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

Contribution à l’étude des inondations dans la partie Nord de la ville de Bujumbura

Hakizimana, Richard; Sous la Direction du : Dr. Kubwimana Désiré

2025-02
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2063

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

UNIVERSITÉ DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

Contribution à l'étude des inondations dans la partie Nord de la ville de Bujumbura

Par :

Richard HAKIZIMANA

Sous la Direction du :

Dr. KUBWIMANA Désiré

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement (MSGIE)

Spécialité : **GENIE DE L'ENVIRONNEMENT**

Bujumbura, Février 2025

MEMBRES DU JURY

Président : Dr. SINDAYIHEBURA Anicet (UB)

Secrétaire : Dr. MATAKARA Giscard (UB)

Directeur : Dr. KUBWIMANA Désiré (UB)

Membre : Dr. NTIHARIRIZWA Seconde (UB)

DEDICACES

À Dieu le Tout puissant,

À mes chers parents qui m'ont quitté très tôt pour l'amour et le soutien précieux qu'ils m'ont réservés,

A ma chère épouse KAMIKAZI Gloriose qui a été vaillante pour s'occuper de la famille pendant que je faisais mes études ;

A mes précieux trésors HAKIZIMANA Don Josué et IZERE Maelle Gadiella ;

À mes sœurs KIGEME Jeanine et HABONIMANA Yvette ainsi que mes amis et connaissances.

Je dédie ce Mémoire !!!

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, qu'il me soit permis d'exprimer mes sentiments de gratitudes envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation.

Je voudrais avant tout remercier le projet GERNAC (Gestion de l'Eau et des Ressources Naturelles en Afrique Centrale) du consortium CICOS du programme GMES & Africa II, qui à travers son programme d'appuyer financièrement les étudiants finalistes du cycle Master ou de Doctorat utilisant les données d'observation de la terre a mis à ma disposition la bourse qui m'a permis de réaliser le présent travail de recherche. Votre appui financier a été très utile pour moi et je suis très reconnaissant.

Le Docteur KUBWIMANA Désiré, respectivement Directeur et Encadreur de ce travail, qui a accepté de diriger ce mémoire, a su par ses conseils méthodologiques et sa rigueur scientifique, me guider vers l'essentiel. Merci pour votre disponibilité, vos orientations, et encouragements dont j'ai bénéficiés particulièrement pendant la réalisation de ce travail. Je serai toujours reconnaissant de votre soutien à tous égards.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les professeurs de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement de l'Université du Burundi, pour la formation solide à caractère multidisciplinaire dont ils nous ont fait bénéficier durant tout le cursus de formation.

J'adressse mes vifs remerciements à l'endroit du Directeur Général de la protection civile et Président de la PFN – PRGC qui m'a accordé le stage de fin d'études et m'a fourni toute la documentation nécessaire relative à mon sujet de recherche.

J'exprime ma profonde reconnaissance à ma chère épouse KAMIKAZI Gloriose pour votre soutien, votre encouragement, je me rappelle de ces soirées pénibles que vous avez agrémentées de joie en me rappelant chaque fois que la fin sera meilleure. A Don Josué et Maelle Gadiella, mes précieux trésors, vous étiez petits mais vous connaissiez déjà réjouir votre Papa, un grand merci à vous mes chers enfants.

Je dis grand merci à Madame Jeanne d'Arc BUKURU pour le grand soutien financier et moral qu'elle m'a réservé durant toute la période de formation, qu'elle trouve ici ma profonde reconnaissance qui restera ancrée dans mon cœur durant toute ma vie.

Que les familles de NYABIBWA Nestor et NDUWIMANA Innocent trouvent également ma reconnaissance pour leur soutien, conseils qu'ils m'ont réservés durant mon parcours académique. Je présente mes sentiments de remerciement à mes camarades étudiants avec qui nous avons cueilli rose et épine ; qui ont agrémenté mon parcours de formation et spécialement ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce travail ; qu'ils trouvent ici mes sentiments distingués de remerciement.

RESUME

Depuis plusieurs années, la plaine de l'Imbo a connu des inondations récurrentes. Dans les années 1960, la population n'occupait pas la majeure partie du territoire et surtout les zones côtières c'est-à-dire proches du lac Tanganyika et des cours d'eau. Les dommages liés à ces inondations n'étaient pas beaucoup importants. Au fur et à mesure que la population a augmenté, il y a eu des catastrophes dues à ces dernières. Les changements climatiques qui touchent le monde contribuent également pour exacerber les risques des événements météorologiques extrêmes. Ainsi, les pluies diluviennes entraînent des inondations catastrophiques dans les zones à faible pente. A l'aide des images satellitaires, nous avons constaté que le changement d'affectation des terres joue un rôle prépondérant dans le processus d'inondations ainsi que les risques associés. L'intensification des inondations dans ces dernières années serait due à la dégradation de l'environnement dans les bassins versants en amont de la zone d'étude ainsi que les événements météorologiques extrêmes exacerbés par les changements climatiques. Les pertes des vies humaines, la destruction des infrastructures socioéconomiques, des maisons individuelles et des moyens de subsistance sont des impacts majeurs entraînés par les inondations. La mise en place des systèmes d'alerte précoce, l'exécution des mesures de restauration du paysage constitueraient une solution durable pour atténuer considérablement les risques d'inondations. La mise en œuvre des outils légaux en matière d'aménagement du territoire et de la gestion des ressources en eau contribuerait aussi à l'utilisation de l'eau entraînant l'inondation aux fins agricoles.

Mots clés : Inondations-risques de catastrophes-atténuation-SIG

ABSTRACT

For several years, the Imbo plain has experienced recurring floods. In the 1960s, the population did not occupy most of the territory and especially the coastal areas, that is to say close to Lake Tanganyika and the rivers. The damage from these floods was not that significant. As the population grew, there were flood disasters. Climate change affecting the world is also exacerbating the risks of extreme weather events. Thus, torrential rains cause catastrophic flooding in areas with low slopes. Using satellite images, we found that land use change plays a major role in the flood process as well as the associated risks. The intensification of flooding in recent years is believed to be due to environmental degradation in the watersheds upstream of the study area as well as extreme weather events exacerbated by climate change. The loss of human lives, the destruction of socio-economic infrastructure, individual homes and the means of subsistence are major impacts caused by floods. The establishment of early warning systems and the execution of landscape restoration measures would constitute a sustainable solution to considerably mitigate the risks of flooding. The implementation of legal tools in terms of land use planning and water resources management would also contribute to the use of water leading to flooding for agricultural purposes.

Keywords: Floods-disaster risks-mitigation-GIS

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACES ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **v**
ABSTRACT ..... **vi**
TABLE DES MATIERES ..... **vii**
LISTE DES FIGURES ..... **ix**
LISTE DES TABLEAUX ..... **xi**
LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS ..... **xii**
AVANT PROPOS ..... **xiv**
0. INTRODUCTON GENERALE **1**
0.1. Contexte et justification 1
0.2. Pertinence 3
0.3. Problématique 3
0.4. Objectifs de l'étude 3
0.5. Hypothèses de l'étude 4
0.6. Structure du Mémoire 4
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE **5**
I.1. Notions de base pour l'étude des inondations 5
I.1.1. Définitions 5
I.1.2. Répartition des inondations 6
1.1.3. Types d'inondations 8
I.1.3.1. Inondation fluviale 8
I.1.3.2. Ondes de tempête 9
I.1.3.3. Crues soudaines 10
I.1.4. Impacts associés aux inondations 10
I.1.5. Facteurs de contrôle des inondations 16
I.2. Description de la zone d'étude 16
I.2.1. Localisation de la zone d'étude 16
I.2.2. Relief et morphologie 18
I.2.3. Géologie 18
I.2.4. Climat 19
I.2.4.1. Précipitations 19

I.2.4.2. Températures 23
I.3. Dynamique de l'occupation du sol 24
I.4. Hydrographie 24
I.5. Structure socio-économique 25
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES 27
II.1. Matériels 27
II.2. Méthodologie 27
II.2.1. Cartographie des inondations et des facteurs de contrôle par l'analyse des images satellitaires 30
II.2.2. Cartographie des inondations à base des levés de terrain 33
II.2.3. Modélisation spatiale 34
CHAPITRE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION 38
III.1. Résultats 38
III.1.1. Apport de l'imagerie satellitaire et photographie aérienne dans l'étude des inondations dans la partie Nord de Bujumbura 38
III.1.2. Types et caractéristiques des inondations 48
III.1.3. Causes et déclencheurs des inondations 49
III.1.4. Cartographie de la susceptibilité des inondations 53
III.2. Interprétation des résultats 58
III.2.1. Inventaire des méthodes et fiabilité des données 58
III.2.2. Processus d'inondations, causes et déclencheurs 62
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 75
ANNEXE 81
QUESTIONNAIRE D'ENQUETE 81

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Les pays d'Afrique Atlantiques victimes des inondations. (Source : adapté du Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest, 2007) (Tchindjang et al., 2019) 6

Figure 2: Inondation du fleuve Niger autour et dans la capitale Niamey en Septembre 2020. (Gosset et al., 2023) 7

Figure 3: Représentation d'une inondation fluviale ; https://www.researchgate.net/ au 10 octobre 2024 9

Figure 4: Inondation fluviale Gatumba (source : Journal iwacu) 9

Figure 5: Synthèse de l'occurrence et du nombre de victimes des inondations pour quelques pays d'Afrique Atlantique (Thindjang et al., 2019) 13

Figure 6: Cumul total du phénomène des inondations et de la vulnérabilité(Tchindjang et al., 2019) 14

Figure 7: Localisation de la zone d'étude (partie nord de la ville de Bujumbura) 17

Figure 8: Carte géologique de la zone d'étude (Laghmouch et al., 2018) 19

Figure 9: Pluviométrie moyenne annuelle de 1981-2000 (station Aéroport de 21

Figure 10: Pluviométrie moyenne annuelle de 2001-2023 22

Figure 11: Pluviométrie moyenne annuelle de Rwegura de 1983 à 2003 22

Figure 12: Pluviométrie moyenne annuelle de Rwegura de 2004 à 2023 23

Figure 13: Variation de température de 1983-2018 (station Aéroport de Bujumbura) 23

Figure 14: Hydrographie de la zone d'étude 25

Figure 15: Evolution de la population de 1954 à 2021 (Source ISTEBU) 26

Figure 16: Méthodologie utilisée pour la modélisation spatiale de la susceptibilité aux inondations 29

Figure 17: Caractéristiques de Landsat 31

Figure 18: Cartes d'occupation du sol de 1987 à 2022 (Landsat) (a): 1987 ; (b) : 1995 ; (c) : 2011 et (d) : 2022 41

Figure 19: Cartes d'occupation du sol de 2016 à 2024 pour sentinel-2 (a) : 2016 et (b) : 2024 42

Figure 20: Comparaison des changements d'occupation du sol entre 1987 à 2022 (Landsat) et 2016 à 2024 (Sentinel-2) 44

Figure 21: Comparaison paramètre entré-sortie 46

Figure 22: Changements du niveau du lac Tanganyika de 1979 à 2023 47

Figure 23: Impacts d'inondations dans la zone de Gatumba 48

Figure 24: Impacts matériels et humains entraînés par la rivière Gasenyi en 2014 49

Figure 25: Carte de pente de la zone d'étude 50

Figure 26: Carte géologique de notre zone d'étude 51
Figure 27: Extrait de la carte routière et vue partielle des pistes dans la zone d'étude.....52
Figure 28: Facteurs qui influencent l'aléa 56
Figure 29: Pondération des facteurs de l'aléa 57
Figure 30: Carte de susceptibilité aux inondations 58
Figure 31: Profil en long des cours d'eau de notre zone d'étude, (a) : Ntahangwa ; (b) : Mutimbuzi ; (c) : Mpanda ; (d) : Rusizi 67
Figure 32: Impacts d'inondations à Gatumba et rivière torrentielles de la zone d'étude (a) : pont de la république ; (b) sécours et sauvétage.....68
Figure 33: Résilience de la population face aux inondations récurrentes à Gatumba.....70
Figure 34: Localisation des maisons inondées.....71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Bilan de quelques inondations en Afrique centrale et occidentale entre 1990 et 2015 (Tchindjang et al., 2019).....11
Tableau 2: Impacts des inondations en afrique (Jha et al., 2011).....14
Tableau 3: Quelques impacts d'inondation dans la plaine de l'Imbo (source : OIM/DTM)..15
Tableau 4: Répartition de la pluviométrie par régions naturelles (MINATTE, 2005). 20
Tableau 5: Facteurs influencés par l'aléa 36
Tableau 6: Comparaison LULC 1987, 1995, 2011 et 2022.....42
Tableau 7: Comparaison LULC 2016 et 2024.....44
Tableau 8: Matrice de confusion 45
Tableau 9: Synthèse des résultats de validation de la carte LULC 45

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

ANA : Articles Non Alimentaires

AP : Alerte Précoce

BPEAE : Bureau Provincial de l'Environnement, de l'Agriculture et l'Elevage

BV : Bassin Versant

CC : Changement Climatique

DTM : Displacement Tracking Matrix

GERNAC : Gestion de l'Eau et des Ressources Naturelles en Afrique Centrale

IFRC : International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies

IGEBU : Institut Géographique du Burundi

ISTEBU : Institut de Statistiques et d'Etudes économiques du Burundi

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GPS : Global Positioning System

KML : Kyhole Markup Language

LULC : Land Use Land Cover

MAM : Mars, Avril, Mai

MD : Maisons Détruites

MDC : Maisons Détruites Complètement

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

MI : Maisons Inondées

MINATTE : Ministère de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de l'Environnement

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MPD : Maisons Partiellement Détruites

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée (IVDN)

OBPE : Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

OCHA : United Nations Office for the Coordination of Humanitarian

OIM : Organisation Internationale des Migrations

ONG : Organisation Non Gouvernementale

ONU : Organisation des Nations Unies

PAM : Programme Alimentaire Mondial

PFN-PRGC : Plateforme Nationale de Prévention des Risques et Gestion Catastrophes

PND : Programme National de Développement

PRGC : Prévention des Risques et Gestion des Catastrophes

RDC : République Démocratique du Congo

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

RN1 : Route Nationale 1

RRC : Réduction des Risques de Catastrophes

SOND : Septembre, Octobre, Novembre, Décembre

SIG : Systèmes d'Information Géographique

UB : Université du Burundi

USGS : United States Geological Survey

AVANT PROPOS

Le présent mémoire intitulé « Contribution à l'étude des inondations dans la partie Nord de la ville de Bujumbura » a été réalisé avec l'utilisation des données d'observation de la terre et couvre une partie de la commune Mutimbuzi et Ntahangwa respectivement dans les provinces de Bujumbura Mairie et Bujumbura communément appélé Bujumbura rural. Cette partie est connue pour avoir été touchée par les inondations récurrentes avec des dommages importants tant matériels qu'humains. Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre de la finalisation du cycle de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, spécialité génie de l'environnement.

L'idée de ce travail nous est venu à l'esprit grâce aux observations directes sur terrain des impacts négatifs liés à la réccurence des inondations dans la partie nord de la ville de Bujumbura, mais aussi l'amplification de leur fréquence et leur intensité.

L'objectif du présent travail de recherche est de réaliser une caractérisation spatio-temporelle de l'aléa et d'évaluer leur susceptibilité dans un contexte d'anthropisation d'un environnement tropical à forte croissance urbaine.

Hormis l'introduction, la conclusion, les recommendations, les références bibliographiques et annexe, ce mémoire est articulé sur trois chapitres.

Le premier chapitre porte sur la revue de la litérature en mettant l'accent sur les concepts clés, la typologie des inondations, leur impacts mais aussi leur répartition spatiale. Pour ce qui concerne le deuxième chapitre, il se concentre sur les matériels et méthodes aux quels nous avons fait recours pour réaliser cette recherche.

Enfin, le troisième chapitre concerne la présentation des résultats et leur intérprétation avant de terminer sur la conclusion et les recommandations. Les résultats de ce mémoire peuvent aider à la prise des décisions par rapport aux localités identifiées comme zones à haut risque d'inondations.

0. INTRODUCTON GENERALE

0.1. Contexte et justification

Les dégâts dus aux inondations, à la sécheresse et aux tempêtes ont été jusqu'à quinze fois plus élevés dans les pays du Sud au cours de la dernière décennie (Hervé, 2023). Le constat du nouveau rapport du GIEC, qualifié *« d'atlas de la souffrance humaine »* par le Secrétaire Général de l'ONU Antonio Guterres, est une nouvelle fois sans appel. Les impacts du changement climatique ont des effets néfastes importants sur la nature et les populations dans toutes les régions, affectant particulièrement les plus vulnérables, et les mesures d'adaptation déjà en place sont loin d'être suffisantes.

Les conséquences en termes de pertes de vies humaines, de diminution de la production agricole et de dommages sur les infrastructures sont appelées à devenir de plus en plus graves et la situation de plus en plus précaire si rien n'est fait (Borde et al., 2015).

Tous les secteurs de l'économie tels que l'agriculture, les infrastructures, la pêche, la foresterie, le tourisme,… sont touchés. Ainsi, l'adaptation aux changements climatiques est un enjeu majeur, afin d'assurer non seulement le développement durable du pays mais aussi la sécurité alimentaire des populations les plus fragiles (Borde et al., 2015).

Plus de 600 millions de personnes dans le monde vivent dans la zone côtière (altitude inférieure à 10 m par rapport au niveau de la mer) et les tendances migratoires prévoient une augmentation à plus d'un milliard d'ici 2050 (Barnard et al., 2019)**.**

De plus, la gestion des inondations doit faire face à des défis nouveaux. Par exemple, les gestionnaires sont confrontés à la prise en compte d'incertitudes croissantes, comme celles liées à l'évolution climatique dont les effets sont encore assez méconnus sur les phénomènes hydrauliques (Lhomme, 2012).

La Priorité n°1 du cadre d'Action de Sendai stipule qu'il faut comprendre les risques de catastrophes. La gestion des risques de catastrophes doit s'appuyer sur la compréhension de tous les paramètres qui les influencent, à savoir les vulnérabilités, les moyens et compétences, l'exposition des personnes et des actifs, les caractéristiques des aléas et l'environnement (Quenault, 2015).

La connaissance des risques à tous les niveaux stimule la prise de décison pour réduire les risques de catastrophes. Selon le rapport de l'IFRC en 2014, au Burundi, les inondations sont

connues depuis plusieurs décennies et les recherches antérieures ont montré que même dans le passé, des dégâts matériels et humains ont été enregistrés (IGEBU-PAM : Modèles SIG sur les risques d'inondations de la ville de Bujumbura). Par exemple, dans la nuit du 9-10 février 2014, des inondations cruelles avec des débris liées aux fortes pluies ont frappé les quartiers nord de la ville de Bujumbura causant des dégâts considérables dont 64 personnes tuées y compris de nombreux enfants, 182 personnes blessées parmi lesquelles figurent 84 personnes grievement blessées. On estime que 12 500 personnes se sont retrouvées sans abris après la destruction complète de plus de 940 maisons.

Selon (Nkunzimana et al., 2020), la station météorologique de Bujumbura a enregistré 80 mm, soit le dixième des précipitations annuelles de cette localité. Ces pluies ont déclenché un fort ruissellement sur des pentes abruptes qui a emporté certaines maisons, causant environ 70 morts et de nombreux blessés, laissant 20 000 personnes sans abris.

Se trouvant le long du lac Tanganyika dans la branche occidentale du rift Est africain, Bujumbura est connue pour être touchée par les inondations fluviales, lacustres et des crues soudaines, c'est-à-dire des processus qui se produisent souvent en interaction (Nibigira et al., 2018; Kubwimana et al., 2021).
En 2024, les inondations ont été catastrophiques entraînant des déplacements massifs des populations suite à l'extension spatiale du lac Tanganyika et le débordement des cours d'eau notamment la rivière Rusizi.

L'augmentation de la fréquence et l'intensité des inondations durant ces dernières années a attiré notre attention pour faire une recherche y relative. Le but global étant de contribuer à l'analyse des inondations récurrentes dans la partie Nord de la ville de Bujumbura afin de dégager une meilleure compréhension du processus d'inondation permettant ainsi de développer des stratégies pour une gestion durable, efficace et accessible de cet aléa.

Le présent travail de recherche prend racine dans notre constat de la récurrence des inondations en Mairie de Bujumbura avec des dommages importants en termes de pertes en vies humaines, matériels et des moyens de subsistance. L'augmentation excessive de la population exposée aux risques d'inondations, la récurrence, l'amplification de la fréquence et l'intensité des inondations nous a poussé à nous intéresser sur ce sujet en vue de pouvoir contribuer à faire un éclairage sur les méthodes/stratégies de prévention des risques et de gestion des catastrophes.

0.2. Pertinence

La population installée dans la zone d'étude subie régulièrement des dommages liés aux inondations catastrophiques. La pertinence de cette recherche consiste à faire un éclairage scientifique à côté des interventions qui sont menées régulièrement en matière de gestions des risques d'inondations. Cet éclairage permet de faire la caractérisation spatio-temporaire des inondations, leur susceptibilité mais aussi des stratégies d'atténuation des risques d'inondations.

0.3. Problématique

Pour notre zone d'étude, la problématique qui a attiré notre attention est la récurrence des inondations dans la partie nord de la ville de Bujumbura avec des dommages importants en termes de pertes en vies humaines, matériels et des moyens de subsistance. Pour aborder ce sujet, il est important de soulever les questions pouvant orienter cette recherche :

Quelles sont les causes majeures des inondations récurrentes dans la partie Nord de la ville de Bujumbura ?

Quels sont les impacts entraînés par les inondations ?

Quelles stratégies de réduction des risques d'inondations ?

0.4. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette recherche est de contribuer à l'analyse des inondations récurrentes dans la partie Nord de la ville de Bujumbura.

Comme objectifs spécifiques, il sera question de :

- réaliser une caractérisation spatio-temporelle de l'aléa
- évaluer leur susceptibilité dans un contexte d'anthropisation d'un environnement tropical à forte croissance urbaine
- Proposer les mesures d'atténuation des risques d'inondations.

0.5. Hypothèses de l'étude

Face à ces multiples questions, les réponses suivantes sont données à l'avance, les inondations dans la partie Nord de Bujumbura seraient dues à la dégradation de l'environnement dans les bassins versants en amont de la ville de Bujumbura ainsi que des pluviométries élevées observées durant ces dernières décennies.

Les impacts d'inondations seraient les pertes des vies humaines, la destruction des infrastructures socioéconomiques, des maisons individuelles et leurs moyens de subsistance.

0.6. Structure du Mémoire

Le présent mémoire permettra de répondre aux objectifs généraux et spécifiques et sera abordé en trois chapitres qui fournissent une structure logique et qui permettent de délimiter les étapes clés du projet.

(i) Le premier chapitre concerne la revue de la littérature sur les inondations.

(ii) Le deuxième chapitre concerne les matériels et méthodes utilisés pour atteindre les résultats.

(iii) Le troisième chapitre s'articule sur la présentation et l'interprétation des résultats par rapport aux objectifs fixés dès le départ dans la présente recherche avant de terminer sur la conclusion et les recommandations.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Notions de base pour l'étude des inondations

I.1.1. Définitions

Une inondation : Selon le dictionnaire de géographie, une inondation est un aléa caractérisé par une hausse du niveau de l'eau au-delà de ses côtes habituelles. C'est un phénomène naturel dans de nombreux écosystèmes, notamment littoraux, marécageux ou fluviaux. Pour Larousse, c'est la submersion des terrains avoisinant le lit mineur d'un cours d'eau.

Aléa : Probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel, potentiellement dangereux et susceptible de causer des dommages aux biens et hommes (Flageollet, 1989).

S'agissant d'une **catastrophe**, la catastrophe est un événement néfaste ou désastreux, social et culturel, fédérateur et extraordinaire. La catastrophe est aussi définie comme un événement qui échappe à la domination d'un groupe humaine, dépassant sa capacité d'absorption , capacité technique, économique, culturelle ou mentale, ce qui crée une rupture et met en place une série d'oppositions entre l'avant et l'après (Quenet, 2000).

Vulnérabilité : Importance des dégâts ou des pertes résultant de l'occurrence d'un phénomène donné (Flageollet, 1989). La vulnérabilité, au sens propre de la science, est un terme polysémique et chaque auteur en donne une définition, ce qui engendre divergences et lacunes pour la gestion du risque (Barroca et al., 2013) .

Risque : est interprété comme la confrontation de l'aléa avec la vulnérabilité, en lieu donné et à un moment donné (Gatti et al., 1993).

Susceptibilité : Propriété de ce qui est en état d'éprouver intensement quelque chose, d'être affecté facilement par quelque chose, Le terme susceptibilité est utilisé pour regrouper les facteurs de vulnérabilité qui décrivent les faiblesses et les défaillances du système étudié et qui contribuent à la situation de vulnérabilité (Birkmann et al., 2013).

Crue : Selon le dictionnaire Larousse, la crue est définie comme étant l'élévation du niveau d'un cours d'eau, résultant de la fonte des neiges ou des glaces ou de pluies abondantes.

I.1.2. Répartition des inondations

Les inondations constituent l'un des risques de catastrophes les plus connus et les plus répandus dans le monde entier. Elles se manifestent avec une grande ampleur principalement le long des zones côtières (mers ou océans) et dans les petits Etats insulaires. De plus, les changements climatiques augmentent l'exposition des villes côtières à cet aléa et la fréquence des désastres. Pour le continent africain, plusieurs capitales bordant l'Océan Atlantique enregistrent des inondations, qu'elles soient périodiques ou permanentes depuis 2000. La figure 1 montre certaines villes situées au bord de l'Océan Atlantique qui subissent de plein fouet le phénomène d'inondation dont l'intensité et le bilan varient d'une ville à l'autre, d'un site à un autre.

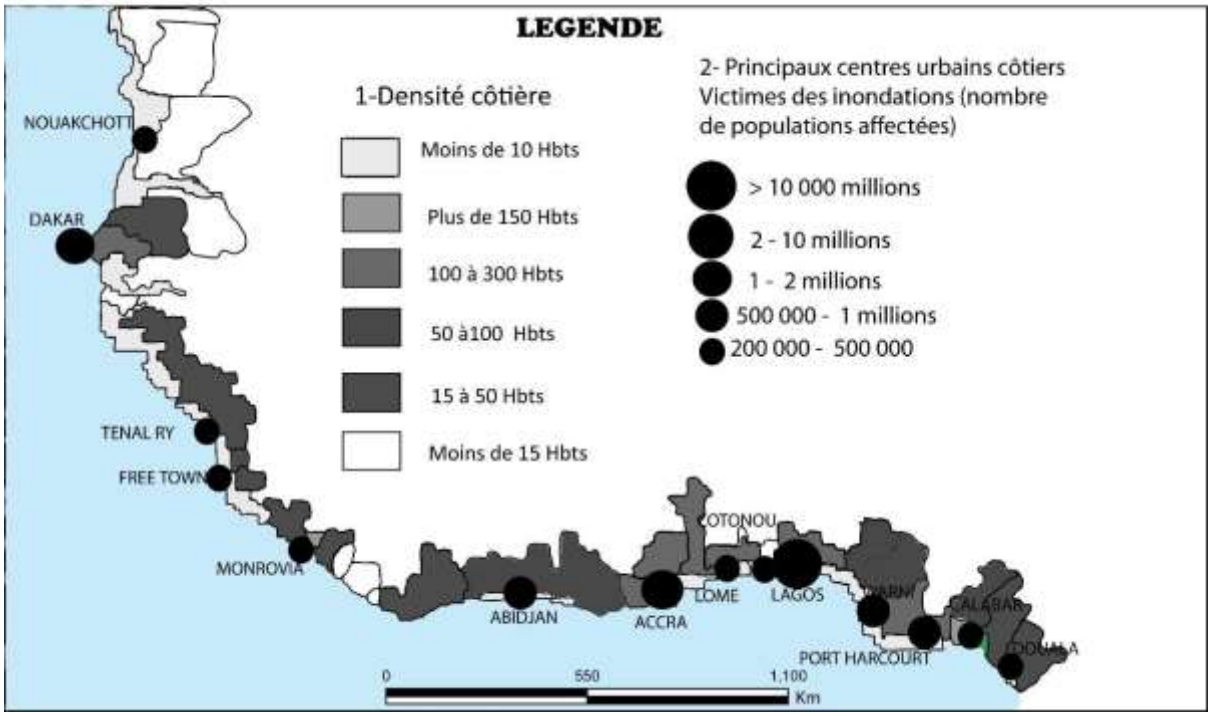


Figure 1: Les pays d'Afrique Atlantiques victimes des inondations. (Source : adapté du Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest, 2007) (Tchindjang et al., 2019)

Dans la région désertique, les inondations du fleuve Niger sont catastrophiques avec deux pics Août et septembre et Novembre et Février. La figure 2 illustre le fleuve Niger dans la capitale Niamey en 2000.



Figure 2: Inondation du fleuve Niger autour et dans la capitale Niamey en Septembre 2020. (Gosset et al., 2023)

Au niveau régional, les inondations sont signalées notamment en Tanzanie, en RDC et partout dans les pays de l'Est. .

En RDC, l'année de 2024 a été une période dure à supporter, à cause des inondations qui sont survenues à Kinshasha résultant des crues du fleuve Congo qui a sorti de son lit. De novembre 2023 à janvier 2024, 18 des 26 provinces de la République Démocratique du Congo (RDC) ont été touchées par des pluies torrentielles qui ont entraîné ces inondations sans précédent, aux conséquences tragiques.

Au Burundi, les inondations sont signalées pendant les mois les plus pluvieux de l'année et les conséquences augmentent au fur des années. Ainsi, des inondations catastrophiques sont signalées dans la plaine de l'Imbo, dans les dépressions de l'Est et le long des cours d'eau au niveau des marais.

1.1.3. Types d'inondations

D'une manière générale, il existe plusieurs types d'inondations. Citons entre autres:

i) les inondations fluviales ;

ii) les ondes de tempête ;

iii) les crues soudaines

iv) etc

I.1.3.1. Inondation fluviale

Les inondations fluviales sont généralement le résultat des précipitations abondantes et prolongées. Lorsque l'eau ne peut plus être absorbée par la nature environnante, elle s'écoule dans le cours d'eau et le niveau de l'eau monte.

L'élévation rapide des niveaux d'eau signifie que même les lits des cours d'eau et les digues ne peuvent plus retenir l'eau, ce qui provoque l'inondation des zones situées à proximité immédiate. Ces inondations peuvent durer plusieurs jours, voire plusieurs semaines et entraîner des dommages inestimables. La figure 3 représente schématiquement l'inondation fluviale qui résulte des pluies torrentielles dans un bassin versant considéré, et par le mécanisme des réseaux de drainage des eaux de ruissellement, les cours d'eau débordent et les crues causent des dommages importants. Ces inondations sont entraînées par de nombreux facteurs entre autres les précipitations intenses, fonte de neiges, défaillance des ouvrages de gestion de l'eau, urbanisation excessive, changement climatique, etc. Les inondations entraînent des impacts pouvant mettre sous l'eau une ville entière (Figure 4 a et b). Sur cette figure nous constatons des maisons complètement englouties dans les eaux résultant de l'action combinée du débordement de la Rusizi et l'extension du lac Tanganyika à Gatumba.

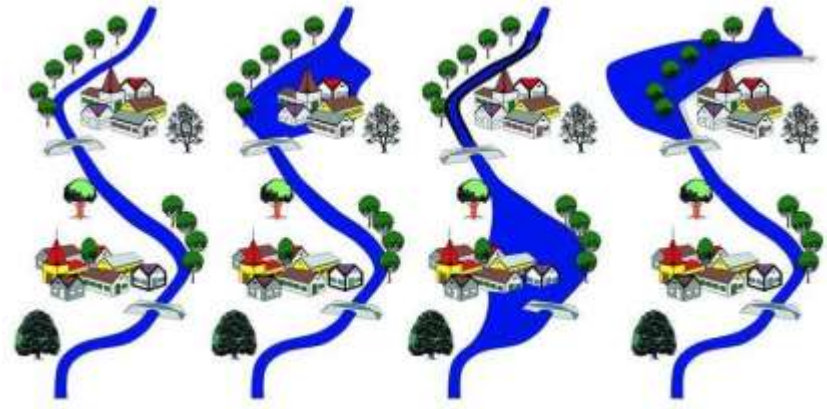


Figure 3: Représentation d'une inondation fluviale ; https://www.researchgate.net/ au 10 octobre 2024



(a) (b)

Figure 4: Inondation fluviale Gatumba (source : Journal iwacu)

I.1.3.2. Ondes de tempête

Pendant une marée d'orage, l'eau des mers ou des lacs est poussée vers la côte ou le rivage par de forts vents. Les hautes vagues peuvent inonder les terres et provoquer des inondations. La prudence est de mise, surtout dans les zones côtières.

Une onde de tempête est différente d'un tsunami. Un tsunami se produit à la suite d'un séisme sous-marin et n'est donc pas une inondation au sens classique du terme.

I.1.3.3. Crues soudaines

Les inondations sont les catastrophes naturelles les plus répandues et les plus coûteuses à l'échelle mondiale**.** L'anticipation des zones inondées est particulièrement ardue car ces crues peuvent survenir sur des bassins versants de faible superficie et pour de petits cours d'eau rarement en eau (Poulin et al., 2012).

Les crues soudaines sont causées par des précipitations particulièrement abondantes et des tempêtes lorsque l'eau produite ne peut plus être absorbée par le sol, dans certains cas, même loin de grands plans d'eau.

Les inondations se produisent généralement en très peu de temps et sont donc difficilement prévisibles. C'est pourquoi il est particulièrement difficile de se préparer à une crue soudaine.

I.1.4. Impacts associés aux inondations

Les impacts associés aux inondations sont multivariés ; nous pouvons citer des pertes en vies humaines, des personnes bléssées, destruction d'infranstructures d'importance nationale (routes, chemins de fer, ponts, ouvrages hydrauliques, champs agricoles, perte de la biodiversité, et bien d'autres dégâts) sans oublier la recrudescence des maladies liées à l'hygiène et assainissement. Le tableau 1 montre le bilan entraîné par les inondations pour la période de 1990 à 2015 dans les pays se trouvant sur la bordure de l'océan Atlantique.

Tableau 1: Bilan de quelques inondations en Afrique centrale et occidentale entre 1990 et 2015 (Tchindjang et al., 2019).

Date /année	Pays ou régions et ville	Bilan
Saison de pluies 2010	Afrique de l'Ouest et du Centre	377 décès et 1500000 sans abris
	Nigeria	118 décès
	Ghana	52 décès
	Mauritanie	21 décès
	Bénin	43 décès
	Burkina Faso	16 décès
	Gambie	12 décès
	Cameroun	13 décès
	Tchad	24 décès
18 juillet 1996, 11 juin 1997, 20 octobre 1998	Abidjan (Koumassi, Abobo, Marcory, Riviera, Yopougon	1mort, 1 disparu, 3 blessés, dégâts matériels
2009	Dakar et banlieue	360 000 sinistrés à Pikine, avec 371 quartiers pour 28053 concessions inondées : 22 000 à Guédiawaye pour 27 quartiers et 1587 concessions
2010	Bénin	100 000 sans-abris, 43 morts, 800 cas de choléra, 40% de la production de riz détruit
Août 2008	Accra	4morts et 150 sans abris
20 juin 2010 26 oct 2011	Accra UNEP/OCHA, 2011	15 morts, 2200 sans abri 14 morts, 43 000 affectés et 17 000 sans abri
8juin 2015	Accra	Inondations et incendie ont fait 10 000 victimes dont 150 morts ; 1125 maisons endommages et 67 personnes hospitalisées

Juillet 1988 et juillet 1990	Lagos	5 morts, 3500 personnes affectées, beaucoup de dommages matériels
10 juillet 2011 20 octobre 2011	Lagos	19 disparus 10 morts, des milliers de personnes affectés, destruction des routes, écoles, ponts et habitations
1juin 2015	Douala	4morts, 2000 déplacés, 30 000 affectés, des milliers de commerces et logements détruits
26 mars 2015	Luanda	9 morts, 4 disparus, 500 maisons touchées, coupure de la route du port de Luanda par un glissement de terrain
21-22 mars 2017	Luanda	11 morts, 500 000 personnes affectées, 5000 écoles maisons et centres de santé inondés, 340 familles sans abri

Comme ce tableau ci-dessus l'indique, les impacts liés aux inondations sont très considérables et les capacités de reconstruction dans différents pays restent un problème majeur à cause du manque de moyens financiers importants. La figure 5 montre clairement à titre comparatif par pays, l'occurrence et le nombre de victimes des inondations qui sont survenues dans les pays d'Afrique Atlantique.

De la même manière, la figure 5 présente les localités durement touchées par les inondations et les victimes enregistrées.

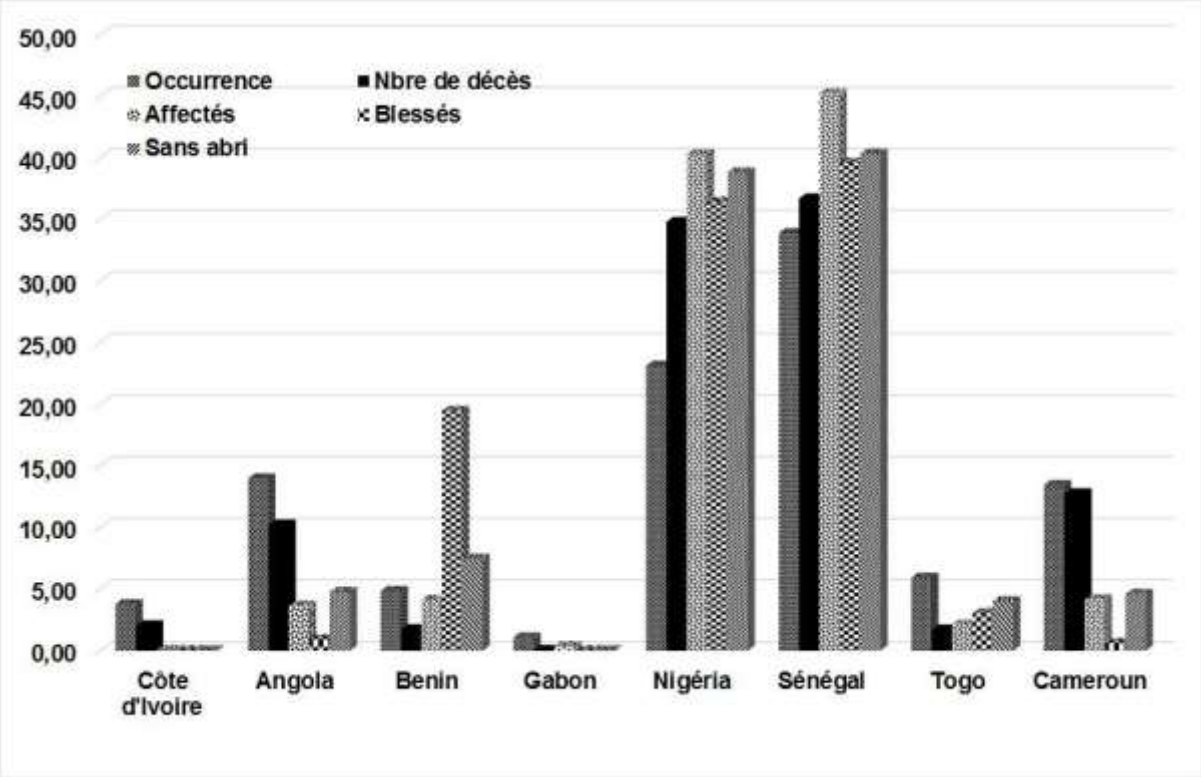


Figure 5: Synthèse de l'occurrence et du nombre de victimes des inondations pour quelques pays d'Afrique Atlantique(Tchindjang et al., 2019)

Pour ce qui concerne les pays touchés, plus un pays est proche de grands réservoirs d'eau en l'occurrence les mers et les océans, plus ce pays est susceptible de subir des inondations catastrophiques et d'une manière récurrente.

Ainsi, la figure 6 fait la comparaison des endroits les plus durement affectés par les inondations ainsi que le niveau d'affectation.

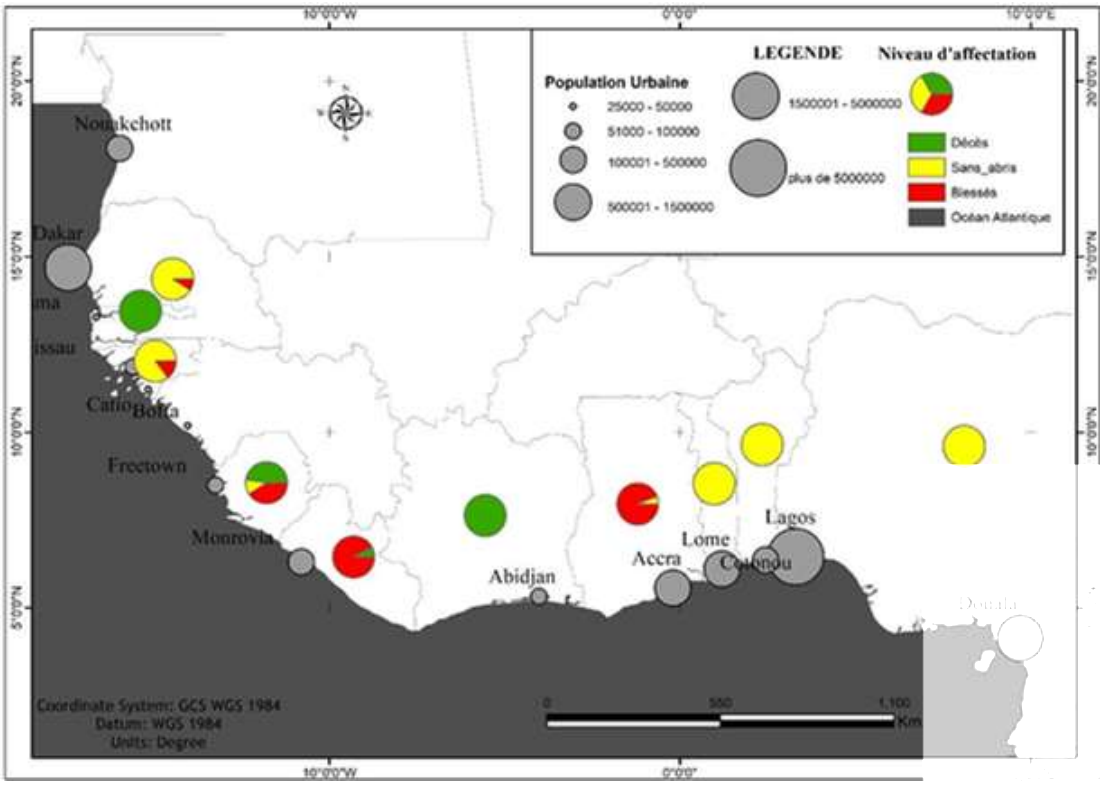


Figure 6: Cumul total du phénomène des inondations et de la vulnérabilité(Tchindjang et al., 2019)

Etant donné que le phénomène d'inondation se manifeste partout avec des causes différentes, les dommages enregistrés varient considérablement d'un pays à l'autre ou d'une localité à une autre. Le tableau 2 illustre les grandes régions d'Afrique qui sont touchées par les inondations ainsi que leurs impacts principalement les pertes en vies humaines.

Tableau 2: Impacts des inondations en afrique (Jha et al., 2011)

Années	Pays	Nr de morts	Pertes en dollars (en millions)
2000	Mozambique, Zimbabwe, Afrique du sud	1000	715
2001	Algérie	750	300
2007	Soudan	150	300
2009	Afrique de l'Ouest	215	300

Pour ce qui concerne la plaine de l'Imbo au Burundi, le tableau 3 montre les dommages enregistrés principalement à Gatumba qui est régulièrement touché par les inondations chaque année pendant la saison des pluies.

Tableau 3: Quelques impacts d'inondation dans la plaine de l'Imbo (source : OIM/DTM)

Localités touchées	Date	Individus affectés		Destructions des maisons				Autres dégâts	Impacts humains	Besoins d'urgences
		Non Déplacés	Déplacés	MD	MPD	MDC	MI			
Ntahangwa	27/12/2023	4204	1197	93	54	0	1026	-	1 pers. décédée et 1 pers. blessée	Vivres, abris, assainissement, ANA, sante
Mmutimbuzi (Kinyinya II)	28/1/2024	263	29	0	0	0	25	-	-	Abris, vivres, ANA
Mutimbuzi (Kinyinya I)	29/1/2024	806	603	0	0	6	0	6 salles de classes détruites	3 personnes blessées	Vivres, abris, ANA
Mutimbuzi	1/1/2024	5017	288	0	0	0	1090	1 structure sanitaire, 18 églises, 3 mosquées et 10 écoles sont détruites	-	Vivres, abris, ANA, assainissement
Mutimbuzi	8/01/2024	441	365	0	0	0	179	23 salles de classes inondées	-	Vivres, Abris, ANA
Mutimbuzi	3/03/2024	6388	4674	0	0	0	2368	82 salles de classes, 33 églises et 5 mosquées sont inondés	-	Vivres, abris, ANA

I.1.5. Facteurs de contrôle des inondations

Dans de nombreux pays, les rivières sujettes aux inondations sont souvent gérées avec soin. Des défenses telles que des digues, des diguettes, des réservoirs et des barrages sont utilisés pour empêcher les rivières de déborder. Lorsque ces défenses échouent, des mesures d'urgence telles que des sacs de sable ou des tubes gonflables portables sont utilisées.

Pour maximiser le coefficient d'infiltration , il est important de créer ou restaurer des surfaces végétalisées (parcs urbains, toitures végétalisées), favoriser des revêtements perméables de type sol naturel, surfaces d'écorces naturels, pavés, dalles alvéolaires, surfaces de gravillons, de graviers-gazon…

En fonction du type d'inondations et des morphologies spatiales, les mesures à faire comprennent les murs anti-inondation, les écluses, les digues et les voies d'évacuation . Les mesures non structurelles réduisent les dommages en éloignant les personnes et les biens des zones à risques. Elles comprennent les structures surélevées, les rachats de propriétés, les relocalisations permanentes, le zonage, la subdivision et les codes du bâtiment.

I.2. Description de la zone d'étude

I.2.1. Localisation de la zone d'étude

Cette zone d'étude qui fait objet de notre recherche s'étend de la rivière Ntahangwa dans sa partie Est et Rusizi sur la frontière Burundo-congolaise. Elle couvre une partie de la commune urbaine de Ntahangwa et une partie de la zone Gatumba en commune Mutimbuzi de la province Bujumbura. Selon le nouveau découpage administratif, elle est localisée dans la commune urbaine de Ntahangwa.

La localisation de notre zone d'étude se présente comme suit :

- Au Sud, se trouve le lac Tanganyika ;
- Sud-Est se trouve la Commune urbaine de Mukaza ;
- Au Nord se trouve la commune Gihanga ;
- A l'Ouest se trouve la RDC.

La figure 8 montre notre zone d'étude qui est localisée dans un pays se trouvant au cœur de l'Afrique, et qui appartient dans la communauté des Etats d'Afrique de l'Est.

Au Burundi, la zone d'étude se trouve dans la partie Ouest du pays faisant face à la frontière avec la RDC.

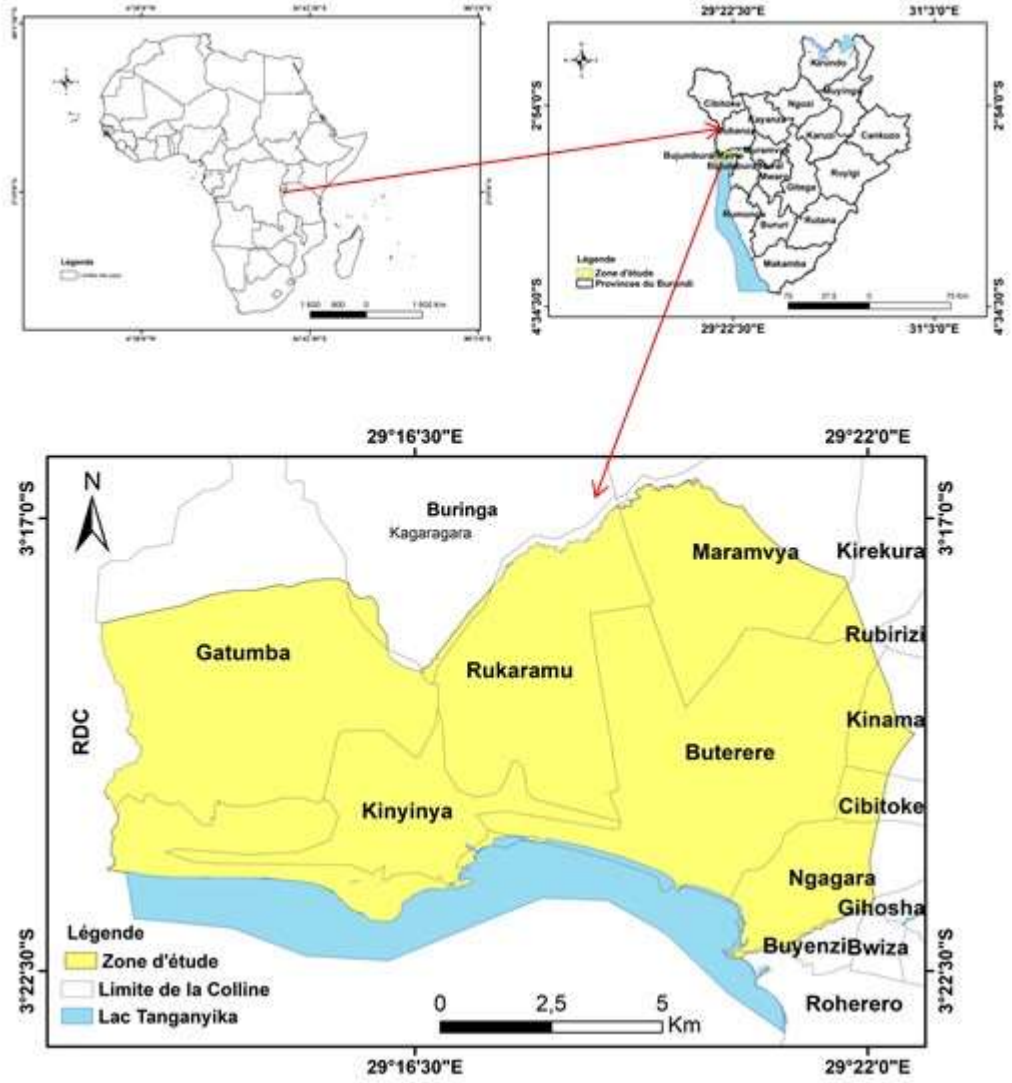


Figure 7: Localisation de la zone d'étude (partie nord de la ville de Bujumbura)

Cette zone d'étude couvre une superficie d'environ 122 km^2.

I.2.2. Relief et morphologie

Le profil en long du Mirwa vers l'Imbo est convexe, la pente est plus forte vers le haut (Mirwa) et faible vers l'aval (Imbo). La ville de Bujumbura est située sur la rive Est du lac Tanganyika, dans la vallée du rift occidental africain.

Cette situation lui confère une topographie aux pentes abruptes avec des écoulements torrentiels, depuis les hautes montagnes qui forment la crête Congo-Nil puis aux pentes très faibles dans la plaine avec des divagations naturelles des cours d'eau et des écoulements insuffisants (Alphonse, 2014).

S'agissant de notre zone d'étude, elle est constituée par la plaine de l'Imbo qui présente une faible pente. Elle est surplombée par les montagnes à pente raide dans les contreforts des Mirwa ou de la Crête Congo-Nil.

La notion du relief joue un rôle très prépondérant, dans la mesure où il commande l'écoulement des eaux. La partie de plaine est souvent envahie par les inondations catastrophiques résultant de l'action combinée du débordement des cours d'eau et de l'extension spatiale du lac Tanganyika.

I.2.3. Géologie

Notre zone d'étude est située dans le fossé d'effondrement du grand rift est africain, partie occidentale. Elle est constituée par des dépôts du pléistocène moyen (Pm) et des alluvions de fonds de vallées et de basses terrasses d'âge Holocène (Ho). La figure 8 illustre les unités géologiques qui sont présentes dans notre zone d'étude.

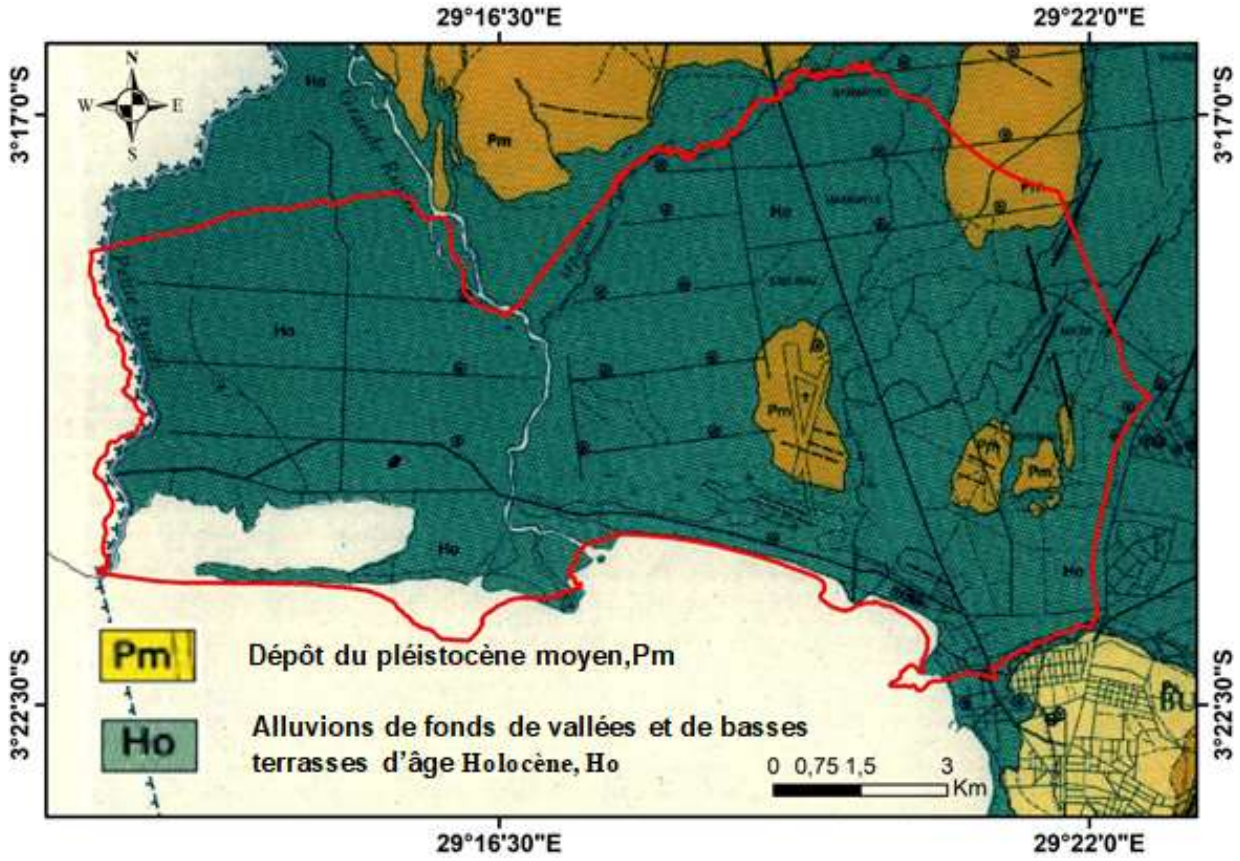


Figure 8: Carte géologique de la zone d'étude (Laghmouch et al., 2018)

I.2.4. Climat

I.2.4.1. Précipitations

Le climat du Burundi est tropical humide influencé par l'altitude qui varie entre 773 m et 2670 m. Il est caractérisé par une alternance de la saison pluvieuse qui s'étend généralement du mois d'octobre à mai et de la saison sèche qui va de juin à septembre. La pluviométrie moyenne annuelle pour le Burundi est de 1274 mm de pluie (MEEATU, 2013).

Le climat varie en fonction de l'altitude. En effet, les altitudes supérieures à 2000 m, matérialisées par la crête Congo-Nil ont des précipitations moyennes annuelles comprises entre 1400 mm et 1600 mm. Nous observons deux grandes saisons, la grande saison pluviale Mars –Avril et la grande saison sèche Juin-Août ainsi que la petite saison sèche Janvier-Février et la saison pluviale A Octobre-Décembre.

Dans la plaine de l'Imbo, les précipitations sont largement inférieures à celles qu'on observe dans les régions de haute altitude (contreforts des Mirwa et Crête Congo Nil).

Cette partie reçoit une pluviométrie moyenne annuelle qui s'intercalle entre 900 et 1000 mm/an.

Le tableau 4, illustre clairement la répartition de la pluviométrie et de la température dans les régions agroclimatiques du Burundi. A travers les données fournies dans ce tableau 4, nous constatons que la pluviométrie augmente au fur et à mesure qu'on s'élève en altitude. Par conséquent, la température diminue au fur et à mesure que l'altitude augmente.

Tableau 4: Répartition de la pluviométrie par régions naturelles (MINATTE, 2005).

Régions écoclimatiques	Pourcentage de la superficie totale (%)	Altitude (en mètre)	Température moyenne annuelle (°C)	Pluie moyenne annuelle (en mm)
Plaine occidentale de l'IMBO	7%	800 - 1100	Sup. à 23 °C	800-1100
Escarpement occidental de MUMIRWA	10%	1100-1700	18°C – 28°C	1100 - 1900
Crête Congo-Nil (Mugamba-Bututsi)	15%	1700 - 2500	14°C -15°C	1300 – 2000
Les hauts plateaux centraux	52%	1350 - 2000	17°C – 20°C	1200 – 1500
Les dépressions de KUMOSO et de BUGESERA	16%	1100 - 1400	20°C – 23°C	1100 - 1550

En se basant sur les données collectées à l'IGEBU, la zone de plaine (basse altitude : 783m) est représentée par la station de l'Aéroport de Bujumbura tandis que la zone de haute altitude est représentée par la station de Rwegura localisée à 2302 m. La pluviométrie tombée dans les régions de hautes altitudes contribue enormement en apport en eau à travers les cours d'eau. A titre comparatif, les deux figures 9 et 10 montrent que la pluviométrie moyenne

annuelle dépasse rarement 1000 mm dans la plaine de l'Imbo. Les figures 11 et 12 montrent les moyennes pluviométriques annuelles pour une période de 40 ans c'est-à-dire de 1983 à 2023 pour la station de Rwegura. Ces données fournies par l'IGEBU pour les stations Rwegura et Aéroport montrent qu'il y a une grande différence de Hauteur moyenne pluviométrique annuelle.

Les régions de plaines reçoivent une pluviométrie moyenne annuelle de 1000 mm/an ou en dessous dans la mesure où celles des montagnes de la Crête Congo Nil reçoivent plus de 1500mm/an.

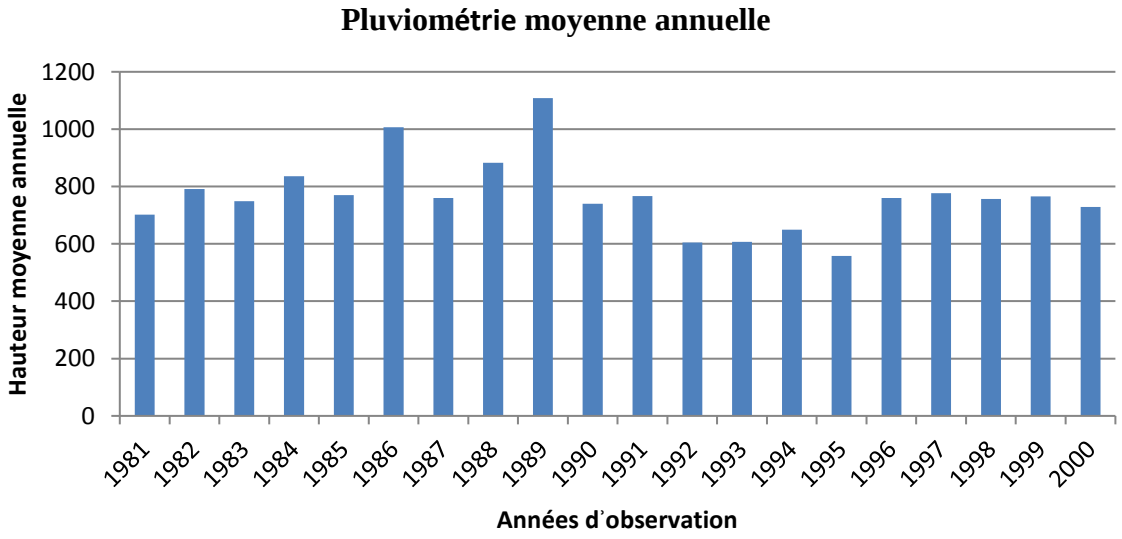


Figure 9: Pluviométrie moyenne annuelle de 1981-2000 (station Aéroport de Bujumbura)

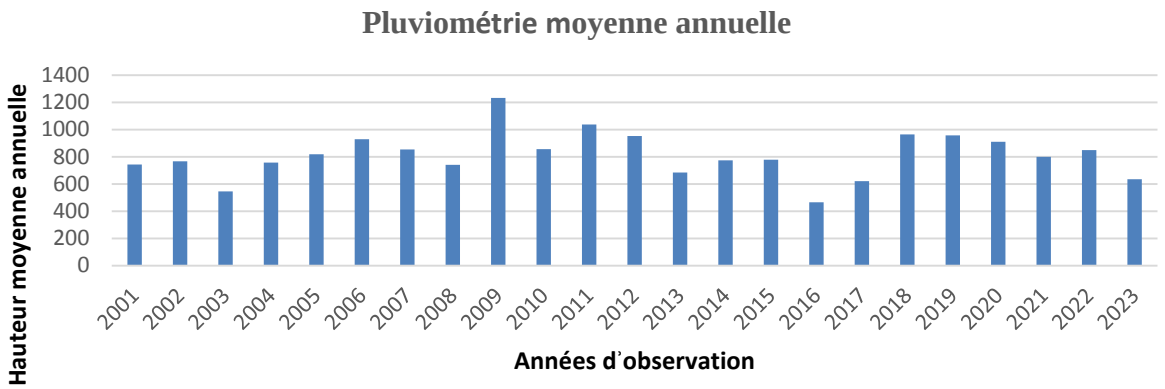


Figure 10: Pluviométrie moyenne annuelle de 2001-2023

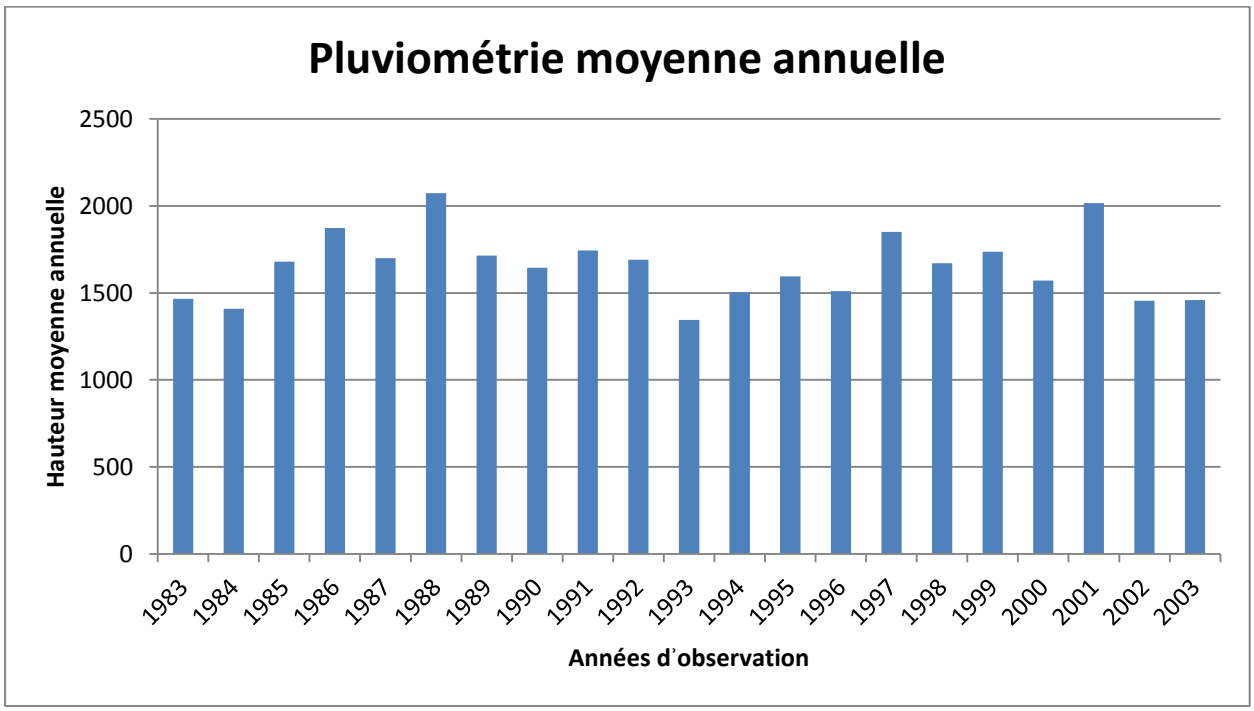


Figure 11: Pluviométrie moyenne annuelle de Rwegura de 1983 à 2003

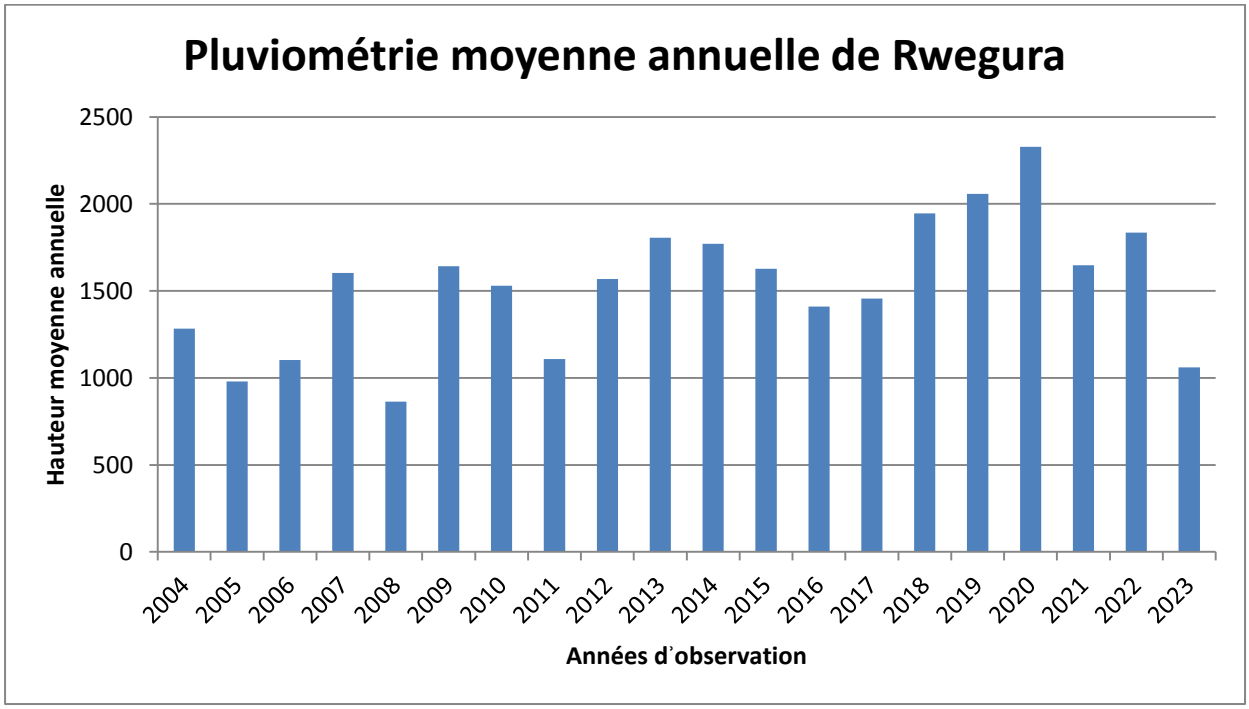


Figure 12: Pluviométrie moyenne annuelle de Rwegura de 2004 à 2023

I.2.4.2. Températures

Le régime annuel des températures donne des mois les plus chauds juste avant la saison des pluies en Septembre ou en Octobre. Le régime thermique suit le rythme des précipitations. La température dans la plaine de l'Imbo est supérieure à 23 °C avec des records de 30°C. La figure 13, montre la répartition de la température de 1983 à 2018 pour la station de l'Aéroport de Bujumbura. Notons que cette partie se présente comme étant l'une des régions qui enregistrent des températures élévées par rapport aux autres régions du pays.

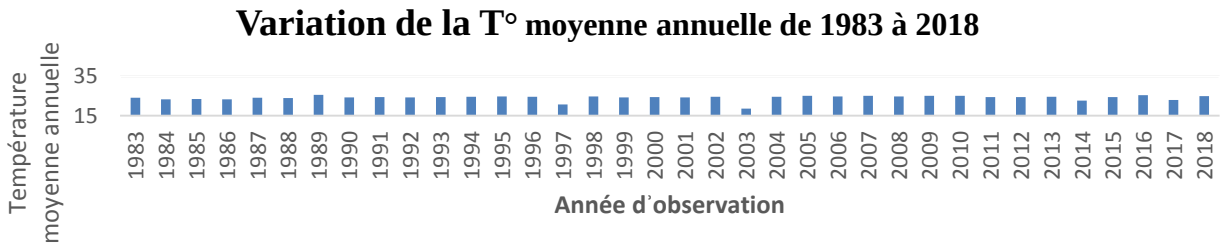


Figure 13: Variation de température de 1983-2018 (station Aéroport de Bujumbura)

I.3. Dynamique de l'occupation du sol

L'occupation du sol dans cette partie connaît des changements spatiaux et temporaires importants à cause des flux de personnes suite au mouvement de l'exode rural. Cette forte attaction humaine entraîne l'extension de la ville vers les périphéries qui jadis étaient occupées par les couvertures forestières et les zones agricoles.

A travers cette étude, nous allons faire une analyse détaillée en nous appuyant sur les données d'observation de la terre notamment les images satellitaires pour étudier les changements qui se sont opérés au cours des années antérieures en ce qui concerne l'occupation du sol.

I.4. Hydrographie

L'hydrographie de cette partie est constituée par des cours d'eau qui prennent généralement source dans les régions de hautes montagnes. Ainsi, nous distinguons de l'Est vers l'Ouest, la rivière Ntahangwa, Nyabagere, Cari, Gasenyi, Gikoma, Muzazi, Mutimbuzi, Mpanda et Rusizi.

La figure 14 montre le réseau hydrographique qui draine les eaux jusqu'au deversoir qui est le lac Tanganyika.

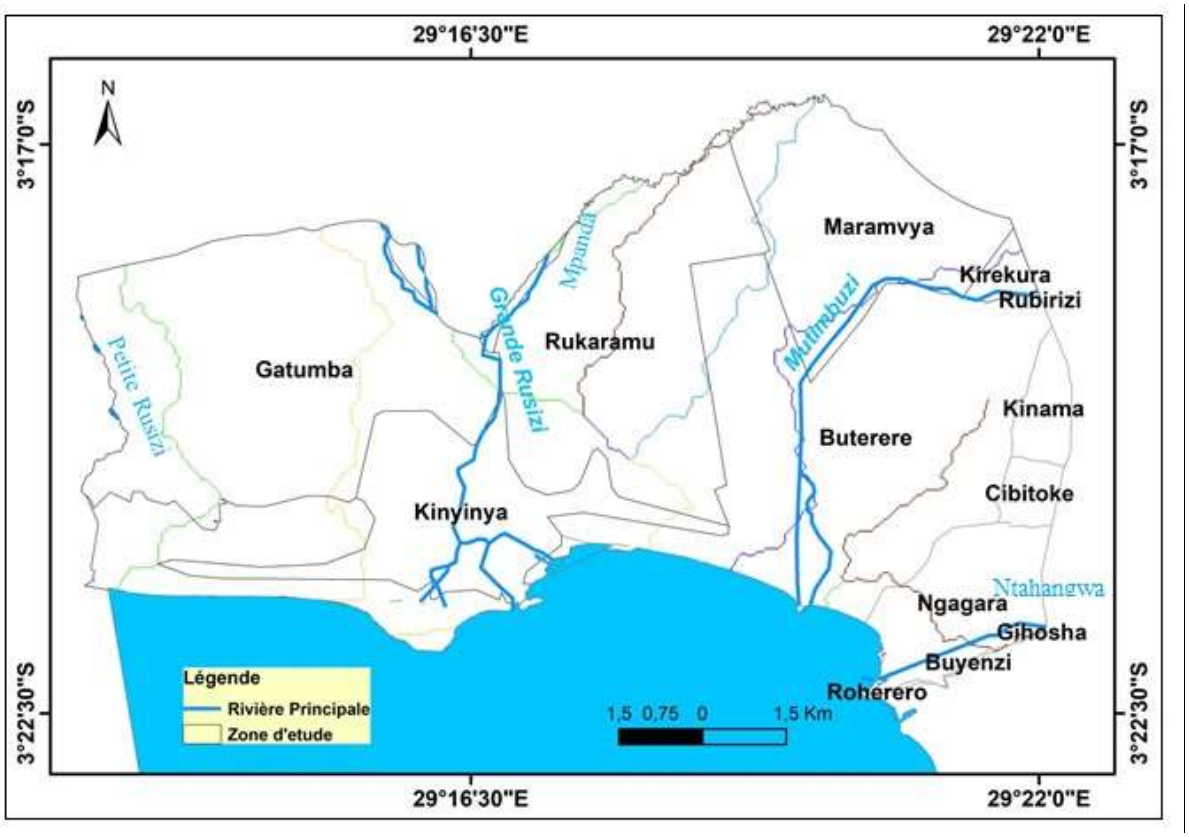


Figure 14: Hydrographie de la zone d'étude

I.5. Structure socio-économique

La population de la ville Bujumbura en 2021 est estimée à 776258 habitants. En 1956, la population de la ville de Bujumbura était de 23247 habitants. Ces estimations représentent l'agglomération urbaine de Bujumbura, qui comprend généralement la population de Bujumbura en plus des zones suburbaines adjacentes.

Nous pouvons signaler que la population dans la ville de Bujumbura est importante, quand bien même nous n'avons pas des données actualisées du récent recensement. Cette population provient généralement des autres provinces du pays à la recherche du travail.

Certaines populations pratiquent des activités du secteur primaire (agriculture, élevage, artisans, exploitants des matériaux de construction), secondaire (vente des services, fonctionnaires de l'Etat) et enfin ceux qui travaillent dans l'usine et industrie.

Pour les localités bien desservies, les populations se déplacent en transport en commun et au niveau des quartiers périphériques, ils utilisent la moto, vélo et autres types de déplacement.

Les infrastructures socio-économiques sont à proximité des ménages à la différence des localités situées en milieu rural.

Certaines populations dépendent étroitement des ressources naturelles pour leur survie (pêche, agriculture par irrigation, ressources forestières, etc.). La figure 15 montre l'augmentation de la population de la ville de Bujumbura de 1954 à 2021. Le constat au regard de l'allure de la courbe est que la population a commencé à augmenter sensiblement à partir de l'année de 2000. Notons par conséquent qu'il existe une longue période oú les données démographiques n'ont pas été trouvées.

Dans une concentration humaine, les populations entretiennent des rapports sociaux les plus importants, et constituent des nœuds d'échanges notamment à travers les services de commerce.

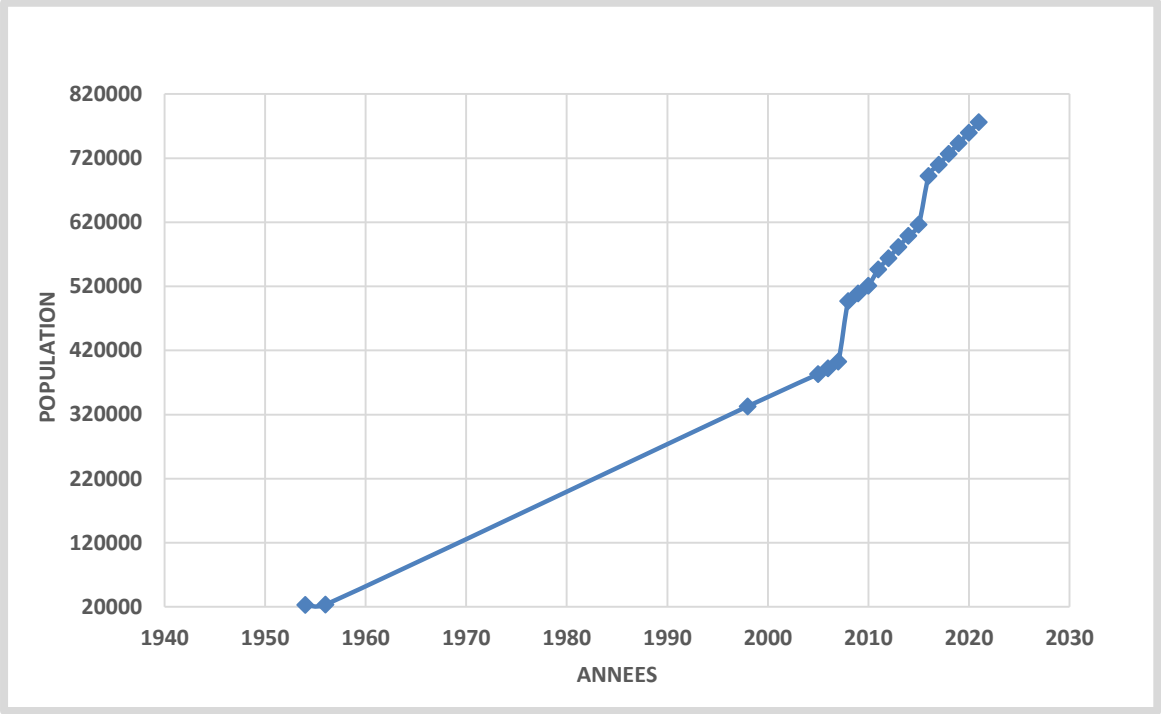


Figure 15: Evolution de la population de 1954 à 2021 (Source ISTEBU)

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

II.1. Matériels

Pour réaliser le présent travail de recherche, différents matériels ont été utilisés pour la collecte des données mais aussi pour leur traitement. Ainsi, les matériels ci-après ont été utilisés :

- GPS (précision de 3m) pour relever les coordonnées géographiques sur terrain en l'occurrence pour délimiter les zones inondées, l'extension du lac Tanganyika, etc. ;
- Smart phone pour la prise des images ;
- Carnet de terrain pour noter les observations de terrain ;
- Fiche d'enquête pour la collecte des données sur terrain dans la zone touchée par l'inondations ;
- Ordinateur pour le reste du travail à l'aide du logiciel Arc GIS.

II.2. Méthodologie

Pour réaliser le présent travail de recherche, différentes méthodologies ont été utilisées dont la recherche documentaire, l'observation directe, l'usage des données d'observation de la terre (télédétection) en faisant recours aux systèmes d'information géographique et l'enquête sur terrain.

En premier lieu nous avons consulté les archives, les documents anciens, les plans d'extension de la ville de Bujumbura et les publications scientifiques en rapport avec notre sujet de recherche.

Nous avons collecté des données auprès des institutions publiques pour bien appréhender les facteurs liés aux risques d'inondations.

En deuxième lieu, nous avons utilisé les données d'observation de la terre notamment les images satellitaires. Ces dernières ont été acquises sur des plates-formes d'imageries satellite, notamment sur https : //earthexplorer.usgs.gov/ pour le cas des images Landsat 5, 7 et 8. S'agissant des images satellites Sentinel-2, elles ont été acquises sur https://dataspace.copernicus.eu de l'Union Européenne.

Ainsi, les SIG ont été utilisés pour leur traitement en vue de dégager des cartes d'occupation du sol. Pour le satellite landsat, les images satellites de 1987, 1995, 2011 et 2022 ont été utilisées.

Concernant le satellite sentinel- 2, nous avons utilisé les images satellites de 2016 et 2024.

Après la production des cartes d'occupation du sol (LULC), nous avons fait leur validation par la méthode de création des couches points dans les cartes d'occupation du sol déjà produites (entré) et nous les avons projetées dans Google earth (sortie) pour comparaison.

Pour l'étude du changement du niveau du lac Tanganyika, nous avons fait recours au Google earth. Ainsi, des courbes d'extension du lac Tanganyika ont été digitalisées sur l'image Google earth de l'année correspondante pour étuder les variations saptio-temporaires du niveau du Lac Tanganyika.

Dans le but de pouvoir identifier le nombre de ménages touchés par les inondations, nous avons utilisé l'image satellitaire la plus récente (2024) pour digitaliser les maisons déjà inondées. Un questionnaire d'enquête a été élaboré et utilisé sur terrain. De plus, un tri aléatoire a été utilisé dans le logiciel excel pour identifier les ménages sur lesquels nous devrions administrer un questionnaire d'enquête pour nous renseigner sur les impacts d'inondations.

Pour cartographier les zones inondées, des visites de terrain ont été réalisées et à l'aide du GPS, nous avons relevé les coordonnées géographiques des points délimitant la zone inondée que nous avons enfin projeté sur les cartes pour visualisation des maisons inondées.

Pour étudier les facteurs qui influencent l'inondation, nous avons cherché les couches et différentes données pour pouvoir produire les cartes thématiques dont la géologie, hydrographie, pente, pluviométrie et bien d'autres. La figure 14 montre la méthodologie qui a été utilisée pour réaliser la susceptibilité des inondations dans notre zone d'étude. Cela inclus les paramètres de l'aléa dont la pente, l'occupation du sol (LULC), la lithologie, la densité de drainage, NDVI, la proximité du lac et la pluviométrie. La modélisation a été réalisée à l'aide des SIG.

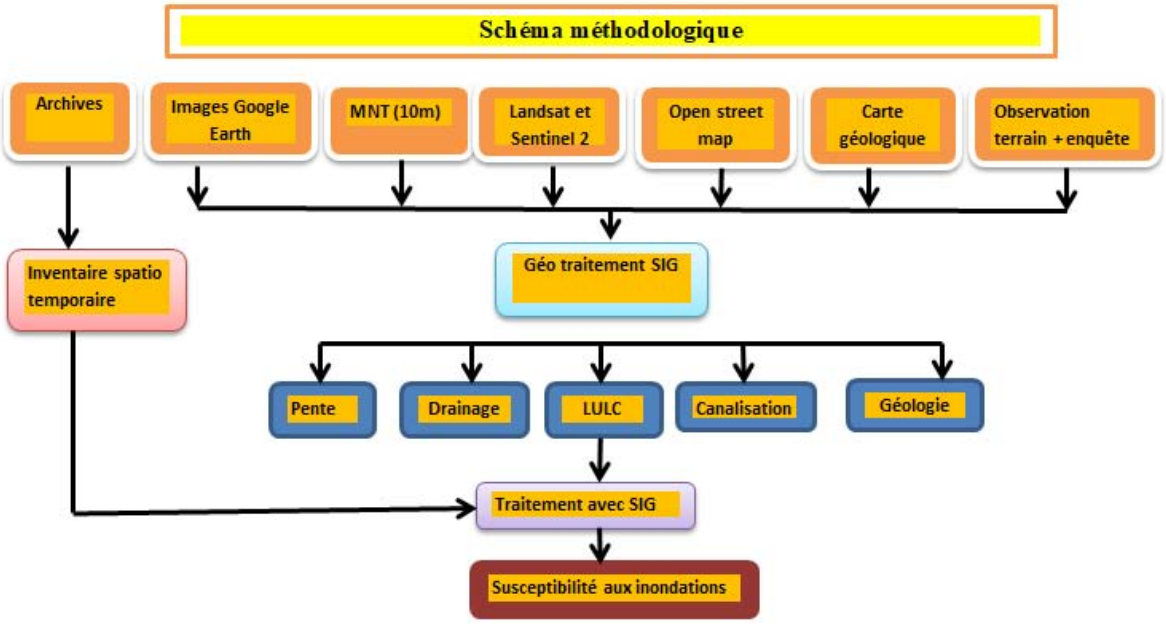


Figure 16: Méthodologie utilisée pour la modélisation spatiale de la susceptibilité aux inondations

D'une manière simplifiée, nous avons élaboré chaque carte thématique d'une façon indépendante et par après nous avons fait la reclassification des cartes thématiques. Ces cartes reclassifiées nous ont permis d'élaborer la carte de susceptibilité aux inondations en procédant à la pondération de chaque facteur.

En dernier lieu, nous avons procédé à la validation de la carte de susceptibilité aux inondations. Pour ce, nous avons élaboré la matrice de comparaison par paire et la matrice de comparaison normalisée avant de terminer sur le calcul d'indice de cohérence qui qu'on obtient avec la formule suivante.

$$CI = \frac{\lambda max - n}{n - 1}$$

$$= \frac{7.03 - 7}{7 - 1} = 0.05$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$= \frac{0.05}{1.25} = 0.04$$

CI: Indice de cohérence

CR: Rapport de cohérence

RI: Indice de Radom

Pour notre cas l'indice de Radom =1.25.

Selon (Saaty & Vargas, 1987) , Si l'Indice de cohérence est inférieur à 0,10, la matrice de comparaison est acceptable, par contre, si il est supérieur à 0,10, on reprend tout le processus de la matrice de comparaison. Pour notre cas l'indice de cohérence est de 0,04.

Concernant, les cours d'eau qui traversent notre zone d'étude, nous avons fait recours au traitement d'images provenant de Google earth pour calculer la distance, et le profil en long de ces cours d'eau afin de trouver les zones potentiellement inondables.

Le tableau se trouvant en annexe montre alors un éventail de données qui ont été utilisées. Cela inclus les images satellitaires, images de Google earth, fichiers de formes, carte géologique et des données pluviométriques.

II.2.1. Cartographie des inondations et des facteurs de contrôle par l'analyse des images satellitaires

Cette méthodologie consiste à cartographier les inondations en faisant recours d'une part aux images google earth pour digitaliser l'extension spatiale du lac Tanganyika depuis 1973. Des courbes d'extension du lac Tanganyika ont été générées, ce qui nous a permis d'établir des comparaisons.

Concernant, l'étude de la dynamique d'occupation du sol, nous avons fait recours à l'usage des images satellitaires Landsat et Sentinelle- 2.

Cette méthode consiste à créer un compte sur USGS earth explorer et procéder au téléchargement des images satellitaires (https://earthexplorer.usgs.gov/). Cela est valable aux images satellites landsat.

S'agissant du satellite Sentinel-2, on doit créer un compte sur la plateforme Copernicus (https://www.copernicus.eu/).

Pour cartographier les changements du niveau du lac Tanganyika, nous avons fait recours à Google earth. Ainsi, les images en libre accès nous ont permis d'étudier les changements sapatio-temporaires du niveau du lac Tanganyika depuis 1973.

Les images sentinel-2 fournissent de l'imagerie optique haute résolution (10 m) permettant l'observation des sols (utilisation des sols, végétation, zones côtières,) ainsi que le traitement des situations d'urgence (catastrophes naturelles) nous ont permis d'étudier les changements d'occupation du sol.

Pour avoir une idée sur les caractéristiques des images satellites utilisées, il est crucial de montrer les informations détaillées sur le satellite sentinel-2 et Landsat. Le tableau se trouvant en annexe et la figure 15 illustrent les caractérisques de ces types de satellites qui nous ont fournis d'images.

Pour le satellite Landsat, la résolution spatiale est de 60 m pour Landsat (1-5) et 30 m pour Land sat 7, 8 et 9. Mais la bande panchromatique est de 15 m.

Band	Band edges (μm)	Spatial resolution (m)
Blue-Green, TM 1	0.452–0.518	30
Green, TM 2	0.528–0.609	30
Red, TM 3	0.626–0.693	30
Near-IR, TM 4	0.776–0.904	30
Mid-IR, TM 5	1.567–1.784	30
Thermal-IR, TM 6	10.40–12.50	120
Mid-IR, TM 7	2.097–2.349	30

Swath width: 185 km.
Radiometric resolution: 8 bits (256 gray levels) for all bands.
Orbit characteristics: Sun-Synchronous.
Inclination: 98.2°

Figure 17: Caractéristiques de Landsat

Pour analyser l'indice de végétation (NDVI) de l'imagerie Landsat TM est calculée selon la formule suivante :

NDVI = bande 4 – bande 3/bande 4 + bande 3.

Le capteur Landsat TM reflète à la fois le proche infrarouge (IR) dans la bande 4 et le rouge visible (R) dans la bande 3. Compte tenu de cette situation, la formule change comme suit :

NDVI = (IR – R) / (IR + R). La classification a été effectuée sur 4 années différentes à l'aide

d'images satellitaires. Au bout de l'analyse, les résultats de la classification NDVI de l'étude ont été évalués (Sahebjalal & Dashtekian, 2013). Cette méthodode a été appliquée pour les années d'études de 1987, 1995, 2011 et 2022.

Après avoir mis fin à la classification, des traitements ont été effectués pour affiner l'évaluation de la précision et valider les résultats.

Enfin, la précision des classifications a été évaluée à travers l'utilisation d'une matrice de confusion (Kpedenou et al., 2016) in (Foody, 2002). A cet effet, les résultats des classifications ont été confrontés à un ensemble de 52 points relevés à l'aide des images Google earth. L'indice de validation de classification de Kappa (rapport entre les pixels bien classés et le total des pixels sondés) (Skupinski et al., 2009), a été déterminé.

Pour valider les cartes d'occupations du sol dans notre zone d'étude, nous avons élaboré la matrice de confusion. Pour notre cas, 52 points ont été crées aléatoirement dans les cartes LULC élaborées (paramètre entré).

La validation de la carte des cartes d'occupation du sol a suivi la méthode suivante : création des couches points dans les cartes LULC à l'aide des SIG et après création, nous les avons converti en format KML pouvant être visualisé sur les images Google earth. Les points ainsi projetés sur Google earth permettent la comparaison des pixels choisis et ce qui se trouve sur terrain.

Paramètre d'entré

Précision globale= Nombre total de pixels correctement classés (diagonal)*100/Nombre total de référence

= (44 x100) /52= 84.6 %

Eau = (7 x100) /7 =100 %

Végétation = (18x 100) /18 =100 %

Bâti = (7 x100) /11= 64 %

Zone agricole = 9 x 100 /13 =69.2 %

Sol nu = (3 x100) /3 = 100 %

Paramètre de sortie

Eau = (7 x 100) /7 = 100 %

Végétation = (18 x100) /19 =95 %

Bâti = (7 x 100) 10 = 70 %

Zone Agricole = (9 x 10) /12 = 75 %

Sol nu = (3 x 100) / 4 = 75 %

Pour la validation de ces cartes d'occupation du sol, nous nous sommes servis de la formule de Kappa et les données ont été prises aléatoirement.

Kappa $Coefficient\ (T) = \frac{(tsxtcs) - \sum(column\ totalx\ row\ total)}{ts^2 - \sum(column\ total\ x\ row\ total)} x\ 100$

$$T = \frac{(52 \text{ x } 44) - \Sigma\ (7 \text{ x } 7) + (19 \text{ x } 18) + (10 \text{ x } 11) + (12 \text{ x } 13) + (4 \text{ x } 3)}{52^2 (52 \text{ x } 44) - \Sigma\ (7 \text{ x } 7) + (19 \text{ x } 18) + (10 \text{ x } 11) + (12 \text{ x } 13) + (4 \text{ x } 3)} \text{ X } 100$$

$$= \frac{2288 - 669}{2704 - 669} * 100$$

Le Coefficient de Kappa est donc **0.79**

Notons qu' un kappa inférieur à 0,4 est considéré comme médiocre (un kappa de 0 signifie qu'il n'y a aucune différence entre les observateurs et le hasard seul). Des valeurs Kappa de 0,4 à 0,75 sont considérées comme modérées à bonnes et un kappa > 0,75 représente une excellente concordance.

II.2.2. Cartographie des inondations à base des levés de terrain

La cartographie des inondations à base des relevés de terrain a été réalisée grâce au relevé des coordonnées géographiques notamment pour délimiter les zones inondées et l'extension spatiale du lac Tanganyika. Cette technique a été utilisée spécifiquement dans la zone Gatumba et Kajaga qui ont été beaucoup touchées par le débordement de la Rusizi et l'extension spatiale du Lac Tanganyika.

Les coordonnées géographiques ainsi prises sont importées (format GPx) et après leur traitement en Excel sont projetées dans le logiciel ArcGIS pour visualisation. Cette méthodologie nous a permis de produire une carte montrant la zone complètement inondée.

II.2.3. Modélisation spatiale

Pour réaliser ce travail tel que montré dans les pages précédentes, nous avons combiné plusieurs paramètres dont la pente, la géologie, LULC, densité de drainage, la proximité du lac, pluviométrie et le NDVI.

Méthodologie: combinaison de cartes d'index

La cartographie de la susceptibilité par combinaison des cartes d'index avec la méthode AHP a été développée par (Saaty & Vargas, 1980). Il s'agit d'une méthode heuristique indirecte et qualitative. Elle permet d'évaluer la susceptibilité en se basant sur la hiérarchisation des différents paramètres significatifs (matérialisés par des cartes), en procédant à l'attribution des poids relatifs à chaque classe (ou subdivision) de ces derniers selon leur importance relative dans la genèse des inondations. Chaque comparaison est une question en deux parties de déterminer quel critère est plus important, et comment beaucoup plus important, en utilisant une échelle avec les valeurs de l'ensemble: {1, 2, 3, 4, 5}. Le nombre de cartes en entrée (paramètres) dépend de l'avis du chercheur effectuant l'analyse, lequel choisit, généralement à l'avance, les facteurs importants, à cartographier et numériser. Cela peut influencer significativement la pertinence de la carte finale. Pour ce qui concerne la pondération des facteurs de l'aléa, les valeurs peuvent être attribuées en se basant sur les connaissances de l'expert analyste (géographe, environementaliste, géologue, géomorphologue…). Ce dernier peut aussi s'appuyer sur une analyse statistique de la relation entre phénomènes inventoriés (inondations) et les paramètres significatifs (p.ex., les fréquences des inondations).

Une fois que les différents poids sont assignés, tous les paramètres sont rassemblés dans une seule et unique carte d'index de l'AMT (IAMT), et ce à l'aide de la formule (Equation VI-1) proposée par (Ayalew et al., 2004) in (Voogd, 1983), et permettant le calcul des sommations linéaires pondérées. La démarche est résumée à l'équation ci-dessous :

$IA_{MT}=\sum_{j=i}^{n} Wjwij$

Avec :

IA_{MT}: Index de la suscptibilté aux mouvements de terrain

wj: Valeur de la pondération assignée au paramètre 'j'

Wij: Valeur de la pondération assignée à la classe 'i' paramètre 'j '

n: Nombre de paramètres

Afin de faciliter la lecture et l'interprétation des cartes de prédiction, il est essentiel de traduire les valeurs de susceptibilité obtenues en termes de niveaux (classes) de susceptibilité. Ceci, n'est pas du tout évident à réaliser, puisqu'aucune démarche automatique n'existe pour l'effectuer (Ayalew et al., 2004) ; (Ayalew & Yamagishi, 2005). En effet, dans la plupart des études antérieures, les cartographes de l'aléa se basent sur leurs propres expériences et avis pour passer d'une carte présentée en valeurs continues (continuous data) à des classes ou niveaux d'une façon manuelle (Guzzetti et al., 1999); (Min & Lee, 2005); (Ohlmacher & Davis, 2003) . Une telle démarche, en plus de sa subjectivité, est inutilisable dans le cas d'une distribution multimodale (Süzen & Doyuran, 2004). Pour cette raison, nous avons opté pour une méthode de reclassification manuelle basée sur la zonation spatiale en termes de pourcentages de la zone d'étude. En plus de son objectivité, la méthode permet de faire des comparaisons entre les modèles (Depicker et al., 2020) ; (Gendreau et al., 1998) ; (Amaya et al., 2021).

Le tableau 5 montre les facteurs influencés par l'aléa qui ont été utilisé dans le cadre de la modélisation de la susceptibilité des inondations. En plus de ces facteurs, ce tableau 4 nous montre les classes par facteur, l'unité, la susceptibilité ainsi que leur intensité sur l'échelle bien déterminée (1 à 5).

Tableau 5: Facteurs influencés par l'aléa

Facteurs	**Unité**	**Classes**	**Classes de susceptibilité**	**Evaluation de susceptibilité**
Pente	%	0-2	Très élevé	5
		2-3	Elevé	4
		3-5	Modéré	3
		5-10	Faible	2
		10-33	Très faible	1
Pluviométrie	mm/an	780.2-780.7	Très faible	1
		780.7-781.3	Faible	2
		781.3-781.8	Modéré	3
		781.8-782.6	Elevé	4
		782.6-784	Très élevé	5
LULC	Niveau	Eau	Très élevé	5
		Sol nu	Elevé	4
		Bati	Modéré	3
		Zone agricole	Faible	2
		Végétation	Très faible	1
Densité de drainage	m/Km	8-36	Très faible	1
		36-64	Faible	2
		64-91	Modéré	3
		91-119	Elevé	4
		119-147	Très élevé	5

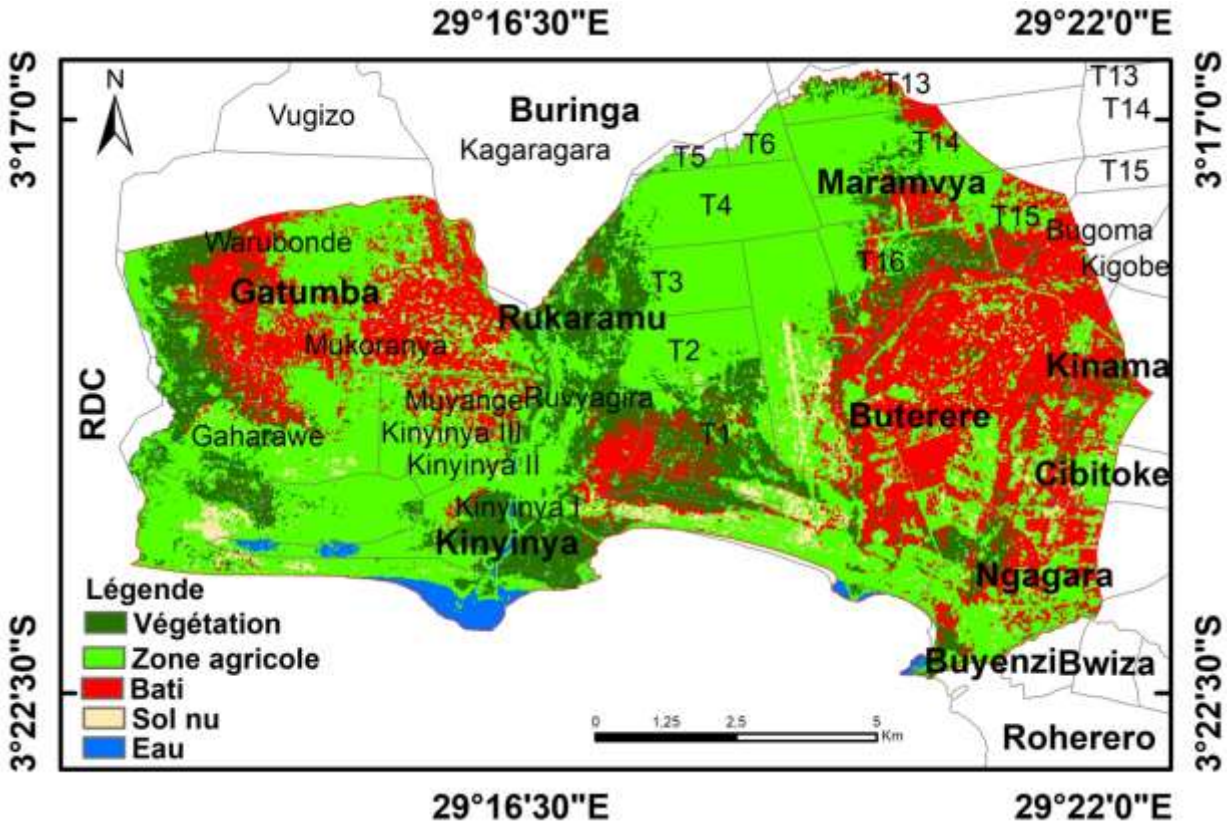
Lithologie	Niveau	1	Elevé	4
		2	Très élevé	5
NDVI	Niveau	94-112	Très élevé	5
		112-122	Elevé	4
		122-128	Modéré	3
		128-134	Faible	2
		134-152	Très faible	1
Proximité du lac Tanganyika	Niveau	0 - 1 718	Très élévé	5
		1 718- 3 437	Elevé	4
		3 437- 5 156	Modéré	3
		5 156 - 6 875	Faible	2
		6 875- 8 593	Très faible	1

CHAPITRE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION

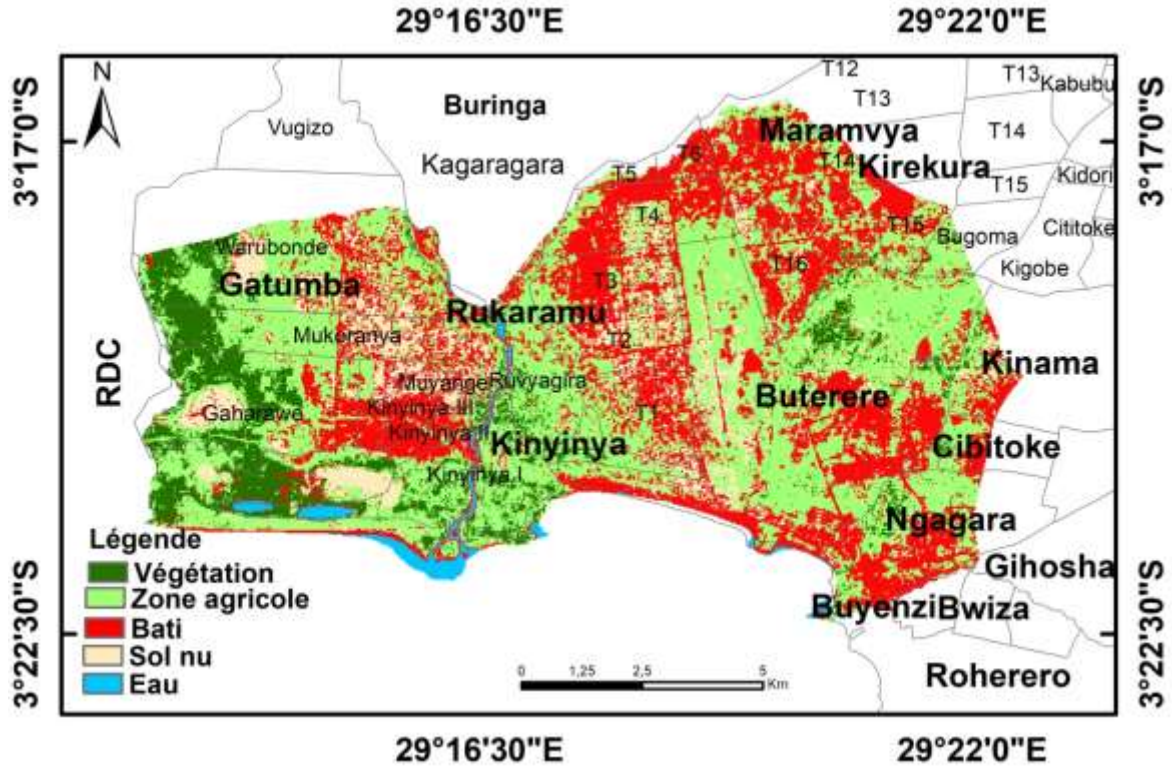
III.1. Résultats

III.1.1. Apport de l'imagerie satellitaire et photographie aérienne dans l'étude des inondations dans la partie nord de Bujumbura

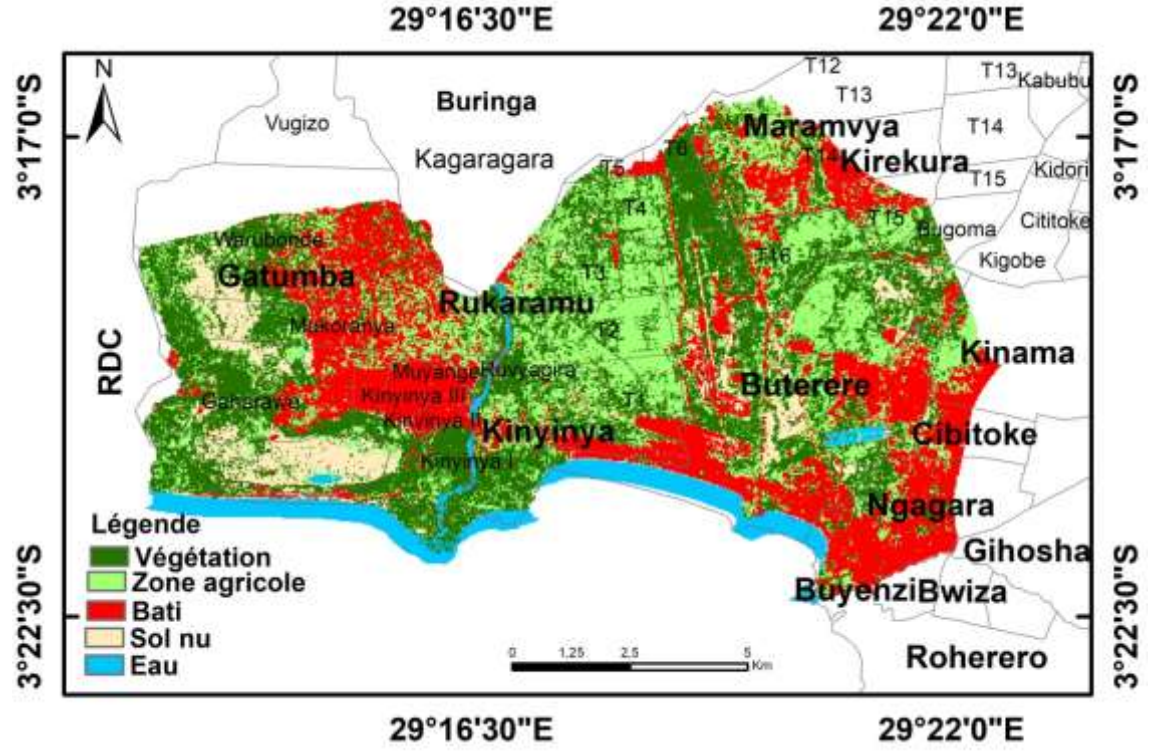
Les images satellites de Landsat 5, 7 et 8 pour les années de 1987, 1995, 2011 et 2022 nous ont permis de faire des cartes d'occupation du sol dans notre zone d'étude. Ces images de résolution spatiale de 30 m et 15m pour la bande panchromatique permettent de montrer les changements spatio- temporaires qui ont eu lieu au fur des années. Pour diversifier les sources, nous avons utilisé les images haute résolution (10 m de résolution spatiale) de sentinel-2 pour étudier les mêmes changements d'occupation du sol. La figure 16 et 17 montrent les cartes d'occupation du sol pour les années 1987 à 2024. La figure 16 concernent landsat pour a (1987), b (1995), c (2011) et d (2022) dans la mesure oú la figure 17 concerne sentinel-2 qui couvre les années 2016 (a) et 2024 (b).



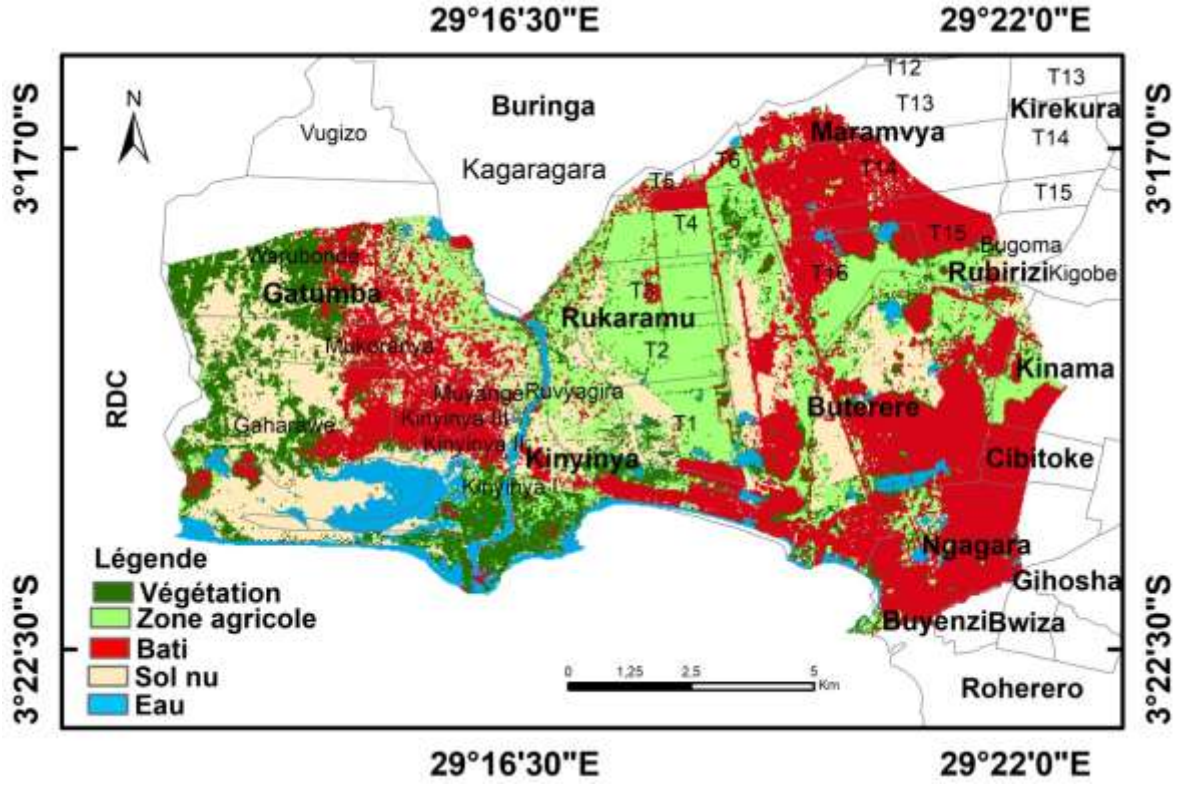
(a)


29°16'30"E
29°22'0"E
3°17'0"S
3°22'30"S
N
Buringa
Vugizo
Kagaragara
Maramvya
Kirekura
Kabubu
Kidori
Cititoke
Bugoma
Kigobe
Warubonde
Gatumba
Rukaramu
Mukoranya
Muyange
Ruvyagira
Gahararwe
Kinyinya III
Kinyinya II
Kinyinya I
Kinyinya
Buterere
Kinama
Cibitoke
Ngagara
Gihosha
BuyenziBwiza
Roherero
RDC
T1
T2
T3
T4
T5
T6
T12
T13
T14
T15
T16
Légende
Végétation
Zone agricole
Bati
Sol nu
Eau
0 1,25 2,5 5
Km

(b)


29°16'30"E
29°22'0"E
3°17'0"S
3°22'30"S
N
Buringa
Vugizo
Kagaragara
Maramvya
Kirekura
Kabubu
Kidori
Cititoke
Bugoma
Kigobe
Warubonde
Gatumba
Rukaramu
Mukoramya
Muyange
Ruvyagira
Kinyinya III
Kinyinya II
Kinyinya I
Kinyinya
Gaharawe
RDC
Buterere
Kinama
Cibitoke
Ngagara
Gihosha
BuyenziBwiza
Roherero
T1
T2
T3
T4
T5
T6
T12
T13
T14
T15
T16
Légende
Végétation
Zone agricole
Bati
Sol nu
Eau
0 1,25 2,5 5 Km

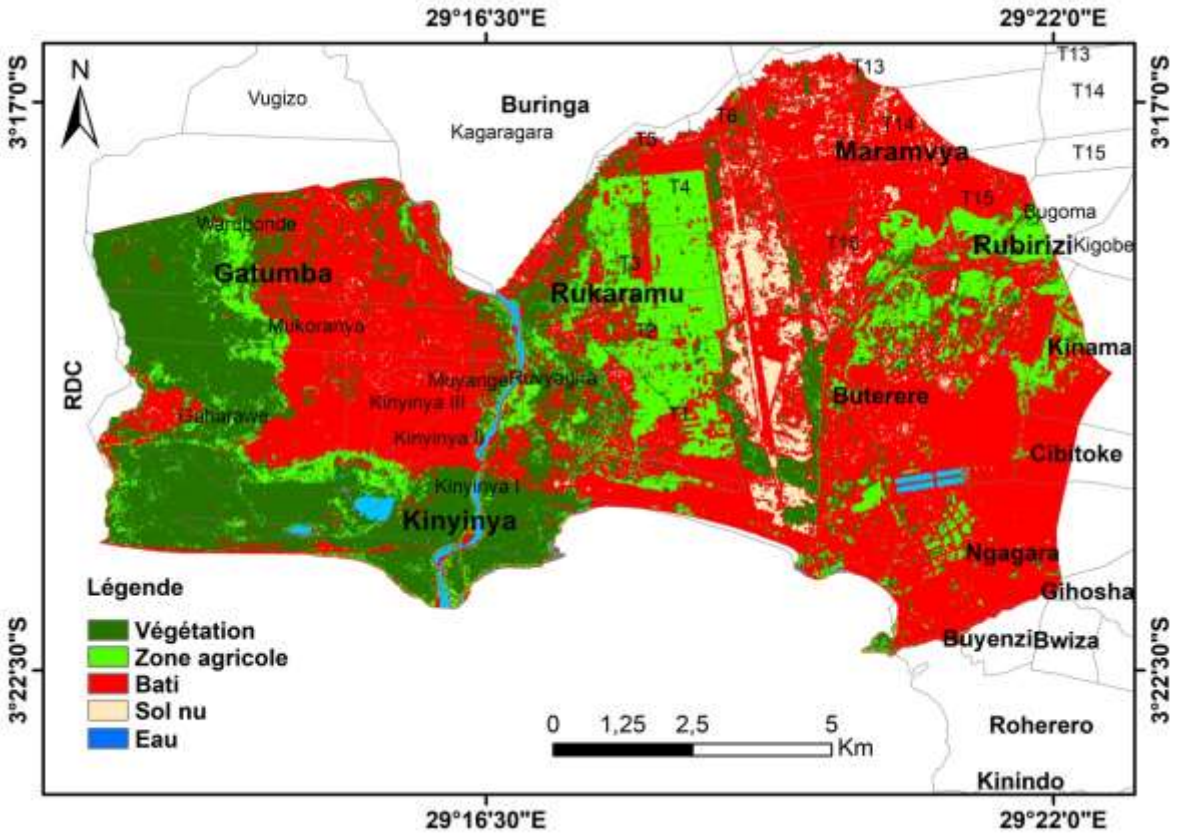
(c)


29°16'30"E
29°22'0"E
3°17'0"S
3°22'30"S
N
Buringa
Vugizo
Kagaragara
Maramvya
Kirekura
Bugoma
Rubirizi
Kigobe
Warubonde
Gatumba
Rukaramu
Mukoramya
Muyange
Ruvyagira
Kinyinya III
Kinyinya II
Kinyinya I
Kinyinya
Gaharawe
RDC
Buterere
Kinama
Cibitoke
Ngagara
Gihosha
BuyenziBwiza
Roherero
T1
T2
T4
T5
T6
T12
T13
T14
T15
T16
Légende
Végétation
Zone agricole
Bati
Sol nu
Eau
0 1,25 2,5 5 Km

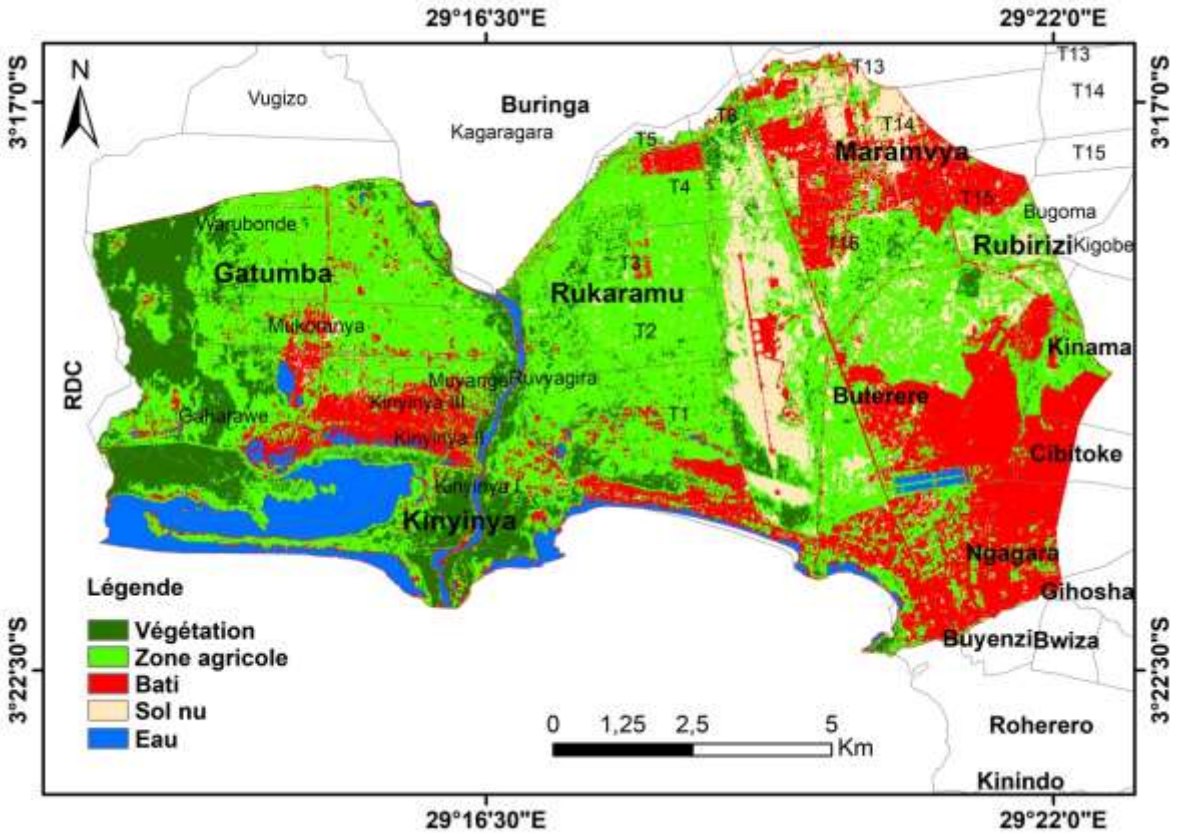
(d)

Figure 18: Cartes d'occupation du sol de 1987 à 2022 (landsat) (a): 1987 ; (b) : 1995 ; (c) : 2011 et (d) : 2022

Pour les images satellites de haute résolution spatiale du satellite européen sentinel-2, les figures 17a et 17b représentent respectivement les années 2016 et 2024.



(a)



(b)

Figure 19: Cartes d'occupation du sol de 2016 à 2024 pour sentinel-2 (a) : 2016 et (b) : 2024

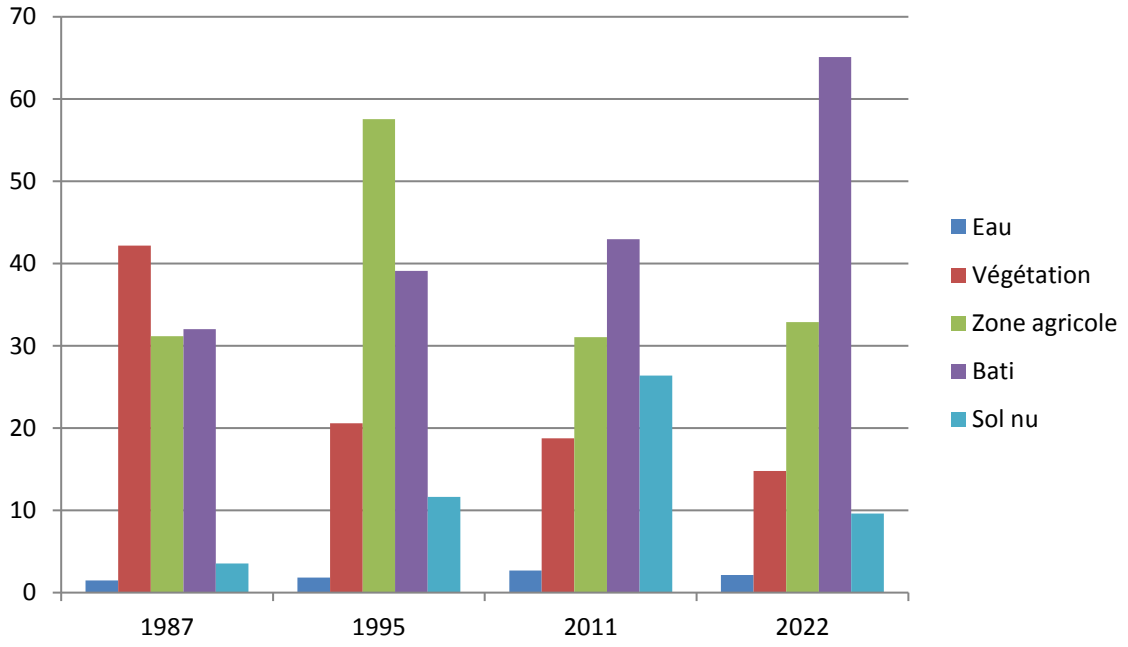
Pour faire la comparaison de la dynamique d'occupation du sol, le tableau 6 ci-dessous montre les différentes évolutions par classes qui se sont opérées.

Tableau 6: Comparaison LULC 1987, 1995, 2011 et 2022

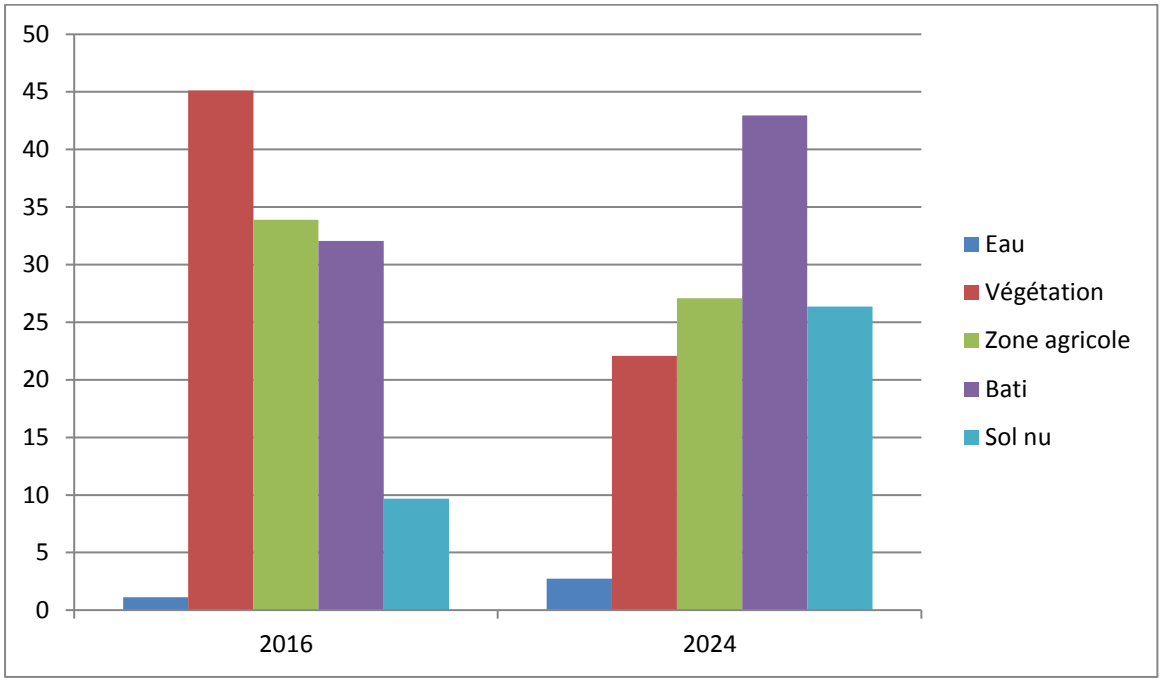
	Année			
Classes (en km^2)	1987	1995	2011	2022
Eau	1.487061	1.83301	2.74334	2.13018
Végétation	42.139005	20.592624	18.76464	14.790475
Zone agricole	31.1963321	57.55722	31.07236	32.897186
Bati	32.047135	39.105455	42.95839	65.113874
Sol nu	3.5351162	11.621442	26.374071	9.691579

Après avoir terminé la pondération des facteurs de l'aléa, la figure 18 nous montre la contribution de chaque facteur dans la modélisation de susceptibilité des inondations. Certains facteurs jouent un rôle très important et d'autres le sont moins. La figure 18 a montre la popndération des facteurs de l'aléa pour les images landsat valables pour les années 1987, 1995, 2011 et 2022 dans la mesure ou la figure 18b montre celle des images sentinel-2 valables pour les années 2016 et 2024.

L'évaluation de susceptibilité et les classes de susceptibilité sont déterminées en fonction de la valeur des pixels.



(a)



(b)

Figure 20: Comparaison des changements d'occupation du sol entre 1987 à 2022 (Landsat) et 2016 à 2024 (Sentinel-2)

Le tableau 7 présente les différentes classes considérées lors de la classification supervisée des images satellitaires sentinel -2. Nous constatons à l'instar des images landsat, des changements significatifs pour les classes de la végétation et du bâti.

Tableau 7: Comparaison LULC 2016 et 2024

	Année	
Classes	2016	2024
Eau	1,13	2,743
Végétation	42,139	22,958
Zone agricole	30,897	27,072
Bati	32,047	42,958
Sol nu	9,691	26,374

Concernant la validation des cartes d'occupation du sol, nous avons élaboré la matrice de confusion. Le tableau 10 en dessous montre la matrice de confusion qui a été élaborée.

Tableau 8: Matrice de confusion

	Eau	Végétation	Bâti	Zone agricole	Sol nu	Total (Entré)
Eau	7	0	0	0	0	7
Végétation	0	18	0	0	0	18
Bâti	0	1	7	3	0	11
Zone agricole	0	0	3	9	1	13
Sol nu	0	0	0	0	3	3
Total (Sortie)	7	19	10	12	4	52

En ce qui concerne les résultats de la validation des cartes d'occupation du sol dans notre zone d'étude, le tableau 11 présente de facon simplifiée par classe, les résultats obtenus.

Tableau 9: Synthèse des résultats de validation de la carte LULC

	Entré	Sortie
Eau	100%	100%
Végétation	100%	95%
bâti	64%	70%
Zone agricole	69,20%	75%
Sol nu	100%	75%

La figure 19 montre la comparaison des paramètres d'entré et de sortie pour la validation des cartes d'occupation du sol.

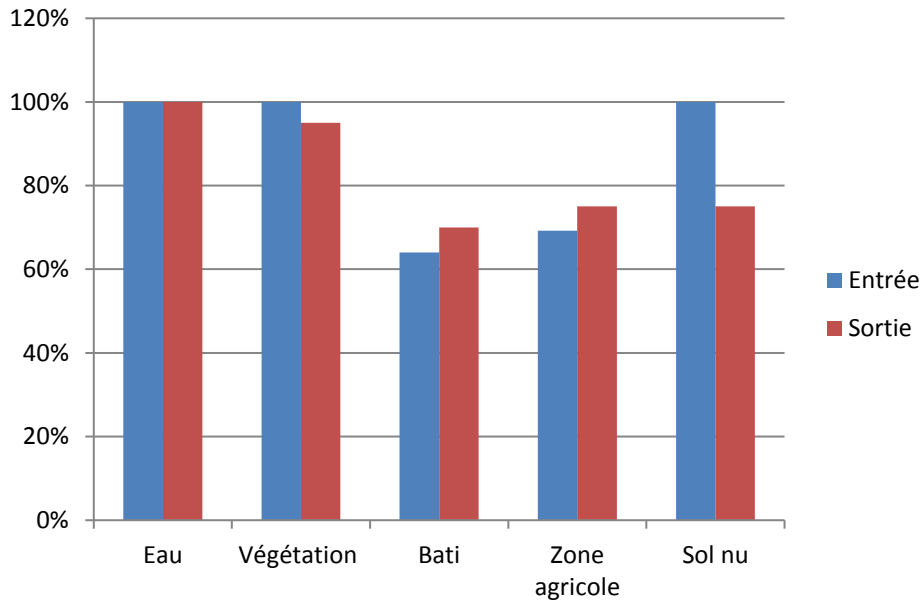


Figure 21: Comparaison paramètre entré-sortie

Concernant l'analyse d'extension spatiale du lac Tanganyika en fonction de l'évolution des années, nous nous sommes servis des images Google Earth accès libre.

Ainsi, des analyses systématiques ont été réalisées de 1979 à 2023 pour étudier l'extension du niveau du lac Tanganyika.

Avec l'usage des SIG, nous avons généré des courbes de variation en ce qui concerne l'extension du lac Tanganyika. La figure 20 a,b,c,d,e et f illustre les changements spatio-temporaires constatés sur l'extension du lac Tanganyika qui ont eu lieu à partir de 1979 jusqu'en 2023. Les courbes montrent des variations spatio-temporaires significatives. Tantôt nous observons l'extension spatiale du lac tantôt une regression du lac.

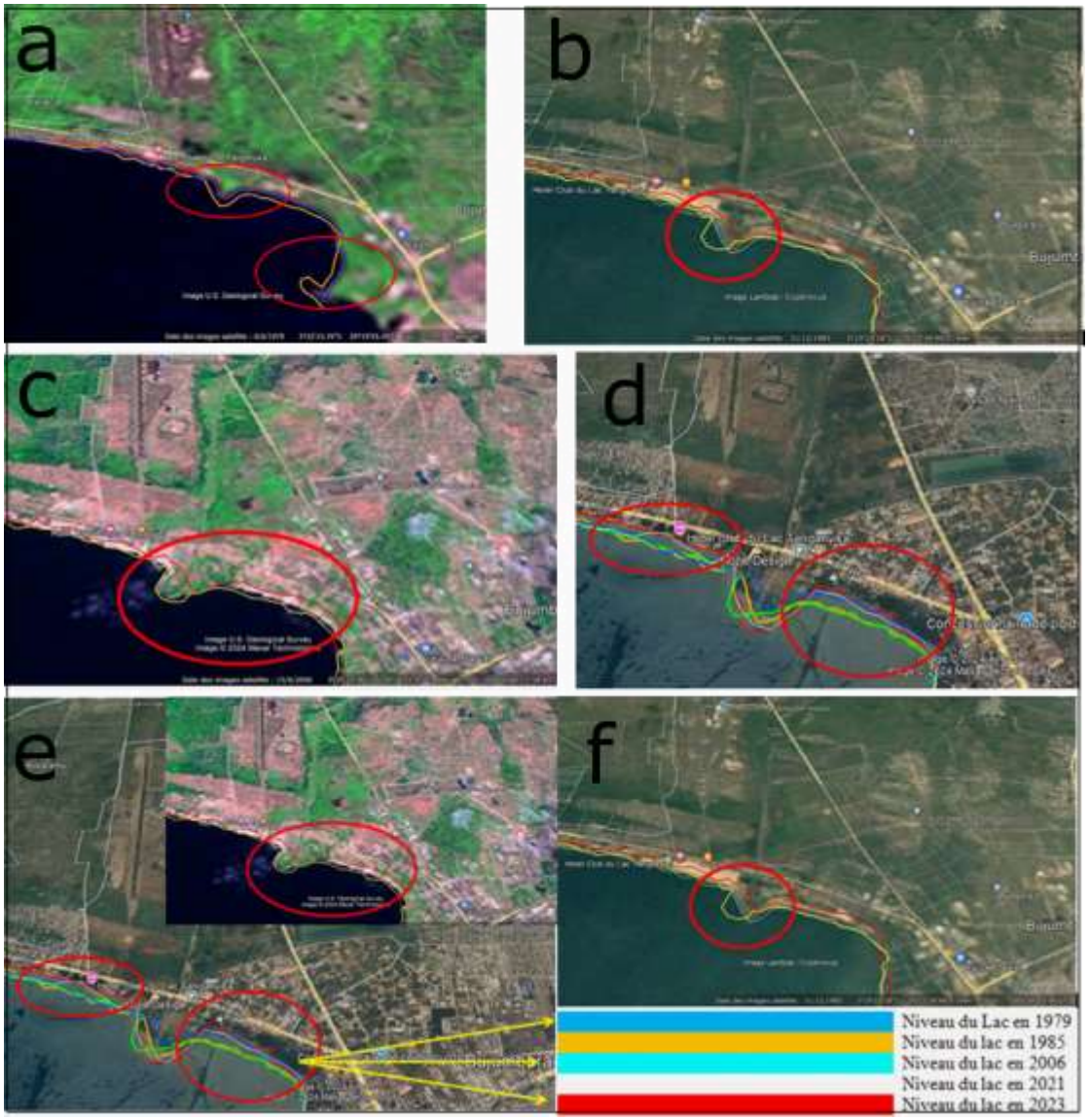


Figure 22: Changements du niveau du lac Tanganyika de 1979 à 2023

III.1.2. Types et caractéristiques des inondations

Pour le cas de notre zone d'étude, les observations de terrain, et les recherches menées dans la consultation des archives et publications anciennes, nous ont montré que nous avons généralement deux types d'inondation. Il s'agit des inondations fluviales et les crues soudaines.

Le cas le plus parlant pour notre zone d'étude pour ce type d'inondation est celui de la rivière Rusizi. Le débordement de ce cours d'eau entraîne des dommages importants dans la plaine, spécifiquement à Gatumba et Kajaga tous de la commune Mutimbuzi. La figure 21a montre des maisons englouties par les eaux résultant des crues de la Rusizi. Il en est de même pour cette église figure 21b oú les fidèles ne sont plus capables d'y exercer leurs cultes habituels.



(a) **(b)**

Figure 23: Impacts d'inondations dans la zone de Gatumba

Ce type d'inondation a été observé sur la rivière Gasenyi en février 2014. L'obstruction des buses sur la RN1 a entraîné des crues catastrophiques dans le quartier Gatunguru, Kinama et Carama faisant des dizaines de morts et des impacts matériels énormes. Les crues soudaines catastrophiques ont eu lieu également sur la rivière Cari, causant des pertes en vies humaines et matérielles considérables. La figure 22a montre une buse de la rivière Gasenyi qui est bouchée par les pierres et autres matériaux grossiers, ce qui a fait dévier la rivière et cette dernière s'est étalée dans le quartier Gatunguru, laissant comme on le voit sur la figure 22b des morts et des destructions inédites.





(a) **(b)**

Figure 24: Impacts matériels et humains entraînés par la rivière Gasenyi en 2014

III.1.3. Causes et déclencheurs des inondations

Dans les zones intertropicales oú il y a alternance de deux saisons (saison pluviale et saison sèche), les causes des inondations sont les pluies diluviennes qui tombent dans les bassins versants des cours d'eau traversant une zone considérée. Ces précipitations sont soit d'intensité importante, soit de faible intensité mais étalées sur des jours consécutifs.

Comme nous l'avons montré dans les pages précédentes sur le climat, les régions de hautes altitudes reçoivent des quantités importantes de pluviométrie. Ces dernières sont drainées par les cours d'eau jusqu'en aval et elles sont combinées par les précipitations qui tombent dans la plaine. La concentration de ces eaux de ruissellement cause par conséquent les inondations soit fluviales ou crues soudaines.

Pour ce qui concerne les facteurs déclencheurs des inondations, nous pouvons citer la pente faible, la densité de drainage, les systèmes de canalisation des eaux, la géologie, l'occupation du sol, la proximité du lac, etc.

Pour ce travail de recherche, il est question d'analyser la pente du terrain afin de pouvoir déterminer s'il y a une corrélation positive entre la pente et les risques récurrents d'inondations. Pour faire cette analyse de la pente nous avons utilisé le MNT(10m) et enfin produire la carte de pente de la zone considérée. Cette pente est exprimée en degré. La figure 23 montre les différentes classes de la pente de notre zone d'étude. D'une manière générale, la figure 23 nous montre que la pente est généralement faible avec une valeur élevée de 33 degré.

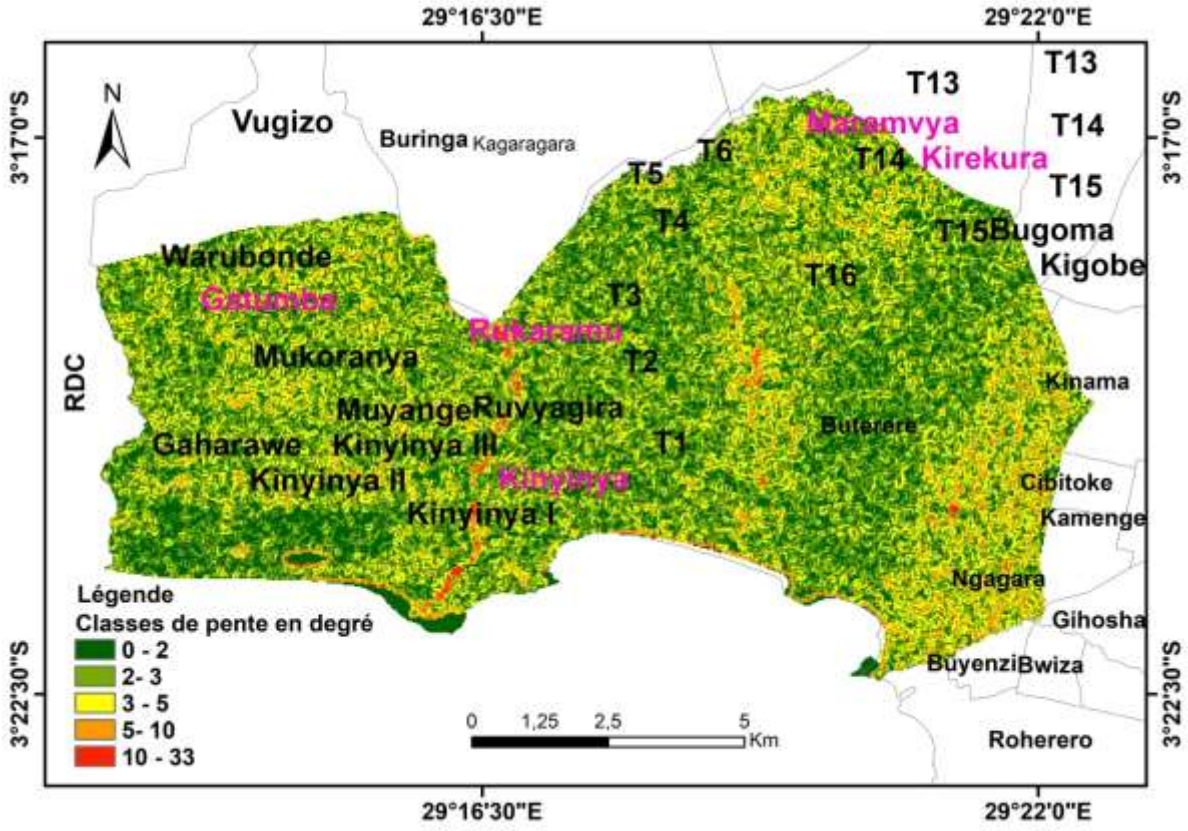


Figure 25: Carte de pente de la zone d'étude

Concernant la géologie, notre zone d'étude est consituée *par l'Holocène (Ho) : qui* comporte essentiellement des dépôts de cônes alluviaux développés aux piedmonts d'escarpements et des dépôts dus au ruissellement d'épandage occupant une grande partie de la plaine de la basse Rusizi, les alluvions récentes de la Rusizi et de son delta ainsi que les plages du lac Tanganyika comportant des cordons littoraux principalement sur la rive septentrionale.

Cette partie dispose le Pléistocène moyen (Pm) qui est représenté par des cônes alluviaux à mécanismes sédimentaires de type débris flowshetflood et des formations fluvio-lacustres allant de sables grossiers aux dépôts fins silto-argileux (Ngenzebuhoro et al., 2019). La figure 24 nous présente les deux formations géologiques présentes dans notre zone d'étude.

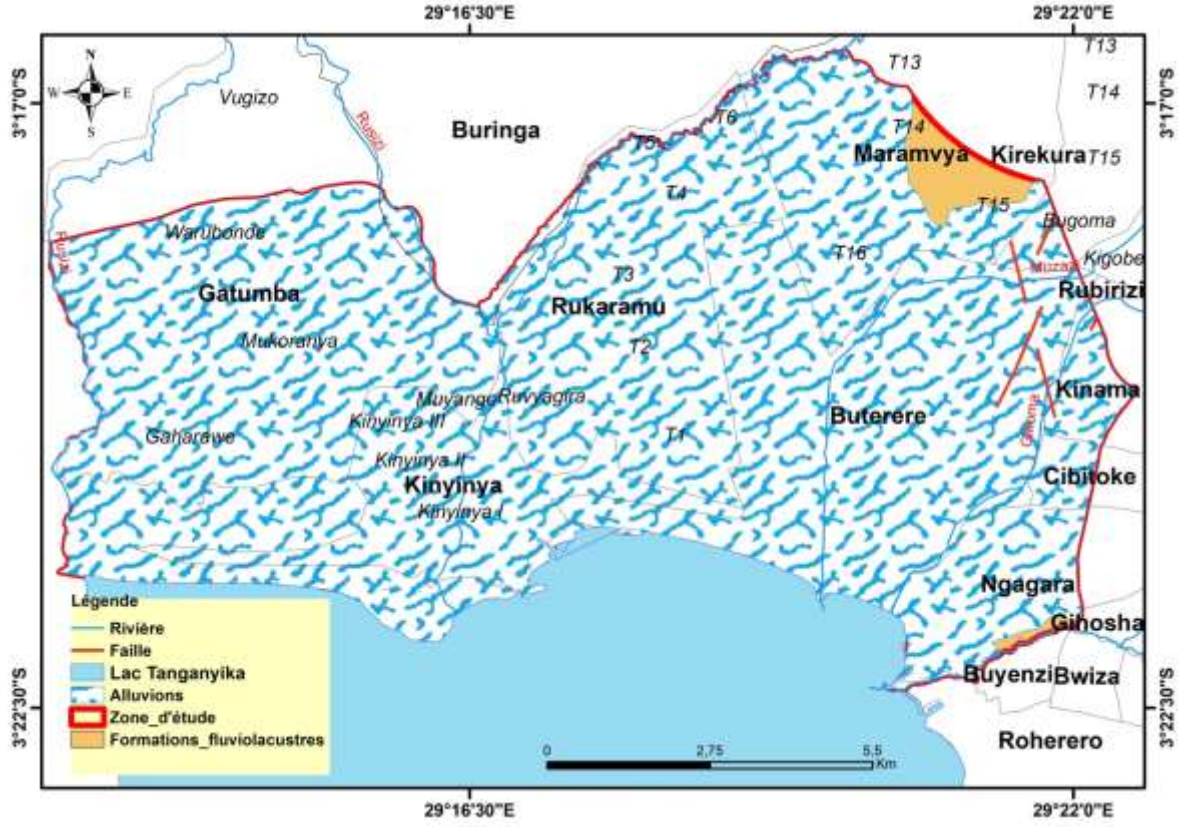
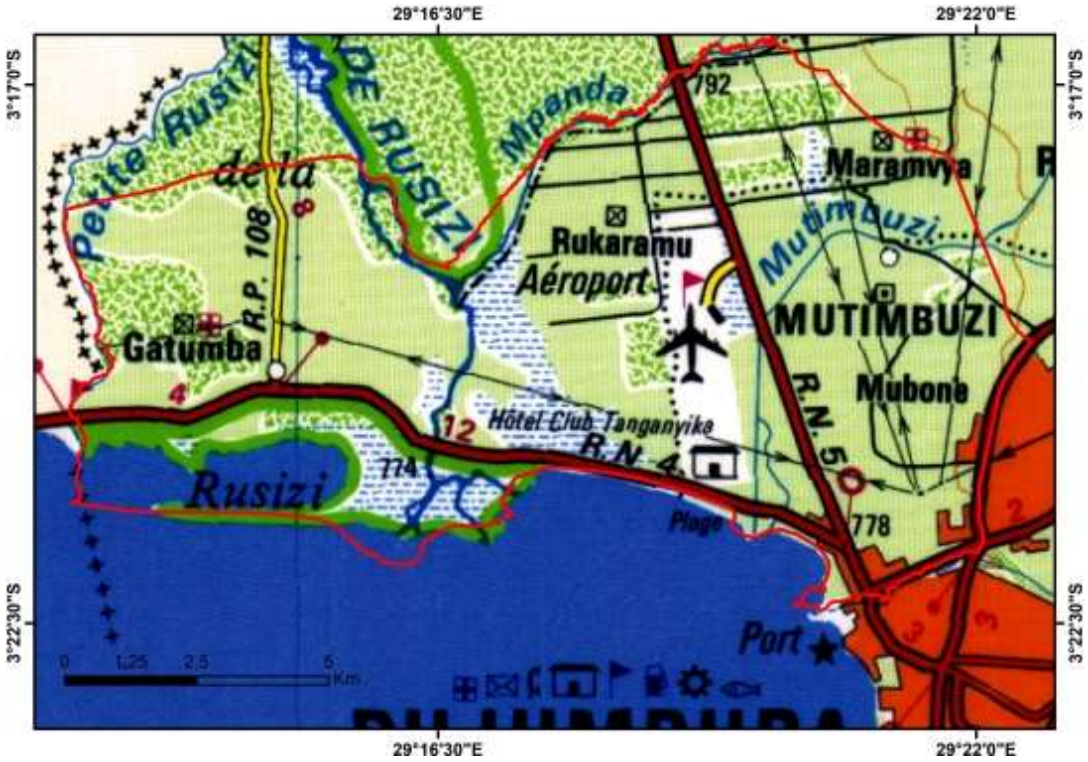


Figure 26: Carte géologique de notre zone d'étude

Un autre facteur déclencheur des inondations est la canalisation des eaux pluviales. Dans notre zone d'intérêt, elle s'est basée sur la viabilisation urbaine. Nous nous sommes servis de la carte routière pour analyser la densité routière dans notre zone d'étude et des images en libre accès sur open streetmap. La figure 25 montre que les routes sont bien présentes dans la majeure partie de notre zone d'étude, mais les caniveaux sont parfois inéxistants ou bouchés par les déchets de tout genre tel que constaté lors de nos visites de terrain dans différents quartiers. Cela complique les processus d'évacuation des eaux usées et des eaux de ruissellement, créant ainsi des eaux stagnantes qui exacerbent les inondations une fois survenues. La figure 25 a et b montre les routes présentes dans cette zone qui a fait objet d'étude.



(a)



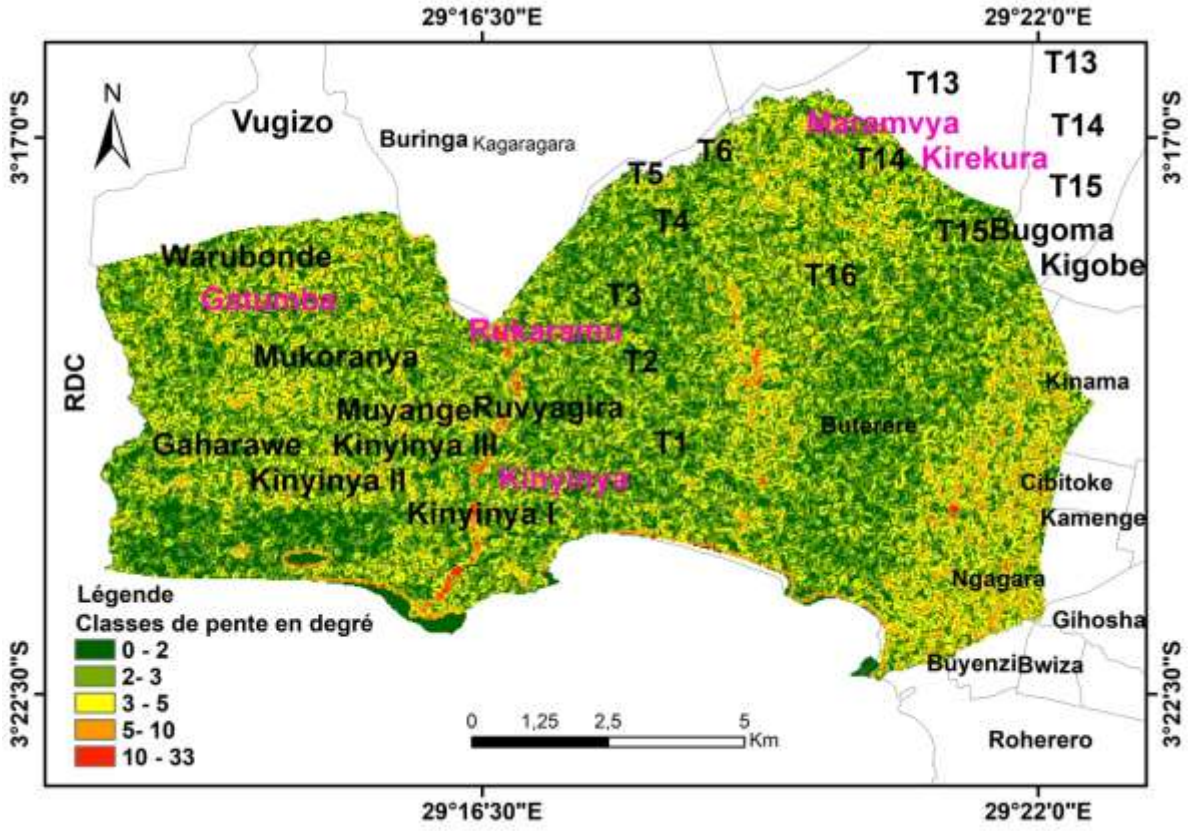
(b)

Figure 27: Extrait de la carte routière et vue partielle des pistes dans la zone d'étude

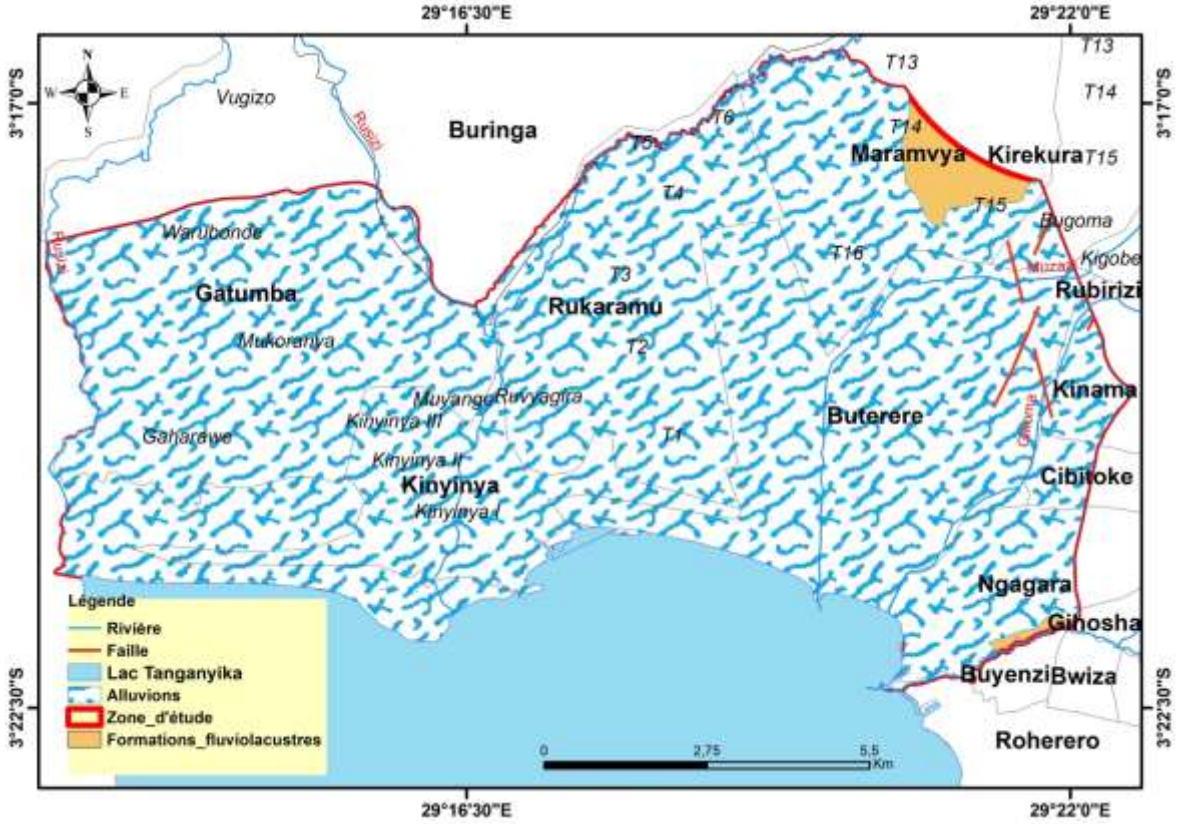
III.1.4. Cartographie de la susceptibilité des inondations

La cartographie de la susceptibilité des inondations a été réalisée en prenant en considération tous les paramètres qui influencent l'aléa.

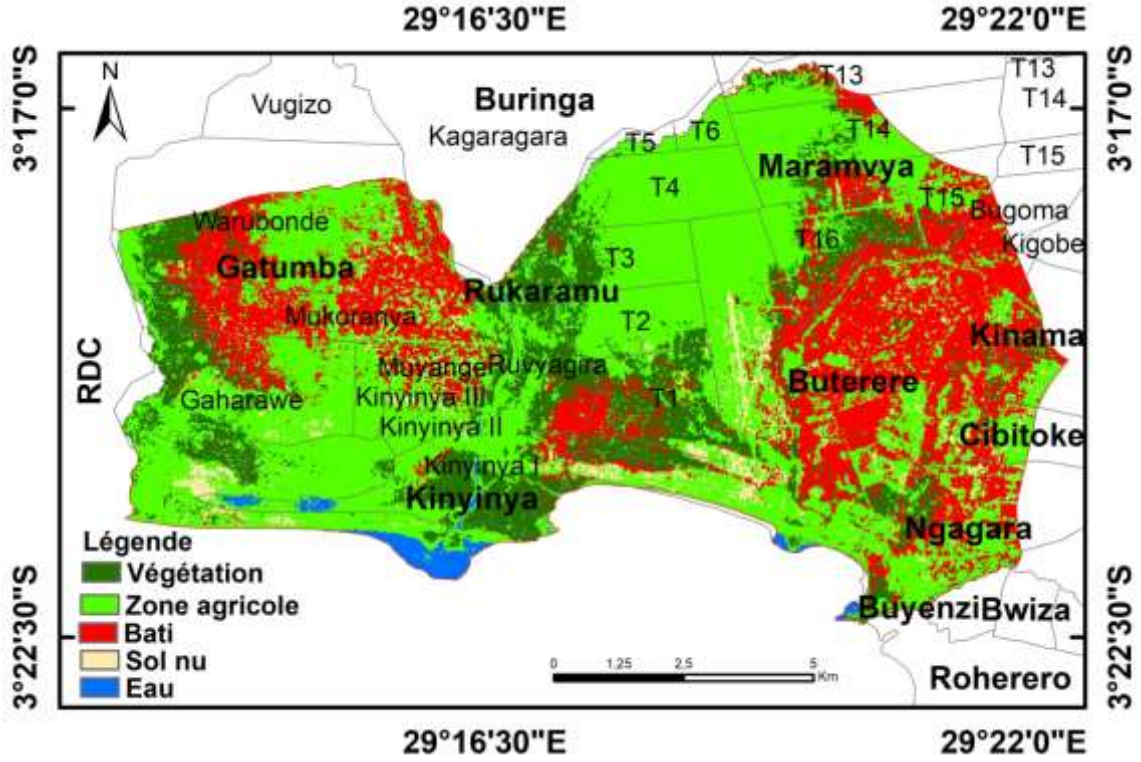
Ainsi, la figure 26 présente les facteurs qui ont été combinés pour élaborer la carte de susceptibilité aux inondations. Ces facteurs sont entre autres la pente du terrain, la lithologie, l'occupation du sol, la pluviométrie, la densité de drainage,la proximité du lac Tanganyika et le NDVI. Cette figure 26 montre alors les types de formations géologiques en place, la pluviométrie pouvant tomber dans cet endroit en faisant références à la station météorologique de l'IGEBU, l'occupation du sol , et bien d'autres.



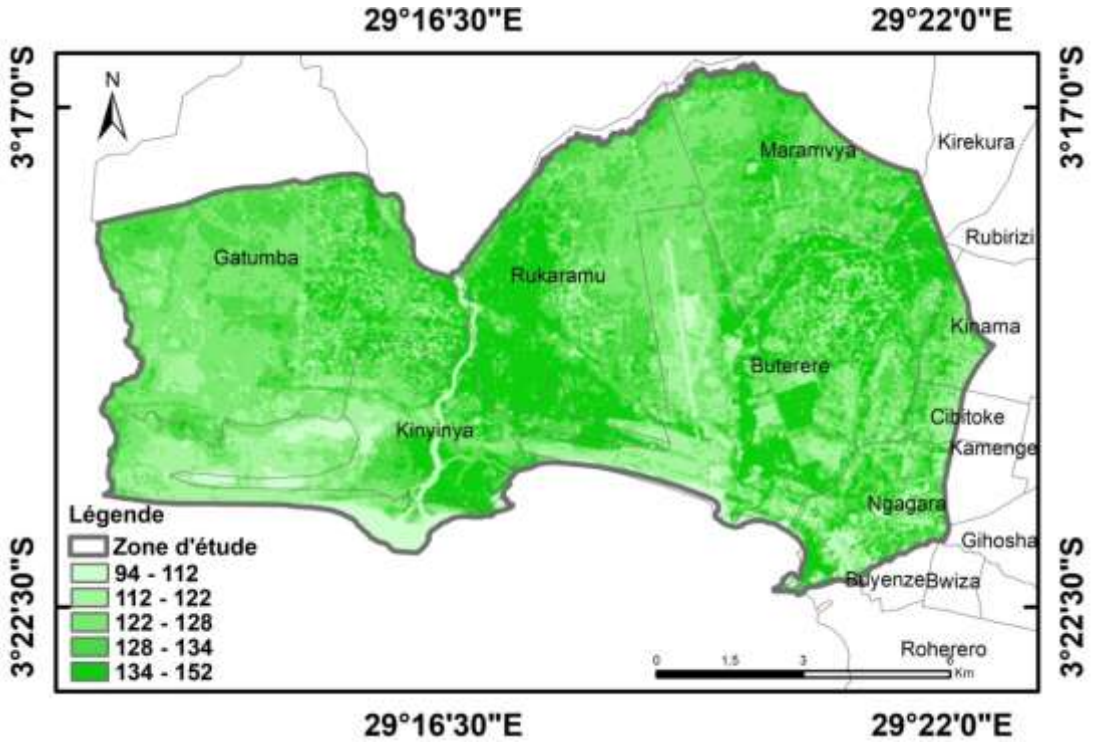
(Pente)


29°16'30"E
29°22'0"E
3°17'0"S
3°22'30"S
Vugizo
Buringa
Maramvya
Kirekura
Bugoma
Kigobe
Rubirizi
Warubonde
Gatumba
Mukoranya
Rukaramu
Muyange
Ruvyagira
Kinyinya III
Kinyinya II
Kinyinya I
Kinyinya
Gaharawe
Buterere
Kinama
Cibitoke
Ngagara
Gihosha
BuyenziBwiza
Roherero
T1
T2
T3
T4
T5
T6
T13
T14
T15
T16
Légende
Rivière
Faille
Lac Tanganyika
Alluvions
Zone_d'étude
Formations_fluviolacustres
0
2,75
5,5
Km

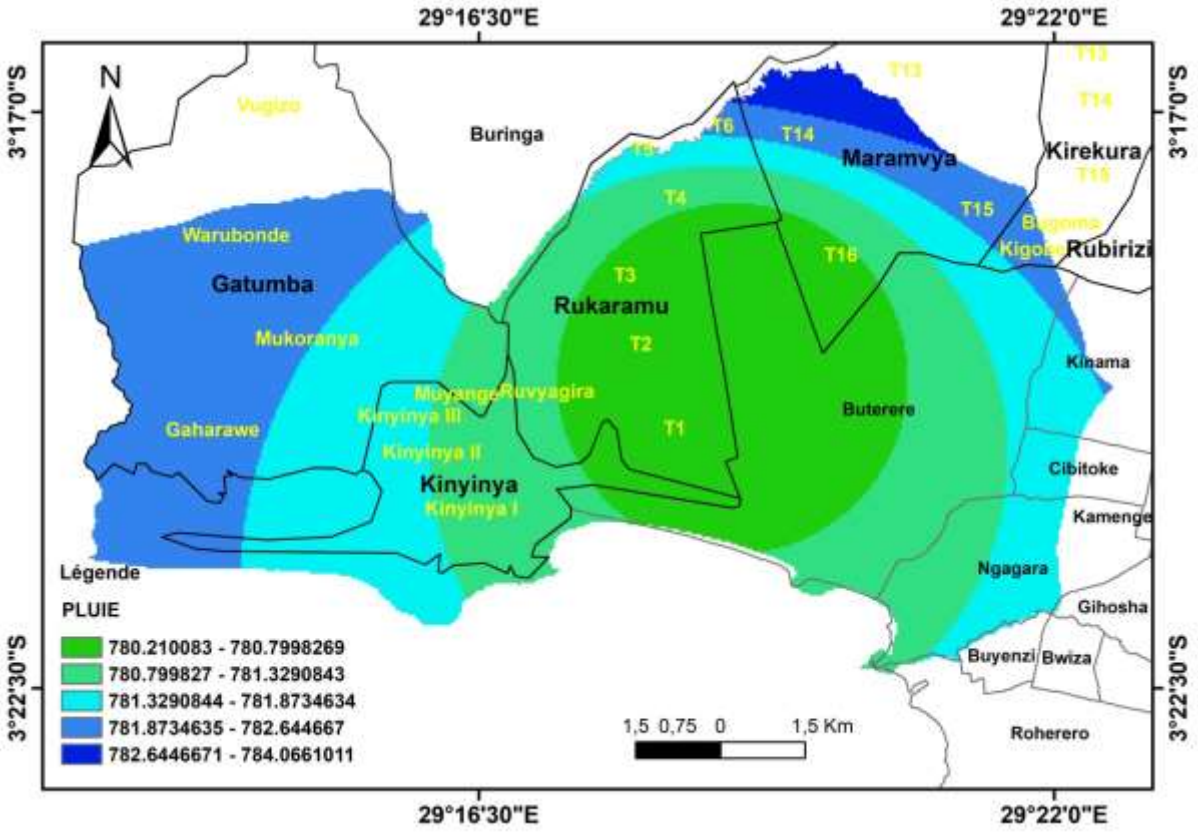
(Lithologie)


29°16'30"E
29°22'0"E
3°17'0"S
3°22'30"S
N
RDC
Vugizo
Buringa
Kagaragara
Maramvya
Bugoma
Kigobe
Warubonde
Gatumba
Mukoranya
Rukaramu
Muyange
Ruvyagira
Kinyinya III
Kinyinya II
Kinyinya I
Kinyinya
Gaharawe
Buterere
Kinama
Cibitoke
Ngagara
BuyenziBwiza
Roherero
T1
T2
T3
T4
T5
T6
T13
T14
T15
T16
Légende
Végétation
Zone agricole
Bati
Sol nu
Eau
0
1,25
2,5
5
Km

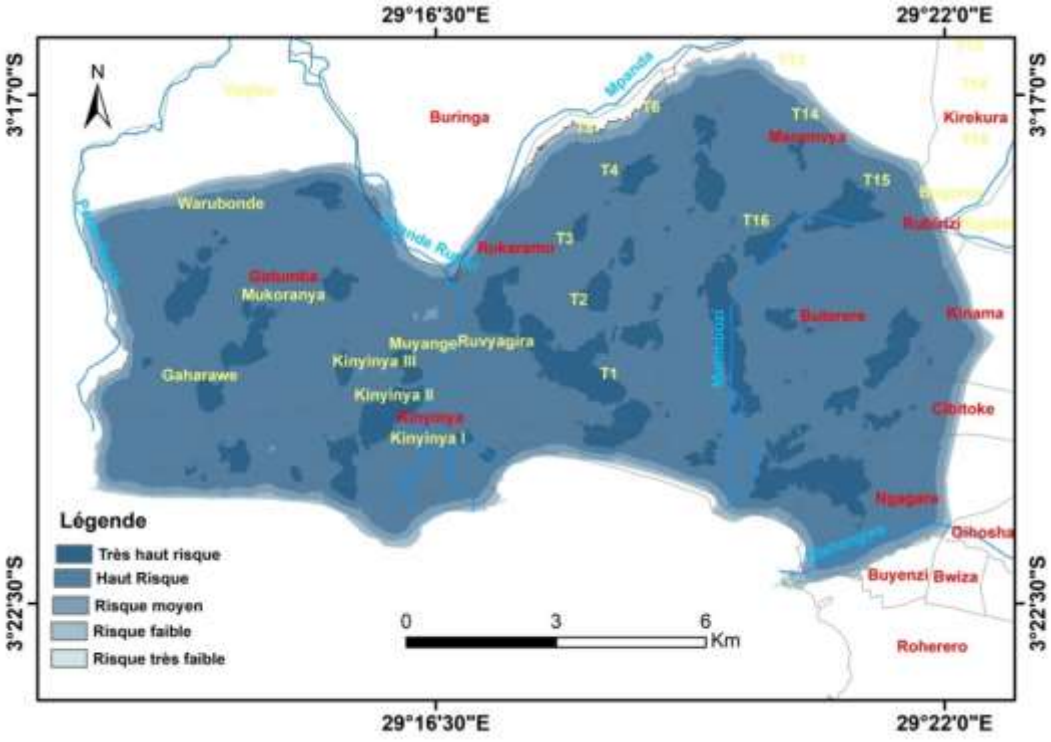
(LULC)



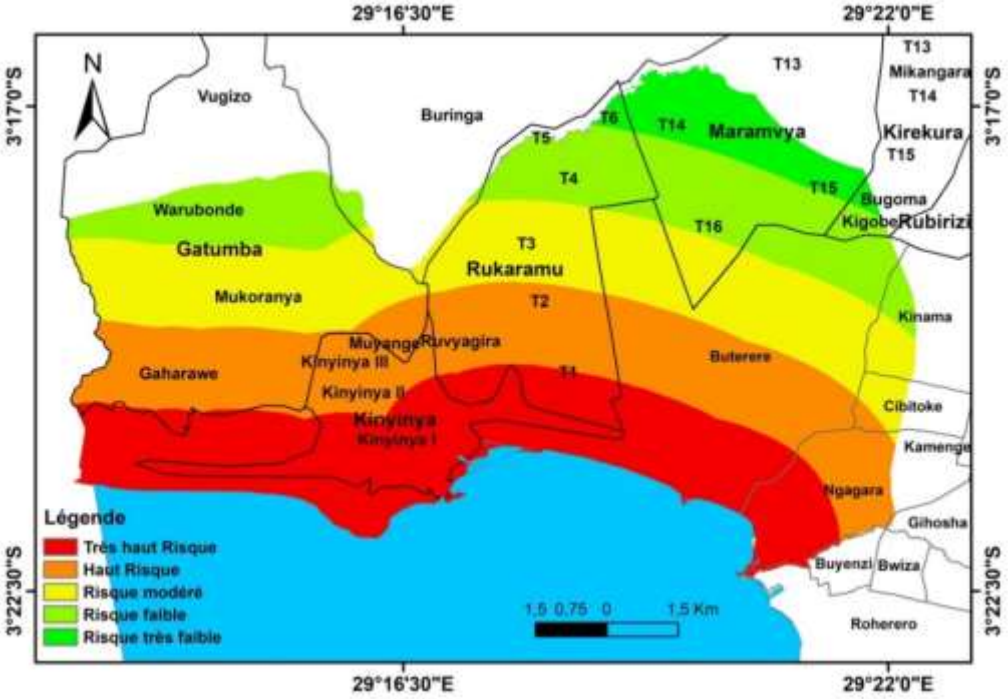
(NDVI)



(Pluie)



(Densité de drainage)



(Proximité du lac)

Figure 28: Facteurs qui influencent l'aléa

Pour parvénir à la carte de susceptibilité aux inondations, la combinaison des facteurs de l'aléa a été réalisée en suivant la pondération faite par chaque facteur qui entre en jeu. Ainsi, la figure 27 montre de ce fait la comparaison entre les facteurs de l'aléa.

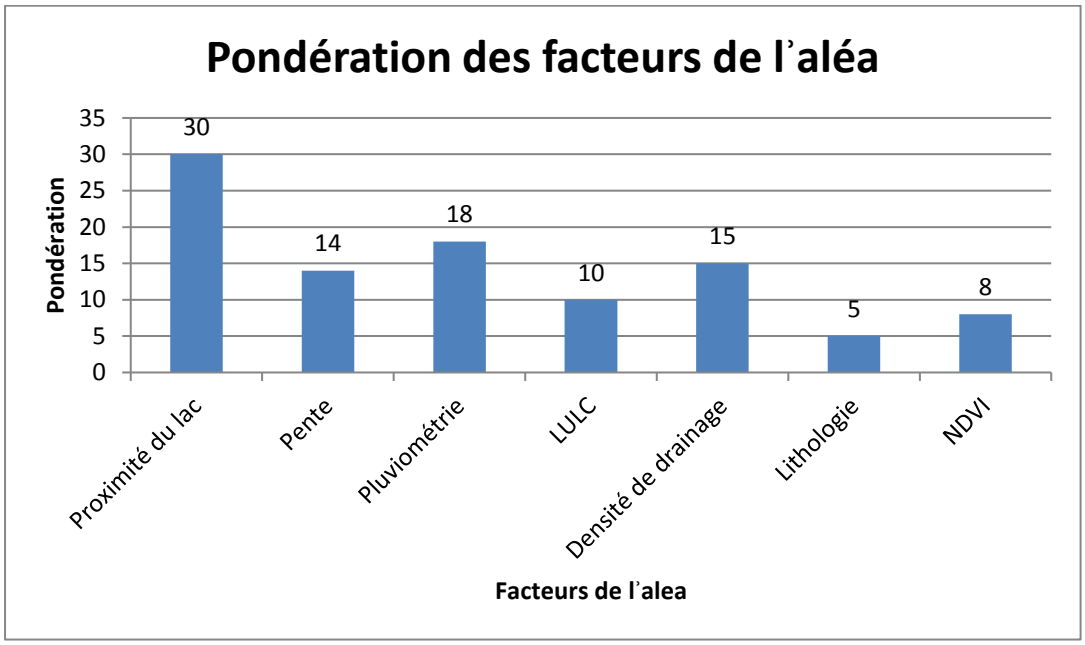


Figure 29: Pondération des facteurs de l'aléa

La modélisation de susceptibilité a fait recours à la combinaison des facteurs de l'aléa qui contribuent d'une manière ou d'une autre à exacerber les inondations. Ainsi, la figure 28 présente la carte de susceptibilité des inondations. En s'appuyant sur les classes, nous distinguons, les zones de très haut risque, haut risque, risque modéré, risque faible et très faible. En faisant l'analyse, nous constatons que les zones se trouvant à proximité du lac ou des cours d'eau sont à très haut risques d'inondations. C'est le cas de Kajaga, Kinyinya I, Kinyinya II et Gaharawe. Les zones présentant une pente très faibles se classent également parmi les zones à haut risques d'inondations. L'occupation du sol peut aussi exacerber ou atténuuer les risques d'inondations. A titre comparatif, une zone occupée par la végétation présente un risque faible par rapport au sol nu.

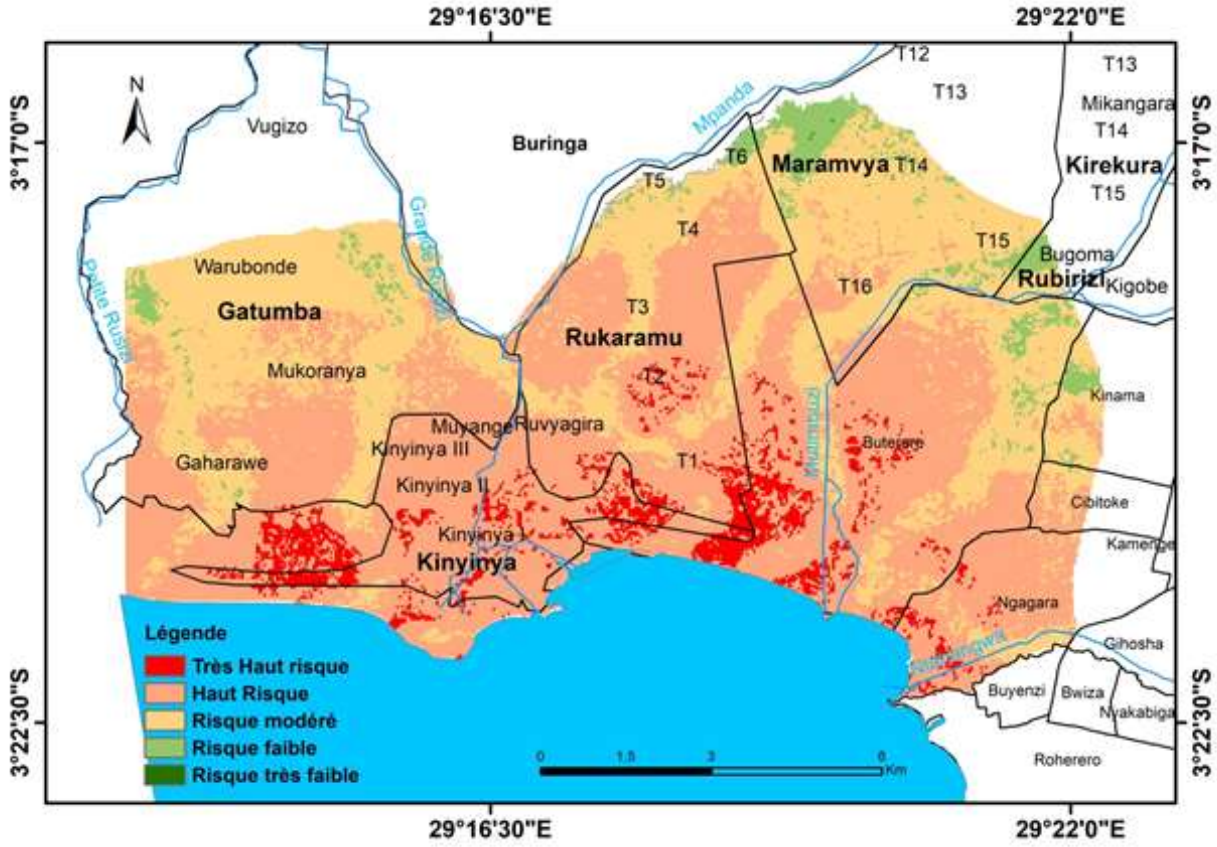


Figure 30: Carte de susceptibilité aux inondations

S'agissant de l'enquête menée dans la zone touchée, nous avons constaté qu'en moyenne un ménage compte 5 personnes. En l'appliquant à la taille de la famille sur les 3501 maisons inondées, nous constatons qu'environ 17505 personnes auraient été touchées par les inondations dans notre zone d'étude dont la majeure partie est déjà délocalisée dans des sites aménagés pour cet effet.

III.2. Interprétation des résultats

III.2.1. Inventaire des méthodes et fiabilité des données

Pour mener cette recherche, nous avons fait recours à un éventail de sources de données. En premier lieu, nous avons fait une recherche documentaire en se servant des recherches antérieures liées aux risques d'inondations. Selon la documentation réalisée à partir des recherches antérieures datant de l'époque coloniale, une bonne partie de la plaine de l'Imbo

était au départ quasiment inoccupée par l'homme. Cette partie était réservée aux savanes, steppes et des zones marécageuses.

Les processus de recontruction des maisons, des ouvrages d'intérêts publics sont anéantis par la récurrence des situations d'urgences liées aux inondations. Cette récurrence s'accompagne parfois de l'augmentation de l'intensité des situations d'urgences.

Nos observations sur terrain nous ont permis de constater que la ville s'étend vers la périphérie et grignote à la fois sur les zones agricoles et les espaces qui jadis étaient réservés aux formations végétales.

En se servant des plans d'aménagements du territoire de l'OBUHA, nous avons constaté que l'extension spatiale et temporaire de la ville, augmente les risques dans un environnement occupé spontanement. A titre d'exemple les quartiers qui existent depuis l'arrivée des colonisateurs sont viabilisés et ne sont pas frappés par les inondations. Il en est de même pour d'autres quartiers qui sont crées après la viabilisation par les services de l'Urbanisme.

Les problèmes d'inondations se manifestent généralement dans les quartiers à faible pente et occupées spontanement. C'est le cas d'une bonne partie de Buterere.

Pour bien étudier la dynamique d'occupation du sol, nous nous sommes servis des images satellitaires de Landsat et Sentinel-2. Ainsi, l'analyse des images satellitaires nous a permis d'étudier les changements d'affectation des terres depuis les années 1987 à 2022 pour les images landsat et de 2016 à 2024 pour les images de haute résolution spatiale Sentinel-2.

La classification supervisée avec le maximum de vraisemblance et la méthode de comparaison diachronique ont été utilisées. Les résultats obtenus, ont permis d'identifier et de caractériser l'évolution spatio-temporaire de l'occupation du sol dans la zone d'étude sur une période de trente cinq ans (1987 à 2022). Ils révèlent que la végétation a connu une grande régression au moment oú le bâti a doublé pendant cette période.

Au départ certaines zones de forêts ont été défrichées et changées en zones agricoles et ensuite la population a investi de vastes territoires pour y installer des maisons d'habitations et des zones d'élevage intensif. L'analyse des images satellitaires nous a permis de constater les changements d'occupation du sol et du niveau du lac Tanganyika , source des inondations.

En faisant l'analyse systématique, nous constatons que la végétation a connu une grande régression au détriment du bâti qui a gagné énormement du terrain.

A titre illustratif, les quartiers comme Kajaga, Gatumba (spécialement Kinyinya I et II, Gaharawe) ne sont pas jadis occupés et étaient soit réservés aux activités agricoles et ou considérés comme zone humides à préserver. Notre classification supervisée des images satellitaires nous a permis de constater des changements spatio-temporaires significatifs laissant prioritairement la place au bâti.

Or, dans une une zone à faible pente, qui était constituée de zones marécageuses, l'installation des maisons augmente la vulnérabilité et par conséquent, les éléments en exposition aux risques sont énormes. La concentration humaine dans une zone à haut risque d'inondation augmente alors la fréquence et l'intensité à cause des éléments du paysage mis en place qui se présentent comme des obstacles d'écoulement dans une zone oú les mouvements gravitaires ne sont pas importants à cause de la faible pente.

De plus, les résultats obtenus, nous ont permis de constater que l'eau du lac a connu une extension spatiale considérable dans ces dernières années et ces années correspondent aux périodes oú on a enregistré beaucoup dommages liés aux inondations. C'est le cas de Gatumba et Kajaga oú des milliers de maisons sont englouties jusqu'à maintenant dans des eaux stagnantes résultant de la combinaison du débordement de la Rusizi et de l'extension du lac Tanganyika. Sur ces cartes réalisées, nous avons constaté qu'au fur et à mesure des années, la végétation recule en faveur du bâti qui gagne du terrain. Le long des cours d'eau étaient pendant ces années occupées par des galeries forestières, ce qui contribuait au ralentissement des impacts d'inondations et d'effondrement des berges.

Pour ce qui est de la cartographie des zones inondées à l'aide des relevées de terrain et du questionnaire d'enquête, nous avons constaté que l'extension spatiale du niveau du Lac Tanganyika est très considérable, dépassant dans certains endroits les limites reglementaires consignées dans le code de l'eau du 26 mars 2012 qui prévoit de laisser 150 m au bord du lac Tanganyika.

Pour l'analyse de chaque classe considérée, nous constatons que la classe eau et végétation, les résultats montrent que la fiabilité est de 100 %. Le plus faible enregistre 75% (classe du bâti). Nous constatons que les pourcentages varient de 100 à 75 % respectivement pour la

classe de l'eau et du sol nu mais aussi de la zone agricole pour les images google earh (sortie). Les comparaisons montrent que les résultats sont satisfaisants quand on tient compte de l'indice de Kappa.

En ce qui concerne les changements du niveau du lac Tanganyika, l'analyse des images satellitaires en libre accès sur Google earth nous ont permis de constater qu'il existe toujours des changements en ce qui concerne l'extension du lac Tanganyika (variation spatio-temporaire).

Pour ce, les images analysées remontent de 1973 à 2023. L'extension du lac Tanganyika pendant ladite période se présentent sommairement comme suit :

i) De 1973 à 1979 : Recul de 126.22 m
ii) 1979 à 1985 : Augmentation de 42.19 m
iii) 1985 à 2011 : Augmentation de 183.3m
iv) 2011 à 2023 : Augmentation de 55.28 m
v) 2023 à 2024 : Augmentation de 65.26 m

Concernant l'analyse de susceptibilité des inondations, les résultats trouvés après la combinaison des différentes cartes thématiques incluant la pente, la pluviométrie, la proximité du lac, la densité de drainage, l'occupation du sol et bien d'autres facteurs de l'aléa, nous donne une carte des risques d'inondations. Ainsi, les zones se trouvant à proximité des cours d'eau et du lac Tanganyika se présentent comme des zones à haut risques d'inondations. C'est le cas de Kajaga et Gatumba qui sont régulièrement touchés par les inondations récurrentes. De surcroît, les localités présentant une pente très faible se présentent également comme des zones à risques d'inondations surtout les crues soudaines. A cause de la défaillance ou incapacité des ouvrages hydrauliques, l'eau ne peut pas être évacuer rapidement, créant ainsi des inondations temporaires. C'est le cas de Buterere, Carama et Kinama.

Compte tenu des observations de terrain, les résultats trouvés sur la carte de susceptibilité cadrent bien avec la réalité de terrain.

III.2.2. Processus d'inondations, causes et déclencheurs

Dans les zones intertropicales oú on observe l'altérnance de la saison sèche et saison pluviale, les causes d'inondations résultent généralement des grosses averses, ou des averses d'intensité faible mais étalées sur de longues périodes consécutives.

L'obstruction des ouvrages hydrauliques ou la défaillance d'un barrage hydroélectrique ou hydroagricole peuvent aussi constituer des causes d'inondations catastrophiques.

Dans la partie Nord de a ville de Bujumbura, les inondations de Gatunguru en février 2014 qui restent gravées dans les mémoires des citadins ont été entraînées par les pluies diluviennes d'environ 80 mm (en une journée) qui se sont abbatues dans les régions surplombant la ville de Bujumbura. Une telle pluviométrie est donc susceptible de causer des dégâts matériels et humains considérables.

Etant donné que les cours d'eau descendant des contreforts des Mirwa charient beaucoup d'objets encombrant, les buses de la rivière Gasenyi sur la RN1 se sont obstruées rendant impossibles le passage des eaux et du coup la rivière a sorti de son lit et a emporté tout ce qui se trouvait dans son passage. On a déploré quelques dizaines de morts, des maisons et infrastructures publiques détruites mais aussi d'autres moyens de subsistance comme des quantités importantes de champs de cultures.

Les élements déclencheurs sont nombreux et peuvent être la forme des bassins versants, l'occupation du sol, ouvrages hyrauliques, pente, pédologie, etc.

Concernant la géologie, l'étude montre qu'il y a la prédominance de deux unités géologiques qui sont les alluvions et basses terrasses résultant des dépôts sédimentaires. Une autre unité géologique présente est constituée par les formations fluviolacustres. La pente du terrain est généralement faible, les ouvrages hydrauliques sont souvent bouchés, ce qui complique l'évacuation des eaux de ruissellement.

Un autre aspect important parmi les éléments déclencheurs concerne les profils en long des cours d'eau traversant cette zone qui sont très contrastés en raison de la topographie qu'ils traversent. Ces cours d'eau une fois débordés jouent un rôle déterminant pour exacerber les risques d'inondations en aval.

Pour le cas de la rivière Ntahangwa, au regard de son profil en long à l'instar des autres cours d'eau prenant source dans les hautes montagnes, elle traverse des zones à pente raide avant de s'étaler dans la plaine de l'Imbo avec des dépôts des matériaux arrachés sur les montagnes, d'où l'extension considérable de son lit majeur.

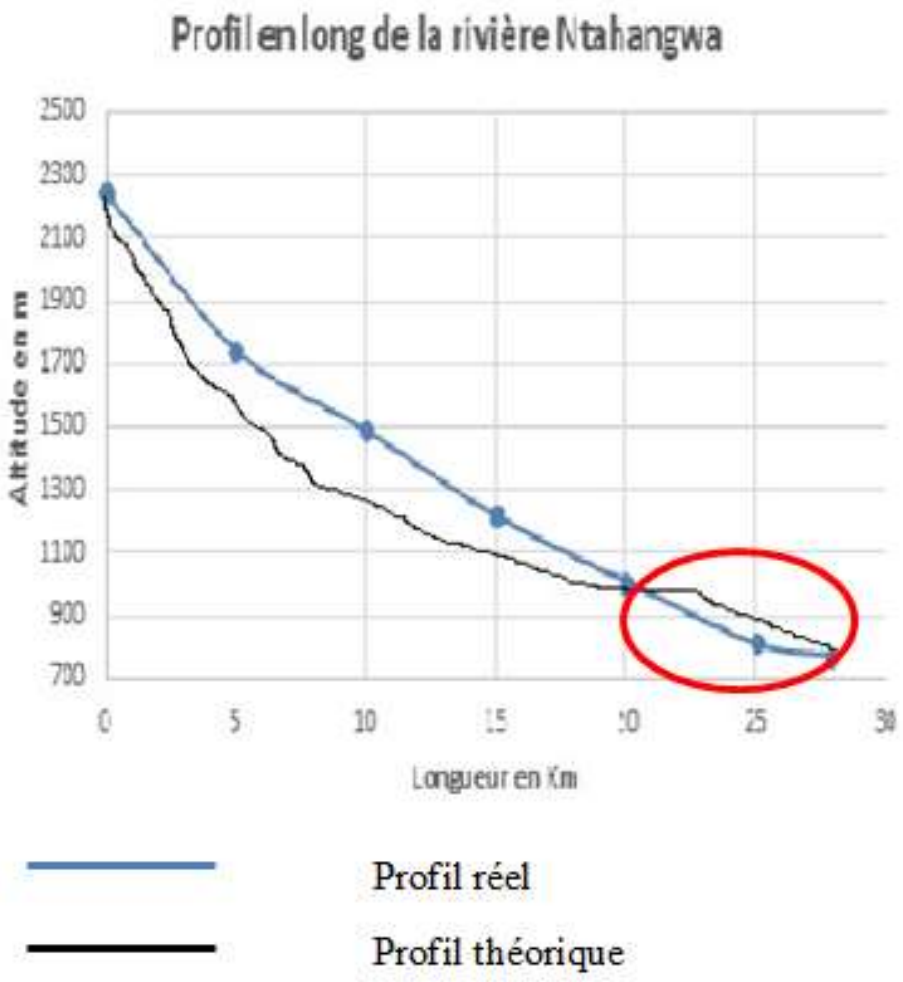
Notons qu'il existe le profil réel qui est adapté au contraste du paysage notamment dans cet endroit oú les cours d'eau prennent source dans les hautes montagnes et se jettent dans le lac Tanganyika après avoir traversé la plaine de l'Imbo.

En plus, il existe aussi le profil théorique tel que visible sur les figure en dessous; ce profil permet de déterminer la zone susceptible de subir des inondations. Ce profil prend l'allure de la topographie en place sans tenir compte des aspects morphologiques du terrain qui par ailleurs fait que le profil réel soit très constrasté.

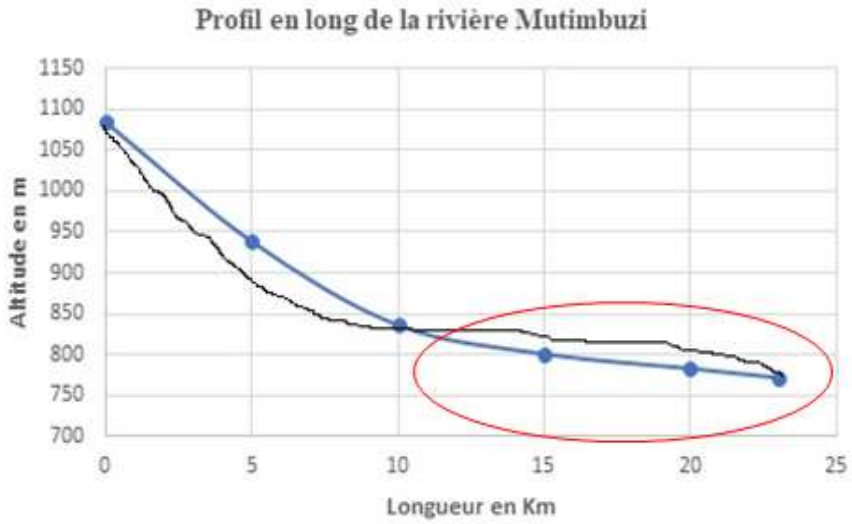
La partie entourée en rouge est celle qui subit les inondations liées au débordement des cours d'eau. Ces cours d'eau arrachent beaucoup de matériaux grossiers, les déplacent, les transportent et à l'arrivée dans une zone ou la pente est très faible; il y a les dépôts et l'étalement des eaux qui envahissent une bonne partie de la plaine.

En période de grandes crues, mars-avril, il est difficile de déterminer le lit majeur d'un cours d'eau.

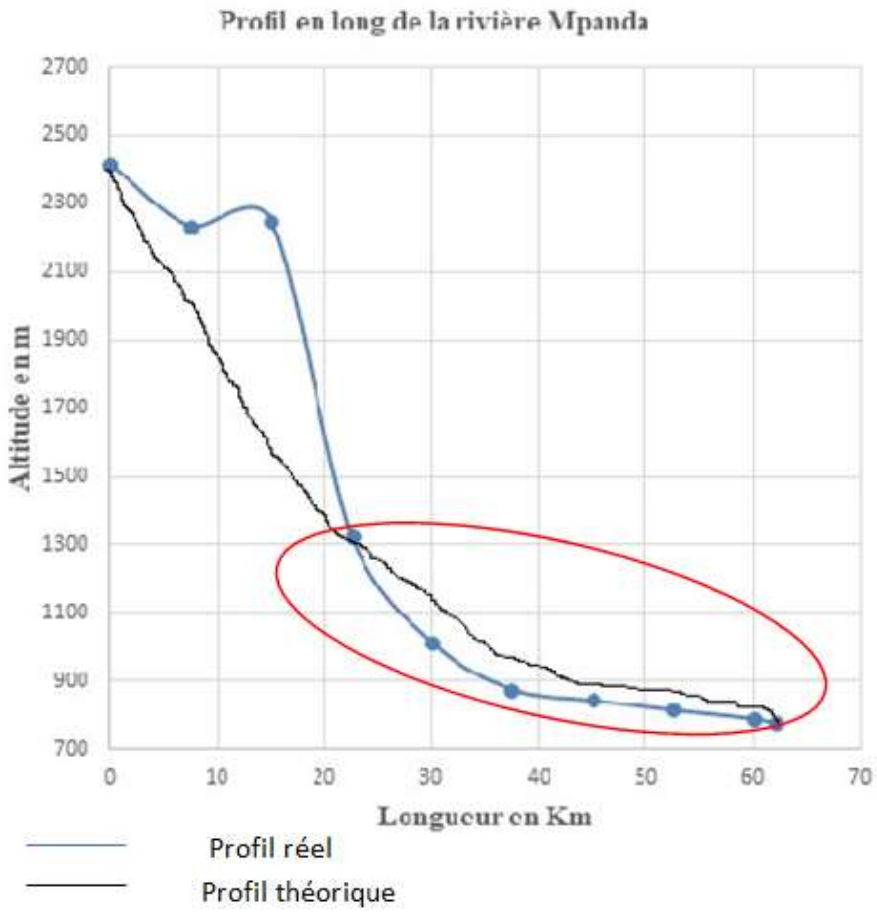
La figure 29 nous présente sur a,b,c et d, les profils réels et théoriques des cours d'eau importants qui traversent notre zone d'étude. Cette figure nous montre que les rivières proviennent toutes des hautes montagnes et s'étalent pour déposer les matériaux arrachés lors qu'elles arrivent dans la plaine. Cet étalement agrandi considérablement leurs lits majeurs allant jusqu'à des dizaines de mètres.


Profil en long de la rivière Ntahangwa
Altitude en m
2500
2300
2100
1900
1700
1500
1300
1100
900
700
0
5
10
15
20
25
30
Longueur en Km
Profil réel
Profil théorique

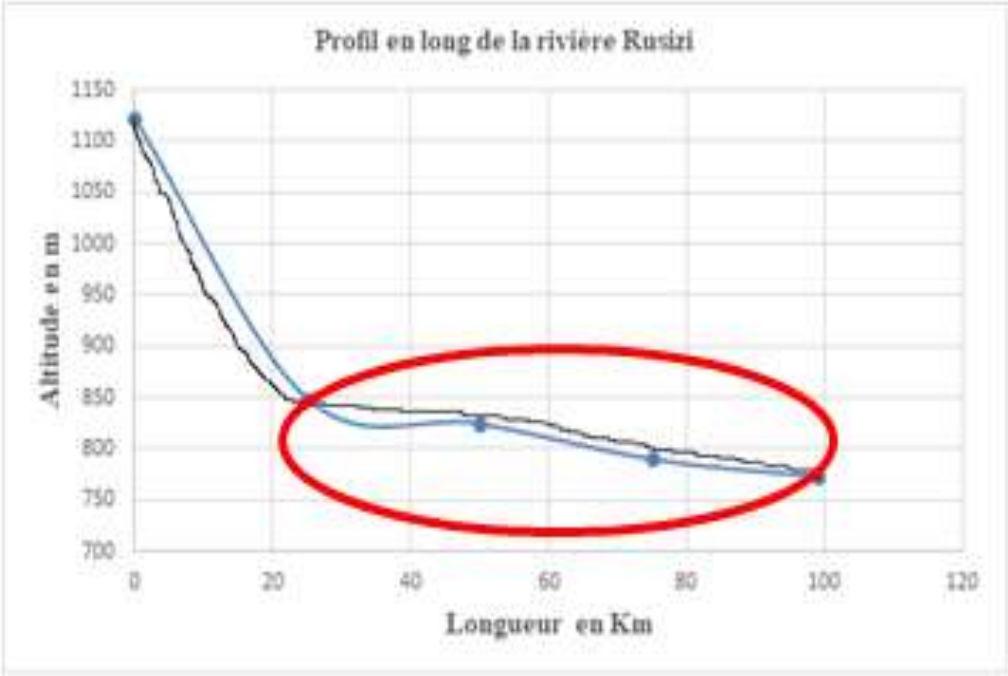
(a)


Profil en long de la rivière Mutimbuzi
Altitude en m
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
750
700
0
5
10
15
20
25
Longueur en Km
Profil réel
Profil théorique

(b)


Profil en long de la rivière Mpanda
Altitude en m
2700
2500
2300
2100
1900
1700
1500
1300
1100
900
700
0
10
20
30
40
50
60
70
Longueur en Km
Profil réel
Profil théorique

(c)



(d)

Figure 31: Profil en long des cours d'eau de notre zone d'étude, (a) : Ntahangwa ; (b) : Mutimbuzi ; (c) : Mpanda ; (d) : Rusizi

La figure 28a montre les rivières torrentielles, surcreusant leurs lits mineurs et menacent les infrastructures d'intérêt public dont les ponts. La figure 28b montre également l'ampleur des impacts matériels (dont les maisons détruites) d'inondations à Gatumba, qui des fois ralentissent l'économie locale notamment par la perte des champs agricoles, ralentissement du transport routier, inaccessibilité de certaines localités, et bien d'autres défis.



(a)



(b)

Figure 32: Impacts d'inondations à Gatumba et rivière torrentielles de la zone d'étude (a) : pont de la république ; (b) : sécours et sauvétage

Selon les observations de terrain, l'inondation à Gatumba liée au débordement de la Rusizi a changé complètement la vie et le mode de vie des populations. Le déplacement à l'intérieur des quartiers inondés se fait maintenant à l'aide des pirogues. La population est toujours en menace permanente à cause des lacs d'eau qui se sont créés autour de leurs maisons. La route nationale qui va de Bujumbura-Uvira est inondée dans plusieurs passages notamment devant l'Eglise MINEVAM de Gatumba.

Pour la période qui couvre notre travail, le niveau du lac Tanganyika a augmenté sensiblement, la Rivière Rusizi a débordé contraignant des milliers de personnes à délocaliser. La figure 31 montre la poulation se déplaçant au niveau des quartiers à l'aide des pirogues.

D'autre part, la population essaie de s'adapter aux inondations récurrentes. Cette figure 29a présente des personnes incluant les enfants se déplacer dans des pirogues. Pour la figure 29b , nous constatons des femmes désesperées en train de vendre quelques produits le long de la route Bujumbura-Uvira. Ces femmes se tiennent dans l'eau qui leur arrivent au niveau des jambes et ont monté des bois pour mettre leurs produits à vendre.



(a)



(b)

Figure 33: Résilience de la population face aux inondations récurrentes à Gatumba

D'autres infrastructures socio-économiques en l'occurrence les écoles, églises, centres de santé et les étables de bovins sont touchés par ces catastrophes naturelles liées aux événements météorologiques extrêmes. La figure 30 montre la zone qui a été durement touchée par les inondations de 2024 et les maisons qui ont été inondées dans la zone d'étude.

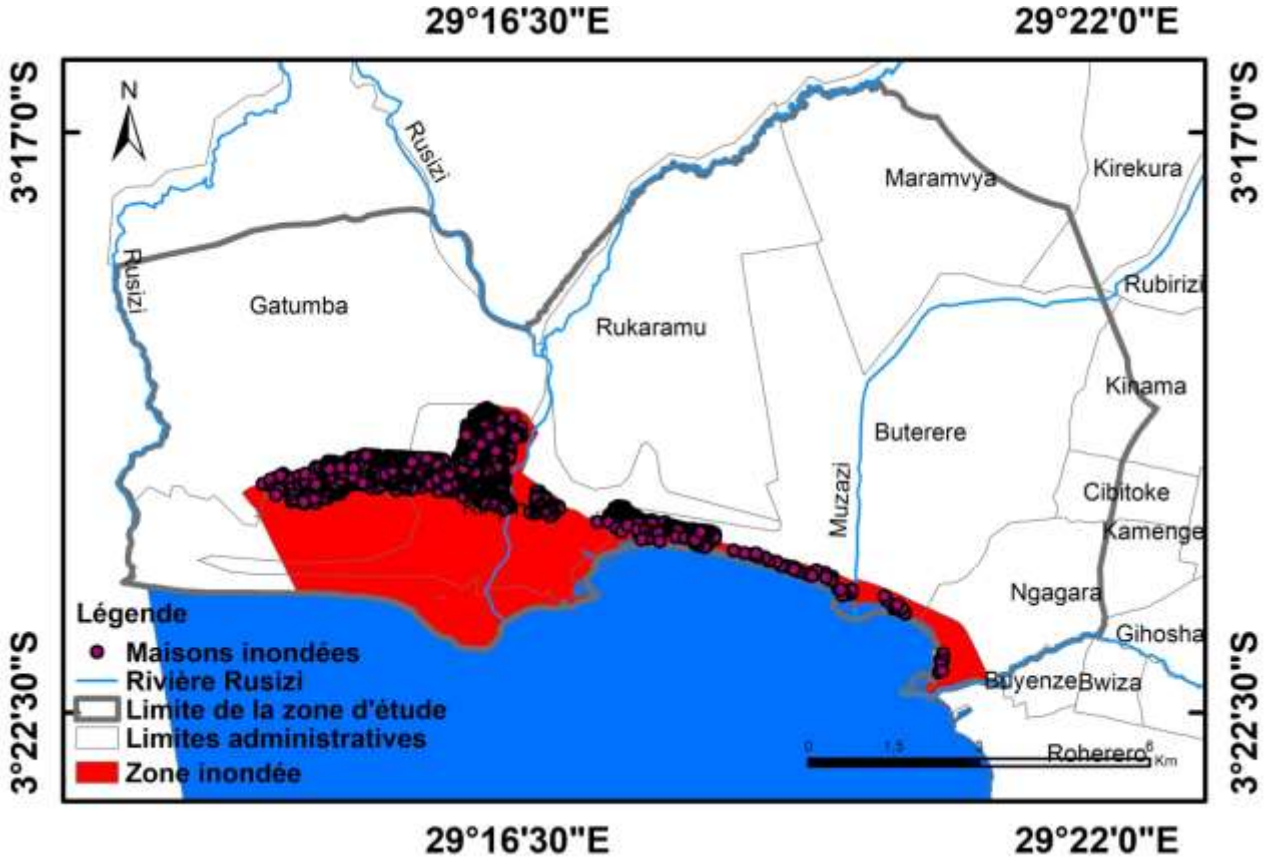


Figure 34: Localisation des maisons inondées

Dans certains endroits mesurés, l'extension du lac Tanganyika a envahi les parties côtières allant de 83 à 121 m (extension spatiale) par rapport au niveau habituel.

S'agissant de l'analyse des changements du niveau du lac Tanganyika, les résultats présentés montrent qu'il y a une corrélation positive de l'augmentation du niveau du lac Tanganyika et les catastrophes d'inondations. De plus la rivière Rusizi qui envahit les populations de Gatumba et Kajaga est exacerbée par la montée du niveau du lac, permettant ainsi l'étalement de la rivière au niveau des ménages avant d'atteindre son embouchure.

La pente qui est faible telle que démontrée ainsi que le changement d'occupation du sol, la nature du sol en place, la densité linéaire,la pluie importante, le relief, les mécanismes d'évacuation des eaux, la proximité du lac et bien d'autres facteurs une fois combinés expliqueraient la récurrence et l'amplification des risques d'inondations.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La population de la Mairie de Bujumbura et les zones périphériques de Kajaga et Gatumba a été confrontée aux risques d'inondations récurrentes qui surviennent en provenance des pluies diluviennes qui s'abattent dans les montagnes des Mirwa et de la Crête Congo Nil et du coup entraînent le débordement des cours d'eau torrentiels avec des dommages inestimables. Ces inondations comme nous l'avons montré peuvent également provenir de l'augmentation du niveau du lac Tanganyika et entraîner des dommages importants le long des rives.

Depuis les années anciennes, l'histoire quoique qu'elle soit orale nous renseigne qu'avant l'arrivée des colonisateurs allemands en 1896 puis suivi par les Belges en 1912, la Plaine de l'Imbo était occupée par la savane arborée tel que documentée dans le premier chapitre.

Avec une telle occupation du sol, quand bien même il y avait les risques d'inondations, les éléments exposés dont les maisons et les champs agricoles n'étaient pas si importants ou étaient quasi inexistants.

En 1964, il y a eu une augmentation considérable du niveau du lac Tanganyika et vu que la population avait déjà occupé la plaine de l'Imbo, des dommages importants liés aux inondations ont été enregistrés dont la destruction des infrastructures d'intérêts publics.

Pour les années 1997 et 2014, des inondations meurtrières ont eu lieu dans la ville de Bujumbura, et ces dernières résultaient du débordement des cours d'eau suite aux pluies diluviennes en amont entraînant l'obstruction des ouvrages hydrauliques d'évacuation des eaux de ruissellement. Le cas qui reste dans les mémoires des citadins a été les inondations de Gatunguru en février 2014 et celles de Cari qui ont endeuillé de nombreuses familles avec des pertes inestimables des maisons individuelles et infrastructures publiques mais également d'autres moyens de subsistance de la population. En 2021 et entre la saison A « SOND 2023 » et « MAM 2024 », nous avons assisté à l'augmentation catastrophique des phénomènes d'inondations.

Pour le cas de notre travail nous avons essayé de comprendre la problématique de la récurrence des inondations en dégageant les causes qui vont de la dégradation de l'environnement en amont, les pluies diluviennes résultant du changement climatique, l'augmentation démographique avec comme effet l'occupation des zones tampon.

L'utilisation des images satellitaires nous ont permis de comprendre comment est le rapport entre la végétation et le bâti au fur des années et les changements constatés sont très importants d'où l'amplification des risques d'inondations. Des localités jadis occupées par la végétation ou zone rizicole ou cotonnière sont actuellement occupées par la population ou les infrastructures d'intérêt public.

Dans le temps, les cours d'eau qui débordaient envahissaient leur zones tampon qui étaient couvertes par la végétation d'où l'absence ou le nombre moins important des dégâts.

Pour tout ce qui précède, nous pouvons désormais confirmer nos hypothèses que la cause d'inondations serait due à la dégradation de l'environnement dans les bassins versants en amont de la ville de Bujumbura ainsi que des pluviométries élevées observées durant les dernières décennies suite au changement climatique qui s'accompagnent de l'amplification de la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes.

Les pertes des vies humaines, la destruction des infrastructures socioéconomiques, des maisons individuelles et leurs moyens de subsistance seraient des impacts majeurs liés aux inondations dans notre zone d'étude.

Pour remédier à une telle situation, il serait important de mettre en œuvre les mesures ci-après :

- Pour l'Office Burundais de la protection de l'Environnement, il faut appliquer scrupuleusement le code de l'eau et le code de l'environnement ;
- A l'endroit des exploitants des matériaux de construction, il faut faire le curage normé des cours d'eau ;
- Pour l'administration locale et les services d'assainissement, il faut entretenir les caniveaux (curage, réhabilitation) notamment à l'approche et pendant la saison pluviale;
- Pour les services de l'OBUHA, viabiliser les nouveaux quartiers avant l'occupation humaine ;
- Pour les services déconcentrés (BPEAE) restaurer les paysages en amont (plantation des arbres sur les hautes montages ou collines dénudées et Aménager les dispositifs antiérosifs dans les terroirs agricoles (en amont) ;

- Pour les exploitants des matériaux de construction, remettre en état les sites d'exploitation des matériaux de construction ;
- Concernant l'OBPE et les ONG locales dans le secteur de l'environnement, stabiliser les berges des cours d'eau (associer le génie civil et génie végétal) ;
- Pour la PF-N de PRGC, aménager les digues de protection sur les grands cours d'eau comme la Rusizi ;
- S'agissant de l'OBPE, préserver la végétation le long du lac Tanganyika et des cours d'eau surtout au niveau de leur embouchure ;
- L'administration locale doit promouvoir la pelouse avec du gazon au lieu de pavage le long des routes et dans les parcelles ;
- Concernant les services d'hygiène et assainissement, aménager les collecteurs d'eau sur les maisons et essentiellement sur les infrastructures publiques aux fins d'hygiène et arrosage des plantes ou fleurs ;
- Pour les services municipaux, déboucher régulièrement les buses et les canalisations souterraines ;
- Concernant la PF-N de PRGC, développer et utiliser les systèmes d'AP fonctionnels (rapide et efficace) ;
- La PF-N de PRGC doit aussi former, sensibiliser et renforcer les capacités de tous les acteurs à tous les niveaux y compris la communauté victime des situations d'urgence.

La liste des mesures ou stratégies à mettre à œuvre telle que ci-haut fournie n'est pas exhaustive. Il y aurait d'autres mesures qui une fois combinées avec celles-ci pourraient contribuer à la réduction d'impacts liés aux risques d'inondations récurrentes et de ce fait préserver l'environnement, la sécurité de la population et leurs moyens de subsistance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alphonse, F. (2014). Evaluation du coût de l'inaction à la protection de la forêt de montagne de la Kibira : Cas des services écosystémiques en faveur. *REPUBLIQUE DU BURUNDI*, 6.

Amaya, A., Ntoumbé, M., Diguim, A. K., & Kah, E. (2021). Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) combinée au Système d'Information Géographique (SIG) : Cas du Département du Diamaré (Extrême-nord, Cameroun). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, *33*(3), 491‑501.

Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, *65*(1‑2), 15‑31.

Ayalew, L., Yamagishi, H., & Ugawa, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, *1*(1), 73‑81. https://doi.org/10.1007/s10346-003-0006-9

Barnard, P. L., Erikson, L. H., Foxgrover, A. C., Hart, J. A. F., Limber, P., O'Neill, A. C., Van Ormondt, M., Vitousek, S., Wood, N., & Hayden, M. K. (2019). Dynamic flood modeling essential to assess the coastal impacts of climate change. *Scientific reports*, *9*(1), 4309.

Barroca, B., DiNardo, M., & Mboumoua, I. (2013). De la vulnérabilité à la résilience : Mutation ou bouleversement? *echogeo*, *24*. https://journals.openedition.org/echogeo/13439

Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., & Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses : The MOVE framework. *Natural Hazards*, *67*(2), 193‑211. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5

Borde, A., Huber, M., Goburdhun, A., Guidoux, A., Revoyron, E., Nsimba, E., Louis, J. A., Donjia, A., & Kesner, J.-L. (2015). Estimation des couts des impacts du changement climatique en Haiti. *Projet de renforcement des capacités adaptatives des communautés côtières d'Haïti aux changements climatiques. Port-au-Prince: Ministère de l'Économie et des Finances*. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ht/UNDP-HT-ProEnv-EtuEconoCC.pdf

Depicker, A., Jacobs, L., Delvaux, D., Havenith, H.-B., Mateso, J.-C. M., Govers, G., & Dewitte, O. (2020). The added value of a regional landslide susceptibility assessment : The western branch of the East African Rift. *Geomorphology*, *353*, 106886.

Flageollet, J. C. (1989). Landslides in France : A risk reduced by recent legal provisions. *International Geological Congress: symposium on landslides. 28*, 157‑167. https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=7203882

Gatti, S., Grech, G., Vandevelde, T., Jasjulke, E., Cunge, J., & Usseglio-Polatera, J. M. (1993). *ISMAP : An integrated approach to the management of agricultural pollution-major orientations after two years.* https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19941904869

Gendreau, N., Longhini, M., & Combe, P.-M. (1998). Gestion du risque d'inondation et méthode Inondabilité : Une perspective socio-économique. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, *14*, p-3.

Gosset, M., Dibi-Anoh, P. A., Schumann, G., Hostache, R., Paris, A., Zahiri, E.-P., Kacou, M., & Gal, L. (2023). Hydrometeorological extreme events in Africa : The role of satellite observations for monitoring pluvial and fluvial flood risk. *Surveys in Geophysics*, *44*(1), 197‑223.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation : A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, *31*(1‑4), 181‑216.

Hervé, N. (2023). *Synthèse du sixième rapport de synthèse du GIEC*. https://policycommons.net/artifacts/6935096/synthese-du-sixieme-rapport-de-synthese-du-giec/7843751/

Jha, A., Lamond, J., Bloch, R., Bhattacharya, N., Lopez, A., Papachristodoulou, N., Bird, A., Proverbs, D., Davies, J., & Barker, R. (2011). Five feet high and rising : Cities and flooding in the 21st century. *World Bank Policy Research Working Paper*, *5648*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1832164

Kpedenou, K. D., Boukpessi, T., & Tchamie, T. T. K. (2016). Quantification des changements de l'occupation du sol dans la préfecture de Yoto (sud-est Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat. *Sciences de l'Environnement*, *13*, 137‑156.

Kubwimana, D., Ait Brahim, L., Nkurunziza, P., Dille, A., Depicker, A., Nahimana, L., Abdelouafi, A., & Dewitte, O. (2021). Characteristics and distribution of landslides in the populated hillslopes of Bujumbura, Burundi. *Geosciences*, *11*(6), 259.

Laghmouch, M., Nimpagaritse, G., Mudende, L., Minani, M., Ndereyimana, J., Icitegetse, I., & Kervyn, F. (2018). *Numérisation de la Carte Géologique au 50,000 ème, Ministère de l'Hydraulique, de l'Energie et des Mines, République du Burundi & Musée royal de l'Afrique centrale (MRAC)Tervuren, Belgium, ISBN 978949224429*. *ISBN 978949224429*.

Lhomme, S. (2012). *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain-Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine* [PhD Thesis, Université Paris-Diderot-Paris VII]. https://theses.hal.science/tel-00772204/

MEEATU. (2013). *POLITIQUE NATIONALE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE*. https://bi.chm-cbd.net/sites/bi/files/2020-12/politiq-nation-changem-climatiq-bi.pdf

Min, J. H., & Lee, Y.-C. (2005). Bankruptcy prediction using support vector machine with optimal choice of kernel function parameters. *Expert systems with applications*, *28*(4), 603‑614.

Ngenzebuhoro, P. C., Mohammed, S., Bahaj, T., Faouzi, M., & Kacimi, I. (2019). Géométrie et caractérisation hydrodynamique d'un système aquifère plio-quaternaire; Cas de la plaine de la basse Rusizi (Burundi). *Bull. L'institut Sci. Sect. Sci. Terre*, 37‑53.

Nibigira, L., Havenith, H.-B., Archambeau, P., & Dewals, B. (2018). Formation, breaching and flood consequences of a landslide dam near Bujumbura, Burundi. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *18*(7), 1867‑1890.

Nkunzimana, A., Bi, S., Alriah, M. A. A., Zhi, T., & Kur, N. A. D. (2020). Diagnosis of meteorological factors associated with recent extreme rainfall events over Burundi.

Atmospheric Research, *244*, 105069. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105069

Ohlmacher, G. C., & Davis, J. C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering geology*, *69*(3‑4), 331‑343.

Poulin, J., Chokmani, K., Tanguy, M., & Bernier, M. (2012). *Cartographie dynamique du risque d'inondations en milieu urbain.* https://espace.inrs.ca/id/eprint/1661/1/R001428.pdf

Quenault, B. (2015). De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe : Nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe? *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, *6*(3). https://journals.openedition.org/developpementdurable/11010

Quenet, G. (2000). La catastrophe, un objet historique? *Hypothèses*, *3*(1), 11‑20.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1980). Hierarchical analysis of behavior in competition : Prediction in chess. *Behavioral Science*, *25*(3), 180‑191. https://doi.org/10.1002/bs.3830250303

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1987). Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process. *European Journal of operational research*, *32*(1), 107‑117.

Sahebjalal, E., & Dashtekian, K. (2013). Analysis of land use-land covers changes using normalized difference vegetation index (NDVI) differencing and classification methods. *African Journal of Agricultural Research*, *8*(37), 4614‑4622.

Skupinski, G., BinhTran, D., & Weber, C. (2009). Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain–Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo: European Journal of Geography*. https://journals.openedition.org/cybergeo/21995

Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems : A method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering geology*, *71*(3‑4), 303‑321.

Tchindjang, M., Mbevo Fendoung, P., & Bopda, A. (2019). Une Afrique Atlantique avec des villes sous l'eau ! Construire des villes côtières sans inondations? *Construire la ville portuaire de demain en Afrique Atlantique*. https://orbi.uliege.be/handle/2268/238401

ANNEXE

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE

I. IDENTIFICATION

1 Nom :

2 Prénom :

3 Age :

4 Sexe :

5 Profession :

6 Niveau d'étude :

II.

1 .Quand est-ce que vous vous êtes installés ici ?

a) avant 2000 b) 2010 c) 2012 d) 2020

2. Y a- t- il des dangers liés à ce cours d'eau ?

a) Oui b) non

3. Quel danger majeur qui menace votre milieu de vie et/ou professionnel ?

a) accidents routiers □ b) inondations □ c) attaques des animaux sauvages □ d) banditisme □

4. Peut- on envisager l'adaptation de la population riveraine face à aux problèmes d'inondations ?

a) oui b) non c) aucune réponse

5. Qui participent activement à la sensibilisation des dangers liés à la mauvaise gestion de cette rivière ?

a) Protection civile

b) Volontaires de la croix rouge

c) Associations œuvrant dans le domaine de l'environnement

d) Administration locale

6. Selon vous que les sont les causes majeures des inondations ?

a)Changements climatiques et dégradation de l'environnement

b) Pluies diluviennes

c)Sédimentation de la rivière ou du lac

7. Quels impacts liés aux inondations dans votre milieu de vie?

a) Destruction des maisons inondées

b) Perte des moyens de subsistance

c) Destruction des infrastructures socioéconomiques

8. Y- a- t-il des personnes qui ont déménagée à cause des inondations

a) Oui b) Non

9. Parmi les personnes touchées y a- t- il des personnes à charge dont les enfants, personnes à handicap physique ou vulnérables ?

a) Oui b) non

10 L'article 5 du code de l'eau du 26 Mars 2012 stipule que 25 m sont réservés à la protection de la rivière ; y a-t- il alors ceux qui passent outre ce code de l'eau en vigueur?

a) Oui b) non c) peut être d) sans réponse

11. Depuis quand vous avez remarqué les inondations ?

a) avant 2000 b) 2010 c) 2020 d) 2024

12. Y- a- il des sanctions faites aux personnes qui s'installent dans les zones à risques d'inondations?

a) oui b) non c) peut être d) sans réponse

13. Peut- on affirmer que cette zone interdite par la loi est instable tenant compte des dangers qui peuvent surgir ?

a) oui b) non c) paraît-il d) sans réponse

Description des données utilisées dans le cadre de cette étude

N°	Types de données	Descriptions	Caractéristiques	Période
1	Inventaire des inondations	Inventaire des impacts	-	2023-2024
2	Images Google Earth Pro	Inventaire, analyse des processus, et des impacts		
3	Modèle Numérique de terrain (DEM)	Inventaire, analyse des processus, évolution ou modification des paysages	10 m	-
4	Carte géologique du Burundi	Inventaire des inondations par rapport aux roches en place	Echelle de 1/50000	2018
5	Carte routière	Inventaire des réseaux de drainage des eaux pluviales (caniveaux)		

6	Fichiers cartographiques de forme	Des données vectorielles tels les réseaux de hydrologiques, les routes, les bâtis, les niveaux administratives	-	Février 2024
7	Données de terrain	Inventaire, processus, impacts, Coordonnées GPS, enquêtes dans les ménages	-	Janvier –mai 2024
8	Données climatiques (pluviométrie et température)	Répartition spatiale et temporaire de précipitations	Station Rwegura et Aéroport de Bujumbura	1983-2023
9	Plans d'extension de la ville de Bujumbura	Mise en place des lotissements		
10	Images satellitaires	Occupation du sol	Landsat 5, 7 et 8(résolution spatiale de 30 m et 15 m panchromatique) Sentinel-2 (résolution spatiale de 10, 20 et 60 m)	(1987,1995, 2011 et 2022) Sentinel-2 (2016 et 2024)
11	Proximité et éloigment du lac	Analyse de l'impact du lac Tanganyika		

Caractérisques du satellite sentinel-2

Orbite / Altitude	786 km, Orbite Héliosynchrone, Noeud équatorial 10:30 UTC
Date de lancement	Sentinel-2A le 23 Juin 2015, Sentinel-2B le 7 Mars 2017
Durée de vie	7,25 ans
Nombre de satellites	2
Revisite	5 jours
Résolution Spatiale	4 bandes à 10m, 6 bandes à 20m de résolution et 3 bandes à 60m de résolution
Bandes Spectrale	13 bandes spectrales dans la gamme du visible, proche Infrarouge et infrarouge court
Résolution Radiométrique	12 Bits
Fauchée	290 Km
Mode d'acquisition	Monoscopique
Echelle de travail	1/50 000
Précision de localisation	5/6 m

Matrice de comparaison par paire

Facteurs	Pente	Proximité du lac	Pluviométrie	LULC	Densité de drainage	Lithologie	NDVI
Pente	1	5	4	3	3	2	2
Proximité du lac	1/5	1	5	4	4	2	2
Pluviométrie	1/4	1/5	1	3	3	2	2
LULC	1/3	1/4	1/3	1	3	2	2
Densité de drainage	1/3	1/4	1/3	1/3	1	2	2
Lithologie	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2
NDVI	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1
SUM	**3,5**	**6,916666667**	**9,666666667**	**10,3333333**	**14**	**11,5**	**13**

Matrice de comparaison par paire Normalisée

Facteurs	Pente	Proximité du lac	Pluviométrie	LULC	Densité de drainage	Lithologie	NDVI	SUM	Criteria Weights	Criteria weights %
Pente	0,28571429	0,57831325	0,4137931	0,19354839	0,14285714	0,17391304	0,15384615	1,94198537	0,277426481	14
Proximité de lac	0,07142857	0,14457831	0,31034483	0,29032258	0,28571429	0,17391304	0,15384615	1,43014778	0,204306825	30
Pluviométrie	0,07142857	0,04819277	0,10344828	0,29032258	0,21428571	0,17391304	0,15384615	1,05543711	0,15077673	18
LULC	0,14285714	0,04819277	0,03448276	0,09677419	0,21428571	0,17391304	0,15384615	0,86435178	0,123478825	10
Densité de drainage	0,14285714	0,03614458	0,03448276	0,03225806	0,07142857	0,17391304	0,15384615	0,64493031	0,092132902	15
Lithologie	0,14285714	0,07228916	0,05172414	0,0483871	0,03571429	0,08695652	0,15384615	0,5917745	0,084539214	5
NDVI	0,14285714	0,07228916	0,05172414	0,0483871	0,03571429	0,04347826	0,07692308	0,47137316	0,067339023	8
								7	**1**	**100**

Calcul de cohérence

CW	0,27742648	0,20430683	0,15077673	0,12347883	0,0921329	0,08453921	0,06733902			
Facteurs	**Pente**	**Proximité du lac**	**Pluviométrie**	**LULC**	**Densité de drainage**	**Lithologie**	**NDVI**	**SUM**	**C W**	**WSV/CW**
Pente	0,27742648	1,38713241	0,60310692	0,37043648	0,27639871	0,16907843	0,13467805	3,21825746	0,321819368	10,00019819
Proximité du lac	0,06935662	0,27742648	0,75388365	0,4939153	0,36853161	0,16907843	0,20201707	2,33420916	0,321819368	7,253165553
Pluviométrie	0,06935662	0,06935662	0,15077673	0,37043648	0,27639871	0,16907843	0,13467805	1,24008162	0,215356927	5,758262075
LULC	0,13871324	0,09247549	0,05025891	0,12347883	0,36853161	0,16907843	0,13467805	1,07721455	0,167265027	6,440166065
Densité de drainage	0,13871324	0,06935662	0,05025891	0,03086971	0,0921329	0,16907843	0,20201707	0,75242687	0,111112418	6,771762212
Lithologie	0,13871324	0,13871324	0,07538837	0,06173941	0,04606645	0,08453921	0,13467805	0,67983797	0,096241784	7,063854636
NDVI	0,13871324	0,09247549	0,07538837	0,06173941	0,04606645	0,04226961	0,06733902	0,52399159	0,088204476	5,940646257
										7,032579283