à 692 364 habitants en 2020 et à 760 932 et 825701 habitants respectivement en 2025 et 2030 [ISTEEBU, 2020]. Cette population est irrégulièrement repartie sur le territoire de la ville et réside principalement dans les zones périphériques. Une rapide urbanisation incontrôlée et une densification considérable se sont traduites par : des densités résidentielles atteignant 6 971 personnes par km^2 et un manque d'espaces publics ouverts [République du Burundi &PNUD, 2014].

Les études détaillées de la dynamique de l'occupation du sol sur l'hydrologie de la zone urbaine et périurbaine de la Ville de Bujumbura restent rares alors que ces dernières contribuent à promouvoir le respect de l'environnement et le développement durable de cette zone.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la palliation de ce défi par la mise en évidence de l'évolution spatio-temporelle de la ville de Bujumbura ainsi que l'augmentation de la population sur l'hydrologie. Il en ressortira des conclusions qui permettront de dégager des recommandations pour une gestion durable. C'est dans cette optique que, sur base de la problématique (I.1), ont été fixés les objectifs (I.2) qui vont nous permettre de confirmer ou d'infirmer nos hypothèses de travail (I.3).

I.1. Problématique

En 2021, 56% de la population du globe vit en milieu urbain et sera projeté à 68% en 2050 [UN-Habitat, 2022], du fait de la forte croissance démographique et de l'exode rural (Fig.I.1). Le taux d'accroissement de la population de Bujumbura est de 6 % à 7 % [SINDAYIGAYA S. ,2015].

La croissance démographique et économique influe sur la durabilité économique, sociale et écologique et remet en cause la sécurité alimentaire et la crise de logement en milieu urbain [KOUAKOU YAO E. et Al, 2010]**.** En effet, cette augmentation de l'urbanisation rend primordial la quantification des impacts de l'urbanisation sur l'environnement, ceci afin de déterminer des schémas d'aménagement impactant le moins possible l'environnement dans les villes qui connaissent un développement rapide.

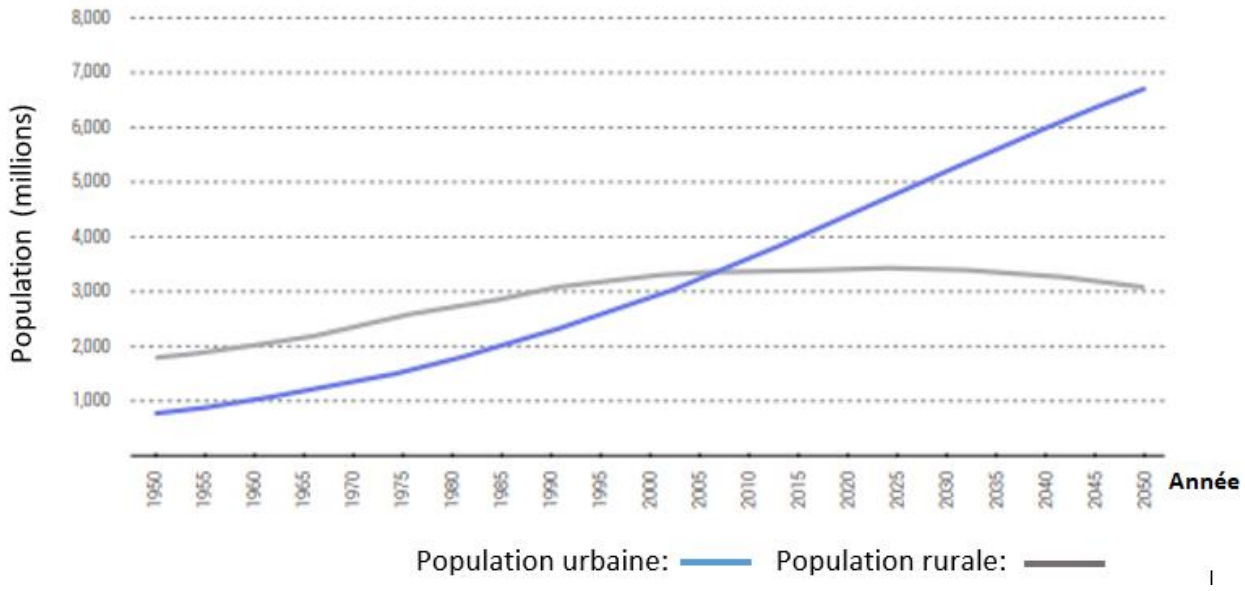


Figure I. 1: Population urbaine et rurale du monde

Source [UN Habitat, 2022]

Au Burundi, la gestion du phénomène d'urbanisation rapide reste une préoccupation des services concernés, d'autant plus que l'élaboration des outils de planification urbaine et les ressources nécessaires de suivi ne sont pas suffisantes pour une meilleure croissance urbaine [SINDAYIGAYA, S. 2015]. Cependant, Bujumbura est une zone où l'occupation du sol est particulièrement dynamique et directement influencée par la croissance de la capitale [SINDAYIHEBURA, B. 2005]. Comme les terrains à construire produits par les pouvoirs publics ne peuvent satisfaire que très peu de ménages par rapport à la demande, ceux de moyen et faible revenu s'installent alors spontanément dans les quartiers non viabilisés.

Ce type d'occupation du sol était fait dans la cité du Sidi Hcine Essijoumi en Tunisie et il a engendré de la part des habitants des quartiers populaires des pratiques qui les ont rendus très vulnérables aux risques d'inondations [NAJEM D., 2011].

Les inondations, soit la submersion par l'eau des terrains qui jouxtent le lit d'un cours d'eau, sont les catastrophes naturelles les plus destructrices dans le monde par leurs fréquences et leurs impacts sur l'environnement, l'économie et les populations. Globalement, il est estimé qu'entre 1980 et 2008, 2887 fortes inondations ont eu lieu, affectant plus de 2.8 milliards de personnes pour 6700 morts, soit une centaine de millions de personnes touchées par an en moyenne Sur le plan économique, l'impact s'élève à 400 milliards de dollars ($US) pour la même période [CRED, 2015].

Une augmentation des risques et des impacts d'inondations ainsi que de leur répartition globale est attendue dans les décennies prochaines (Fig.I.2). En effet, l'expansion des populations, la restructuration et la transformation des secteurs urbains poussent les développements en zones inondables, augmentant la proportion des surfaces imperméables et modifiant la morphologie des bassins versant. L'impact des inondations est exacerbé par une densité plus élevée de population et d'atout socio-économique que les zones rurales [ALCRUDO, 2004 ; EL KADI ADERREZAK, PAQUIER, & MIGNOT, 2008 ; GALLEGOS, SCHUBERT, &SANDERS, 2009; SEYOUM, 2013].

D'après les informations de l'International Disaster Database, les inondations sont au cours des deux dernières décennies au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde [GUHA S. et Al, 2016]. Dans la nuit du 9 au 10 Février 2014, une pluie importante s'est abattue sur Bujumbura et a entraîné des ruissellements importants sur les pentes voisines, des glissements de terrains et la rupture d'une retenue spontanée sur la rivière Gasenyi, en amont d'un quartier de Gatunguru aménagé anarchiquement (Fig. I.2). Cet événement a causé des dommages dont le coût est de 6.9 milliards FBu [BANQUE MONDIALE, 2014]. Aussi le pont de la Rivière Murago, affluent de la rivière Mutimbuzi, était détruit en 2020, suite aux eaux de ruissellement.



Figure I.2 : Près de la Gare du Nord à Kamenge, une route est barrée le 10 Février 2014. (Source :Presse Iwacu)

De plus, les eaux de la rivière Cari séparant Winterekwa et Nyabagere, durant la nuit du 21 au 22 décembre 2019, ont débordé et emporté presque tout sur leur passage (des maisons, des cultures de maïs, des étables, etc.) (Fig. I.3). Le bilan fait état de 15 morts, 45 blessés, 219 ménages affectés par la catastrophe et 279 déplacés.

a. Destruction des maisons	b. Obstruction des caniveaux
	

Figure I.3. Dégâts causés par la rivière Cari en 2019[1]

[1] https://burundi-eco.com/la-ville-de-bujumbura-encore-frappee-par-les-catastrophes-naturelles/

L'ampleur des dommages liés aux inondations récurrentes dans le monde et au Burundi plus particulièrement à Bujumbura a mis à jour les lacunes de gestion dans le domaine de risque d'inondation. Une voie d'amélioration de la gestion du risque lié à ces phénomènes naturels passe par une meilleure compréhension des processus mis en jeu.

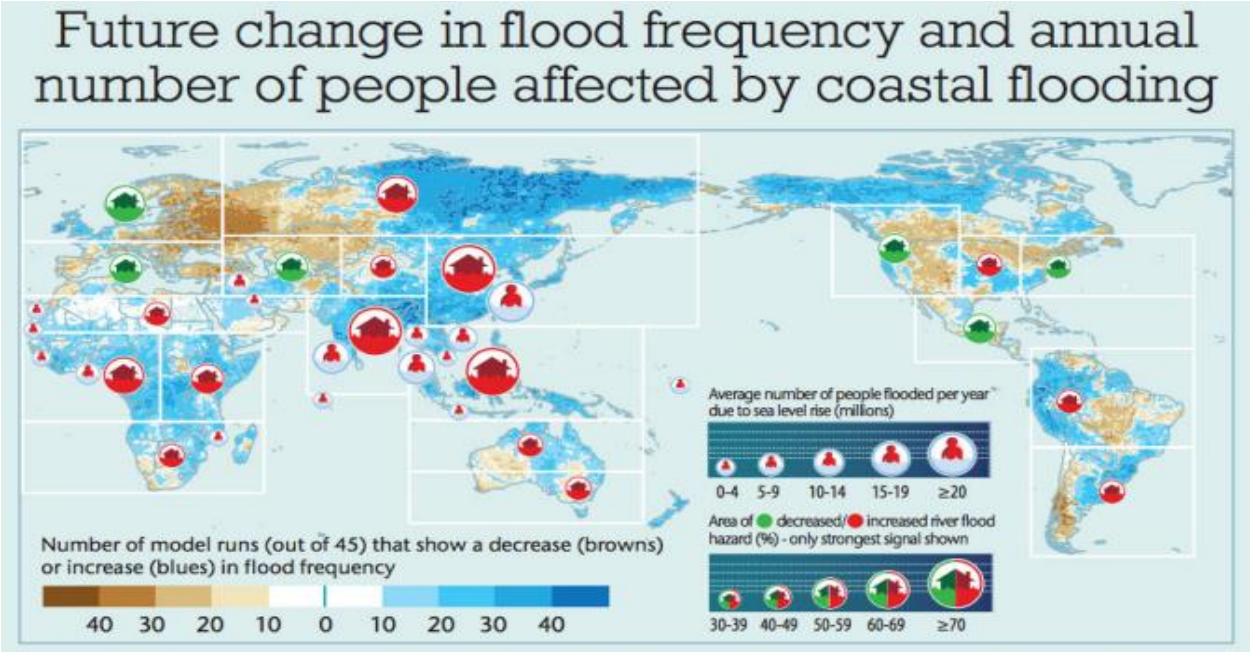


Figure I.4: Evolution future dans la fréquence des inondations et nombre de personnes affectées annuellement[2].

Les études détaillées sur l'urbanisation anarchique de la ville de Bujumbura et sur la gestion des inondations restent rares alors que ces dernières promeuvent l'environnement et le développement durable dans cette zone.

I.2. Objectifs

L'objectif global de notre travail est de contribuer à la protection contre le risque d'inondation dans la zone urbaine et périurbaine du bassin versant de la rivière Mutimbuzi. Spécifiquement, il s'agit de :(i) Mettre en évidence l'urbanisation anarchique de la zone d'étude, (ii) évaluer l'évolution de l'occupation du sol, particulièrement le bâti et la végétation entre 2000 et 2022, (iii) évaluer l'évolution des débits pour une pluie considérée et les surfaces inondables (iv) proposer une ligne rouge limitant les constructions vers la partie amont du bassin versant.

[2] Human Dynamics of climate change,HDCC. http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/j/k/HDCC_map.pdf

I.3. Hypothèses

Les hypothèses ci-dessous ont été formulées : (i) l'indisponibilité du plan d'aménagement serait à la base de l'urbanisation anarchique ;(ii) l'urbanisation anarchique augmenterait les débits de ruissellement ;(iii) l'urbanisation anarchique augmenterait le risque d'inondation.

I.4. Démarche méthodologique

Afin d'atteindre l'objectif assigné à l'étude, les valeurs des débits de pointe, des volumes de ruissellement, des hauteurs de pointe de l'écoulement ainsi que la limitation de l'urbanisation anarchique pour pouvoir contrôler la zone inondable sont requises pour différentes périodes de retour et des conditions antérieures, actuelles et projetées du bassin versant de la rivière Mutimbuzi. L'étude est menée au moyen d'une modélisation et simulation (i) hydrologique dans HEC-HMS par la construction des modèles des bassins versants de Gikoma, Murago et Muzazi, qui sont les principaux affluents de la rivière Mutimbuzi de l'amont à l'aval, sollicités par divers événements de pluies basés sur leurs périodes de retour et (ii) hydraulique dans HEC-RAS par la construction d'un modèle 1D-2D.

Une revue de la littérature, sur (1) les théories derrière les processus et les modèles hydrologiques et hydrauliques à l'échelle des bassins versants et (2) les bases mathématiques des équations et les concepts physiques utilisés ainsi que les théories générales et les méthodologies développées dans les logiciels HEC-HMS et HEC-RAS est présentée dans le chapitre II. Dans le même chapitre, nous allons analyser le type d'urbanisation du bassin versant de la rivière Mutimbuzi et faire un aperçu sur le risque d'inondation dans cette zone.

Le chapitre III décrit la zone d'étude, le bassin versant de la rivière Mutimbuzi, en présentant ses caractéristiques morphologiques et climatologiques et les contours du travail ainsi qu'un récit détaillé des matériels et méthodes utilisés dans la collecte et le traitement des données pertinentes à l'étude.

Les configurations et les résultats des simulations des modèles hydrologiques et hydrauliques sont abordés dans le chapitre IV.

I.5. Résultats attendus

Ce travail de recherche permettra de mieux connaître, l'effet de l'urbanisation anarchique sur la gravité du risque d'inondation, en se référant sur le bassin versant de la rivière Mutimbuzi au Burundi. En ce fait, nous allons : (i) produire un aperçu sur les outils et méthodes utilisés dans sa mise en œuvre, l'importance de chaque outil et méthode et son apport dans la réalisation des résultats et (ii) identifier les facteurs qui peuvent contribuer à l'aggravation du risque d'inondation. En effet, les constats effectués à la suite de notre étude permettront d'orienter l'urbanisation et de limiter les risques d'inondation dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi.

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.0. Introduction

Ce chapitre présente les différentes théories relatives à la fonction de transformation pluie–débit et aux écoulements dans les cours d'eau. Nous allons nous intéresser à celles applicables par les logiciels de HEC-HMS et HEC-RAS ainsi que les conditions susceptibles de générer des inondations.

Cependant, en se référant aux récentes études faites sur la ville de Bujumbura, nous allons analyser les caractéristiques de son urbanisation en général et dans la partie du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en particulier. Cela va nous permettre d'étudier le comportement hydrologique des zones urbanisées ou non urbanisées.

II.1. Processus hydrologiques de générations des écoulements

II.1.1. Précipitations directes à la surface libre du cours d'eau

La première composante dans la génération des crues est la contribution directe des précipitations dans le réseau hydrographique du bassin versant. Dans la majorité des cas, les précipitations directes représentent une part négligeable en raison de la faible portion de la surface qu'occupent les cours d'eau par rapport à l'étendue du bassin versant. Cependant les études de Gburek (1990, cité par MUSY, A., 1998) ont révélé que pour des événements de faibles intensités, elles peuvent constituer une part importante dans la quantification des crues. Dans l'analyse de la réponse hydrologique d'un bassin versant, les précipitations directes sont intégrées dans le ruissellement de surface.

II.1.2. Ecoulement de surface

Lors d'un événement pluvieux, le ruissellement de surface est la résultante observable après que toutes les pertes par interception, infiltration et rétention superficielle aient été soustraites. Horton (1933) a décrit l'écoulement de surface comme suit : « En négligeant l'interception par la végétation, le ruissellement de surface est la partie des précipitations qui n'est pas absorbée par le sol par infiltration ». Il établit donc qu'il y a ruissellement quand l'intensité pluviométrique excède la capacité d'infiltration du sol [MUSY, A. 1998].

D'après Dunne (1978), l'écoulement de surface se produit quand l'eau de pluie nouvelle tombe sur des surfaces saturées. Dans ce cas, l'écoulement se produit, indépendamment de la différence des précipitations et le taux d'infiltration, en raison de l'incapacité du sol à absorber plus d'eau [DUNNE, T.1978].

II.1.3. Ecoulements de subsurface ou Ecoulement hypodermique

Les écoulements de subsurface apparaissent dans les couches peu profondes du sol et se caractérisent par un mouvement latéral de l'eau suite au processus d'infiltration [MUSY, A. 1998]. La condition essentielle pour voir apparaître les écoulements de subsurfaces est que la conductivité latérale du milieu doit être nettement supérieure à la conductivité verticale [MUSY, 1998]. Dans ce cas l'eau, s'écoule latéralement en zone non-saturée, par un mécanisme type « toit de chaume[3]» ou dans le cas d'un écoulement en zone saturée, lorsqu'une nappe perchée se forme dans la partie supérieure d'un horizon peu perméable. Des conditions particulièrement favorables existent là où une couche de sol, mince et perméable, couvre un substratum quasi imperméable. Il se peut aussi que plusieurs niveaux superposés d'écoulement de subsurface se forment. Ces niveaux correspondent à des changements de texture et/ou de structure dans le sol. L'écoulement de subsurface en régime non-saturé peut devenir l'écoulement de base dans des terrains de forte pente, et domine généralement dans les régions humides aux sols couverts de végétation et bien drainés ; une frange saturée réduite au pied du versant étant continuellement alimentée par les écoulements non-saturés [Fig.II.1]. L'écoulement de subsurface se veut intermédiaire entre l'écoulement profond et l'écoulement de surface. Il comprend l'écoulement par l'effet piston, par macropores, intumescence de la nappe ainsi que l'écoulement de retour. [WEILL S., 2007]

[3] L*'analogie avec un toit de chaume se comprend aisément. Le toit de chaume, par l'organisation structurée de ses fibres permet un écoulement latéral tandis que le mouvement vertical de l'eau est difficile. Dans le cas du sol, une conductivité hydraulique latérale élevée couplée à une conductivité verticale faible permet ce type de transport de l'eau.*

Figure II.1. Principaux processus de genèse de débits dans les bassins versants [AMBROISE B.,1999]

II.1.4. Ecoulement souterrain

En termes de processus, l'eau qui rejoint la nappe peut être considérée comme de l'eau souterraine [MUSY, 1998]. L'évaluation de la participation de l'écoulement souterrain à la génération des crues a fait l'objet de plusieurs études dans le siècle passé. [SKLASH & FARVOLDEN, 1979] affirment que : « les eaux souterraines jouent un rôle beaucoup plus actif, réactif et significatif dans la génération de ruissellement pluvial et de fonte des neiges dans les cours d'eau que ne le suggère la littérature récente sur le sujet ». L'observation faite est que dans certaines conditions notamment celles en présence des précipitations modérées sur des sols imbibés d'eau, l'essentiel de l'écoulement dans la rivière est dû à l'écoulement souterrain.

Figure II.2: Hydrogramme de crues en trois composantes : Ecoulement de surface, écoulement de subsurface (hypodermique) et écoulement souterrain, en coordonnées semi- logarithmiques par des droites de pentes différentes permettant de les séparer [BLAVOUX B., 1978].

La détermination de la contribution de l'écoulement souterrain dans l'écoulement total de la rivière se fait par l'utilisation du traceur isotopique. Les méthodes de traçage isotopiques se basent sur le fait que la composition isotopique de l'eau contenue dans le sol est différente de celle de l'eau de pluie et de celle de l'eau des rivières. Ainsi le débit de l'eau du sol est trouvé en résolvant le système (2.1) [WEILL S.,2007].

$$\begin{cases} Q = Q_a + Q_n \\ \delta Q = \delta_a Q_a + \delta_n Q_n \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec Q : le débit total, Qa : débit d'eau ancienne (eau souterraine), Qn : débit d'eau nouvelle (eau de pluie) , δ_a:teneur en isotopes de l'eau souterraine, δ_n : teneur en isotopes de l'eau de la pluie et δ : teneur en isotopes de l'eau de la rivière .

II.2. Inondations

L'inondation désigne la submersion temporaire (plusieurs heures, jours voire même mois) des surfaces précédemment sèches. Les inondations peuvent être déclenchées par plusieurs phénomènes tels que les précipitations excessives, une fonte des neiges, une rupture de barrage, un tsunami, etc.

Le risque d'inondation se caractérise par l'exposition des enjeux vulnérables à l'aléa, en l'occurrence la présence temporaire de l'eau. Le risque est d'autant imminent avec le développement urbain qui catalyse l'augmentation des vulnérabilités en concentrant des enjeux humains et matériels dans les zones préalablement dédiées à d'autres occupations du sol mais souvent sujettes à un aléa d'inondation.

La détermination des caractéristiques de l'aléa inondation, dont la surface inondable, l'évaluation de la période de retour associée à la submersion, la hauteur et la durée de submersion, et la vitesse du courant, suppose d'analyser la physiographie, la nature et l'occupation du sol du bassin versant [KOVACS et AL. 2017].

L'analyse de plusieurs travaux sur la gestion des plaines inondables ayant débouché à la définition des seuils distinctifs des grandeurs de la hauteur atteinte et de la vitesse du courant pour la stabilité spécifique des personnes, des véhicules et des bâtiments. Smith, Davey & Cox ont proposé une classification générale des risques d'inondation dans une plaine inondable au moyen d'un ensemble combiné des courbes isolignes des seuils de risques liés à la vulnérabilité de la communauté lorsqu'elle interagit avec les eaux débordées [SMITH, DAVEY & COX, 2014]. La figure II.1 présente les six classes du danger potentiel qui se rapportent aux seuils de vulnérabilité spécifiques.

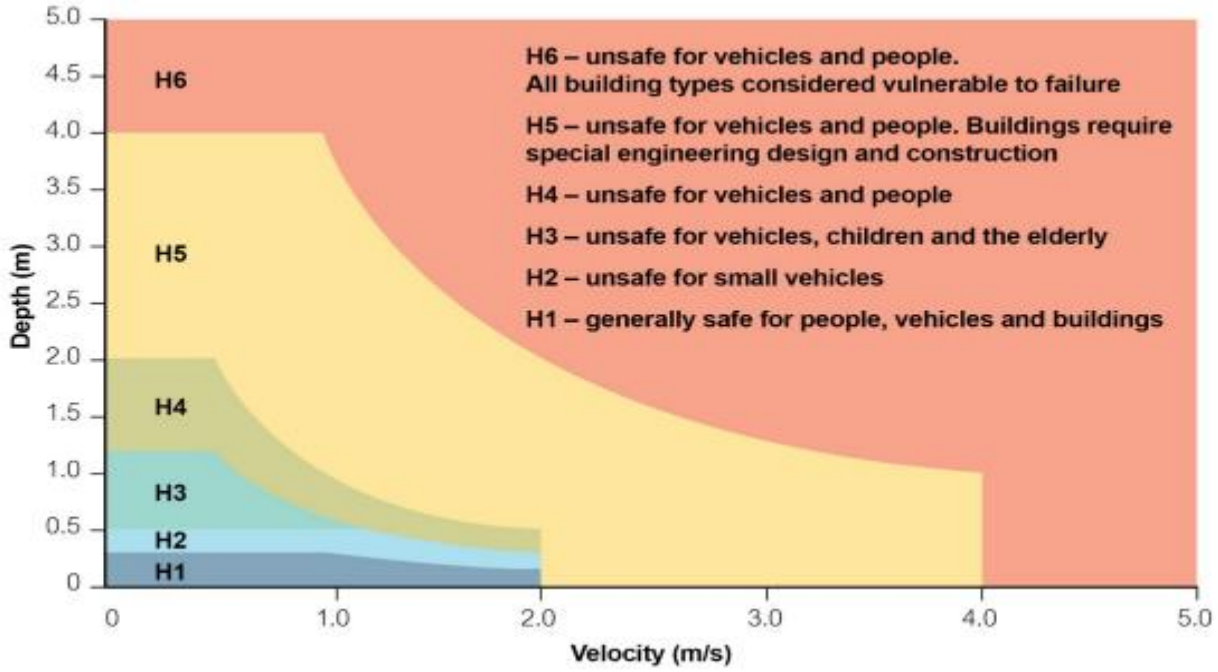


Figure II.3 : Courbes et classes du risque d'inondation.

Source [SMITH, DAVEY & COX, 2014]

Les classes de la figure précédente sont explicitées dans le tableau suivant :

Tableau II. 1 : Classes de classification des seuils de vulnérabilité aux inondations

Classe de vulnérabilité	**Limites des classes (D*V)**	**Limite de la hauteur de submersion D (m)**	**Limite de la vitesse du courant V(m/s)**	**Description**
H1	D*V≤ 0.3	0.3	2.0	Généralement sans danger pour les personnes, les véhicules et les bâtiments
H2	D*V ≤ 0.6	0.5	2.0	Dangereux pour les petits véhicules
H3	D*V ≤ 1.0	1.2	2.0	Dangereux pour les véhicules, les enfants et les personnes âgées
H4	D*V≤ 4.0	2.0	2.0	Dangereux pour les personnes et les véhicules
H5	D*V ≤ 4.0	4.0	4.0	Dangereux pour les personnes et les véhicules. Tous les bâtiments vulnérables aux dommages structurels. Certains types de bâtiments moins robustes vulnérables à la destruction totale.
H6	D*V ≥ 4.0	-	-	Dangereux pour les personnes et les véhicules. Tous les types de bâtiments considérés vulnérables à la destruction totale.

Source [SMITH, DAVEY & COX, 2014]

Le risque est donc accru par le vieillissement des infrastructures en place, et constitue un danger pour les populations qui se sont installées, au fil des années, à l'aval de celles-ci. Ces conséquences sévères renforcent la nécessité d'établir des stratégies de mitigation dans le cadre de la gestion des inondations en zones urbaines dues aux événements extrêmes. Une analyse rigoureuse des caractéristiques de propagation des crues est indispensable pour développer des mesures précises visant à quantifier et réduire les impacts sociaux, économiques et environnementaux de ces désastres.

II.3. Détermination de certains paramètres morphologiques

II.3.1. Indice de compacité de Gravelius

Il sert à qualifier la forme du bassin en le comparant à un cercle de même surface pour lequel KG = 1. En plus, il donne une idée sur le temps de concentration du bassin versant et il est donné par la formule :

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2.2)$$

Avec KG : indice de compacité, p et A respectivement le périmètre et la surface du bassin versant.

Pour les valeurs de KG supérieures à 1.5, le bassin versant est dit de forme allongée, et de forme ramassée pour les valeurs comprises entre 1 et 1.15.

II.3.2. Le rectangle équivalent

La longueur et la largeur du rectangle équivalent sont calculées par les formules (2. 3) et (2.4) :

$$L = \left(\frac{KGx\sqrt{A}}{1.12}\right) x \left(1 + \sqrt{\left(1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2\right)}\right) \quad (2.3)$$

$$l = \left(\frac{KG*\sqrt{A}}{1.12}\right) x \left(1 - \sqrt{\left(1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2\right)}\right) \quad (2.4)$$

II.4. Climat du Bassin Versant de la rivière Mutimbuzi

La compréhension du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Mutimbuzi implique inévitablement celle de tous les paramètres qui en conditionnent le comportement. Cela met en jeu une combinaison des paramètres incluant aussi bien la morphologie (les pentes par exemple), l'occupation et la texture des bassins versants (élément pouvant contrôler le taux d'infiltration par exemple) ainsi que le lit mineur (géométrie des sections transversales, pente et rugosité du fond, etc.). Toutefois, ceux-ci peuvent être considérés comme des facteurs définissant les conditions initiales qui conditionnent le comportement du réseau hydrographique face à un volume d'eau donné qui lui est soumis.

L'écoulement dans les rivières dépend donc fondamentalement des précipitations, bien que d'autres paramètres viennent en amplifier ou en atténuer l'impact sur le réseau hydrographique.

A côté des précipitations, la température ne peut pas non plus être ignorée, vu sa relative implication en passant notamment par son rôle dans la diminution de la quantité d'eau au moyen de l'évaporation [NIBIGIRA, L. 2018].

Le climat du Bassin versant de la rivière Mutimbuzi est influencé par son altitude qui varie entre 759 m et 2505 m. Il est caractérisé par une alternance de la saison pluvieuse qui s'étend généralement du mois d'octobre à mai et de la saison sèche qui va de juin à septembre [Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme, 2010]. Le tableau II.2 nous montre la répartition de la pluviométrie et la température moyenne dans les trois régions de la zone d'étude (III.3).

Tableau II. 2: Répartition de la pluviométrie et la température de la zone d'étude

Régions éco climatiques	Température moyenne annuelle (°C)	Pluie Moyenne annuelle (en mm)
Plaine de l'Imbo	Supérieure à 23	800 - 1100
Contrefort de Mumirwa	18 – 28	1100 - 1900
Crête Congo - Nil	14 - 15	1300 - 2000

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

II.4.1. Précipitations

Les précipitations constituent un phénomène qui décrit le transfert d'eau dans sa phase liquide ou solide entre l'atmosphère et le sol. Les principales caractéristiques des précipitations sont : les intensités, les fréquences et les durées.

Pour notre étude, nous avons les données sur les hauteurs des précipitations journalières enregistrées entre 1981 et 2021 (Tableau II. 3) ainsi que les courbes IDF de la station hydrométéorologique de l'Aéroport International Melchior Ndadaye (Fig.II.4), pour le choix des intensités, fréquences et durées des pluies. Les durées des pluies sont estimées aux temps de concentration des sous bassins versants.

Tableau II.3 : Maxima Journaliers annuels

Annéé	Maximum Journalier	Année	Maximum Journalier	Année	Maximum jounalier	Maximum journalier	Maximum journalier
1981	48.4	1992	46.7	2003	29.4	2014	80
1982	94.6	1993	50.7	2004	64.8	2015	48.5
1983	45.5	1994	59.5	2005	58.4	2016	47.5
1984	60.4	1995	43.4	2006	31.3	2017	113.2
1985	55.6	1996	43.4	2007	63	2018	60.5
1986	88.1	1997	32.1	2008	79.8	2019	60.5
1987	39.5	1998	60.7	2009	142	2020	54.3
1988	47.8	1999	71.2	2010	52.9	2021	45.7
1989	64.4	2000	77	2011	56.3		
1990	77.8	2001	49.8	2012	55.5		
1991	61.7	2002	39.4	2013	60.2		

Source : Etabli par l'auteur à partir des relevés journaliers de l'IGEBU

Les courbes IDF donnent des intensités moyennes et les hauteurs totales en fonction du temps de pluie. La pluie de projet est déduite de la distribution temporelle de la hauteur totale de la pluie tombée.

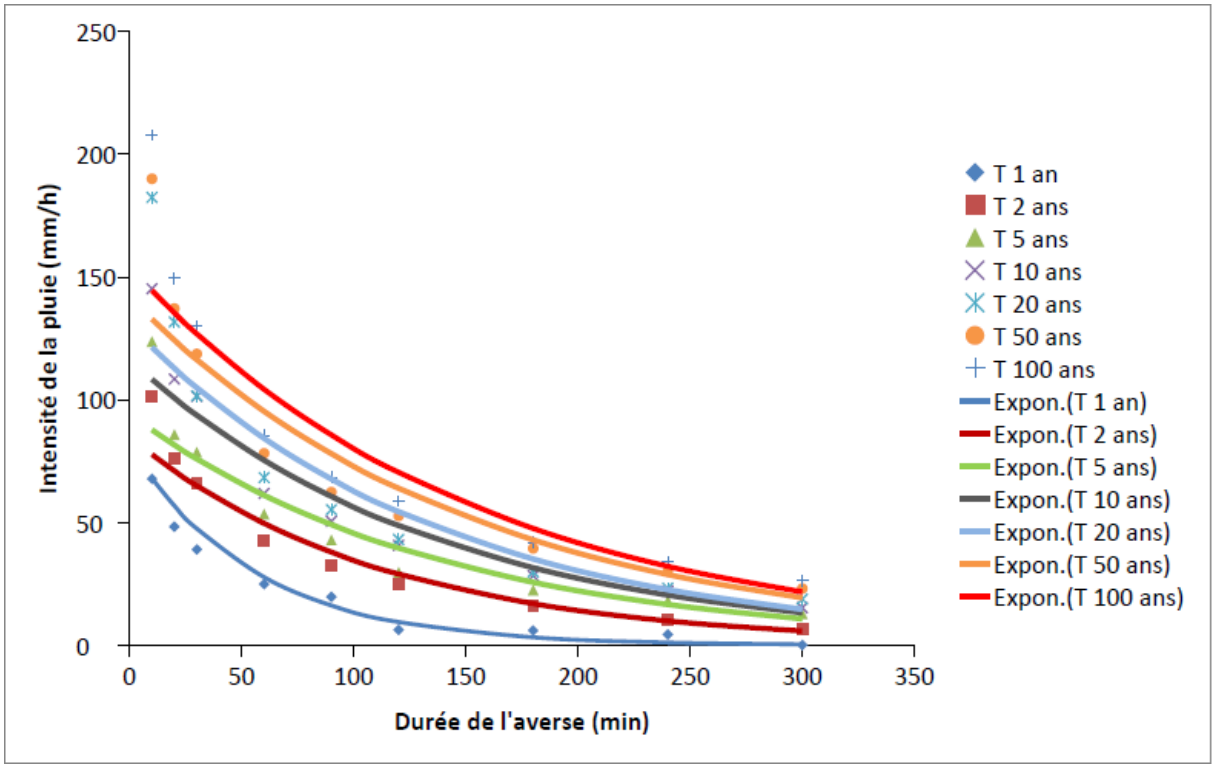


Figure. II.4 : Courbes IDF de la station météorologique de l'Aéroport International Melchior Ndadaye (Source :IGEBU)

II.5. Théories de calcul des modèles HEC-HMS et HEC-RAS

II.5.1. Modèle HEC-HMS

Le modèle HEC-HMS est un logiciel de modélisation hydrologique. Il permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit de ruissellement à un temps donné, en un point donné du bassin versant étudié. Afin de s'adapter aux différents contextes d'études, ce modèle opère selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il simule le bassin à un système composé de plusieurs composantes assurant chacune de représenter un aspect particulier du processus pluie-débit et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement. Les données d'entrées sont les précipitations, les caractéristiques du sol du bassin versant, le temps de concentration du bassin versant et les paramètres des fonctions de transfert selon le choix.

II.5.1.1. Pluie de projet

La formule la plus utilisée pour estimer un quantile hydrologique x_t(intensité, hauteur, débit, etc) correspondant à une période de retour T donnée a été proposée par Chow V.T (1951) cité par [CHOW, MAINDMENT, &MAYS, 1988] :

$$x_t = \mu + K_T \sigma \qquad (2.5)$$

Avec K_T un facteur de fréquence qui dépend de la période de retour et de la loi de distribution utilisée, μ et σ respectivement la moyenne et l'écart type de la série enregistrée.

La distribution d'ajustement intervient après l'application d'une distribution fréquentielle des données rangées par ordre croissant ou décroissant à l'aide d'une formule d'évaluation de la fréquence empirique exprimée généralement par :

$$F = \frac{(m-A)}{(n+1-A-B)} \qquad (2.6)$$

Avec m le rang de la valeur dans la série, n l'étendue de la série et A & B, des constantes dépendant de l'équation empirique utilisée (Weibull : A =B= 0 ; Hazen A=B= 0.5).

Selon la loi de Gumbel,K_T est déterminé comme suit :

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}\left\{0.5772 + ln\left[ln\left(\frac{T}{1-T}\right)\right]\right\} \qquad (2.7)$$

Cependant, les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) locales développées par une loi d'ajustement pour différentes durées de pluie t permettent de déterminer directement une

intensité du projet pour un site donné sans procéder à une analyse fréquentielle à chaque fois. Elles peuvent donner par la formule de Montana :

$$i = \frac{aT^b}{c+t^d} \quad (2.8)$$

où a, b, c et d sont des paramètres d'ajustement spécifiques de la zone.

II.5.1.2. Hyétogrammes de projet

La distribution temporelle d'une pluie de projet est importante dans les études d'inondation. Les méthodes suivantes sont développées pour déterminer l'hyétogramme de projet (i) la méthode du NRCS (SCS), (ii) la méthode de l'hyétogramme triangulaire, (iii) la méthode de Huff, (iv) la méthode ABM (Alternative Block Method) et (v) la méthode de la pluie de Chicago.

II.5.1.3. Fonction de production

Pour l'estimation d'une pluie nette de projet, les pertes par interceptions sont souvent combinées aux pertes par stockage dans les dépressions pour constituer un terme unique de « pertes initiales » [HINGRAY, PICOUET, & MUSY, 2009].

Ces pertes sont supposées se produire uniquement dans les instants initiaux de l'averse quand elles sont supérieures à la hauteur de la pluie tombée. Les pertes par évaporation et les pertes par infiltrations forment « les pertes continues ». Dans le cas de modèles événementiels, les pertes par évaporation sont négligées, les pertes continues sont évaluées uniquement en fonction de la capacité d'infiltration du milieu qui varie avec le temps.

Différents modèles sont proposés pour déterminer la capacité d'infiltration sont entre autres modèle conceptuel de Green et Ampt basé sur la loi de darcy et la conservation de la masse, le modèle hortonien, les modèles basés sur le coefficient de ruissellement, le modèle du NRCS-CN anciennement appelé SCS-CN.

II.5.1.4. Fonction de transfert

La fonction d'acheminement permet de représenter les transformations de la forme de l'onde de débit lors de son passage à travers le bassin versant. La détermination de l'hydrogramme de ruissellement à un point exutoire en est le résultat.

Dans la modélisation hydrologique, la propagation de l'écoulement est couramment abordée sous un aspect conceptuel global se basant sur le principe de la conservation de la masse (ou

du volume) combiné avec certaines relations linéaires ou non linéaires établies entre le stockage et l'écoulement.

L'équation de continuité à l'échelle du bassin versant est articulé comme suit :

$$\frac{dS(t)}{dt} + Q_s(t) = Q_e(t) \quad (2.9)$$

Avec $Q_e$le débit entrant, $Q_s$le débit sortant et ${}^{dS(t)}/_{dt}$ la variation du volume de stockage durant la période de temps considéré.

La quantité de stockage dans un système hydrologique varie avec le temps en fonction de Q_e et Q_s et leurs variations dans le temps ${}^{dQ_e}/_{dt}, \frac{d^2Q_e}{dt^2}, \ldots., \frac{dQ_s}{dt}, \frac{d^2Q_s}{dt^2}, \ldots.$ [CHOW, MAINDMENT, &MAYS, 1988] et s'écrit par :

$$S(t) = f\left(Q_e(t), \frac{dQ_e(t)}{dt}, \frac{d^2Q_e(t)}{dt^2}, \ldots., Q_s(t), \frac{dQ_s(t)}{dt}, \frac{d^2Q_s(t)}{dt^2}, \ldots\right) \quad (2.10)$$

Quand la réponse hydrologique est assumée linéaire se basant sur les principes de proportionnalité et de superposition, le modèle de transfert peut être approché sous des formes très simples telles que le modèle du réservoir linéaire, le concept de l'hydrogramme unitaire et la méthode des isochrones dite aussi méthode rationnelle généralisée.

La résolution du système de deux équations (2.9) et (2.10), pour un système linéaire, aboutit à la relation :

$$Q_e(t) = \frac{M(D)}{N(D)} Q_e(t) \quad (2.11)$$

La fonction $\frac{M(D)}{N(D)}$ (avec $M(D)$ et $N(D)$ des opérateurs différentiels relatifs à Q_e et Q_s respectivement) est la fonction de transfert du système, il décrit la réponse à la sortie à une séquence d'entrée [CHOW, MAIDMENT, & MAYS, 1988]

L'hydrogramme unitaire conceptuel de Nash dérive de la modélisation du fonctionnement du bassin versant en une cascade de n réservoirs linéaires ayant le même coefficient de stockage K. Il est ainsi formulé par une expression du débit Q(t) en fonction du débit de pointeQ_p et du temps de pointe t_p:

$$t_p = K(n-1) \quad (2.12)$$

$$Q_p = \frac{1}{K\Gamma(n)}(n-1)^{(n-1)}e^{1-n} \tag{2.13}$$

$$Q(t) = Q_p\left(\frac{t}{t_p}\right)e^{(1-n)^{t}/t_p}e^{n-1} \tag{2.14}$$

Il existe aussi des hydrogrammes unitaires synthétiques :(1) ceux qui relient les caractéristiques de l'hydrogramme aux caractéristiques du bassins versants (Snyder) ;(2) ceux basés sur un hydrogramme unitaire adimensionnel (SCS) et (3) ceux basés sur des modèles de stockage des bassins versants (Clark) [CHOW, MAIDMENT, & MAYS, 1988].

L'hydrogramme unitaire adimensionnel du NRCS (ex-SCS) est une moyenne d'un grand nombre d'HUs sans dimensions observés sur des bassins versants à travers les Etats Unis pour lesquels le débit et le temps sont exprimés respectivement par rapport au débit de pointe Q/Q_p. Les paramètres de l'hydrogramme unitaire sont donnés dans le Tableau II.4 et Fig.II.5.

Tableau II. 4 : Hydrogramme unitaire synthétique du NRCS (tiré de Musy,A.,1998)

T/tp	q/Qp	T/tp	q/Qp	T/tp	q/Qp	T/tp	q/Qp	T/tp	q/Qp
0	0	0.7	0.82	1.4	0.78	2.2	0.207	3.6	0.021
0.1	0.03	0.8	0.93	1.5	0.68	2.4	0.147	3.8	0.015
0.2	0.1	0.9	0.99	1.6	0.56	2.6	0.107	4	0.011
0.3	0.19	1	1	1.7	0.46	2.8	0.077	4.5	0.005
0.4	0.31	1.1	0.99	1.8	0.39	3	0.055	5	0
0.5	0.47	1.2	0.93	1.9	0.33	3.2	0.04		
0.6	0.66	1.3	0.86	2	0.28	3.4	0.029		

tl : Temps entre le centre de gravité de l'averse et la pointe de l'hydrogramme ; le temps de montée tp est le temps entre le début et la pointe de l'hydrogramme ; le temps de concentration tc signifie le temps entre la fin de la pluie nette et la fin de l'hydrogramme et tb qui est la durée totale de l'hydrogramme.

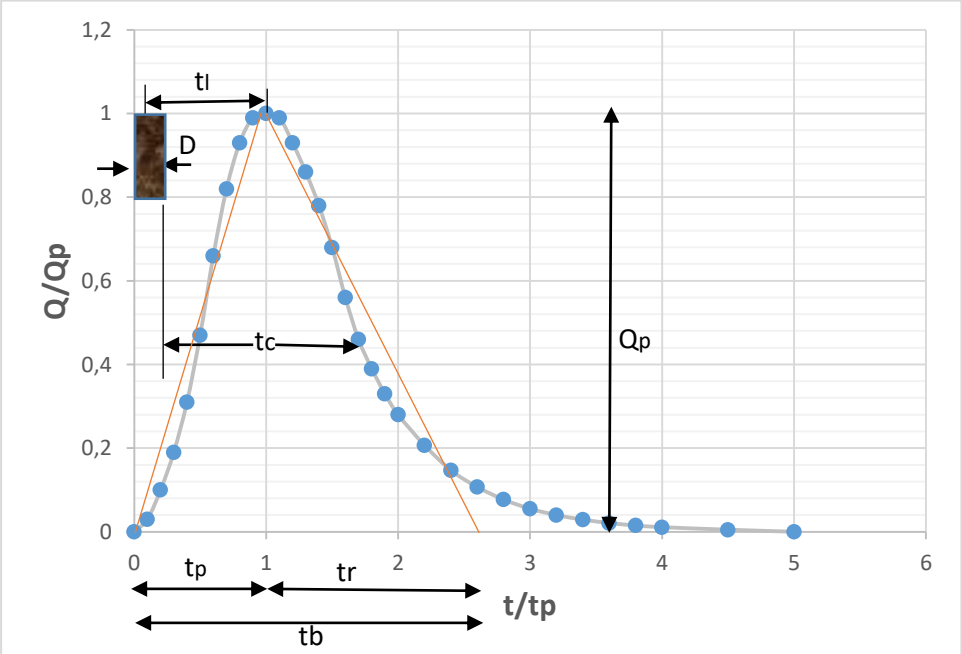


Figure II. 5 : Hydrogramme unitaire synthétique du NRCS (tiré de Musy, 1998).

Les caractéristiques géométriques $Q_p$et t_p d'un HU-NRCS d'un bassin versant sont estimés selon les hypothèses suivantes :

(1) 37.5 % de la crue se situe avant la pointe de l'hydrogramme : $\frac{t_p}{t_b} = 0.375$,

(2) le lag vaut approximativement 6/10 du temps de concentration t_c et pour l'HU adimensionnel le temps de pointe est à une unité de temps et le point d'inflexion à environ 1.7 unités de temps. Ainsi, on a :

$$t_p = \frac{D}{2} + 0.6t_c \quad (2.15)$$

$$Q_p = 0.208\frac{AH_u}{t_p} \quad (2.16)$$

Avec Q_p le débit de pointe en m^3/s ; A la superficie du bassin versant en km^2 Hu la hauteur de pluie nette unitaire (1mm) et t_p le temps de pointe (en heures).

Ainsi l'hydrogramme unitaire synthétique du bassin versant exige l'estimation du temps de concentration.

II.5.1.5. Temps de concentration

Il désigne le temps écoulé avant qu'une particule d'eau qui tombe au point le plus éloigné du bassin versant arrive à l'exutoire. On l'assimile à la durée de temps entre la fin de la pluie et la fin du ruissellement. Il est en relation direct avec le paramètre « Lag », qui reflète le décalage entre la pointe de l'hyétogramme de pluie et la pointe de l'hydrogramme de débit. Il y a plusieurs formules empiriques qui permettent d'estimer le temps de concentration Tc. En voici quelques-unes dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Formules de calcul du temps de concentration

Auteur	Formule	Signification des symboles
Giandotti	$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{h}}$	Tc : temps de concentration du bassin versant en heures A : taille du bassin versant en km^2 L : longueur du thalweg principal en km h : différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle de l'exutoire en m
Turazza	$T_c = \frac{0.108 * \sqrt[3]{AL}}{\sqrt{i}}$	i : pente moyenne du cours d'eau principal, en m/m et où les définitions des variables Tc, A et L sont les mêmes que pour Giandotti

Kirpich	$T_c = 0.945 * \frac{L^{1.155}}{D^{0.385}}$	D : différence d'altitude entre les extrémités du talweg, en mètres
Ventoura	$T_c = 76.3 * \sqrt{A}/\sqrt{I}$c	T_c : temps de concentration (minutes), A : superficie du bassin versant (km^2) et I pente moyenne du bassin (%).
Shake et Geyer	$T_c = \frac{1.4}{0.8} x L^{0.24} x P^{-0.16} x C^{-0.26}$	Tc : Temps de concentration en minutes L : La plus grande longueur hydraulique en mètres P : pente en m/m C : Coefficient de ruissellement sans dimension
Desbordes	$T_c = \frac{5.3}{0.8} x S^{0.3} x P^{-0.38} x C^{-0.45}$	Tc : Temps de concentration en minutes, S : Surface en ha, P : Pente en %, C : Coefficient de ruissellement
NRSCS	$T_c = 0.136x \frac{L^{0.8}}{I^{0.5}} x \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}$	Tc : temps de concentration en heures, L est la longueur du talweg principal en km, I est la pente en % et CN est le Curve number du bassin versant

II.5.1.6. Curver Number (CN)

Le modèle SCS s'appuie sur le concept que la précipitation totale tombant sur un bassin peut être séparée en trois composantes (Fig. II.3) : (i)le ruissellement direct (LR), (ii) la rétention qui se produit dans le bassin (F) et (iii) les pertes initiales (Ia).

La relation entre la précipitation (P) et les trois composantes est la suivante

$$\frac{F}{S} = \frac{LR}{P - I_a} \qquad (2.17)$$

Où S représente la rétention potentielle maximale. La rétention se produisant réellement se définit avec la relation suivante :

$$F = (P - I_a) - LR \quad (2.18)$$

En substituant 2.18 dans l'équation 2.17, on obtient :

$$\frac{(P-I_a)-LR}{S} = \frac{LR}{P-I_a} \quad (2.19)$$

En réarrangeant pour LR, on trouve finalement :

$$LR = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (2.20).$$

L'équation 2.20 contient deux inconnues Ia et S. En se basant sur les résultats de simulations, USDA (1986) pose que la perte initiale est :

$$Ia = 0.2S \quad (2.21)$$

Ceci donne l'équation (2.22) :

$$LR = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (2.22)$$

Cette relation permet de déterminer le ruissellement LR à partir de la précipitation P en utilisant le concept d'un indice de ruissellement CN.

L'indice CN est relié au stockage S exprimé en millimètres, par la relation suivante :

$$CN = \frac{25400}{S+254} \quad (2.23)$$

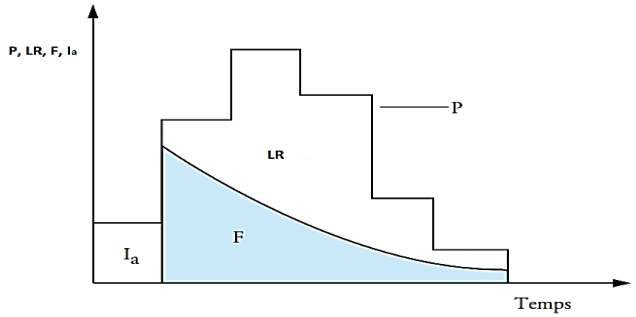


Figure II.6: Séparation de la pluie en ruissellement, pertes initiales et pertes par rétention

Le CN est simplement une transformation non linéaire de S qui est un paramètre de stockage, il est déterminé en considérant essentiellement les types de sol en présence dans le bassin versant et l'occupation du sol.

II.5.2. Modèle HEC-RAS

HEC-RAS est un logiciel de modélisation hydraulique. La modélisation hydraulique constitue un outil important d'évaluation des impacts potentiels des inondations.

Les modèles hydrauliques sont en effet, des algorithmes décrivant les mécanismes physiques qui régissent l'écoulement de l'eau et le transport des sédiments dans les cours d'eau. L'utilisation de ces modèles demande les données topographiques du lit du cours d'eau et des ouvrages hydrauliques en place sont nécessaires pour leur implémentation.

Ces modèles hydrauliques visent à résoudre les équations de continuité et conservation de la quantité de mouvement (les équations aux dérivées partielles de barré de Saint-Vénant) qui s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + S_f - S_0 = 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

Où Q est le débit, A est la section mouillée, v est la vitesse moyenne de l'écoulement au travers la section, y est la hauteur d'eau, g est l'accélération de la pesanteur, $S_f est$ la pente de la ligne de charge et S_0 est la pente du fond.

La deuxième équation de (2.24) varie avec le type d'écoulement :

(1) $S_f = S_0$ pour écoulement uniforme,

(2) $S_f = S_0 - \frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x}$ pour l'écoulement permanent non uniforme et

(3) $S_f = S_0 - \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} - \frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x}$ pour l'écoulement non permanent et non uniforme.

Pour les écoulements permanents, HEC-RAS permet de calculer les profils de la surface de l'eau entre deux sections comme il est montré à la figure II.3 en résolvant l'équation d'énergie. L'équation d'énergie est écrite comme suit :

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2.25)$$

Où : Z_1, Z_2 : Altitude du lit principal respectivement à la section 1 et 2, Y_1, Y_2 : hauteur d'eau à la section 1 et 2 respectivement, V_1, V_2 : Vitesses moyennes, $\alpha_1; \alpha_2$:Coefficients de pondération de vitesse, g : accélération de la gravité et h_e : perte de charge.

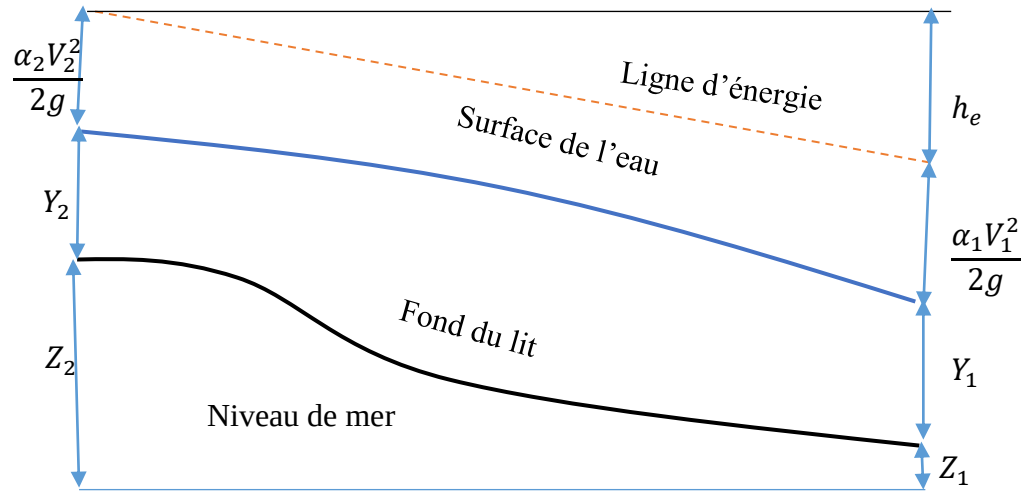


Figure II.7 : Représentations des limites dans l'équation d'énergie

La perte totale d'énergie (h_e) entre deux sections est composée par des pertes par frottement et des pertes de contraction ou d'expansion. L'équation pour la perte totale d'énergie est comme suit :

$$h_e = L\bar{S}_f + C\left|\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right| \qquad (2.\ 26)$$

Où :L est la distance entre deux sections et $\bar{S}_f$ est l'angle de frottement représentatif entre deux sections et C est le coefficient de perte d'expansion ou de contraction.

La longueur de la distance entre deux sections, L, est calculée en HEC-RAS comme suit :

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \qquad (2.27)$$

Où : L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} sont respectivement les longueurs des distances entre deux sections pour l'écoulement dans la berge gauche, le canal principal et la berge droite ; $\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ sont les moyennes arithmétiques des débits entre deux sections pour la berge gauche, le canal principal et la berge droite.

Pour l'écoulement à surface libre et dans le cas du régime uniforme la vitesse moyenne d'écoulement est donnée par la formule (2.31) ou bien formule de Chézy

$$V = C\sqrt{R_h I} \qquad (2.28)$$

Où C : le coefficient de Chézy, il a comme unité le $m^{0.5}/s$, R_h : le rayon hydraulique (m), I : la pente du radier (du fond) du canal.

Pour le calcul du coefficient de Chézy il existe une panoplie de formules, parmi ceux, nous mentionnons les plus souvent utilisées : Formule de Manning, de Pavlovski et Agroskine.

Manning donne la formule suivante :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}} \qquad (2.29)$$

Où n est le coefficient de rugosité et R_h est le rayon hydraulique. Cependant Blench (1939) considère le coefficient C comme une variable qui dépend non seulement de n mais aussi de R_h et dont l'exposant dépend à son tour de n et de R_h. C'est la formule dite de Pavlovski donne comme suit :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{y}, \left(\frac{m^{0.5}}{s}\right) \qquad (2.30)$$

y est un exposant déterminé soit d'après la relation complète :

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R_h}(n - 0.10) \qquad (2.31)$$

Soit d'après les égalités simplifiées :

$y = 1.5\sqrt{n}$ à $R_h < 1m$;

$y = 1.3\sqrt{n}$ à $R_h > 1m$

La formule de Pavlovski est applicable pour un rayon hydraulique variant entre 0.10 m et 3 m et pour n compris entre 0.011 et 0.04.

Agroskine donne la formule suivante pour calculer le coefficient de Chézy :

$$C = 4\sqrt{2g}(k + lgR_h) \qquad (2.32)$$

Où k est le paramètre de poli choisi conformément aux données du tableau II.6.

Tableau II.6 : Valeurs du paramètre de poli k pour la formule d'Agroskine.

Caractéristiques de la surface du lit	K
Enduit de ciment, béton bien lissé à joints lissés	4.70
Canaux de terre réalisés par les machines sans finitions ultérieure dans de bonnes conditions d'entretien et de réparation, pavé de pierres sur mortier	2.50
Canaux de terre dans des conditions d'entretien et de réparation moyennes ; pavé de pierres sans mortier	2.30 à 2.20
Gabions	2.10
Canaux de terres dans des conditions d'entretien inférieures à celles moyennes	2.00
Canaux de terres dans des conditions assez mauvaises ; pierres entassées	1.90

Comme la formule est semi-empirique et les grandeurs qui font partie de son deuxième terme ne sont mesurées qu'en mètres, au lieu de la formule précédente on peut écrire :

$$C = 17.72(k + lgR_h), (m^{0.5}/s) \quad (2.33)$$

Etant donné que la formule d'Agroskine est semi empirique et que les grandeurs incluses dans le deuxième terme sont exprimées uniquement en unité de longueur, à savoir le mètre, on recommande l'utilisation de la formule suivante :

$$C = \frac{1}{n} + 17.72lgR_h, (m^{0.5}/s) \quad (2.34)$$

Dans le logiciel HEC-RAS, le débit est calculé par la relation de Manning en utilisant une rugosité composite $n_c$des différentes rugosités n_i de N parties de la section transversale de périmètre mouillées P_i.

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (2.35)$$

et $$n = \left[\sum_1^N \left(P_i n_i^{1.5}\right)\right]^{2/3} P^{-2/3} \quad (2.36)$$

Avec A est la surface mouillée, R_h est le rayon hydraulique et S est la pente du canal.

Aux emplacements d'ouvrages hydrauliques et aux endroits où l'écoulement à travers l'ouvrage ou l'équation de conservation de la quantité est automatiquement adopté par le logiciel pour l'estimation des paramètres hydrauliques [USACE, 2000].

II.6. Urbanisation anarchique

Au Burundi, l'intensification des épisodes pluvieux, couplée à l'urbanisation croissante qui accentue l'étendue des surfaces imperméables d'année en année, soulève des interrogations sur la gestion du ruissellement urbain. Les techniques d'assainissement appliquées pour l'urbanisation anarchique ne s'embarrassent pas des objectifs du développement durable et ne sont pas sujettes à l'imperméabilisation massive des bassins versants. Récemment encore, l'hypothèse admise était basée sur la maîtrise quantitative du ruissellement, gérant le risque inondation grâce à des ouvrages démesurés qui canalisent l'intégralité des eaux de pluie selon le principe « tout à l'égout ».

Depuis les années 70, les techniques historiques d'assainissement pluvial sont fortement remises en cause pour deux raisons : (i) l'incapacité à absorber les volumes pluviaux, (ii) les préoccupations quant à la qualité des eaux drainées. Face à la croissance démographique et l'urbanisation, les bassins versants voient leurs caractéristiques hydrologiques changer drastiquement : augmentation des vitesses d'écoulement, des débits de pointe, des surfaces inondées [NEPPEL L et Al]. Ainsi, suite aux dégâts matériels et humains causés par les récentes inondations, la Mairie de Bujumbura peut intégrer ces facteurs dans leurs projets d'aménagements.

II.6.1. Historique de l'aménagement de la ville de Bujumbura

Dans les villes des pays en développement, l'urbanisation informelle des périphéries est une pratique populaire classique, sous forme de lotissement clandestins ne respectant pas les règlements d'urbanisme et souvent avec des habitations précaires. En Afrique, les villes coloniales sont aujourd'hui dépassées et butées à cette crise spatiale qui se caractérise par une urbanisation non maîtrisée, rapide, consommatrice de l'espace, et donc facteur des déséquilibres écologiques [MUTUMBO H, 2014]. Les quartiers envahissent les espaces libres, et même ceux qui sont difficilement constructibles.

Ce rythme de croissance est tellement rapide que le tissu urbain est alors trop distendu. Ces villes présentent une structure en vastes entreprises immobilières, fruit du prolongement de la trame urbaine ancienne. Ce phénomène d'habitation anarchique, souvent illégale, observé dans beaucoup de villes d'Afrique rend difficile l'urbanisation des quartiers périphériques.

Ces occupations illégales se développent sur des terrains disponibles en périphérie souvent non propres à l'habitation et sans encadrement ou carrément sans le consentement de l'autorité publique.

P VENNETIER (1989) donne des exemples illustratifs. La ville de Cotonou où la formation anarchique des quartiers périphériques est le fruit d'une active spéculation foncière. A Brazaville, la périurbanisation est accélérée après l'indépendance, lorsque des citadins congolais ont obtenu à leur tour l'immatriculation de domaines ruraux préalablement achetés aux propriétaires coutumiers du sol.

En effet, la configuration spatiale d'ensemble prise par le développement de l'agglomération de la ville de Bujumbura, à partir de la fin des années 1950, il nous a semblé commode de scinder l'espace urbanisé suivant les trois rivières (Ntahangwa, Muha et Kanyosha) qui traversent la ville de Bujumbura d'Est en Ouest. On délimite quatre secteurs : (i) Nord Ntahangwa (au nord de la Ntahangwa), (ii) Muha – Ntahangwa (entre Muha et Ntahangwa), (iii) Kanyosha – muha (entre Muha et Kanyosha) et (iv) Sud Kanyosha (au sud de la kanyosha).

Le comportement spécifique de ces secteurs est décrit par SINDAYIHEBURA B, 2005 dans sa thèse comme indiqué dans le tableau II.7. Avant 1949, la ville se résume au seul secteur Muha- Ntahangwa, qui regroupe cinq quartiers (Buyenzi, Bwiza, Rohero, Quartier Asiatique et quartier industriel) dont l'expansion va rester très soutenue jusqu'au début des années 1980, où elle se stabilise.

Tableau II.7: Croissance spatiale des quatre secteurs d'Usumbura- Bujumbura de 1925 à 2002

Secteurs	Années de développement urbain et surface urbanisé concerné (en ha)								
	1925	1935	1945	1957	1974	1980	1986	1994	2002
Nord Ntahangwa	0	0	0	342.7	523.3	958.8	1395.8	2158.8	2400.3
Muha Ntahangwa	9.2	35.9	261.7	391.4	866.6	1255.6	1346.5	1372	1384.5
Kanyosha-Muha	0	0	0	6	120.9	327.4	477.8	650.6	813
Sud Kanyosha	0	0	0	0	0	4.5	4.7	197.1	384.1
Total	9.2	35.9	261.7	740.1	1512.8	2546.3	3224.8	4378.5	4981.9

Source : [SINDAYIHEBURA B, 2005]

Avant 1957, aucun habitat spontané n'avait été signalé à Usumbura. Les quartiers commencent à déborder sur des terrains non viabilisés et en dehors de toute planification urbaine entre 1957 et 1974. Les habitats spontanés se concentrent notamment entre Kanyosha et Muha (quartier spontané de Musaga en groupes dispersés) et dans le Nord Ntahangwa, à Mutakura (à l'Ouest de Cibitoke) et aux quartiers de Mirango et Gasenyi, localisés à l'est et au sud de Kamenge.

La période de 1974 - 1980 correspond à une sensible accélération de la croissance de l'espace bâti : 33 ha par an en moyenne, soit près de 12 % de croissance annuelle, pratiquement le double de celle de la période de 1957 – 1974 qui était environ 6 % [SINDAYIHEBURA B, 2005]. Cette dynamique se poursuit et s'illustre par la figure II.7.

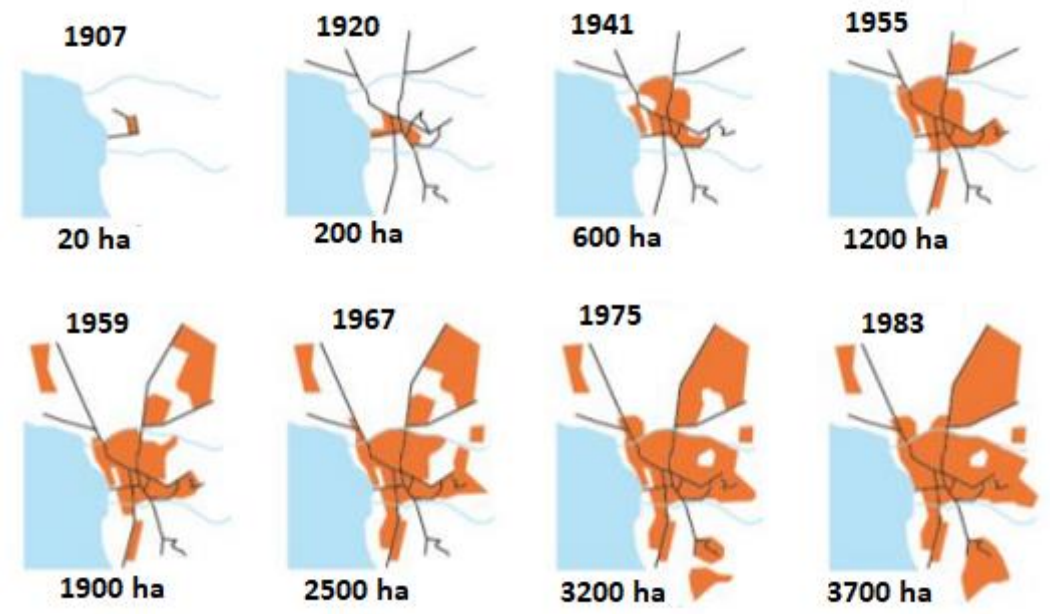


Figure II.7: Evolution de la ville de Bujumbura [PNPRGC/Burundi, 2014]

Pratiquement, le terrain doit être d'abord loti et viabilisé par les aménageurs publics ou privés agrées par le Ministère ayant l'urbanisme dans ses attributions. Après les opérations de viabilisation, les parcelles sont mises à l'administration de l'Urbanisme et de l'Habitat qui délivre aux candidats acquéreurs des lettres d'attribution. L'offre est de loin inférieure au volume des demandes des parcelles.

Cela entraîne des arrangements privés, et des spéculations foncières sur les périphéries des périmètres urbains.

Il en résulte des établissements spontanés, caractérisés par des mélanges des constructions en dures, et semi - dures, et par des voies de circulation aléatoires sans forme géométrique régulière (Fig.II.8) ; et sans aucun assainissement planifié [SINDAYIGAYA, 2015].

II.6.2. Evolution de la ville de Bujumbura

Les communes Kanyosha, Mutimbuzi et Kabezi de la province Bujumbura, se distinguent par l'occupation irrégulière de l'espace à la périphérie de la Mairie de Bujumbura. Elles constituent la zone d'extension de la ville de Bujumbura qui ne peut qu'évoluer spatialement dans l'espace de la province Bujumbura Rural. Le caractère semi rural et sans ordre de l'habitat rencontré à la périphérie de la ville de Bujumbura, le mauvais état et l'étroitesse des voiries d'accès aux quartiers sont les caractéristiques d'une urbanisation anarchique.

L'urbanisation se développe donc jusqu'à présent sans tenir compte des possibilités de collecte et de drainage des eaux pluviales ainsi que le réseau de collecte des eaux usées sans tenir compte des tendances en matière d'urbanisme [PNPRGC/BURUNDI, 2014]. Ainsi, certains collecteurs larges se déversent dans des exutoires de dimension plus réduite, ce qui entraîne invariablement des débordements. Les formes urbaines, les modes d'occupation de l'espace, les modes de vies sont ainsi choisis sans évaluer leurs conséquences ou leurs interactions avec l'évacuation des eaux de ruissellement [CHOCAT, B.1988].



a. Image de google Earth 2016



b. Image de google Earth 2022



c. Image de Google Earth 2023

Figure II.8 : Augmentation de la surface bâtie dans le site Kagerure (source : Google Earth, 2000 ,2016 et 2022)

Les figures II.2 mettent en évidence des ensembles spontanés et anarchiques actuellement sur une étendue alors herbacée en 2016 du site Kagerure dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi.

Cependant EGROT et M. WERNER (1980), ont proposé de limiter la ville de Bujumbura à une longueur nord -sud de 13 km afin de limiter les difficultés de transport principalement mais aussi des autres contraintes de l'hypertrophie des villes. Ainsi, ils proposent de devoir créer de nouveaux centres urbains, dotés des moyens et infrastructures indispensables à leur fonctionnement [EGROT, M. & WERNER M., 1980].

II.7. Occupation du sol

L'occupation du sol est trouvée par le traitement des images de LandSat en déterminant l'indice normalisé de la végétation par classification supervisée. La zone d'étude de 257.33 km^2 couvrant l'entièreté du Bassin versant de la Rivière Mutimbuzi a été isolée sur les images de landsat de 30 m de résolution. Ces images, issues des capteurs *Enhanced Thematic Mapper (ETM)* et *Operational Land Imager (OLI)*, ont été téléchargées sur le site *Earth Explorer (https://earthexplorer.usgs.gov).*

II.7.1. Choix des images

Pour l'étude de la dynamique d'occupation du bassin versant de la Rivière Mutimbuzi, les images de capteurs ETM (image de 2000 et image de 2016) et OLI (image de 2022) ont fait l'objet de nos traitements. Leur choix a été guidé par les critères : (i)L'an 2000, c'est la fin des conflits inter burundais, période par laquelle l'occupation du sol a brusquement changée et l'an 2022 constitue l'état actualisé de la zone ; (ii) les images de 2016 sont très claires, l'an 2016 est choisie pour illustrer la tendance de l'occupation du sol entre 2000 et 2022 (ii) les images ont été choisies pendant la période de la grande saison sèche où la couverture nuageuse est très réduite.

II.7.2. Prétraitement des images

Les images satellitaires téléchargées nécessitent un certain nombre d'opérations de prétraitement. Il s'agit d'une étape indispensable dans le processus de traitement des images satellitaires qui oriente l'ensemble du cheminement méthodologique. Les prétraitements d'images ou analyses préliminaires sont un ensemble d'opérations qui ont pour but d'augmenter la lisibilité des données pour faciliter leur interprétation.

Lorsqu'ils sont bien menés, ils contribuent à une meilleure extraction de l'information utile. Ainsi, dans le cas présent, les prétraitements faits sont les suivants : (i) Assemblage des bandes spectrales : avant de faire d'autres traitements, il faut combiner les différentes bandes en une seule image composée de plusieurs bandes (image multispectrale) pour rendre la manipulation plus facile afin que les traitements se fassent simultanément sur l'ensemble des bandes regroupées. Le logiciel ArcGIS 10.3 a été utilisé et la combinaison a été faite par l'outil *Image Analysis* . (ii) Le découpage des images : les images satellitaires téléchargées couvrent de grandes superficies que la zone d'étude. Le découpage nous a permis de réduire la taille des images pour ne garder que la zone qui nous intéresse. Cela a pour effet de faciliter des opérations.

II.7.3. Traitement des images

Les images prétraitées ont été soumises à la classification supervisée par maximum de vraisemblance. Les étapes sont reprises ci-dessous :

II.7.3.1. Réalisation de la classification supervisée

Pour réaliser une classification supervisée d'une image satellite il faut une connaissance de l'occupation réelle du sol de la zone de l'image à l'époque où elle a été prise. Ainsi, la connaissance du milieu, complémentée par les résultats du prétraitement, nous a permis de réaliser la classification supervisée en classes thématiques identifiées pour notre zone d'étude. Cette étape nécessite trois étapes importantes :

a. Définition des classes spectrales

Pour notre travail, quatre classes de l'occupation du sol ont été retenues : Bâti, Eau, Forêt et végétation. Ces classes ont été identifiées à partir des connaissances du terrain de la zone d'étude et de l'interprétation des images colorées de Google Earth de la zone de l'époque.

b. Sélection des aires d'entraînement

Il s'agit de choisir un minimum de 30 « pixels purs » spectralement représentatifs de chaque classe thématique identifiée précédemment. Ces échantillons ou aires d'entraînement servent à la calibration de la classification. Elles sont définies à l'écran par la numérisation d'un ou plusieurs polygones représentatifs [DENIS, 2013].

c. Mise en œuvre de la classification

L'algorithme de classification selon le maximum de vraisemblance a été utilisé. Il s'applique à tous les pixels de l'image sur base des paramètres statistiques décrivant chaque signature obtenue. La comparaison entre les valeurs de chaque pixel et les signatures spectrales des différentes classes déterminera la probabilité d'appartenance du pixel à chacune des classes. La classe présentant le maximum de probabilité sera attribuée au pixel considéré [DENIS, 2013].

II.7.3.2. Validation de la classification

Pour évaluer la fiabilité d'une classification, de nombreuses méthodes basées sur des résultats statistiques de la classification sont proposées [NDIKUBWAYO, 2019]. Il s'agit principalement de la matrice de confusion, l'indice de séparabilité des classes ou de la visite de terrain. Pour notre étude, nous avons utilisé la validation par la matrice de confusion. C'est une méthode basée sur la définition des points de validation.

II.7.4. Documents de planification urbaine

Loi n°1/09 du 12 Août 2016 portant code de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction dans son article 15 donne les documents de planification urbaine ci-après : (i) Des schémas directeurs d'aménagement et d'urbanisme qui sont des instruments de planification à moyen et à long terme et à petite échelle. Ils déterminent la destination générale des sols dans un périmètre urbain donné et localisé les zones à urbaniser, les zones à protéger en raison de leur spécificité et enfin, les zones à grands équipements et infrastructures. (ii)Des plans locaux d'aménagement qui déterminent notamment l'affectation des sols en spécifiant les zones d'habitat collectif et individuel, les zones destinées aux constructions en étage, les zones touristiques, le réseau routier, le réseau hydrographique ainsi que les réseaux d'assainissement. (iii)Les plans particuliers d'aménagement qui reprennent et précisent à plus grande échelle, les dispositions des schémas directeurs d'aménagement et d'urbanisme et des plans locaux d'aménagement en fonction des spécificités de chaque secteur concerné. Ils précisent dans les quartiers les limites des différentes zones, les emplacements réservés aux services publics, les dimensions des constructions et les conditions d'occupation du sol de façon aussi précise que possible. Ils précisent les plans d'alimentation en eau potable et d'assainissement, d'électrification et de téléphonie.

Néanmoins, ces documents importants pour la promotion d'un développement durable d'une ville ne sont pas disponibles pour la planification urbaine du bassin versant de la rivière Mutimbuzi. Le Schèma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (SDAU) de Bujumbura datait de 1982, et projette l'image de la ville de Bujumnura jusqu'en 2002 et il ne se limite qu'entre la rivière Mugere et la rivière Gasenyi (Annexe 3).

II.7.5. Aperçu sur l'habitat

La planification urbaine au Burundi a connu une certaine période (2000 à 2015) dépourvue des outils de planification et de gestion urbaine, c'est-à-dire les documents existants ayant été tombés en désuétude.

Il est évident que pendant toute cette période, et jusqu'à maintenant le développement urbain se réalise à travers un pilotage à vue, avec parfois des conséquences néfastes sur l'extension des villes [SINDAYIGAYA S., 2015].

De plus, la gestion des terres urbaines se réalise à deux niveaux à savoir la mise en œuvre des outils et de documents de planification à l'intérieur du périmètre urbain ; et le suivi proactif de l'extension des périphéries immédiates à l'extérieur du périmètre de développement des villes. Cependant la procédure de cession des parcelles est longue et compliquée d'autant plus que l'offre est de loin inférieure au volume des demandes des parcelles.

II.8. Inondation dans la zone d'étude

Les affluents principaux de la rivière Mutimbuzi, sont des cours d'eau torrentiels qui, simultanément aux réalités du milieu et aux pluies intenses, entraînent des mouvements de terrain au niveau des berges et les érosions verticales du lit, véhiculent des matériaux solides à fort pouvoir destructeur qui sont ensuite déposés dans le lit à faible pente. Ces éléments contribuent à l'aléa inondation qui se reproduit dans la partie basse de notre zone d'étude. Cette partie servait par ailleurs, dans le temps, de zone de divagation des eaux provenant des montagnes en amont.

Dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi, on a déjà enregistré des inondations importantes (MUHIGIRWA G., 2011) dont quelques cas déjà enregistrés dans le tableau II.8.

Tableau II.8 : Quelques inondations historiques dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi

	Endroits touchés	
Années	Zone Buterere	Aéroport International Melchior NDADAYE
2002	Oui	Oui
2009	Oui	Non
2010	Non	Oui
2011	Oui	Non

Source : [MUHIGIRWA, G.2011]

Sur le long de la rivière Mutimbuzi, il y a des digues anti crues en terre. Ces digues sont fortement dégradées. Du fait que les rivières ne sont plus recalibrées et draguées pour élargir la section et créer des pentes non érosives au fond, pendant les crues, elle sort de son lit et provoque les cassures des digues [NEPAD PDDAA, 2006].

Tout cela a occasionné les inondations du 30 Avril 2018 où la digue a cédé sur sa rive gauche et a causé des dégâts énormes comme le montre les images de la presse Iwacu (Fig.II.9). Elle indique aussi que plus de 300 maisons ont été détruites, d'autres inondées et beaucoup de champs dévastés par les eaux débordées de la rivière Mutimbuzi.



Figure II.9: Photos illustrant les dégâts causés par la rivière Mutimbuzi dans la zone de Buterere en 2018 (Source : https://iwacu-burundi.org/)

II.8.1. Ouvrages Hydrauliques sur les affluents de la rivière Mutimbuzi

Dans la partie avale du bassin versant de la rivière Mutimbuzi, on trouve sur les différents affluents des ouvrages hydrauliques entre autres : (i)les ponts de la RN9 sur Gikoma, Murago et Muzazi ainsi que celui de la RN 5 sur Mutimbuzi. (ii) les microbarrages à seuil épais dont certains sont effondrés et d'autres en mauvais état (Fig. II.10).

		
Pont de la RN9 sur Muzazi	Pont sur de la RN9 sur Murago	Pont de la RN9 sur Gikoma

Figure II.10 : Les ponts de la RN 9 sur les affluents de la rivière Mutimbuzi (Photos prises par l'auteur, juillet 2022)

Les parties avales de ces ponts sont instables, on assiste à des affouillements des lits et des mouvements de terre des berges (Fig.II.11).

Cela peut augmenter le risque d'inondation dû à la rupture de barrage et quand le débit important devrait arriver très rapidement près des régions habitées, ce qui pourrait ne pas permettre aux habitants de s'échapper ou d'appliquer un plan d'urgence nécessaire [NIBIGIRA L., 2018].

		
Les berges de la rivière Muzazi à l'aval du pont de la RN9	Les berges de la rivière Murago à l'aval du pont de la RN 9	Les berges de la rivière Gikoma à l'aval du Pont de la RN 9

Figure II.11 : Etat des berges à l'aval des ponts de la RN 9.(Photos prises par l'auteur, Mars 2023)

Les ouvrages d'irrigation dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi sont en mauvais état comme le montre la figure II.12.

	
Barrage d'irrigation du Secteur Mubone	Barrage d'irrigation du Secteur Bukirasazi
	
Barrage d'irrigation en cours d'aménagement artisanalement du secteur Bukirasazi	Partie avale du canal d'amenée traversant la rivière Gikoma pour irriguer le secteur de Bukirasazi

Figure II.12 : Les ouvrages d'irrigation dans la partie avale du Bassin versant de la rivière Mutimbuzi (Photos prises par l'auteur, Mars 2023)

L'augmentation des débits change les caractéristiques prévues des écoulements et ainsi engendre la dégradation de ces ouvrages, cela est accentué par les conditions de curage. L'aménagement artisanal des barrages d'irrigation affaiblit les berges de la rivière Mutimbuzi et ainsi augmentera le risque d'inondation par débordement ou par déviation. De plus, la diminution des eaux d'irrigation favorise la transformation des espaces cultivables en bâti.

II.8.2. Paramètres du risque d'inondation dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi

Le risque est une notion composite. Il est le produit d'un aléa est d'une vulnérabilité. C'est pourquoi nous avons d'abord dégager les caractéristiques de l'aléa (inondation) et les enjeux de la zone d'étude et leur vulnérabilité.

II.8.2.1. Aléa d'inondation dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi

UNISDR définit l'aléa comme « un phénomène dangereux, une substance activité humaine ou condition pouvant causer des pertes de vies humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, des dommages aux biens, des pertes de moyens de subsistance et des services, des perturbations socio-économiques, ou des dommages à l'environnement » [UNISDR, 2009]. L'aléa est un concept qui désigne la probabilité d'occurrence d'un phénomène. Il est principalement fonction de l'intensité du phénomène et de son occurrence. Pour notre étude, la fréquence des inondations peut changer pour deux raisons : (i) la fréquence des précipitations extrêmes et (ii) l'aménagement du territoire, ici nous considérons l'occupation anarchique du sol en construisant des bâtiments aussitôt que l'espace est disponible.

La fréquence des précipitations extrêmes est étudiée par les courbes IDF de la station météorologique de l'Aéroport International Melchior Ndadaye selon la formule proposée par KAESER cité par [ERCA, 2018], pour la région de l'Imbo. L'aménagement du territoire est analysé par le traitement des photos Landsat jusqu'en 2022 et par des simulations en supposant les limites des zones urbanisées aux niveaux des différentes altitudes.

II.8.2.2. Enjeux

Pour notre étude, la zone inondable se trouve dans la partie aval à l'ouest de la RN 9. Actuellement, cette partie comprend la zone de culture de riz, des zones de bâtis dispersés, l'Aéroport International Melchior Ndadaye et des zones de bâtis groupés (Fig .II.13).

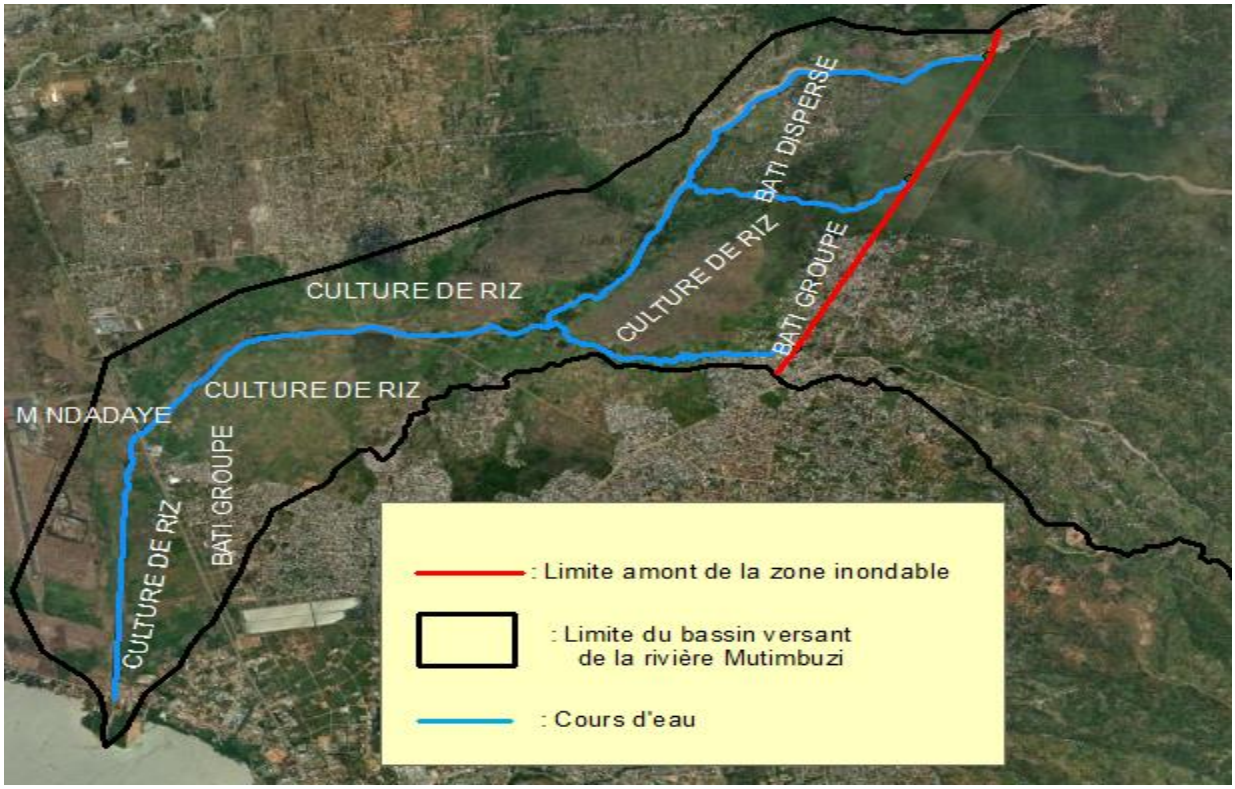


Figure II.13 : Localisation de la zone inondable de la rivière Mutimbuzi (établi par l'auteur à partir des images de Google earth, Février 2023)

Dans les états simulés, nous avons considéré que la partie des cultures sera transformée en zone bâtie. Les zones bâties vont ainsi augmenter au détriment de la végétation.

II.9. Conclusion

La modélisation hydrologique par HEC-HMS et la modélisation hydraulique par HEC-RAS utilisent des modèles mathématiques, des données géométriques des cours d'eau, de la topographie ainsi que d'autres caractéristiques de la zone d'étude comme la nature du sol et l'occupation du sol. Le modèle HEC-HMS intègre les techniques de transformation pluie-débit :la rétention initiale, le stockage, l'évapotranspiration et le transfert du débit. HEC-RAS quant à lui permet de calculer, en fonction des débits générés par HEC-HMS, des paramètres permettant de caractériser la vulnérabilité d'une zone aux inondations.

De plus nous avons analysé les caractéristiques de l'urbanisation anarchique de la ville de Bujumbura en général et dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi en particulier. Les bâtiments sont en train de remplacer les zones allouées aux différentes cultures.

Cependant, nous avons vu que la partie aval du bassin versant est une zone inondable. L'évaluation du risque d'inondation est fortement influencée par l'amplitude et la fréquence de l'aléa ici qui sont le débit des crues et leur période de retour. L'état des lieux des barrages d'irrigation favorise l'expansion de l'urbanisation anarchique car les cultures de riz deviennent sèches suite à l'indisponibilité de l'eau. Dans le chapitre suivant, nous allons analyser et traiter les données climatiques et géographiques du bassin versant de la rivière Mutimbuzi.

CHAPITRE III. ANALYSE DE LA SITUATION GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET DES DONNEES UTILISEES

III.0. Introduction

Les études des écoulements dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi sont fortement influencées par son relief, son climat, géologie, hydrogéologie et sa pédologie. Le bassin versant de la rivière Mutimbuzi comprend deux parties : la partie avale à faible pente et la partie amont à forte pente. Dans ce chapitre nous allons analyser ces caractéristiques et dégager quelques paramètres hydrologiques qui en découlent.

III.1. Localisation géographique

Notre travail porte sur une période de 2000 à 2022. Spatialement, la zone d'étude est délimitée par le bassin versant de la rivière Mutimbuzi et ses affluents de 257.33 km^2 de superficie. Cette rivière traverse la ville de Bujumbura dans sa partie Nord et se déverse dans le lac Tanganyika. Géographiquement notre zone d'étude s'étend du centre à l'ouest du pays (Fig.III.1). Le bassin versant de la rivière Mutimbuzi se situe au Nord de la ville de Bujumbura entre 3°12'00'' et 3°24'30'' de latitude Sud et 29°19'00'' et 29°34'00'' de longitude Est.

Du point de vue administratif, le bassin versant de la rivière Mutimbuzi s'étend sur la commune Ntahangwa de la mairie de Bujumbura, les communes Mutimbuzi, Mubimbi, Isale et Mugongomanga de la Province Bujumbura, les communes Mpanda et Rugazi de la province Bubanza ainsi que les communes Bukeye et Muramvya de la province Muramvya (Fig.III.1).

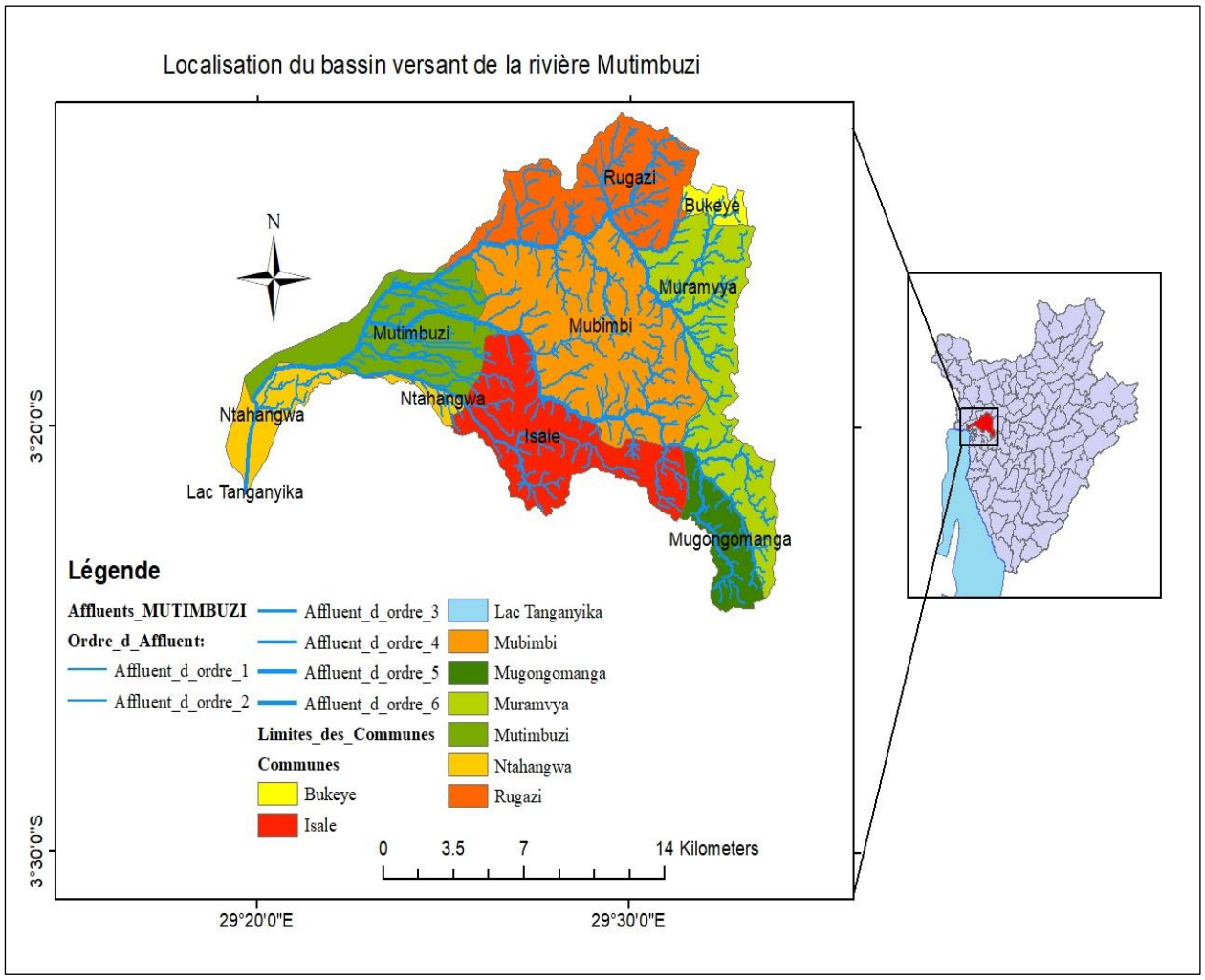


Figure III. 1 : Localisation de la zone d'étude (établi par l'auteur à partir du MNT et limites administratives du BCG)

III.2. Population

D'après le plus récent recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2008, la population totale du Burundi s'élevait à 8 053 574 habitants. Selon l'ISTEEBU, on observe une augmentation sensible de la population pour la Mairie de Bujumbura, de l'ordre de 3.1% à 4.2% [ISTEEBU, 2008]. Dans notre zone d'étude, la situation démographique selon le même recensement est donnée sur la figure III.2 selon les différentes communes de la zone.

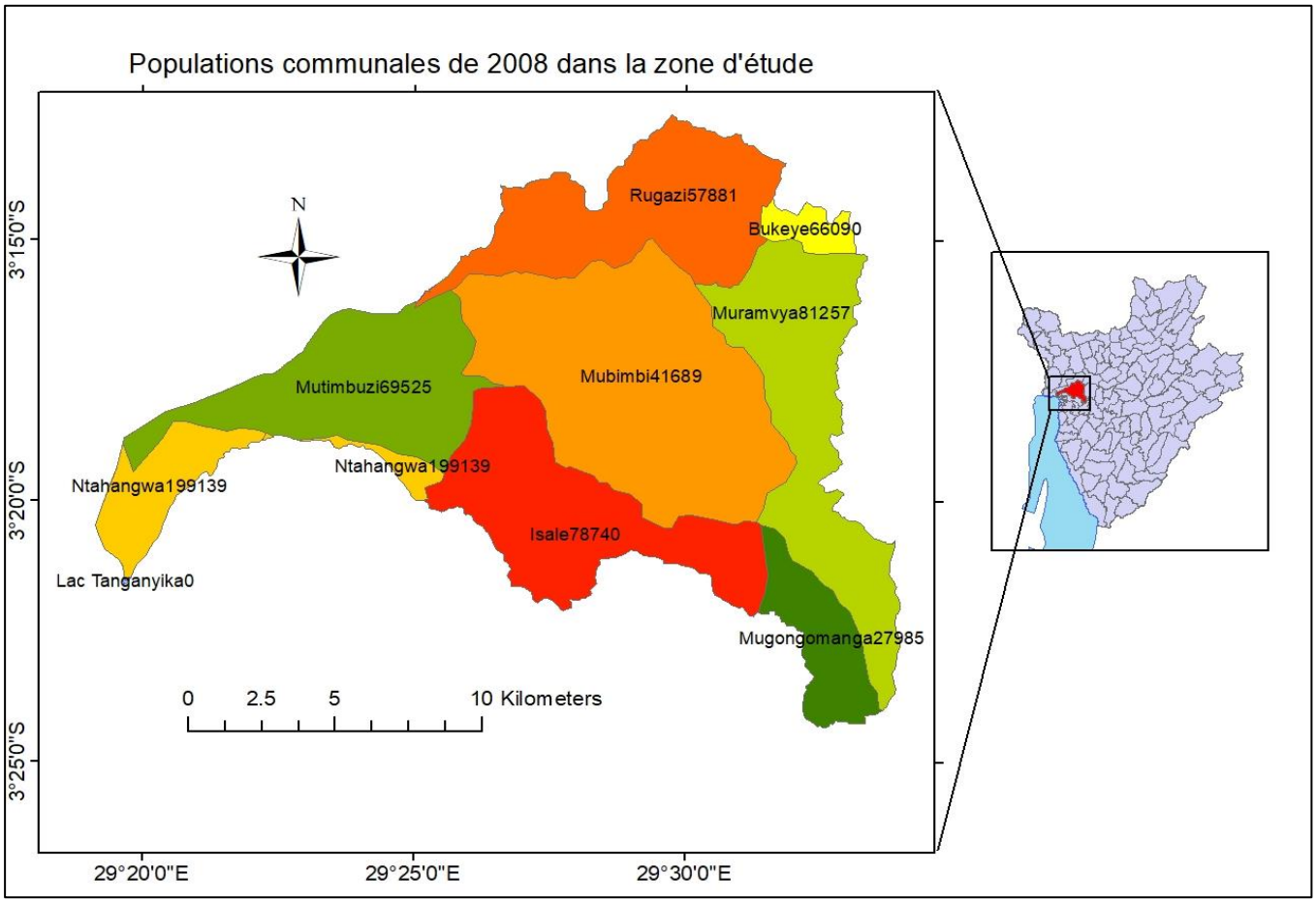


Figure III. 2 : Population communale dans la zone d'étude selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008. (Établi par l'auteur à partir des limites administratives de la BCG et données de la population par ISTEEBU,2008)

En projetant les proportions ou poids relatifs de chaque entité, l'ISTEEBU a pu déterminer les projections communales et provinciales. Pour les communes de la zone d'étude les projections sont données dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Projections communales de la population dans les communes du bassin versant de la rivière Mutimbuzi

Année	Commune							
	BUKEYE	MURAMVYA	MUTIMBUZI	ISALE	MUBIMBI	MUGONGO-MANGA	RUGAZI	NTAHANGWA
2010	77641	95459	81676	92502	48975	32876	67997	292419
2011	80183	98585	84351	95531	50579	33953	70224	301995
2012	82659	101628	86955	98480	52140	35001	72392	311317
2013	85076	104600	89498	101360	53665	36024	74509	320422
2014	87431	107495	91975	104166	55151	37022	76571	329291
2015	89722	110313	94386	106896	56596	37992	78578	337921
2016	92034	113155	96817	109650	58054	38971	80602	346627
2017	94335	115984	99238	1120391	59506	39945	82618	355294
2018	96607	118777	101628	116098	60939	40907	84608	363852
2019	98838	121520	103975	117756	62346	41852	86561	372254
2020	101016	124198	106267	120351	63720	42774	88469	380458
2021	103191	126872	108554	122942	65092	43695	90373	388647
2022	105350	129527	110826	125515	66454	44609	92265	396781
2023	107481	132147	113067	128054	67798	45512	94131	404806
2024	109579	134726	115274	130553	69122	46400	95968	412708
2025	111645	137266	117447	133014	70425	47275	97777	420488
2030	122131	150159	128479	145508	77039	51715	106961	459982
2035	133143	163698	140063	158628	83986	56378	116606	501458
2040	144516	177681	152027	172177	91159	61193	126565	544290
2045	155709	191442	16381	185512	98220	65933	136368	586446
2050	166384	204568	175032	198231	104954	70453	145718	626654

Source : [ISTEEBU, 2020]

Les chiffres du tableau III.1, montre que la population dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi est en pleine croissance. En absence des mesures limitant l'urbanisation anarchique, nous allons assister à une augmentation des surfaces imperméabilisées au détriment de la végétation.

III.3. Relief de la Zone d'étude

Le bassin versant de la rivière Mutimbuzi s'étend sur trois zones à reliefs variés (Fig.III.3). Il s'agit : (i) Plaine de l'Imbo : la partie se trouvant dans cette zone se situe entre 760 m et 1000 m d'altitude avec une faible pente.

Les mêmes altitudes se retrouvent dans la description de la zone par NZIGIDAHERA B. (2012) avec une pente moyenne pour la plaine de 12% ;(ii) versant Ouest de la Crête Congo Nil ou les Contreforts des Mirwa : la partie du bassin versant de la rivière Mutimbuzi intersectant les contreforts de Mumirwa a une altitude variante entre 1000 et 2000 m. Le relief de cette zone est très marqué avec des pentes variant de 70% à plus de 100% [NZIGIDAHERA, B. 2012] ;(iii) crête Congo-Nil : Cette zone s'étire du Sud au Nord. Elle prend naissance au pied de la chaîne des Virunga, au Nord du Rwanda et se poursuit, après le Burundi, en Tanzanie en définissant la ligne de partage des eaux entre les deux bassins hydrographiques, celui du Congo et celui du Nil. Pour la partie du bassin versant de la rivière Mutimbuzi, la crête se situe entre 2000 m et 2500 m d'altitude.

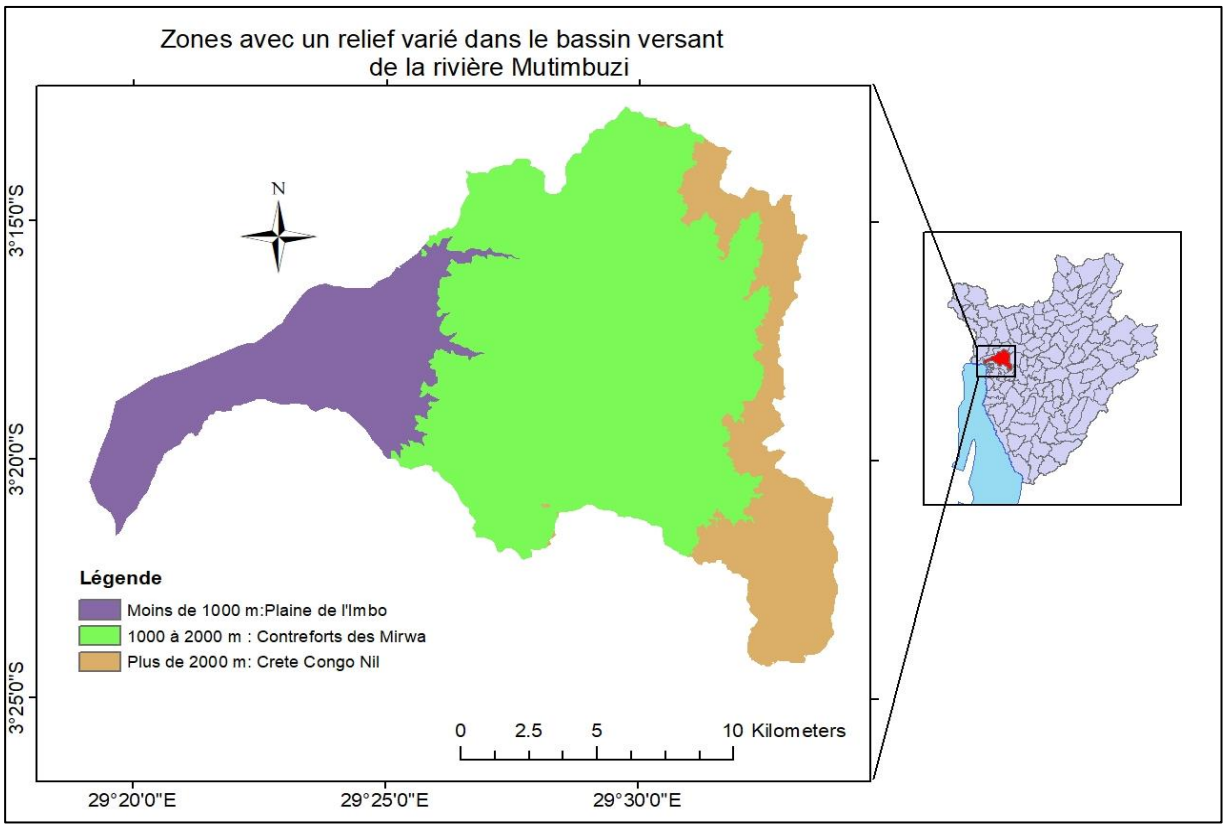


Figure III. 3 : Relief du Bassin Versant Mutimbuzi .(établi par l'auteur à partir du MNT du Burundi du BCG)

Dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi la tranche d'altitude la plus représentée est celle comprise entre 1000 et 2000 m. Les pentes varient de 0 en aval à 63° en amont. La courbe hypsométrique (Fig. III.4) montre la répartition des altitudes sur la superficie du bassin versant de la rivière Mutimbuzi.

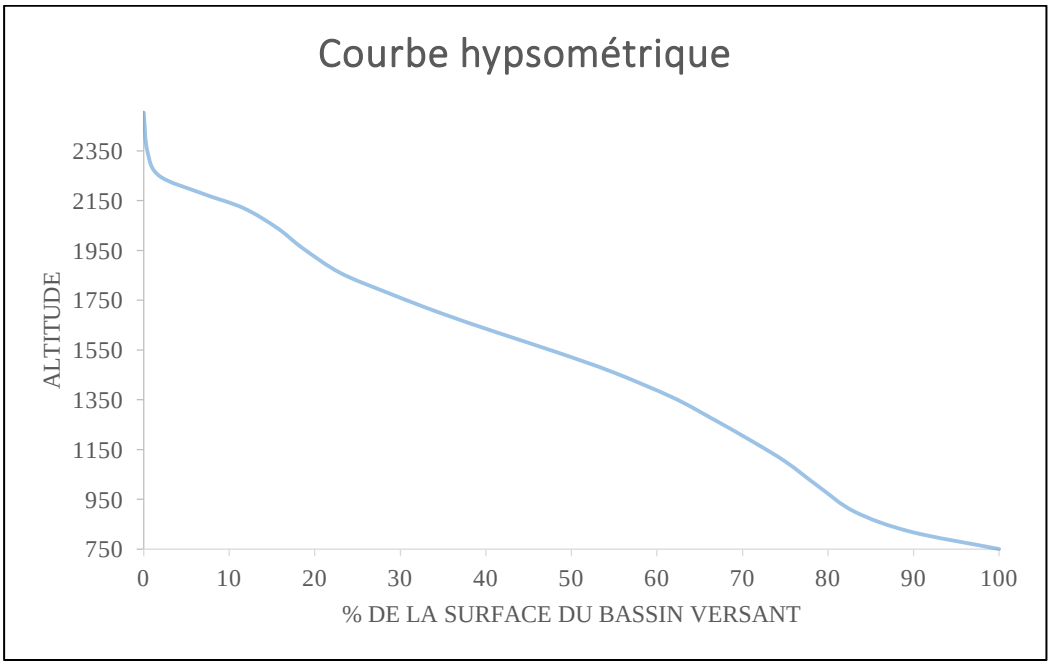


Figure III.4. Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière Mutimbuzi (établi par l'auteur à partir du MNT du Burundi du BCG)

III.3.1. Détermination de certains paramètres morphologiques du Bassin Versant de la rivière Mutimbuzi

a. Indice de compacité de Gravelius du Bassin Versant de la rivière Mutimbuzi

L'indice de compacit du bassin versant de la rivière Mutimbuzi est 1.93. Cela nous montre qu'il s'agit d'un bassin versant de forme allongée.

b. Rectangle équivalent du Bassin versant de la rivière Mutimbuzi

Le rectangle équivalent du bassin versant de la rivière mutimbuzi, a les dimensions suivantes :

la longueur L = 48.981 km et la largeur l = 5.024 km.

III.3.2. Détermination du temps de concentration de la zone d'étude

Le temps de concentration du Bassin versant de la rivière Mutimbuzi est déterminé en le subdivisant en 18 sous bassins dont les caractéristiques géométriques (Fig.III.4 et Tableau III.4) sont calculées par le logiciel HEC-HMS à partir du Modèle Numérique de Terrain.

En fonction de la superficie inférieure spécifiée par l'utilisateur, il permet de générer la pente du bassin versant, la longueur du plus long thalweg, la pente du thalweg principal, la densité de drainage etc.

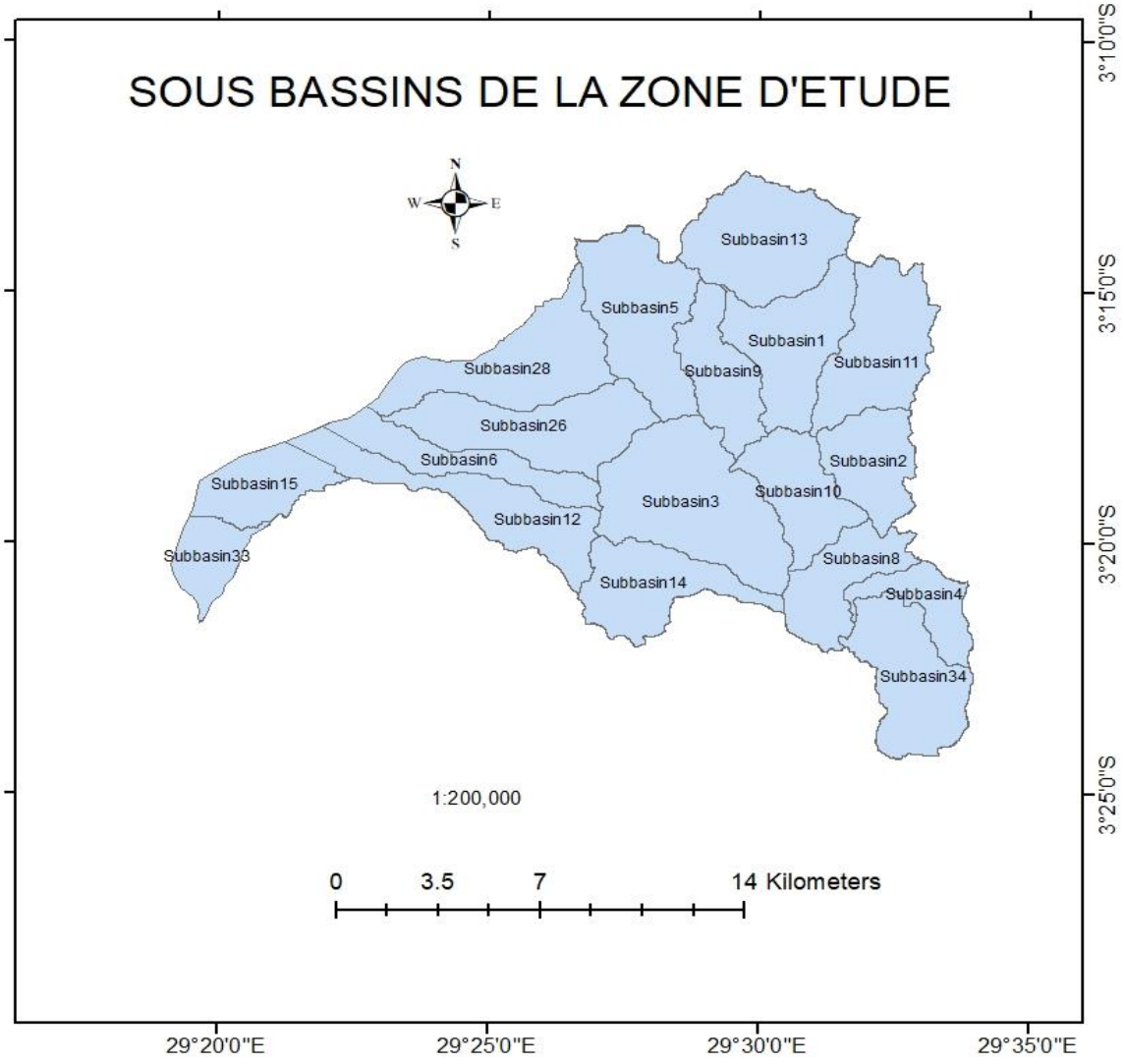


Figure III. 5: Sous bassins du bassin versant de la rivière Mutimbuzi (établi par l'auteur à partir du MNT du BCG en utilisant le logiciel HEC-HMS)

En utilisant les formules basées sur les dimensions géométriques (II.5.1.5), les temps de concentration trouvés pour les différents sous bassins sont montrés dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Temps de concentration des sous bassins de la rivière Mutimbuzi

	Sous Bassin	**SBV 1**	**SBV 10**	**SBV 11**	**SBV 12**	**SBV 13**	**SBV 14**	**SBV 15**	**SBV 2**	**SBV 26**
	A (km2)	15.85	11.36	16.80	13.85	19.37	13.58	5.73	10.74	18.12
	I	0.49	0.45	0.46	0.23	0.46	0.41	0.01	0.43	0.20
	LH (km)	8.56	5.51	7.42	12.07	7.17	9.03	6.62	5.79	12.18
Tc en minutes	Kirpich	44	33	42	76	37	58	147	34	75
	Turazza	47	38	48	74	49	50	221	39	87
	Ventoura	43	38	46	59	49	44	185	38	72
	Giandotti	63	63	69	87	63	80	296	61	90
	Moyenne	49	43	51	74	50	58	212	43	81
	Adopté (Tc depuis les BV amont)	**144**	**197**	**94**	**132**	**50**	**58**	**561**	**43**	**349**
	Sous Bassin	**SBV 28**	**SBV 3**	**SBV 33**	**SBV 34**	**SBV 4**	**SBV 5**	**SBV 6**	**SBV 8**	**SBV 9**
	A (km2)	16.98	26.50	3.62	16.24	6.98	18.78	9.01	10.81	10.82
	I	0.21	0.40	0.01	0.30	0.31	0.45	0.12	0.42	0.44
	LH (km)	12.00	10.56	4.84	8.48	7.83	6.26	10.08	4.97	7.10
Tc en minutes	Kirpich	82	63	131	55	50	36	68	30	42
	Turazza	84	67	160	61	44	47	83	38	42
	Ventoura	69	62	138	56	36	49	65	39	38
	Giandotti	101	91	310	84	64	70	80	60	64
	Moyenne	84	71	184	64	48	51	74	42	46
	Adopté (Tc depuis les BV amont)	**325**	**268**	**746**	**64**	**113**	**241**	**423**	**154**	**190**

Le temps de concentration est fortement influencé par la pente du sous bassin, plus la pente est forte, plus le temps de concentration est petit et inversement. Cela a fait que le sous bassin 15 ait un temps de concentration plus grande en raison de sa pente de l'ordre 1%.

III.3.3. Temps de pluie de projet

Le plus souvent, pour une étude du type événementiel, le temps de concentration sert de référence pour le choix de la durée du temps de pluie de projet. Cependant, les courbes IDF (Fig.II.4) de la zone d'étude nous montrent que les temps de pluie ne dépassent pas 300 minutes. Selon les temps de concentration des différents sous bassins, nous avons déterminé les types d'averses dont les durées sont illustrées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Durées des types d'averses de projet utilisées

Type d'averse	Durée (minutes)	Sous bassins versants				Station météorologique
1	50	SB1 SB14 SB8	SB10 SB2 SB9	SB11 SB4	SB13 SB5	Aéroport International Melchior NDADAYE
2	60	SB3	SB34			
3	100	SB12	SB26	SB28	SB6	
4	150	SB34				
5	180	SB15				

III.4. Hydrographie de la zone d'étude

Notre zone d'étude est dominée par la rivière Mutimbuzi qui a ses trois principaux affluents Murago, Gikoma et Muzazi.

En effet, cette rivière ainsi que ses affluents se caractérisent par de grands débits pendant la saison pluvieuse et faible pendant les saisons sèches. Il est à souligner que pour notre zone d'étude, le réseau tertiaire est très dense surtout en amont (Fig.III.6).

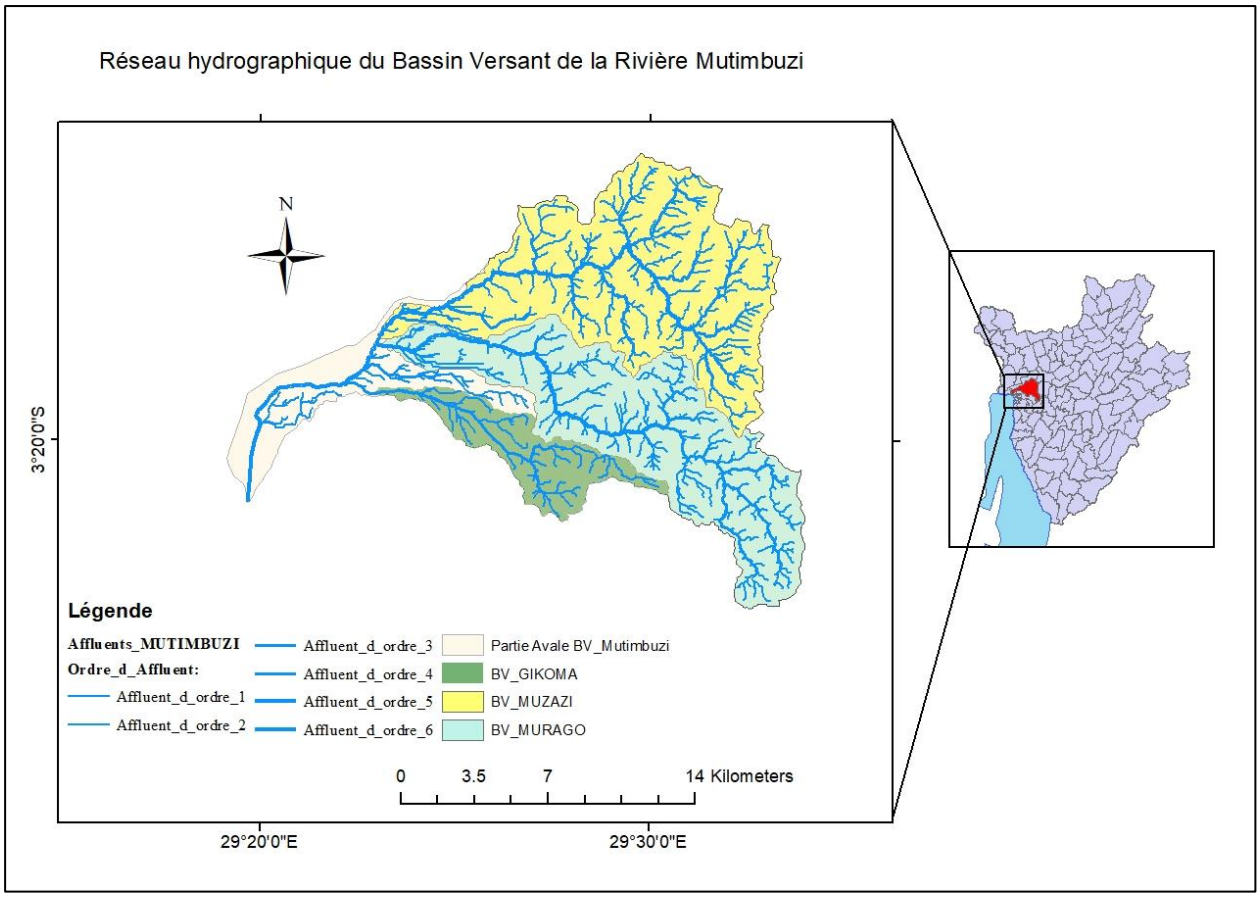


Figure III.6: Réseau hydrographique de la rivière Mutimbuzi (établi par l'auteur à partir du MNT du Burundi du BCG)

La hiérarchisation du réseau hydrographique s'est appuyée sur la méthode de Strahler. Selon ce dernier, tout talweg dépourvu d'affluent est d'ordre 1 et est considéré comme talweg de premier ordre. Le talweg d'ordre suivant est formé de la confluence de deux talwegs d'ordre 1.

III.5. Sols du bassin versant de la rivière Mutimbuzi

USDA (1986) a classé les sols en quatre groupes hydrologiques selon leurs capacités de perméabilité. Il s'agit des groupes A, B, C et D (Tableau III.6). Les types de sol de la zone d'étude sont tirés dans les fichiers raster de classe texturale du sol selon le système du USDA aux six intervalles de profondeur (0 – 5cm, 5 – 15 cm, 15 -30 cm, 30 – 60 cm,60 – 100 cm et 100 – 200 cm) disponibles sur le site d'accessibilité gratuite en accédant au lien *https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/2a7d2fb8-e0db-4a4b-9661-4809865aaccf*.

La figure III.7 montre les cartes des propriétés texturales du sol de la zone d'étude extraites des fichiers raster téléchargés aux limites de la zone d'étude après que leur résolution ait été ramené de 250 m à 10 m. Les sols du bassin versant de la rivière Mutimbuzi sont généralement argileux.

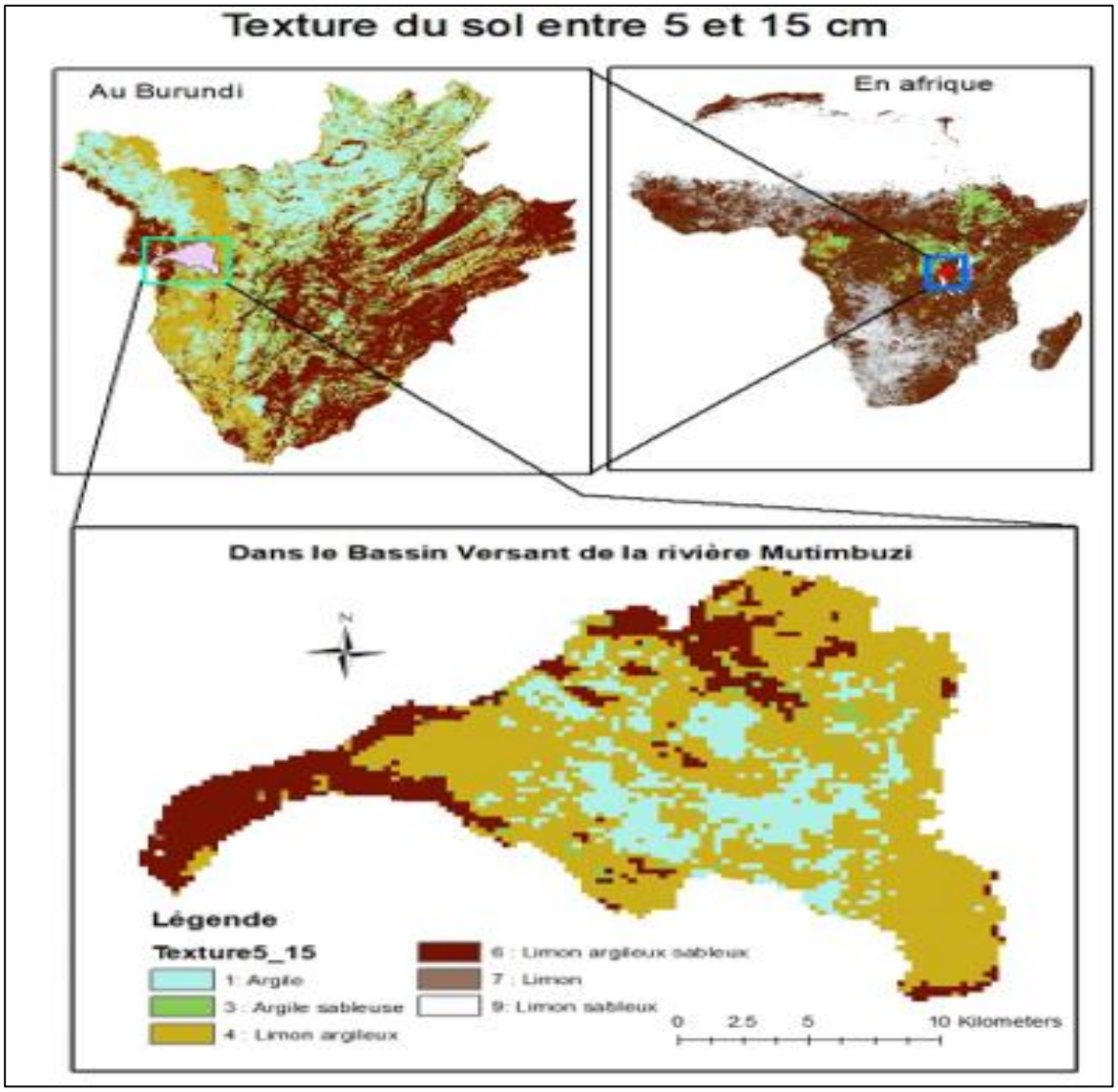


Figure III. 7 : Sols de la Zone d'étude en raster[4]

Le tableau suivant illustre les caractéristiques des quatre groupes de sol hydrologiques.

Tableau III.4: Textures des sols hydrologiques

HSG	**Texture du Sol**
A	Sableux, limon sableux ou sable limoneux
B	Sol Limoneux
C	Sable argileux limoneux
D	Argile limoneux, Sable argileux, Argile

Source : USDA (1986)

[4] *https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/2a7d2fb8-e0db-4a4b-9661-4809865aaccf*

Le sol du Bassin Versant de la Rivière Mutimbuzi est constitué en grande partie par les sols hydrologiques C et D (Fig. III.6).

III.6. Occupation du sol

L'occupation du sol est trouvée par le traitement des images de LandSat en déterminant l'indice normalisé de la végétation par classification supervisée. Pour notre étude nous avons considéré quatre classes : Bâti, Végétation, Forêt et Eau (Fig.IV.3).

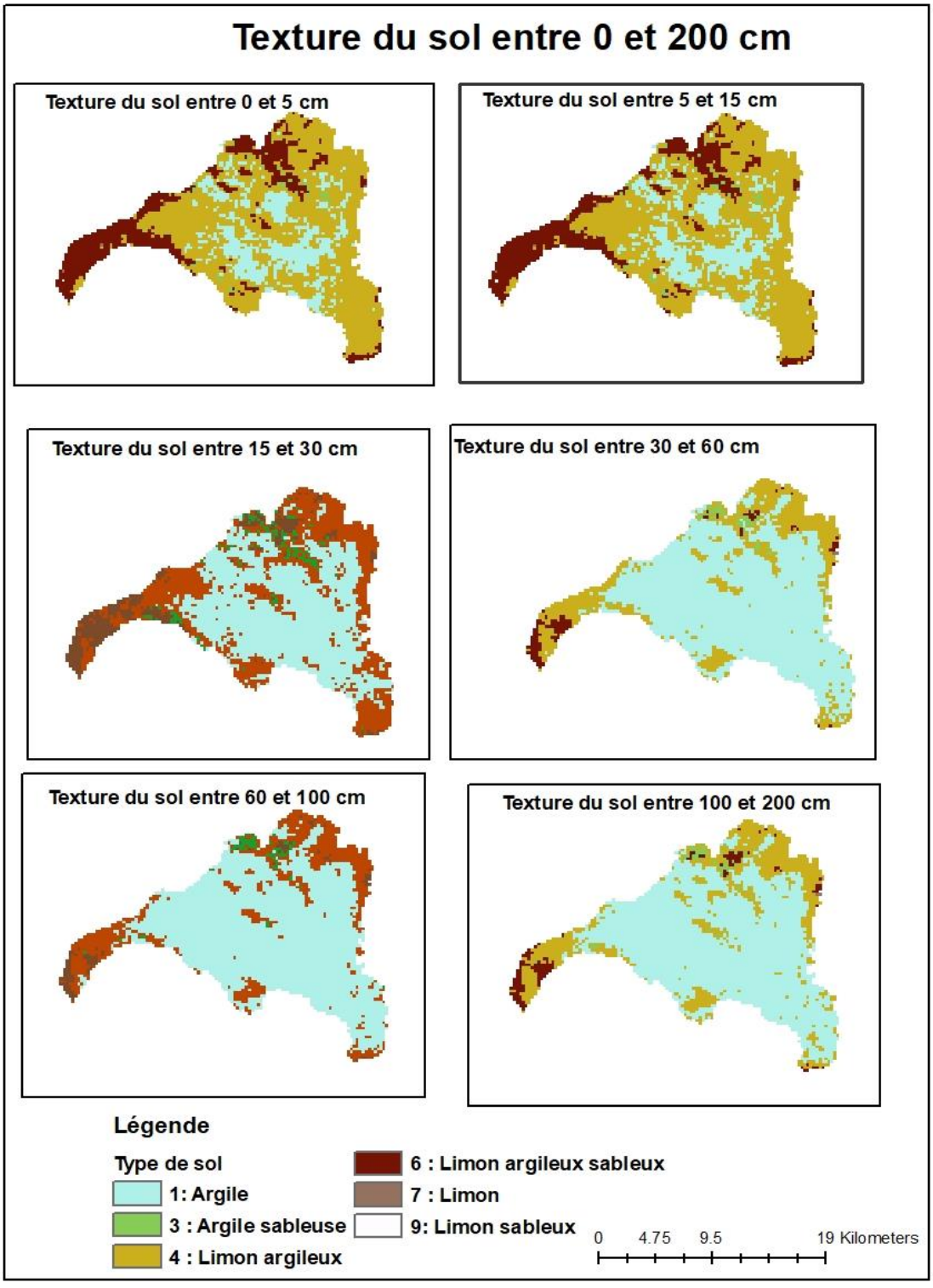


Figure III.8 : Sols hydrologiques du Bassin versant de la Rivière Mutimbuzi (établi par l'auteur à partir des métadonnées de ISRIC)

En effet, la disponibilité du terrain sans tenir compte de toutes ses caractéristiques, étant le moteur de l'urbanisation, des quartiers se développent partout, y compris des zones sensibles aux risques d'inondation.

Assako Assako illustre une telle urbanisation à Yaoundé où la croissance spatiale n'épargne ni fortes pentes ni fonds de vallées [ASSAKO ASSAKO RJ, 1998]. Notre zone d'étude est un cas illustratif où les visites de terrain ont par ailleurs, permis de constater que la construction du bâti fut privilégiée au détriment de l'aménagement de l'espace agricole (Fig.III.4).



Figure III.9 : Photos illustrant l'occupation du sol par le bâti au détriment de l'espace agricole (prises par l'auteur, mars 2023)

III.7. Conclusion

Ce chapitre montre les différentes données pédologiques et hydrologiques du bassin versant. Certaines données ont été d'abord transformées en fichier raster ou vectoriel qui sont lisibles par les logiciels SIG (ArcGIS, HEC-GEOHMS ou HEC-GEORAS). Les données hydrologiques sont utilisées en leur état de fichier texte. Dans notre travail, ces caractéristiques sont considérées comme étant constantes. Le temps de concentration du bassin versant est de 746 minutes. Ceux des sous bassins versants montrent clairement que plus la pente diminue, plus le temps de concentration augmente. Le paramètre considéré comme variable dans le temps, est l'occupation du sol. Les changements de l'occupation du sol ainsi que ses effets hydrologiques sont analysés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : OCCUPATION DU SOL ET SES IMPACTS HYDROLOGIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE MUTIMBUZI

IV.0. Introduction

La ville de Bujumbura, à l'image des plusieurs autres villes africaines, est en pleine expansion vers ses périphéries. C'est l'étalement urbain qui entraîne des impacts sur l'écosystème, c'est une urbanisation qui se fait en tache d'huile, guidée par l'expansion démographique et le mouvement d'exode rural et se fait hors contrôle des services publics chargés de contrôler l'évolution des territoires et de maîtriser leur développement [SINDAYIGAYA S.,2015]. Dans ce chapitre, nous allons étudier les effets de l'occupation anarchique du sol dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi sur son comportement hydrologique en utilisant le logiciel HEC-HMS.

IV.1. Impacts de l'urbanisation sur le cycle de l'eau

Les impacts de l'urbanisation sur le cycle de l'eau sont nombreux. L'imperméabilisation des sols est la première conséquence la plus visible de l'urbanisation. Elle limite fortement les possibilités d'infiltration de l'eau. Ce phénomène entraîne en premier lieu une augmentation des volumes ruisselés et un manque de réalimentation des nappes souterraines. Ce dernier sera accentué en cas de pompages dans la même nappe pour l'alimentation de la ville.

Le remplacement d'un réseau hydrographique naturel parfois sinueux par un réseau d'assainissement au tracé direct pour en limiter la longueur et doté d'une pente confortable pour diminuer les dimensions et son ensablement. Cela diminue les temps de réponse et augmente les débits de pointe [CHOCAT, B.1997].

De plus, l'urbanisation s'accompagne toujours de la mise en place d'un réseau de routes et des rues. Ces voies peuvent modifier l'écoulement des eaux superficielles, en constituant des obstacles à l'écoulement et dans certains cas, sur des terrains à pente faible, peuvent modifier la délimitation des bassins versants. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons évaluer l'influence de l'occupation anarchique du sol sur l'augmentation des débits de ruissellement dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi.

IV.2. Approche méthodologique

Le présent travail consiste à utiliser les technologies SIG et télédétection pour caractériser l'évolution spatio-temporelle de la zone inondable de notre zone d'étude en fonction de son occupation. Les logiciels utilisés sont ArcGIS 10.5, HEC-HMS 4.7.1 et HEC-RAS 5.0.5. L'approche méthodologique est ci-dessous illustrée :

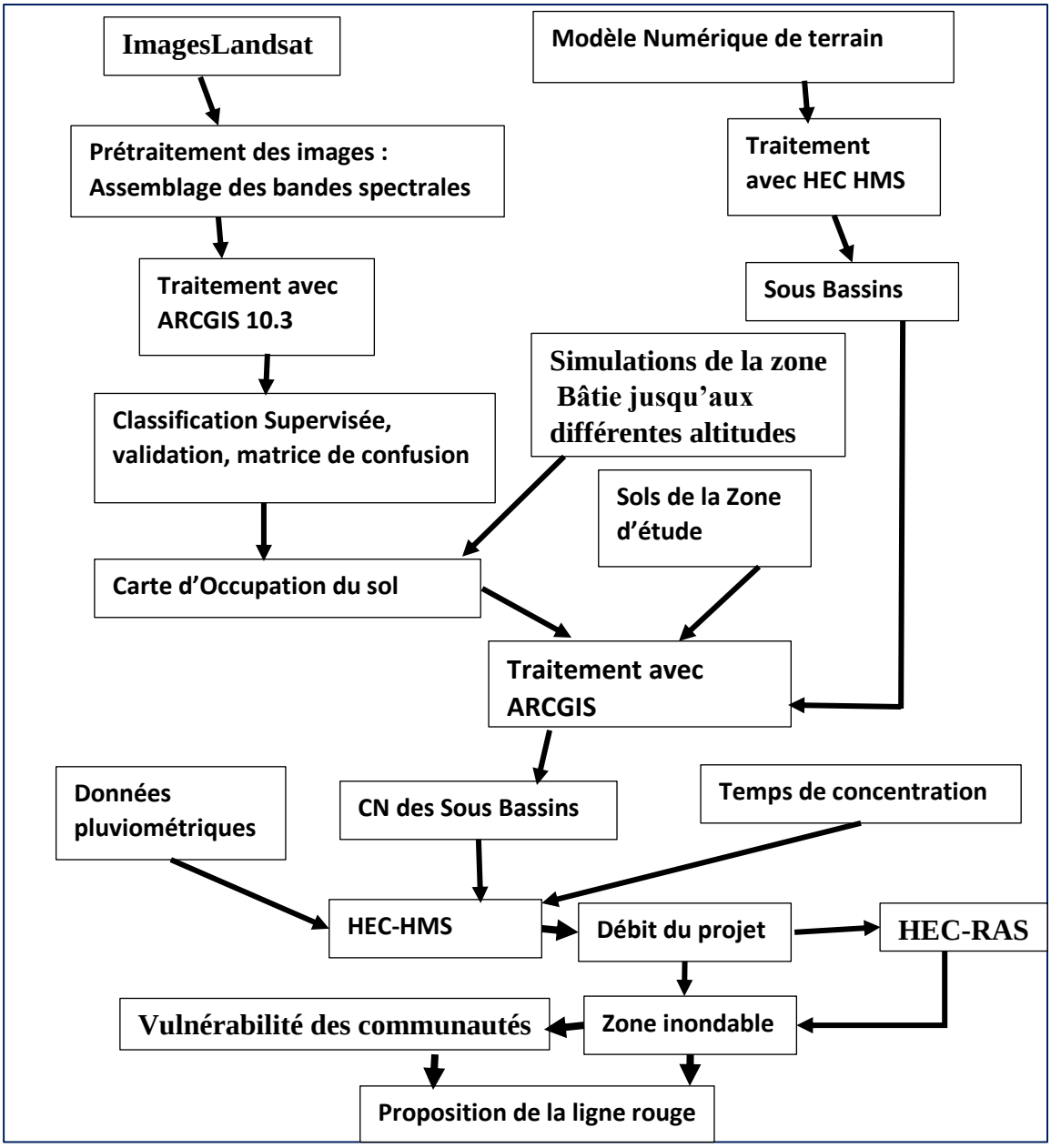


Figure IV. 1: Approche méthodologique (établi par l'auteur)

IV.3. Classification supervisée dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi

La définition des points de validation d'une classification supervisée se fait d'une manière aléatoire. Le choix, quoique aléatoire, se fait dans des zones où l'utilisateur est sûr de lui-même de la correspondance à la classe à valider [DENIS ,2013]. Le tableau IV.1 montre le nombre de points de validation considérés pour chaque classe d'occupation pour les différentes images.

Tableau IV. 1: Points de validation de la classification

Classe	**Image 2000**	**Image 2016**	**Image 2022**
Bâti	14	17	20
Eau	0	0	3
Forêt	10	11	23
Végétation	26	22	34
Total	50	50	80

Ces points nous ont permis de faire les matrices de confusion qui servent à apprécier la qualité de la classification. La validation des classifications a été réalisée à partir de la précision globale et des coefficients de Kappa issus des matrices (Tableaux IV.2, IV.3 et IV.4) de confusion. Les valeurs de Kappa inférieures à 50 %, comprises entre 50 et 75 % et supérieures à 75 %, indiquent respectivement une classification médiocre, acceptable et excellente [BOGAERT, J et Al. Cité par KABANYEGEYE, H.2021]. Pour chaque classe d'occupation du sol, au moins 50 points ont été utilisés pour cette évaluation.

Tableau IV. 2: Matrice de confusion pour les images de 2000

Classe	Bâti	Végétation	Forêt	User
Bâti	14	1	0	15
Végétation	0	24	0	24
Forêt	0	1	10	11
Producer	14	26	10	50

Tableau IV. 3 : Matrice de confusion pour les images de 2016

Classe	Bâti	Végétation	Forêt	User
Bâti	16	1	0	17
Végétation	1	20	1	22
Forêt	0	1	10	11
Producer	17	22	11	50

Tableau IV. 4: Matrice de confusion pour les images de 2022

Classe	Végétation	Bâti	Eau	Forêt	User
Végétation	33	0	0	4	37
Bâti	1	20	0	0	21
Eau	0	0	3	0	3
Forêt	0	0	0	19	19
Producer	34	20	3	23	80

Les résultats issus de la classifications supervisés révèlent que, pour chacune des images, les valeurs de la précision globale sont 96%, 92% et 93.75 % et celles du coefficient de Kappa sont respectivement de 93.57%, 87.55% et 90.64%, ce qui indique une discrimination statistiquement fiable entre les différentes classes d'occupation du sol. L'analyse visuelle des cartes obtenues (Fig. IV.2 et IV.3) montre que le bâti est caractérisé par une dynamique progressive au détriment de la végétation ou l'agriculture.

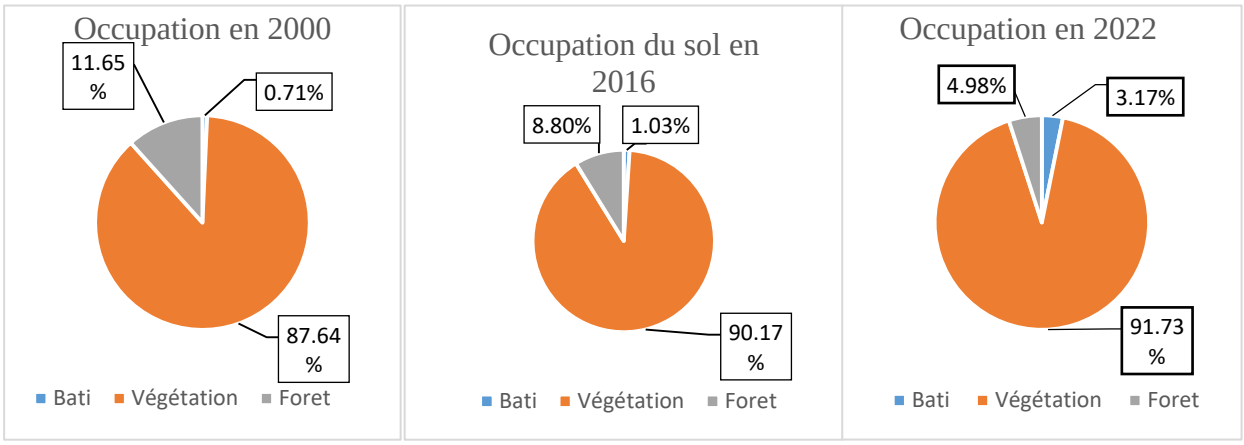


Figure IV. 2: Pourcentages des différentes classes dans le Bassin en fonction du temps (établi par l'auteur à partir des Images LandSat de juin 2000, 2016 et 2022)

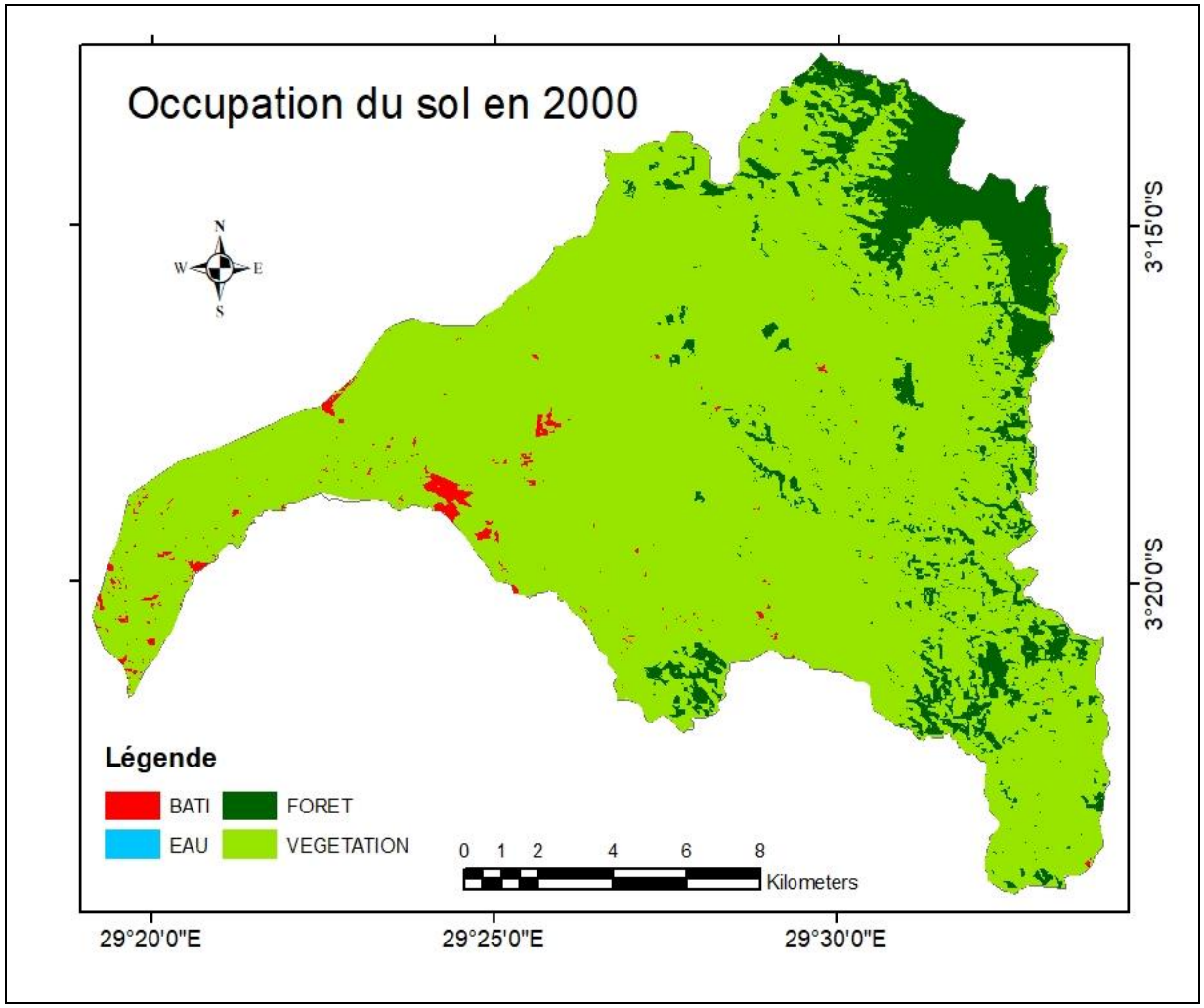


Figure IV.3 : Occupation du sol du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2000 (établi par l'auteur à partir des images de landSat de juin 2000).

En 2000, 87,64% de la surface du bassin versant de la rivière Mutimbuzi est occupée par la végétation et l'agriculture, 11,65% par la forêt et seulement 0.71% sont bâtis.

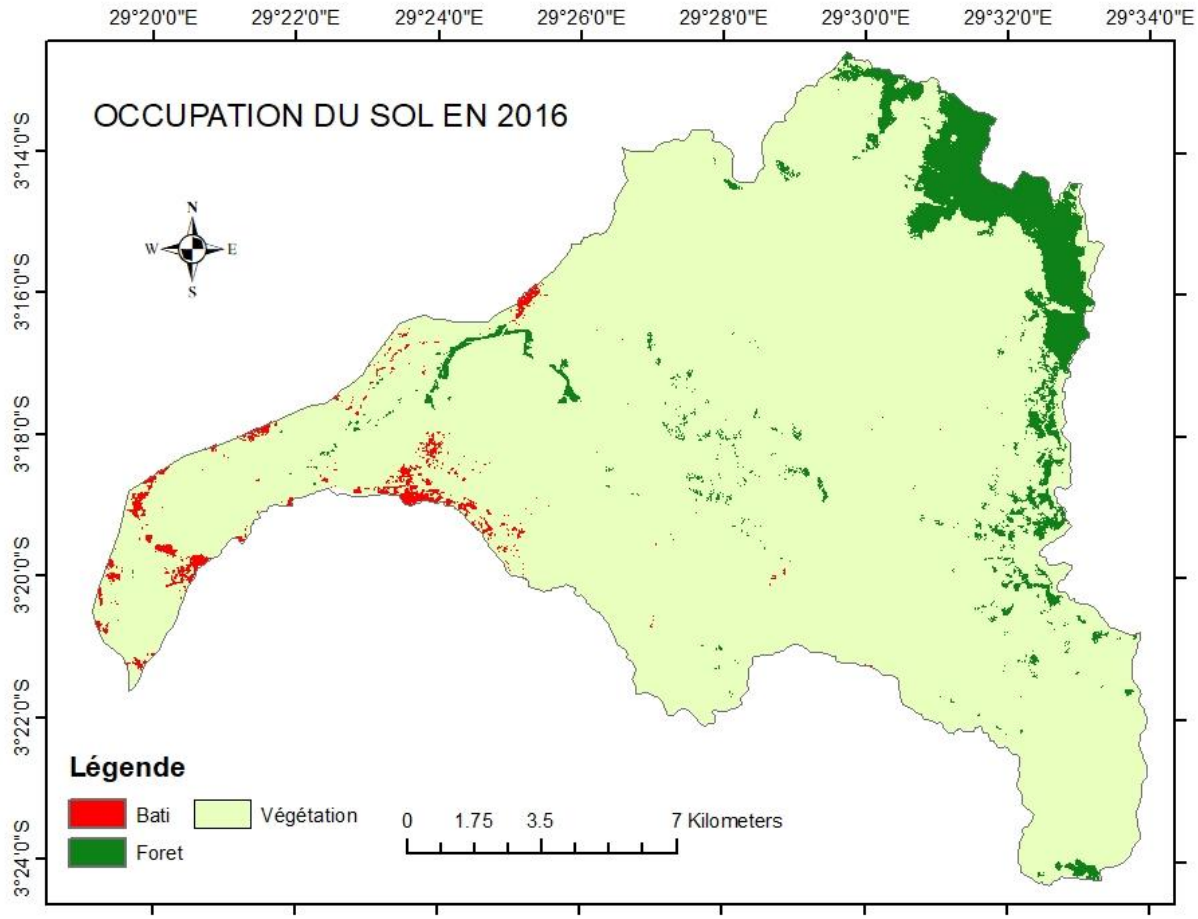


Figure IV.4: Occupation du sol du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2016 (établi par l'auteur à partir des images de landSat de juin 2016).

L'occupation du sol du bassin versant de la rivière Mutimbuzi montre l'augmentation de la surface bâtie et celle de la végétation qui sont respectivement de 1.03% et 90.17% en 2016. L'espace caractérisé par une forte végétation (forêt) connait une diminution comparativement aux proportions de 2000.

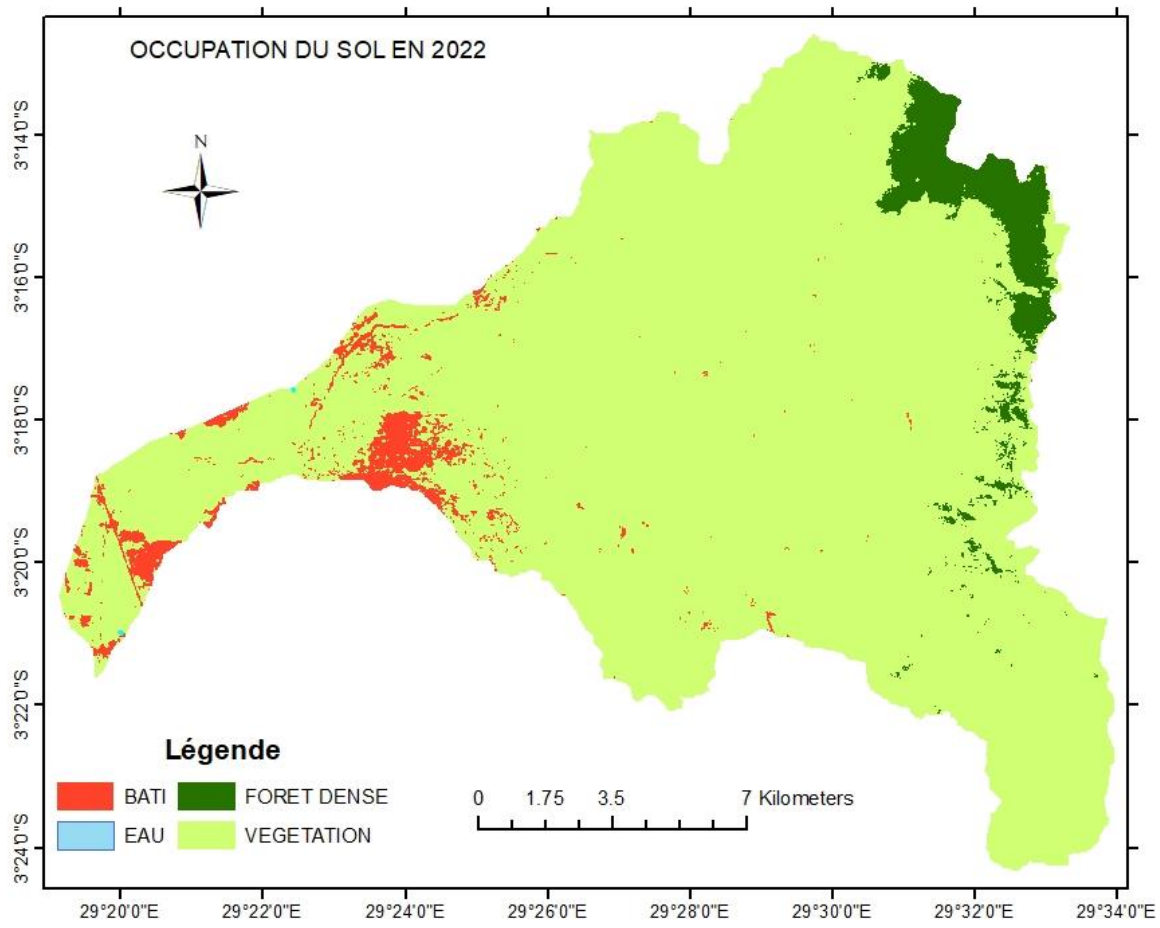


Figure IV.5 : Occupation du sol du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2022 (établi par l'auteur à partir des images de landSat de juin 2022).

Dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi, la surface bâtie a une forte croissance entre 2016 et 2022. Nous assistons à une explosion des constructions non loties qui n'est pas accompagnée d'un développement des infrastructures urbaines. Les constructions sont installées sur des espaces occupées dorénavant par la végétation et l'agriculture. La surface bâtie a passé de 1.07 % en 2016 à 3.17% en 2022.

IV.4. Evaluation des débits par HEC-HMS

IV.4.1. Données d'entrée du modèle

IV.4.1.1. Modèle numérique de terrain (MNT)

Avant de procéder à n'importe quelle opération de préparation d'un fichier de simulation HEC-HMS, il est primordial d'avoir le MNT de la zone d'étude, dont le rôle est fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul de certains paramètres. Il s'agit d'un raster de résolution 10 m.

IV.4.1.2. Carte d'occupation du sol

Pour pouvoir utiliser la méthode NRCS CN comme fonction de production, l'établissement d'une carte d'occupation du sol sur l'ensemble de la zone d'étude déterminé au point IV.3, est une voie incontournable. La comparaison des différentes classes de cette carte aux classes de la NRCS nous a permis de dégager le CN [USDA, 1986] correspondant à chaque classe lorsqu'elle est associée à un sol hydrologique de la NRCS.

Tableau IV. 5: Curve Number des classes d'occupation du sol en fonction des sols hydrologiques

	Sols Hydrologiques			
CN	**A**	**B**	**C**	**D**
Végétation	57	73	82	86
Forêt	30	48	65	73
Bâti	77	85	90	92
Eau	100	100	100	100

IV.4.1.3. Carte des sols

Comme c'est le cas pour la carte d'occupation du sol, la carte du sol est indispensable pour la détermination du paramètre CN de la fonction de production. Pour notre étude, nous avons utilisé les sols décrits au point III.6.

Le logiciel ArcGis 10.3 nous a permis de produire une carte combinant l'occupation du sol et la nature du sol selon les différents types d'occupation considérés de la zone d'étude. Ainsi, la fonctionnalité HEC-GEOHMS de l'ArcGIS 10.3 sera utilisée pour déterminer des raster des grilles de CN (CN_GRID) de tous les points du bassin versant.

Cependant, les rasters de Grille CN sont trouvés en combinant les caractéristiques du sol et celles de l'occupation du sol. Ainsi, en considérant que chaque point du bassin versant ait son CN, nous avons cherché la valeur du CN moyenne correspondant à chaque sous bassin (Tableau IV.6). Elles sont trouvées par la formule suivante :

$$CN_{SB} = \frac{\sum_i^n CN_i A_i}{A_{SB}} \quad (4.1)$$

Où : CN_{SB} : *Curve number* du sous bassin

A_i : superficie partielle

CN_i : CN de la superficie i

A_{SB} : Superficie totale du Sous Bassin

Soulignons que les valeurs présentées dans le tableau IV.6 (Curve number) sont validées pour des conditions antécédentes d'humidité moyennes (CAH II), on peut utiliser les équations suivantes pour évaluer le CN pour des conditions sèches ou pratiquement saturées [USDA, 1986] :

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

$$CN(III) = \frac{23\ CN(II)}{10+0.13\ CN\ (II)} \quad (4.3)$$

Comme, c'est plus difficile de connaître les conditions sèche, moyenne et saturée ; nous avons pris la classe II dont les conditions antécédentes d'humidité sont moyennes.

Tableau IV. 6: CN des sous bassins du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en 2000 et 2022

Sousbassin	Aire (km^2)	CN en 2000	CN en 2016	CN en 2022
Sousbassin1	15.854	77.3	78.0	78.0
Sousbassin10	11.36	79.6	79.9	79.9
Sousbassin11	16.8	76.9	77.2	77.4
Sousbassin12	13.845	78.1	78.4	79.0
Sousbassin13	19.369	75.0	76.3	76.9
Sousbassin14	13.58	78.9	79.5	79.6
Sousbassin15	5.7252	74.3	74.3	74.6
Sousbassin2	10.741	79.1	79.1	79.3
Sousbassin26	18.119	80.0	80.0	80.2
Sousbassin28	16.979	78.5	78.5	78.8
Sousbassin3	26.499	79.7	79.8	79.9
Sousbassin33	3.6207	77.2	78.4	82.4
Sousbassin34	16.241	78.5	79.2	79.4
Sousbassin4	6.9805	78.4	79.7	79.8
Sousbassin5	18.778	78.2	78.5	78.5
Sousbassin6	9.0076	78.8	78.9	80.4
Sousbassin8	10.811	78.8	79.7	79.8
Sousbassin9	10.815	78.9	79.0	79.0

Source : Etabli par l'auteur en utilisant Arc GIS et les données de [USDA, 1986]

En comparant les CN des Sous bassins des années 2000, 2016 et 2022, nous constatons que tous les bassins versants ont vu leurs CN augmenter malgré que l'urbanisation se soit manifestée dans certains sous bassins. Ainsi, les CN des autres sous bassins sont variés à cause des activités de l'homme qui ont changé la couverture végétale comme Kabanyegeye l'a dit que le bâti dans la ville de Bujumbura augmente au détriment de la végétation [KABANYEGEYE.H, 2021].

Bahar indique que la diminution des temps de concentration est l'une des conséquences de l'urbanisation sur l'hydrologie [BAHAR.S, 2017]. Pour notre étude, les formules permettant de trouver les temps de concentration en fonction de la lame ruisselée sont des formules empiriques entre autres celles de Shake et Geyer, Desbordes et la formule SCS donnent des temps de concentration très petits ce qui montrent la nécessité des facteurs d'ajustement sur notre zone d'étude.

IV.4.1.4. Lag du bassin versant

Le temps de concentration à l'exutoire de chaque sous bassin versant résulte de l'application des formules empiriques données au point II.6.1.5 jugées adéquates pour chaque sous bassin. L'hydrogramme unitaire NRCS est utilisé pour la fonction de transfert on utilise le paramètre Tlag, donné par la formule :

$$Tlag = 0.6\,Tc \tag{4.4}$$

Tlag est le lag du bassin versant (différence entre le pic de la pluie et le pic de l'hydrogramme) et Tc est le temps de concentration.

IV.4.1.5. Hyétogrammes de projet

Les données en rapport avec les précipitations ont été obtenues auprès de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU). Elles ont été récoltées auprès de la station météorologique de l'Aéroport International Melchior Ndadaye. Elles donnent les maximas journaliers enregistrées sur une période de 40 ans (1981–2021) et ne spécifient pas la durée de ces averses (Tableau V.8), d'où l'impossibilité de tirer la relation « Intensité – Durée-Fréquence ».

Dans notre étude, la quantité Q représente la hauteur maximale journalière des précipitations sur une année. Les paramètres de base sont donnés dans le tableau V.6. Nous avons utilisé la loi de GUMBEL pour déterminer les maximums journaliers des différentes périodes de retour. D'après cette loi, la probabilité de non dépassement d'une quantité Q est donnée par :

$$F(Q) = e^{-e^{-u}} \tag{4.5}$$

Les différents paramètres utilisés sont donnés par les équations suivantes :

$$u = \alpha(Q - Q_0) \tag{4.6}$$

avec : $\alpha = (0.780\sigma)^{-1}$ (4.7)

$$Q(T) = \frac{u}{\alpha} + Q_0 \tag{4.8}$$

$$Q_0 = \bar{Q} - 0.45\sigma \tag{4.9}$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_i^N Q_i}{N} \tag{4.10}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (Q_i - \bar{Q})^2}{N-1}} \tag{4.11}$$

Tableau IV. 7 : Paramètres de la loi de Gumbel

Désignation	**Symbole**	**Unités**	**Valeur**
Moyenne	Hmax, moy	mm	61.5375
Ecart-type	σ		21.8616733
Paramètre1	α		0.05864379
Paramètre 2	H_0	mm	51.699747

Des valeurs obtenues avec la loi des extrêmes de GUMBEL (averse journalière maximale de 130.1 mm de hauteur cumulée) pour une période de retour de 100 ans.

Tableau IV. 8 : Précipitations journalières extrêmes des différentes périodes de retour

Période de retour	**F**	**u**	**Hauteur (mm)**
5	0.8	1.49993999	77.2768814
10	0.9	2.25036733	90.0732474
15	0.93333333	2.67375209	97.2928489
20	0.95	2.97019525	102.347829
25	0.96	3.19853426	106.24149
30	0.96666667	3.38429449	109.409093
50	0.98	3.901938658	118.236015
75	0.98666667	4.31078411	125.207691
100	0.99	4.60014923	130.141976

En tenant compte de la pluviométrie locale, où le pic de l'intensité intervient souvent au milieu de l'averse, nous adoptons la distribution de Huff du 2ème quartile pour la construction des hyétogrammes.

Les intensités moyennes des trois types d'averses de projet données au Tableau IV.9 sont obtenues par la relation IDF de la région de l'Imbo proposée par KAESER cité par (ERCA, 2018) :

$$i = \frac{aT^b}{c+t^d} \qquad (4.12)$$

Avec : T et t respectivement la période de retour et le temps de pluie ; a = 2800 ; b = 0.22 ; c= 24 et d = 0.98 sont les paramètres d'ajustement.

Tableau IV. 9. Intensités moyennes (mm/h) des averses de projet

Période de retour	Temps de pluie		
	50 min	60 min	100 min
10 ans	66.15938	58.61116	40.3368
20 ans	77.05806	68.26639	46.98163
25 ans	80.93535	71.70131	49.34558
50 ans	94.26812	83.51293	57.47446
100 ans	109.7972	97.27031	66.94243

Nous présentons ici, les hyétogrammes de projet obtenu par la méthode Huff Type II pour des périodes de retour de 10 et 20 ans (Fig.IV.4). Par l'interpolation linéaire, nous avons obtenu à partir des courbes cumulées adimensionnelles données par la méthode Huff, des nouvelles courbes dont les valeurs de discrétisation temporelles sont 5, 6 et 10 minutes pour les averses types de durées 50 ,60 et 100 minutes respectivement.

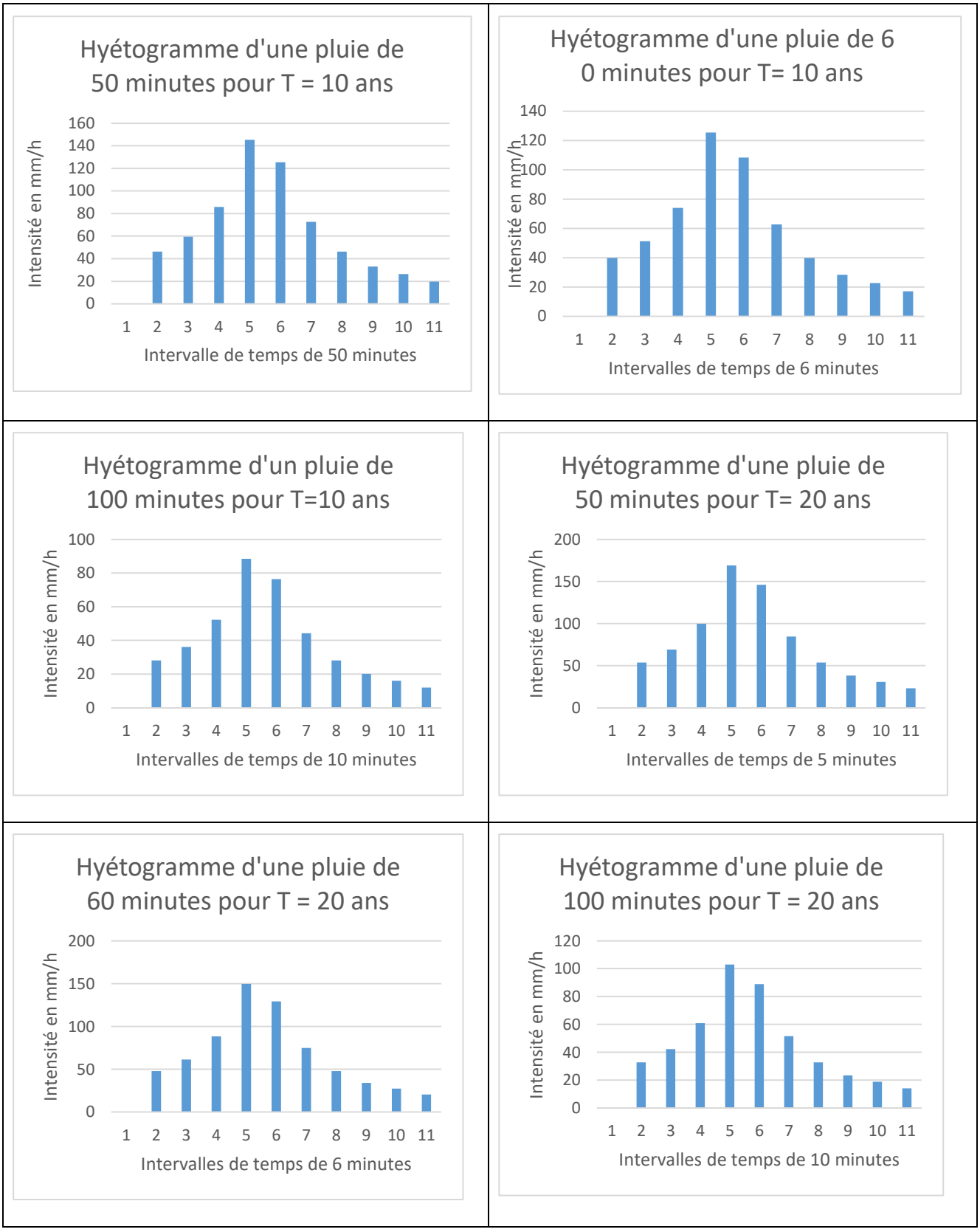


Figure IV.6 : Hyétogrammes des averses utilisées dans le modèle HEC-HMS

Source. Etabli par l'auteur à partir des courbes IDF de l'Aéroport International Melchior Ndadaye de l'IGEBU

IV.4.2. Evaluation des crues fréquentielles

Les données hydrologiques que nous avons dans cette étude sont les débits jaugés journaliers de la rivière Mutimbuzi d'une période de 5 ans seulement, sur les années de 1989 ; 1990 ; 2009 ; 2010 et 2011. Néanmoins ces données sont de loin fiables car il y a des données manquantes. Nonobstant, elles montrent que le débit de base a diminué avec le temps.

Après analyse et traitement de ces données, nous avons pu déduire le débit moyen minimal annuel de la rivière Mutimbuzi. Pour trouver les débits moyens annuels de ses affluents (Gikoma, Murago et Muzazi), nous avons appliqué la méthode du rapport des superficies donnée par la formule suivante :

$$Q_1 = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^b * Q_2 \qquad (4.13)$$

Où : Q représente le débit, A est la superficie du bassin versant, b est le facteur de correction régional du rapport des superficies, ici pris égal à 1 et les indices 1 et 2 sont respectivement bassin jaugé et bassin non jaugé. Le tableau V.10 montre les débits moyens minimaux mensuels de la rivières Mutimbuzi et ses affluents.

Tableau IV. 10 : Débits de base mensuels des affluents de la rivière Mutimbuzi

Mois	**Mutimbuzi**	**Gikoma**	**Murago**	**Muzazi**
Janvier	3.7421667	0.322901	1.048457	1.316342
Février	2.7823531	0.240081	0.779542	0.978719
Mars	1.9872018	0.17147	0.556762	0.699017
Avril	1.3480162	0.116316	0.377679	0.474177
Mai	1.6055089	0.138535	0.449822	0.564753
Juin	1.0404109	0.089774	0.291496	0.365974
Juillet	0	0	0	0
Aout	0	0	0	0
Septembre	0.0409213	0.003531	0.011465	0.014394
Octobre	1.4673979	0.126618	0.411126	0.516171
Novembre	1.335398	0.115228	0.374144	0.469739
Décembre	3.0963889	0.267178	0.867527	1.089184
Débit de base moyen	1.537147	0.132636	0.430668	0.540706

Source : Etabli par l'auteur à partir des débits journaliers de la rivière Mutimbuzi de l'IGEBU

Pour le calcul du débit nous avons utilisé les sous bassins versants des affluents de la rivière Mutimbuzi dont les exutoires sont matérialisés par les ponts de la RN9 dans le bassin versant.

IV.4.3. Justification du choix de HEC-HMS

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix.

Parmi ceux les plus importants sont :

(i)Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles ; (ii)possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie -débit (morphologie du bassin, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure) et donc les résultats seront plus réalistes ; (iii) NRCS-CN a été validée sur plusieurs petits bassins versants aux Etats unis , donc ses résultats seront fiables ;(iv)la méthode NRCS-CN va nous permettre de faire des prédictions concernant la réponse du bassin versant à des scénarii de changement d'occupation du sol.

IV.4.4. Construction du modèle hydrologique

Pour modéliser avec HEC-HMS le bassin versant de la rivière Mutimbuzi, nous l'avons subdivisé en 3 sous bassins selon ses trois grands affluents : Gikoma , Murago et Muzazi. Cependant, chaque modèle requiert les composantes principales comme le modèle du bassin, le modèle météorologique, les spécifications de contrôle et les données en séries chronologiques.

Dans cette section, nous avons décrit les méthodes, modèles et procédures utilisés pour générer le débit à l'exutoire de chaque sous bassin versant de la rivière Mutimbuzi.

IV.4.4.1. Modèle du bassin versant

Les propriétés physiques du bassin versant sont décrites dans ce modèle. Ces propriétés sont contenues dans les éléments hydrologiques décrivant les processus physiques dans le bassin versant. Les figures IV.7 représentent les modèles schématiques des bassins versants des rivières Gikoma, Murago et Muzazi. Il y a des sous bassins, des jonctions, les tronçons des cours d'eau et les exutoires.

1. Modèle du bassin versant de la rivière Gikoma



2. Modèle du bassin versant de la rivière Murago



3. Modèle du sous bassin versant de la rivière Muzazi



<u>Légende</u>

Sous bassin versant

Jonction des exutoires des sous bassins versants

Tronçon de la rivière

Exutoire d'un bassin versant

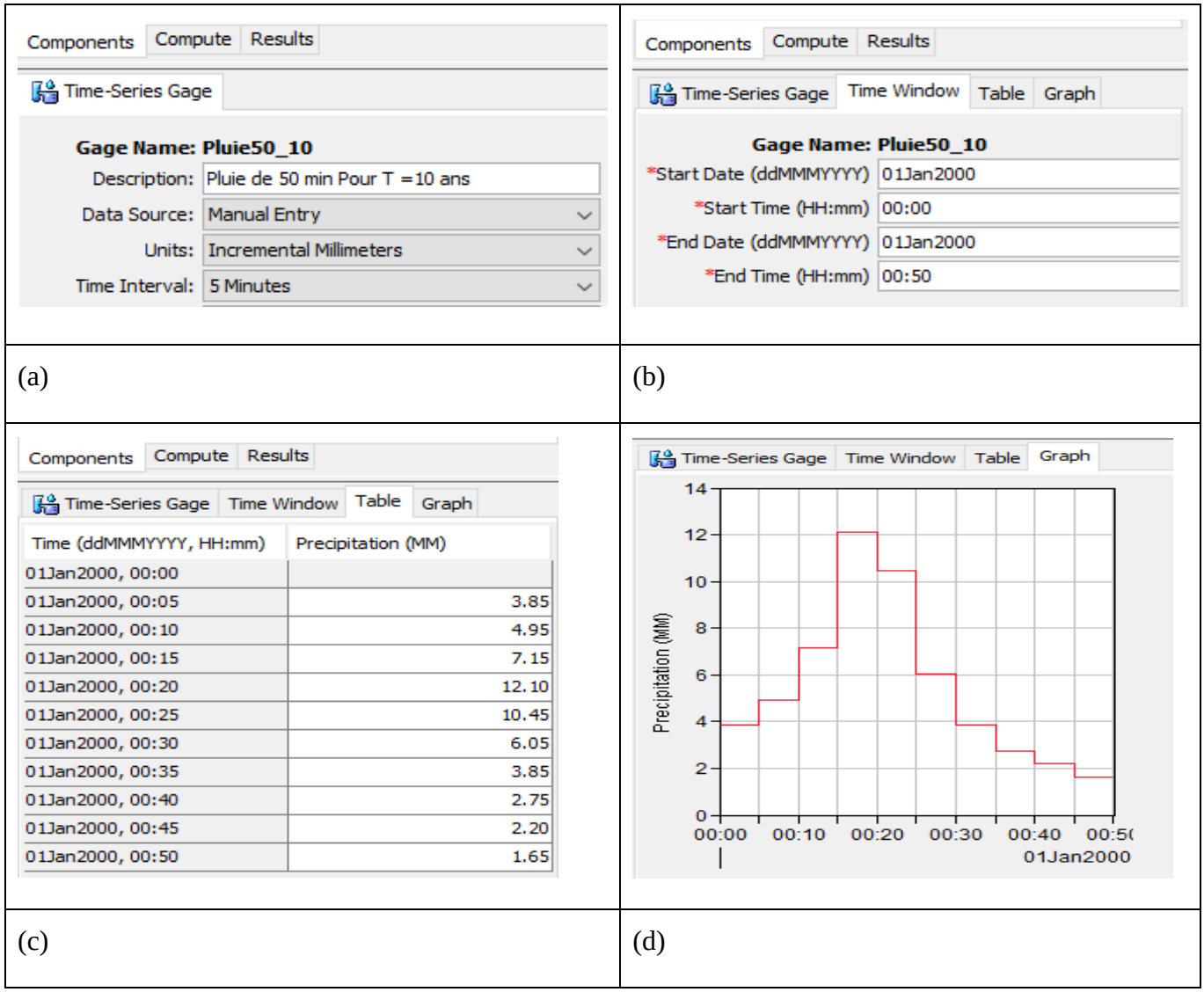
Figure IV.7 : Modèles des bassins versants des affluents de la rivière Mutimbuzi

IV.4.5. Modules de HEC-HMS

IV.4.5.1. Module météorologique

Nous fournissons dans le programme trois types de pluies de périodes de retour de 10, 20, 25, 50 et 100 ans. Chacune de ces trois averses est spécifiée dans la composition des données en séries chronologiques sous forme d'une répartition temporelle des hauteurs des pluies enregistrée par une jauge pluviomètre dont la configuration de l'averse de 50 minutes est illustrée par la figure IV.6.

En créant la jauge pluviométrique, nous indiquons, ici, que les données sont entrées manuellement, sous forme incrémentale de pas de temps autour du dixième de la durée de l'averse. Nous remplissons également les informations concernant le moment (date et heures) d'occurrence (début et fin) de l'événement. La date et l'heure des averses sont définis arbitrairement et les dates et heures de fin en respectant leurs durées respectives. Enfin la répartition temporelle de la hauteur de pluie est remplie fenêtre « table » et l'hyétogramme est généré automatiquement par le programme dans la fenêtre « graphique ».



(a) (b)

(c) (d)

Figure IV.8 : Configuration de la jauge pluviométrique de l'averse de 50 minutes pour une période de retour de 10 ans.

Chaque sous bassin versant est associé à son pluviomètre sur base de l'hyétogramme que ce dernier contient afin de générer le débit résultant à son exutoire.

IV.4.5.2. Spécification de contrôle

Une période de simulations de 15 heures (01 Janvier 2000,01 :00 -01Janvier 2000, 15 :00) est définie et jugée suffisante pour représenter le débit résultant d'une pluie de 100 minutes. Le pas de temps de calcul et génération des résultats est fixé à Δt = 5 minutes égal au pas de distribution temporelle de l'averse de plus courte durée (50 minutes) afin de favoriser une bonne visualisation des résultats même au niveau des éléments du modèle de bassin sollicités par une telle averse.

IV.4.6. Paramètres du modèle

IV.4.6.1. Infiltration

Nous utilisons la méthode du NRCS CN pour calculer les pertes par infiltration et définir les hyétogrammes des pluies nettes à partir des hyétogrammes des pluies totales définies dans le modèle météorologique. L'application de cette méthode dans HEC-HMS nécessite d'introduire, pour chaque sous Bassin versant, trois paramètres : (i)le CN donné au tableau V.6, (2) les pertes initiales calculées par application de la formule 2.24 et 2.26 et le pourcentage imperméabilisé qui est estimé à 0.6 de la surface bâtie.

IV.4.6.2. Fonction de transfert

La méthode d'hydrogramme unitaire NRCS est utilisée pour la fonction de transfert. Il existe deux types de graphique standard et delmarva. Nous avons utilisé la courbe delmarva pour les sous bassins versants de Gikoma et Murago et standard pour ceux de Muzazi. La courbe standard est applicable sur les bassins des Etats Unis et Delmalva est utilisée sur les plaines de Delaware, Maryland et Virginia aux Etats Unis. Le temps de Lag de chaque sous bassin Versant vaut approximativement le 6/10 du temps de concentration.

IV.4.6.3. Atténuation

Le modèle de Muskingum est sélectionné pour le laminage dans les tronçons des rivières. Il est basé sur l'utilisation de l'équation de continuité. Les paramètres de la méthode de Muskingum X et K sont indispensables pour l'application de cette méthode. La figure IV.7 montre les éléments de leur calcul à partir de l'équation de continuité.

L'équation de continuité nous donne :

$$\frac{ds}{dt} = I(t) - Q(t) \qquad (4.13)$$

Le volume du stockage est donné par

$$S = f_1(Q) + f_2(I - Q) \qquad (4.14)$$

Les termes de l'équation 4.14 peuvent être des fonctions linéaires, on a : $f_1(Q) = KQ$ et $f_2(I - Q) = b(I - Q)$,ce qui nous donne :

$$S = bI + (K - b)Q = K[\left(\frac{b}{K}\right) I + \left(1 - \frac{b}{k}\right) Q] \qquad (4.15)$$

En considérant que $X = b/k$, nous avons :

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (4.16)$$

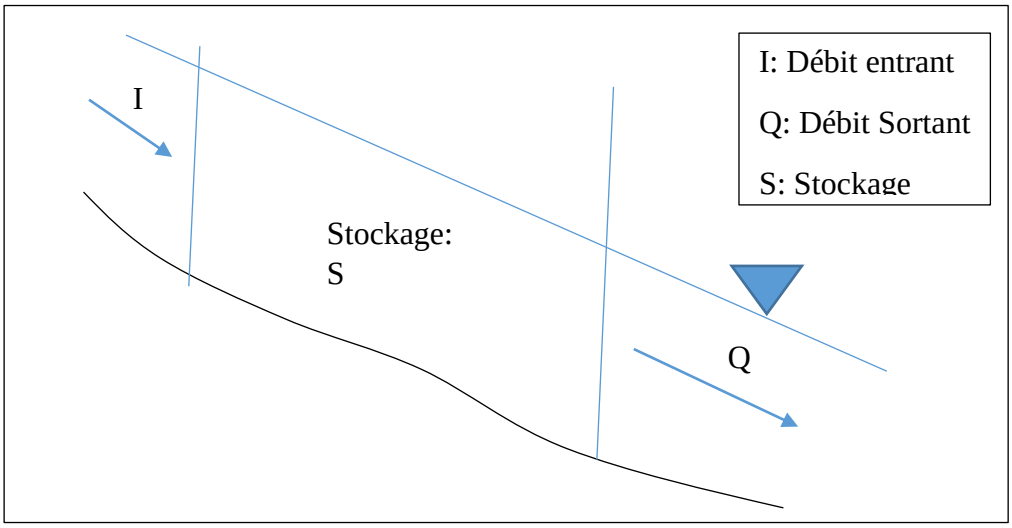


Figure IV.9: Stockage d'un tronçon d'une rivière

X est le paramètre sans dimension qui indique l'importance de I et Q pour la détermination du stockage dans un tronçon donné. Il prend des valeurs comprises entre 0 et 0.5. Pour les rivières, il a des valeurs comprises entre 0.1 et 0.3.

Le paramètre K a la dimension du temps ; c'est la pente de la relation entre le débit pondéré et le stockage. Pratiquement pour trouver K, on est amené à considérer plusieurs valeurs de $X\epsilon[0\ ,0.5]$ et à prendre la valeur de K pour laquelle la représentation de S en fonction de $K[XI + (1 - X)Q]$ est proche de la droite.

Pour notre étude, cette démarche n'est pas applicable suite au manque des stations de jaugeage dans les différents tronçons de nos rivières. Ainsi, ces paramètres sont estimés par des considérations théoriques où X est compris entre 0.1 et 0.3 pour les rivières. Pour notre étude nous avons choisi X = 0.3.

Le paramètre K est estimé par l'inéquation : $\frac{K}{3} \leq \Delta t \leq K$. Ici, nous avons pris $K = 3\Delta t$ =15 minutes soit 0.25 heures pour un intervalle de temps $\Delta t = 5\ minutes$.

IV.4.7. Sorties du modèle hydrologique calé

Après avoir créé et lancé le fichier d'exécution de l'application dans lequel sont spécifiés (i) le modèle de bassin contenant les caractéristiques hydromorphologiques des différents éléments hydrologiques du modèle en 2000, (ii) le modèle météorologique avec les différentes jauges pluviométriques des types d'averses de période de retour de 10 ans,20 ans, 25 ans, 50 ans et 100 ans.

Les résultats (graphiques et tableaux) générés incluent (i) pour un sous bassin versant, l'hyétogramme et le volume de pluie nette ainsi que l'hydrogramme et le volume de ruissellement à l'exutoire, (ii) pour un tronçon de la rivière, les hydrogrammes de sortie et le volume véhiculé et enfin (iii) pour une jonction, les hydrogrammes qui s'y joignent, l'hydrogramme total résultant de leur somme et le volume total qui y transite.

Face à l'absence de l'enregistrement d'un hydrogramme généré en un point quelconque par une pluie (hyétogramme) observée, le calage du modèle est fait en comparant les débits des crues des rivières Gikoma, Murago, Muzazi et Mutimbuzi trouvés dans le projet NEPAD-PDDAA en 2006 (Tableau V.11). Ces débits approchent ceux générés par les averses du temps de retour de 100 ans après ajustement des paramètres de Muskingum X et K ramenés respectivement à 0.3 et 0.25 pour les différents tronçons des rivières.

Tableau IV. 11 : Débits des affluents de la rivière Mutimbuzi

Rivière	Débit d'étiage (m^3/sec)	Débit moyen annuel (m^3/sec)	Crue décennale (m^3/sec)	Crue centenaire (m^3/sec)
Muzazi	1.47	2.10	90	141
Murago	0.75	1.47	70	109
Gikoma	0.29	0.76	32	49
Mutimbuzi	2.85	4.72	192	299

Source : NEPAD-PDDAA (2006)

IV.4.8. Scenarii simulés dans le modèle

La confrontation des prévisions du changement de l'occupation du sol à cause de l'urbanisation anarchique et des sollicitations pluviométriques d'une pluie des temps de retour de 10 ans, 20 ans, 25 ans, 50 ans et 100 ans et d'autres phénomènes induits (érosion, transport et dépôts sédimentaires, etc) dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi permet de déterminer un seuil d'alerte au-delà duquel la sécurité des habitants de la zone et de leurs biens est menacée.

Ainsi, l'étude est menée pour la situation où le bassin versant est moins urbanisé (2000), la situation en 2016 (2016), la situation actuelle en 2022 (2022), la situation où le bassin versant est supposé urbanisée jusqu'aux niveaux des altitudes 1000 (A1000), 1250 (A1250) et 1500 (A1500).

IV.4.9. Changements d'occupation du sol

La croissance des infrastructures de logements individuels dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi est évidente. Les situations sont supposées dans les conditions où la partie aval de l'altitude considérée est anarchiquement bâtie et les CN des sous bassins vont varier.

IV.4.10. Résultats et Discussions

IV.4.10.1. Résultats

En utilisant le modèle HEC-HMS du bassin versant de la rivière Mutimbuzi, nous avons déterminé les débits des crues des différentes périodes de retour en considérant l'occupation du sol du bassin versant selon les situations 2000, 2016, 2022, A1000, A1250 et A1500. Le tableau IV.12 illustre les débits de pointe des cours d'eau principaux du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en tenant compte des différentes situations de l'urbanisation anarchique.

Tableau IV. 12 : Débits de pointe (en m^3/s) trouvés par le modèle HEC HMS

	Période de retour					
Rivière	**Situation**	**10 ans**	**20 ans**	**25 ans**	**50 ans**	**100 ans**
Gikoma	2000	7.4	12.8	14.9	23.6	35.5
	2016	7.8	13.4	15.5	24.5	36.6
	2022	10.5	16.1	18.3	27.5	40.1
	A1000	21.9	29	31.7	42.1	55.2
	A1250	30.2	38.5	41.6	53.4	68
	A1500	37.7	46.9	50.4	63.2	78.7
Murago	2000	21.9	39.6	45.8	72.3	108.2
	2016	24	42.6	49.1	76.7	113.7
	2022	27.6	46.8	60.7	89.9	128.3
	A1000	33.9	53.8	60.7	89.9	128.3
	A1250	41.5	62.3	69.5	99.5	139
	A1500	60.2	83.6	91.6	124.3	166.5
Muzazi	2000	24.9	46.7	55.4	91.6	142.8
	2016	26.9	49.7	58.6	96.1	148.6
	2022	31.2	55.4	65	104.8	159.3
	A1000	41	67.9	78.4	121.3	179.1
	A1250	63.7	91.1	102.9	150.5	213.6
	A1500	104.6	135.9	147.6	192.9	256.8
Mutimbuzi	2000	53	96.6	113	182.8	278.1
	2016	57.5	103	120.2	192.3	290.1
	2022	68.5	116.8	134.8	175.3	312
	A1000	95.7	148.6	168.3	249.1	356.6
	A1250	130.9	189	210.6	298	412.8
	A1500	195.6	259.2	282.4	375.4	495.7

Les taux d'augmentation des débits de la rivière Mutimbuzi par rapport aux débits des crues de la situation de 2000 sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 13:Taux d'augmentation des débits de la rivière Mutimbuzi

	Période de retour				
Scénario	10 ans	20 ans	25 ans	50 ans	100 ans
S2000	53	96.6	113	182.8	278.1
S2016	8.49%	6.63%	6.37%	5.20%	4.31%
S2022	29.25%	20.91%	19.29%	13.29%	12.19%
S1000	80.57%	53.83%	48.94%	36.27%	28.23%
S1250	146.98%	95.65%	86.37%	63.02%	48.44%
S1500	269.06%	168.32%	149.91%	105.36%	78.25%

La pluie extrême d'une période de retour de 10 ans est très sensible à l'imperméabilisation du sol jusqu'à ce qu'elle pourrait générer un débit supérieur à celle d'une période de 50 ans.

IV.4.10.2. Discussion des résultats

Les résultats nous montrent qu'au fur et à mesure que la surface bâtie augmente, les débits sont sensiblement augmentés aux exutoires des sous bassins versants. Un débit centennal de 278.1 m^3/s pour la situation de 2000, est dépassé par un débit cinquantenaire de la situation A1500. Cela indique que la période de retour d'un débit de crue de 278.1m^3/s sera de plus ou moins 50 ans dans ces conditions.

Il en est de même pour les débits des crues de la situation de 2000, des périodes de retour de 50 ans, 25 ans se retrouveront dépasser par ceux de périodes de retour inférieure lorsque l'urbanisation continuera à augmenter. Cela augmente la rigueur du risque d'inondation dans la zone étudiée.

Ces résultats sont plus proches de ceux de la DDTM 34, 2014 qui stipulent qu'un débit avant aménagement de période de retour T_{avant} donnée se produirait donc plus fréquemment après aménagement et pourrait donc entraîner des désordres à l'aval des aménagements urbains. Il indique qu'en considérant que les débits croissent asymptotiquement comme le logarithme de leur période de retour, alors un débit centennal avant aménagement se produirait en moyenne de 20 à 100 fois plus souvent après aménagement.

IV.5. Application du modèle HEC-RAS

IV.5.1. Données nécessaires

IV.5.1.1. Données topographiques

Un modèle numérique de terrain à une grande précision altimétrique. Pour notre étude, nous avons amélioré le MNT de la partie avale d'une résolution de 10m à celle de 0.5 m. Le MNT utilisé est sous format TIN

IV.5.1.2. Coefficient de Manning

Le second élément le plus important, est le coefficient de Manning qui représente le frottement et qui est déduit à partir de la carte d'occupation du sol. Ce paramètre permet d'avoir une modélisation la plus proche de la réalité en prenant en compte la vitesse d'écoulement de l'eau sur le fond de la rivière et sur les berges. La vitesse est définie par la formule suivante en fonction du coefficient de Manning :

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (4.17)$$

V : la vitesse de l'écoulement ; R_h : Rayon hydraulique ; J : Pente et n : Coefficient de Manning

Selon les différentes études effectuées sur les écoulements de l'eau, le Manuel d'Hydraulique Général donne des valeurs estimées pour les coefficients de Manning en fonction de la nature des parois dans le tableau suivant :

Tableau IV. 14 : Coefficients de Manning en fonction de la nature des parois

Nature des parois	n ($s/m^{1/3}$)
Béton lisse	0.011 à 0.013
Béton brut	0.013 à 0.016
Canal en terre, non enherbé	0.017
Canal en terre, enherbé	0.02
Rivière de plaine sans végétation arbustive	0.025 à 0.029
Rivière de plaine large, végétation peu dense	0.033
Rivières étroites très végétalisées	0.067 à 0.1
Lit majeur en prairie	0.033 à 0.05
Lit majeur en vigne	0.067 à 0.1
Lit majeur urbanisé	0.067 à 0.1
Lit majeur en forêt	>0.1

Source [BOURRIER, R, 1997]

IV.5.2. Modélisation des tronçons des cours d'eau de la partie avale de la RN9

Premièrement, en utilisant l'extension HEC-GeoRAS dans ArcGis, le fichier géométrique 1D des parties des cours d'eau étudié est créé. Cette étape consiste à la numérisation, sous forme des fichiers vectoriels en polyligne, de l'axe longitudinale de la rivière, des traces du lit mineur et du lit majeur. Ainsi, on peut créer les profils en travers automatiquement ou manuellement.

Dans un modèle 1D, la topographie de la rivière est définie par les profils en travers qui, dans le cadre d'une modélisation hydraulique doivent respecter les règles suivantes : (i) être perpendiculaire aux écoulements ; (ii) ne jamais se croiser ; (iii) considérer toute la largeur du lit majeur ; (iv) prendre en compte les contractions et les élargissements des écoulements.

Ces informations seront alors importées dans le logiciel HEC-RAS. La première chose à faire est la création du projet autour duquel s'organisent les éléments essentiels à la modélisation. Après avoir choisi le système d'unités à utiliser, on doit entrer les informations relatives à la géométrie et au débit. Dans le fichier de géométrie, les coordonnées de la rivière sont en deux dimensions (X, Y). Les profils en travers sont représentés au moyen des points représentant des coordonnées X- Y où X est la distance par rapport au point de référence arbitraire sur la rive et Y est l'altitude du point. Il faut ensuite déterminer les points de la berge pour définir la largeur du cours d'eau.

Pour notre étude, suite à la non visibilité causée par une forte végétation le long des rivières dans la zone étudiée, nous avons utilisé le GPS pour identification des profils en travers et les mesures seront faites à l'aide de l'échelle graduée sur terrain et les lignes du lit mineur sont digitalisées en se référant aux images satellitaires.

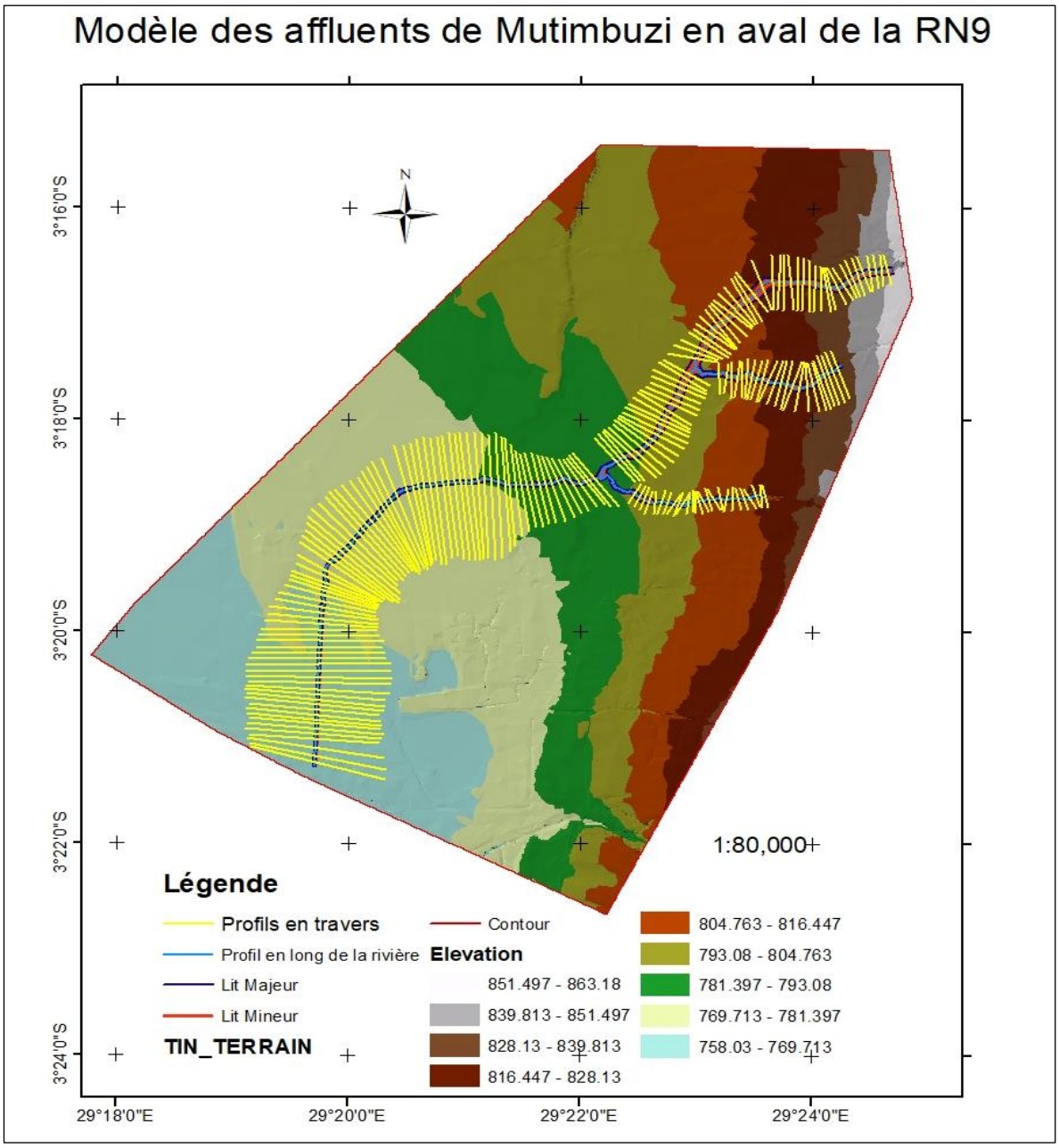


Figure IV.10 : Modèle de Mutimbuzi et ses affluents en aval de la RN 9

HEC-RAS place sur un tronçon de rivière les stations des profils en travers en ordre décroissant de la partie amont vers aval.

Le lit majeur des rivières est digitalisé en se référant aux routes contournant les digues construites le long de la rivière Mutimbuzi et Muzazi. Dans le logiciel HEC-RAS on corrige les profils en travers selon la réalité du terrain.

IV.5.2.1. Données géométriques

Les longueurs des tracés sont de 3280.636 m pour Gikoma, 2672.177 m pour Murago, 6690.614 m pour Muzazi et 8546.82 m pour Mutimbuzi. Les profils en travers sont distants de 100 m sauf dans les parties plus concaves où les coupes distantes de 100 m se croisent.

IV.5.3. Débits et conditions limites

IV.5.3.1. Débits

L'étape suivante de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulement. Les débits utilisés ont été déterminés par le logiciel HEC-HMS et sont détaillés dans le tableau IV.12. Pour tenir compte des apports latéraux et le débit de base, nous avons augmenté de 0.1 m^3/s les débits des affluents après dix profils en travers et de 0.2 m^3/s pour la rivière Mutimbuzi

IV.5.3.2. Conditions limites

La définition des conditions aux limites est différente selon les logiciels. Pour notre étude, la condition à la limite amont et aval est la hauteur d'eau critique.

IV.5.4. Résultats

Au niveau de chaque profil en long, HEC-RAS fournit les informations suivantes, pour chaque débit considéré correspondant à une situation quelconque : altitude minimale du lit de la rivière, altitude de la surface de l'eau, altitude de la hauteur critique, altitude de la ligne d'énergie, la pente de la ligne d'énergie, la vitesse de l'écoulement, la surface mouillée, la largeur au miroir et le nombre de Froude. Le tableau IV.15 montre les différents paramètres enregistrés sur le profil en en travers se trouvant à 8546.82 m de l'exutoire de la rivière Mutimbuzi, pour les différents cas considérés dans cette étude.

Ces résultats sont donnés en annexes 1 pour les profils où nous avons assisté aux plus courants débordements lors des simulations.

Après avoir exporté les résultats d'HEC-RAS en ArcGIS, nous pouvons déterminer les superficies inondées selon les différentes situations considérées, les hauteurs d'eau au niveau des différents points ainsi que les vitesses d'écoulements (Tableau IV.15). Ces paramètres sont importants dans la détermination de la vulnérabilité de la zone considérée (Annexe 2). Les surfaces inondables sont données dans le tableau IV.16.

Tableau IV. 15: Résultats par HEC-RAS sur le profil en travers de 8546.82 pour les différents débits considérés des situations étudiées

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
MUTIMBUZI	8546.82	A1500_25ans	282.40	786.00	786.90	787.80	790.33	0.063641	8.58	35.07	44.71	3.09
MUTIMBUZI	8546.82	2022_10ans	68.50	786.00	786.35	786.73	787.96	0.095433	5.88	12.41	37.84	3.28
MUTIMBUZI	8546.82	2022_20 ans	116.80	786.00	786.49	787.01	788.70	0.084261	6.88	18.08	39.67	3.25
MUTIMBUZI	8546.82	2022_25ans	134.80	786.00	786.54	787.10	788.93	0.081190	7.16	20.05	40.29	3.24
MUTIMBUZI	8546.82	2022_50ans	207.10	786.00	786.72	787.48	789.74	0.072779	8.05	27.40	42.51	3.20
MUTIMBUZI	8546.82	2022_100ans	312.00	786.00	786.95	787.90	790.59	0.062562	8.83	37.66	45.43	3.09
MUTIMBUZI	8546.82	2000_10ans	53.00	786.00	786.29	786.62	787.69	0.104004	5.48	10.29	37.13	3.33
MUTIMBUZI	8546.82	2000_20ans	96.60	786.00	786.43	786.91	788.44	0.089989	6.55	15.70	38.91	3.29
MUTIMBUZI	8546.82	2000_25ans	113.00	786.00	786.48	787.00	788.66	0.086097	6.84	17.59	39.51	3.27
MUTIMBUZI	8546.82	2000_50ans	182.80	786.00	786.66	787.37	789.51	0.076160	7.82	24.90	41.77	3.23
MUTIMBUZI	8546.82	2000_100ans	278.10	786.00	786.87	787.78	790.40	0.067321	8.70	34.08	44.43	3.17
MUTIMBUZI	8546.82	2016_10ans	57.50	786.00	786.31	786.65	787.78	0.102462	5.63	10.87	37.33	3.33
MUTIMBUZI	8546.82	2016_20ans	103.00	786.00	786.45	786.95	788.53	0.088507	6.67	16.44	39.15	3.29
MUTIMBUZI	8546.82	2016_25ans	120.20	786.00	786.50	787.01	788.77	0.085026	6.97	18.36	39.76	3.27
MUTIMBUZI	8546.82	2016_50ans	192.30	786.00	786.68	787.41	789.62	0.075403	7.94	25.81	42.04	3.23
MUTIMBUZI	8546.82	2016_100ans	290.10	786.00	786.90	787.83	790.47	0.065728	8.76	35.32	44.78	3.15
MUTIMBUZI	8546.82	A1000_10ans	95.70	786.00	786.45	786.90	788.26	0.077570	6.23	16.36	39.12	3.08
MUTIMBUZI	8546.82	A1000_20ans	148.60	786.00	786.59	787.18	788.98	0.072481	7.15	22.14	40.93	3.10
MUTIMBUZI	8546.82	A1000_25ans	168.30	786.00	786.64	787.30	789.21	0.070854	7.42	24.16	41.54	3.10
MUTIMBUZI	8546.82	A1000_50ans	249.10	786.00	786.83	787.67	790.04	0.065555	8.30	31.98	43.83	3.10
MUTIMBUZI	8546.82	A1000_100ans	356.60	786.00	787.22	788.04	789.98	0.036488	7.78	50.45	52.55	2.45
MUTIMBUZI	8546.82	A1250_10ans	130.90	786.00	786.55	787.07	788.75	0.073698	6.87	20.30	40.36	3.09
MUTIMBUZI	8546.82	A1250_20ans	189.00	786.00	786.70	787.40	789.40	0.067565	7.61	26.45	42.23	3.07
MUTIMBUZI	8546.82	A1250_25ans	210.60	786.00	786.75	787.50	789.62	0.066236	7.86	28.56	42.85	3.07
MUTIMBUZI	8546.82	A1250_50ans	298.00	786.00	786.94	787.86	790.40	0.061172	8.63	36.81	45.19	3.05
MUTIMBUZI	8546.82	A1250_100ans	412.80	786.00	787.41	788.13	790.01	0.029338	7.59	61.03	58.44	2.24
MUTIMBUZI	8546.82	A1500_10ans	195.60	786.00	786.70	787.44	789.55	0.070464	7.81	26.68	42.30	3.14
MUTIMBUZI	8546.82	A1500_20ans	259.20	786.00	786.85	787.71	790.14	0.065498	8.41	32.83	44.08	3.11
MUTIMBUZI	8546.82	A1500_50ans	375.40	786.00	787.28	788.13	789.99	0.033748	7.71	53.96	54.57	2.37
MUTIMBUZI	8546.82	A1500_100ans	495.70	786.00	787.67	788.13	790.06	0.022498	7.33	77.41	66.55	2.01

Après avoir traité les résultats d'HEC-RAS en ArcGIS, nous avons trouvé les superficies inondables pour chaque situation étudiée dans ces simulations.

Tableau IV. 16: Les surfaces inondables hors lits majeurs des rivières en km^2

Période de retour	Situations étudiées					
	2000	2016	2022	A1000	A1250	A1500
10 ans	0.000841	0.001439	0.003347	0.015398	0.035229	1.037707
20 ans	0.015493	0.020228	0.026849	0.291827	0.888739	3.028598
25 ans	0.025817	0.028922	0.037885	0.547881	1.317682	2.825008
50 ans	0.758749	0.969755	1.290115	2.459749	3.785716	4.613157
100 ans	2.827257	3.377449	3.44374	4.514905	5.451953	8.132519

Les surfaces inondables sont suffisamment grandes. En considérant le cas où, la partie avale sera bâtie selon les différentes situations, nous avons estimé le nombre de personnes susceptibles d'occuper les surfaces inondables selon les cas. L'Aménagement du quartier Nyabugete phase 5 nous a servi, de référence pour déterminer le nombre de parcelles à prévoir par unité de surface où sur 96.48 ha il y a 1120 parcelles de superficies variées.

Ici nous allons considérer que 1 km^2 abritera 1120 parcelles. L'enquête démographique et de la santé au Burundi 2016 – 2017, indique qu'une femme urbaine a en moyenne 4.1 enfants [MPBGP& Al, 2018]. Ainsi nous avons choisi que la taille moyenne d'un ménage urbain, est estimée à 7 personnes. Le tableau IV.17 illustrant le nombre de personnes dans la zone inondée n'est établi que pour les situations A1000, A1250 et A1500.

Tableau IV. 17. Personnes projetées dans la zone inondée

Période de retour	Situation simulée		
	A1000	A1250	A1500
10 ans	111	258	7159
20 ans	2226	6874	18622
25 ans	4232	8527	16953
50 ans	14658	21026	26417
100 ans	26536	30892	51794

La zone de l'Aéroport international Melchior Ndadaye n'est pas tenu en considération pour l'estimation des zones habitables.

IV.5.5. Discussion des résultats

Pour les situations de 2000 et 2016, nous avons trouvé que la rivière reste dans son lit majeur pour les pluies des périodes de retour de 10 ans à 25 ans. Cela change lorsque la partie avale de l'altitude 1000 m, sera complétement urbanisée. Signalons que l'altitude 1000 m est choisie comme le niveau autour duquel les maisons sont en train d'être construites dans ces jours.

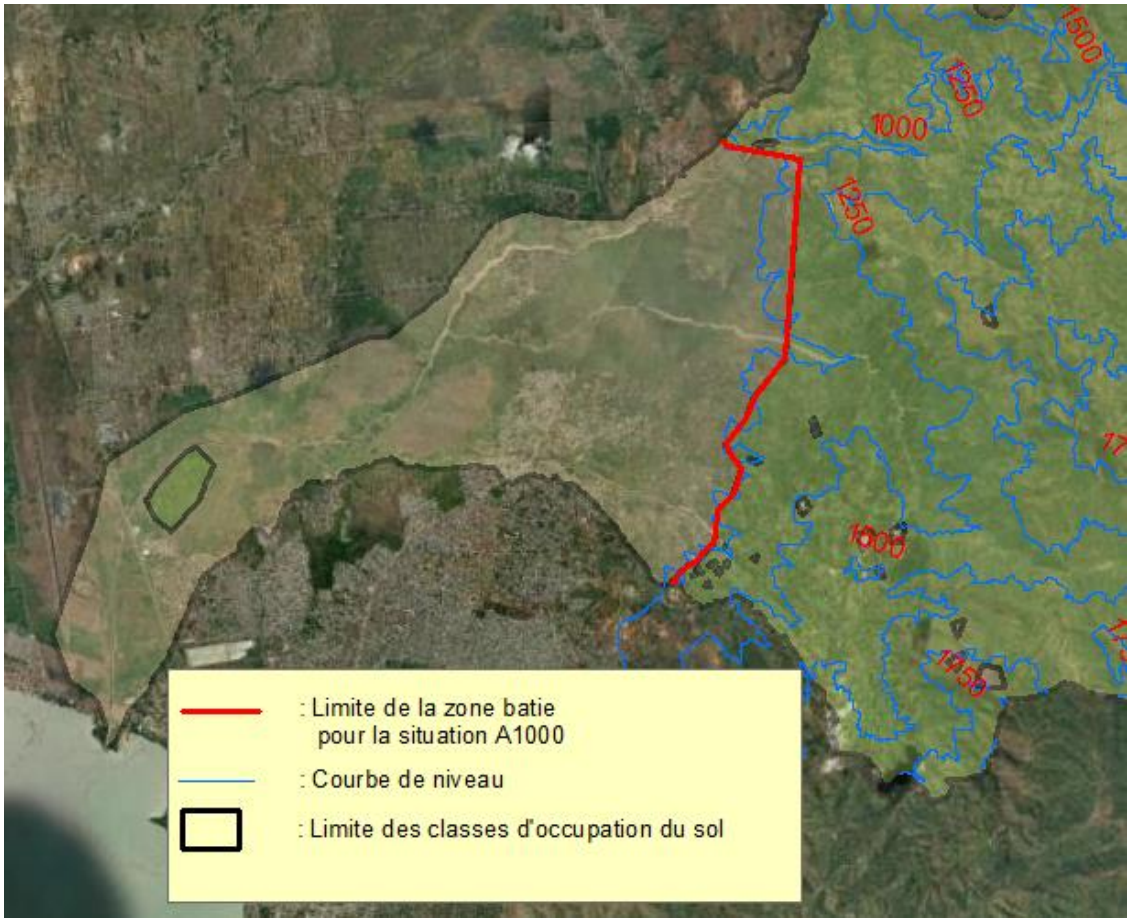


Figure IV.11: Limite de la zone bâtie de la situation A1000

Les surfaces inondables sont évaluées sans tenir compte de la résistance aux écoulements des éléments de construction comme les murs, les clôtures, les canalisations etc. Les résultats du tableau IV.15 montrent que les surfaces imperméabilisées à l'amont entrainent une augmentation considérable des surfaces inondables à l'aval comme le montre la figure IV.10. Les seuils de vulnérabilité des communautés de la zone inondable selon la vitesse et la hauteur d'eau, sur les situations A1000 et A1250 pour les périodes de retour de 20ans et 25 ans pour l'un et 10 ans pour l'autre, sont illustrés sur l'annexe 2. Les surfaces bâties en amont accentuent la vulnérabilité des communautés se trouvant en aval.

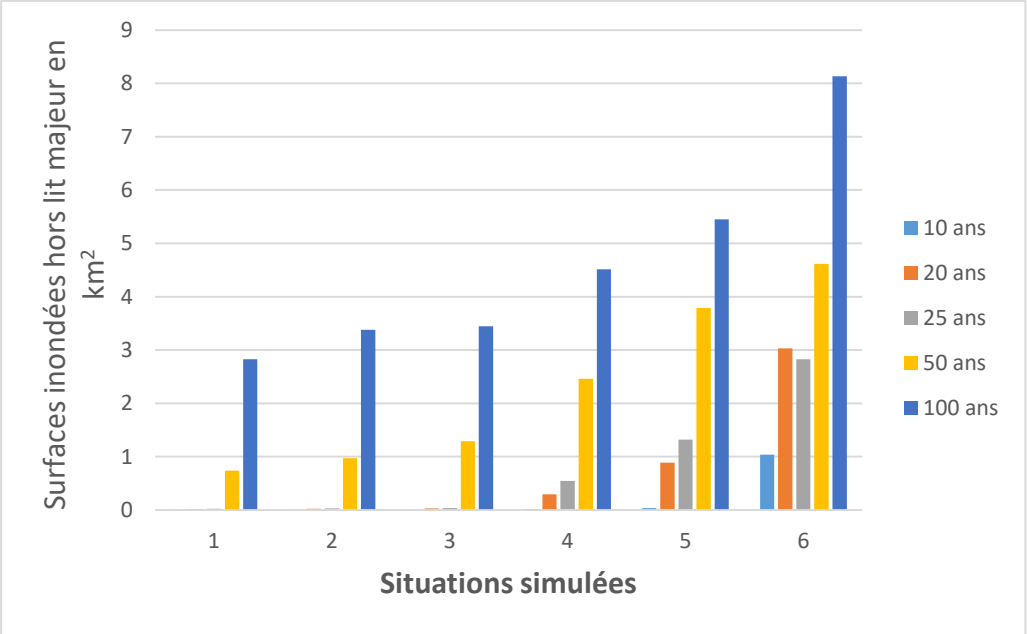


Figure IV. 32 : Evolution des surfaces inondables pour les situations simulées.

Ce graphique illustre bien que le profil utilise dans la modélisation ne suffise pas pour l'écoulement des différentes périodes de retour considérées. Pour les situations A 1000, A 1250 et A 1500, nous considérons que la partie avale sera construite excepté la zone de l'Aéroport, suite à l'urbanisation anarchique et la diminution progressive des eaux d'irrigation causée par la destruction de certains barrages d'irrigation de la zone d'étude. Cela augmentera le risque d'inondation. Nos résultats vont dans le même sens que les conclusions de Georges Raimbault ont souligné que le développement des villes entraine une imperméabilisation des sols [RAIMBAULT G, 1996]. L'imperméabilisation quant à elle se traduit par une suppression complète de l'infiltration de l'eau dans le sol, provoquant par conséquent un ruissellement quasi immédiat après le début de la pluie ce qui conduit à aggraver la combinaison des apports des sous bassins et à accroitre les hauteurs de submersion dans les zones inondables [KJHA A. et Al, 2012].

CHAPITRE V : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

V .1. Conclusion générale

Le processus de gestion des inondations peut se décomposer en trois phases : la planification avant inondation, la gestion d'urgence de la crue, et le rétablissement post- inondation. La modélisation hydrologique par HEC-HMS et hydraulique par HEC-RAS ont une incidence dans toutes ces phases.

Pour la première phase, ces modèles permettent la prédiction, plus ou moins précise, de la distribution spatiale et temporelle des niveaux d'eau et des vitesses d'une crue. Ses résultats permettent ensuite d'évaluer l'intensité de la crue potentielle, mais surtout de pouvoir en déduire les impacts probables sur la population, l'économie et l'environnement, ainsi que de mettre en place des solutions pour atténuer ces impacts.

Dans une optique de prévision, les modèles peuvent être un support avantageux dans la phase de gestion d'évacuation de la population, et l'envoi ciblé de secours dans les zones les plus à risque.

Ces recommandations, remises aux autorités compétentes , peuvent donc aboutir à la mise en place des mesures d'atténuation, structurelles ou non, telles que de nouvelles politiques d'aménagement du territoire, des renforcements des fondations de structure à risque, le déménagement des propriétés vulnérables , l'amélioration ou la mise en place de structure de protection, l'ajustement des contrats d'assurance, etc. toutes ces mesures visent à être préparé face à de tels événements et peuvent donc accélérer la phase de rétablissement.

Le problématique de ce travail fait état de la situation actuelle et future des inondations dans le monde, le consensus de la communauté scientifique étant que la fréquence des inondations urbaines ou non est amenée à s'intensifier ; que ce soit dû au changement climatique ou à des événements exceptionnels de pluie, les risques aux inondations sont réels. Ainsi l'emploi des modèles numériques est important. Les études d'impacts doivent refléter ces aléas et donc mettre à dispositions plusieurs scénarii.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé le logiciel HEC-HMS pour simuler les débits générés par les conditions actuelles et les conditions futures dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi en ne considérant que l'urbanisation anarchique continuant vers les zones à haute altitude.

Dans la zone d'étude, l'urbanisation anarchique est une réalité incontestée en s'appuyant sur les situations de 2000, 2016 et 2022, avec une allure aussi importante dans ces derniers jours.

Les résultats nous ont montré que les débits augmentent comparativement à ceux des situations où l'urbanisation est faible (2000 ; 2016 et 2022). Les débits selon la situation de 2000 ont évolué comme suit, lorsque la zone bâtie monte jusqu'à altitude de 1500 m dans la zone d'étude : 269% pour une période de retour de 10 ans, 168.3% pour une période de retour de 20 ans de 149.9 % pour une période de retour de 25 ans, 105% pour une période de retour de 50 ans et 78.2% pour une période de retour de 100 ans.

Cependant les débits des crues trouvés engendrent des surfaces inondables et par conséquent des dégâts matériels et humains surtout lorsque la zone inondable sera construite. En analysant les surfaces inondables, nous proposons de ne pas dépasser l'altitude de 1000 m en considérant un débit des crues d'une période de retour de 20 ans moyennant des petits travaux de calibration du lit de la rivière entre les profils en travers des stations 5004.171 et 4917.832 m. Pour un débit d'une période de retour de 10 ans, le bâti peut arriver à l'altitude de 1250 m.

Notre recherche s'est limitée sur l'influence de l'urbanisation anarchique sur l'augmentation des débits des crues et par la suite l'augmentation des surfaces inondables. Des études sur le transport des sédiments ainsi que la stabilité des berges des rivières de la zone d'étude ne sont pas abordés dans ce travail.

Cependant, notre travail se heurte à un manque d'instruments utilisant la photogrammétrie à grande échelle à cause des coûts élevés pour réaliser des relevés topographiques, comme le LiDAR qui permet d'obtenir des données d'élévation d'une précision d'environ 15 cm. C'est une technique qui utilise le laser aéroporté et permet un grand usage dans le modèle hydrologique.

V.2. Recommandations

Pour diminuer les surfaces imperméables en amont et le risque d'inondation en aval, nous recommandons : (i) de privilégier les constructions en hauteur dans les zones actuellement bâties ; (ii) de ne pas construire dans la partie avale considérée comme inondable sans tenir en considération le risque d'inondation ; (iii) d'arrêter l'urbanisation anarchique dans les hauteurs de la ville de Bujumbura et (iv) dresser la carte de susceptibilité aux inondations dans la zone d'étude.

C'est un modèle pouvant être appliqué sur d'autres bassins versants contenant des surfaces urbanisées ou des centres à vocation urbaine. Ainsi des études similaires sont à mener pour prédire le comportement hydrologique d'un bassin versant en continuelle urbanisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ALCRUDO F. **Mathematical modelling techniques for flood propagation in urban areas**. proceedings 1st IMPACT project Workshop Project, 2004
2. AMBROISE B., **La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant -Processus, facteurs, modèles** ; Edition H*GA, Bucarest, 1999.
3. ASSAKO-ASSAKO R J. **Apport de la télédétection et du SIG dans la recherche des zones constructibles d'un site urbain de collines : le cas de Yaoundé** (Cameroun) In : Espace géographique, tome 27, n°2,1998.
4. Banque Mondiale. **Evaluation rapide et conjointe suite à la catastrophe des 9-10 Février 2014 aux alentours de Bujumbura, Bujumbura**, 2014.
5. BARBET M., JOUARDA T., GINGRAS H., BOBEE B., LEMONIER M. **Synthèse des méthodes simples de régionalisation**. Chaire Hydro Québec/CRSNG/Alcan en Hydrologie statistique, Institut National de la recherche Scientifique. Québec.2001
6. BLAVOUX B., **Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium : Possibilités et limités de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée**, Université et Marie Curie Paris VI, Paris, 1978
7. BOURRIER R., **Les réseaux d'assainissement, calculs applications persepectives**.4édition Revue et augmentée, Lavoisier, Paris 1997
8. BRUNNER GARY W. **HEC RAS Rivers Analysis System Hydraulic Reference manual**, US Army Corps of Engineers, Davis, 2016.
9. CHOCAT B. **Aménagement urbain et hydrologie**, la Houille blanche, n°7-1997.
10. CHOCAT B. **Urbanisation et inondation, phénomènes de ruissellement, causes naturelles et facteurs d'aggravation**. Aménagement nature, n°95, pp13à15.
11. CRED, **The human cost of weather disasters**, 2015
12. DENIS A. **Travaux Pratiques de télédétection spatiale**, Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique ,2013.
13. DUNNE T. **Field studies of hillslope flow processes**, Chapiter7, University of Washington, Wash, USA, 1978
14. EGROT, M. & WERNER, M., **Etude de croissance urbaine de la ville de Bujumbura**, Mission Francaise de Coopération, Ministère des travaux Publics de l'Equipement et du logement, COLRD,1982

15. EL KADI ABDERREZZAK K., PAQUIER A., & MIGNOT E. **Modelling flash flood propagation in urban areas using a two-dimensional numerical model**. Natural Hazards, 2008, 50(3), 433-460. doi: 10.1007/s11069-008-9300-0
16. ERCA, **Etude de faisabilité technique et financière d'aménagement de la rivière Gasenyi et la protection de son bassin versant**, Etude Hydrologique (A,P,D,), Bujumbura: MEEATU, Direction Générale de l'Aménagement du Territoire et de la Protection du Patrimoine Foncier , 2016.
17. GALLEGOS, H. A., SCHUBERT, J. E., & SANDERS, B. F. **Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California**. Advances in Water Resources, 2009, 32(8), 1323-1335. doi: 10.1016/j.advwatres.2009.05.008
18. GUHA-SAPIR D, HOYOIS Ph, WALLEMACQ P, BELOW R. **Annual Disaster statistical Review 2016: The numbers and trends**; Brussels: CRED,2016.
19. HINGRAY, B, PICOUET, C., & MUSY A., (2009), **Hydrologie**, Tome 2 : Une science pour l'ingénieur, Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2009. Consulté le Février 3, 2023, sur http://www,books,google,com/Hydrologie: Tome 2, Une science pour l'ingénieur
20. HORTON, R.E. **The role of Infiltration in the Hydrologic Cycle**. *Transactions of the American Geophysical Union*,14,446-460, 1933.
21. ISTEEBU. (2008). **Recensement général de la population et de l'habitat du Burundi 2008** - Synthèse des résultats définitifs. Bujumbura.
22. ISTEEBU. **Projections démographiques au niveau communales 2010 – 2050**, Bujumbura, Février 2020.
23. KABANYEGEYE H., USENI SIKUZANI Y., SAMBIENI KOUAGOU R., MASHARABU T., HAVYARIMANA F. et BOGAERT J. **Trente _trois ans de dynamique spatiale de l'occupation du sol de la ville de Bujumbura, République du Burundi .** Afrique SCIENCE 18 (1) (2020) 203 -2015. Janvier 2021.
24. KATALAYI MUTOMBO H. **Urbanisation et fabrique urbaine à Kinshansa: défis et opportunité d'aménagemen**t. Géographie. Université Michel de Montaigne-Bordeaux III, 2014.

25. KHAMIS NABA S., HAITHAM ABDULMOHSIN A., NUR SHAZWANI M., AHMED E. **Development of a Spatial Hydrologic Soil Map Using Spectral Reflectance Band Recognition and a Multiple-Output Artificial Neural Network Model.** Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., doi:10.5194/hess-2017-13, 2017 Manuscript under review for journal Hydrol. Earth Syst. Sci. Published: 23 January 2017
26. KJHA A., BLOCH R., LAMOND J., **Villes et inondation Guide de gestion intégrée du risque d'inondation en zone urbaine pour** le XXIè S. Banque Mondiale. Washington, 2012.
27. KOUAKOU YAO E., BRAMA K, BASSIROU B, KIENTGA SONWOUIGNANDE M., N'Go Yao Alexis, ISSIAKA S. et Guéladio C. **L'étalement urbain au péril des activités agro-pastorales à Abidjan**, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 10 numéro 2 | septembre 2010, mis en ligne le 29 septembre 2010, consulté le 03 novembre 2022. URL : http://journals.openedition.org/vertigo/10066 ; DOI : https://doi.org/10.4000/vertigo.10066
28. KOVACS Y., DOUSSIN N., & GAUSSENS M., **Risque d'inondation et villes des pays en développement**, Notes Techniques, 2017, Paris : AFD,
29. Ministère à la Présidence chargé de la Bonne Gouvernance et du Plan [Burundi] (MPBGP), Ministère de la Santé Publique et de la Lutte contre le Sida [Burundi] (MSPLS), Institut de Statistiques et d'Études Économiques du Burundi (ISTEEBU), et ICF. 2018. **Enquête Démographique et de Santé au Burundi 2016- 2017** : Rapport de synthèse. Rockville, Maryland, USA: ISTEEBU, MSPLS, et ICF
30. MINISTERE DE L'EAU, DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'URBANISME. **Deuxième Communication Nationale sur les Changements Climatiques** "DCNCC". Bujumbura, 2010.
31. MUHIGIRWA, G. **L'approche de prévention et de gestion des risques naturels au Burundi et le droit international de l'environnement**. Institut des Nations Unies pour la Formation et la Recherche, 2011.
32. MUSSY A. et HIGY C. (1998) : **Hydrologie appliquée**, Edition *H*G*A*, Bucarest,. ISBN: 973-98530-8-0
33. NAJEM D**, Production du sol urbain et vulnérabilité aux inondations** : l'exemple de la cité Sidi Hcine Essijoumi en Tunisie, *Revue franco-brésilienne de géographie*, décembre 2011, Numéro 11.

34. NEPPEL L. et TOURNOUD, M G., **Gestion du Ruissellement pluvial dans l'aménagement urbain**, Université de Montpellier, Montpellier
35. NIBIGIRA L. **Etude des risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique des lacs Kivu et Tanganyika**, Thèse de Doctorat. Université de Liège (2018).
36. NZIGIDAHERA, B. **Description du Burundi : Aspects physiques**. MEEATU, Bujumbura, 2012
37. PETRESCU MAFTEI C., **Etudes concernant les écoulements superficiels Modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de voinesti-Roumanie**, thèse de doctorat ,Université de Constanta et université Montpellier II,2002.
38. RAIMBAULT G. **Effets des sols et sous-sols urbains sur le devenir des eaux pluviales,** *Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées* -202-Mars Avril 1996 – REF.4024.pp.71-78.
39. SEYOUM S.,VOJINOVIC Z., MWANAISHA H. S., PRICE R. K , FIKRI A. K. &ABEBE Y., **Modelling floods in urban areas and representation of buildings with a method based on adjusted conveyance and storage characteristics**, *Journal of Hydroinformatics*,2013.
40. SINDAYIGAYA S. **Rapport National pour l'habitat III**. Programme des Nations unis sur les établissements Humains, PNUD, Bujumbura ,2015.
41. SINDAYIHEBURA B. **De l'IMBO au MIRWA, Dynamique de l'occupation du sol, croissance urbaine et risques naturelles dans la région de BUJUMBURA (BURUNDI)**.Thèse de Doctorat. Université de Toulouse II Géographie de l'environnement UMR-5602 CNRS (2005).
42. SKLASH, M, & FARVOLDEN, R, (1979), **The role of groundwater in storm runoff**, *Journal of Hydrology*, Vol 43(n° 1-4), pp, 45-65,
43. SMITH, G, DAVEY, E, & COX, R, (2014), **Flood hazard, Technical report** 2014/07, Sidney: Water Research Laboratory, University of New South Wales,
44. UN HABITAT, **World Cities Report 2022**, Nairobi, 2022
45. USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS**. Technical Reference Manual version 3.5. Hydrologic Engineering Center, 2000.
46. USDA. **Urban Hydrology for small watersheds, Technical Release 55**. Washington.1986

47. VENNETIER P., **Evolution des espaces périphériques à Brazaville (Congo) et Cotonou (Bénin),** in *Espaces Tropicaux*, N°1, Bordeaux, pp.113 – 174, 1989
48. WEILL S., **Modélisation des échanges Surface /Subsurface à l'échelle de la parcelle par une approche darcéenne multidomaine** .Planète et Univers [Physics]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. Français NNT :2007 ENMP1482.Pastel-00003411

Sites internet

1. http://www.preventionweb.net/english/hazards/statistics/?hid=62
2. *https://earthexplorer.usgs.gov*
3. https://iwacu-burundi.org/
4. *https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/2a7d2fb8-e0db-4a4b-9661-4809865aaccf*
5. *http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/j/k/HDCC_map*

ANNEXES

Annexes 1 : Résultats d'HEC-RAS sur les profils en travers 5004.171 et 4917.832 sur la rivière Mutimbuzi

1. Profil en travers 5004.171 m de l'exutoire

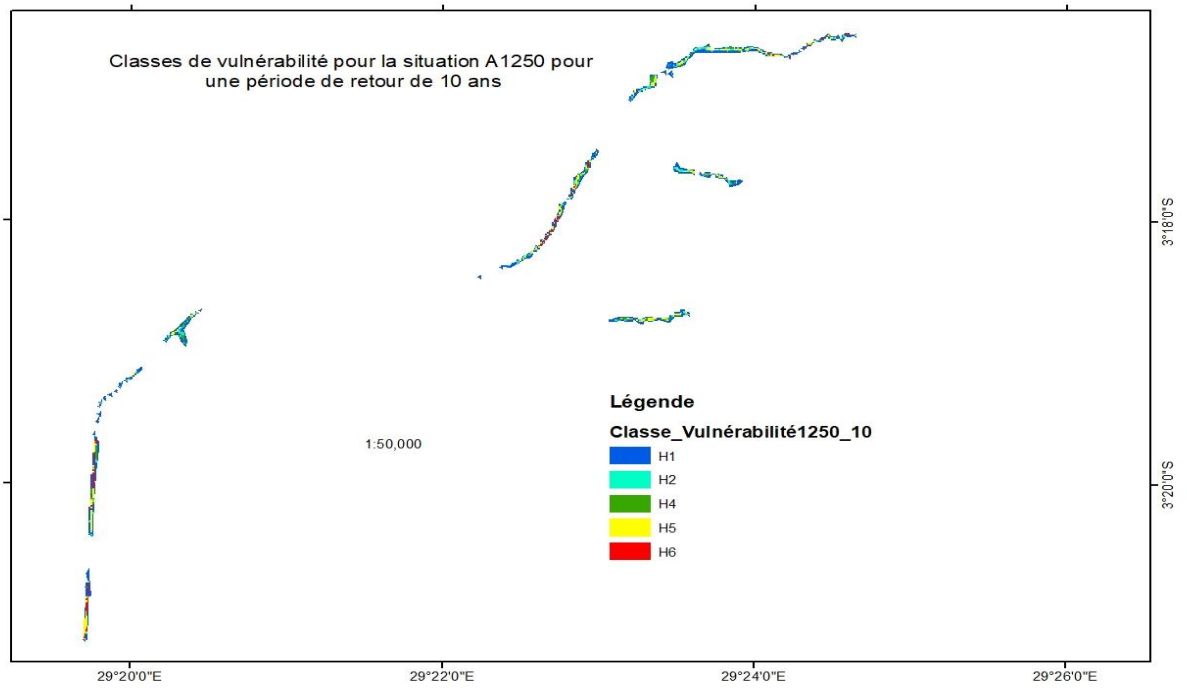
River	Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
				(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2022_25ans	135.40	772.50	774.39	773.57	774.51	0.000736	1.66	96.86	66.56	0.39
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2022_50ans	207.70	772.50	775.06	773.90	775.06	0.000013	0.27	1533.23	1204.81	0.05
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2022_100ans	312.60	772.50	774.87	774.30	774.88	0.000049	0.50	1312.18	1204.40	0.10
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2000_10ans	53.60	772.50	773.47	773.08	773.56	0.001277	1.40	42.36	51.67	0.45
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2000_20ans	97.20	772.50	774.00	773.35	774.11	0.000873	1.55	72.32	60.31	0.40
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2000_25ans	113.60	772.50	774.17	773.46	774.29	0.000804	1.60	83.00	63.11	0.39
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2000_50ans	183.40	772.50	774.87	773.79	774.87	0.000017	0.29	1309.67	1204.40	0.06
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2000_100ans	278.70	772.50	775.51	774.17	775.51	0.000009	0.25	2077.31	1205.81	0.05
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2016_10ans	58.10	772.50	773.53	773.13	773.62	0.001209	1.42	45.53	52.65	0.45
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2016_20ans	103.60	772.50	774.07	773.40	774.18	0.000843	1.57	76.54	61.43	0.40
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2016_25ans	120.80	772.50	774.25	773.50	774.36	0.000777	1.62	87.70	64.30	0.39
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2016_50ans	192.90	772.50	774.94	773.83	774.95	0.000015	0.28	1397.24	1204.56	0.06
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	2016_100ans	290.70	772.50	774.86	774.22	774.86	0.000045	0.47	1294.17	1204.37	0.10
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1000_10ans	96.30	772.50	773.99	773.36	774.10	0.000877	1.55	71.74	60.16	0.40
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1000_20ans	149.20	772.50	774.59	773.63	774.59	0.000029	0.35	971.79	1203.78	0.08
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1000_25ans	168.90	772.50	774.76	773.73	774.76	0.000020	0.31	1178.57	1204.16	0.07
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1000_50ans	249.70	772.50	775.37	774.07	775.38	0.000009	0.25	1915.36	1205.52	0.05
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1000_100ans	357.20	772.50	774.96	774.45	774.97	0.000050	0.52	1421.26	1204.61	0.10
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1250_10ans	131.50	772.50	774.35	773.55	774.47	0.000748	1.65	94.37	65.95	0.39
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1250_20ans	189.60	772.50	774.92	773.82	774.92	0.000016	0.29	1368.65	1204.51	0.06
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1250_25ans	211.20	772.50	775.09	773.92	775.09	0.000013	0.27	1567.66	1204.88	0.05
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1250_50ans	298.60	772.50	774.86	774.25	774.87	0.000046	0.48	1299.99	1204.38	0.10
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1250_100ans	413.60	772.50	774.98	774.51	774.99	0.000064	0.59	1440.99	1204.64	0.12
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1500_10ans	196.20	772.50	774.97	773.85	774.97	0.000015	0.28	1427.63	1204.62	0.06
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1500_20ans	259.80	772.50	775.45	774.11	775.45	0.000009	0.24	2009.03	1205.69	0.04
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1500_50ans	376.00	772.50	774.97	774.51	774.97	0.000055	0.54	1422.88	1204.61	0.11
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	5004.171	A1500_100ans	496.30	772.50	775.12	774.51	775.13	0.000065	0.61	1609.00	1204.95	0.12

2.Profils en travers à 4917.832m de l'exutoire

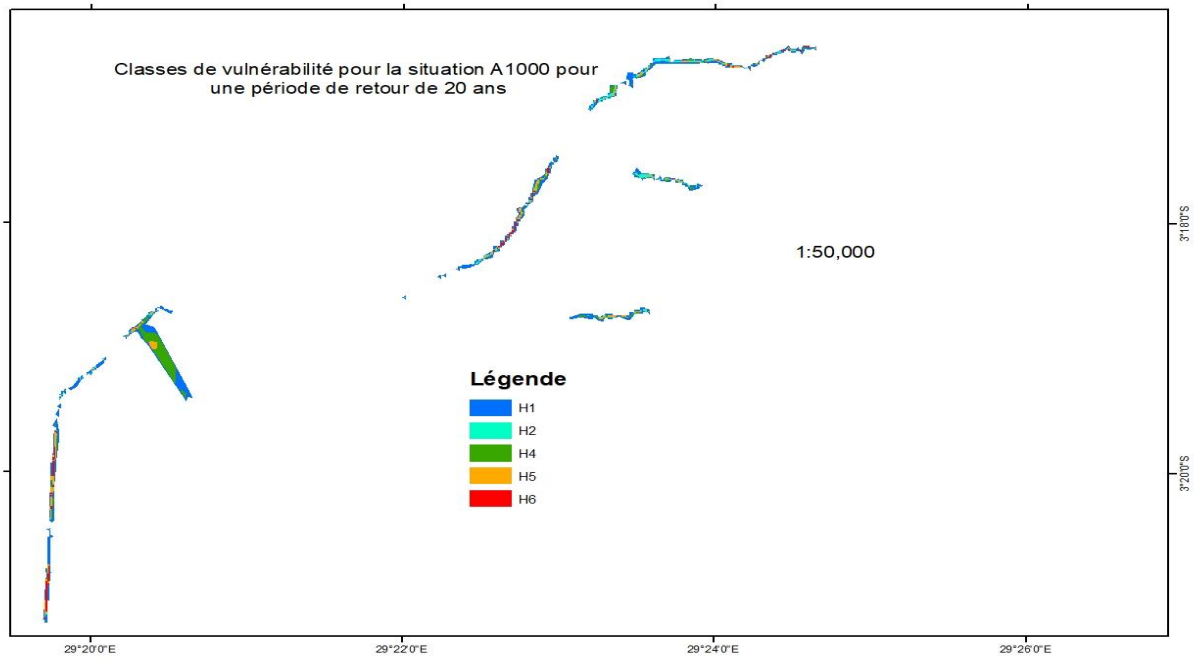
River	Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
				(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1500_25ans	283.00	772.15	775.53	773.72	775.53	0.000015	0.35	2103.73	1973.43	0.06
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2022_10ans	71.10	772.15	773.69	772.83	773.73	0.000321	0.96	94.68	86.45	0.25
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2022_20 ans	117.40	772.15	774.22	773.08	774.27	0.000278	1.08	145.06	103.70	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2022_25ans	135.40	772.15	774.40	773.16	774.45	0.000266	1.12	164.22	109.55	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2022_50ans	207.70	772.15	775.04	773.46	775.06	0.000098	0.80	693.04	1234.79	0.15
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2022_100ans	312.60	772.15	774.71	773.79	774.85	0.000778	2.09	374.84	844.13	0.42
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2000_10ans	53.60	772.15	773.46	772.72	773.49	0.000345	0.89	74.99	78.69	0.25
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2000_20ans	97.20	772.15	774.01	772.98	774.05	0.000294	1.04	123.34	96.64	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2000_25ans	113.60	772.15	774.18	773.06	774.23	0.000281	1.08	140.99	102.41	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2000_50ans	183.40	772.15	774.84	773.37	774.87	0.000160	0.98	487.31	898.24	0.19
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2000_100ans	278.70	772.15	775.51	773.70	775.51	0.000016	0.36	2054.54	1973.43	0.06
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2016_10ans	58.10	772.15	773.52	772.75	773.55	0.000339	0.91	80.01	80.74	0.25
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2016_20ans	103.60	772.15	774.08	773.01	774.12	0.000288	1.05	130.28	98.95	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2016_25ans	120.80	772.15	774.26	773.09	774.31	0.000275	1.09	148.84	104.88	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2016_50ans	192.90	772.15	774.92	773.40	774.94	0.000131	0.90	560.19	968.49	0.17
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	2016_100ans	290.70	772.15	774.73	773.74	774.84	0.000623	1.88	390.68	851.95	0.37
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1000_10ans	96.30	772.15	774.00	772.98	774.04	0.000295	1.03	122.36	96.31	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1000_20ans	149.20	772.15	774.53	773.21	774.58	0.000258	1.15	178.76	113.78	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1000_25ans	168.90	772.15	774.72	773.30	774.76	0.000223	1.12	378.48	845.93	0.22
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1000_50ans	249.70	772.15	775.37	773.61	775.37	0.000048	0.60	1109.64	1280.35	0.11
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1000_100ans	357.20	772.15	774.57	773.94	774.92	0.001748	3.01	183.13	176.13	0.62
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1250_10ans	131.50	772.15	774.37	773.14	774.41	0.000269	1.11	160.03	108.29	0.24
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1250_20ans	189.60	772.15	774.89	773.39	774.92	0.000139	0.93	536.11	920.73	0.18
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1250_25ans	211.20	772.15	775.07	773.47	775.08	0.000106	0.84	726.83	1271.42	0.16
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1250_50ans	298.60	772.15	774.72	773.75	774.85	0.000674	1.95	385.55	849.43	0.39
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1250_100ans	413.60	772.15	774.55	774.08	774.93	0.001971	3.18	180.77	118.60	0.66
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1500_10ans	196.20	772.15	774.95	773.41	774.97	0.000123	0.88	587.25	1029.04	0.17
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1500_20ans	259.80	772.15	775.45	773.63	775.45	0.000017	0.36	1942.49	1973.43	0.06
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1500_50ans	376.00	772.15	774.56	773.99	774.92	0.001824	3.07	181.92	149.37	0.63
MUTIMBUZI	MUTIMBUZI	4917.832	A1500_100ans	496.30	772.15	774.34	774.29	775.04	0.004038	4.28	156.82	107.33	0.92

Annexe 2 : Classes de vulnérabilité des communautés des surfaces inondables

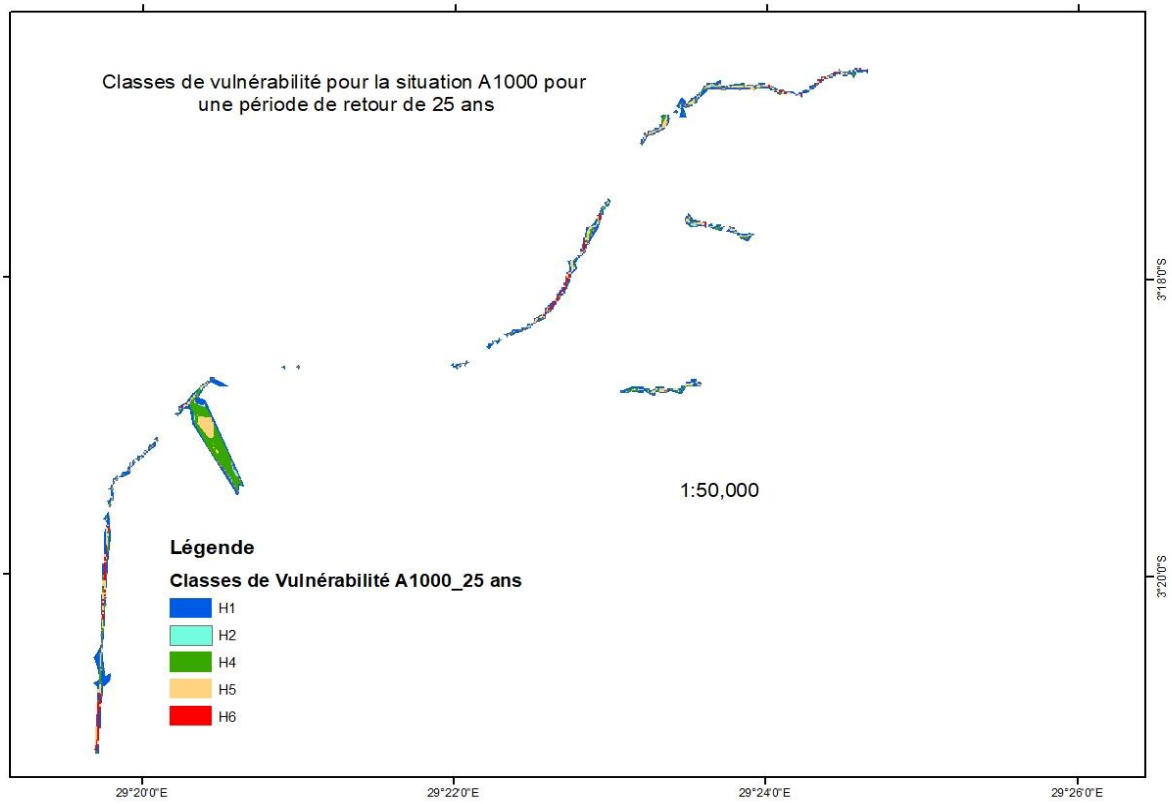
1. Situation A12500 pour une période de retour de 10 ans



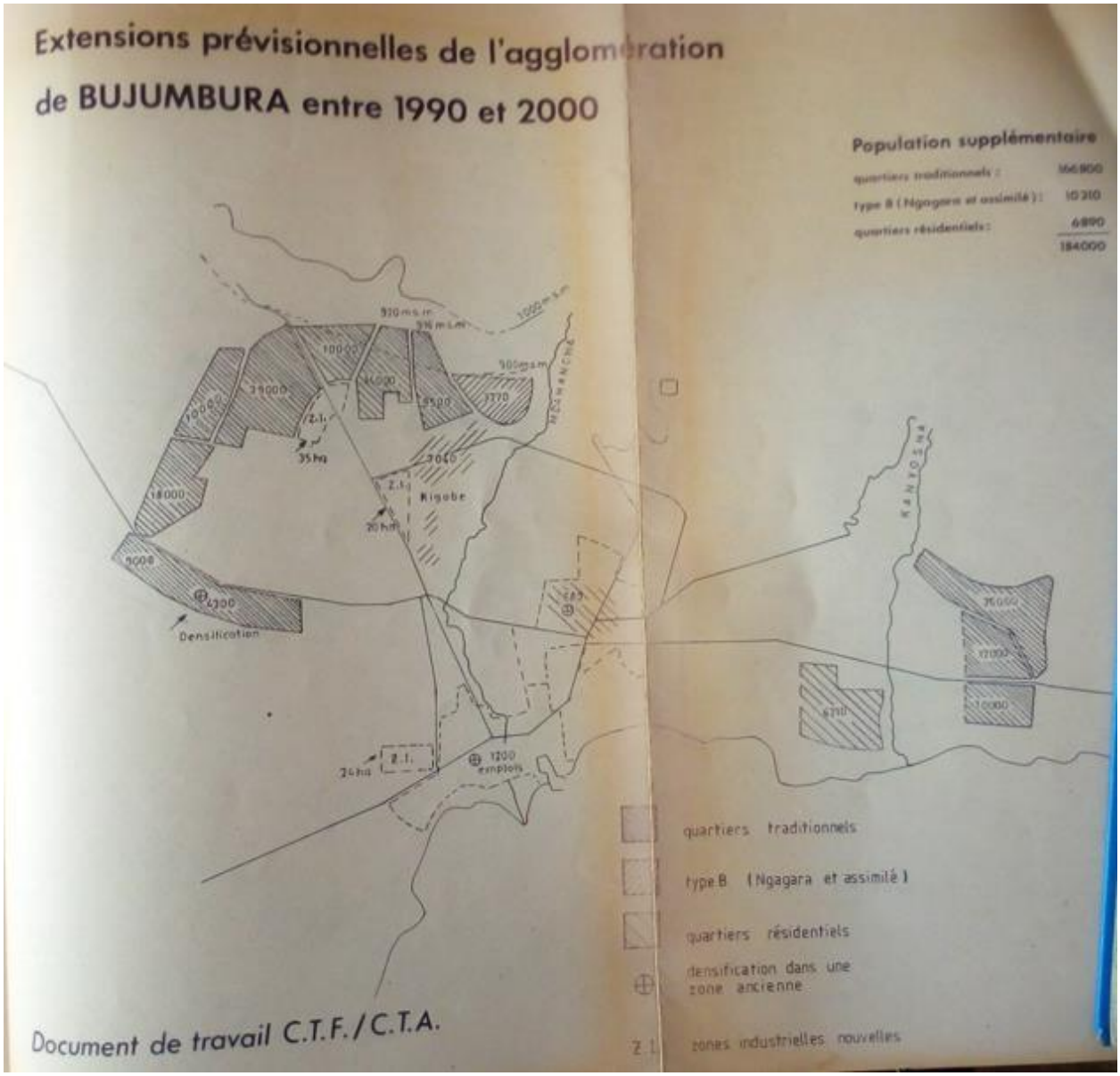
2. Situation A1000 pour une période de retour de 20 ans



3. Situation A1000 pour une période de retour de 25 ans



Annexe 3 : Limite du SDAU 1990 - 2000



Source : EGROT, M. & WERNER, M. (1982)