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

Effet combiné de la déforestation et du changement climatique sur la susceptibilité aux glissements de terrain du Sud-Est de Bujumbura (rivière Ntahangwa – Mugere)

Kwibuka Ishimwe, Yvette; Sous la direction de : Dr. Nkunzimana Athanase; Dr Ir Ntakirutimana Léonard

2026-03
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2462

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

MASTER EN SCIENCES ET GESTION INTEGREE DE L'ENVIRONNEMENT

Effet combiné de la déforestation et du changement climatique sur la susceptibilité aux glissements de terrain du Sud-Est de Bujumbura (rivière Ntahangwa – Mugere)

Par :

KWIBUKA ISHIMWE Yvette

MÉMOIRE

Présenté et défendu en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement

Option : Génie de l'Environnement

Sous la direction de :

Directeur : Dr. NKUNZIMANA Athanase

Co-directeur : Dr Ir NTAKIRUTIMANA Léonard

Bujumbura, Mars, 2026

MEMBRES DU JURY :

Président : Dr. KUBWIMANA Désiré

Secrétaire : Dr. MATAKARA Giscard

Directeur : Dr. NKUNZIMANA Athanase

Co-directeur : Dr. Ir. NTAKIRUTIMANA Léonard

DEDICACE

A mes parents,

A mes frères et belles-sœurs

A la famille NGENZIRABONA

A tous mes amis et connaissances

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, mes remerciements s'adressent particulièrement à mon Directeur de mémoire Dr NKUNZIMANA Athanase et à mon Co-Directeur Dr Ir NTAKIRUTIMANA Léonard pour leur disponibilité et leur patience malgré leurs multiples occupations. Leurs conseils méthodologiques et leur rigueur scientifique m'ont guidé vers l'essentiel.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté à évaluer ce travail. Ils ont pris leur temps à lire ce mémoire afin de l'améliorer. Je leur en suis très reconnaissant.

Une vive reconnaissance est adressée à tous les professeurs du Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, pour la formation solide et multidisciplinaire dont ils m'ont bénéficié.

Je remercie chaleureusement mes parents et grands frères pour leur soutien et leurs encouragements constants tout au long de mes études.

A toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, qu'elles trouvent ici mes sympathies et mes reconnaissances.

Que ce mémoire vous comble de joie.

RESUME

Ce mémoire s'inscrit dans une perspective de compréhension intégrée des facteurs naturels et anthropiques responsables de l'augmentation des risques de glissements de terrain dans la zone située entre les rivières Ntahangwa et Mugere, au Nord et au Sud de la ville de Bujumbura. Cette région, marquée par une topographie accidentée et une forte densité humaine, connaît depuis plusieurs décennies une recrudescence d'instabilités de pentes, souvent aggravées par la déforestation, l'urbanisation non planifiée et les effets du changement climatique.

L'étude a mobilisé une approche géospatiale et diachronique, basée sur l'analyse des images satellitaires Landsat (1990–2024) et des données climatiques issues de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU). Les traitements effectués sous SIG ont permis de réaliser une classification supervisée de l'occupation du sol, une analyse des pentes et une cartographie des zones à risque.

Les résultats ont montré une régression significative du couvert forestier, passant de 2257,88 ha en 1990 à 845,28 ha en 2024, soit une perte d'environ 62 %. Cette diminution du couvert végétal s'accompagne d'une expansion rapide des zones bâties multipliées par plus de 40 fois sur la même période. Parallèlement, l'évolution climatique indique une augmentation des précipitations extrêmes et une irrégularité interannuelle liée à la variabilité climatique régionale accentuant la saturation des sols et la fréquence des mouvements de terrain.

L'analyse multicritère (pente, lithologie, densité de drainage, occupation du sol et aspect topographique), pondérée selon la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), a permis d'établir une carte de susceptibilité aux glissements. Celle-ci révèle que près de 35 % de la zone d'étude présente une vulnérabilité élevée à très élevée, notamment sur les pentes abruptes de cette zone.

La production des cartes cartographiques illustrant la susceptibilité aux glissements de terrain. Ces cartes constituent un outil d'aide et une base scientifique solide pour l'orientation des actions de reboisement, aménagement du territoire, la mise en place des systèmes d'alerte précoce et le renforcement de la planification de la résilience environnementale face aux aléas climatiques.

MOTS CLES : Glissements de terrain, Déforestation, Changement climatique, Vulnérabilité environnementale, Gestion intégrée des risques

ABSTRACT

This thesis is part of an integrated approach aimed at understanding the natural and anthropogenic factors responsible for the increasing risk of landslides in the area located between the Ntahangwa and Mugere rivers, to the North and South of Bujumbura city. This region, characterized by rugged topography and high population density, has experienced for several decades a resurgence of slope instability, often aggravated by deforestation, unplanned urbanization, and the effects of climate change.

The study adopted a geospatial and diachronic approach based on the analysis of Landsat satellite images (1990–2024) and climatic data from the Geographic Institute of Burundi (IGEBU). GIS-based analyses included supervised land-use classification, slope analysis, and risk mapping.

Results revealed a significant decline in forest cover, from 2,257.88 ha in 1990 to 845.28 ha in 2024, representing a 62% loss. This reduction in vegetation cover coincides with a rapid expansion of built-up areas, which have increased more than fortyfold over the same period. Meanwhile, climate trends show an increase in extreme rainfall events and interannual irregularity related to regional climate variability, further contributing to soil saturation and the frequency of landslides.

The multi-criteria analysis (slope, lithology, drainage density, land use, and topographic aspect), weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP), produced a landslide susceptibility map. The findings indicate that nearly 35% of the study area exhibits high to very high vulnerability, particularly on the steep slopes of that sector.

The production of cartographic maps illustrating landslide susceptibility. These maps constitute a decision-support tool and a solid scientific basis for guiding reforestation initiatives, land-use planning, the establishment of early warning systems, and the strengthening of environmental resilience planning in response to climate-related hazards.

KEYWORDS: Landslides, Deforestation, Climate Change, Environmental Vulnerability, Integrated Risk Management.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY i
DEDICACE ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DES MATIERES vi
SIGLES ET ABREVIATIONS viii
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES FIGURES x
AVANT- PROPOS xi
0. INTRODUCTION 1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 5
I.1. Revue de la littérature 5
I.1.1. Déforestation 5
I.1.2. Changement climatique 6
I.1.3. Glissements de terrain 7
I.1.4. Facteurs naturels et anthropiques des glissements de terrains 8
I.1.4.1. Facteurs naturels 8
I.1.4.2. Facteurs anthropiques 8
I.1.5. Impacts du changement climatique sur l'amplification des glissements de terrain 9
I.1.6. Etat des lieux du phénomène de glissements de terrains au Burundi 10
I.1.6.1. Etudes de cas spécifiques 10
I.1.6.2. Interactions entre le climat, l'usage du sol, l'urbanisation et la déforestation 13
I.1.6.3. Impacts dimensionnels dans le cadre environnementale, économique et sociale 13
I.1.7. Cadres politiques et réglementaires du Burundi sur la gestion des risques et la protection des forêts 13
I.2. Présentation de la zone d'étude 16
I.2.1. Délimitation spatio-temporelle de la zone d'étude 16
I.2.2. Description de la zone d'étude 17
I.2.2.1. Démographie 17
I.2.2.2. Climat 18
I.2.2.3. Géologie de la zone d'étude 20
I.2.2.4. Hydrographie de la zone d'étude 22

I.2.2.5. Biodiversité 24
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES 26
II.1. Méthodologie 27
II.1.1. Téléchargement des images satellitaires 28
II.1.2. Prétraitement des images satellitaires 28
II.1.3. Classification non supervisée 28
II.1.4. Photographies *in situ* 29
II.1.5. Production des cartes thématiques, analyse de pente et étude diachronique 29
II.1.6. Digitalisation sur Google Earth 29
II.1.7. Etude du lien de cause à effet entre le changement climatique et la dynamique des glissements de terrain 30
II.2. Techniques et outils utilisés 31
CHAPITRE III : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS. 32
III.1. Dynamique de l'occupation du sol 32
III.2. Evolution spatiale des glissements de terrains 38
III.3. Evolution climatique dans la zone 38
III.4. Cartographie des zones à risque de glissement de terrain 41
III.5. Illustration de certains glissements de terrain dans la zone 44
III.6. Evaluation de la susceptibilité aux risques de glissements 47
III.6.1. Analyse de la matrice de comparaison 50
III.6.2. Cohérence du modèle et interprétation du CR 51
CONCLUSION 52
SUGGESTIONS 53
Références bibliographiques 54
ANNEXES 61

SIGLES ET ABREVIATIONS

BCG : Bureau de Centralisation Géomatique

BV : Bassin-Versant

CIE : Centre d'Information Environnementale

CRHB : Centre de Recherche Hydrometeologique du Burundi

DGPC : Direction Générale de la Protection Civile

DOS : Dark Object Subtraction

FAO : Food and Agriculture Organization

GPS : Global Positioning System

IGEBU : Institut Geographique du Burundi

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

ISTEEBU : Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi

MINEAGRIE : Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage

OBPE : Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

PFNPRGC : Plateforme Nationale de Prévention des Risques et de Gestion des Catastrophes

QGIS : Quantum Geographic Information System (logiciel libre du SIG)

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

SIG : Système d'Information Géographique

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Dynamique des superficies des composants d'occupation du sol 32
Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bugarama (1990 à 2024) 39
Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bujumbura (1990 à 2024) .. 39
Tableau 4: Classification de la susceptibilité des facteurs environnementaux aux risques de glissements de terrain 47
Tableau 5: échelle utilisée pour les comparaisons par paire pour cette étude (Saaty, 1980) ... 62
Tableau 6: Analyse de comparaison par paires (Saaty, 1980) 62

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Destruction des maisons à Kamesa suite aux glissements de terrain 11
Figure 2: Délimitation spatiale de la zone d'étude..... 17
Figure 3:Evolution démographique de la zone d'étude **(RGPH, 1990 et 2008, RGPHAE, 2025)**..... 18
Figure 4: Diagramme ombrothermique de Bujumbura 19
Figure 5: Carte géologique de la zone d'étude 20
Figure 7: Carte hydrologique de la zone 23
Figure 8: Schéma synthétique de la méthodologie utilisée 31
Figure 9: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 5 TM, 1990) 33
Figure 10: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 7 TM, 2000)..... 34
Figure 11: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 8 OLI/TIRS, 2014) 35
Figure 12: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 9 OLI/TIRS, 2024) 36
Figure 13: Evolution de l'occupation du sol et de glissements de terrain (1990-2024) 37
Figure 14: Evolution des précipitations (cumuls annuels) de la zone d'étude pour la période 1990-2024..... 40
Figure 15: Cartographies des pentes 42
Figure 16: Carte d'illustration de certains glissements de terrain dans la zone d'étude correspondant aux images prises sur terrain 44
Figure 17: Carte d'évaluation de la susceptibilité des risques 49

AVANT- PROPOS

Cette étude porte sur l'effet combiné de la déforestation et du changement climatique sur les risques de glissements de terrain dans la zone comprise entre les rivières Ntahangwa et Mugere, surplombant la ville de Bujumbura. Le choix de ce sujet est motivé par l'augmentation récurrente des catastrophes liées aux mouvements de terrain observées dans cette région au cours des dernières décennies.

Ces événements provoquent d'importantes pertes de terres, des destructions d'infrastructures et une dégradation progressive des ressources naturelles. Dans un contexte marqué par les changements climatiques et une forte pression anthropique sur les écosystèmes, il apparaît indispensable de mieux comprendre les interactions entre ces facteurs afin de proposer des stratégies efficaces de prévention et de gestion durable des risques.

La réalisation de ce travail a nécessité l'exploitation de données satellitaires, climatiques et topographiques par utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de l'analyse multicritère pour évaluer la susceptibilité des terrains aux glissements. Les résultats obtenus apportent une contribution scientifique à la compréhension de la dynamique des risques naturels dans les zones de montagne du Burundi et constituent un outil d'aide à la décision pour les institutions chargées de l'aménagement du territoire, de la protection de l'environnement et de la gestion des catastrophes.

Ce mémoire ambitionne également de contribuer à la mise en œuvre des politiques nationales de réduction des risques de catastrophes, de gestion durable des ressources naturelles et d'adaptation aux changements climatiques. Les recommandations formulées pourront servir de base aux décideurs, aux collectivités territoriales, aux chercheurs et aux partenaires techniques et financiers engagés dans la protection des populations et des écosystèmes vulnérables.

0. INTRODUCTION

Les glissements de terrain comptent parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices à l'échelle mondiale, particulièrement dans les régions montagneuses et tropicales. Ils résultent de l'interaction entre des facteurs naturels tels que les précipitations intenses, l'érosion ou les séismes, et des facteurs anthropiques comme la déforestation, l'urbanisation non planifiée et les pratiques agricoles sur pentes (Crozier, 1985). Dans un contexte de changement climatique, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes des précipitations accentue l'instabilité des versants et la vulnérabilité des sols. Par ailleurs, la perte du couvert forestier mondial, estimée à environ 420 millions d'hectares entre 1990 et 2020, contribue significativement à l'érosion et à la dégradation des écosystèmes, réduisant ainsi la capacité naturelle des sols à résister aux mouvements de masse selon le rapport de la FAO en 2020.

En Afrique, ces phénomènes prennent une ampleur particulière dans les zones de hautes terres où la pression démographique et la dépendance à l'agriculture de subsistance favorisent la déforestation et l'occupation des pentes instables. Les pays de la région des Grands Lacs sont régulièrement confrontés à des glissements de terrain causant d'importantes pertes humaines et matérielles. La combinaison de fortes précipitations, de la déforestation et des caractéristiques géomorphologiques rend ces régions particulièrement vulnérables (Claessens et al., 2007 ; Munyaneza, 2019).

Au Burundi, cette problématique est accentuée par un relief fortement accidenté, une densité de population élevée et une pression croissante sur les ressources naturelles. La déforestation, estimée à environ 1,2 % par an, résulte principalement de l'expansion agricole, de la coupe de bois et des besoins énergétiques des ménages (Ndayishimiye et al., 2022). Combinée aux modifications du régime pluviométrique liées au changement climatique, cette situation favorise l'augmentation des risques de glissements de terrain, en particulier dans les zones collinaires et périurbaines.

La zone comprise entre la rivière Ntahangwa au nord et Mugere au sud, surplombant la ville de Bujumbura, illustre parfaitement cette dynamique. Cette zone est caractérisée par des pentes abruptes, une urbanisation rapide et souvent anarchique, ainsi qu'une forte dégradation du couvert végétal, elle connaît une recrudescence des glissements de terrain ces dernières années. Les pluies intenses observées dans la région entraînent une saturation rapide des sols, aggravée par l'insuffisance des aménagements de drainage et de gestion des eaux.

Face à cette situation, il apparaît nécessaire d'analyser l'effet combiné de la déforestation et du changement climatique sur la susceptibilité aux glissements de terrain dans cette zone, afin de proposer des stratégies efficaces de prévention et de gestion durable des risques.

0.1. Problématique

Au cours des dernières décennies, la zone située entre la rivière Ntahangwa et Mugere, qui surplombe la ville de Bujumbura, connaît une recrudescence des glissements de terrain ayant des impacts socio-environnementaux préoccupants. Cette situation semble liée à deux phénomènes majeurs : d'une part, la déforestation massive due à l'urbanisation et à l'agriculture sur pente ; d'autre part, les effets du changement climatique qui se traduisent par des précipitations intenses sur de courtes périodes.

Bien que plusieurs études aient porté séparément sur la déforestation ou le changement climatique, peu ont abordé l'effet combiné de ces deux facteurs sur les glissements de terrain. Un sol déjà fragilisé par la déforestation devient beaucoup plus vulnérable lorsqu'il est exposé à des pluies intenses, cette interaction complexifie la compréhension des risques.

0.2. Questions de recherche

1. Dans quelle mesure la déforestation dans la zone comprise entre la rivière Ntahangwa et Mugere surplombant la ville de Bujumbura influence-t-elle la susceptibilité des sols aux glissements de terrain ?
2. Comment les précipitations extrêmes affectent-elles la fréquence et la gravité des glissements de terrain dans la zone d'étude ?
3. Quelles sont les caractéristiques biophysiques (pente, couverture du sol, précipitations) des zones les plus affectées par les glissements de terrain dans la zone d'étude ?

0.3. Objectifs

0.3.1. Objectif général

L'objectif global est d'évaluer l'effet combiné de la déforestation et du changement climatique sur les risques de glissements de terrain dans la zone surplombant la ville de Bujumbura comprise entre la rivière Ntahangwa et Mugere sur les 20 dernières années.

0.3.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont :

1. Évaluer l'évolution spatio-temporelle de la couverture forestière et de l'occupation des sols dans la zone d'étude et identifier les zones les plus exposées aux glissements de terrain ;
2. Analyser les extrêmes météorologiques, les tendances climatiques et leurs impacts ;
3. Analyser la corrélation entre la déforestation, les précipitations extrêmes et les mouvements de terrain afin de proposer des recommandations pour la prévention et la gestion durable des risques de glissements de terrain.

0.4. Hypothèses de recherche

0.4.1. Hypothèse générale

L'hypothèse générale est la combinaison de la déforestation et du changement climatique influence significativement l'occurrence et l'intensité des glissements de terrain dans la zone surplombant la ville de Bujumbura comprise entre la rivière Ntahangwa et Mugere.

0.4.2. Hypothèses spécifiques

Les hypothèses spécifiques de travail sont :

1. La déforestation dans la zone Ntahangwa–Mugere surplombant la ville de Bujumbura augmente significativement la susceptibilité des sols aux glissements de terrains.
2. Les précipitations extrêmes induites par le changement climatique contribuent à la fréquence et la gravité accrue des glissements de terrains.
3. Les zones les plus touchées combinent forte pente, sol nu et fortes pluies.

0.5. Intérêt du sujet

Ce sujet présente un intérêt majeur à la fois scientifique, environnemental et socio-économique.

Sur le plan scientifique, il contribue à une meilleure compréhension des interactions entre la déforestation et le changement climatique dans le déclenchement des glissements de terrain, un aspect encore peu étudié de manière intégrée. Il permet ainsi d'enrichir les connaissances sur les dynamiques d'instabilité des versants dans les milieux tropicaux de montagne.

Sur le plan environnemental, cette étude met en évidence les conséquences de la dégradation du couvert végétal sur la stabilité des sols et la gestion durable des écosystèmes.

Elle souligne l'importance du reboisement et de la conservation des ressources naturelles comme mesures de réduction des risques.

Sur le plan socio-économique, les résultats attendus pourront aider les décideurs, les urbanistes et les communautés locales à mieux anticiper les zones à risque, à améliorer la planification territoriale et à réduire les pertes humaines et matérielles liées aux glissements de terrain. Enfin, ce travail s'inscrit dans une perspective de gestion intégrée des risques de catastrophes, essentielle pour le développement durable de la ville de Bujumbura et de ses périphéries.

0.6. Structure du mémoire

Le présent mémoire est structuré comme suit :

I. Le premier chapitre concerne la revue de la littérature, présentation et description de la zone d'étude.
II. Le deuxième chapitre concerne les matériels et méthodes
III. Le troisième chapitre : présentation, l'interprétation et discussion des résultats

Une introduction et une conclusion encadrent ce travail.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Revue de la littérature

I.1.1. Déforestation

La déforestation est la disparition ou la réduction significative de la couverture forestière naturelle au profit d'autres usages du sol tels que l'agriculture, l'élevage, l'urbanisation ou encore l'exploitation minière. Selon le rapport de la FAO (2020), elle peut être totale lorsqu'elle aboutit à la transformation complète du milieu forestier en un autre usage, ou partielle dans le cas d'une dégradation progressive des écosystèmes forestiers.

Au niveau mondial, les forêts naturelles jouent un rôle central dans la régulation des cycles hydrologiques, la protection des sols contre l'érosion, la séquestration du carbone et la préservation de la biodiversité. Leur destruction a donc des impacts majeurs sur l'environnement et les sociétés humaines (Roose *et al*., 2018).

Entre 1990 et 2020, environ 420 millions d'hectares de forêts ont été perdus à l'échelle mondiale, soit une superficie équivalente à celle de l'Union européenne**.** Ce phénomène est particulièrement marqué dans les zones tropicales où la croissance démographique rapide, la pauvreté énergétique, l'agriculture extensive surbrûlis et les coupes illégales de bois constituent les principaux moteurs de la déforestation. Les conséquences environnementales sont nombreuses notamment la perte de biodiversité, la perturbation du régime des eaux, la baisse de la fertilité des sols et l' augmentation des risques naturels tels que l'érosion et les glissements de terrain (Achard, 2014; Roose *et al.*, 2018)

Sur le plan géotechnique, la végétation forestière joue un rôle stabilisateur essentiel des versants. Les racines des arbres contribuent à l'ancrage des particules du sol et limitent le ruissellement en favorisant l'infiltration de l'eau (Mbago-Bhunu *et al*., 2022; Sidle *et al.*, 2006). Lorsque la couverture végétale est supprimée, les sols deviennent plus sensibles à la saturation hydrique, surtout en période de pluies intenses. Cela augmente significativement les risques de mouvements de terrain. Plusieurs études menées en Asie du Sud-Est, en Amérique latine et en Afrique de l'Est ont confirmé la corrélation directe entre déforestation sur pente et instabilités gravitaires (Chaturvedi *et al*., 2018)

La déforestation constitue l'un des facteurs majeurs de déstabilisation des pentes, favorisant l'apparition de glissements de terrain dans les zones montagneuses et tropicales. La couverture

végétale joue un rôle déterminant dans la stabilité des sols. Elle améliore leur cohésion grâce aux racines et réduit l'érosion par interception des eaux de pluie (Sidle et Ochiai, 2006).

Lorsque les forêts sont détruites, la diminution de l'ancrage racinaire entraîne une perte de résistance au cisaillement, rendant les pentes plus vulnérables aux mouvements de masse, surtout en période de fortes précipitations (Glade, 2013). Au Burundi les zones déboisées présentent un taux d'incidence des glissements jusqu'à trois fois supérieur à celui des zones forestières intactes.

La perte de matière organique et la compaction accrue du sol accentuent également le ruissellement de surface, favorisant la saturation rapide du terrain. Ce phénomène est particulièrement critique dans les collines entourant la mairie de Bujumbura, où la pression démographique pousse à la conversion des forêts en terres agricoles et urbanisation augmentant le risque de glissements catastrophiques (Bachar, 2024; Madani, 2023).

I.1.2. Changement climatique

Le changement climatique désigne une modification durable des paramètres climatiques globaux ou régionaux, notamment des températures, des précipitations et des événements extrêmes(Chaturvedi, 2018). L'un des effets les plus notables du changement climatique dans les régions tropicales est l'augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes, en particulier les épisodes de fortes pluies.

Selon le GIEC (2023), la température moyenne de la planète a augmenté d'environ 1,1 °C depuis l'ère préindustrielle, entraînant une fréquence accrue d'événements extrêmes tels que les fortes précipitations provoquant l'érosion des sols et les glissements de terrains, les sécheresses prolongées, les cyclones tropicaux. Ces modifications perturbent les équilibres climatiques régionaux, avec des conséquences profondes sur les systèmes écologiques, hydrologiques et géomorphologiques.

Parmi les multiples impacts du changement climatique, l'intensification des précipitations intenses constitue un facteur clé dans le déclenchement des glissements de terrain. En effet, l'augmentation du volume des pluies, combinée à leur caractère épisodique et brutal, entraîne une saturation rapide des sols, réduisant leur cohésion et favorisant leur instabilité sur les versants pentus (Sidle *et al.*, 2006)**.** Les terrains déboisés ou dépourvus de couverture végétale sont particulièrement vulnérables à ces phénomènes.

En Afrique de l'Est, plusieurs études ont démontré que le réchauffement climatique est corrélé à une hausse de la variabilité pluviométrique, marquée par des épisodes de pluies torrentielles intercalées avec de longues périodes de sécheresse (Weissenberger *et al*., 2016).

Au Burundi, cette tendance se manifeste par des saisons pluvieuses de plus en plus erratiques, souvent caractérisées par des pluies diluviennes sur de courtes périodes. Selon le rapport du ministère de l'environnement, l'agriculture et de l'élevage (MINEAGRIE) en 2023, les modifications climatiques ont pour effet d'éroder les sols, d'augmenter le ruissellement et d'aggraver les risques de mouvements de masse, en particulier sur les terrains instables comme ceux surplombant la ville de Bujumbura. Une fréquence accrue de précipitations extrêmes et d'inondations localisées, contribuent à l'augmentation des glissements de terrain. La combinaison de ces aléas avec la fragilité géologique des sols et les pressions anthropiques notamment la déforestation crée un environnement particulièrement propice aux catastrophes naturelles (Weissenberger et al., 2016)

I.1.3. Glissements de terrain

Les glissements de terrain sont des mouvements massifs du sol, de roches ou de débris le long d'une pente sous l'effet de la gravité (Djerbal, 2013). Ces mouvements constituent une menace sérieuse pour les communautés humaines, les infrastructures et les écosystèmes, particulièrement dans les zones montagneuses ou instables. Ce phénomène est généralement causé par une instabilité géologique, amplifiée par des facteurs hydrologiques et anthropiques. La saturation excessive du sol par l'eau, souvent due à des précipitations intenses, est l'un des déclencheurs principaux (Cruden et Varnes, 1996).

Dans le monde entier, plusieurs facteurs naturels ou anthropiques peuvent en être à l'origine, notamment les fortes pluies, les séismes, la déforestation, l'altération des pentes par des activités humaines et les variations climatiques (Djerbal, 2013). Ces phénomènes se multiplient avec une intensité croissante, causant des pertes humaines et matérielles considérables (Kabanyegeye *et al*., 2024). La topographie accidentée de la région surplombant la ville de Bujumbura, combinée à la pression démographique, à l'urbanisation anarchique et aux changements d'usage des terres, augmente la vulnérabilité aux glissements de terrain.

I.1.4. Facteurs naturels et anthropiques des glissements de terrains

I.1.4.1. Facteurs naturels

Les glissements de terrain sont souvent déclenchés par des processus naturels qui modifient l'équilibre des pentes. Les fortes précipitations prolongées ou intenses constituent l'un des déclencheurs les plus fréquents, car elles saturent le sol en eau et réduisent sa résistance au cisaillement (Iverson, 2000)**.** Les séismes et vibrations tectoniques peuvent également provoquer des ruptures soudaines de pente, en particulier dans les zones géologiquement fragiles. La nature géologique et la composition du sol influencent fortement la susceptibilité aux glissements : les sols argileux gonflants et les matériaux meubles sont particulièrement vulnérables (Highland et Bobrowsky, 2008; Keefer, 1984)**.** La topographie, notamment la pente raide et l'altitude, accroît la gravité des mouvements de masse. Les variations climatiques naturelles, comme les épisodes El Niño, peuvent intensifier les précipitations extrêmes et déclencher des glissements massifs (Gariano et Guzzetti, 2016).

I.1.4.2. Facteurs anthropiques

Les activités humaines jouent un rôle déterminant dans l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des glissements de terrain.

D'une part l'urbanisation non planifiée figure parmi les causes majeures. Dans de nombreuses zones, les constructions se développent sur des pentes instables sans études géotechniques préalables, entraînant un déboisement massif et une imperméabilisation des sols par les routes, les toitures et les surfaces bétonnées. Cette imperméabilisation favorise le ruissellement rapide des eaux de pluie, accentuant l'érosion et la déstabilisation des versants (Fell *et al.*, 2008).

D'autre part, l'extraction des matériaux de construction, comme le sable, les pierres et l'argile, fragilise également les pentes. Les carrières ouvertes sur des zones sensibles modifient la structure interne des sols et suppriment leur cohésion, réduisant la résistance mécanique des versants. Ces pratiques, souvent effectuées sans mesures de restauration ou de stabilisation, créent des niches d'érosion qui évoluent rapidement en glissements de terrain, surtout pendant les saisons pluvieuses (Amaral, 2018).

La déforestation amplifie ce phénomène en supprimant le rôle protecteur des racines qui fixent le sol et absorbent une partie de l'eau de pluie. En l'absence de couverture végétale, les sols deviennent plus sensibles à l'érosion hydrique et à la saturation en eau d'où les conditions deviennent favorables au déclenchement des glissements (Sidle et Ochiai, 2006).

Dans certaines zones, la coupe de bois pour le chauffage domestique, combinée à l'extension des surfaces cultivées, a considérablement réduit la stabilité naturelle des versants (Kabanyegeye et al., 2022; Masharabu et al., 2023).

Ces facteurs anthropiques agissent souvent en synergie : l'urbanisation stimule la demande en matériaux de construction, ce qui encourage leur extraction, tandis que ces deux processus nécessitent souvent une déforestation préalable. Ce cumul d'impacts crée un cercle vicieux de déstabilisation progressive des pentes, aggravé par les précipitations intenses liées au changement climatique.

I.1.5. Impacts du changement climatique sur l'amplification des glissements de terrain

Le changement climatique exerce une influence croissante sur la fréquence, l'intensité et la distribution spatiale des phénomènes géologiques, notamment les glissements de terrain, l'érosion côtière, la subsidence et les mouvements de masse (Thiery et al., 2015). L'augmentation des températures moyennes entraîne une fonte accélérée des glaciers et du pergélisol, déstabilisant les pentes dans les zones de montagne et libérant de grandes quantités d'eau dans les bassins versants (Crozier, 2010; Hock *et al.*, 2019).

La modification du régime des précipitations, avec une intensification des pluies extrêmes et une variabilité accrue, accroît la saturation des sols et favorise leur instabilité, particulièrement sur les terrains à forte pente (Crozier, 2010; Hock *et al.*, 2019).

Les épisodes de sécheresse prolongée, suivis de pluies intenses, provoquent également des fissurations dans les sols argileux, qui se gorgent d'eau rapidement et deviennent plus susceptibles aux glissements.

Le changement climatique peut aussi déclencher des processus de dégel rapide dans les régions de haute altitude, augmentant le risque d'effondrements rocheux (Gruber et Haeberli, 2017).

Au Burundi, où la topographie est marquée par des collines abruptes et des zones à fortes pentes, la combinaison de pluies torrentielles et la déforestation amplifie les effets du changement climatique sur la stabilité des sols (Nibigira, 2022; Nkunzimana *et al.*, 2019). Les zones riveraines des rivières et lisières de montagnes deviennent particulièrement vulnérables, car les crues soudaines déstabilisent les berges et déclenchent des glissements. Ce lien étroit entre climat et phénomènes géologiques souligne la nécessité d'intégrer la gestion des risques liés au changement climatique dans l'aménagement du territoire et la prévention des catastrophes.

I.1.6. Etat des lieux du phénomène de glissements de terrains au Burundi

Le Burundi, à l'instar de nombreux pays d'Afrique subsaharienne, subit depuis plusieurs décennies une variabilité climatique accrue qui se traduit par des épisodes pluviométriques extrêmes, une élévation des températures moyennes et des perturbations saisonnières marquées. Cette dynamique, associée à des pressions anthropiques croissantes sur les écosystèmes, a accentué la fréquence et l'intensité des catastrophes naturelles, notamment les glissements de terrain (Nkunzimana *et al*., 2020). Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en 2021, la région des Grands Lacs est l'une des plus vulnérables du continent africain face au changement climatique, en raison de la combinaison entre topographie accidentée, forte densité de population et fragilité des écosystèmes montagneux.

Dans ce contexte, les précipitations deviennent de plus en plus irrégulières et concentrées sur de courtes périodes, entraînant des épisodes d'inondations et d'érosion sévères.

Les effets du changement climatique sur la dynamique géomorphologique du Burundi se traduisent donc par une déstabilisation progressive des terrains et par une récurrence accrue de glissements dans les zones à forte pente, notamment celles de Bujumbura, Rumonge, Bururi et Cibitoke (Nibigira, 2018)

I.1.6.1. Etudes de cas spécifiques

Les effets des glissements de terrain combinés au changement climatique sont déjà visibles dans plusieurs localités. Dans le quartier Sororezo, les fissures menaçantes et les maisons effondrées ou endommagées plusieurs fois ont provoqué le déplacement de centaines de personnes.

A Kamesa, Busoro, Ruziba et Kizingwe-Bihara, des glissements de terrain ou ravinements ont détruit des maisons, des routes et des infrastructures de base (Nibigira, 2022)



Figure 1: Destruction des maisons à Kamesa suite aux glissements de terrain

Destruction des maisons à Kamesa suite aux glissements de terrain (Nkurunziza, 2024)

Cela illustre parfaitement comment un phénomène géohydrologique, combiné à des précipitations fortes, peut déclencher une catastrophe. Ce travail inclut la modélisation tridimensionnelle du glissement, l'analyse des sections géophysiques, et la simulation de la vague d'inondation, montrant des risques concrets pour les populations urbaines riveraines.

Dans des zones périurbaines de Bujumbura, la construction sans étude géotechnique, les afflux d'eau non canalisés et la non-prise en compte des zones à risque sont rapportés comme causes majeures de glissements qui menacent les habitations (Mbonimpa *et al.*, 2025).

Les observations climatologiques du Burundi au cours des dernières décennies révèlent une augmentation notable de la température moyenne annuelle (environ +1,4°C depuis 1960) et une variabilité accrue des précipitations IGEBU en 2020. Cette tendance favorise une intensification des épisodes de pluies torrentielles, responsables de la saturation des sols et de la déstabilisation des pentes (Nkunzimana *et al.*, 2020).

Plus de 90 % des glissements de terrain au Burundi sont déclenchés par les fortes pluies, ce qui indique que le facteur climatique joue un rôle prépondérant. En parallèle, la nature géologique (roches fragiles, pentes abruptes) et les rivières jouant un double drainage peuvent amplifier ces

phénomènes, surtout quand les pentes sont déjà dégradées ou déboisées (Dai et Lee, 2012; Nkunzimana *et al*., 2020).

Selon Nibigira, (2022), les premiers grands glissements recensés dans les collines surplombant Bujumbura remontent à la fin des années 1980, notamment sur les pentes de Mugoboka, Kanyosha et Nyabagere, où les sols argilo-sableux instables ont été fragilisés par la perte du couvert forestier. Ces événements avaient provoqué des perturbations majeures dans les réseaux de drainage et entraîné des coulées boueuses dans certains quartiers bas de la ville.

Durant la décennie 1990–2000, plusieurs incidents de moindre ampleur ont été signalés, mais c'est à partir des années 2000 que la fréquence et l'intensité des glissements ont fortement augmenté. D'après le rapport de l'OBPE en 2021, cette intensification est directement liée à la croissance urbaine rapide de Bujumbura et à la conversion des terres forestières en zones bâties, notamment dans les communes de Mukaza et Muha (Nduwimana et al., 2025). L'occupation anarchique des pentes, la construction de routes non stabilisées et les déboisements à des fins agricoles ont contribué à la fragilisation du manteau pédologique.

L'un des événements les plus marquants dans la zone d'étude reste celui de 2018, un glissement d'importance a été enregistré dans la zone de Kanyosha, provoquant la fermeture temporaire de routes locales et des dégradations d'infrastructures hydrauliques (Nibigira, 2018).

Les années 2019–2020 ont été particulièrement critiques, avec des pluies anormalement fortes attribuées à la variabilité climatique régionale. Ces précipitations intenses ont déclenché des mouvements de terrain à Mutanga Sud et Sororezo, provoquant des dégâts considérables sur les habitations et les réseaux d'assainissement (Kubwimana, 2022). Les rapports de la Direction Générale de la Protection Civile (DGPC ,2021) signalent également une recrudescence des glissements mineurs sur les versants non végétalisés de Mugoboka et Kiriri.

Récemment, au cours de la période 2022–2024, des études récentes ont confirmé une aggravation des instabilités de pente, notamment après les épisodes de pluie prolongés de mars et avril 2023. Ces phénomènes ont entraîné l'érosion des sols, la rupture de certaines diguettes et la détérioration des routes secondaires reliant les quartiers de Gasekebuye et Kanyosha**.**

L'augmentation des catastrophes naturelles (inondations, glissements, ravinement) est liée directement à l'intensification climatique, le manque de capacité à gérer ces risques en amont, l'insuffisance des infrastructures de drainage, et la croissance urbaine anarchique se démarque comme facteur aggravant.

I.1.6.2. Interactions entre le climat, l'usage du sol, l'urbanisation et la déforestation

Les études montrent que les effets du climat ne se manifestent pas seuls. Ils sont renforcés par des modifications du couvert végétal, la construction non planifiée, l'extraction de matériaux, le ravinement et l'imperméabilisation des sols (Kubwimana, 2022**).** Ce dernier décrit les ravins creusés par les pluies sur des versants dénudés, où l'infiltration est réduite, ce qui accélère la saturation des sols et précipite les glissements.

De plus les interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans les régions du lac Tanganyika participent à la dynamique de glissements et de propagation des impacts suite aux affluents, les ravins et les zones de dépôt alluvionnaire (Mugisho Bachinyaga, 2024). L'urbanisation exerce non seulement une pression sur les sols, mais fragilise les berges, supprime les zones tampons, entraîne des puits perdus non étanches ce qui engendre des infiltrations non contrôlées (Russo et Cirella, 2023).

I.1.6.3. Impacts dimensionnels dans le cadre environnementale, économique et sociale

Les conséquences des glissements de terrain au Burundi sont multiples et profondes.

Sur le plan environnemental, ils entraînent la dégradation des sols, la perte de la végétation et la sédimentation accrue des rivières et du lac Tanganyika, menaçant la qualité de l'eau et la biodiversité aquatique (Nibigira *et al*., 2018).

Sur le plan infrastructurel, les glissements causent la destruction de routes, d'habitations et de réseaux d'assainissement, comme observé à Gikoto, Kanyosha et Sororezo (Kubwimana, 2021).

Sur le plan socio-économique, Selon le rapport publié par la Direction Générale de la Protection Civile (DGPC ,2022), ces catastrophes provoquent le déplacement de populations entières, la perte de moyens de subsistance et des coûts de reconstruction très élevés.

I.1.7. Cadres politiques et réglementaires du Burundi sur la gestion des risques et la protection des forêts

La gestion durable des ressources naturelles et la prévention des risques environnementaux au Burundi s'inscrivent dans un cadre politique et réglementaire cohérent, élaboré à partir des engagements internationaux et des priorités nationales de développement. Ce cadre vise principalement à réduire la vulnérabilité des populations face aux catastrophes naturelles, dont les glissements de terrain, et à promouvoir la conservation des écosystèmes forestiers, essentiels à la stabilité des sols et à la régulation climatique (République du Burundi, 2018).

Sur le plan institutionnel, le Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage (MINEAGRIE) est l'organe central chargé de la coordination des politiques environnementales et forestières. L'Office Burundais pour la Protection de l'Environnement (OBPE), créé par le Décret n°100/188 du 23 août 2011, joue un rôle clé dans l'application des lois environnementales, notamment en matière de surveillance écologique, de gestion des aires protégées et de suivi des risques naturels**.** L'OBPE coordonne également les évaluations d'impact environnemental (EIE), devenues obligatoires pour tout projet susceptible d'affecter l'environnement, selon la Loi n°1/010 du 30 juin 2000 portant Code de l'Environnement.

Concernant la gestion des risques de catastrophes, le Cadre National de Réduction des Risques et de Gestion des Catastrophes (2018-2025) met en avant l'approche de la prévention, de la préparation et de la résilience communautaire. Ce cadre est aligné sur le Cadre de Sendai (2015–2030), adopté par les Nations Unies, qui appelle à réduire considérablement les pertes humaines et économiques dues aux catastrophes naturelles.

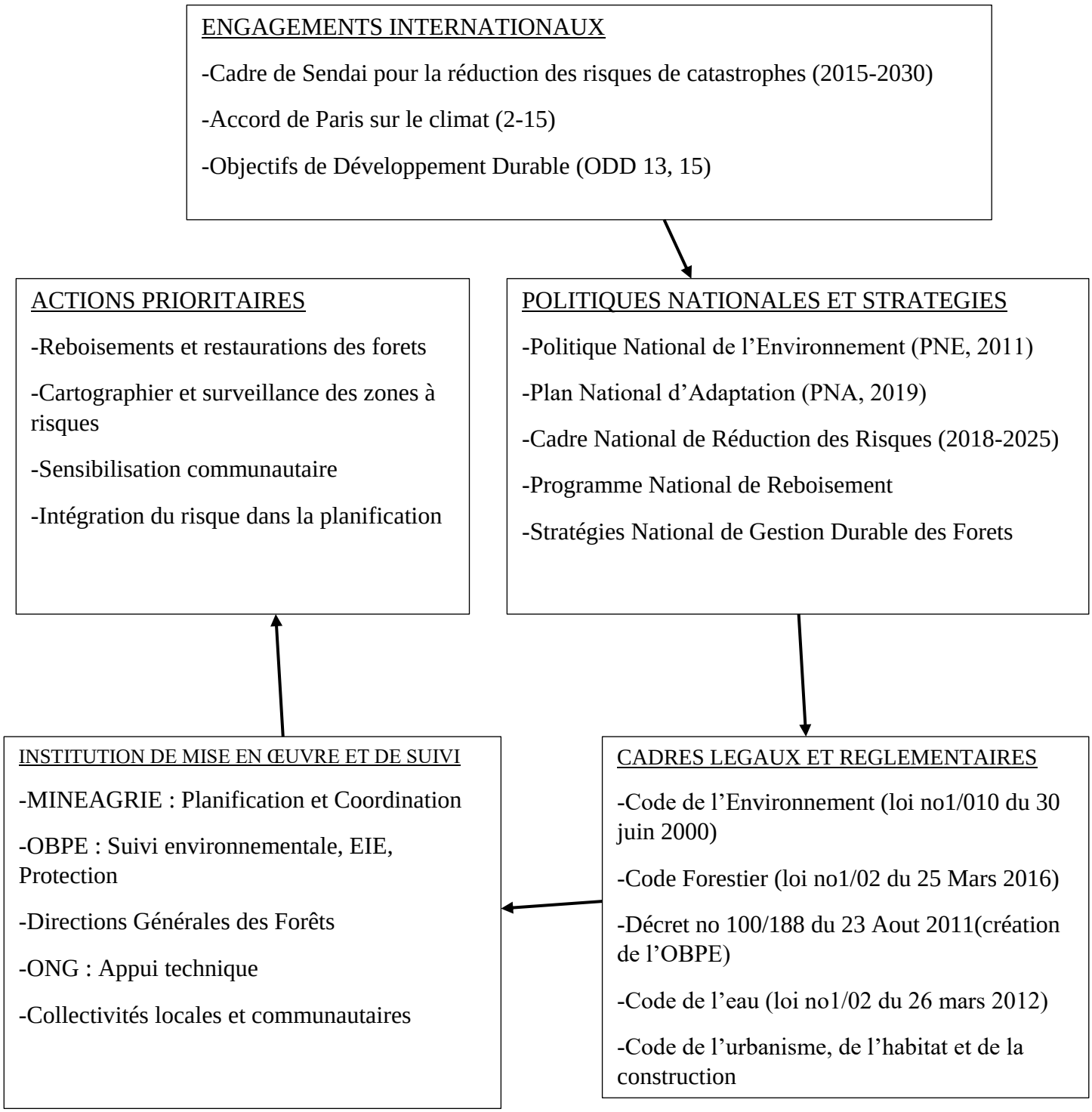
Il recommande la cartographie des zones à risque, la réhabilitation des forêts de protection, la sensibilisation communautaire et l'intégration de la gestion des risques dans la planification du développement local (PNUD, 2019).

Dans le domaine forestier, le Code Forestier du Burundi (Loi n°1/02 du 25 mars 2016) établit les principes de gestion durable des forêts, en distinguant les forêts de production et les forêts de protection. Ce code interdit le défrichement dans les zones de fortes pentes, les berges des rivières et les forêts naturelles sans autorisation préalable. Il encourage également la foresterie communautaire et la restauration des paysages dégradés à travers des initiatives locales telles que le Programme National de Reboisement (PNR, 2017–2027), qui vise à reconstituer le couvert forestier du pays jusqu'à 30 % du territoire national d'ici 2030 (MINEAGRIE, 2018).

Le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNA, 2019) souligne, pour sa part, la forte corrélation entre la déforestation, la variabilité climatique et les glissements de terrain. Il recommande la reforestation des zones montagneuses et la promotion de pratiques agroforestières durables. Ces mesures visent à réduire l'érosion des sols, stabiliser les versants et améliorer la régulation hydrique.

La PNE stipule que la déforestation et la mauvaise gestion des bassins versants constituent des causes majeures de la fragilisation des sols et de l'accroissement des risques de glissements de terrain (Nkunzimana *et al.*, 2021).

Schéma synthétique du cadre politique et réglementaire en matière de gestion des risques et de protection des forêts



I.2. Présentation de la zone d'étude

I.2.1. Délimitation spatio-temporelle de la zone d'étude.

Le présent travail porte sur la période de 1990 à 2024. Spatialement la zone d'étude se situe entre la rivière Ntahangwa au Nord et la rivière Mugere au Sud. Dans la partie Nord-Est, elle comprend les quartiers (Sororezo,Coga , Muyira et Kavumu), dans la partie Sud-Est (Nyamaboko, et Gisovu), dans la partie Sud – Ouest (Ruziba et Kizingwe-Bihara), dans la partie Nord-Ouest (Mutanga Sud,Mugoboka et Kiriri-Vugizo), dans la partie Est (Bigwa,Ruyaga, Kabumba et Gisovu) et la partie Ouest (Gikoto, Gasekebuye,Gitaramuka, Kamesa et Nkenga-Busoro). Cette zone correspond à une bande de terrain surplombant directement la ville de Bujumbura et couvre un relief escarpé, formé de versants abrupts qui dominent la plaine littorale.

Sur le plan topographique, cette zone est marquée par un fort dénivelé de la région de Mirwa, allant de près de 855 mètres d'altitude sur les rives du lac Tanganyika à plus de 1 200 mètres sur les crêtes environnantes (Ndikubwayo, 2019). Les pentes prononcées, combinées à un régime pluviométrique élevé (plus de 1 200 mm/an), rendent ces versants particulièrement sensibles aux phénomènes de ruissellement intense, d'érosion hydrique et de glissements de terrain **(**Ndayishimiye *et al*., 2019).

Hydrographiquement, la rivière Ntahangwa au nord et la rivière Mugere au sud constituent des limites naturelles de cette zone, mais aussi des vecteurs d'amplification des processus érosifs lors des fortes précipitations (Bizimana et Van Ranst, 2016). La zone est également traversée par de petits ravins et affluents saisonniers qui accélèrent l'instabilité des sols.

La zone inclut des quartiers densément peuplés de Mukaza (tels que Mugoboka, Mutanga Sud, Sororezo, Kiriri ,) ainsi que des zones périurbaines de Muha(des quartiers tels que Kanyari, Busoro, Kizingwe,Busoro…) où l'urbanisation récente a souvent été réalisée sans études géotechniques préalables, augmentant ainsi le risque de mouvements de terrain (Ndikumana, 2021). L'expansion urbaine vers les versants a entraîné la déforestation et la réduction des zones végétalisées, accentuant la vulnérabilité face aux aléas géologiques.

Cette zone, du fait de sa position stratégique dominant la capitale économique du pays, est à la fois un espace de fort intérêt socio-économique et un territoire à haute vulnérabilité environnementale. Elle concentre de nombreux enjeux liés à l'occupation du sol, à la gestion des risques et à la planification urbaine durable**.**

Localisation de la zone d'étude

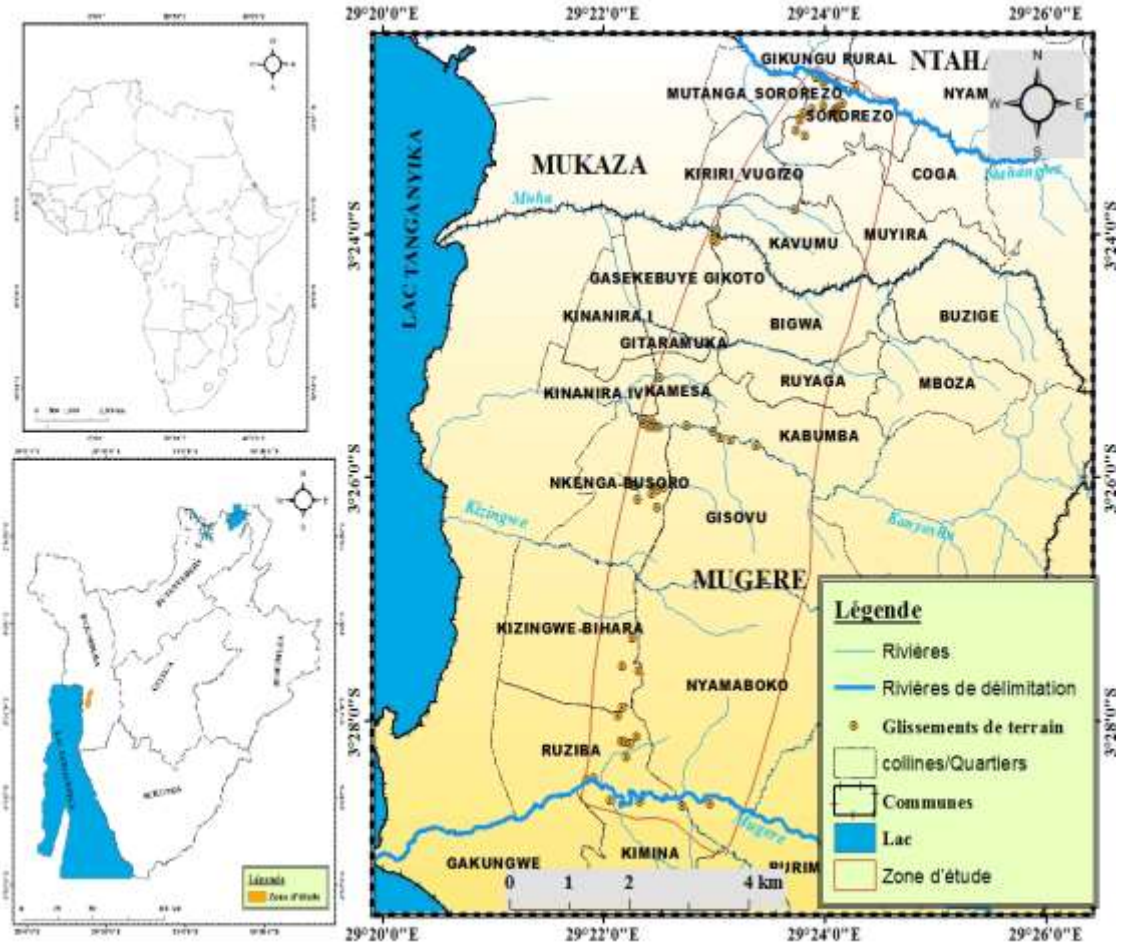


Figure 2: Délimitation spatiale de la zone d'étude

I.2.2. Description de la zone d'étude

La zone d'étude comprise entre la rivière Ntahangwa au Nord et la rivière Mugere au Sud surplombant la ville de Bujumbura a été délimitée sur base de critères géomorphologique (nature du sol, type de roches,), topographiques (la pente de collines), hydrographiques (rivières, ruisseaux,) et anthropiques (agricultures, urbanisations, Orpaillage,).

I.2.2.1. Démographie

Selon les résultats du recensement de la population et de l'habitat publiés par l'ISTEEBU (2008), la ville de Bujumbura comptait une population de 497.166 habitats.

Les données de recensement général de la population et de l'habitat de 2008 étaient de 275411habitats contrairement à celui de 1990 ou la population était de 166281 habitats.

Dans notre zone d'étude, la situation démographique selon le recensement de 2025 est de 681810 habitats de la commune Mugere et Mukaza de la province Bujumbura.

Cette augmentation galopante de population en ville de Bujumbura apparait comme une raison principale de l'extension de la ville. Elle est à la base d'une pression qui se fait sur les zones vertes des quartiers périphériques par urbanisation et agriculture anarchique. Cela rend le milieu très vulnérable aux aléas climatiques.

La figure ci-dessous illustre le dynamisme démographique de notre zone d'étude depuis 1990 jusqu'en 2025.

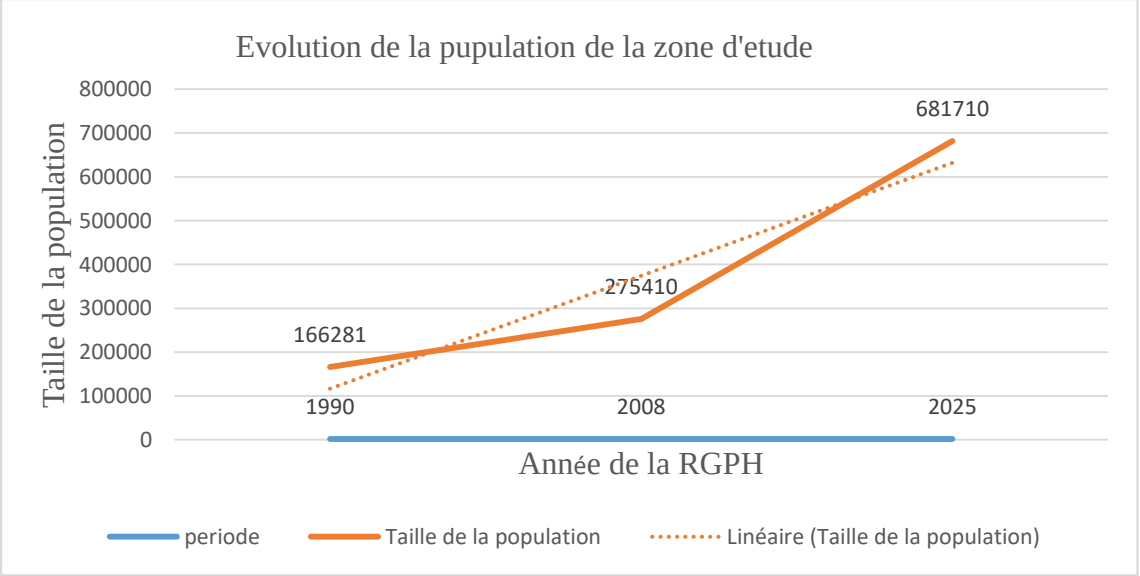


Figure 3:Evolution démographique de la zone d'étude **(RGPH, 1990 et 2008, RGPHAE, 2025)**

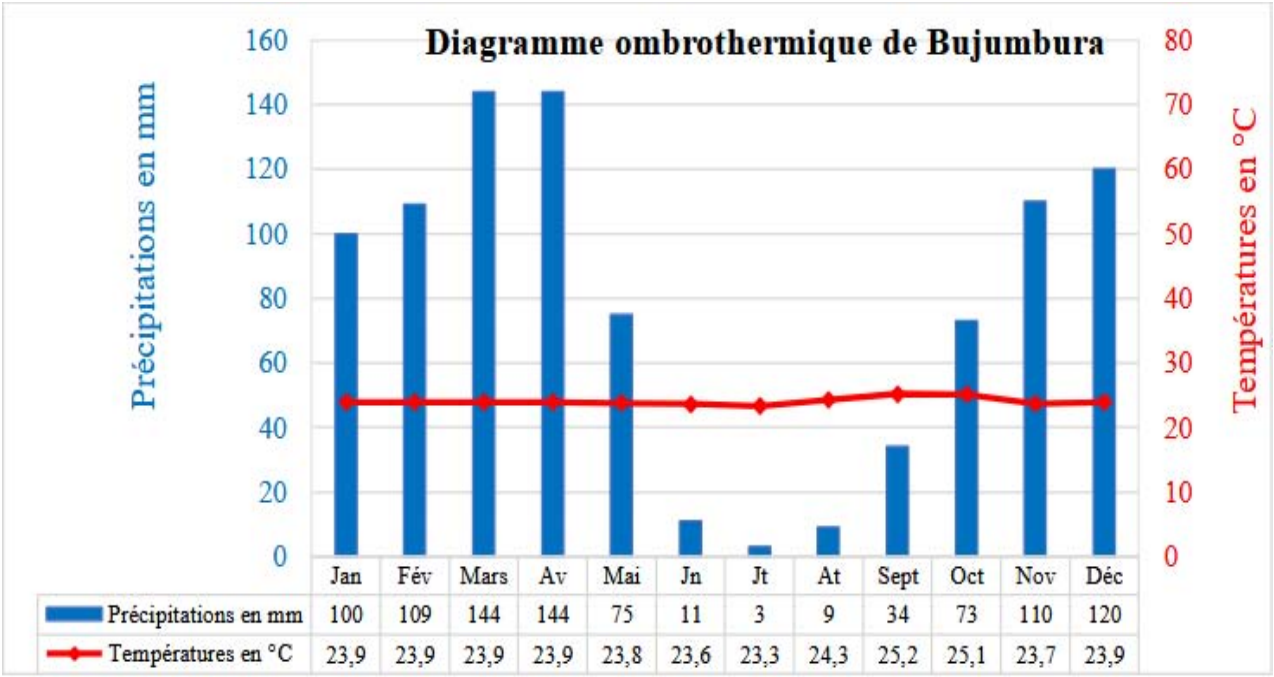
I.2.2.2. Climat

Notre zone d'étude bénéficie d'un climat de type tropical humide influencé par la proximité du lac Tanganyika et par la configuration topographique des versants. Selon l'IGEBU (2024), ce climat se caractérise par deux grandes saisons : une saison pluvieuse longue, s'étendant de septembre à mai et une saison sèche courte de juin à août. Les précipitations annuelles moyennes varient entre 1 200mm et 1 500 mm, avec une intensité maximale observée entre mars et avril, période où les risques de glissements de terrain sont les plus élevés.

La température moyenne annuelle avoisine 23 à 25°C en plaine, mais diminue progressivement avec l'altitude, atteignant environ 18 à 20°C sur les hauteurs (Bizimana et Van Ranst, 2016).

La présence du lac Tanganyika induit un effet de régulation thermique, atténuant les amplitudes thermiques journalières, mais favorise également la formation de systèmes convectifs locaux à l'origine de pluies intenses (Lemoalle *et al.*, 2014).

Les épisodes climatiques extrêmes, tels que les pluies diluviennes associées aux orages, sont de plus en plus fréquents, phénomène que plusieurs études attribuent à la variabilité climatique accrue et aux effets du changement climatique (IPCC, 2021; Mugisho Bachinyaga, 2024).



	Jan	Fév	Mars	Av	Mai	Jn	Jt	At	Sept	Oct	Nov	Déc
Précipitations en mm	100	109	144	144	75	11	3	9	34	73	110	120
Températures en °C	23,9	23,9	23,9	23,9	23,8	23,6	23,3	24,3	25,2	25,1	23,7	23,9

Figure 4: Diagramme ombrothermique de Bujumbura

Source : https://en.climate-data.org/africa/burundi/bujumbura-mairie/bujumbura-1073/ (*Climat Bujumbura: Météo Bujumbura & Température Par Mois,* 2024)

Le relief accidenté de la zone favorise un écoulement rapide des eaux de pluie, limitant l'infiltration et accentuant le ruissellement de surface. Ceci contribue à la saturation des sols sur les pentes, augmentant la probabilité d'érosion et de glissements (Kabanyegeye et al., 2023). Ainsi, le climat de la zone d'étude, caractérisé par des précipitations abondantes, une humidité élevée et des températures modérées mais influencées par la topographie, constituent un facteur naturel majeur dans la genèse et l'amplification des risques de glissements de terrain, surtout lorsqu'il interagit avec les pressions anthropiques telles que la déforestation et l'urbanisation anarchique (Nkunzimana et al., 2020).

I.2.2.3. Géologie de la zone d'étude

La zone comprise entre la rivière Ntahangwa et la rivière Mugere, surplombant la ville de Bujumbura, s'inscrit dans le cadre géologique du socle précambrien du Burundi, appartenant à la ceinture orogénique du Rift Albertin, elle est intégrée dans le vaste système du Rift Est-Africain (Chorowicz, 2005). La carte ci-dessous représente une carte géologique de la zone étudiée.

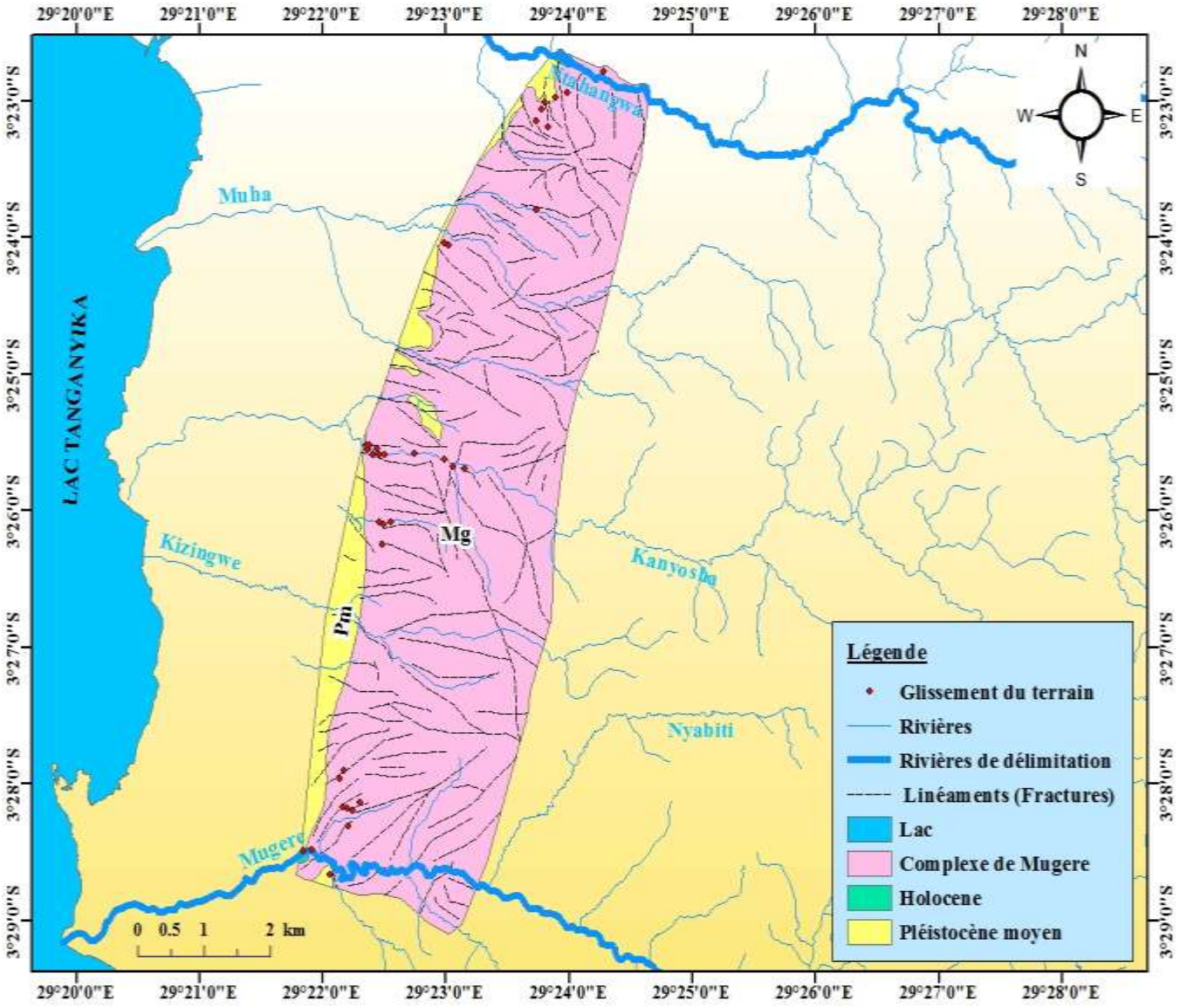


Figure 5: Carte géologique de la zone d'étude

Ce socle est constitué majoritairement de roches métamorphiques protérozoïques, notamment les complexes de Mugere et les amphibolites, caractérisées par une forte foliation et un réseau important de fractures. Les formations holocènes et pléistocènes sont limitées aux dépôts superficiels récents (Nsabimana *et al*., 2023).

Ces structures, en créant des zones de faiblesse dans la roche, facilitent l'altération chimique et mécanique, rendant certains versants particulièrement instables.

En surface, les roches du socle sont recouvertes par des altérites ferrallitiques rouges ou jaunes, issues de l'altération intense en climat tropical humide. Ces sols présentent une faible cohésion lorsqu'ils sont saturés en eau, ce qui accroît leur susceptibilité aux glissements de terrain lors des fortes pluies (Bizimana et Van Ranst, 2016). Dans les zones basses et les fonds de vallées, on retrouve des dépôts colluviaux et alluvionnaires récents, composés de matériaux meubles, souvent remaniés par les crues saisonnières, qui se comportent comme des surfaces de glissement potentielles (Bizimana et Van Ranst, 2016).

Sur le plan structural, la région est traversée par plusieurs zones de fractures et failles orientées NE-SO et NO-SE. Ces discontinuités sont en partie héritées des mouvements tectoniques liés à l'ouverture du Rift Est-Africain, et elles influencent la morphologie locale en créant des ruptures de pente et en favorisant la concentration des écoulements (Chorowicz, 2005; kubwimana, 2022; Nsabimana et al., 2023)**.** Les zones de faille, souvent altérées, constituent des interfaces fragiles pouvant jouer un rôle déterminant dans le déclenchement des mouvements de masse.

La proximité immédiate du lac Tanganyika et du graben tectonique associé influence également la stabilité des versants. Bien que l'activité sismique y soit modérée, les micro-séismes enregistrés dans la région peuvent, à terme, déstabiliser les terrains fragilisés par les infiltrations d'eau et l'altération (Kabanyegeye *et al.,* 2024; Nsabimana *et al.*, 2023)

La géologie de cette zone combine trois éléments de vulnérabilité majeurs :

-Un socle métamorphique fracturé et altéré qui constitue une base fragile

-Des formations superficielles meubles et peu cohésives qui se saturent rapidement en eau.

-Une dynamique tectonique résiduelle qui, combinée à la topographie escarpée, favorise les instabilités de versant (Nsabimana *et al*., 2023). Ces caractéristiques géologiques expliquent pourquoi la zone étudiée est particulièrement sujette aux glissements de terrain, surtout lorsque les facteurs climatiques (précipitations intenses) et anthropiques (déforestation, urbanisation anarchique) s'ajoutent à cette fragilité naturelle.

	
Glissement de terrain à Nkenga-Busoro le5/9/2025)	Glissement de terrain à Muyira (le 5/9/2025)

Sur les collines de Nkenga-Busoro et de Muyira, des roches métamorphiques fortement dégradées (schistes et quartzites), constitué de matériaux meubles et peu cohésifs dans une configuration lithologique sont reconnues comme particulièrement favorable à l'instabilité des versants et au déclenchement des glissements de terrain en milieu tropical humide, surtout en présence de fortes précipitations et de déforestation.

I.2.2.4. Hydrographie de la zone d'étude

La zone d'étude, située sur les pentes orientales des communes de Mukaza et Mugere, est constituée les principaux cours d'eau : la rivière Ntahangwa, la rivière Muha, la rivière Kanyonsha et la rivière Mugere, avec la limite de deux rivières notamment : la rivière Ntahangwa au Nord et la rivière Mugere au Sud. Ces deux rivières prennent leur source dans les hautes altitudes des collines de l'intérieur du Burundi et coulent vers l'Ouest pour se jeter dans le lac Tanganyika (Niyonzima, 2017). Elles présentent un régime pluvial tropical, marqué par de fortes variations saisonnières de débit : hautes eaux pendant la saison des pluies (octobre à mai) et étiages prononcés pendant la saison sèche (juin à septembre) (Nkurunziza *et al*., 2020).

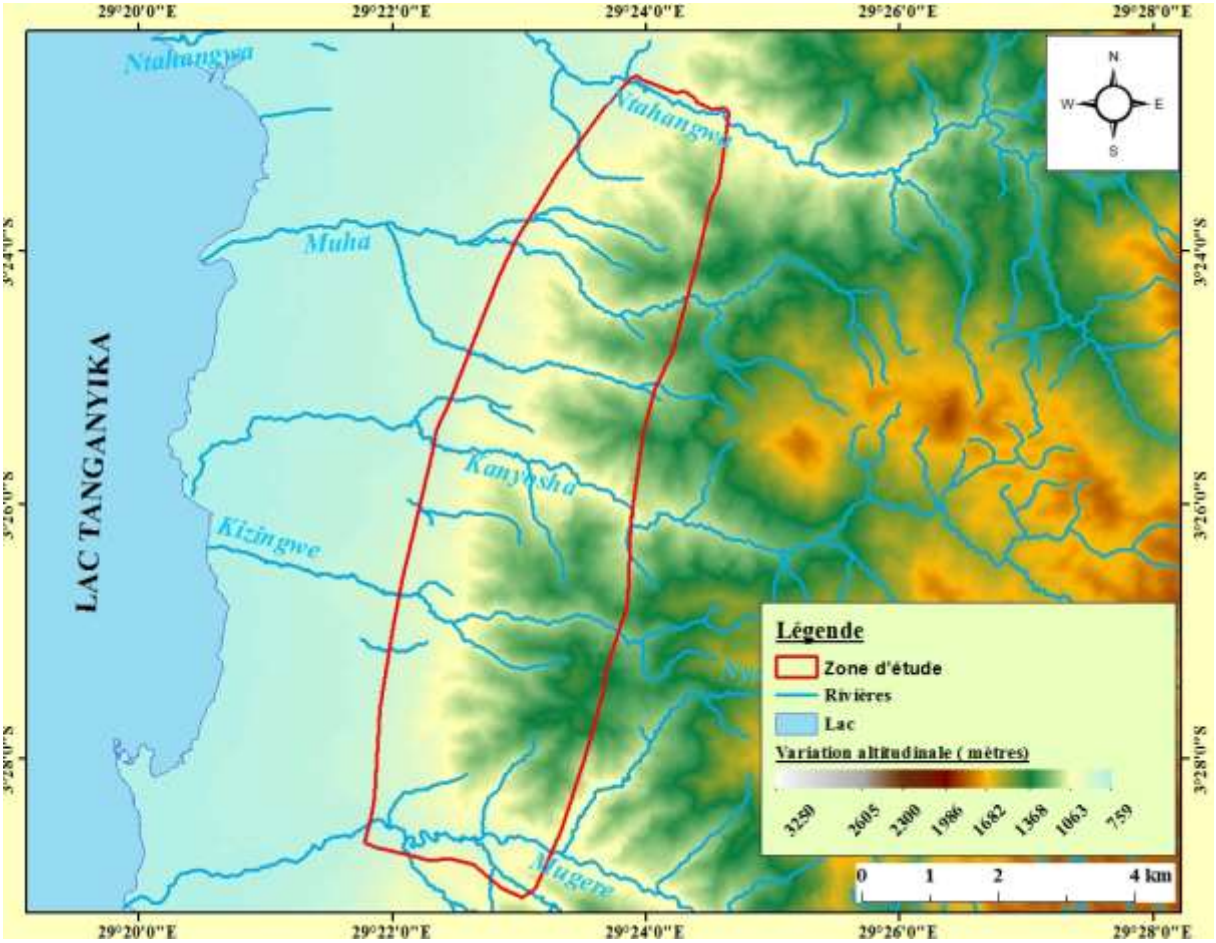


Figure 6: Carte hydrologique de la zone

La rivière Ntahangwa est l'un des principaux collecteurs d'eaux pluviales de la ville de Bujumbura. Elle draine un bassin versant de plus de 220 km², en traversant des zones urbanisées, industrielles et agricoles (Niyonkuru, 2018).

Ses berges, souvent abruptes, sont soumises à une érosion intense, accentuée par le ruissellement provenant des versants déboisés et imperméabilisés. Cette érosion entraîne un apport massif de sédiments dans le lit de la rivière, réduisant sa capacité hydraulique et augmentant le risque d'inondations et de débordements (Nkunzimana *et al*., 2020)**.**

Au sud, la rivière Mugere possède un bassin versant plus restreint, mais elle présente des caractéristiques similaires : forte pente dans sa partie amont, lit encaissé dans les formations métamorphiques, et zones de dépôts alluvionnaires dans les sections aval. Les crues soudaines, fréquentes en saison pluvieuse, transportent d'importantes charges solides, pouvant obstruer le lit et aggraver les phénomènes d'instabilité des pentes avoisinantes (Bizimana et Van Ranst, 2016).

Outre ces deux rivières principales, la zone est traversée par de petits affluents tels que (Muha, Nyabiti et kizingwe) et plusieurs ravines temporaires qui se forment rapidement lors des pluies intenses. Ces écoulements concentrés, non canalisés, creusent des sillons profonds dans les versants, accélérant les processus de ravinement et favorisant l'initiation de glissements de terrain (Ndikumana, 2021).

Dans la rivière Ntahangwa, la morphologie abrupte du versant, associée à un réseau hydrographique fortement incisé, favorise l'écoulement concentré des eaux pluviales vers la base du talus, provoquant l'érosion du pied de versant et la déstabilisation progressive des matériaux altérés observés sur la photo.

I.2.2.5. Biodiversité

Notre zone d'étude se distingue par une biodiversité remarquable malgré la pression croissante exercée par l'urbanisation, la déforestation et les activités humaines. Située dans une zone de transition entre les forêts de montagne de l'arrière-pays et les écosystèmes lacustres du Tanganyika, cette région abrite une grande variété d'espèces végétales et animales qui participent à l'équilibre écologique du bassin versant (Ndayishimiye et Masharabu, 2023).

Sur le plan floristique, la végétation naturelle originelle était constituée principalement de forêts claires et de savanes arbustives, typiques des zones de piémont du Congo-Nil. Ces formations abritaient des espèces ligneuses telles que *Albizia gummifera*, *Markhamia lutea*, *Newtonia buchananii*, *Ficus thonningii* et *Vernonia amygdalina* (Kabanyegeye *et al*., 2022). Cependant, la couverture forestière a fortement diminué au cours des deux dernières décennies à cause du défrichement pour la construction, l'agriculture urbaine et la production de bois de chauffe. Cette dégradation de la végétation a entraîné une fragmentation des habitats et une perte significative de diversité biologique.

Du point de vue faunistique, la zone présente encore une faune résiduelle adaptée aux milieux anthropisés, composée de petits mammifères, de reptiles et d'oiseaux comme *Cisticola chiniana*, *Tauraco rossae* et *Halcyon senegalensis* (Ndayizeye et al., 2024)**.** Plusieurs espèces d'amphibiens sont également observées dans les zones humides et les berges des rivières Ntahangwa et Mugere, témoignant de la résilience écologique de ces microhabitats. Toutefois, les espèces endémiques sont menacées par la pollution des eaux, l'érosion des sols et la réduction des zones de reproduction.

Sur le plan écologique, les rivières et leurs zones ripariennes jouent un rôle crucial dans la connectivité écologique entre les milieux forestiers du plateau et les écosystèmes aquatiques du Tanganyika (Kabanyegeye et al., 2022; Ndayishimiye et al., 2023; Niyonkuru, 2022). Ces corridors biologiques assurent le déplacement et la survie de plusieurs espèces, notamment des oiseaux migrateurs et des amphibiens. Toutefois, la déforestation des berges et le dépôt de déchets solides perturbent ce rôle écologique essentiel.

L'un des éléments majeurs affectant la biodiversité de la zone d'étude est la pression urbaine de Bujumbura, qui entraîne la disparition progressive des espaces verts et la conversion des forêts secondaires en zones d'habitation. Selon Kubwimana (2021), la perte annuelle de la couverture forestière dans la périphérie de Bujumbura dépasse 2,5 %, un taux alarmant qui compromet la régénération naturelle des espèces et la stabilité des sols. Cette dégradation des écosystèmes favorise par ailleurs l'augmentation des glissements de terrain, en réduisant la capacité de rétention des sols et la fixation des pentes par les racines.

Les politiques de protection environnementale, bien qu'existantes, peinent à être appliquées sur le terrain. Des initiatives locales de reboisement, notamment à travers les programmes de la Direction Générale des Forêts et de l'Environnement et les actions communautaires, ont été lancées pour restaurer la couverture végétale des versants (Rwabahungu et al., 2013)**.** Ces efforts visent non seulement à préserver la biodiversité, mais aussi à renforcer la résilience écologique face aux changements climatiques et aux risques géologiques.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

Les principales données de cette recherche sont entre autres :

- Images satellitaires (capteurs LANDSAT 5 TM, LANDSAT 7 ETM+, LANDSAT 8 OLI/TIRS et LANDSAT 9 OLI/TIRS),
- Climatiques (données pluviométriques de station de l'IGEBU : Station de Bugarama et Bujumbura),
- Topographiques et géologiques (téléchargement des images selon le Modèle Numérique de Terrain (MNT)),
- Observation sur terrain et photographies (prise de photo in situ),
- Socio-économiques (données de l'ISTEEBU)

❖ Données satellitaires

Les images satellitaires constituent la principale source d'information pour l'analyse diachronique de la déforestation et des modifications morphologiques. Les images de la zone d'étude ont été téléchargées sur des satellites LANDSAT 5 TM, LANDSAT 7 ETM+, LANDSAT 8 OLI/TIRS et LANDSAT 9 OLI/TIRS obtenues gratuitement à partir du portail de l'USGS Earth Explorer.

Selon les chercheurs tels que (Chander *et al.*, 2009 ; Roy *et al.*, 2014), ces images multispectrales permettent d'extraire des indices de végétation (NDVI), d'humidité (NDWI) et de classification d'occupation du sol, utiles pour mesurer la déforestation et identifier les zones à risque de glissement.

❖ Données climatiques

Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) dans les stations météorologiques de Bugarama et Bujumbura (aéroport), couvrant la période de 1990 à 2024. Ces données comprennent les séries mensuelles et annuelles de précipitations et de températures maximales.

Elles ont permis d'identifier les tendances et anomalies climatiques, notamment les périodes de fortes précipitations associées à une recrudescence des glissements de terrain comme indiqué par (Claude *et al.,* 2023) experts de l'IGEBU.

- **Données topographiques et géologiques**

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) issus de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ont été utilisés pour l'analyse des pentes, la délimitation des bassins versants et la cartographie des zones à forte instabilité. Ces données présentent une résolution spatiale de 30 mètres, suffisante pour la modélisation morphologique à l'échelle de la zone d'étude (Farr *et al*., 2017)

Ces cartes ont servi à identifier la nature lithologique des terrains (gneiss, schistes, granites altérés) et leur susceptibilité aux glissements.

- **Données de terrain et photographies**

Les données de terrain ont été collectées au cours de missions d'observation sur terrain réalisées entre juin et septembre 2025. Ces observations ont permis de repérer les zones de glissements récents, les fissures, les glissements anciens stabilisés, ainsi que les pratiques anthropiques aggravant les risques (cultures sur pente, extraction de sable, déboisement).

Des photographies géoréférencées ont été prises pour documenter les sites sensibles. Ces données qualitatives ont été intégrées dans le SIG pour la validation des cartes thématiques et la confrontation avec les données satellitaires (Foody, 2002)

- **Données socio-économiques**

Les données sociales utilisées proviennent principalement des services de l'Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi (ISTEEBU). Ces informations concernent la densité de population, l'utilisation des sols et les activités économiques locales.

Elles ont été utiles pour analyser l'influence des pressions anthropiques sur la déforestation et la vulnérabilité des versants (Nibigira, 2018).

II.1. Méthodologie

La méthodologie utilisée dans cette étude repose sur une approche intégrée combinant l'analyse des données, les observations de terrain et le traitement géospatial à l'aide des outils de Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de télédétection.

Ces démarches permettent de suivre l'évolution spatio-temporelle de la couverture du sol, d'identifier les zones à risque de glissement de terrain, et d'évaluer la relation entre la déforestation, le changement climatique et les phénomènes géologiques.

II.1.1. Téléchargement des images satellitaires

Les données satellitaires constituent la base essentielle pour l'analyse diachronique de l'évolution du couvert forestier et des zones exposées aux glissements de terrain. Dans ce travail, les images ont été téléchargées à partir du portail USGS Earth Explorer (https://earthexplorer.usgs.gov/ en privilégiant celles issues des satellites LANDSAT 5 TM, LANDSAT 7 ETM+, LANDSAT 8 OLI/TIRS et LANDSAT 9 OLI/TIRS, couvrant la période de 1990 à 2024. Ces séries d'images ont été choisies pour leur résolution spatiale de 30 mètres, suffisante pour la détection des changements d'occupation du sol à l'échelle locale (Chander et al., 2009).

Chaque image a été sélectionnée sur la base de sa qualité radiométrique, de la faible couverture nuageuse et de la période correspondant à la saison sèche (juin à août), afin de limiter les biais dus à l'humidité des sols ou à la végétation temporaire. Cette approche temporelle permet de suivre la dynamique spatio-temporelle de la déforestation et des modifications géomorphologiques de la zone d'étude (Roy *et al.*, 2014).

II.1.2. Prétraitement des images satellitaires

Les images brutes obtenues nécessitent un ensemble d'opérations de prétraitement afin d'assurer leur comparabilité temporelle et leur précision géométrique. Ces opérations comprennent la correction radiométrique, la correction atmosphérique et la correction géométrique.

La correction radiométrique a consisté à convertir les valeurs de comptage numérique (DN) en réflectance de surface, en utilisant les coefficients fournis par le capteur. La correction atmosphérique a été effectuée par la méthode Dark Object Subtraction (DOS), qui permet de réduire les effets de la diffusion atmosphérique. Enfin, les corrections géométriques ont permis d'aligner les images selon le système de coordonnées WGS 84/UTM Zone 35S, afin d'assurer la superposition parfaite entre les différentes dates d'observation (Schowengerdt, 2007).

II.1.3. Classification non supervisée

La classification supervisée a été réalisée à partir des images corrigées afin d'identifier les principales classes d'occupation du sol : forêts, zones agricoles, zones bâties, zones dénudées et plans d'eau. Pour cela, la méthode du Maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Classification) a été utilisée, elle tient compte de la distribution statistique des pixels au sein de chaque classe (Lillesand *et al.*, 2015).

Les échantillons de formation ont été collectés à partir d'observations de terrain et de l'imagerie Google Earth. La précision de la classification a ensuite été évaluée à l'aide d'une matrice de confusion et du calcul de l'indice Kappa, afin de mesurer la fiabilité des résultats (Congalton et Green, 2019).

II.1.4. Photographies *in situ*

Les campagnes de terrain ont permis de collecter des photographies géoréférencées illustrant les zones sujettes aux glissements de terrain, les sites de déforestation et les zones à forte pente. Ces données qualitatives ont servi à la validation visuelle des résultats de classification et à la description morphologique des glissements observés.

Les points de prise de vue ont été localisés à l'aide d'un GPS (Global Positioning System) et reportés sur les cartes thématiques. Cette triangulation entre observations de terrain et analyses spatiales permet de renforcer la validité des résultats.

II.1.5. Production des cartes thématiques, analyse de pente et étude diachronique

L'analyse spatiale a été effectuée à l'aide des logiciels ArcGIS 10.7.1 et QGIS 3.28.4. Les cartes thématiques produites incluent la carte d'occupation du sol, la carte de pente, la carte de densité de drainage et la carte de susceptibilité aux glissements de terrain.

L'analyse de pente a été dérivée du Modèle Numérique de Terrain (MNT) obtenu à partir des données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) à une résolution de 30 mètres. Les pentes ont été classées en cinq catégories selon leur degré d'instabilité (Burrough *et al.*, 2015) . Une étude diachronique a ensuite permis de comparer l'évolution du couvert forestier entre 1990, 2000, 2014 et 2024 ; et de quantifier la progression des zones exposées aux glissements.

II.1.6. Digitalisation sur Google Earth

La digitalisation des éléments physiques et anthropiques (zones bâties, forets, végétations et réseaux hydrographiques) a été effectuée sur Google Earth Pro, permettant une meilleure précision dans la délimitation des zones d'intérêt (Tripathi, 2022). Cette étape a complété les informations issues des images Landsat en offrant une résolution spatiale plus fine, utile pour l'analyse locale des zones de glissement (Burrough *et al.*, 2015)

II.1.7. Etude du lien de cause à effet entre le changement climatique et la dynamique des glissements de terrain

Les données pluviométriques provenant de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) pour la période 1990–2024 expliquent les dérèglements de la quantité des pluies qui varie d'une année à une autre. Comparablement aux types du sol de la zone d'étude, la majorité de ces derniers n'ont pas la capacité de contenir beaucoup d'eau, d'où la naissance des glissements de terrain en cas de fortes précipitations.

La déforestation et le changement d'utilisation des terres aggravent les risques d'incapacité du sol à retenir l'eau.

Les résultats obtenus permettent de comprendre le rôle combiné de la déforestation et du changement climatique dans la déstabilisation des versants.

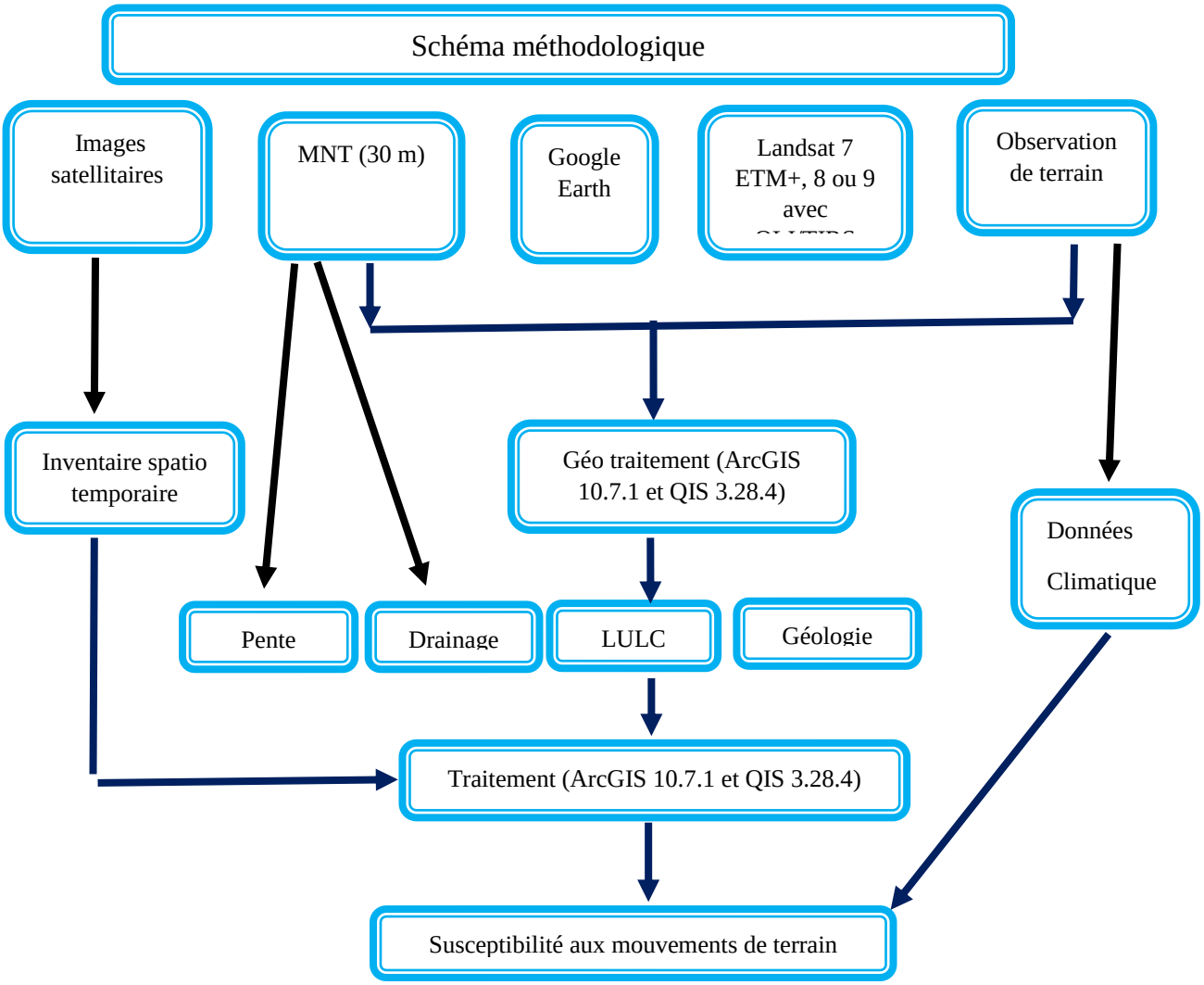


Figure 7: Schéma synthétique de la méthodologie utilisée

II.2. Techniques et outils utilisés

La réalisation de cette étude a nécessité la mobilisation de plusieurs types de matériels. Ces ressources ont permis d'assurer la collecte, le traitement et l'analyse des informations relatives à la déforestation, aux changements climatiques et aux glissements de terrain dans la zone d'étude.

Les outils principaux de terrain utilisés sont :

- GPS (précision de 3m) pour relever les coordonnées géographiques sur terrain en l'occurrence pour délimiter la zone d'étude et les parties de la zone à risque de glissements de terrain ;
- Smart phone pour la prise des images ;
- Carnet de terrain pour noter les observations de terrain ;

Le matériel informatique utilisé comprend un ordinateur portable doté d'une capacité de traitement suffisante, permettant la manipulation d'images satellitaires volumineuses et le traitement des bases de données géographiques.

Les logiciels principaux utilisés pour les traitements sont :

- ArcGIS 10.7.1 et QGIS 3.28.4 pour la gestion et l'analyse spatiale des données géographiques selon Burrough *et al.*,(2015)
- Google Earth Pro pour la digitalisation et la vérification visuelle des zones d'intérêt à haute résolution (Psomiadis *et al.*, 2020)
- Microsoft Word et Excel pour la rédaction et l'organisation des résultats

CHAPITRE III : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.

L'analyse et la discussion des résultats sont issus des traitements des données climatiques et géospatiales réalisés dans le cadre de cette étude. L'analyse de ces résultats met en évidence la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol, l'évolution des paramètres climatiques et leur influence sur la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone comprise entre les rivières Ntahangwa et Mugere. Les résultats obtenus sont interprétés et comparés aux travaux antérieurs, afin de mieux comprendre les interactions entre déforestation, changement climatique et instabilité des pentes. Cette analyse permet également d'identifier les zones les plus vulnérables et d'évaluer les implications de ces dynamiques pour la gestion durable des risques environnementaux.

III.1. Dynamique de l'occupation du sol

L'analyse diachronique de l'occupation du sol entre 1990 et 2024 dans la zone d'étude montre des transformations majeures du paysage. Les données issues de la classification supervisée des images LANDSAT révèlent une diminution importante des surfaces couvertes de végétation, accompagnée d'une croissance rapide des zones bâties et d'une modification significative des espaces végétalisés. Cette dynamique reflète la pression anthropique croissante liée à l'expansion urbaine de la ville de Bujumbura, à la déforestation et à la conversion des terres naturelles en zones résidentielles et agricoles.

Le tableau ci-dessous représente la comparaison des superficies en hectares des différents composants de l'occupation du sol dans les années 1990, 2000,2014 et 2024.

Tableau 1:Dynamique des superficies des composants d'occupation du sol

Année	Forêts (ha)	Végétaux (ha)	Zone bâtie (ha)	Nombre de glissements de terrain observés
1990	2257,88	976,47	14,91	118
2000	2131,50	1115,88	27,93	320
2014	1280,25	1599,03	383,011	781
2024	845,28	1240,37	1176,64	1286

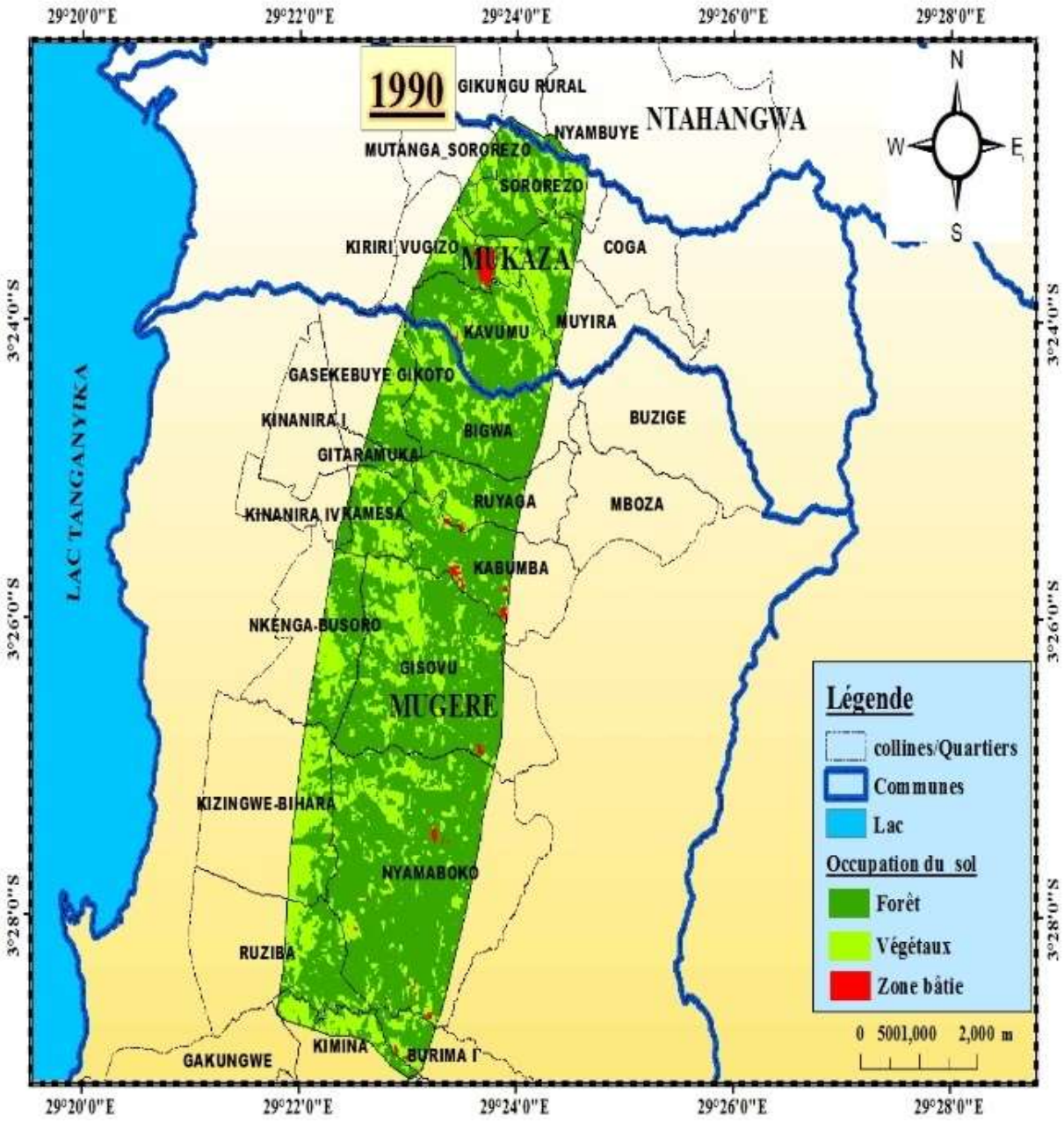


Figure 8: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 5 TM, 1990)

En 1990, la couverture forestière dominait largement le paysage avec une superficie de 2 257,89 ha, représentant la principale forme d'occupation du sol. Les formations végétales secondaires occupaient 976,47 ha, tandis que la zone bâtie restait marginale avec seulement 14,91ha. Cet environnement était encore relativement préservé, où la forêt jouait un rôle essentiel dans la stabilisation des pentes et la régulation hydrologique.

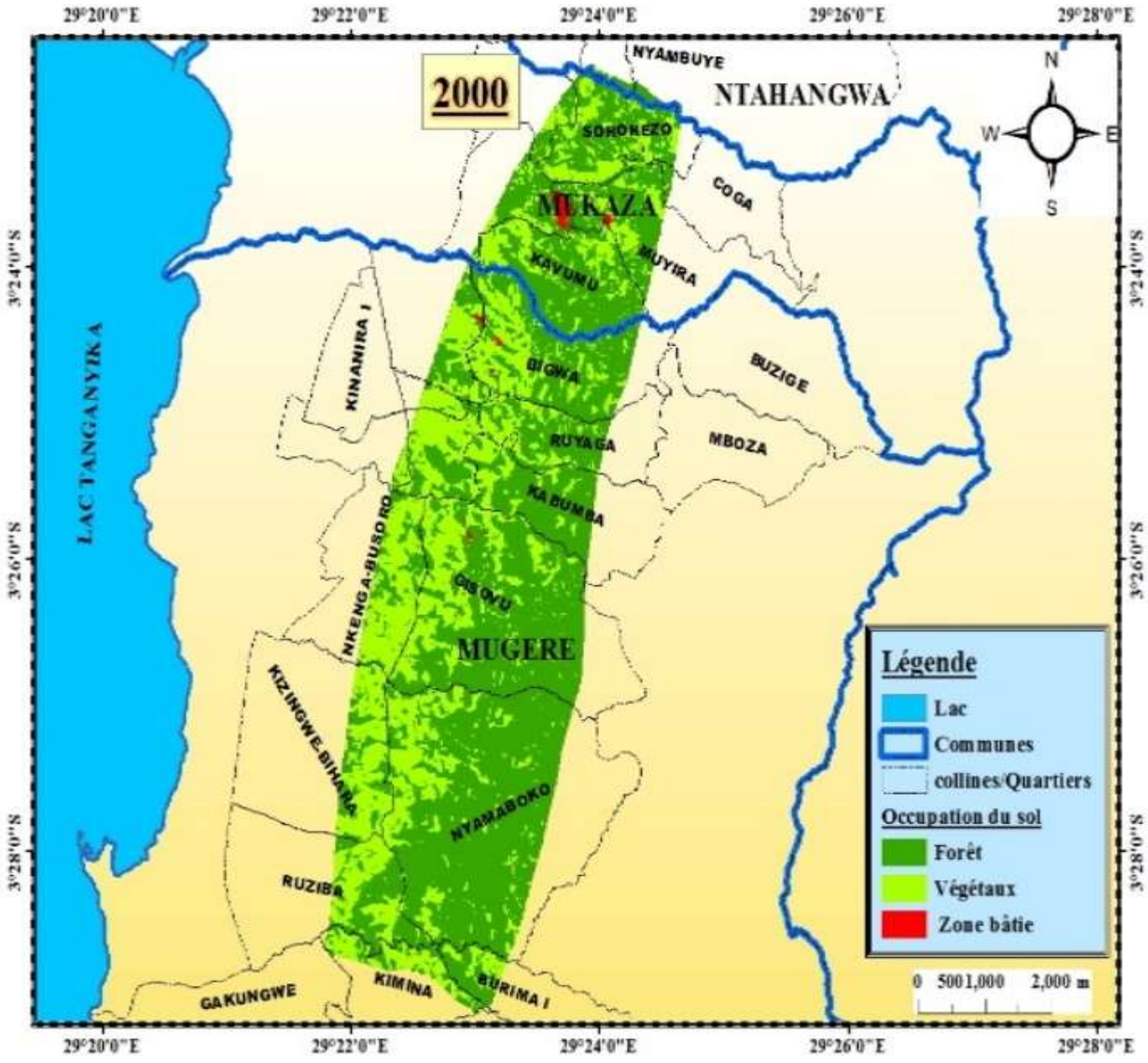


Figure 9: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 7 TM, 2000)

En 2000, on observe une réduction modérée de la superficie forestière, passée à 2 131,50 ha, soit une perte d'environ 126 ha en dix ans. Parallèlement, la végétation naturelle a légèrement augmenté, atteignant 1 115,89 ha, grâce à une régénération secondaire sur certaines zones agricoles abandonnées. Malgré ces légères fluctuations, la couverture forestière demeure prédominante, bien qu'elle commence à subir la pression croissante des activités humaines.

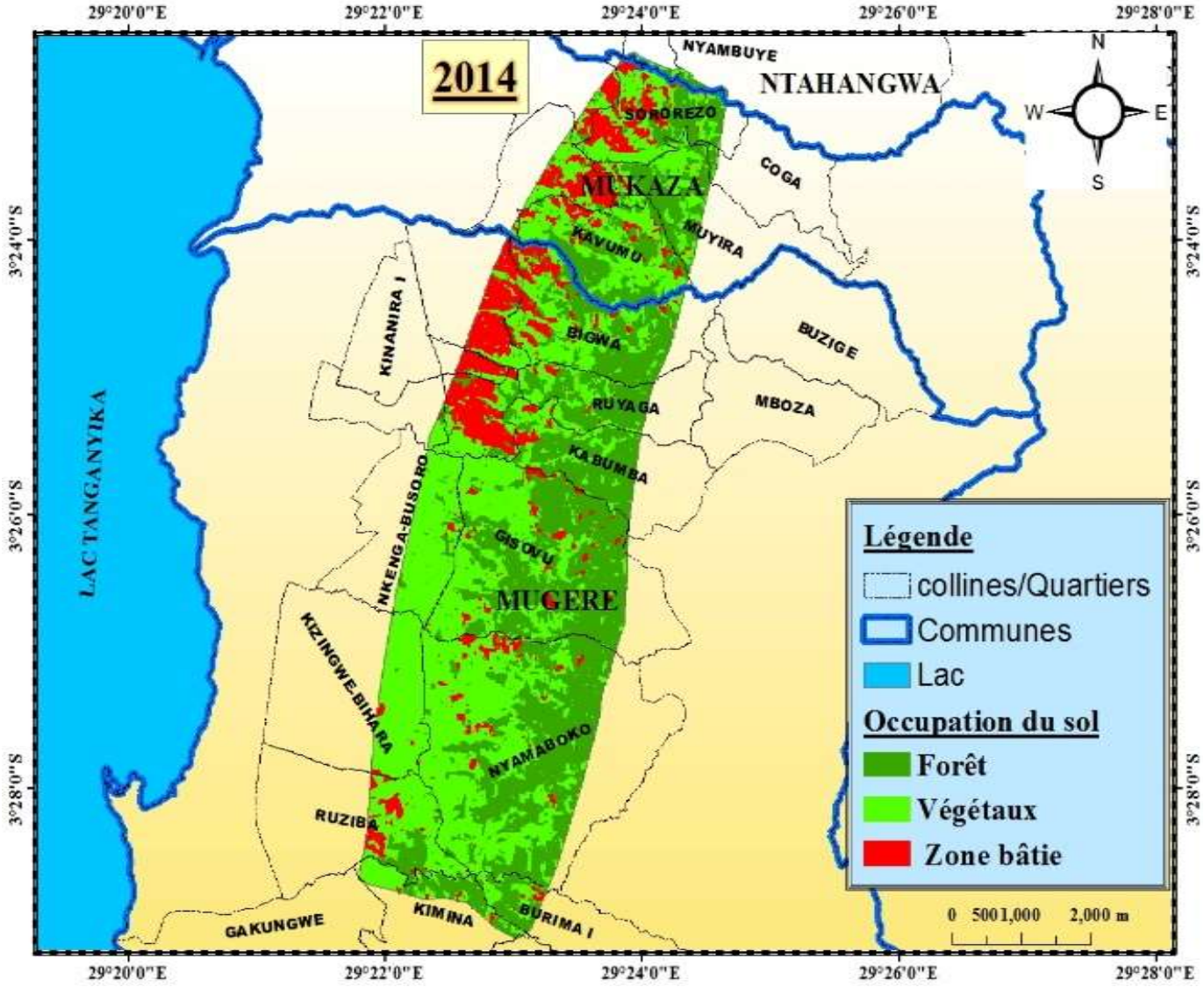


Figure 10: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 8 OLI/TIRS, 2014)

La situation se dégrade considérablement en 2014, la superficie forestière chute à 1 280,26 ha, marquant une perte de plus de 850 ha par rapport à 2000. Dans le même temps, les surfaces végétalisées augmentent sensiblement pour atteindre 1 599,03 ha, tandis que les zones bâties connaissent une croissance exponentielle, passant de 14,91 ha à 383,01 ha. Cette mutation spatiale s'explique par la périurbanisation rapide de Bujumbura, l'exploitation du bois-énergie et la conversion des forêts en parcelles agricoles ou résidentielles. Cette urbanisation non planifiée a entraîné une forte artificialisation des sols et une réduction de leur capacité d'infiltration, amplifiant le ruissellement et les risques de glissements de terrain.

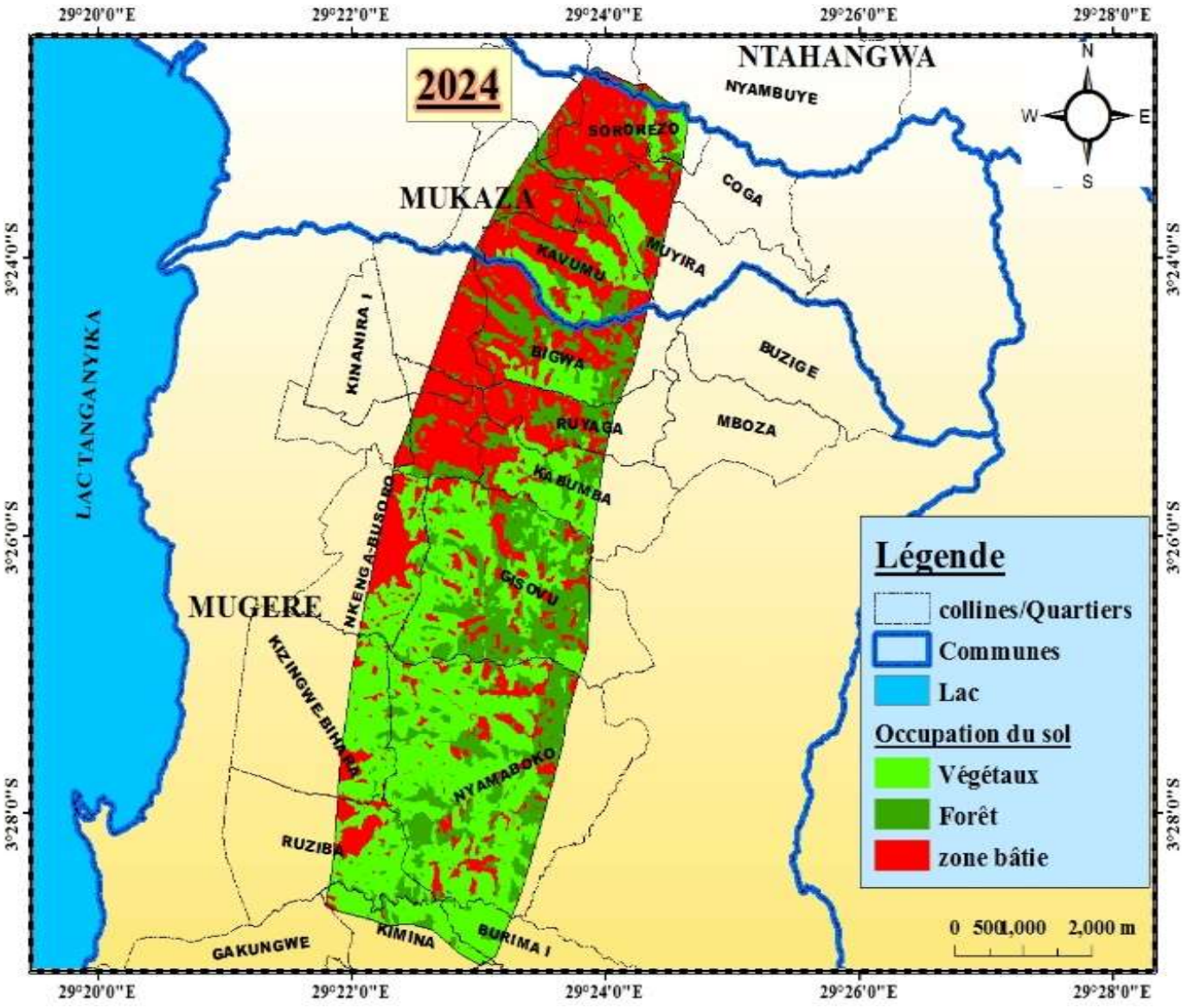


Figure 11: Carte d'occupation du sol (LANDSAT 9 OLI/TIRS, 2024)

En 2024, les tendances observées atteignent un niveau critique. La superficie forestière continue de diminuer jusqu' à 845,28 ha, soit une perte totale de plus de 62 % par rapport à 1990. En revanche, les zones bâties connaissent une expansion fulgurante, atteignant 1 176,64 ha. La zone bâtie a augmenté environ 40fois en trois décennies. Les surfaces végétalisées chutent à 1 240,38 ha, ce qui montre une conséquence directe de la pression urbaine et de la conversion des terrains agricoles en espaces résidentiels. Ces résultats illustrent clairement la dynamique régressive du couvert forestier et l'avancée rapide de l'urbanisation vers les zones à forte pente, contribuant à l'instabilité géomorphologique du secteur.

D'un point de vue spatial, cette dynamique s'est traduite par une fragmentation du paysage et une perte de connectivité écologique entre les habitats forestiers. Les couloirs écologiques naturels qui assuraient la régulation hydrologique et la protection contre l'érosion ont été remplacés par des infrastructures imperméabilisées. Ce processus d'artificialisation des sols est un facteur aggravant de la déstabilisation des versants.

Les résultats de cette analyse corroborent ceux de Mbonimpa et al.(2025), qui souligne que la combinaison entre la croissance démographique, la pauvreté énergétique et l'urbanisation anarchique constitue le principal moteur de la dégradation environnementale autour de Bujumbura. En outre, Nkunzimana et al. (2022) et (Nduwimana et al., 2025) mettent en évidence le lien direct entre la déforestation et la recrudescence des phénomènes de glissements de terrain observés entre 2014 et 2021, notamment lors des pluies extrêmes.

Ainsi, (Masharabu et al., 2023) en collaboration avec l'OBPE ont prouvé que la dynamique de l'occupation du sol telle qu'observée entre 1990 et 2024 peut illustre un processus accéléré de dégradation environnementale qui accentue la vulnérabilité de la zone d'étude. La perte du couvert végétal et l'expansion des zones bâties sur des terrains instables augmentent significativement la probabilité de catastrophes naturelles telles que les glissements de terrain

Représentation graphique de l'évolution de l'occupation du sol et des glissements de terrains (1990-2024)

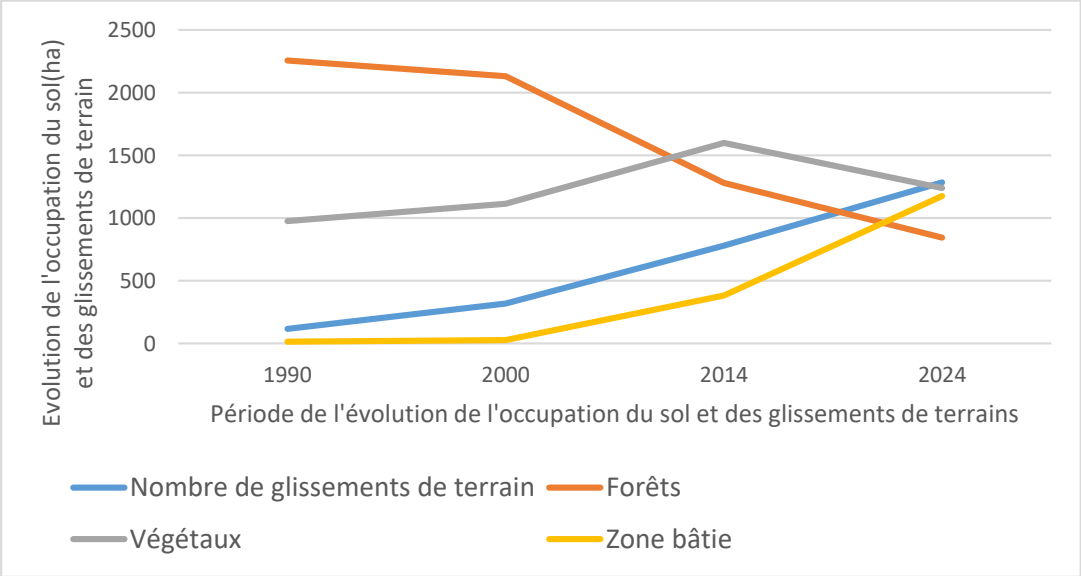


Figure 12: Evolution de l'occupation du sol et de glissements de terrain (1990-2024)

A l'exception de la superficie de la zone bâtie qui augmente au fil du temps, la zone occupée par les forêts et la végétation diminue progressivement.

III.2. Evolution spatiale des glissements de terrains

L'analyse diachronique des glissements de terrain réalisée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 30 m met en évidence une augmentation considérable du nombre de mouvements de masse dans la zone comprise entre les rivières Ntahangwa et Mugere entre 1990 et 2024. Les résultats obtenus montrent que le nombre de glissements de terrain est passé de 118 en 1990 à 320 en 2000, puis à 781 en 2014 pour atteindre 1 286 glissements en 2024. Cette évolution traduit une dégradation progressive de la stabilité des versants au cours des trois dernières décennies.

Au cours de la période 1990-2000, le nombre de glissements de terrain a augmenté de 118 à 320, soit une hausse de près de 171 %. Cette évolution peut être attribuée à l'intensification des activités anthropiques sur les versants, notamment l'extension des terres agricoles, l'exploitation du couvert forestier et l'augmentation de la pression démographique. La réduction progressive de la couverture végétale a diminué le rôle protecteur des racines dans la cohésion des sols, rendant ainsi les pentes plus vulnérables aux processus d'érosion et d'instabilité.

Entre 2000 et 2014, le nombre de glissements de terrain a connu une augmentation particulièrement marquée, passant de 320 à 781 événements, soit une progression de plus de 144 %. Cette période correspond à une phase de forte expansion urbaine sur les collines surplombant la ville de Bujumbura ainsi qu'à une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes observés dans la région. Les pluies exceptionnelles de février 2014 ont notamment contribué à déclencher de nombreux mouvements de terrain dans la région.

La période 2014-2024 est caractérisée par une poursuite de l'augmentation du nombre de glissements de terrain, qui atteint 1 286 événements avec une augmentation d'environ 65 %. Cette situation reflète la persistance des facteurs de prédisposition tels que la forte pente, la nature fracturée des formations géologiques, la dégradation continue du couvert végétal et l'occupation anarchique des zones sensibles.

III.3. Evolution climatique dans la zone

Cette région, caractérisée par un climat tropical humide avec alternance de saisons pluvieuses (septembre à mai) et sèches (juin à Août), connaît une variabilité croissante des pluies liée aux effets du changement climatique.

En se basant sur les données collectées à l'IGEBU, la zone de plaine est représentée par la station de l'Aéroport de Bujumbura tandis que la zone de haute altitude est représentée par la station de Bugarama.

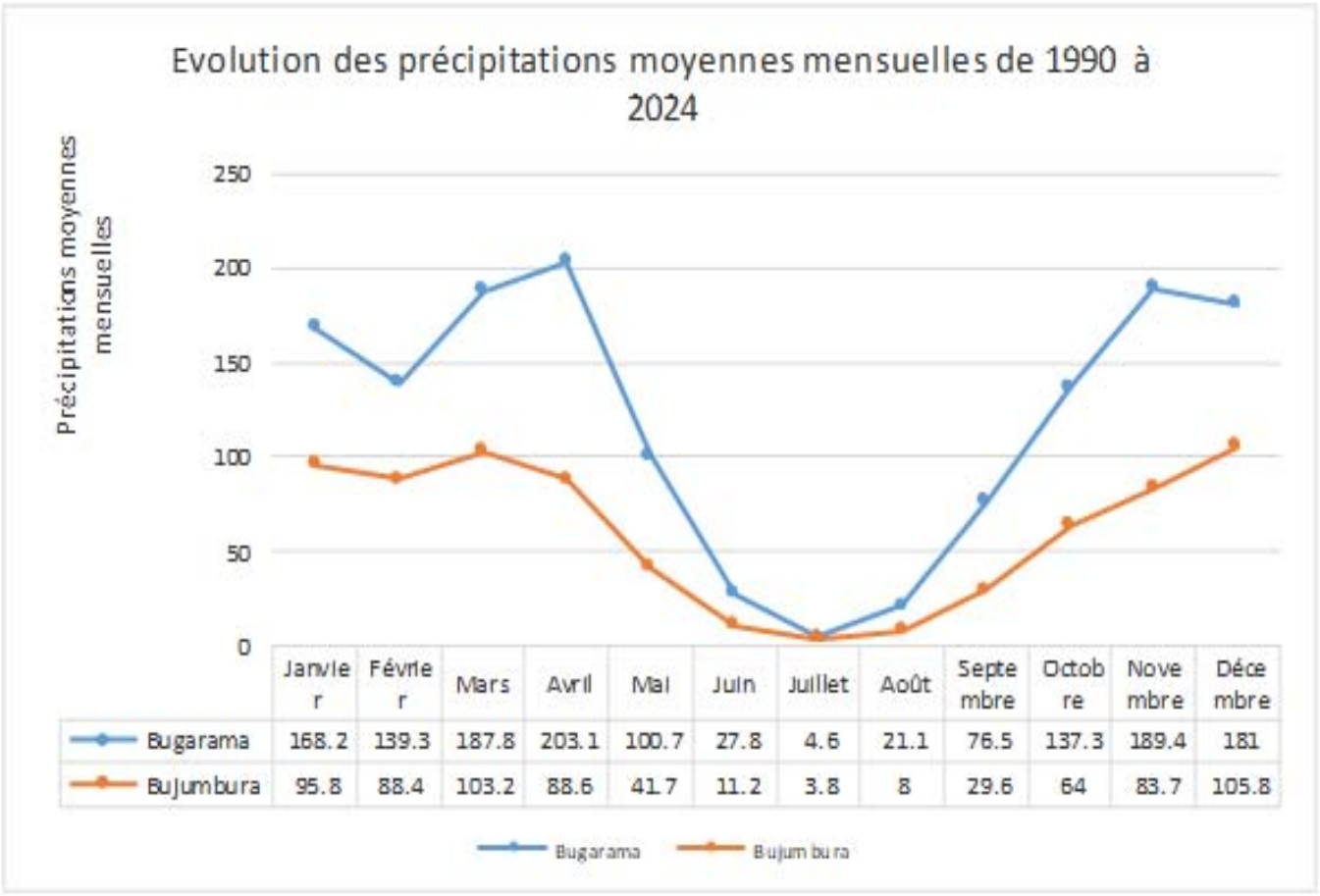
Les deux tableaux 2et 3 montrent les données des précipitations enregistrées par la station Bujumbura-Aéroport et celle de Bugarama sur une période allant de 1990 à 2024.

Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bugarama (1990 à 2024)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
Pmm	168,2	139,3	187,8	203,1	100,7	27,8	4,6	21,1	76,5	137,3	189,4	181	1436,8

Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bujumbura (1990 à 2024)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
Pmm	95,8	88,4	103,2	88,6	41,7	11,2	3,8	8	29,6	64	83,7	105,8	723,8



	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Bugarama	168.2	139.3	187.8	203.1	100.7	27.8	4.6	21.1	76.5	137.3	189.4	181
Bujumbura	95.8	88.4	103.2	88.6	41.7	11.2	3.8	8	29.6	64	83.7	105.8

Figure 13: Evolution des précipitations (cumuls annuels) de la zone d'étude pour la période 1990-2024

Source de données : IGEBU, (2025) – Station météorologique de Bugarama et Bujumbura (aéroport)

Entre 1990 et 2000, les précipitations annuelles moyennes étaient relativement stables, oscillant entre 1 000 et 1 200 mm/an, avec une bonne répartition saisonnière. Cette période correspond à un climat encore modérément humide, où les régimes pluviométriques suivaient les cycles normaux liés à la zone de convergence intertropicale.

Cependant, à partir des années 2000, une tendance à la baisse des précipitations est observée, suivie d'une reprise irrégulière entre 2010 et 2015. Ces fluctuations traduisent une perturbation du cycle hydrologique local, accentuée par la déforestation et l'urbanisation rapide.

Les données climatiques récentes 2016–2024 montrent une augmentation notable des événements pluviométriques extrêmes, avec des précipitations concentrées sur de courtes

périodes et des épisodes de sécheresse prolongée tels que Nibigira (2018) l'a remarqué lors de son étude portant sur le processus de formation des inondations et ses conséquences.

Ce déséquilibre saisonnier favorise les phénomènes d'érosion et de ruissellement intense, amplifiant le risque de glissements de terrain sur les versants dénudés.

D'après les rapports du Service Hydrométéorologique du Burundi (2024), les précipitations maximales journalières ont augmenté de plus de 15 % par rapport aux années 1990, alors que la durée moyenne des épisodes pluvieux a diminué.

Cette tendance s'explique par les modifications des régimes atmosphériques régionales, notamment l'influence croissante du phénomène El Niño-Southern Oscillation (ENSO), qui engendre des alternances entre des phases très humides (El Niño) et des sécheresses sévères (La Niña) (Nkurunziza *et al*., 2021). Ces oscillations climatiques ont des répercussions directes sur la stabilité des sols et la recharge des nappes, accentuant les processus de déstabilisation géologique.

L'intensification de la variabilité pluviométrique avec une augmentation des précipitations extrêmes et une perturbation des saisons, combinées à la pression anthropique, contribuent significativement à la multiplication des glissements de terrain. La concentration du ruissellement en surface entraîne une saturation rapide des sols argileux et latéritiques, caractéristiques de la région, favorisant ainsi les mouvements de masse récurrents observés dans les quartiers périphériques de Bujumbura tels que Kanyosha, Musaga et Mugoboka et Sororezo.

III.4. Cartographie des zones à risque de glissement de terrain

La cartographie des zones à risque de glissement de terrain a été réalisée à partir de l'intégration des paramètres topographiques (pente, altitude), géologiques (nature des sols, lithologie), hydrologiques (proximité des rivières) et anthropiques (occupation du sol, densité urbaine) dans un système d'information géographique (SIG).

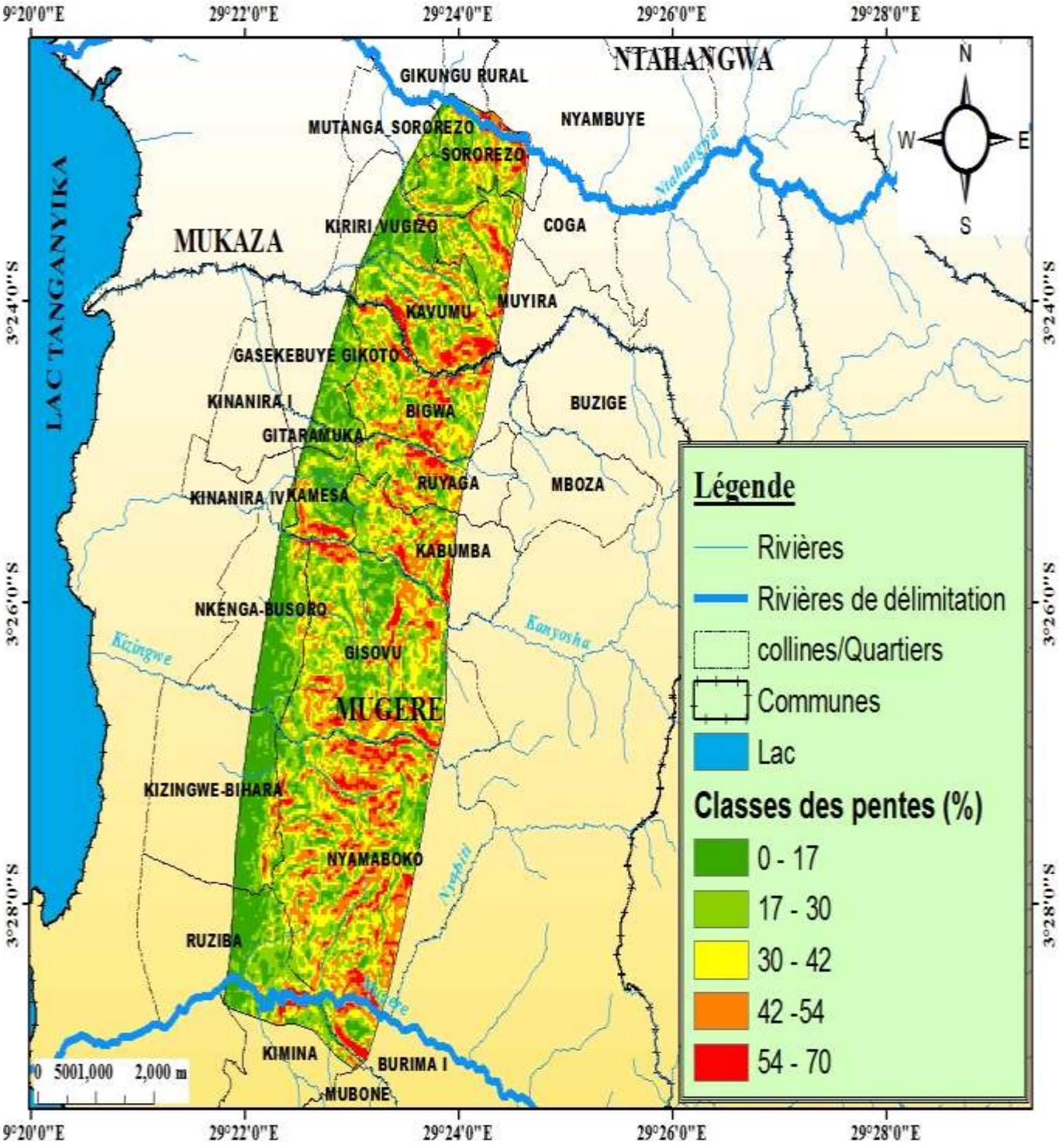


Figure 14: Cartographies des pentes

Les résultats montrent que les zones les plus exposées se situent principalement sur les pentes abruptes des collines où la pente dépasse 30 %. Ces secteurs sont caractérisés par des sols limono-argileux instables et une forte densité de constructions. Les cartes produites ont permis de classer la zone en trois niveaux de risque : faible, moyen et élevé.

Les zones à risque élevé (environ 28 % de la superficie totale étudiée) coïncident avec les secteurs de forte déforestation et d'urbanisation récente, où les précipitations intenses provoquent des coulées de boue et des glissements récurrents tels que conclus par (Nkunzimana et al., 2022 ; Mbonimpa et al., 2019) dans leurs travaux portant sur les vulnérabilités climatiques de la ville de Bujumbura.

La superposition des cartes de pentes et d'occupation du sol met clairement en évidence l'effet cumulatif de la pression anthropique et du climat sur la dynamique des instabilités.

Ces résultats corroborent ceux de Gariano et Guzzetti (2016), qui ont démontré que la combinaison entre facteurs climatiques et anthropiques augmente significativement la susceptibilité des terrains à glisser, en particulier dans les zones tropicales montagneuses.

III.5. Illustration de certains glissements de terrain dans la zone

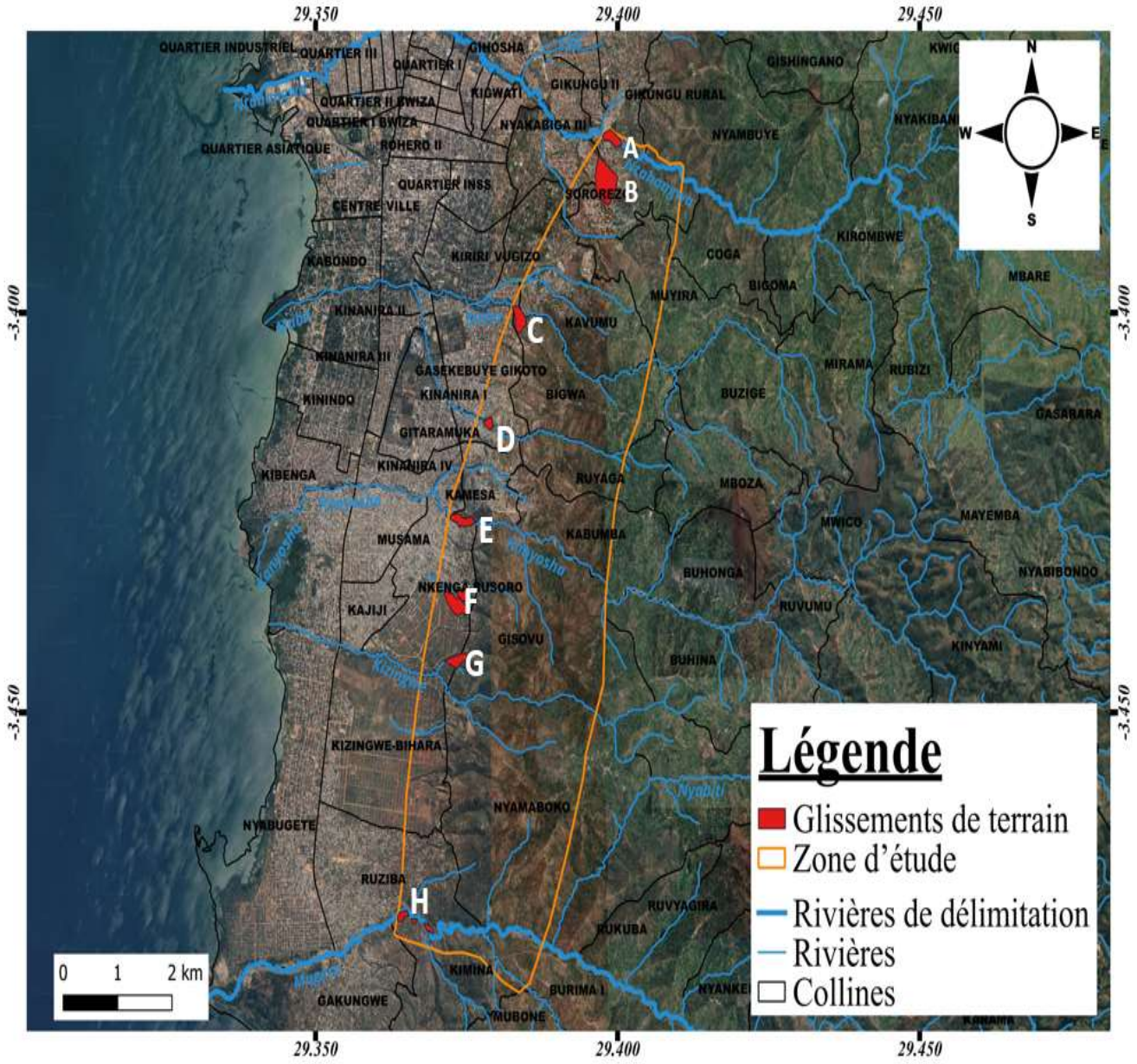


Figure 15: Carte d'illustration de certains glissements de terrain dans la zone d'étude correspondant aux images prises sur terrain

A) Glissements observés à Mutanga Sud sur les berges de la rivière Ntahangwa suite à la déforestation ;

B) Glissements observés à Sororezo dû à la déforestation, construction sur pente et la nature lithologique ;

C) Glissements observés sur la rivière Muha suite à une augmentation de l'intensité des précipitations et la nature lithologique, avec aussi la mauvaise gestion des eaux pluviales favorisant la saturation rapide des sols ;

D) Glissements Observés à Gikoto dû à une urbanisation non planifie en construisant sur une pente forte accompagnée par le sol fragile ;

E) Glissements observés à Kamesa, sur la Rivière Kanyosha dû à l'orpaillage des matériaux de construction et l'absence de systèmes de drainage ;

F) Glissements observés à Nkenga- Busoro suite à l'absence de reboisement et la nature fragile du sol ;

G) Glissement dans la partie Kizingwe dû à une forte pluie et la nature lithologique ;

H) Glissements dans la rive de la rivière Mugere à Ruziba dû à la destruction de la végétation et orpaillage des matériaux de construction.

X=29.3908333	Y=-3.3791666

A



X=29.40198333	Y=-3.3841

B



Observation sur terrain tout près de la rivière Ntahangwa dans le quartier de Mugoboka : Les pluies intenses causées par les changements climatiques augmentent la probabilité des glissements de terrain dans la zone potentiellement affectées par la déforestation.

Observation à Sororezo : Une construction anarchique sur pente suivie d'une déforestation a favorisé le déclanchement d'un glissement de terrain très grave.

X=29.38387	Y=-3.3994

C



Observation à Muyira: La déforestation pour l'urbanisation en construisant sur une forte pente combinée par la nature du sol avec une forte pluie déclenche les glissements

X=29.37512	Y=-3.41965

D



Observation à Kamesa : Naissance des ravins suite aux activités anthropiques.

X=29.37262	Y=-3.42529

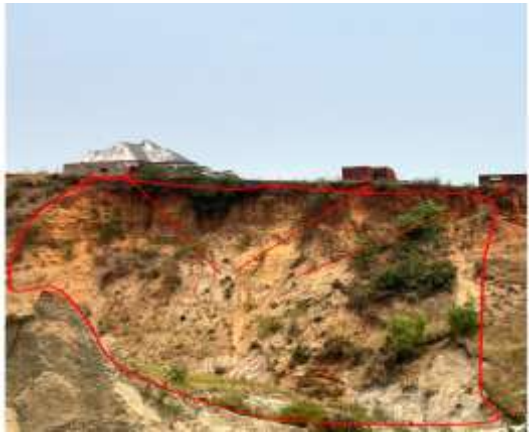
E



Observation sur les rives de la Rivière Kanyosha : La destruction de la végétation près de la rive de la rivière Kanyosha, favorise le déclanchement de glissement de terrain, mettant en danger les ménages riverains.

X=29.37104	Y=-3.43443

F



Observation à Nkenga –Busoro : La forte pente combinée aux fortes précipitations ont fait apparaitre des glissements mettant en danger les ménages de la localité.

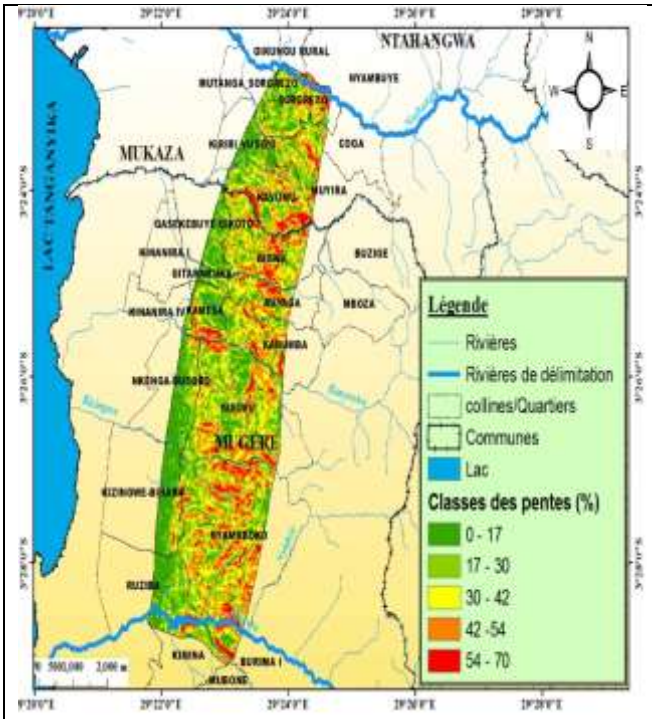
III.6. Evaluation de la susceptibilité aux risques de glissements

L'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone a été réalisée à l'aide de la méthode d'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP), développée par Saaty (1980). Cette approche permet de hiérarchiser les différents facteurs contribuant aux instabilités de versant en leur attribuant des poids relatifs selon leur importance dans le déclenchement des glissements.

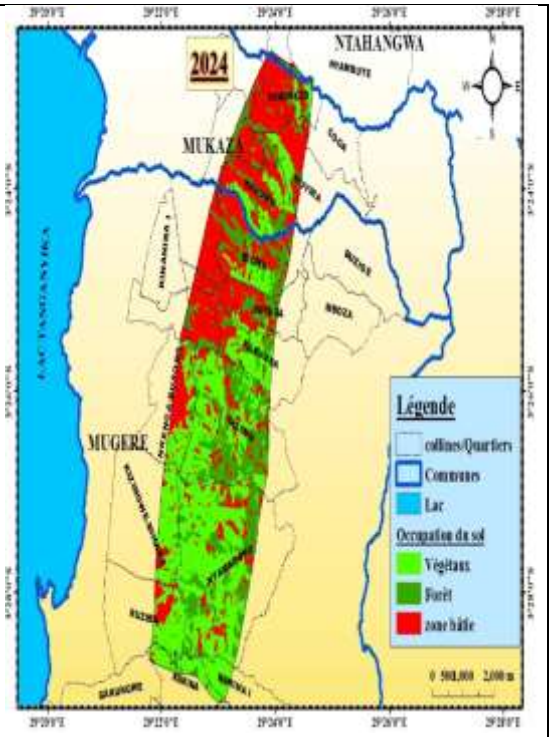
Les principaux paramètres intégrés dans cette analyse sont : la pente, la densité de drainage, la lithologie, l'occupation du sol (LULC) et Aspect.

Tableau 4: Classification de la susceptibilité des facteurs environnementaux aux risques de glissements de terrain

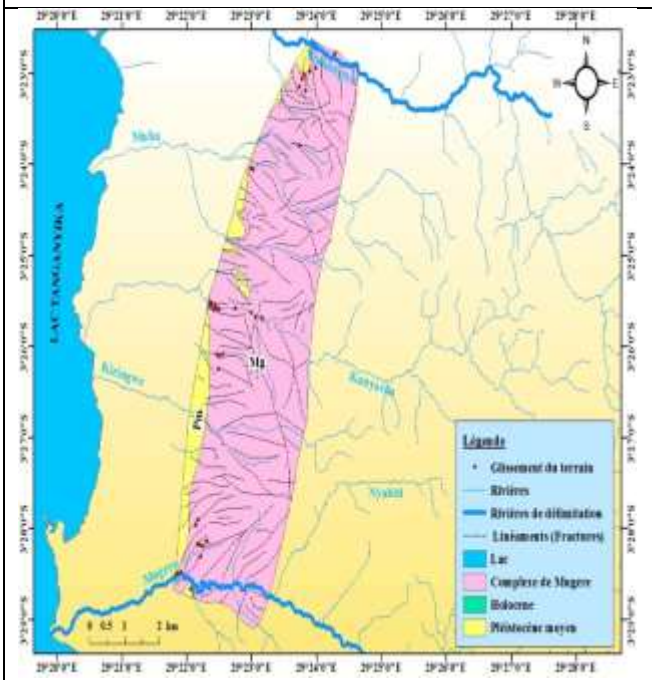
Facteurs	**Unité**	**Classes**	**Classes de susceptibilité**	**Evaluation de susceptibilité**
Pente	%	<17	Très faible	1
		17-30	Faible	2
		30-42	Modéré	3
		42-54	Elevé	4
		>54	Très élevé	5
LULC	Niveau	Zone bâtie	Elevé	5
		Végétaux	Modéré	4
		Forêt	Faible	3
Densité de drainage	m/Km	0- 230	Très faible	1
		230 - 450	Faible	2
		450 - 680	Modéré	3
		680 - 910	Elevé	4
		910 - 1100	Très élevé	5
Lithologie	Niveau	Holocène	Faible	3
		Pléistocène moyen	Modéré	4
		Complexe de Mugere	Elevé	5
ASPECT	Niveau	1	Très faible	1
		2	Faible	2
		3	Modéré	3
		4	Elevé	4
		5	Très élevé	5



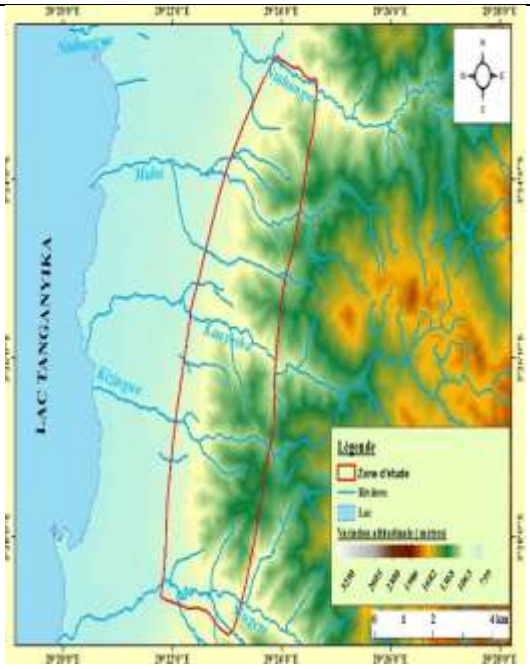
(Pente)



(LULC)



(La lithologie)



(Densité de drainage)

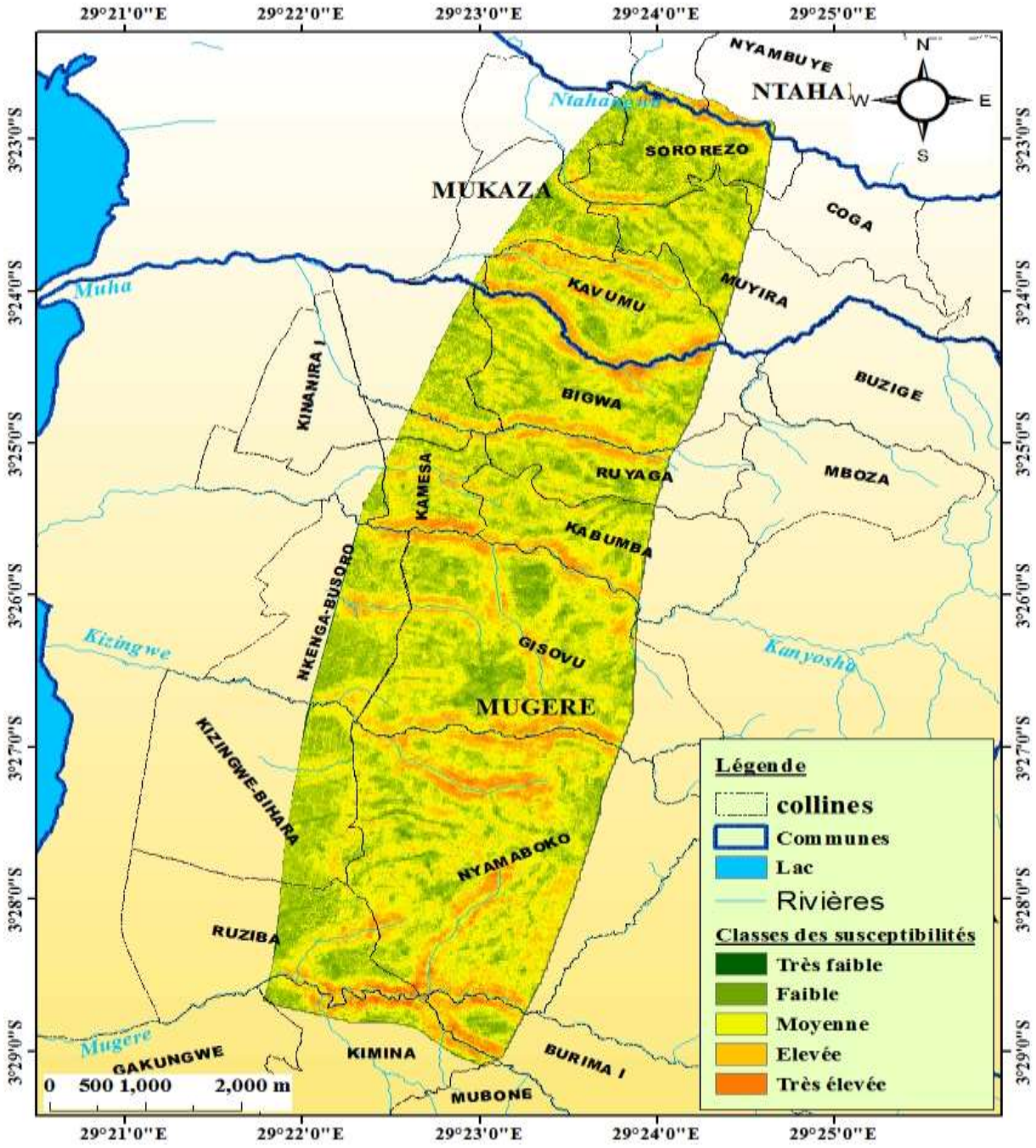


Figure 16: Carte d'évaluation de la susceptibilité des risques

La carte montre que la majorité des quartiers de la zone d'étude présente une susceptibilité moyenne à élevée aux risques Étudiés. Les zones à susceptibilité très élevée se situent surtout le long des cours d'eau, sur les ravins et sur les pentes fortes, où le ruissellement et l'érosion sont importants.

Les secteurs à susceptibilité élevée correspondent aux zones de transition entre les sommets et les bas-fonds, où les eaux de surface favorisent l'instabilité des sols. La susceptibilité moyenne concerne une grande partie de la zone et les zones à susceptibilité faible à très faible se trouvent principalement sur les pentes douces et les parties les plus stables du relief.

La carte met en évidence l'influence du réseau hydrographique dans la répartition des risques, les zones proches des cours d'eau étant généralement plus exposées.

III.6.1. Analyse de la matrice de comparaison

La matrice de comparaison par paires montre que le facteur "pente" est le paramètre le plus déterminant dans le déclenchement des glissements de terrain, avec un poids dominant sur les autres facteurs (valeurs de comparaison variant entre 3 et 4). Ce résultat est cohérent avec plusieurs études menées en milieu tropical montagneux, qui soulignent que l'augmentation de l'inclinaison des pentes accroît considérablement les forces de cisaillement et donc le risque d'instabilité (Dai et Lee, 2002 ; Guzzetti *et al.*, 2006). Dans la zone d'étude, les versants escarpés surplombant la ville de Bujumbura présentent des pentes souvent supérieures à 30 %, ce qui accentue la vulnérabilité aux glissements surtout après des épisodes pluvieux intenses.

Le facteur densité de drainage arrive en seconde position d'importance. Une densité élevée de drainage traduit une forte incision du relief et une capacité accrue de concentration des eaux de ruissellement, favorisant ainsi la saturation des sols et le déclenchement des mouvements de masse. Ce constat rejoint les travaux de Lee et Pradhan (2007), qui ont montré que les zones à forte densité hydrographique présentent un risque élevé de glissement en raison de l'érosion linéaire et de la perte de cohésion des matériaux superficiels.

La lithologie, avec un poids moyen (valeurs de comparaison entre 2 et 3), joue un rôle non négligeable dans la stabilité des terrains. Les formations schisteuses, argileuses et les altérites issues des roches métamorphiques sont particulièrement vulnérables à la saturation en eau et aux ruptures mécaniques (Van Westen *et al*., 2008). Dans la région de Ntahangwa–Mugere, la présence de sols sablo-argileux et de matériaux meubles sur des substrats fracturés accentue la sensibilité des pentes aux glissements, surtout en période de fortes pluies.

Le facteur occupation du sol (LULC) montre une influence modérée mais significative. Les zones déboisées et les espaces urbanisés non planifiés, observés principalement dans les communes de Mukaza et Muha, amplifient le ruissellement et diminuent la capacité d'infiltration des sols. Ceci confirme les résultats de Kouassi et al. (2019), selon lesquels la

déforestation et l'urbanisation anarchique figurent parmi les principales causes anthropiques des glissements de terrain dans les régions tropicales d'altitude.

Enfin, le facteur aspect (orientation des pentes) présente un poids relativement faible dans l'ensemble de la matrice. Néanmoins, il peut influencer la distribution de l'humidité et de la radiation solaire, donc indirectement la stabilité des versants. Les pentes orientées sud-est, recevant davantage de précipitations dans la région étudiée, sont plus sujettes aux phénomènes d'instabilité que celles exposées au nord-ouest (Van Westen *et al.,* 2008).

III.6.2. Cohérence du modèle et interprétation du CR

L'indice de cohérence (CR = 0,084) est inférieur à la valeur seuil de 0,1 proposée par Saaty (1980). Ainsi, la pondération attribuée aux paramètres peut être considérée comme fiable et représentative de la réalité géomorphologique et environnementale de la zone d'étude.

Les zones à pentes abruptes, à forte densité de drainage et à couvert végétal réduit apparaissent logiquement comme les plus exposées aux glissements de terrain, notamment les secteurs situés à l'est des communes de Mukaza et Mugere où les altitudes sont élevées et les précipitations sont souvent très intenses.

Les résultats de cette hiérarchisation confirment les tendances observées dans d'autres régions du Burundi et de l'Afrique de l'Est. Selon Nkunzimana et al. (2020), les zones montagneuses du nord et de l'Est de Bujumbura présentent une sensibilité accrue aux glissements, principalement en raison de la combinaison des fortes pentes, de la déforestation et de la variabilité pluviométrique. De même, Kubwimana et al. (2021) soulignent que le changement d'occupation du sol, notamment la conversion des forêts en zones urbaines et agricoles, constitue un facteur aggravant majeur dans la genèse des glissements récents.

Les résultats de la présente étude confirment également les conclusions de Nibigira et al. (2022), qui ont démontré une corrélation positive entre la dynamique du couvert forestier, la densité de drainage et la fréquence des glissements de terrain dans la région de Bujumbura.

CONCLUSION

Le présent travail avait pour objectif général d'évaluer l'effet combiné de la déforestation et du changement climatique sur les risques de glissements de terrain dans la zone surplombant la ville de Bujumbura, comprise entre les rivières Ntahangwa et Mugere, au cours des vingt dernières années. A travers une approche intégrée mobilisant la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG), l'analyse multicritère et les données climatiques, l'analyse spatio-temporelle de la couverture forestière et de l'occupation des sols a mis en évidence une régression marquée du couvert forestier accompagnée d'une extension rapide et souvent non planifiée des zones bâties. Cette dynamique a contribué à l'exposition accrue des versants instables, permettant ainsi d'identifier clairement les zones les plus vulnérables aux glissements de terrain, notamment sur les pentes abruptes.

Nos résultats confirment que la déforestation joue un rôle déterminant dans l'augmentation de la susceptibilité des sols aux mouvements de masse.

Par ailleurs, l'analyse des tendances climatiques a révélé une augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations ainsi qu'une intensification des événements pluvieux extrêmes. Ces conditions climatiques favorisent la saturation des sols et l'augmentation des pressions interstitielles, constituant ainsi un facteur déclencheur majeur des glissements de terrain dans la zone d'étude.

Ces constats valident l'hypothèse selon laquelle le changement climatique contribue significativement à la fréquence et à la gravité accrue des glissements de terrain.

Enfin, l'évaluation de la corrélation entre la déforestation, les précipitations extrêmes et les mouvements de terrain a montré que les zones les plus touchées résultent d'une combinaison de facteurs défavorables, notamment des pentes fortes, des sols dénudés et des pluies intenses. Cette interaction synergique explique l'intensification des glissements observés au cours des deux dernières décennies.

SUGGESTIONS

- Aux décideurs politiques chargés de la protection de l'environnement (OBPE)

- Identifier des zones à grande vulnérabilité et à sol nu afin d'y pratiquer un reboisement avec des essences locales à enracinement profond et impliquer des communautés locales dans l'entretien des plants ;

-Organiser des campagnes de sensibilisation environnementale et former les populations aux techniques de conservation des sols ; promotion du reboisement participatif, assurer la protection des zones à forte pente vulnérables aux glissements et les bassins versants.

- Aux décideurs chargés de l'urbanisme (OBUHA)

- Délimitation des zones non constructives ; renforcement des procédures de permis de construire et exigence d'études géotechniques en zones à risque ;

- Aux services charges de la protection civile

- Diffusion d'alertes précoces aux populations exposées ;

- Harmonisation de la Politique Nationale de Gestion des Risques de Catastrophes et de la Politique Forestière et planification exigée.

- Aux chercheurs

- Réalisation des études géotechniques détaillées et analyse de la stabilité des sols.

Références bibliographiques

1. Achard, F. (2014). *Determination of deforestation rates.* Environmental Research Letters, 9(1), 015003

2. Amaral, A. M. C. do. (2018). *Analyse statistique des précipitations liées à la survenue de mouvements de masse à Cubato—SP*. https://repositorio.unesp.br/items/ad070fdd-c6f0-4e96-a555-d7ce1fd6eb5e

3. Bachar, K. (2024). La prise en compte de la problématique de la dégradation des terres dans l'aménagement urbain en milieu steppique: Un état des lieux prospectif. *«Land Degradation and Sustainable Development in the Steppes»*. https://shs.hal.science/halshs-05151578/

4. Bizimana et Van Ranst. (2016). *Caractérisation des sols et risques d'instabilité des versants dans la région de Bujumbura.* African Journal of Environmental Science, 10(3), 214-227.

5. Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems*. Oxford university press. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=kvoJCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=%E2%80%A2%09Burrough,+P.+A.,+%26+McDonnell,+R.+A.+(1998).+Principles+of+Geographical+Information+Systems.+Oxford+University+Press.&ots=aMG15pz5FG&sig=vOFDSSYZi2jKSr1Hk6_OxJZEotw

6. Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, *113*(5), 893–903.

7. Chaturvedi. (2018). *Impact of deforestation on landslide susceptibility in tropical mountainous regions.* Journal of Mountain Science, 15(3), 463–474.

8. Chorowicz, J. (2005). The east African rift system. *Journal of African Earth Sciences*, *43*(1–3), 379–410.

9. *Climat Bujumbura: Météo Bujumbura & température par mois*. (2024). https://en.climate-data.org/africa/burundi/bujumbura-mairie/bujumbura-1073/

10. Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. CRC press. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780429052729/assessing-accuracy-remotely-sensed-data-russell-congalton-kass-green

11. Crozier, M. J. (2010). Déchiffrer l'effet du changement climatique sur l'activité des glissements de terrain: Une revue. Geomorphology, 124(3), 260-267. *Geomorphology*, *124*(3–4), 260–267.

12. Dai, F. C., & Lee, C. F. (2012). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, *42*(3–4), 213–228.

13. Djerbal, L. (2013). *Analyse des mécanismes de déformation et de la rupture progressive du verssant instable d'Ain El Hammam* [PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri]. https://dspace.ummto.dz/items/15144e04-ec6d-47d8-9c0c-313d6091002a

14. Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W. Z., Landslides, J.-1 J. T. C. on, & Slopes, E. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, *102*(3–4), 85–98.

15. Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, *162*, 227–252.

16. Glade, T. (2013). Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand. *Catena*, *51*(3–4), 297–314.

17. Gruber, S., & Haeberli, W. (2017). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *112*(F2), 2006JF000547. https://doi.org/10.1029/2006JF000547

18. Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook-A guide to understanding landslides*. US Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/circ/1325/

19. Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., & Kutuzov, S. (2019). Régions de haute montagne. Dans: Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans un climat en évolution. In *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* (pp. 131–202). H.-O.

Pörtner, DC Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E …. https://iris.unito.it/bitstream/2318/1803038/1/06_SROCC_Ch02_FINAL.pdf

20. Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, *36*(7), 1897–1910. https://doi.org/10.1029/2000WR900090

21. Kabanyegeye, H., Cirezi, N. C., Muteya, H. K., Mbarushimana, D., Mukubu Pika, L., Salomon, W., Useni Sikuzani, Y., Sambieni, K. R., Masharabu, T., & Bogaert, J. (2024). Spatio-Temporal Analysis of Green Infrastructure along the Urban-Rural Gradient of the Cities of Bujumbura, Kinshasa and Lubumbashi. *Land*, *13*(9), 1467.

22. Kabanyegeye, H., NDAYISHIMIYE, J., HAKIZIMANA, P., MASHARABU, T., Malaisse, F., & Bogaert, J. (2022). Diversité floristique et statut de conservation des espaces verts de la ville de Bujumbura (Burundi). *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, *46*(1). https://orbi.uliege.be/handle/2268/295460

23. Kabanyegeye, H., Sikuzani, Y. U., Sambieni, K. R., Mbarushimana, D., Masharabu, T., & Bogaert, J. (2023). Analysis of anthropogenic disturbances of green spaces along an urban–rural gradient of the City of Bujumbura (Burundi). *Land*, *12*(2), 465.

24. Keefer, D. K. (1984). Des glissements de terrain provoqués par des tremblements de terre. *Geological Society of America Bulletin*, *95*(4), 406–421.

25. Kubwimana, D. (2022). *Mouvements de terrain dans les collines peuplées de Bujumbura (Burundi): Inventaire, caractérisation et prédiction d'un aléa dans un environnement en mutation*. https://toubkal.imist.ma/handle/123456789/33454

26. Lemoalle. (2014). *Hydrologie et climat du lac Tanganyika.* Hydrological Sciences Journal, 59(2), 279-293

27. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons. https://books.google.com/books.

28. Madani, D. (2023). *Étude d'impacts de la dégradation des terres liée à la désertification sur le paysage et le volet socio-économique dans la région de M'Sila, Algérie Est* [PhD Thesis, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER-BISKRA]. http://thesis.univ-biskra.dz/6369/

29. Masharabu, T., Kabanyegeye, H., & Nyandwi, V. (2023). *Status of Land and Natural Resources Administration in Burundi: An overview*. https://www.researchgate.net/profile/Henri-Kabanyegeye/publication/308903345_Status_of_Land_and_Natural_Resources_Administration_in_Burundi_an_overview/links/67f78d9ae8041142a17066b7/Status-of-Land-and-Natural-Resources-Administration-in-Burundi-an-overview.pdf

30. Mbago-Bhunu, S., Dagmawi, H.-S., & Mc Grenra, D. (2022). *République du Burundi Programme d'options stratégiques pour le pays*. 4.

31. Mbonimpa, S., Ngenzi, J. C., Hatungimana, D., Rudahinyuka, S., & Cirimwami, L. (2025). *Engineers'and architects'perceptions of the environmental pollution caused by construction sites in the city of bujumbura*. https://repositori.mypolycc.edu.my/handle/123456789/6781

32. Mugisho Bachinyaga, J. (2024). *Travail d'expertise interdisciplinaire: Evolution récente des glissements de terrain dans les collines de Bujumbura: Une analyse spatio-temporelle des processus et des impacts associés*. https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/20835

33. Ndayishimiye, J., Ntakimazi, G., Nsavyimana, G., Sibomana, C., Mpawenayo, B., Nzigidahera, B., Ndayikeza, L., Vanhove, M., Triest, L., & Janssens de Bisthoven, L. (2023). La dégradation du littoral du lac Tanganyika au Burundi: Approche multidisciplinaire. *Bulletin Scientifique Sur l'Environnement et La Biodiversité*, *6*, 1–15.

34. Ndayizeye, L., Odette, M., Nduwarugira, D., Sibomana, C., & Dieudonné, N. (2024). Dominance of Bactrocera dorsalis Hendel on Ceratitis cosyra Walker (Diptera: Tephritidae) in orchards in Bujumbura, Burundi. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, *9*(2), 345–349.

35. Ndikubwayo, E. (2019). *Contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain de la partie nord de la mairie de Bujumbura, Burundi*. https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/8038

36. Ndikumana. (2021). *Urbanisation et vulnérabilité aux risques naturels à Bujumbura.* Cahiers de Géographie Africaine, 8(1), 77-93.

37. Nduwimana, A., Ndagigimana, G., Niyonzima, N., & Ngiye, E. (2025). La protection des rivières traversant la ville de Bujumbura au Burundi: Un grand défi à relever. *Afrique SCIENCE*, *26*(5), 25–36.

38. Nibigira. (2022). *Impacts des changements climatiques sur la stabilité des sols en milieu collinaire burundais.* Revue Burundaise des Sciences de l'Environnement, 15(2), 45-57.

39. Nibigira, L. (2018). *Etude des risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans la région des lacs Kivu et Tanganyika*. Universite de Liege (Belgium). https://search.proquest.com/openview/b301b26b22e695d0f4ddbcdcbccb7252/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y

40. Niyonkuru, C. (2022). *Initiatives communautaires de reboisement et restauration des écosystèmes à Bujumbura.* Bulletin de la Recherche Environnementale du Burundi, 11(2), 63–79

41. 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.

42. Nkunzimana, A., Bi, S., Jiang, T., Wu, W., & Abro, M. I. (2019). Spatiotemporal variation of rainfall and occurrence of extreme events over Burundi during 1960 to 2010. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*(5), 176. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4335-y

43. Nsabimana, J., Henry, S., Ndayisenga, A., Kubwimana, D., Dewitte, O., Kervyn, F., & Michellier, C. (2023a). Geo-hydrological hazard impacts, vulnerability and perception in Bujumbura (Burundi): A high-resolution field-based assessment in a sprawling city. *Land*, *12*(10), 1876.

44. Nsabimana, J., Henry, S., Ndayisenga, A., Kubwimana, D., Dewitte, O., Kervyn, F., & Michellier, C. (2023b). Geo-hydrological hazard impacts, vulnerability and perception

in Bujumbura (Burundi): A high-resolution field-based assessment in a sprawling city. *Land*, *12*(10), 1876.

45. Psomiadis, E., Charizopoulos, N., Efthimiou, N., Soulis, K. X., & Charalampopoulos, I. (2020). Earth observation and GIS-based analysis for landslide susceptibility and risk assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(9), 552.

46. Roose, É., Duchaufour, H., & de Noni, G. (2018). *Lutte antiérosive: Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*. IRD Éditions.

47. Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Ce, W., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., & Kennedy, R. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, *145*, 154–172.

48. Russo, A., & Cirella, G. T. (2023). Urban ecosystem services: Advancements in urban green development. In *Land* (Vol. 12, Number 3, p. 522). MDPI. https://www.mdpi.com/2073-445X/12/3/522

49. Rwabahungu, M., Niyonkuru, D., & Bukobero, L. (2013). Dégradation et prédation des boisements communaux avant, pendant et après la guerre au Burundi. *VertigO-La Revue Électronique En Sciences de l'environnement*, (Hors-série 17). https://journals.openedition.org/vertigo/13811

50. Sidle, R. C., Ziegler, A. D., Negishi, J. N., Nik, A. R., Siew, R., & Turkelboom, F. (2006). Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, *224*(1–2), 199–225.

51. Sidle, R., & Ochiai, H. (2006). Processes, prediction, and land use. *Water Resources Monograph. American Geophysical Union, Washington*, *525*, 870.

52. Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., & Maquaire, O. (2015). Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. *Revue Internationale de Géomatique*, *15*(2), 227–245.

53. Tripathi, V. K. (2022). *Mapping of landslide susceptible zones in malappuram district, kerala using machine learning algorithm and geoinformatics.* [PhD Thesis, BANARAS

HINDU UNIVERSITY VARANASI]. https://krishikosh.egranth.ac.in/server/api/core/bitstreams/beff6c67-df70-470c-9bd8-54c2cbb7f2bc/content

54. Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, *102*(3–4), 112–131.

55. Weissenberger, S., Noblet, M., Plante, S., Chouinard, O., Guillemot, J., Aubé, M., Meur-Férec, C., Michel-Guillou, É., Gaye, N., & Kane, A. (2016). Changements climatiques, changements du littoral et évolution de la vulnérabilité côtière au fil du temps: Comparaison de territoires français, canadien et sénégalais. *VertigO-La Revue Électronique En Sciences de l'environnement*, *16*(3). https://journals.openedition.org/vertigo/18050

ANNEXES



Déforestation sur pente qui a causé un glissement de terrain à MUGOBOKA (3septembre 2025)



Rupture de la route à SOROREZO suite à un glissement de terrain (3septembre 2025)

Tableau 5: échelle utilisée pour les comparaisons par paire pour cette étude (Saaty, 1980)

Jugement verbal	Évaluation numérique
Poids dominant	4 3
Poids moyen	2
Poids relativement faible	1

Tableau 6: Analyse de comparaison par paires (Saaty, 1980)

Critères	Pente	Densité de drainage	Lithologie	Occupation du sol (LULC)	Aspect (Orientation des pentes)
Pente	1	2	3	2	3
Densité de drainage	1	1	2	3	4
Lithologie	2	3	1	2	3
Occupation du sol (LULC)	2	3	2	1	4
Aspect (Orientation des pentes)	3	4	3	4	1