



UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI

Dépôt institutionnel officiel

<https://repository.ub.edu.bi>

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Ntawumenya, Joseph; Sous l'encadrement de : Dr. Désiré Kubwimana

2026-03

UB, F S

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2423>

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

MASTER EN SCIENCES ET GESTION INTEGREE DE L'ENVIRONNEMENT



Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Par :

Joseph NTAWUMENYA

Sous l'encadrement de :
Dr. Désiré KUBWIMANA

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

Spécialité : Génie de l'environnement

Bujumbura, Mars 2026

MEMBRES DU JURY

Président : Dr. NKUNZIMANA Athanase

Directeur de mémoire : Dr. KUBWIMANA Désiré

Secrétaire : Dr. MATAKARA Giscard

DEDICACE

A Dieu le Tout puissant,

A mes parents,

A ma très chère épouse NSHIMIRIMANA Nadine qui s'est occupée de la famille pendant que je faisais mes études,

A mes enfants ITANGANEZA Stéphane Brillant et IGIRANEZA Aimé Gaël,

A ma sœur et frères ainsi que mes amis et connaissances,

A tous qui ont contribué au déroulement de ce mémoire.

Je dédie ce mémoire

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, plusieurs personnes ont contribué pour devenir ce que nous sommes aujourd'hui. De ceci, qu'il nous soit permis d'exprimer nos sentiments de gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, en se donnant corps et âme pour la réalisation de ce travail.

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

Nous serons toujours reconnaissants envers l'Administrateur de la Commune Isare, le Directeur du Bureau Provincial de l'Environnement, Agriculture et Elevage et le Directeur Général de la Protection Civile et de la Gestion des Catastrophes, qui ont fourni une documentation utile à notre travail de recherche.

Nous remercions nos éducateurs depuis l'école primaire jusqu'à l'université, particulièrement ceux de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement de l'Université du Burundi, pour la formation à caractère multidisciplinaire dont ils nous ont donné durant tout le cursus de formation académique.

Enfin, je dis grand merci à la famille de Monsieur Emmanuel NDAYIRAGIJE pour le grand soutien financier et moral qu'elle m'a réservé durant toute la période de formation, qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance qui restera ancrée dans mon cœur durant toute ma vie.

Joseph NTAWUMENYA

RESUME

Les instabilités de terrain figurent parmi les phénomènes géodynamiques les plus spectaculaires et les plus fréquents à l'échelle mondiale. Leur manifestation entraîne des modifications morphologiques importantes du terrain et affecte les infrastructures, les activités humaines et les écosystèmes exposés. Ces phénomènes résultent de plusieurs facteurs favorisant leur déclenchement. Le bassin versant de la rivière Gikoma est situé en partie dans la plaine de l'Imbo et dans la région des Mirwa, en province de Bujumbura. De par ses caractéristiques naturelles, ce bassin versant est particulièrement propice au développement de nombreuses instabilités de terrain. Ces dernières sont conditionnées par plusieurs facteurs, notamment la lithologie, la pédologie, la fracturation des roches, l'occupation du sol, le réseau hydrographique, la pente ainsi que l'exposition des versants. La topographie fortement accidentée, les pluies torrentielles et la réduction de la couverture végétale sont les principaux facteurs des instabilités de terrain dudit bassin versant. En saison des pluies, les sols argileux sont saturés en eau et deviennent plus susceptibles à glisser. Un inventaire des instabilités de terrain a été réalisé par l'analyse d'images et photographies aériennes et à partir des observations in situ. Au total, 78 mouvements de masse ont été identifiés : éboulements (37,20 %), glissements translationnels (26,92%), glissements rotationnels (7,69%), mouvements complexes (6,41%), effondrements (8,97%), fissures (3,85%), érosion hydrique (3,85%), coulées boueuses (2,56%), affouillements (1,28%) et affaissements (1,28%). La pente et les pluies torrentielles sont des principaux facteurs jouant un rôle prépondérant dans le processus des instabilités de terrain dans la zone d'étude. L'étude diachronique de l'occupation du sol à partir d'images satellitaires de 2002, 2014 et 2024 révèle que les changements d'affectation des terres jouent un rôle prépondérant dans le processus de déclenchement des mouvements de terrain au sein du bassin versant de la rivière Gikoma. L'intensification récente de ces phénomènes serait principalement liée à la dégradation progressive de l'environnement du bassin versant. Après avoir soumis les facteurs responsables des instabilités de terrain à l'analyse multicritère hiérarchisée en utilisant une méthode AHP, la carte de susceptibilité produite a permis de montrer les zones stables (Buhayira, Giterama et Tenga) et non stables (Kindobwe, Kagoma, Kwigere, Masake et le long des cours d'eau : Kigezi, Nkuri et Karunga) dans notre zone d'étude.

Mots clés : Bassin versant de Gikoma-Instabilités de terrain-Carte de susceptibilité-Bujumbura

ABSTRACT

Ground instability is one of the most spectacular and frequent geodynamic phenomena worldwide. Its occurrence causes significant morphological changes to the terrain and affects exposed infrastructure, human activities, and ecosystems. These phenomena result from several factors that contribute to their occurrence. The Gikoma River watershed is located partly in the Imbo plain and partly in the Mirwa region, in the province of Bujumbura. Due to its natural characteristics, this watershed is particularly prone to the development of numerous types of ground instability. These are influenced by several factors, including lithology, pedology, rock fracturing, land use, the hydrographic network, slope and exposure of the slopes. The highly rugged topography, torrential rains and reduced vegetation cover are the main factors contributing to the instability of the terrain in this watershed. During the rainy season, the clay soils become saturated with water and more susceptible to landslides. During the rainy season, clay soils become saturated with water and more prone to slipping. An inventory of ground instability was carried out by analysing aerial images and photographs and based on in situ observations. A total of 78 mass movements were identified: rockfalls (37.20%), translational slides (26.92%), rotational slides (7.69%), complex movements (6.41%), collapses (8.97%), fissures (3.85%), water erosion (3.85%), mudflows (2.56%), scouring (1.28%) and subsidence (1.28%). Slope and torrential rainfall are the main factors playing a major role in the process of land instability in the study area. A diachronic study of land use based on satellite images from 2002, 2014 and 2024 reveals that changes in land use play a major role in triggering ground movements within the Gikoma River watershed. The recent intensification of these phenomena is thought to be mainly linked to the gradual deterioration of the environment in the catchment area. After subjecting the factors responsible for ground instability to hierarchical multi-criteria analysis using an AHP method, the susceptibility map produced showed the stable areas (Buhayira, Giterama and Tenga) and unstable areas (Kindobwe, Kagoma, Kwigere, Masake and along the watercourses: Kigezi, Nkuri and Karunga) in our study area.

Keywords : Gikoma watershed – Land instability – Susceptibility map – Bujumbura

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY.....	i
DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS.....	xii
AVANT-PROPOS	xiii
0. INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	4
I.1. Notions de base pour l'étude des mouvements de terrain.....	4
I.1.1. Clarification terminologique	4
I.1.2. Définitions.....	4
I.1.3. Mouvements de masse au niveau mondial.....	4
I.1.4. Glissements de terrain au Burundi	6
I.1.5. Les mouvements de terrain dans les bassins versants	6
I.1.6. Description des mouvements de terrain	7
I.1.6.1. Types et classification de mouvements de terrain.....	7
I.1.6.1.1. Types de mouvements de terrain.....	7
I.1.6.1.1.1. Glissement rotationnel ou circulaire	10
I.1.6.1.1.2. Glissement translationnel ou plan	10
I.1.6.1.1.3. Coulées de boues ou des débris.....	10
I.1.6.1.1.4. Reptation ou creeping.....	11
I.1.6.1.1.5. Affaissements	11
I.1.6.1.1.6. Effondrements	11
I.1.6.1.1.7. Eboulements	12
I.1.6.1.1.8. Affouillements.....	12
I.1.6.1.1.9. Glissement complexe	12
I.1.6.1.1.10. Erosion en nappe	12

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

I.1.6.1.1.11. Avalanches des débris ou de roches	13
I.1.6.1.2. Classification de mouvements de terrain	14
I.1.6.1.3. La classification des mouvements de terrain selon la profondeur.....	16
I.1.6.2. Facteurs de glissement de terrain	17
I.1.6.2.1. Facteurs de prédispositions	17
I.1.6.2.1.1. Topographie	17
I.1.6.2.1.2. Lithologie	17
I.1.6.2.1.3. Pédologie	18
I.1.6.2.2. Facteurs préparatoires	18
I.1.6.2.3. Facteurs déclencheurs	18
I.2. Présentation de la zone d'étude	19
I.2.1. Localisation de la zone d'étude	19
I.2.2. Description de la zone d'étude	21
I.2.2.1. Climat	21
I.2.2.2. Précipitations	21
I.2.2.3. Températures	22
I.2.2.4. Lithologie de la zone d'étude	23
I.2.2.5. Relief et morphologie du bassin versant de la rivière Gikoma	23
I.2.2.5.1. Relief	23
I.2.2.5.2. Géomorphologie	24
I.2.2.5.2.1. Zone des Mirwa	25
I.2.2.5.2.2. Zone moyenne des Mirwa	25
I.2.2.5.2.3. Plaine	26
I.2.2.5.3. Densité de drainage	27
I.2.2.5.4. La nature pédologique	29
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	32
II.1. Matériels de collecte et de traitement des données	32
II.1.1. Matériels de collecte des données	32
II.1.2. Matériels de traitement et analyse des données	32
II.2. Méthodologie	33
II.2.1. Recherche documentaire	34
II.2.2. Visite de terrain	35
II.2.3. Utilisation des logiciels et outils de traitement des données	36

CHAPITRE III : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES

RESULTATS	40
III.1. Apport de l'imagerie satellitaire et photographie aérienne dans l'étude de mouvements de terrain dans le bassin versant de Gikoma.....	40
III.1.1. Dynamique d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Gikoma	40
III.1.1.1. Occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2002.....	41
III.1.1.2. Occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2014.....	43
III.1.1.3. Occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2024.....	45
III.1.2. Evolution de l'occupation du dans le bassin versant de la rivière Gikoma	47
III.2. Inventaire de mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma.....	48
III.2.1. Description des mouvements de masse identifiés dans la zone d'étude.....	51
III.2.2. Causes et déclenchements de mouvements de terrain dans zone d'étude	55
III.2.2.1. Pente	55
III.2.2.2. Hydrographie du bassin versant de la rivière Gikoma.....	56
III.2.2.3. Lithologie.....	57
III.2.2.4. Exposition des versants	58
III.2.2.5. Pédologie	60
III.2.2.6. Occupation du sol	60
III.3. Influence <i>des</i> facteurs <i>liés aux mouvements de terrain</i>	60
III.4. Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la zone d'étude.....	68
III.5. Interprétation et discussion des résultats	71
III.5.1. Interprétation des résultats.....	71
III.5.2. Discussion des résultats	73
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	76
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma illustratif d'un bassin versant	7
Figure 2: Schéma illustratif d'un glissement de terrain idéalisé	9
Figure 3: Illustration schématique des principaux types de mouvement de terrain	14
Figure 4: Localisation de la zone d'étude	20
Figure 5: Courbe d'évolution des précipitations moyennes mensuelles (1990 à 2024).....	22
Figure 6: Carte de la lithologie du bassin versant de la rivière Gikoma (A partir de la carte géologique, feuille de Bujumbura).....	23
Figure 7: Profil topographique du bassin versant de la rivière Gikoma (Sindayihebura, 2015)	25
Figure 8: Carte hypsométrique du bassin versant de la rivière Gikoma	27
Figure 9: Carte de la densité du réseau de drainage	28
Figure 10: Carte pédologique du bassin versant de la rivière Gikoma	31
Figure 11: Méthodologie utilisée pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain	38
Figure 12: Carte des classes d'occupation du sol dans le bassin versant Gikoma en 2002	42
Figure 13: Carte des classes d'occupation du sol dans le bassin versant Gikoma en 2014	44
Figure 14: Carte des classes d'occupation du sol du bassin versant de Gikoma en 2024.....	46
Figure 15: Illustration de la dynamique d'une zone bâtie dans le bassin versant de la rivière Gikoma (2002 à 2024).....	47
Figure 16: Carte d'inventaire de mouvements de terrain dans le bassin versant Gikoma	50
Figure 17: Carte des pentes du bassin versant de la rivière Gikoma.....	56
Figure 18: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Gikoma.....	57
Figure 19: Carte de la lithologie du bassin versant de Gikoma	58

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Figure 20: Carte d'exposition du bassin versant de la rivière Gikoma	59
Figure 21: Fréquence par lithologie	61
Figure 22: Fréquence par pédologie	62
Figure 23: Contact avec fracturation	63
Figure 24: Classification d'occupation du sol	64
Figure 25: Contact avec le réseau hydrographique	65
Figure 26: Fréquence par altitude	66
Figure 27: Fréquence par exposition des versants	67
Figure 28: Pondération des différents paramètres susceptible d'influencer les glissements de terrain	69
Figure 29: Carte de probabilité aux instabilités de terrain du bassin versant Gikoma	70
Figure 30: Evolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de Gikoma	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des glissements de terrain (Varnes, 1978)	15
Tableau 2: Types de glissements de terrain en fonction du type de mouvement et des matériaux déplacés	16
Tableau 3: Classification selon la profondeur de la surface de glissement (Abderrahim,.....	16
Tableau 4: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bugarama (1990 à 2024)	21
Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bujumbura (1990 à	21
Tableau 6: Superficies des classes d'occupation du sol dans le Bassin versant de la rivière Gikoma en 2002	41
Tableau 7: Superficies des classes d'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2014	43
Tableau 8: Superficies des classes d'occupation du sol dans le BV Gikoma en 2024	45
Tableau 9: Evolution d'occupation du sol dans le BV Gikoma de 2002 à 2024	48
Tableau 10: Types et effectif de mouvements de terrain identifiés sur terrain	49
Tableau 11: Facteurs liés aux mouvements de terrain	61
Tableau 12: Matrice de comparaison par paire des facteurs de l'aléa	69

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

AHP	: Analytical Hierarchy Process
BV	: Bassin versant
DGPC	: Direction Générale de Protection Civile
ETM	: Enhanced Thematic Mapper
GPS	: Global Positioning System
IGEBU	: Institut Géographique du Burundi
LULC	: Land Use Land Cover
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
MT	: Mouvement de terrain
OLI	: Operational Land Image
RC	: Rapport de Cohérence
RH	: Réseau hydrographique
RN	: Route nationale
SIG	: Systèmes d'Information Géographique
TIRS	: Thermal Infra Red Sensor
USGS	: United States Geological Survey

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire porte sur l'analyse des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma, une zone particulièrement vulnérable aux aléas géologiques et hydrométéorologiques en raison de ses caractéristiques topographiques, géologiques et climatiques. Cette étude s'inscrit dans un contexte où les effets combinés de la dégradation environnementale et des changements climatiques accentuent les risques naturels et leurs conséquences sur les populations, les infrastructures et les écosystèmes.

Le choix de ce sujet est motivé par l'importance croissante des mouvements de masse dans la région de Bujumbura et plus particulièrement dans les contreforts des Mirwa, où les glissements de terrain, les éboulements et les phénomènes d'érosion causent régulièrement des pertes humaines, des destructions d'infrastructures et une dégradation des ressources naturelles. Face à cette problématique, il apparaît indispensable de mieux comprendre les facteurs responsables de l'instabilité des versants afin de proposer des stratégies de prévention, d'aménagement et de gestion durable des territoires exposés.

La réalisation de ce travail a nécessité une démarche scientifique combinant les observations de terrain, l'analyse des images satellitaires et de Google Earth, les techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) et la modélisation de la susceptibilité aux mouvements de terrain.

Cette approche multidisciplinaire a permis d'établir un inventaire détaillé des différents types de mouvements de terrain, d'identifier les principaux facteurs de prédisposition et des zones les plus exposées aux risques.

Ce mémoire ambitionne ainsi d'apporter une contribution scientifique à la connaissance des mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma. Les résultats obtenus constituent un outil d'aide à la décision pouvant être utilisé par les autorités publiques, les services techniques, les urbanistes, les gestionnaires de l'environnement ainsi que les chercheurs dans la planification territoriale, la réduction des risques de catastrophes.

Ce travail servira de référence pour de futures recherches sur les risques naturels au Burundi et contribuera à promouvoir une gestion intégrée des bassins versants fondée sur une meilleure compréhension des interactions entre les facteurs naturels et les activités humaines.

0. INTRODUCTION

Dans le monde entier, chaque année, on assiste à des phénomènes naturels meurtriers de causes différentes qui menacent la population avec leurs biens et leurs environnements. Les instabilités de terrain figurent parmi les catastrophes naturelles qui sont à l'origine d'un grand nombre de victimes de par le monde et leur fréquence est en constante progression depuis ces dernières années (Petley D., 2012; Roose et al., 2001).

Les risques naturels sont devenus de plus en plus intenses en raison des actions anthropiques et de l'impact du changement climatique global (Harmouzi et al., 2018). A l'instar de nombreux pays à travers le monde, le Burundi est exposé à ces aléas. Cette vulnérabilité est plus marquée dans les contreforts des Mirwa, où les fortes pentes et la nature géologique des formations favorisent l'occurrence des mouvements de masse. Les versants de Bujumbura sont sujets aux glissements de terrain. Malgré les dommages importants causés par les glissements de terrain, les instabilités des pentes sont moins étudiées (Kubwimana, et al., 2021).

L'augmentation des cas de mouvements de masse peut engendrer de graves dégâts humains et matériels. Ces catastrophes peuvent provoquer des pertes en vies humaines, la destruction des habitations, des routes, des infrastructures publiques ainsi que des terres agricoles. Dans certains cas, les pertes économiques peuvent être énormes, ce qui oblige les gouvernements et les autorités locales à accorder une grande attention à la prévention, à la gestion des risques et à la protection des populations exposées.

Les mouvements de masse rencontrés dans la région des Mirwa existent depuis longtemps. Notre zone d'étude est favorable à de nombreux mouvements de terrain et autres phénomènes érosifs. Elle est menacée par les mouvements de terrain à savoir les éboulements, glissements rotationnels et translationnels, complexes, effondrements, fissures de terrain dues au retrait-gonflement des argiles, érosion hydrique, coulées boueuses, affouillements et affaissements.

Les causes des mouvements de masse peuvent être naturelles (la lithologie, la pédologie, fracturation des roches, le réseau hydrographique, la pente et l'exposition des versants de la rivière Gikoma géologie du terrain) ou anthropiques comme extraction des matériaux de construction au bord de la rivière Gikoma, excavation de roches quartziques, construction des maisons d'habitation d'une manière anarchique, les activités champêtres, la déforestation, etc.

0.1. Problématique

La région des Mirwa pour l'ensemble de Bujumbura est confrontée à une dégradation de ses versants, entraînant des risques naturels importants (Sindayihebura, 2005). La vulnérabilité des bassins versants des Mirwa est aggravée par le manque du schéma d'aménagement du territoire approprié aussi bien sur le plan local que régional (Sabushimike, 2015).

La région des Mirwa connaît une instabilité considérable et généralisée de ses bassins versants en amont aussi bien qu'en aval. La sensibilité des roches des Mirwa à l'altération physique et surtout à l'altération chimique constitue une menace environnementale très redoutable.

0.2. Questions de recherche

L'étude de mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma se base sur deux principales questions :

1. Quelles sont les principaux mouvements de masse présents dans la zone d'étude ?
2. Les prédispositions naturelles et les activités anthropiques sont-elles responsables des mouvements de masse dans la localité ?
3. Le paysage géomorphologique a-t-il une influence sur les mouvements de masse dans la zone d'étude ?

0.3. Objectifs du travail**0.3.1. Objectif général**

L'objectif général de ce travail est d'analyser les mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma afin de mieux comprendre leur répartition spatiale, leurs mécanismes de déclenchement et les facteurs qui les contrôlent.

0.3.2. Objectifs spécifiques

1. Inventorier et classer tous les types de mouvements de masse présents dans zone d'étude et
2. Analyser les facteurs qui influencent leur occurrence ;
3. Etudier la dynamique de l'occupation du sol et son impact sur l'évolution spatiale des mouvements de masse ;

0.4. Hypothèses de recherche

1. Les mouvements de masse observés dans le bassin versant de la rivière Gikoma sont dominés par des mouvements dont leur occurrence varie en fonction des caractéristiques géologiques et topographiques de la zone.
2. Les mouvements de masse dans la zone d'étude sont fortement influencés par une combinaison de facteurs naturels et d'activités anthropiques qui augmentent la vulnérabilité du milieu.
3. Le paysage géomorphologique du bassin versant de la rivière Gikoma, notamment la morphologie des versants et le réseau de drainage contrôle significativement la répartition spatiale et la susceptibilité aux mouvements de masse.

0.5. Intérêt du travail

Face à cette situation de mouvements de masse caractérisant la zone d'étude, le présent travail de recherche a été fait pour donner des informations sur les mouvements de masse rencontrés dans le bassin versant de la rivière Gikoma. Elles permettront également aux administratifs pour prendre des décisions en vue d'assurer une gestion rationnelle de la zone d'étude. Enfin, la production de la carte de susceptibilité permettra à identifier les zones stables et non stables du bassin versant de la rivière Gikoma.

0.6. Articulation du travail

En plus de l'introduction, la conclusion et les recommandations, le présent travail s'articule autour de trois chapitres qui permettent de délimiter les étapes clés du présent projet comme suit :

1. Le premier chapitre concerne les notions générales sur les mouvements de masse ;
2. Le deuxième chapitre concerne les matériels et méthodes utilisées pour aborder cette étude ;
3. Le troisième chapitre porte sur la présentation, interprétation et discussion des résultats obtenus.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN**I.1. Notions de base pour l'étude des mouvements de terrain****I.1.1. Clarification terminologique**

Dans le cadre de la présente étude, les termes instabilités de terrain, mouvements de masse et mouvements gravitaires sont employés de manière interchangeable. Dans ce travail, leurs distinctions ne modifient pas l'analyse globale, l'accent étant mis sur les processus d'instabilités affectant le bassin versant de Gikoma.

I.1.2. Définitions

- ❖ Un glissement de terrain est défini comme le déplacement vers le bas d'une masse de sol, de débris ou de roche sous l'effet de la gravité (Varnes, 1978). Selon cette définition, il considère que les mouvements de terrain comprennent l'écoulement, les glissements, la chute de matériaux, etc.
- ❖ Pierson & Costa (1987) ont décrit les mouvements de terrain comme des coulées de débris à mouvement rapide composée de boues, de graviers et de débris organiques.
- ❖ D'autres chercheurs convergent avec Varnes, 1978 et définissent un glissement de terrain comme le mouvement d'une masse de sol ou de roche le long d'une surface de rupture sous l'effet de la gravité, qui s'amorce essentiellement là où il y a un talus (Mebirouk et al., 19).

I.1.3. Mouvements de masse au niveau mondial

L'histoire d'un mouvement de masse est complexe et comprend des déformations avant la rupture, la rupture elle-même ainsi que des déplacements post-rupture. Les glissements de terrain causent de nombreuses victimes dans le monde et les pays les moins développés s'avèrent être particulièrement vulnérables (Petley, 2012).

Les mouvements de masse sont plus répandus que tout autre événement géologique et peuvent se produire n'importe où dans le monde. Ils se produisent lorsque de grandes masses de sol, de roches ou de débris descendent une pente en raison d'un phénomène naturel ou d'une activité humaine. Entre 1998 et 2017, les mouvements de masse ont touché environ 4,8 millions de personnes et causé plus de 18 000 décès (Lahmidi Alla, 2021).

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Au niveau de la République Démocratique du Congo (RDC) les mouvements gravitaires sont responsables chaque année de nombreuses victimes et parmi les régions les plus touchées figurent les versants du rift Est-africain (Mateso & Dewitte, 2014).

Les glissements de terrain sont parmi les mouvements de masse les plus spectaculaires et les plus fréquents au monde, dont l'apparition provoque des déformations de la croûte terrestre. Ils se développent dans un massif de sols meubles ou de roches tendres et se produisent dans des circonstances très variées, affectant les ouvrages construits par l'homme ou tout simplement, des pentes naturelles (Abderrahim, 2014)

Les glissements de terrain apparaissent lorsque les sols ou des roches se déplacent, fragilisés par les activités humaines ou par des phénomènes naturels qu'ils soient climatiques, géologiques ou encore géomorphologiques

Les glissements d'un massif se produisent généralement dans des matériaux meubles (des sols) ou des massifs rocheux fracturés ou altérés. Ils se manifestent par le déplacement d'une masse de matériau le long d'une (ou plusieurs) surface(s) de rupture (Chhun, 2013).

Les mouvements de masse provoquent ainsi une faible productivité du point de vue socio-économique. Les glissements de terrain comme catastrophe naturel sont des phénomènes qui s'observent partout à l'échelle planétaire. Ils causent des pertes en vies humaines, matérielles, biodiversité, destruction des espaces cultivables, etc. De 2002 à 2011, on a dénombré dans le monde 4130 catastrophes dues aux aléas naturels, qui ont provoqué la mort de 1.117.527 personnes et entraîné au minimum 1.195 milliards de dollars de perte économiques (Tameur, 2019). Ils sont répartis un peu partout dans le monde et leur fréquence varie d'une région à l'autre. Ils sont plus observés dans les zones les plus géo-dynamiquement actives.

Les phénomènes localisés à la surface du globe ne sont pas sans causes. Les causes d'instabilités sont multiples. Elles peuvent être dues soit à une augmentation des sollicitations : surcharge, suppression de la butée de pied déboisement, séisme et autres sources de vibration (Mugisho Bachinyaga, 2024).

Ces phénomènes ont des facteurs qui permettent leurs genèses et leurs déclenchements, et ces déclenchements suivent des mécanismes précis. Les glissements de terrain sont une partie intégrante du processus naturelle qui façonne les montagnes et les paysages en distribuant les matériaux au bas des pentes.

I.1.4. Glissements de terrain au Burundi

Les phénomènes de glissements de terrain s'observent aussi au Burundi. Le domaine montagnard est le théâtre privilégié de la manifestation des phénomènes en raison du relief souvent très accidenté (Kouadio et al., 2020).

Les glissements de terrain causent chaque année des dommages et des pertes en vies humaines.

L'exemple le plus frappant est l'événement du 9 février 2014 à Gatunguru, où plus de 70 personnes sont mortes et d'innombrables infrastructures ont été détruites lors de séries de glissements de terrain déclenchés par des pluies prolongées et qui se sont transformés en crues soudaines de débris (Tomety, 2017).

I.1.5. Les mouvements de terrain dans les bassins versants

Un bassin versant est une zone géographique qui collecte les eaux de pluie pour les acheminer vers un cours d'eau principal tel qu'un fleuve, une rivière ou un lac ou un bassin versant est une portion de territoire dont les eaux de ruissellement et d'infiltration alimentent un exutoire commun, soit un cours d'eau ou un lac.

Grands ou petits, les bassins versants rendent d'innombrables services aux communautés humaines. Mais ils sont souvent le siège de nombreuses crises environnementales, notamment géomorphologiques à l'instar de l'érosion dont les manifestations sont diverses et les conséquences difficiles à supporter et à remédier par les sociétés qui y vivent (Toko et al., 2023).

Les glissements de terrain figurent parmi les catastrophes naturelles qui sont à l'origine d'un grand nombre de victimes de par le monde et leur fréquence est en constante progression depuis ces dernières années. Le bassin versant est défini par le relief et délimité par les lignes de partage des eaux (Figure 1).

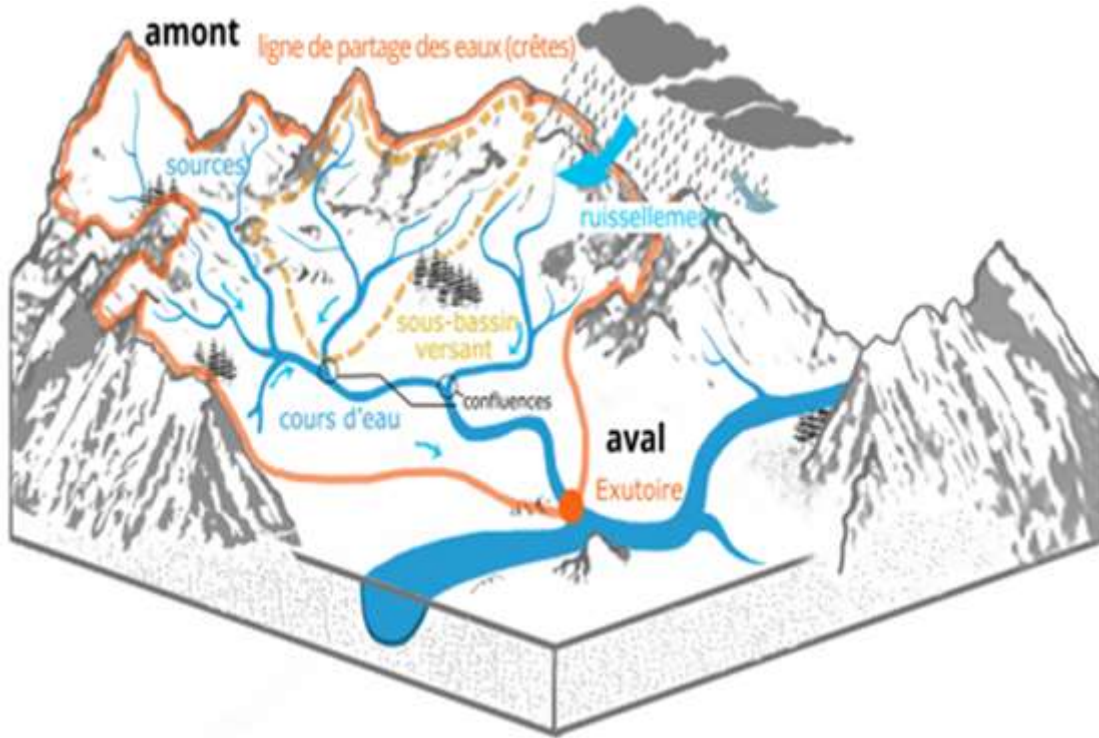


Figure 1: Schéma illustratif d'un bassin versant

La zone d'étude est favorable à de nombreux mouvements de terrain y compris les phénomènes érosifs. La ville de Bujumbura est surplombée par les contreforts des Mirwa et subie des effets néfastes issus des phénomènes naturels se produisant en amont de la zone des Mirwa. Une forte croissance démographique de la ville de Bujumbura et l'absence de planification urbaine adéquate font que la population est souvent forcée de s'installer sur des pentes instables et cela fait que certains versants glissent avec des habitations qu'ils portent.

I.1.6. Description des mouvements de terrain

I.1.6.1. Types et classification de mouvements de terrain

I.1.6.1.1. Types de mouvements de terrain

Il est complexe de comprendre en détail les processus de glissement de terrain, en particulier lorsque le paysage naturel est façonné par une variété de facteurs environnementaux en interaction qui influencent les types et les moments des instabilités de pente, ainsi que leurs conditions de causalité et de déclenchement.

Le terme mouvements de terrain regroupe plusieurs types de phénomènes bien différents : les affaissements et les effondrements liés aux cavités souterraines, les éboulements et les chutes de pierres et de blocs, les glissements de terrain ; le retrait-gonflement des sols argileux.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Les glissements de terrain sont subdivisés en zones de départ, de transport et d'accumulation (Bachinyaga Mugisho, 2024) :

- Une partie supérieure où le mouvement commence, souvent caractérisée par une rupture abrupte est appelée zone de départ ;
- Une partie intermédiaire où la masse en mouvement se déplace le long de la pente est appelée zone de transport ;
- Une partie inférieure où les matériaux déplacés s'accumulent s'appelle zone d'accumulation.

Varnes, 1978 a élaboré un bloc diagramme idéal mettant en exergue les caractéristiques d'un glissement de terrain complexe. On y observe une surface de rupture très nette le long de laquelle les matériaux impliqués dans le glissement de terrain se déplacent au-dessus de matériaux que le phénomène n'affecte pas.

Le diagramme montre également que la surface de rupture s'étend sur une profondeur considérable de sorte qu'un glissement de terrain ne saurait être considéré comme un phénomène superficiel (Pireh et al., 2025). Ils ont trois parties principales, la tête comprenant l'escarpement principal, le corps ou la masse déplacée et le pied (Figure 2).

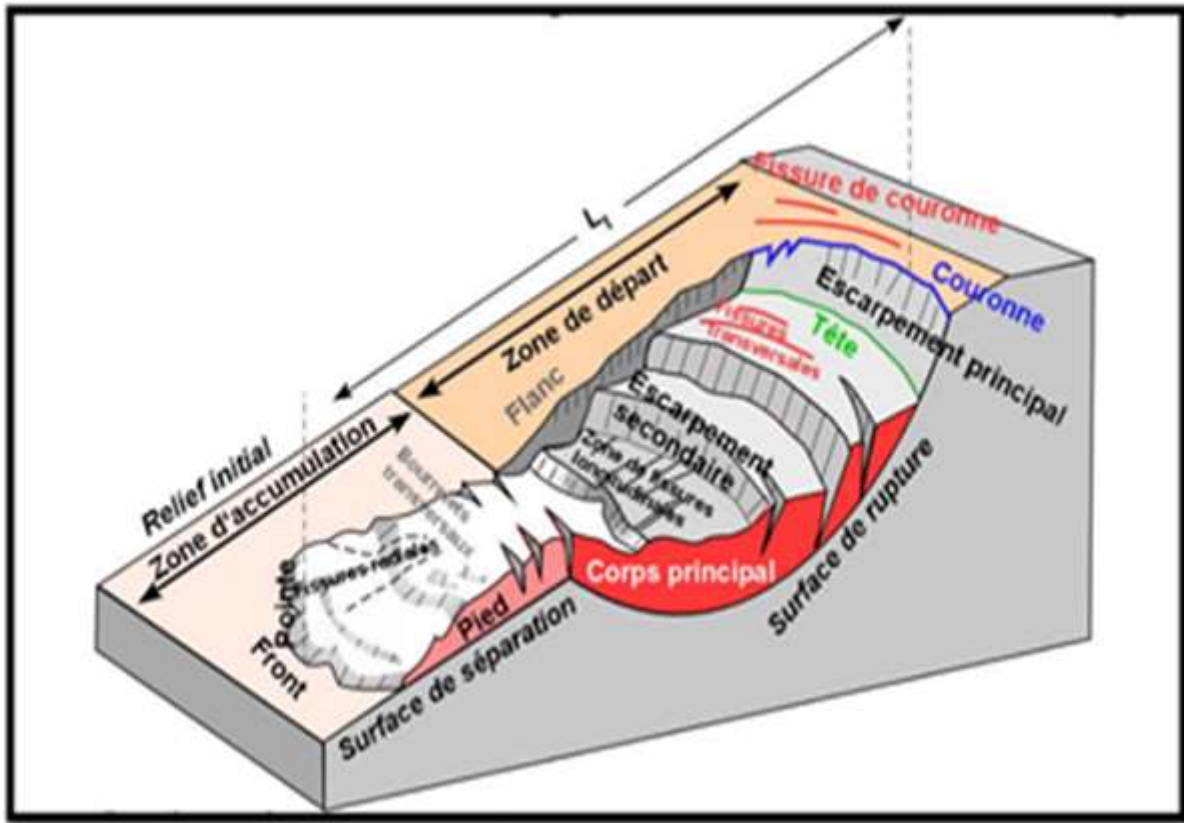


Figure 2: Schéma illustratif d'un glissement de terrain idéalisé

Les mouvements de terrain peuvent être classés en plusieurs types en fonction des matériaux déplacés et de mécanismes de mouvements (Bachinyaga Mugisho, 2024).

Cette classification est en anglais et parfois difficile même de trouver des termes équivalents en français. Ainsi, la traduction peut s'avérer, compliqué et authentique les termes clés de cette classification seront mis entre parenthèses.

Les différents types de mouvements de masse, on distingue :

- Les mouvements de terrain rotationnel et translationnel (rotational and translational slides) ;
- Les éboulements (earth/debris falls) et les chutes de roches / blocs (rockfalls) ;
- Les fauchages (topples) ;
- Les effondrements et étalements latéraux (lateral spreads) ;
- Les coulées de terre lentes (earthflows si très lents), coulées des débris (debris flows), coulées volcaniques (lahars) et les avalanches (debris avalanches) ;

- Les glissements complexes ou mixtes relevant de la combinaison de deux ou plusieurs mouvements (par exemple les flowslides, slide-earthflows)

I.1.6.1.1.1. Glissement rotationnel ou circulaire

C'est un glissement avec une surface de rupture concave. Il s'agit d'une glissière dans laquelle la surface de rupture est courbée de manière concave vers le haut et le mouvement de glissement est approximativement rotatif autour d'un axe parallèle à la surface du sol et transversal à la glissière. Le mouvement est plus ou moins rotationnel d'un axe parallèle aux courbes de niveaux. La masse se déplace en général de manière cohérente le long d'une surface de rupture avec une certaine déformation interne. La partie en amont se déplace verticalement en laissant une surface de rupture appelée escarpement et la masse déplacée tend à remonter (Figure 3 A).

I.1.6.1.1.2. Glissement translationnel ou plan

Dans le cas des glissements plan ou translationnel, la surface de glissement est plane. Des couches ou des ensembles de couches de terrain se mettent en mouvement le long d'une couche plus faible ou d'une discontinuité lithologique ou structurale et on rencontre ce type de glissement dans les sols meubles reposant sur un substratum (Mouffok, 2014).

Ce type de glissement se produit lorsque le massif en pente est constitué des meubles reposant sur un substratum ou encore lorsque la longueur de la surface de rupture potentielle est très grande par rapport à l'épaisseur du terrain. La taille de tel glissement est très variable et peut comprendre des surfaces allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres carrés. Les formations schisteuses et les gneiss sont sujets à ce genre de glissements (Figure 3 B).

I.1.6.1.1.3. Coulées de boues ou des débris

Les glissements de type écoulement (flow-like landslides) constituent un risque naturel majeur dans la plupart des zones de montagne. Ce terme générique regroupe un ensemble de phénomènes variés (glissement-coulée, coulée de débris, lave de lave) qui peuvent s'enchaîner dans le temps ; leur trait commun caractéristique est le transport en masse d'un mélange très concentré d'eau et de particules solides (Pireh et al., 2025).

Les coulées boueuses sont des phénomènes très rapides affectant des masses de matériaux remaniés, soumis à de forte concentration en eau sur de faibles épaisseurs généralement (0-5

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

m). En fait, la coulée boueuse a eu lieu dans les terrains meubles, et la teneur en eau au moment du déclenchement est supérieure à celle des glissements.

Ce type de phénomène est caractérisé par un fort remaniement des masses déplacées, une cinématique rapide et une propagation importante. La coulée de boues s'avance plus rapidement vers l'aval et ses conséquences peuvent être dévastatrices (Figure 3 H).

I.1.6.1.1.4. Reptation ou creeping

Il s'agit d'un déplacement progressif superficiel du sol et des roches altérées, suivant la pente. La reptation se fait surtout sentir en période humide. Les petits mouvements verticaux que le sol subit à la suite de la succession d'humidification et de dessiccation des minéraux d'argiles ou du gel et dégel de l'eau présente, en sont la cause principale. Après gonflement sous l'action de l'humidification, le fragment d'argile, lorsqu'il sèche retombe à la verticale. Ce mouvement est parfois si lent qu'il faut plusieurs années pour s'en apercevoir. Les poteaux électriques et arbres sont inclinés. Ce mouvement correspond à des faibles vitesses gravitationnelles qui induisent à glissements de creep (Figure 3 I).

I.1.6.1.1.5. Affaissements

Les affaissements correspondent à un phénomène progressif et lent. Ils sont des dépressions topographiques en forme de cuvette plus ou moins profonde dues au fléchissement lent et progressif des terrains de couverture, avec ou sans fractures ouvertes, consécutif à l'évolution d'une cavité souterraine. Il n'y a pas de rupture en surface. Ils marquent l'aboutissement d'une déformation souple, correspondant au réarrangement continu des matériaux éboulés du sous-sol et à la résorption des vides. Des efforts de flexion, de traction, de cisaillement et des tassements différentiels peuvent se manifester dans les zones de bordure. Dans certains cas, les affaissements peuvent être le signe annonciateur d'effondrements.

I.1.6.1.1.6. Effondrements

Les effondrements se produisent de façon brutale. Ils résultent de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine, rupture qui se propage jusqu'en surface de manière plus ou moins brutale, et qui détermine l'ouverture d'une excavation grossièrement cylindrique. Les dimensions de cette excavation dépendent des conditions géologiques, de la taille et de la profondeur de la cavité ainsi que du mode de rupture (Figure 3 J).

I.1.6.1.1.7. Eboulements

Les éboulements sont dus à l'action mécanique s'exerçant sur une pente forte. Ceux-ci sont très fréquents en montagnes et dans les très fortes pentes. Ils conduisent immédiatement au détachement immédiat de bloc et à leur chute sur la pente. Ils sont favorisés par certaines structures de roches (plans de stratification, diaclases) et par certaines conditions climatiques.

Les distances parcourues sont fonction de la position de la zone de départ dans le versant, de la pente du versant, de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la nature de la couverture superficielle, de la végétation, etc. (Figure 3 D).

I.1.6.1.1.8. Affouillements

Ils désignent une érosion par la base provoquée par un cours d'eau. Ils se produisent dans le lit de la rivière et se traduisent par un approfondissement local au niveau de la berge ou dans le lit mineur.

I.1.6.1.1.9. Glissement complexe

C'est une combinaison de deux ou plusieurs types de mouvements de terrain (Novotný, 1978). Il se définit également comme un glissement avec plusieurs typologies par exemple à composante rotationnel et plane, à affaissement et effondrement, éboulement qui induisant une coulée de boue (Figure 3 C).

I.1.6.1.1.10. Erosion en nappe

Le sol est une mince couche (0,1 à plus de 10 m d'épaisseur) de matériaux meubles qui recouvrent le noyau rocheux de la Terre (Nahimana, 2019). L'érosion en nappe est une forme complexe du mouvement de masse. C'est un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité (Warda & El Houda, 2017).

L'érosion en nappe se caractérise par le détachement et le transport des matériaux rocheux de son emplacement d'origine par les différents agents. En d'autres termes, c'est une érosion hydrique.

L'érosion hydrique est un phénomène grave qui touche la quasi-totalité des terres agricoles. Les activités humaines qui accompagnent le développement ont accéléré la dégradation des couvertures végétales et pédologiques, la fertilité naturelle des sols, le réseau hydrographique et le microclimat augmentant ainsi le ruissellement (Roose et al., 2001).

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

C'est un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité. Les problèmes d'érosion sont fréquents en Afrique, mais l'importance relative des différents processus varie d'une région à l'autre (Roose et al., 2001).

En montagne, la dégradation des sols a pour principale origine la concentration du ruissellement qui entraîne la migration des particules terreuses après destruction de la structure de l'horizon superficiel et un entraînement sélectif des éléments nutritifs, des colloïdes organiques et minéraux (Chebbani et al., 1999).

I.1.6.1.1.11. Avalanches des débris ou de roches

Les avalanches (Figure 3 G) sont essentiellement de grandes coulées de débris extrêmement rapides, souvent à pente ouverte, qui se forment lorsqu'une pente instable s'effondre et que les débris fragmentés qui en résultent sont rapidement évacués de la pente.

Dans certains cas, la neige et la glace contribuent au mouvement s'il y a suffisamment d'eau, et l'écoulement peut évoluer en une coulée de débris (debris flows, Figure 3 F). Ils se produisent dans le monde entier dans des environnements accidentés. Certaines avalanches peuvent transporter de matériaux sur de grandes distances de leur source. Rapide à extrêmement rapide, les avalanches peuvent mobiliser les débris à une vitesse de près de 100 m/s.

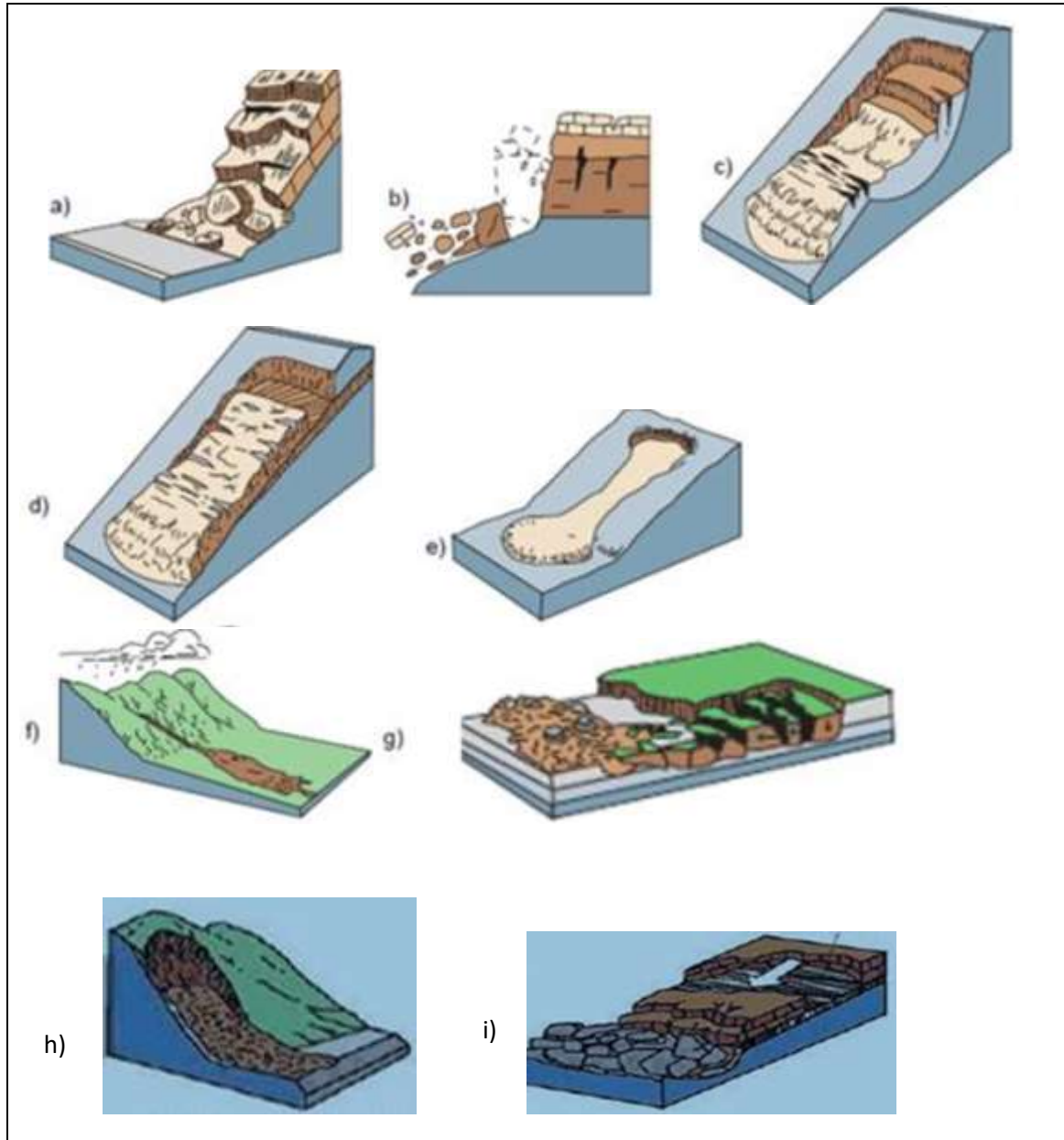


Figure 3: Illustration schématique des principaux types de mouvement de terrain

a) Eboulement, b) Chutes de pierres ou de blocs, c) Glissement rotationnel ou circulaire, d) Glissement translationnel ou plan, e) Coulée de débris, f) Coulée boueuse, g) Reptation ou creep, h) Coulée de terrain, i) Affaissement (Varnes, 1978)

I.1.6.1.2. Classification de mouvements de terrain

Selon Varnes (1978), les glissements de terrain sont des processus liés à la gravité qui se caractérisent par des descentes de masses de roche, de terre ou de débris le long d'une surface de rupture.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Le tableau 1 montre la classification de Varnes (1978) qui est la plus utilisée car il est à caractère principalement géologique et distingue les principales familles de mouvements de terrain en fonction de la nature des matériaux en cause et du type de mécanisme de déformation et de rupture.

Tableau 1: Classification des glissements de terrain (Varnes, 1978)

Type de mouvement			Type de matériau		
			Roche	Sols	
				Grossiers	Fins
Chutes			Ecroulement rocheux (<i>Rock fall</i>)	Ecroulement de débris (<i>Debris fall</i>)	Ecroulement de terrain (<i>Earth fall</i>)
Basculements			Basculements rocheux	Basculements de débris	Basculements de terrain
Glissements	Rotation	Peu d'unités	Affaissement rocheux	Affaissement de débris : <i>Debris slump</i>	Affaissement de terrain
			Masse rocheuse en glissement (<i>Rock block slide</i>)	Débris en glissement (<i>Debris block slide</i>)	Terrain en glissement
	Translation	Unités multiples	Glissement rocheux (<i>Rock slide</i>)	Glissement de débris (<i>Debris slide</i>)	Glissement de terrain (<i>Earth slide</i>)
Etalements latéraux			Etalement de roche (<i>Rock spread</i>)	Etalement de débris (<i>Debris spread</i>)	Etalement de terrain (<i>Earth spread</i>)
Ecoulements			Avalanche de roches (<i>Rock flow</i>)	Lave torrentielle (<i>Debris flow</i>)	Coulée de terrain (<i>Earth flow</i>)
Complexes			Combinaison de deux ou plusieurs types de mouvements principaux		

La mise à jour de la classification de Varnes qui est la plus récente. Elle est résumée en 29 types de mouvements de terrain. Cette classification associe la forme de rupture et la nature des matériaux déplacés ou mobilisés (Tableau 2).

Tableau 2: Types de glissements de terrain en fonction du type de mouvement et des matériaux déplacés (définitions de Varnes (1978)) actualisées par (Hungr et al., 2014)

Type	Rock	Debris	Earth
Fall	1. Rock fall	2. Debris fall	3. Earth fall
Topple	4. Rock topple	5. Debris topple	6. Earth topple
Rotational slides	7. Rockslide	Debris slide	9. Earth slide
Translational slide	10. Bloc slide	11. Debris slide	12. Earth slide
Lateral spreads	13. Rock spread	-	14. Earth spreads
Flow	15. Rock creep	16. Talus flow	17. Dry sand flow
		18. Debris flow	19. Wet sand flow
		20. Debris avalanches	21. Quick clay flow
		22. Solifluxion	23. Earth Flow
		24. Soil creep	25. Rapid earth flow
			23. Loess flow
Complex	27. Rockslide-debris, avalanche	28. Cambering, valley bulging	29. Earth slide-earthflow

I.1.6.1.3. La classification des mouvements de terrain selon la profondeur

Les glissements peuvent être classés selon la profondeur estimée de la surface de glissement. Lors de l'évaluation du danger potentiel que représente un glissement, on ne doit pas seulement considérer le volume du glissement. Il faut aussi tenir compte des mouvements différentiels qui se manifestent et qui peuvent conduire au basculement des bâtiments ou à la formation de fissures (Tableau 3).

Tableau 3: Classification selon la profondeur de la surface de glissement (Abderrahim, 2014)

Glissement	Surface de glissement
Superficiel	0 à 2 m
Semi profond	2 à 10 m
Profond	> 10 m

I.1.6.2. Facteurs de glissement de terrain

L'origine des mouvements de terrain est complexe et dépend rarement d'une seule cause. La géologie, le relief, la pente et l'exposition sont des paramètres fondamentaux qui déterminent la prédisposition générale du terrain aux phénomènes d'instabilités. Dans l'occurrence des glissements de terrain, il existe des facteurs de prédisposition, des facteurs préparatoires et des facteurs déclencheurs. Les causes de glissements de terrain sont multiples et sont naturelles mais peuvent aussi être provoquées par des conséquences d'interventions humaines.

I.1.6.2.1. Facteurs de prédispositions

Liés à la nature même, ils sont appelés aussi des facteurs statiques. Ce sont les facteurs comme la topographie, la lithologie, la pédologie et la pesanteur.

I.1.6.2.1.1. Topographie

C'est essentiellement la pente qui compte, mais on peut lui ajouter l'altitude quelques fois. La pente est l'inclinaison de la surface. Elle affecte la vitesse de ruissellement et le taux d'infiltration d'eau de pluie (Baga Wendzoodo, 2023). La pente détermine les cibles potentielles des glissements de terrain, ces derniers pouvant se produire sur des pentes modérées à raides, d'une déclivité de 10 à 40 degrés généralement. L'altitude quant à elle augmente dans bien des cas le risque d'occurrence des mouvements de terrain. Ceci a lieu dans les reliefs accidentés où l'élévation en altitude se poursuit avec l'aggravation de la pente (Sindayihebura, 2015).

I.1.6.2.1.2. Lithologie

La nature des roches des Mirwa, classées généralement dans la catégorie des roches précambriennes en milieu tropical chaud et humide favorise la généralisation des mouvements de terrain, comme les glissements de terrain, les éboulements, les effondrements, etc...(Sabushimike, 2015). Les roches précambriennes sont constituées par un ensemble des roches métamorphiques, des intrusions granitiques, des intrusions basiques, des gneiss et le complexe de Buhonga (granites, quartzites et des schistes) et favorisant les mouvements de masse (les glissements de terrain, éboulements, effondrements, érosion hydrique, fissures de terrain).

Les glissements de terrain résultent de la rupture de l'équilibre entre les forces agissant sur une pente, qui à leur tour dépendent de la lithologie et de la structure des types de roches. Le type des matériaux en place ainsi que leur structure déterminent la force de résistance.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

La géologie des terrains conditionne le déroulement des mouvements de masse. Dans les mêmes conditions, les roches dures résistent plus tandis les roches tendres sont plus fragiles aux glissements de terrain.

I.1.6.2.1.3. Pédologie

Le type de sol et sa profondeur contribuent également dans l'occurrence ou non des mouvements gravitaires d'une région donnée. Les principaux glissements s'observent dans des sols argileux. Cependant, les sols à tendance sableux constituent des terrains plus stables face aux risques de mouvements gravitaires.

I.1.6.2.2. Facteurs préparatoires

Avant tout mouvement, il existe un état d'équilibre entre les différentes forces qui en sont responsables. Les causes de ces mouvements doivent donc être recherchées dans les variations de ces forces qui peuvent être modifiées par des facteurs naturels ou anthropiques (Martins-Campina, 2005).

Les facteurs préparatoires sont appelés aussi les facteurs dynamiques et sont considérés comme les moteurs de l'évolution temporelle menant vers le déclenchement des mouvements de versants. L'altération, le changement climatique, le soulèvement tectonique, l'érosion, la déforestation et les activités humaines sont les facteurs dynamiques des mouvements de masse.

I.1.6.2.3. Facteurs déclencheurs

Dans la plupart des cas de glissements de terrain, l'eau est un facteur déclencheur, mais aussi l'activité humaine, et moins fréquemment les séismes (Locat & Leroueil, 2019). L'eau a plusieurs aspects dans le déclenchement des glissements de terrain. Les glissements de terrains, ainsi que les éboulements sont déclenchés par la forte pluviométrie et renforcés par l'érosion qui augmente encore le risque de catastrophe. L'érosion entraîne aussi le ravinement (République du Burundi, 2018)

Les venues d'eaux dans la nature peuvent être d'origine pluviale ou souterraine. Les eaux pluviales peuvent provoquer une érosion de surface et des infiltrations rejoignant les eaux souterraines. Des précipitations efficaces, cumulées et élevées sur de longues périodes engendrent une augmentation progressive des pressions interstitielles à laquelle les argiles au

niveau de la surface de glissement réagissent en se déformant selon leur comportement dilatant (Guirous et al., 2014).

I.2. Présentation de la zone d'étude

I.2.1. Localisation de la zone d'étude

Situé en Afrique orientale et à l'Est du Lac Tanganyika, le bassin de la rivière Gikoma se trouve à l'Ouest du Burundi dans une partie de la plaine de l'Imbo et des contreforts de Mirwa. Cette zone d'étude se localise en Afrique sub-saharienne dans la région du rift Est Africain et couvre une partie de la ville de Bujumbura.

La partie occidentale du bassin versant de la rivière Gikoma est située aux coordonnées géographiques : longitude (29,423458°), latitude (-3,321036°), limitée à l'Est par les contreforts des Mirwa de la Crête Congo-Nil surplombant la ville de Bujumbura en commune Isare aux coordonnées géographiques : longitude (29,472711°), latitude (-3,359318°). La variation altitudinale de la zone d'étude est comprise entre 914 m en aval et 2040 m en amont.

Pour délimiter le bassin versant de la rivière Gikoma, nous avons utilisé le MNT avec 10 m de résolution. La zone d'étude s'étend de l'exutoire vers la partie des contreforts de Mirwa. Cette zone est sujette à des risques de mouvements de terrain.

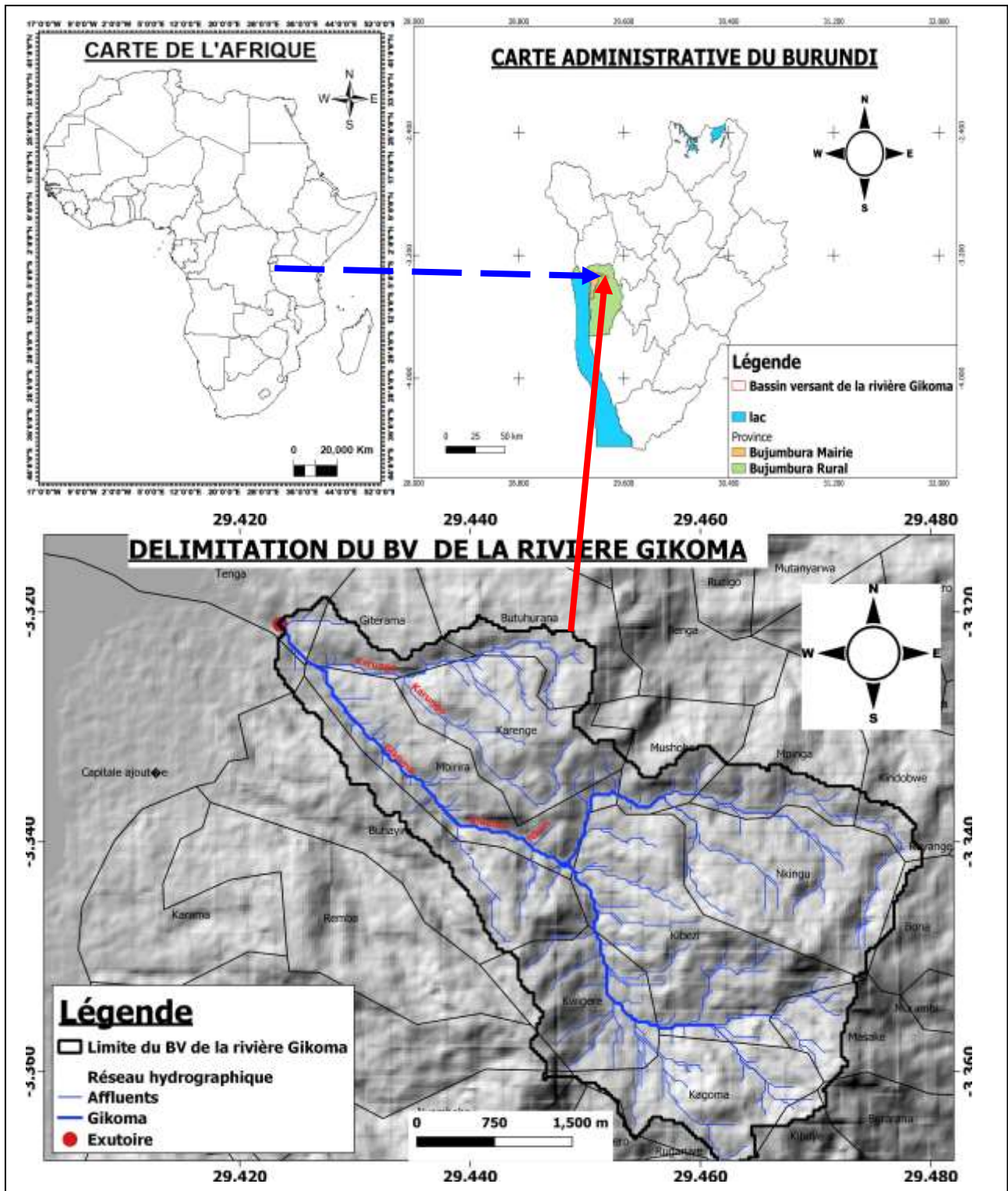


Figure 4: Localisation de la zone d'étude

I.2.2. Description de la zone d'étude**I.2.2.1. Climat**

La zone d'étude s'étend sur les contreforts de Mirwa et une petite partie de la plaine de l'Imbo, le climat de la zone d'étude est tropical humide de montagne influencé par l'altitude qui varie entre 914 m et 2040 m.

Les données climatologiques utilisées dans cette étude proviennent deux stations à savoir la station météorologique de Bujumbura-Aéroport et celle de Bugarama.

I.2.2.2. Précipitations

Les précipitations élevées favorisent l'altération rapide des roches et la rupture de pente dans la région des Mirwa. Les Mirwa sont les sièges des fortes précipitations pendant la période pluvieuse. Les précipitations moyennes annuelles varient entre 1100 mm à 1800 mm/an.

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 4 et 5 montrent que les données des précipitations enregistrées par la station Bujumbura-Aéroport et celle de Bugarama sur une période allant de 1990 à 2024.

Tableau 4: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bugarama (1990 à 2024)

Mois	J	F	M	A	M	J	J ^t	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 5: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Bujumbura (1990 à 2024)

Mois	J	F	M	A	M	J	J ^t	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

Les précipitations moyennes annuelles ont été de 1436,8 mm à la station de Bugarama, alors qu'à la station de Bujumbura, elles sont de 723,8 mm. Les données fournies par l'IGEBU pour les stations de Bugarama et Bujumbura-Aéroport montrent qu'il y a une grande différence de hauteur moyenne pluviométrique annuelle.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

La figure 5 montre que les mois de Novembre et Avril sont les plus pluvieux et leurs moyennes mensuelles correspondent respectivement à 189,4 et 203,1 mm dans la partie amont de la zone d'étude. Les précipitations abondantes dans les contreforts de Mirwa sont la cause principale des réactions des mouvements de terrain du bassin versant de la rivière Gikoma. Elles contribuent de façon importante aux glissements de terrain dans les contreforts de Mirwa et aux inondations dans la plaine de l'Imbo.

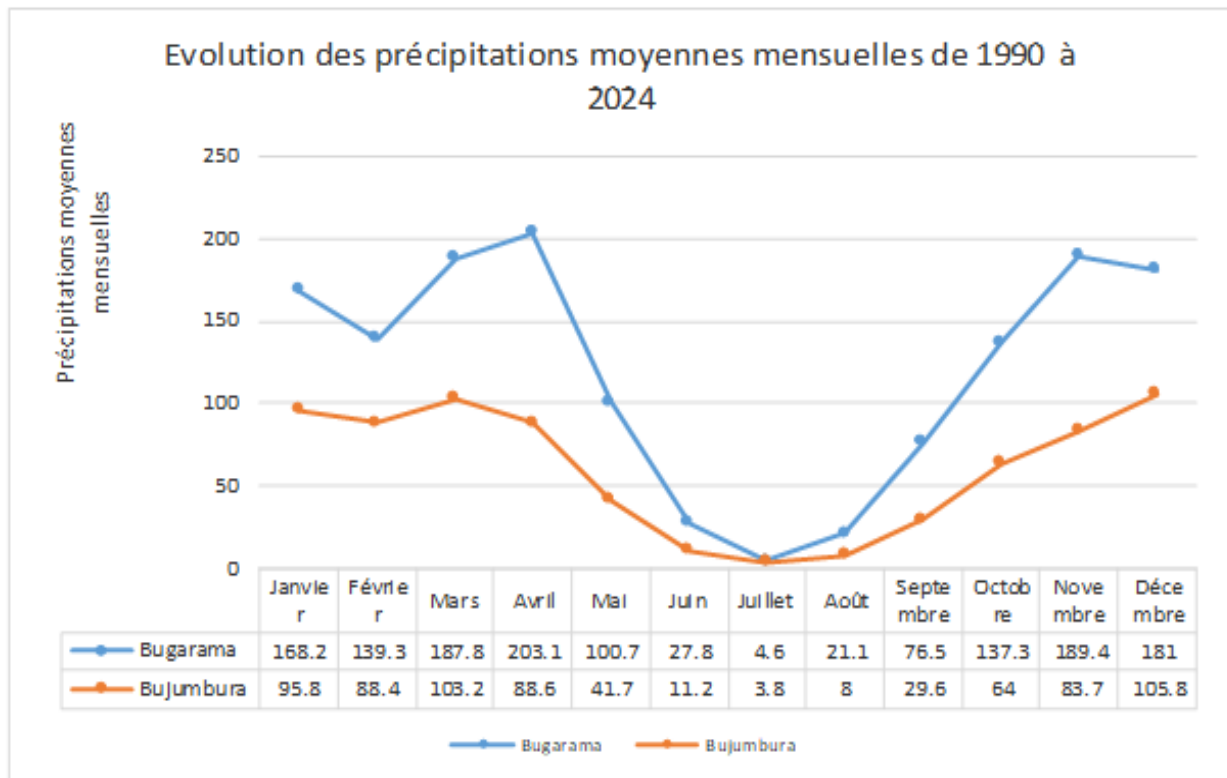


Figure 5: Courbe d'évolution des précipitations moyennes mensuelles (1990 à 2024)

I.2.2.3. Températures

Les données obtenues auprès de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) sur les deux stations respectives Bugarama et Bujumbura-Aéroport ne contiennent pas les données des températures.

Dans la plaine de l'Imbo, les températures maximales peuvent dépasser 30°C. Les variations de température sont fonctions de l'altitude (Hakiza, 2002). La température moyenne annuelle est supérieure à 23°C (Kabanyegeye et al., 2021).

I.2.2.4. Lithologie de la zone d'étude

La stabilité des pentes est affectée par les processus d'altération et par la fluctuation de la nappe phréatique (Kubwimana et al., 2018). Les mouvements de terrain constituent un élément important dans la dégradation du milieu naturel. La zone faisant l'objet de ce travail est caractérisée par une topographie très accidentée liée au phénomène de rifting avec la présence des failles. D'après les données trouvées sur la carte géologique du Burundi, feuille Bujumbura, les principales formations géologiques rencontrées sont constituées par des schistes, quartzites et des granites (Figure 6).

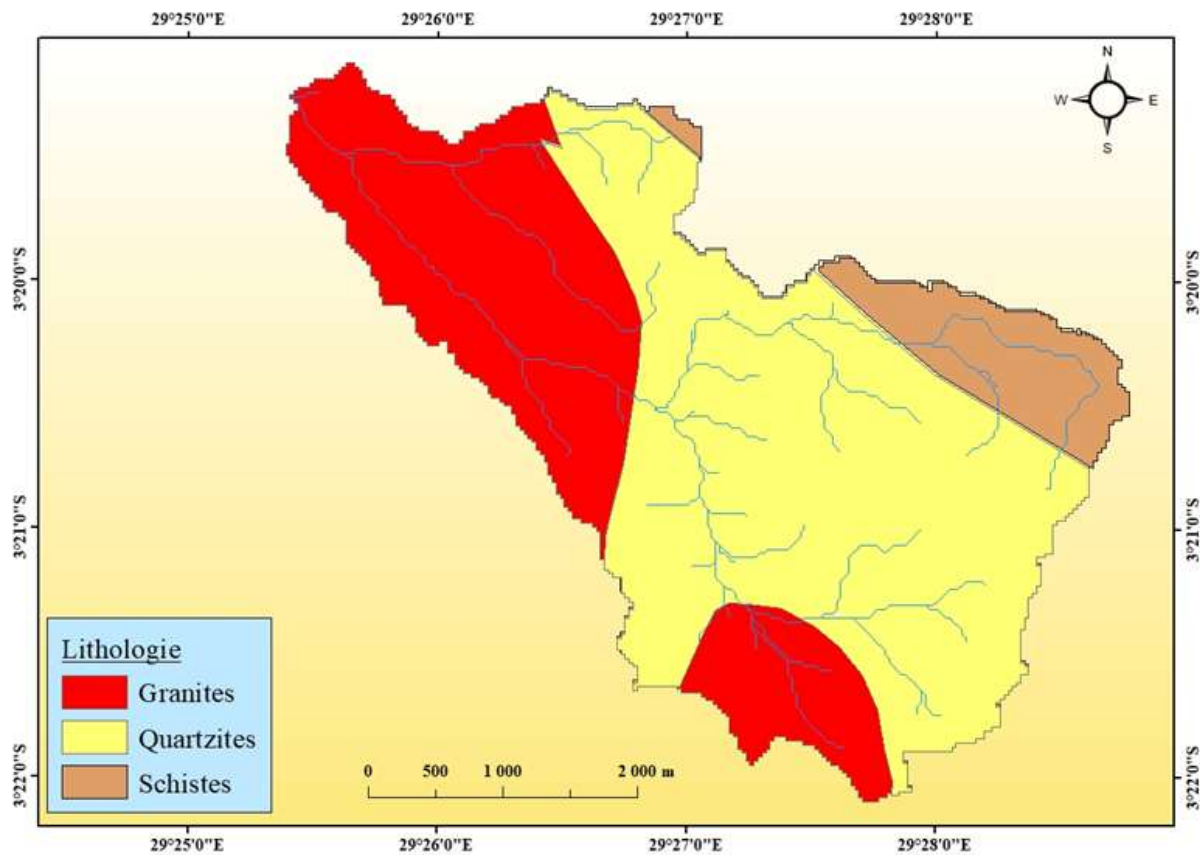


Figure 6: Carte de la lithologie du bassin versant de la rivière Gikoma (A partir de la carte géologique, feuille de Bujumbura)

I.2.2.5. Relief et morphologie du bassin versant de la rivière Gikoma**I.2.2.5.1. Relief**

La notion du relief joue un rôle très prépondérant, dans la mesure où il commande l'écoulement des eaux. Le profil en long du Mirwa vers l'Imbo est concave, la pente est plus forte vers le haut (Mirwa) et faible vers l'aval (Imbo).

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Cette situation lui confère une topographie aux pentes abruptes avec des écoulements torrentiels, depuis les hautes montagnes qui forment la Crête Congo-Nil vers la plaine de l'Imbo aux pentes très faibles.

Le relief dans notre zone de travail se subdivise en deux parties :

- Les Mirwa localisés dans la partie amont qui est le siège des fortes précipitations pendant la période pluvieuse ;
- La plaine localisée est dans la zone basse à faibles précipitations.

Ainsi donc, l'importance de la pente va permettre le développement de certains types de glissements :

- Dans la zone de plaine caractérisée par une pente faible, on assiste à des phénomènes de fluages ou de solifluxion ;
- Les zones de pente moyenne à forte sont susceptibles à des glissements et des éboulements.

I.2.2.5.2. Géomorphologie

Les reliefs de Bujumbura sont caractérisés par un relief très accidenté. Plus à l'Ouest, les reliefs sont marqués par des altitudes faibles correspondant à la plaine de l'Imbo où se trouve la ville de Bujumbura. Les altitudes sont élevées à l'Est des collines de Mumirwa et une partie de la Crête Congo Nil située dans la région naturelle de Mugamba (Kubwimana, 2022).

Notre zone d'étude connaît une géomorphologie variable (Figure 7) :

- La géomorphologie de la plaine à pente faible ;
- La géomorphologie du piémont à pente moyenne ;
- La géomorphologie du Mirwa à pente forte.

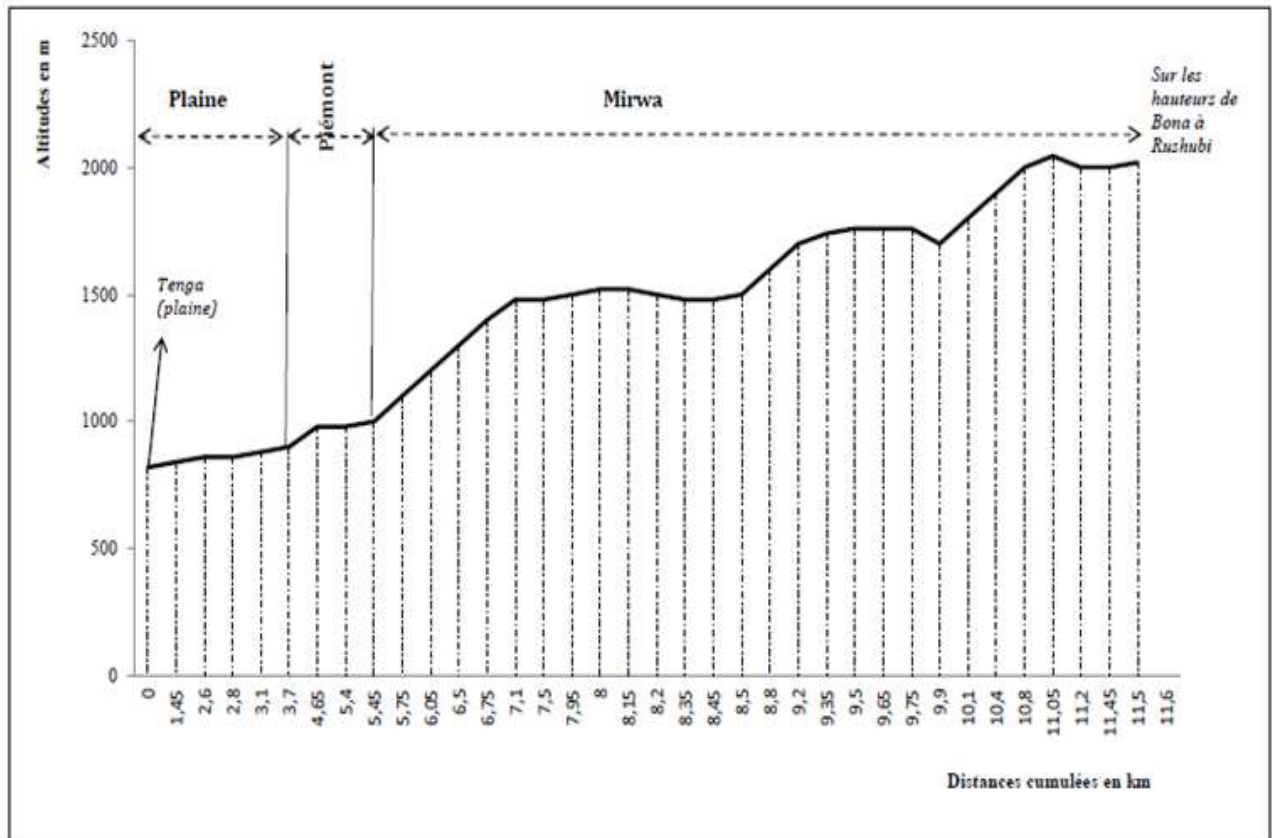


Figure 7: Profil topographique du bassin versant de la rivière Gikoma (Sindayihebura, 2015)

I.2.2.5.2.1. Zone des Mirwa

Bordant à l'Est les basses terres de l'Imbo et dominant au sud le lac Tanganyika, le relief de cette zone est très marqué avec des pentes variant de 70 % à plus de 100 %. Ce sont d'abrupts versants très disséqués allant de la plaine de l'Imbo à la Crête Congo-Nil (Ndikubwayo, 2019).

Les pentes des Mirwa ont des vallées très encaissées en forme de V. Cette zone haute des Mirwa est approximativement localisée à une altitude comprise entre 1500 m à 2040 m. le relief de cette zone est remarquable à Kagoma, Masake et Kindobwe. Elle est le siège des fortes précipitations pendant la période pluvieuse. Elle est caractérisée par des pentes fortes.

I.2.2.5.2.2. Zone moyenne des Mirwa

Il apparaît comme le prolongement et/ou l'atténuation de la pente des Mirwa avant leur retombée sur la plaine de l'Imbo. Dans le bassin versant, qui nous concerne, le relief de piémont est remarquable à Kwigere, Buhayira et Mbirira. L'altitude est comprise entre 1000 m et les environs de 1300 m, à partir desquels les pentes se redressent brusquement sur les contreforts.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Cette géomorphologie est caractérisée par des mouvements de masse tout au long de la rivière Gikoma. Cette rivière s'écoule dans la plaine de la Rusizi en contrebas après avoir traversée des roches précambriennes altérées.

I.2.2.5.2.3. Plaine

La plaine de l'Imbo est comprise entre 774 m et 1000 m d'altitude. Dans le bassin versant de la rivière Gikoma, l'altitude varie entre 914 m et 1000 m. Elle est caractérisée par une pente faible de 0 à 12%. De l'Ouest à l'Est, le bassin versant de la rivière Gikoma augmente en altitude (Figure 8).

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

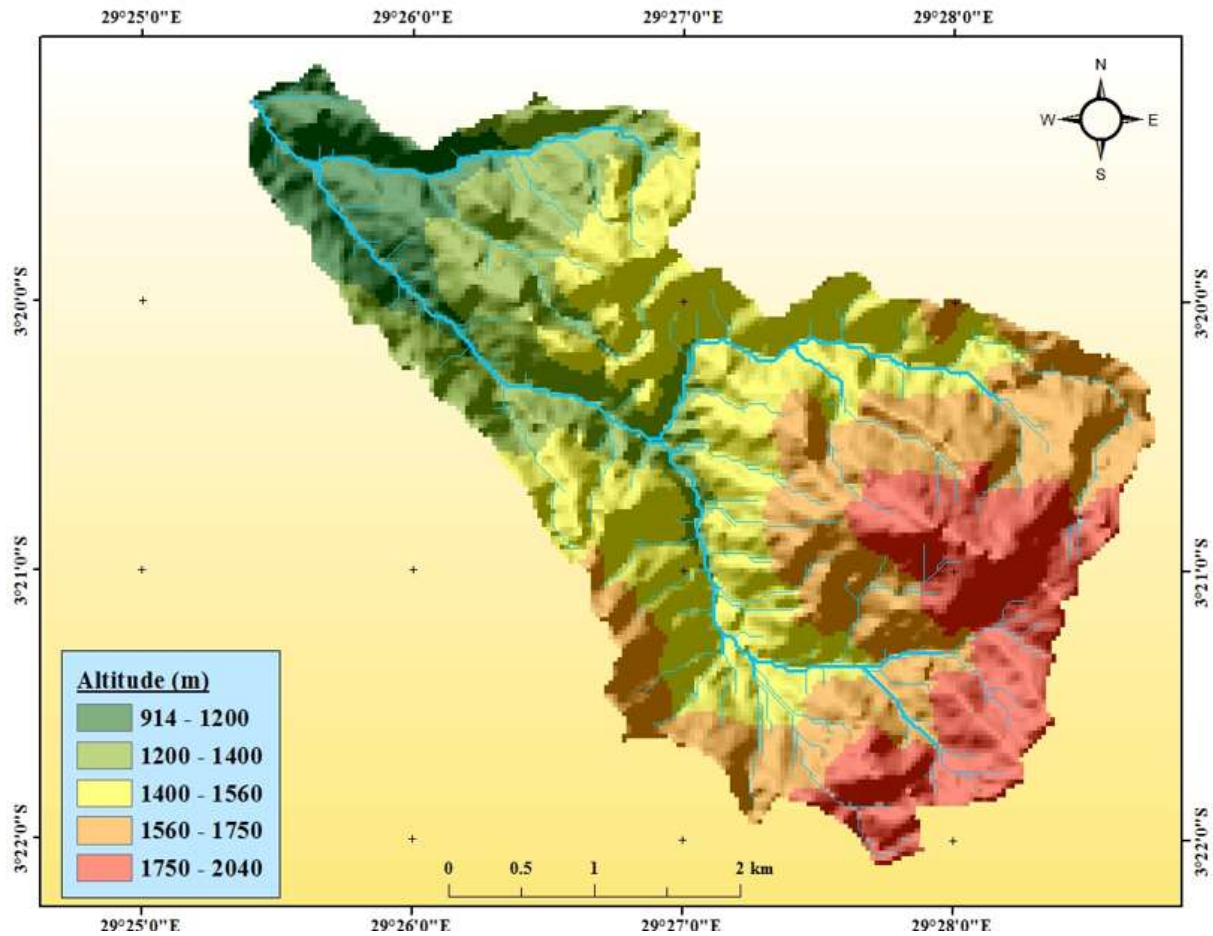


Figure 8: Carte hypsométrique du bassin versant de la rivière Gikoma

1.2.2.5.3. Densité de drainage

La densité de drainage est définie comme étant le rapport de la longueur totale des canaux du bassin versant à la superficie totale du bassin. Or, la densité de drainage est le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la surface du bassin versant. En général, l'eau joue un rôle crucial dans les glissements de terrain en produisant une pression hydrostatique dans les vides (pressions interstitielles), les fractures et les failles du sol et de la roche, ainsi qu'en raison des forces de percolation. Par ailleurs, elle peut provoquer le gonflement des minéraux argileux.

La densité du réseau hydrographique est un critère important pour l'étude des glissements de terrain. L'effet de l'eau sur les instabilités des terrains est fonction de la densité de drainage.

Les zones à forte densité de drainage sont des zones à haut risque de glissement de terrain. Dans notre zone d'étude, la densité de drainage est très forte dans partie amont à Kibezi et

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Kwigere. Elle est également une zone qui se caractérise par des fortes précipitations et des mouvements de terrain.

La figure 9 montre la répartition de 5 classes de densité de drainage suivantes : la classe de densité de drainage très faible varie de 0 à 4,91 m/km², la classe de densité de drainage faible varie de 4,92 à 9,82 m/km², la classe de densité de drainage modérée varie de 9,83 à 14,7 m/km², la classe de densité de drainage élevée varie de 14,8-19,6 m/km² et enfin la classe de densité de drainage très élevée varie de 19,7-24,5 m/km². Les zones de plus fortes densités du réseau hydrographique sont les plus probablement exposés aux mouvements de masse et inversement.

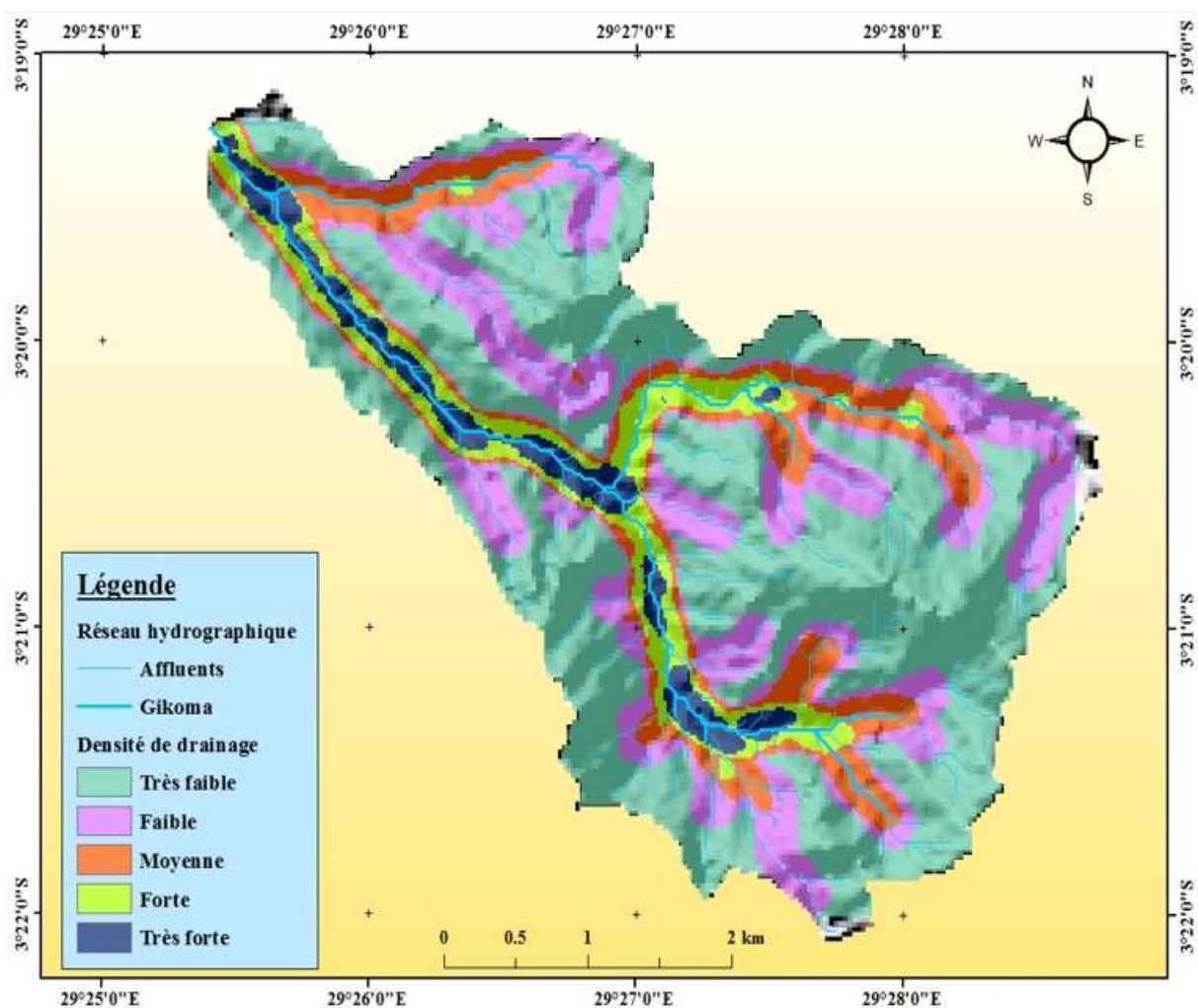


Figure 9: Carte de la densité du réseau de drainage

I.2.2.5.4. La nature pédologique

La zone d'étude est dominée par des sols provenant de l'altération des roches en place dans la partie de la région des Mirwa. Trois grands ensembles pédologiques couvrent la région des Mirwa à savoir :

- Des lithosols auxquels s'associent les affleurements rocheux ;
- Des lands qui caractérisent surtout les versants à pente forte ;
- Des sols ferralitiques sur les versants à pente moins raide, sur les replats et sur les sommets des collines qui forment l'essentiel des terres cultivées.

Ce sont souvent des sols immatures et contiennent beaucoup de minéraux argileux qui sont favorables aux glissements de terrain (Sindayihebura, 2005). La partie de la plaine est occupée par des dépôts fluvio-lacustres et des cônes alluviaux constitués des argiles et les sables. Les piémonts sont formés par des dépôts d'épandages. La figure 10 montre la carte pédologique de la zone d'étude est l'issu de l'extraction de la carte pédologique au 1/50000 (Feuille de Bujumbura). Les indices sont expliqués en bas :

- a01 : sols jaunes, bien drainés, limono-argilo-sableux ou limono-sableux, présentant une altération minimale et peu profonde ;
- a02 : sols jaunes ou rouges bien drainés limo-argilo-sableux présentant une altération avancée ou peu profonde ;
- a11 : sols jaunes, bien drainés, argileux, argilo-sableux ou limono-argileux, présentant une altération minimale et peu profonde ;
- a99 : prédominance d'affleurements des formations quartziques ;
- b10 : sols jaunes ou rouges bien drainés argileux ou argilo-sableux à limoneux présentant une altération modérée et moyennement profonde ;
- b12 : sols jaunes ou rouges, bien drainés, argileux, argilo-sableux à limoneux, présentant une altération modérée et moyennement profonde ;
- d20 : sols jaunes ou rouges, bien drainés, argileux ou argilo-sableux, présentant une altération avancée et profonde ;
- d220 : sols jaunes ou rouges bien drainés argileux lourds à limono-argileux présentant une altération avancée et profonde ;

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

- d222 : sols jaunes ou rouges, bien drainés, argileux, argilo-sableux à limoneux, présentant une altération avancée et profonde ;
- f10 : sols jaunes ou rouges, bien drainés, argileux lourd à limono-argileux, présentant une altération et profonde ;
- f20 : sols jaunes ou rouges bien drainés argileux ou argilo-sableux présentant une altération ultime et profonde ;
- f30 : sols jaunes ou rouges, bien drainés, argileux, argilo-sableux à limoneux, présentant une altération modérée et moyennement profonde ;
- gal10 : sols jaunes, bien drainés, argileux, présentant une altération minimale et peu profonde ;
- ha110 : sols jaunes biens drainés argileux-lourds ou très lourds, présentant une altération ultime et profonde ;
- ha111 : sols jaunes, biens drainés, argilo-sableux ou limono-argileux, présentant une altération modérée et moyennement profonde.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

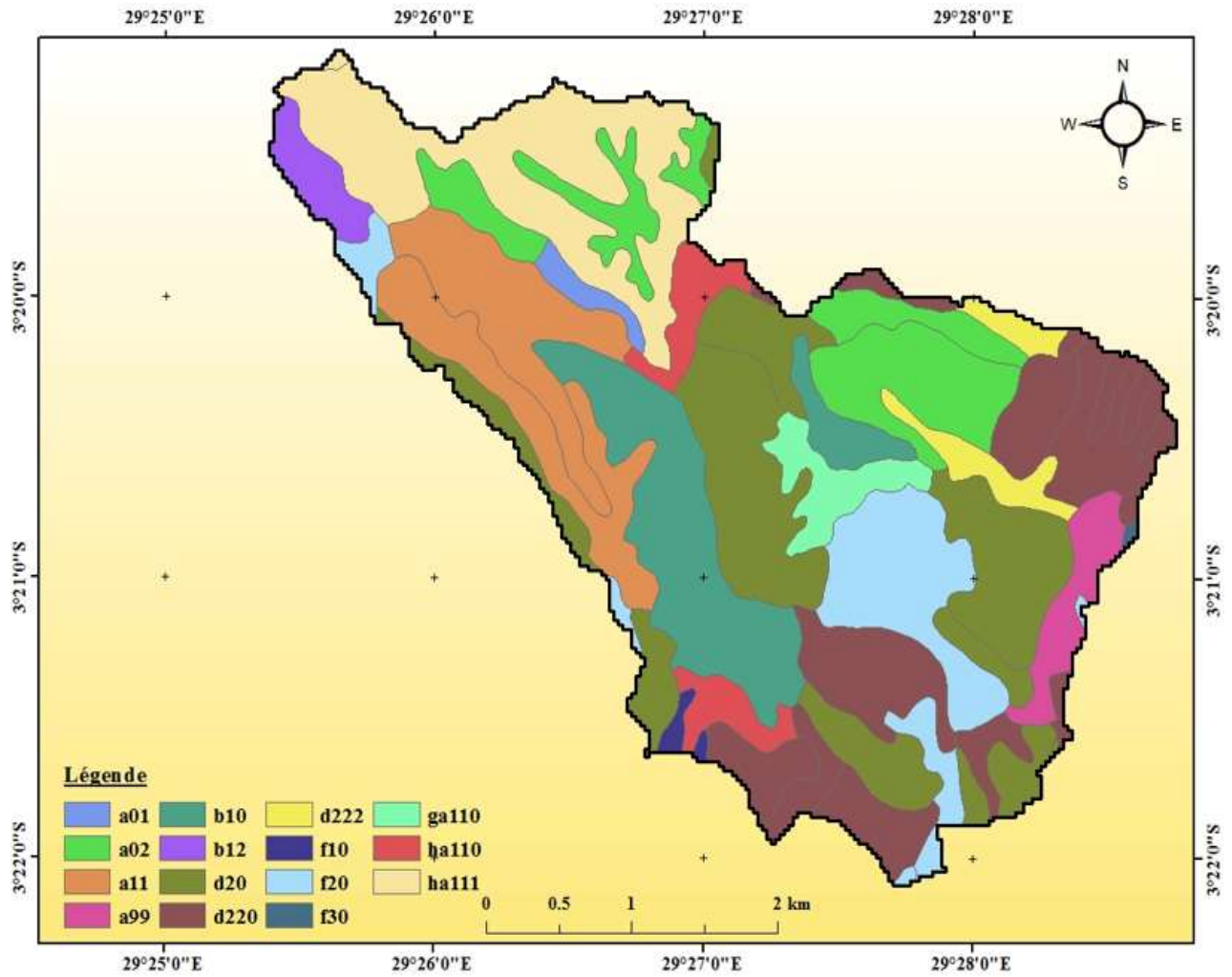


Figure 10: Carte pédologique du bassin versant de la rivière Gikoma

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

II.1. Matériels de collecte et de traitement des données

La réalisation du présent travail de recherche sur l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma a nécessité l'utilisation de divers matériels, tant pour la collecte des données de terrain que pour leur traitement et leur analyse. Ces outils ont permis d'assurer la fiabilité des informations recueillies et la cohérence des analyses spatiales et statistiques.

II.1.1. Matériels de collecte des données

La collecte des données sur le terrain a été effectuée à l'aide des équipements suivants :

- Système de positionnement global (GPS) : un GPS d'une précision de 5 mètres a été utilisé pour la localisation précise des phénomènes observés. Cet outil a permis d'enregistrer les coordonnées géographiques (latitude, longitude) ainsi que l'altitude des différentes instabilités de terrain identifiées.
- Appareil photo numérique : un appareil photo numérique de marque *Fujifilm* a servi à la prise de vues sur le terrain. Les photographies constituent un support essentiel pour l'illustration, la description et la validation des phénomènes environnementaux observés. Elles permettent également de conserver une trace visuelle de l'état des sites étudiés, nécessitant une présence physique à proximité des zones concernées.
- Bloc-notes de terrain : un carnet de terrain a été utilisé pour consigner les observations directes, les descriptions des sites, ainsi que toute information qualitative pertinente relative aux mouvements de terrain.

II.1.2. Matériels de traitement et analyse des données

- Un ordinateur a été utilisé pour le traitement, l'analyse et la mise en forme des données, à l'aide de plusieurs logiciels spécialisés, notamment ArcGIS 10.7.1 et QGIS 3.28.4 pour les analyses spatiales et cartographiques, Google Earth (GE) pour l'interprétation visuelle et la validation des observations, Microsoft Excel 2016 pour la gestion et l'organisation des bases de données, ainsi que IBM SPSS Statistics 25 pour les analyses statistiques.

- **Données satellitaires et aériennes utilisées**

Les données d'observation de la terre sont notamment les images satellitaires. Les images de Landsat 7, 8 et 9 avec des capteurs respectifs ETM+, OLI/TIRS ont été tirées du catalogue de l'explorateur de la Terre USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Dans les reliefs de Bujumbura comme d'autres régions de l'Afrique tropicale, il est difficile de trouver ces images sans couverture nuageuse. Nous avons utilisé les images prises le 28/01/2002, 20/08/2014 et 20/08/2024 qui n'avaient pas de nuages du moins au niveau de la zone d'étude.

De plus, à l'échelle de Bujumbura, plusieurs images sont floues à cause de la résolution spectrale faible mais celle utilisée permet de distinguer différentes signatures spectrales des objets au sol. La résolution la plus élevée est celle de la bande panchromatique avec 15 m de résolution et la plus faible est celle de la bande thermique de 120 m. Le Système d'Informations Géographique a été utilisé pour assurer le traitement de ces images satellitaires afin de dégager les cartes d'occupation du sol de 2002, 2014 et 2024.

Les différentes bandes spectrales utilisées ont été combinées et nous avons rehaussé l'image composite par la bande panchromatique pour améliorer la résolution spatiale au 15 m.

Le hillshade utilisé comme background pour certaines cartes a été obtenu par traitement spatial du MNT (Résolution 10 m) sous un SIG. Le tableau 6 illustre les différentes caractéristiques des satellites Landsat 7, 8 ou 9 ayant des capteurs respectifs suivants ETM+ et OLI/TIRS utilisées dans le présent travail de recherche.

II.2. Méthodologie

Le présent travail de recherche a été mené à travers une approche méthodologique intégrée, combinant l'exploitation de documents existants, l'analyse des données d'observation de la Terre, les travaux de terrain ainsi que l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et d'outils statistiques. Cette démarche a permis une analyse approfondie des facteurs de déclenchement des mouvements de terrain et de leur répartition spatiale dans le bassin versant de la rivière Gikoma.

Dans un premier temps, une recherche documentaire approfondie a été réalisée. Elle a consisté en la consultation des archives, des documents anciens et des publications scientifiques en lien avec les instabilités de terrain et le contexte géographique de la zone d'étude. Des données ont également été collectées auprès des institutions publiques afin de

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

mieux appréhender les facteurs naturels et anthropiques associés aux risques de mouvements de terrain. Cette phase a permis d'établir un cadre théorique solide et de rassembler des informations de base, notamment à partir de photographies aériennes, de cartes géologiques et pédologiques (feuilles de Bujumbura).

Dans le second temps, les données d'observation de la Terre ont été exploitées à travers l'utilisation d'images satellitaires. Les images Landsat 7, 8 et 9 ont été acquises à partir de la plateforme Earth Explorer de USGS. Ces images ont servi à l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol pour les années 2002, 2014 et 2024, ainsi qu'à l'identification de certains indices spatiaux liés aux mouvements de terrain. Le traitement et l'analyse de ces données ont été réalisés principalement sous le logiciel ArcGIS 10.7.1 et QGIS 3.28.4.

Pareillement, des visites de terrain ont été effectuées afin de valider les informations issues de l'analyse spatiale et de procéder à l'inventaire des mouvements de terrain. Ces observations ont permis d'identifier et de caractériser les différents types de mouvements de terrain, ainsi que de collecter des données géographiques utiles à leur localisation et à leur classification. Les images Google Earth ont également été utilisées en complément pour la reconnaissance visuelle et la vérification spatiale des phénomènes observés.

Enfin, l'ensemble des données collectées a été organisé et traité à l'aide de plusieurs logiciels notamment Microsoft Excel pour la gestion des bases de données, IBM SPSS Statistics 25 pour les analyses statistiques et les traitements quantitatifs, et les logiciels SIG pour l'analyse spatiale et la cartographie thématique. L'intégration des facteurs morphologiques, géologiques, hydrologiques et d'occupation du sol dans un environnement. Le SIG a permis l'élaboration de la carte de susceptibilité aux mouvements de terrain du bassin versant de la rivière Gikoma.

II.2.1. Recherche documentaire

La consultation des documents a été effectuée dans les bibliothèques, institutions et sur internet. Pour bien aborder notre travail de recherche, plusieurs documents ont été utilisés comme référence bibliographique.

En effet, deux catégories de documents ont été suffisamment consultées tels que les documents physiques ou en papier et les documents électroniques. Ces documents sont essentiellement des publications des ministères, des ouvrages généraux comme les mémoires, thèses, articles scientifiques et notes de cours.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Certains documents ont été consultés à la Direction Générale de Protection Civile (DGPC). La DGPC est une institution publique chargée de la prévention, de la gestion et de la réduction des risques de catastrophes, notamment dans le cadre de la protection des personnes, des biens et de l'environnement contre les accidents, les sinistres et les catastrophes. Bref, c'est une institution qui, parmi les préoccupations figurent les questions sur l'environnement.

De même, l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) a été visité pour chercher les données météorologiques en rapport avec les pluviométries mensuelles sur une période allant de 1990 à 2024. Ces données météorologiques ont été enregistrées à partir des stations météorologiques de Bujumbura-Aéroport et Bugarama. En tant qu'un seul Institut Géographique du Burundi, il a été identifié comme une institution mieux placée pour nous fournir assez d'informations.

II.2.2. Visite de terrain

Une visite de terrain a été effectuée dans la commune Isare pour demander l'autorisation auprès de l'administrateur communal et le Directeur du Bureau Provincial de l'Environnement, Agriculture et de l'Elevage afin de bien mener notre travail de recherche.

La visite a été orientée vers les zones où les réalités environnementales en rapport avec les mouvements de terrain sont observables. Lors de la visite de terrain, la localisation de mouvements de terrain a été réalisée par un GPS et d'autres mouvements de terrain ont été identifiés par observation des images satellitaires de Google Earth.

Les méthodes utilisées pour inventorier les glissements de terrain sont variées et regroupent en deux grands groupes. Le premier concerne les travaux d'identification des glissements sur des observations directes sur terrain. La détermination des coordonnées est facilitée par l'usage des outils modernes de cartographie comme les GPS. Le deuxième groupe concerne les méthodes basées sur la télédétection qui consiste en une analyse des images reçues à distance au moyen des satellites ou par des capteurs aéroportés (Nibigira, 2018).

En outre, nous avons relevé les coordonnées géographiques des points de localisation des mouvements de terrain que nous avons enfin, projeté sur la carte d'inventaire pour visualiser les zones qui sont susceptibles aux mouvements de terrain.

II.2.3. Utilisation des logiciels et outils de traitement des données

Le traitement des différentes données a été fait par les différents logiciels et outils informatiques (Microsoft Excel 2016, IBM SPSS Statistics 25, ArcGIS 10.7.1, QGIS 3.28.4, Google Earth).

Pour le cas des coordonnées géographiques récoltées à l'aide d'un GPS, elles ont été transférées dans un ordinateur pour être traitées dans un logiciel Microsoft Excel 2016 (classeur excel).

Après un enregistrement dans un répertoire, ces points ont été projetés pour localiser les mouvements de terrain dans la zone d'étude. L'analyse du paysage a été faite par Google Earth pour identifier à distance les zones les plus menacées par les mouvements de terrain.

En plus, les données de la télédétection notamment les images de Landsat de 2002, 2014 et 2024 ont été traitées sous l'ArcGis 10.7.1. Les classes d'occupation du sol ont été obtenues après la classification des images. Après la production des cartes d'occupation du sol (LULC), nous avons fait leur validation en faisant la vérification par comparaison des cartes d'occupation du sol produites avec les données du terrain après leur projection dans le Google Earth.

Le processus hiérarchique analytique, dite AHP, est une approche analytique multicritère d'aide à la décision développée par Saaty (1980). Elle permet de décomposer un problème complexe et de le présenter sous la forme d'une hiérarchie. Elle propose une approche d'évaluation flexible et robuste à des situations de décision impliquant des alternatives de décision, les critères de décision, et les compromis.

L'AHP réduit la complexité d'un problème de décision à une de comparaisons par paires qui sont synthétisés dans une matrice de rapport qui fournit une justification claire pour commander les décisions possibles de la plus à la moins souhaitable.

Plus précisément, le processus construit une hiérarchie de critères de décision et à travers la comparaison par paires de chaque paire de critère possible un poids relatif pour chaque critère de décision à l'intérieur de la hiérarchie est produit. La mise au point de comparaison par paire a été basée sur l'estimation de préférences relatives à deux critères à la fois. Chaque comparaison est une question en deux parties de déterminer quel critère est plus important.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Le nombre de cartes en entrée (paramètres) dépend de l'avis du chercheur effectuant l'analyse. Quant à leurs poids relatifs, les valeurs peuvent être attribuées en se basant sur les connaissances de l'expert analyste (géologue, géomorphologue...).

La matrice de comparaison est constituée d'un nombre égal de lignes et de colonnes où les scores sont enregistrés sur un côté de la diagonale tandis que la diagonale de la matrice est remplie par des valeurs de 1. Les poids sont déterminés en normalisant le vecteur propre qui correspond à la plus grande valeur propre de la matrice de rapport. Puisque les jugements humains peuvent violer la règle de transitivité et ainsi provoquer une incohérence, le rapport de cohérence (CR) est calculé pour vérifier la cohérence des comparaisons effectuées. En cas de forte incohérence ($CR > 0.1$) les jugements les plus contradictoires doivent être révisés.

Le rapport de cohérence (CR) est calculé selon la formule suivante : $CR = \frac{CI}{RI}$

Avec CI est l'indice de cohérence $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{1 - n}$

Où :

λ_{max} : C'est la plus grande valeur propre positive de la matrice

n : C'est l'ordre de la matrice

RI : C'est appelé Indice aléatoire et dépend de l'ordre de la matrice (n)

La carte de susceptibilité est élaborée sur la base de la pondération des facteurs issus de la matrice de AHP.

La figure 11 montre la synthèse de la méthodologie que nous avons utilisé dans le présent travail de recherche et a permis d'aboutir à la réalisation de la carte de susceptibilité des mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma.

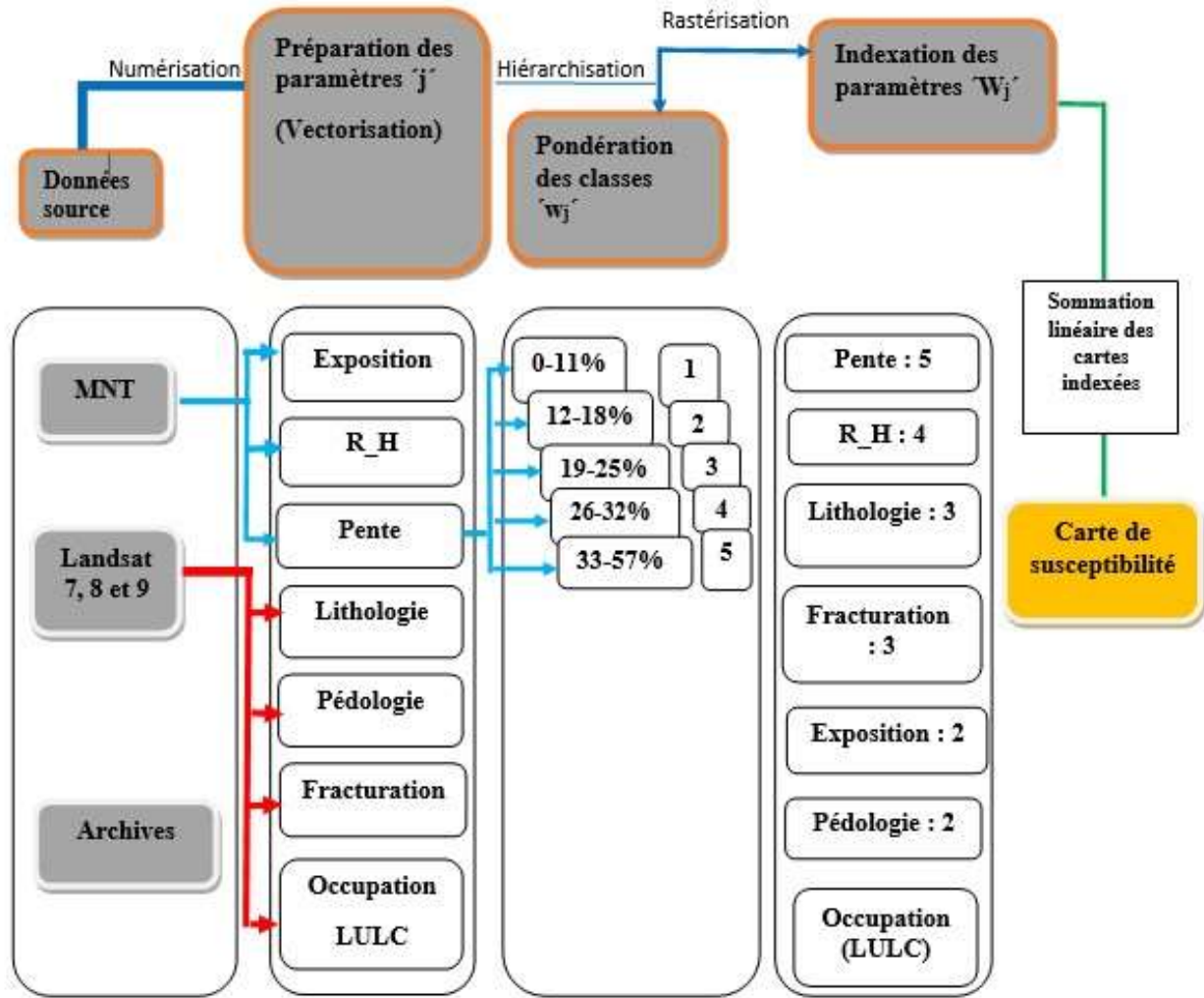


Figure 11: Méthodologie utilisée pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain

Bref, la figure ci-dessus montre le déroulement des différentes étapes pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain par combinaison des cartes indexées. Les différents poids sont assignés et tous les paramètres sont rassemblés dans une seule et unique carte d'index, et ce à l'aide de l'équation ci-dessous proposée par Voogd (1983) et permettant le calcul des sommations linéaires pondérées. La démarche est résumée par la formule suivante :

$$\text{Equation : } IA_{MT} = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij}$$

Avec :

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

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

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

w_{ij} : Valeur de la pondération assignée à la classe 'i' paramètre 'j'

n : Nombre des paramètres

D'une manière générale, les données utilisées dans ce travail proviennent de quatre sources : la bibliographie, la morphostructurale, la télédétection et la visite sur terrain. Chacune d'elles apporte des informations qui interviennent dans l'élaboration de la carte de vulnérabilité des terrains aux mouvements de masse. L'ensemble des couches des facteurs ont été combinés par des techniques de superposition pondérée et la carte de susceptibilité aux mouvements de masse a été créée. L'approche méthodologique adoptée pour mener cette étude est illustrée sur la figure 11.

CHAPITRE III : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES**RESULTATS****III.1. Apport de l'imagerie satellitaire et photographie aérienne dans l'étude de mouvements de terrain dans le bassin versant de Gikoma**

Le bassin versant faisant l'objet de notre zone d'étude est menacé par les mouvements de terrain surtout en cas des précipitations excessives. Ces dernières occasionnent la perte de terre, la destruction des cultures etc.

III.1.1. Dynamique d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Gikoma

L'occupation du sol regroupe des informations à la fois sur la description physique du territoire et sur l'utilisation du sol. Cette distinction permet de différencier les surfaces (naturelles, anthropisées) et pour cela, les observations faites sur terrain montrent que la végétation naturelle a été progressivement éliminée au détriment des espaces cultivables et à l'installation des maisons d'habitation sur les versants de la rivière Gikoma.

Notre zone d'étude est en grande partie occupée par les cultures vivrières plus ou moins annuelles (haricot, maïs, patates douces, etc.) ou pérennes (manioc, palmier à l'huile, arbre fruitier) ainsi que quelques boisements d'eucalyptus. Donc, les versants de la rivière Gikoma sont affectés par les effets de la dégradation du sol au détriment des habitations (ce qui réduit les surfaces d'infiltration).

La réduction sensible du boisement à la faveur des aires cultivées et à végétation herbeuse et l'accroissement du nombre de maisons, une concentration des écoulements de surface au niveau de l'escarpement a probablement contribué aux instabilités des terrains du bassin versant de la rivière Gikoma.

Les figures 12, 13 et 14 sont les résultats de classification des images captées par les satellites. La contrainte majeure dans cette analyse de la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma est la disponibilité des images satellitaires. En effet, l'image la plus récente est celle de 2024.

III.1.1.1. Occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2002

La carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Gikoma en 2002 a été réalisée à base de l'image satellitaire captée par Landsat 7 ETM+. En 2002, le bassin versant de la rivière Gikoma était au départ quasiment inoccupé par l'homme. Les modes d'occupation du sol appelés « classes » ont été identifiées dans la zone d'étude, il s'agit des classes suivantes la végétation (prairies et champs de cultures) et la forêt. Le tableau 6 présente les résultats de l'analyse par l'ArcGIS 10.7.1 et la figure 13 montre les différentes classes d'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma.

Tableau 6: Superficies des classes d'occupation du sol dans le Bassin versant de la rivière Gikoma en 2002

Classes	Surface d'occupation du sol (ha)	%
Végétation (Cultures et prairies)	753,90	45.85
Forêt	890,52	54,15
Total	1644,42	100

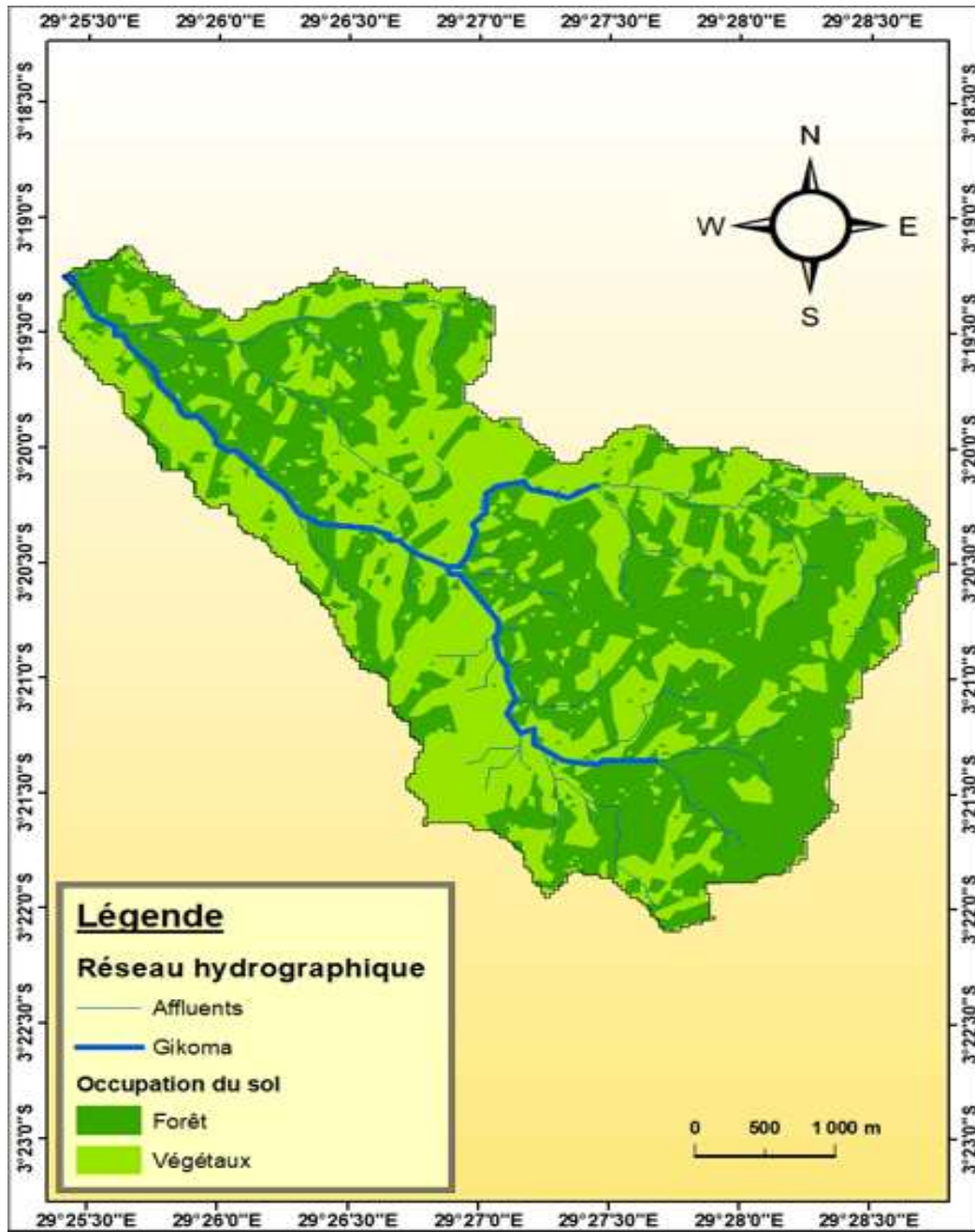


Figure 12: Carte des classes d'occupation du sol dans le bassin versant Gikoma en 2002

III.1.1.2. Occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2014

Cette image satellitaire captée par Landsat 8 équipé d'un capteur OLI/TIRS. Le tableau 7 montre les résultats de l'analyse après le traitement. La carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Gikoma en 2014 est illustrée par la figure 13.

Tableau 7: Superficies des classes d'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2014

Classes	Surface d'occupation du sol (ha)	%
Végétation (Cultures et prairies)	1221,82	74,30
Forêt	350,82	21,33
Zone Bâtie	71,78	4,37
Total	1644,42	100

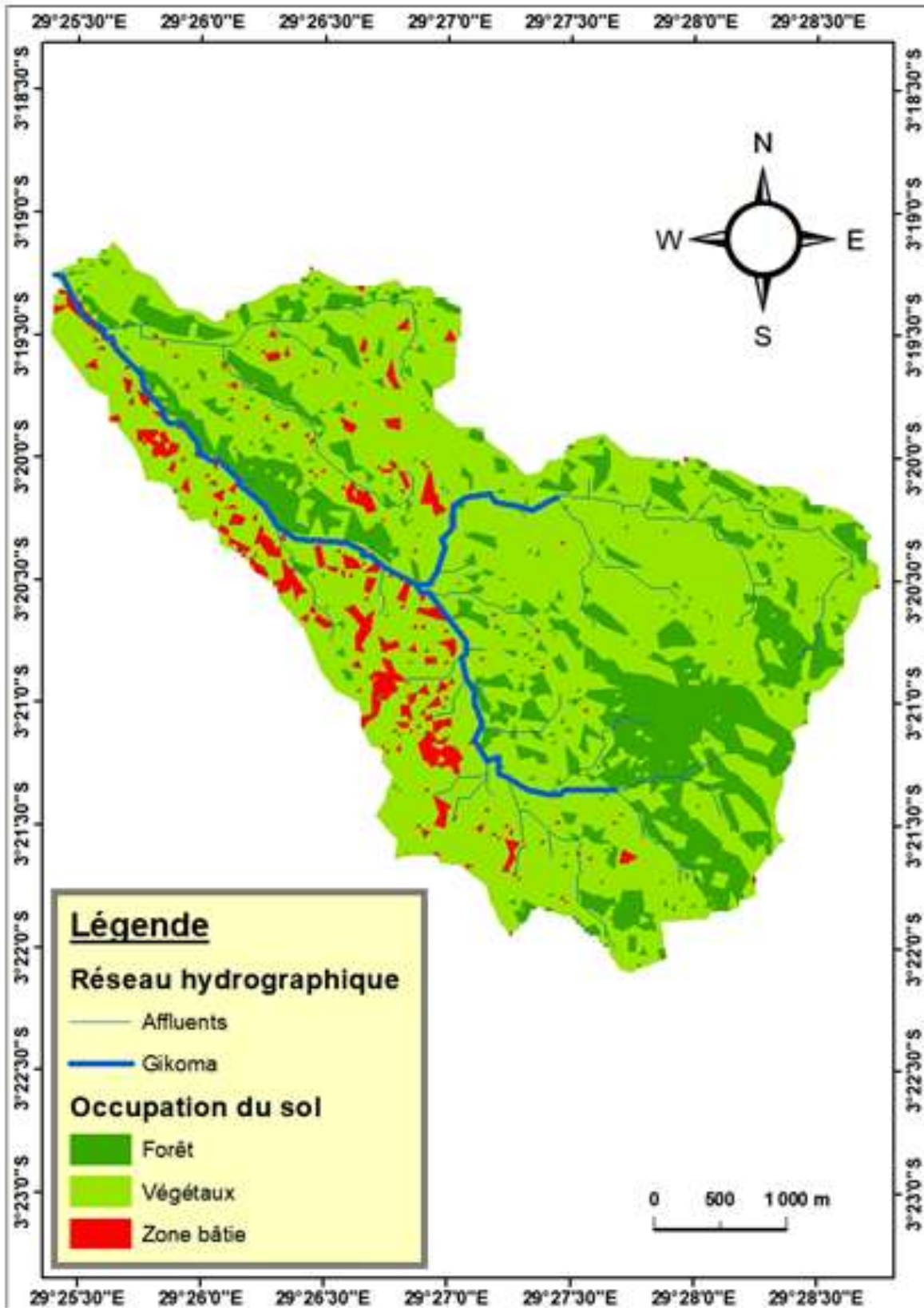


Figure 13: Carte des classes d'occupation du sol dans le bassin versant Gikoma en 2014

III.1.1.3. Occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2024

La carte d'occupation du sol de la zone d'étude a été réalisée à base de l'image satellitaire téléchargée sur le site de USGS. L'image satellitaire a été captée par Landsat 9 équipé d'un capteur OLI/TIRS. Après le traitement par ArcGIS 10.7.1, la classification a permis de distinguer trois classes d'occupation du sol notamment : les végétaux, la forêt et la zone bâtie. Le tableau 8 ci-dessous présente les résultats de l'analyse issu du traitement par ArcGIS 10.7.1. L'augmentation de la surface occupée par la classe de végétation est issue du défrichement de la forêt au détriment des champs de culture. La figure 14 montre les différentes classes d'occupation du sol dans le bassin versant Gikoma en 2024. Parmi ces classes d'occupation du sol en 2024, la zone bâtie a augmenté d'une manière exponentielle (Figure 14).

Tableau 8: Superficies des classes d'occupation du sol dans le BV Gikoma en 2024

Classes	Surface d'occupation du sol (ha)	%
Végétation (Cultures et prairies)	972,15	59,12
Forêt	185,76	11,30
Zone bâtie	486,51	29,58
Total	1644,42	100

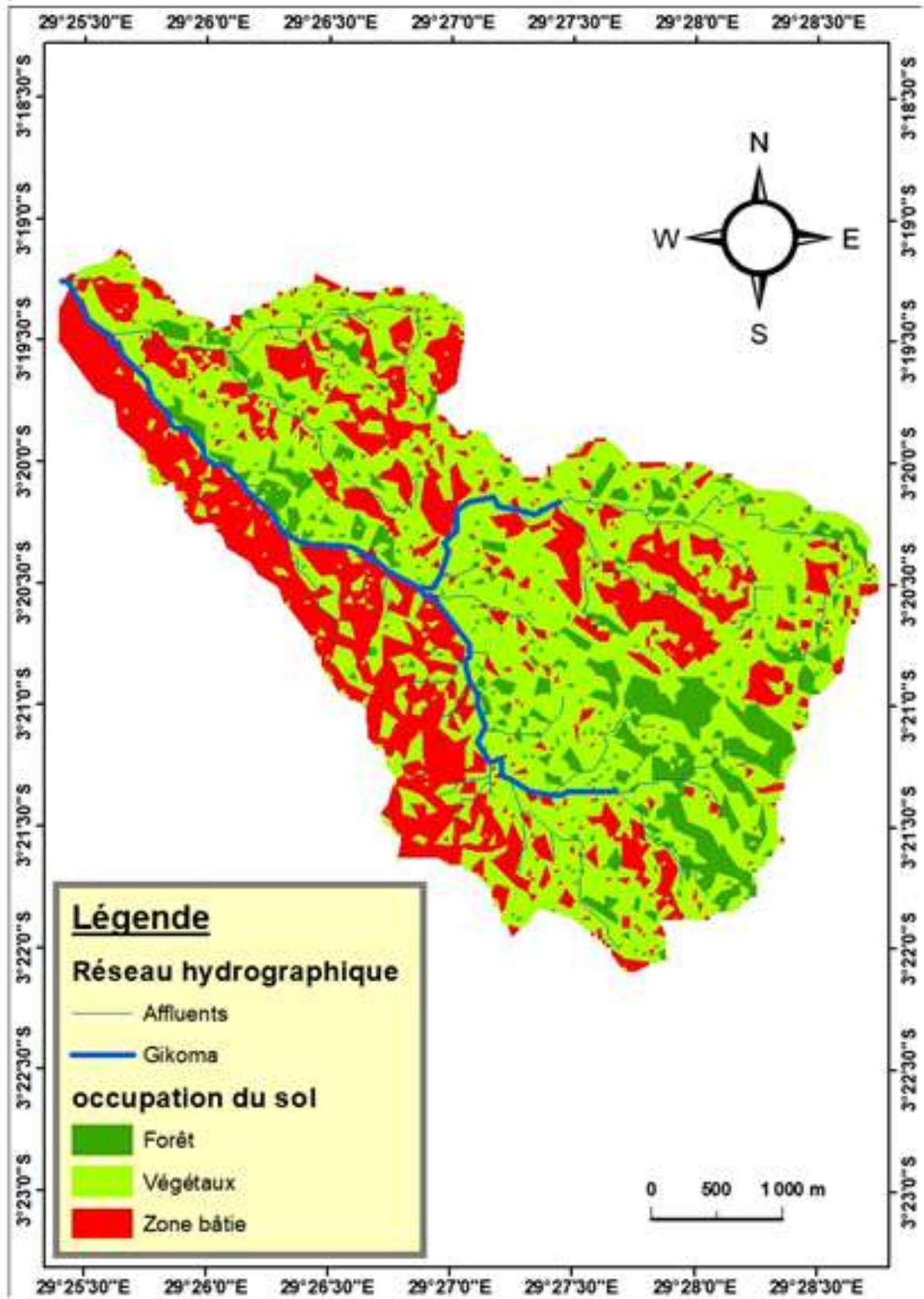


Figure 14: Carte des classes d'occupation du sol du bassin versant de Gikoma en 2024

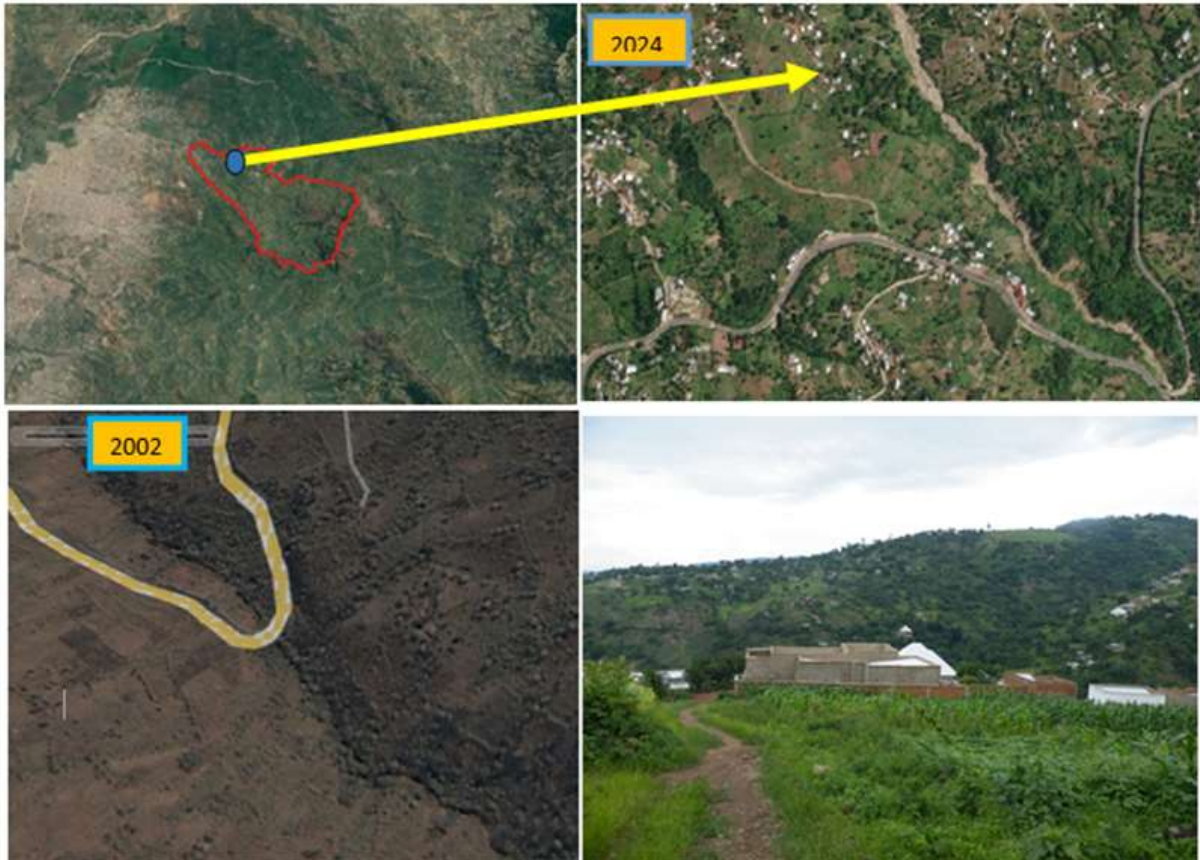


Figure 15: Illustration de la dynamique d'une zone bâtie dans le bassin versant de la rivière Gikoma (2002 à 2024)

III.1.2. Evolution de l'occupation du dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Le traitement des images satellitaires montre que la zone bâtie a augmenté d'une façon exponentielle suite à la saturation de l'espace à bâtir dans la ville de Bujumbura. Cette situation a fait que la population construit des maisons d'habitation de façon anarchique dans les zones à risques d'instabilités aux piémonts de la région de Mirwa. Plus la zone bâtie augmente, il y a une diminution de la couverture végétale dans la zone d'étude et par conséquent, on observe autant de mouvements de terrain pendant la saison des pluies suite à l'érosion hydrique accélérée par la diminution de la surface d'infiltration des eaux pluviales dans le sol. Le tableau 9 montre les classes et les superficies d'occupation du sol dans la zone d'étude depuis les 2002 jusqu'en 2024.

Tableau 9: Evolution d'occupation du sol dans le BV Gikoma de 2002 à 2024

Classes (%)	2002	2014	2024
Végétation (Cultures et prairies)	45,85 %	74,30 %	59,12 %
Forêt	54,15 %	21,33 %	11,30 %
Zone bâtie	-	4,37 %	29,58 %

L'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de Gikoma entre 2002 et 2024 montre une transformation marquée du paysage. La forêt a fortement régressé, passant de 54,15 % en 2002 à 11,30 % en 2024, traduisant une déforestation importante.

Parallèlement, les zones de végétation (cultures et prairies) ont d'abord augmenté jusqu'en 2014 (74,30 %) avant de diminuer à 59,12 % en 2024.

La zone bâtie, quasi inexistante en 2002, connaît une forte expansion pour atteindre 29,58 % en 2024. Cette dynamique témoigne d'une pression anthropique croissante, susceptible d'accentuer l'instabilité des sols et les risques de mouvements de masse.

III.2. Inventaire de mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Cette section vient en complément des précédents pour donner une lumière au sujet des mouvements de terrain observés dans la zone d'étude. Les mouvements de terrain observés dans le bassin versant de la rivière Gikoma au mois de décembre 2024 sont en dynamiques complexes dictées à la fois par les facteurs anthropiques et naturelles.

Ces mouvements de terrain observés dans le bassin versant de la rivière Gikoma sont comptés parmi les instabilités de terrain qui menacent les activités socio-économiques de la population de cette localité. Les particules des roches érodées sur les versants sont déversées dans la rivière Gikoma et vont constituer des alluvionnements dans la plaine car la pente du terrain est faible dans la partie aval du bassin versant de la zone d'étude.

Les mouvements de terrain répertoriés dans la zone d'étude sont au nombre de 78. Parmi eux, les 61 mouvements de terrain ont été observés sur terrain lors de la visite sur terrain et 17 autres mouvements de terrain ont été identifiés à l'aide du Google Earth (Tableau 10).

Tableau 10: Types et effectif de mouvements de terrain identifiés sur terrain

Types de mouvements de terrain	Nombre de mouvements de terrain	%
Eboulement	29	37.20
Glissement rotationnel	6	7.69
Glissement translationnel	21	26.92
Effondrement	7	8.97
Complexe	5	6.41
Fissure	3	3.85
Erosion	3	3.85
Coulée boueuse	2	2.56
Affaissement	1	1.28
Affouillement	1	1.28
Total	78	100

L'instabilité de terrain constitue une famille très diversifiée de phénomènes qui intéressent le sol et le sous-sol. Elle est en relation avec l'évolution géodynamique (Mohamed et al., 2017). L'analyse du paysage de la zone d'étude a été faite à l'aide de Google Earth pour identifier les mouvements de terrain dans la zone d'étude. Le Google Earth a été d'une grande utilité en offrant une vue multi-temporelle de certains glissements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma.

Le bassin versant de Gikoma est instable à cause de la présence de plusieurs glissements de terrain. Ces glissements de terrain sont pour la plupart d'origine naturelle mais peuvent parfois être réactivés par de fortes pluies ou des activités humaines. Le curage des matériaux de construction du lit de la rivière est l'une des activités anthropiques contribuant à l'instabilité des berges de la rivière Gikoma.

Notre zone d'étude souffre des différents types de mouvements de terrain entre autres l'érosion hydrique, effondrements, affouillements, affaissements, éboulements, coulées boueuses, les glissements de terrain etc. Les glissements de terrain sont abondants sur les

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

schistes et là où les rivières sapent les berges qui provoquent les coulées boueuses. La figure 16 montre les mouvements de terrain répertoriés sur terrain.

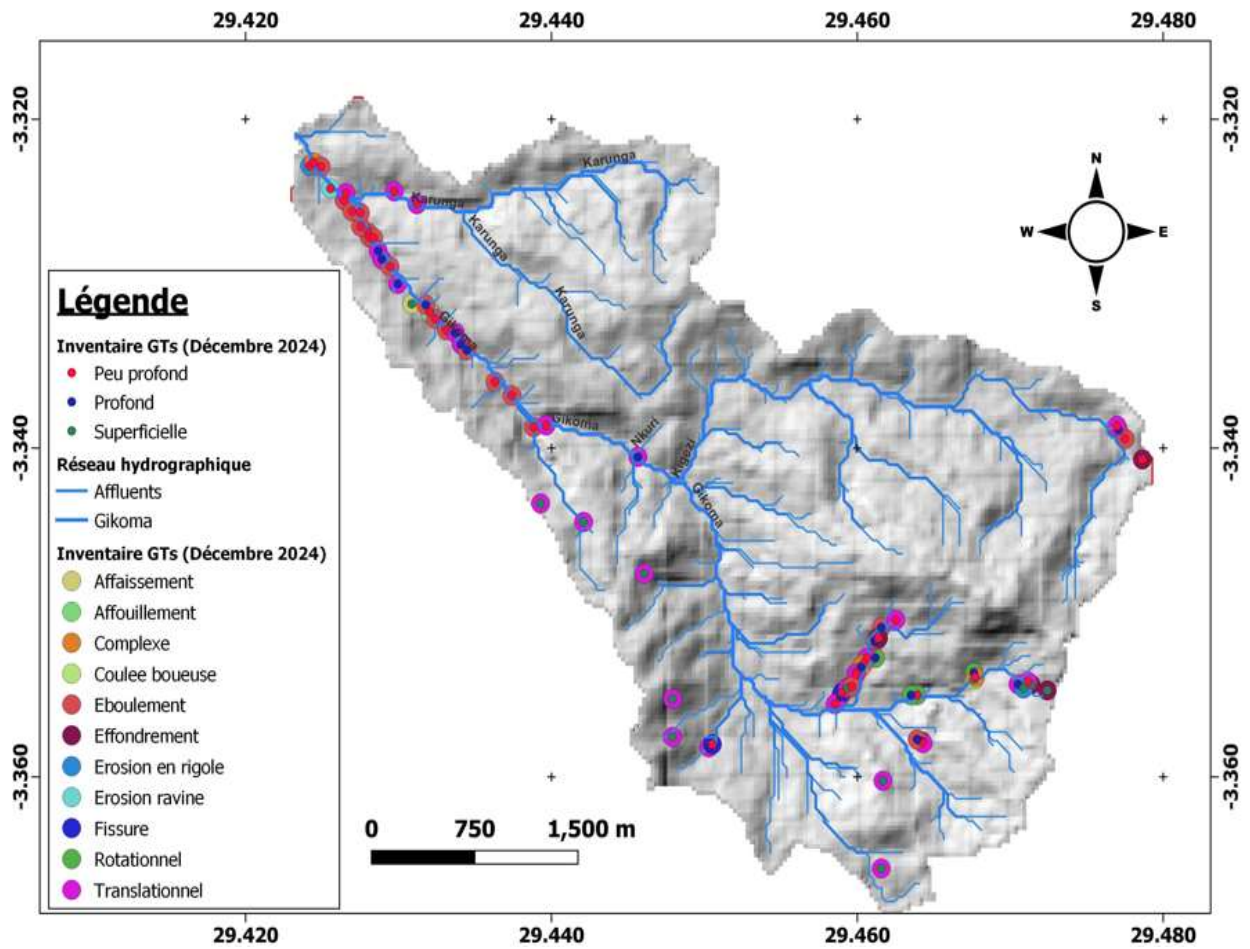


Figure 16: Carte d'inventaire de mouvements de terrain dans le bassin versant Gikoma

III.2.1. Description des mouvements de masse identifiés dans la zone d'étude

	<p>Exemples de mouvements de masse inventoriés dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2024 :</p> <p>(a) Lors de la visite sur terrain, il s'observe une érosion en rigole à Tenga de la zone Rubirizi en commune Mutimbuzi. Cette érosion hydrique a été identifiée et localisée aux coordonnées géographiques ci-après $X = 29,42419^\circ$ et $Y = -3,322822^\circ$. Elle est superficielle et menace la terre. La photo a été prise le 30/12/2024.</p>
	<p>(b) Le mouvement de terrain qui s'observe sur la figure, il s'agit d'une érosion ravine. Elle a été localisée à Tenga aux coordonnées géographiques $X = 29,425552^\circ$ et $Y = -3,324200^\circ$. Cette érosion ravine menace la terre cultivable ainsi que les cultures. L'image a été prise le 30/12/2024.</p>
	<p>(c) Le pont de la rivière de Gikoma a été visité lors de la collecte des données. L'affouillement observé en dessous d'un mur de soutènement de la berge de la rivière Gikoma est superficiel. Cet affouillement a été identifié et localisé aux coordonnées géographiques $X = 29,432047^\circ$ et $Y = -3,331718^\circ$ à Mbirira. Il menace l'infrastructure de soutènement de la berge de la rivière Gikoma. Les images ont été prises le 30/12/2024.</p>
	
	<p>(d) Tout au long de la rivière Gikoma, nous avons observé les mouvements de masse qui sont entre autres des éboulements, des affaissements sur la RN1, et l'érosion hydrique. Ces mouvements de terrain constituent une menace majeure aux infrastructures : exemple la route RN1, les maisons d'habitation et aux cultures. Les affaissements de la RN1 sont peu profonds et ont été localisés aux coordonnées géographiques suivantes : $X = 29,430870^\circ$ et $Y = -3,331220^\circ$. La prise de vue a été faite le 30/12/2024.</p>

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma



La partie en aval du pont de la RN1 est menacée par les activités anthropiques : les constructions anarchiques, les activités agricoles, le curage anarchique des matériaux de construction dans le lit de la rivière Gikoma, les images illustrent les affaissements de la RN1, les éboulements et certaines activités faites dans la partie en aval du pont de la RN1 dans le bassin versant de la rivière Gikoma. Les photos ont été prises le 30/12/2024.

(e) Il s'observe un éboulement à Buhayira. Ce mouvement de terrain est localisé aux coordonnées géographiques $X = 29,446068^\circ$ et $Y = -3,347629^\circ$. Il s'observe dans ce mouvement de terrain un déplacement des matériaux rocheux et de la terre. Cet éboulement est peu profond. La prise de vue a été faite le 28/12/2024.

(f) Ce mouvement de terrain localisé aux coordonnées géographiques $X = 29,450522^\circ$ et $Y = -3,358008^\circ$, il s'agit d'un effondrement qui est peu profonde et identifiée à Kwigere, zone Benga en commune Isare. Cet effondrement montre que les végétaux sont menacés. Elle favorise la pénétration des eaux pluviales considérées comme un facteur déclencheur des glissements de terrain. La photo a été prise le 26/12/2024.

(g) C'est un effondrement profond, localisé à Kwigere et aux coordonnées géographiques $X = 29,45029^\circ$ et $Y = -3,358192^\circ$. Le matériau déplacé est la terre. Ce mouvement de terrain identifié sur terrain est profond et menace les cultures de banane y compris aussi des herbes ainsi que la terre cultivable. La prise de vue a été faite le 26/12/2024.

	<p>(h) Ce glissement de masse identifié à Kibezi est un éboulement qui est profond. Les matériaux glissés sont entre autres la terre, les débris des roches et les végétaux. Les coordonnées géographiques de ce mouvement de terrain complexe sont les suivantes : $X = 29,461128^\circ$ et $Y = -3,351700^\circ$. L'image a été prise le 23/12/2024.</p>
	<p>(i) Ce mouvement de masse a été observé dans un champ de cultures. Les cultures sont en association de maïs et patate douce à Kibezi. Il s'agit d'une coulée boueuse qui est superficielle et localisée aux coordonnées géographiques $X = 29,461370^\circ$ et $Y = -3,351538^\circ$. Ce mouvement de terrain entraîne la dégradation du sol et menace aussi le champ de cultures.</p>
	<p>(j) Il est localisé à Kibezi aux coordonnées géographiques $X=29,462517^\circ$ et $Y=-3,350440^\circ$, c'est un glissement de terrain translationnel peu profond. Le matériau glissé est une masse de terre. Cette zone est susceptible aux glissements de terrain compte tenu de la lithologie du milieu. La photo a été prise le 23/12/2024.</p>
	<p>(l) Cette image prise le 23/12/2024 montre un mouvement de masse complexe qui est constitué par un glissement translationnel et une coulée bouseuse. Ce mouvement de masse complexe est localisé à Kibezi aux coordonnées géographiques $X = 29,460367^\circ$ et $Y = -3,353147^\circ$. Le matériau déplacé est la terre. En outre, il s'agit d'un glissement qui est peu profond et menace les herbes.</p>
	<p>(m) Ce mouvement de terrain observé à Kibezi, c'est un effondrement superficiel, identifiée et localisée aux coordonnées géographiques $X = 29,458998^\circ$ et $Y = -3,354853^\circ$. Cet effondrement met en danger les champs de cultures et les constructions de la localité visitée. La</p>

	<p>prise de vue a été faite le 21/12/2024.</p> <p>(n) C'est un glissement de terrain rotationnel profond, localisé à Kagoma aux coordonnées géographiques $X = 29,464218^\circ$ et $Y = -3,357845^\circ$. Ce glissement s'est fait sur un terrain en pente. Les matériaux déplacés sont entre autres la terre et les débris rocheux. Il est profond et menace les végétaux. La photo a été prise le 21/12/2024.</p>
	<p>(s) L'image prise le 18/12/2024 illustre un mouvement de terrain observé sur terrain. Il s'agit d'une simple érosion massive qui est superficiel. Il a été identifié et localisé à Masake aux coordonnées géographiques $X = 29,471358^\circ$ et $Y = -3,354375^\circ$. Le matériau déplacé dans ce mouvement de terrain est la terre. Ce mouvement de terrain menace les herbes.</p>
	<p>(t) Il s'agit d'un glissement rotationnel qui est profond et localisé aux coordonnées géographiques $X = 29,46762^\circ$ et $Y = -3,353662^\circ$. Ce mouvement de terrain a été identifié à Masake. Il emporte la terre, les herbes et quelques cultures notamment les bananiers et manioc. La photo a été prise le 18/12/2024.</p>
	<p>(u) Le mouvement observé à Masake, il s'agit d'une coulée boueuse. Elle est superficielle et localisée aux coordonnées géographiques $X = 29,467638^\circ$ et $Y = -3,354068^\circ$. Ce mouvement de terrain entraîne le déplacement de la terre sous forme de boue et menace les herbes. La prise de vue a été faite le 18/12/2024.</p>

III.2.2. Causes et déclenchements de mouvements de terrain dans zone d'étude

Pour notre zone d'étude, les mouvements de terrain sont causés par les facteurs naturels et anthropiques. Le bassin versant de la rivière Gikoma est situé dans la partie amont de la région des Mirwa et l'autre partie dans la plaine de l'Imbo. Dans les zones intertropicales où il y a alternance de deux saisons (saison pluviale et saison sèche), les causes de mouvements de terrain sont les pluies diluviennes qui tombent dans les bassins versants de Gikoma. La zone d'étude considérée est le siège de forte précipitation.

Concernant les facteurs influençant les mouvements de terrain dans notre zone d'étude, nous pouvons citer la lithologie, la pédologie, la fracturation des roches, l'occupation du sol (LULC), le réseau hydrographique, la pente et l'exposition des versants de la rivière Gikoma.

Au cours de ce travail de recherche, nous avons fait une analyse de facteurs qui influencent les mouvements de terrain afin de voir s'il y a une corrélation positive entre les facteurs déclencheurs de mouvements de masse. Cette corrélation est obtenue à l'aide d'une matrice de corrélation illustrée par le tableau 12. Cette matrice consiste à faire la comparaison par paire des facteurs qui sont à l'origine de mouvements de masse.

III.2.2.1. Pente

La pente est une composante essentielle de l'analyse de la stabilité, elle est directement liée au potentiel gravitationnel et donc à la contrainte de cisaillement à laquelle sont soumis les matériaux. La pente est certainement la variable la plus utilisée dans les études des mouvements de terrain. Elle est directement liée à la résistance au cisaillement.

Les pentes ont été calculées à partir du MNT avec le traitement sous ArcGis 10.7.1 (Figure 17). Les classes à pente plus forte sont les plus probables à subir des instabilités liées aux mouvements de masse gravitaire que les autres.

Notre zone d'étude, la pente est inférieure à 12 % dans la partie en aval et supérieure à 33 % dans la partie amont dans le bassin versant de la rivière Gikoma. La susceptibilité aux mouvements de terrain augmente avec la pente.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

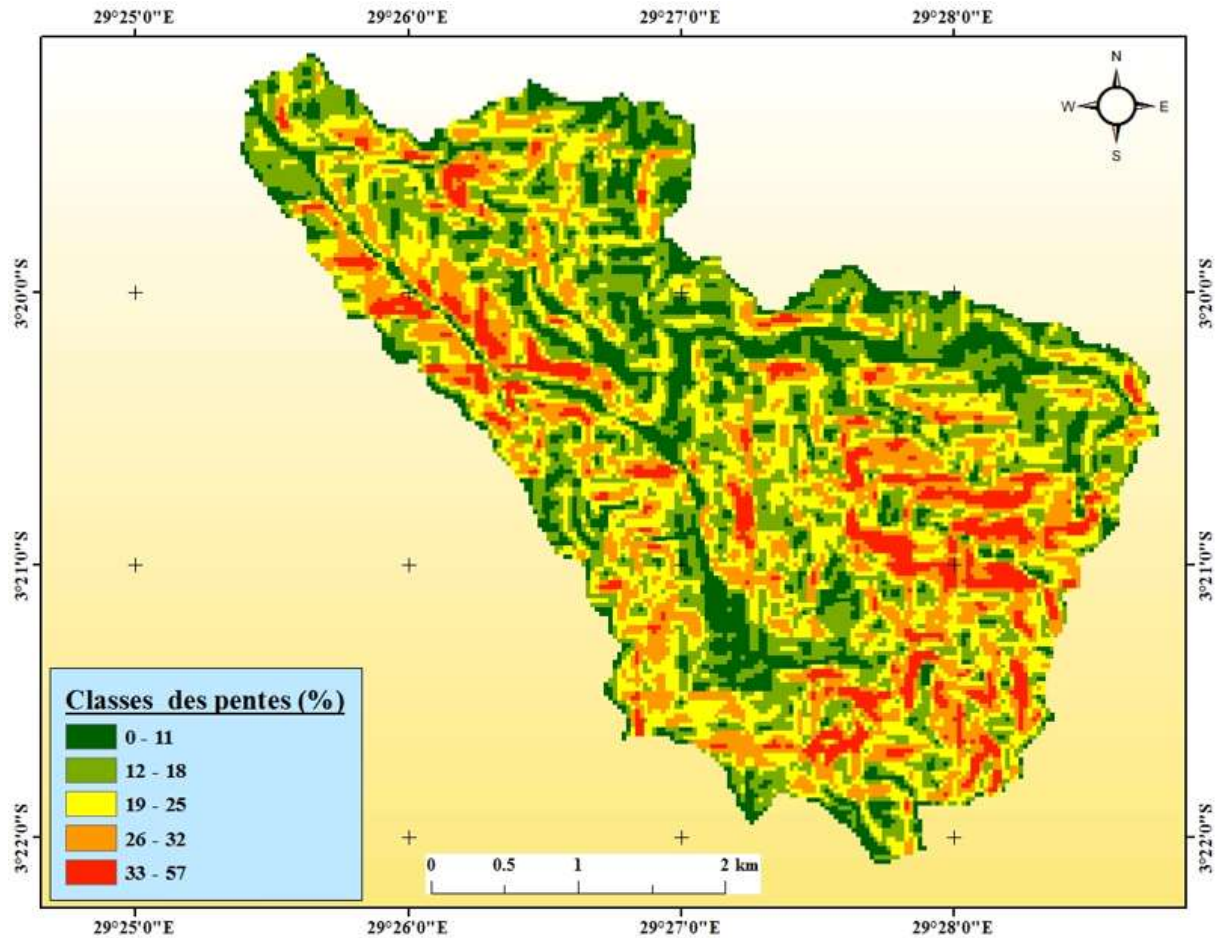


Figure 17: Carte des pentes du bassin versant de la rivière Gikoma

III.2.2.2. Hydrographie du bassin versant de la rivière Gikoma

Le bassin versant de la rivière Gikoma est un espace drainé par ses affluents vers un exutoire commun. Il a une superficie de 1644,42 ha et un contour de 20783,16 m. Selon l'ordre de grandeur, nous avons distingué 3 grands affluents de la rivière Gikoma : Kigezi, Karunga et Nkuri. La zone d'étude se trouve dans le grand bassin du fleuve Congo.

Le réseau hydrographique est très dense avec le cours d'eau principal, la rivière Gikoma qui se jette directement dans la rivière Mutimbuzi. La rivière Mutimbuzi après avoir collecté les eaux de la Gikoma, Muzazi et Murago, se jettent à son tour dans le lac Tanganyika.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) du bassin versant de la rivière Gikoma montre que le point le plus haut culmine à 2040 m d'altitude et le plus bas se trouve à 914 m, ce qui justifie le caractère torrentiel des cours d'eau (Figure 18).

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

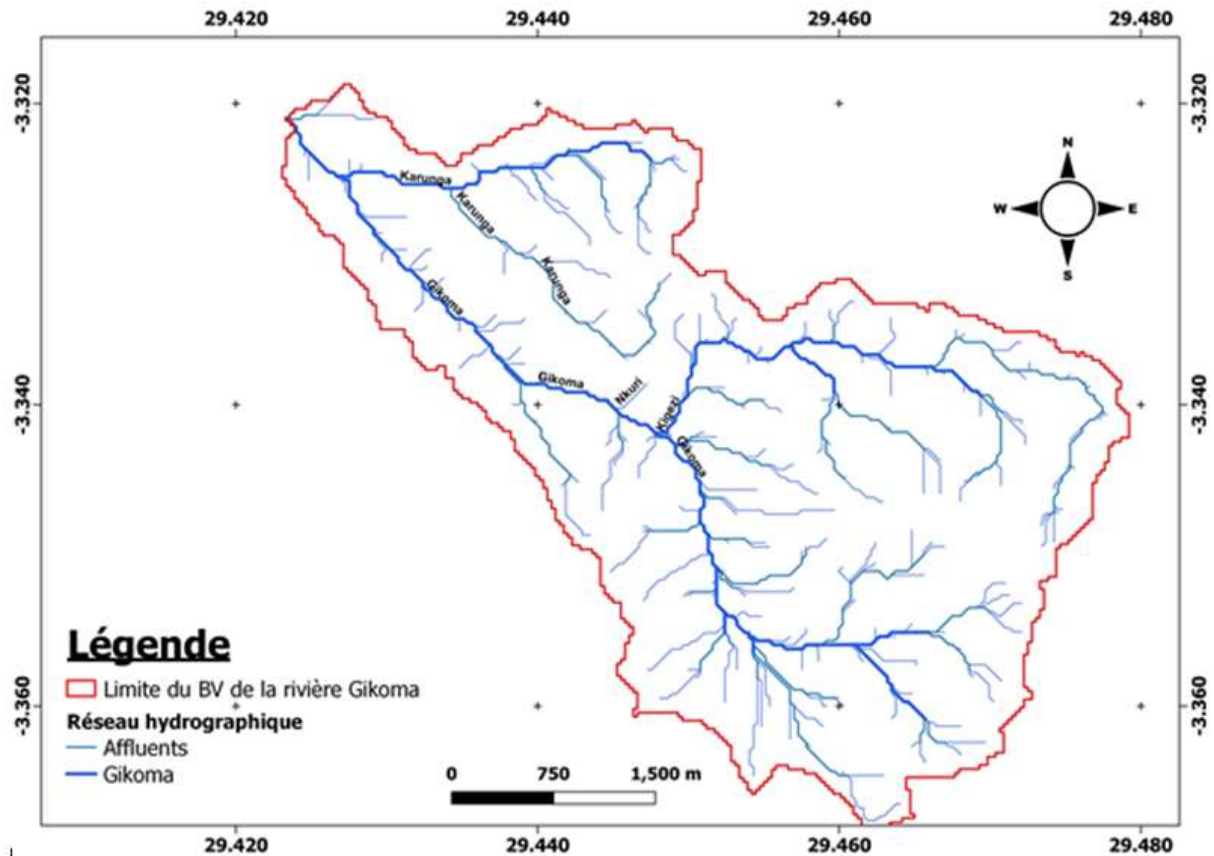


Figure 18: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Gikoma

III.2.2.3. Lithologie

La lithologie est l'un des principaux facteurs contrôlant les mouvements de terrain. Les mouvements de terrain résultent d'un changement de l'équilibre des forces dans le versant et celui-ci dépend de la géologie et de l'agencement structural des roches en présence. Les zones de faiblesse comme les schistosités, les failles, les plans de stratification, etc. sont des endroits plus fragiles pour le déclenchement des glissements de terrain.

La lithologie de notre zone d'étude est constituée par un ensemble des roches précambriennes dominées par les roches granitiques (Buhayira, Mbibirira, Giterama et Tenga), les roches quartziques (Kwigere, Kibezi et Masake,) et les schistes (Kindobwe). Les différents faciès ont été classifiés suivant leur vulnérabilité à des instabilités de terrain du plus faible au plus fort (Figure 19)

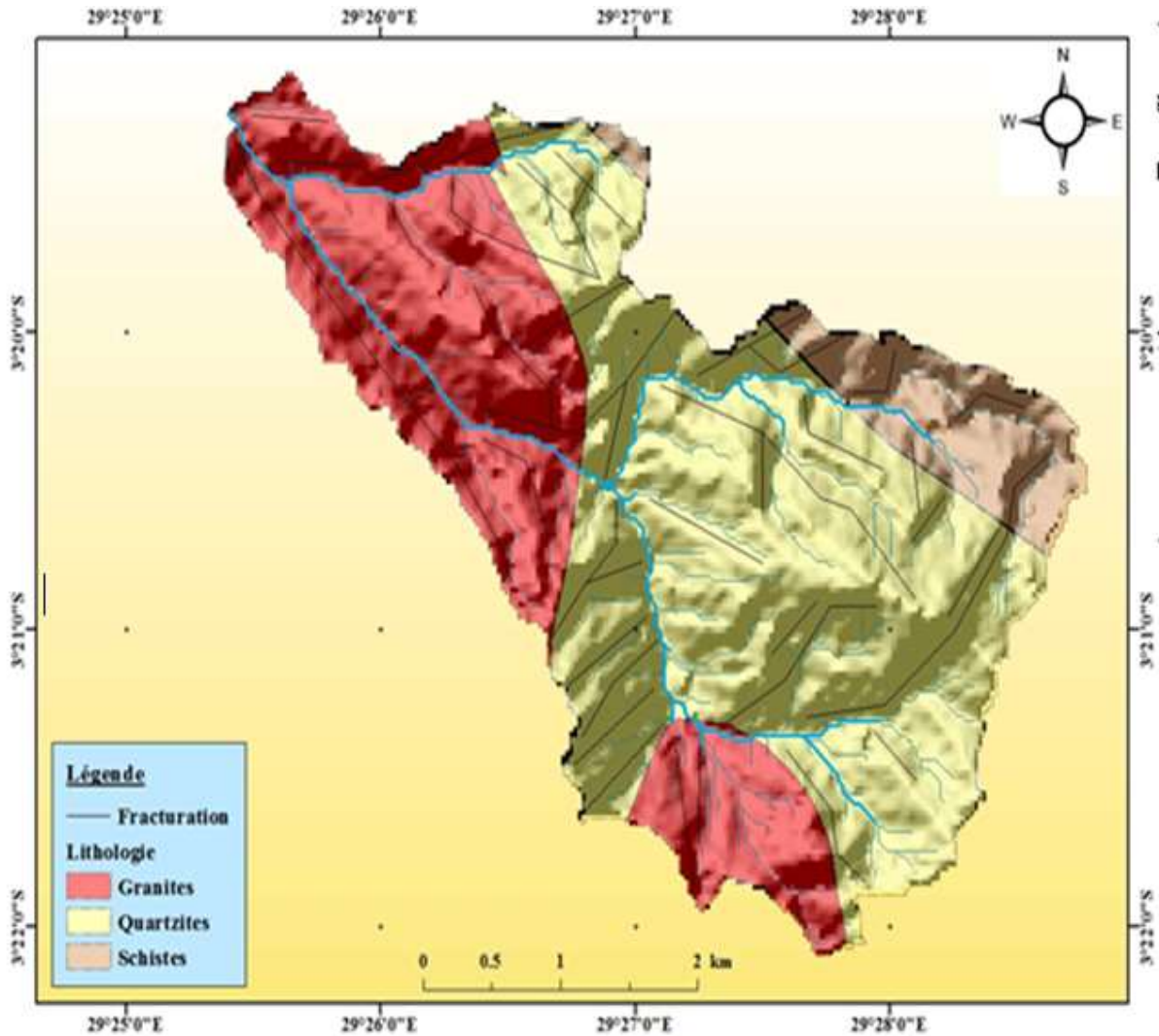


Figure 19: Carte de la lithologie du bassin versant de Gikoma

III.2.2.4. Exposition des versants

L'orientation des pentes influence la quantité de rayonnement solaire et donc l'humidité du sol. Elle contrôle également la quantité de précipitations lorsque celles-ci sont liées à des vents dominants avec une composante directionnelle prononcée. L'orientation peut influencer les propriétés physiques de la pente et donc sa susceptibilité au mouvement. La radiation reçue du soleil, donc la rétention de l'humidité influencée par l'orientation des pentes, qui ainsi peuvent influencer la résistance des sols et la susceptibilité au mouvement de masse.

L'intensité de l'exposition à la lumière, le type et l'étendue du couvert végétal et l'apport des eaux de surface varient considérablement selon l'aspect de la pente, la différence de température entre jour et nuit sur une pente ensoleillée est également plus importante que sur une pente ombragée et le cycle sec-humide est également plus rapide, ce qui réduit la

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

résistance et la stabilité de la masse rocheuse et du sol sur la pente ensoleillée, à son tour augmente la probabilité de glissement de terrain (Lahmidi Alla, 2021).

Pour notre cas, les versants sont ensoleillés presque de la même façon au cours de l'année parce que nous sommes dans la zone intertropicale proche de l'équateur. Et par conséquent, ils reçoivent approximativement les mêmes précipitations (Figure 20).

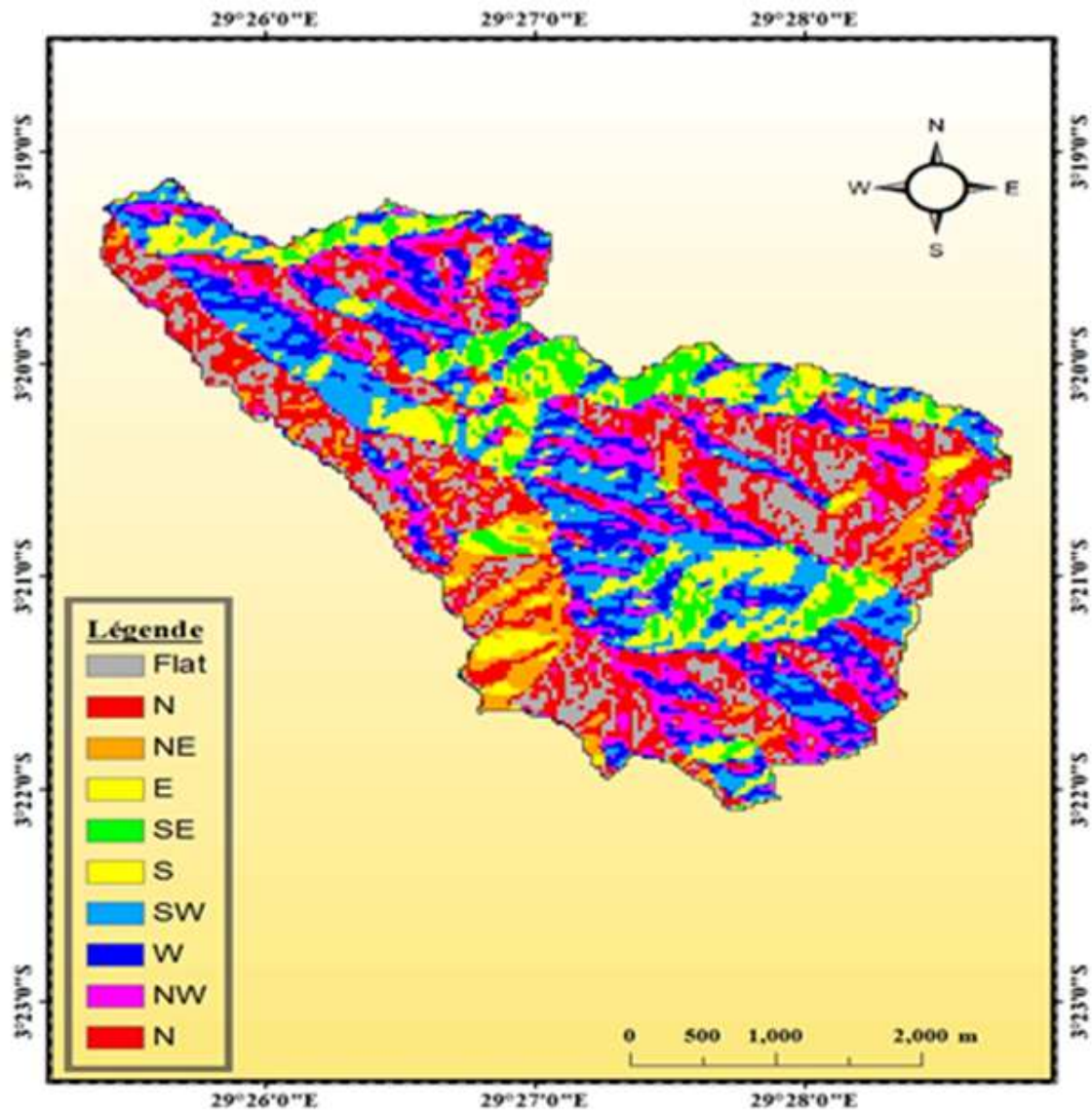


Figure 20: Carte d'exposition du bassin versant de la rivière Gikoma

III.2.2.5. Pédologie

La nature du sol contribue aux risques des mouvements terrain d'une région donnée dans la le bassin versant de la rivière Gikoma. Les principaux mouvements de terrain observés sur terrain se font dans les sols argileux et limono-argileux occupant respectivement 39.50% et 39.50% dans notre zone d'étude. Cependant les sols à tendance sableux constituent des terrains plus stables face aux mouvements de terrain.

III.2.2.6. Occupation du sol

La zone d'étude était occupée par les couvertures forestières et les végétaux (les cultures et prairies) dans les années antérieures. A travers cette étude, nous avons fait une analyse détaillée en nous appuyant sur les données d'observation de la terre notamment les images satellitaires pour étudier les changements qui se sont opérés au cours des années antérieures en concerne l'occupation du sol.

L'anthropisation du bassin versant de la rivière a fait que le pourcentage de zone bâtie augmente dans les années 2024 comme carte d'occupation du sol le montrent (Figure 14). Cette augmentation de la zone bâtie témoigne que la couverture naturelle notamment les forêts continuent à diminuer au détriment des espaces cultivables afin d'augmenter la production agricole. Les résultats de l'analyse de IBM SPSS Statistics 25 montrent la classe des végétaux (prairies et cultures) occupe 59.12%.

III.3. Influence des facteurs liés aux mouvements de terrain

Les paramètres responsables du risque de mouvements de terrain sont entre autres : la lithologie, la pédologie, la fracturation, l'occupation du sol (LULC), le réseau hydrographique, la pente et l'exposition des versants de la rivière Gikome. Les tableau 11 A, B, C, D, E, F, G donnent une lumière sur la contribution des facteurs qui sont à l'origine des mouvements de terrain dans la zone d'étude et correspondent respectivement aux figures ci-après : 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27.

Tableau 11: Facteurs liés aux mouvements de terrain

A		Lithologie			
		Granite	Quartzite	Schiste	Total
Type de mouvement de terrain	Eboulement	18	5	3	26
	Affaissement	1	0	0	1
	Affouillement	1	0	0	1
	Erosion en rigole	1	1	0	2
	Erosion ravine	1	0	0	1
	Complexe	1	5	0	6
	Glissement rotationnel	1	3	0	4
	Coulée boueuse	0	2	0	2
	Glissement translationnel	16	11	2	29
	Fissure	0	3	0	3
	Effondrement	0	2	1	3
Total		41	33	4	78

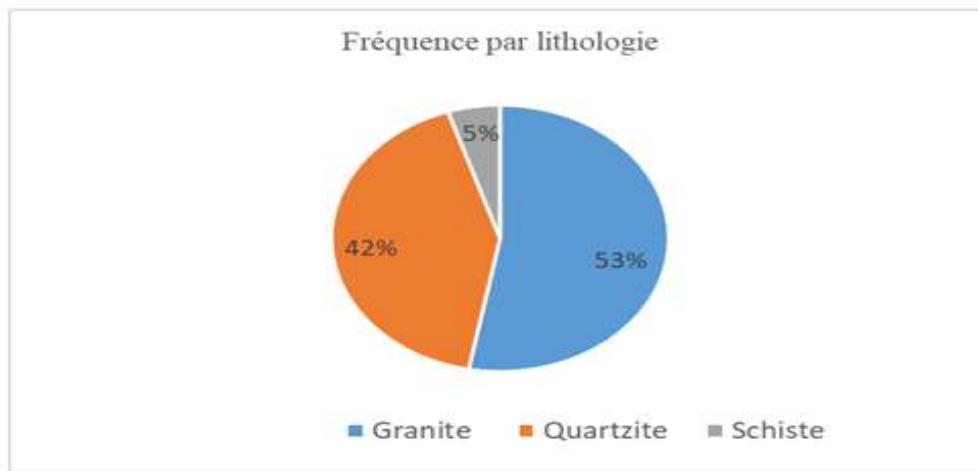


Figure 21: Fréquence par lithologie

L'analyse de la répartition des formations lithologiques dans la zone d'étude montre une nette dominance du granite, qui représente 53 % des occurrences, suivi du quartzite avec 42 %, tandis que le schiste reste très faiblement représenté avec seulement 5 %.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Cette distribution indique que le substrat géologique est majoritairement constitué de roches dures mais leur altération peut produire des matériaux meubles susceptibles de favoriser certains types de mouvements de masse, notamment sur des pentes fortes.

B		Pédologie			
		Limono-argileux	Argilo-sableux	Argiles	Total
Type de mouvement de terrain	Eboulement	17	1	8	26
	Affaissement	1	0	0	1
	Affouillement	1	0	0	1
	Erosion en rigole	0	2	0	2
	Erosion ravine	0	1	0	1
	Complexe	0	2	4	6
	Glissement rotationnel	0	1	3	4
	Coulée boueuse	0	0	2	2
	Glissement translationnel	10	7	12	29
	Fissure	0	0	3	3
	Effondrement	1	2	0	3
Total		31	16	31	78

Fréquence par nature du sol (Pedologie)

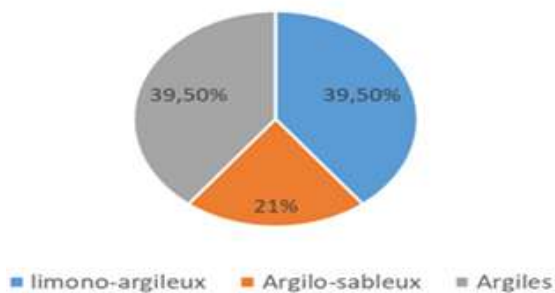


Figure 22: Fréquence par pédologie

La répartition pédologique montre une dominance des sols limono-argileux et argileux (39,50 % chacun), tandis que les sols argilo-sableux sont moins représentés (21 %).

Cette structure indique une forte proportion de sols fins, généralement sensibles à la rétention d'eau et à l'instabilité.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

C		Contact _ Fracturation		
		Oui	Non	Total
Type de mouvement de terrain	Eboulement	16	10	26
	Affaissement	0	1	1
	Affouillement	0	1	1
	Erosion en rigole	0	2	2
	Erosion ravine	0	1	1
	Complexe	4	2	6
	Glissement rotationnel	2	2	4
	Coulée boueuse	1	1	2
	Glissement translationnel	20	9	29
	Fissure	3	0	3
	Effondrement	1	2	3
Total		47	31	78

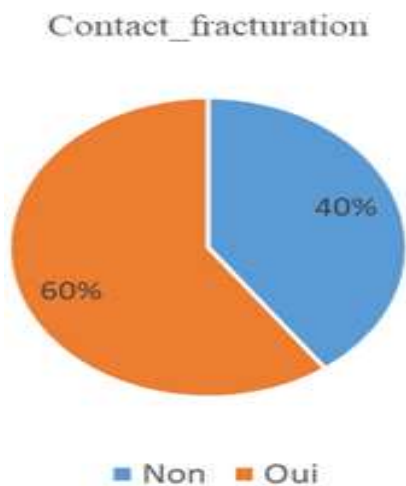


Figure 23: Contact avec fracturation

L'analyse montre que 40 % des roches de la zone présentent une fracturation, contre 60 % non fracturées. Cette fracturation bien que moins dominante constitue un facteur non négligeable de fragilisation des roches.

Elle peut aussi favoriser localement l'infiltration de l'eau et le déclenchement des mouvements de masse.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

D	Composantes	Classification	Fréquence	Superficie(ha)
LULC	Zone bâtie	Elevé	4	486,51
	Végétaux (Champs de cultures, prairies)	Modéré	3	972,15
	Forêt	Faible	2	185,76
Total				1644,42

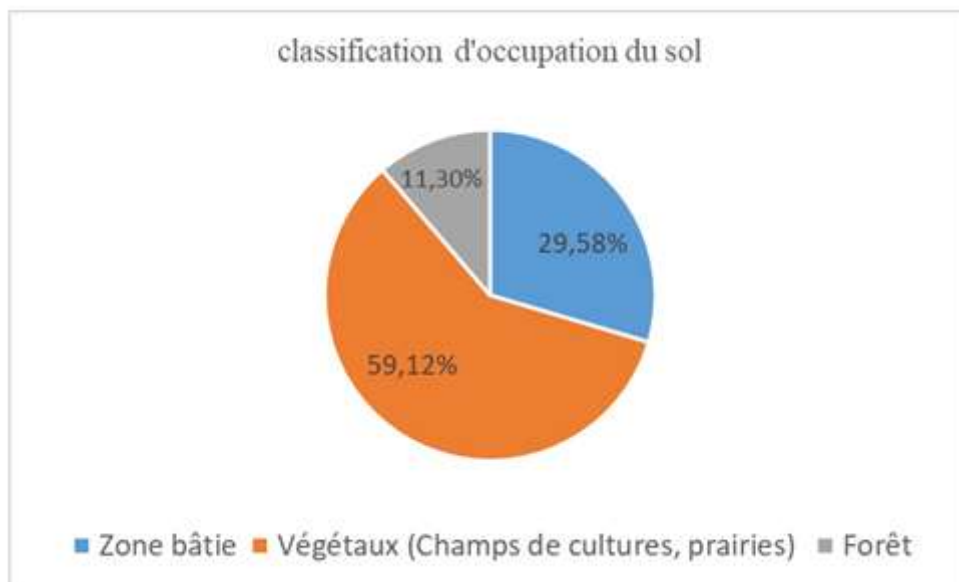


Figure 24: Classification d'occupation du sol

L'occupation du sol montre une dominance de la végétation (59,12 %), suivie des zones bâties (29,58 %) et d'une faible proportion de forêt (11,30 %). Cette configuration traduit une couverture végétale importante mais peu dense, avec une pression anthropique notable.

La réduction des surfaces forestières pourrait ainsi diminuer la stabilité des sols et favoriser les mouvements de masse.

E	Contact _ RH
---	--------------

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

		Oui	Non	Total
Type de mouvement de terrain	Eboulement	21	5	26
	Affaissement	1	0	1
	Affouillement	1	0	1
	Erosion en rigole	2	0	2
	Erosion ravine	1	0	1
	Complexe	6	0	6
	Glissement rotationnel	3	1	4
	Coulée boueuse	2	0	2
	Glissement translationnel	16	13	29
	Fissure	3	0	3
	Effondrement	2	1	3
Total		58	20	78

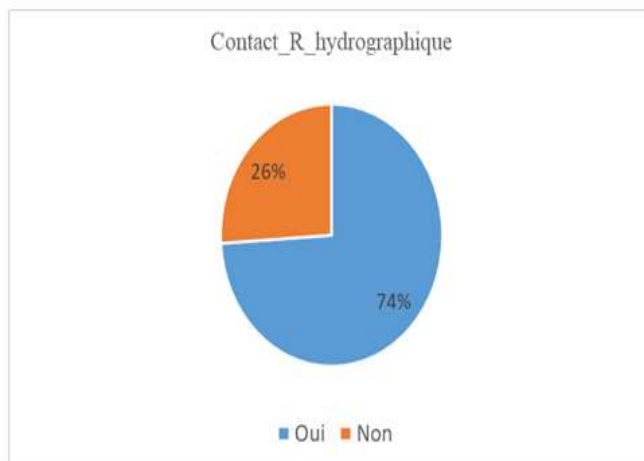


Figure 25: Contact avec le réseau hydrographique

La majorité de la zone (74 %) est en contact avec le réseau hydrographique, contre 26 % sans influence directe. Cette forte proximité favorise la saturation des sols et l'érosion des versants.

Elle constitue ainsi un facteur important de déclenchement des mouvements de masse.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

F		Altitude			
		900-1300m	1300-1500m	1500-2000m	Total
Type de mouvement de terrain	Eboulement	16	8	2	26
	Affaissement	1	0	0	1
	Affouillement	1	0	0	1
	Erosion en rigole	1	1	0	2
	Erosion ravine	1	0	0	1
	Complexe	1	5	0	6
	Glissement rotationnel	0	3	1	4
	Coulée boueuse	0	2	0	2
	Glissement translationnel	12	9	8	29
	Fissure	0	2	1	3
	Effondrement	1	2	0	3
Total		34	32	12	78

Fréquence par Altitude (m)

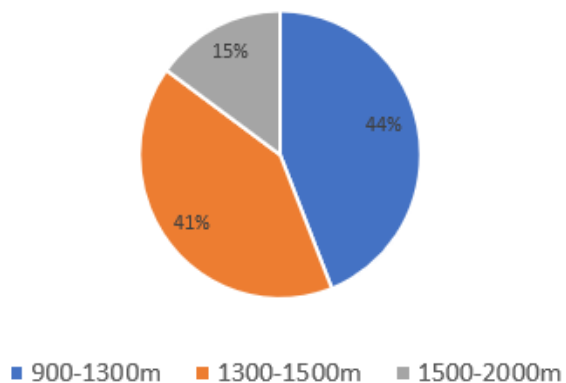


Figure 26: Fréquence par altitude

La distribution altitudinale montre une dominance des classes 900 - 1300 m (44 %) et 1300 - 1500 m (41 %), tandis que les altitudes élevées (1500–2000 m) sont moins représentées (15 %).

Cette configuration indique que la majorité des zones se situe à des altitudes intermédiaires. Ces niveaux peuvent présenter des pentes modérées à fortes, favorisant ainsi les mouvements de masse.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

G		Exposition						
		Est	N-E	N-W	S-W	S	S-E	Total
Type de mouvement de terrain	Eboulement	4	1	8	8	0	5	26
	Affaissement	0	0	0	1	0	0	1
	Affouillement	0	0	0	1	0	0	1
	Erosion en rigole	0	0	0	1	0	1	2
	Erosion ravine	0	0	0	1	0	0	1
	Complexe	4	0	1	0	0	1	6
	Glissement rotationnel	2	0	0	0	0	2	4
	Coulée boueuse	1	0	0	0	0	1	2
	Glissement translationnel	6	2	6	5	3	6	29
	Fissure	1	0	0	0	1	0	3
	Effondrement	0	2	0	0	0	1	3
Total		20	5	15	17	4	17	78

Fréquence par Exposition

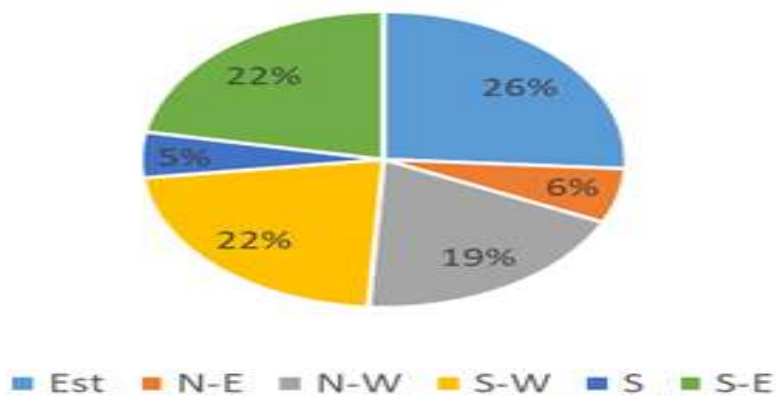


Figure 27: Fréquence par exposition des versants

L'exposition des versants est dominée par les orientations Est (26 %), Sud-Ouest (22 %) et Sud-Est (22 %), suivies du Nord-Ouest (19 %), tandis que le Nord-Est (6 %) et le Sud (5 %) sont faiblement représentés.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Cette distribution traduit une prédominance des versants recevant un ensoleillement variable selon la saison. Les orientations Est et Sud peuvent favoriser une alternance humidité–dessèchement des sols. Ces conditions influencent la stabilité des terrains et peuvent moduler la susceptibilité aux mouvements de masse.

III.4. Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la zone d'étude

Dans ce travail de recherche, la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain a été réalisée en tenant compte des paramètres ayant une influence sur l'instabilité de terrain du bassin versant de la rivière Gikoma (Figure 28).

Les différents facteurs ont été combinés pour produire la carte de susceptibilité aux mouvements de terrain. La cartographie de la susceptibilité a été faite en compilant 4 cartes (la pente, la lithologie, le réseau hydrographique et l'exposition des versants) directement liés aux mouvements de terrain.

La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain a été faite en utilisant une approche spatiale multicritère basée sur le SIG. Le poids pour chaque facteur est attribué à l'aide du processus de hiérarchie analytique (AHP) en fonction de son influence sur l'occurrence du glissement de terrain.

Les critères respectifs de pondération obtenus pour les caractéristiques (critères) considérées importantes à l'élaboration de la carte de probabilité de glissements. Les critères utilisés, par ordre de priorité, ont été, respectivement : pente, réseau hydrographique, lithologie, pédologie, fracturation, exposition et utilisation ou occupation du sol (LULC). Dans le but d'assurer la qualité des données obtenues, une matrice de comparaison par paire a été construite avec les différentes classes d'un même critère et ensuite entre les différents critères ou paramètres liés aux mouvements de terrain.

Selon (Saaty & Vargas, 1987), si le ratio de cohérence (RC) est inférieur à 0,10, la matrice de comparaison par paire est acceptable, par contre, s'il est supérieur à 0,10, on reprend tout le processus de la matrice de comparaison par paire.

Pour notre cas, la valeur de RC est de 0,083. Le ratio de cohérence est inférieur au seuil de 0,1, ce qui signifie que le risque de mouvements de terrain est élevé.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Tableau 12: Matrice de comparaison par paire des facteurs de l'aléa

Facteurs	Pente	R_H	Lithologie	Pédologie	Fracturation	Exposition	LULC	Poids
Pente	1	2	3	4	5	6	7	0,317
R_H	0,623	1	2	3	4	5	6	0,214
Lithologie	0,385	0,623	1	2	3	4	5	0,169
Pédologie	0,251	0,385	0,623	1	2	3	4	0,129
Fracturation	0,13	0,251	0,385	0,623	1	2	3	0,068
Exposition	0,098	0,13	0,251	0,385	0,623	1	2	0,057
LULC	0,086	0,098	0,13	0,251	0,385	0,623	1	0,046

RC = 0.083

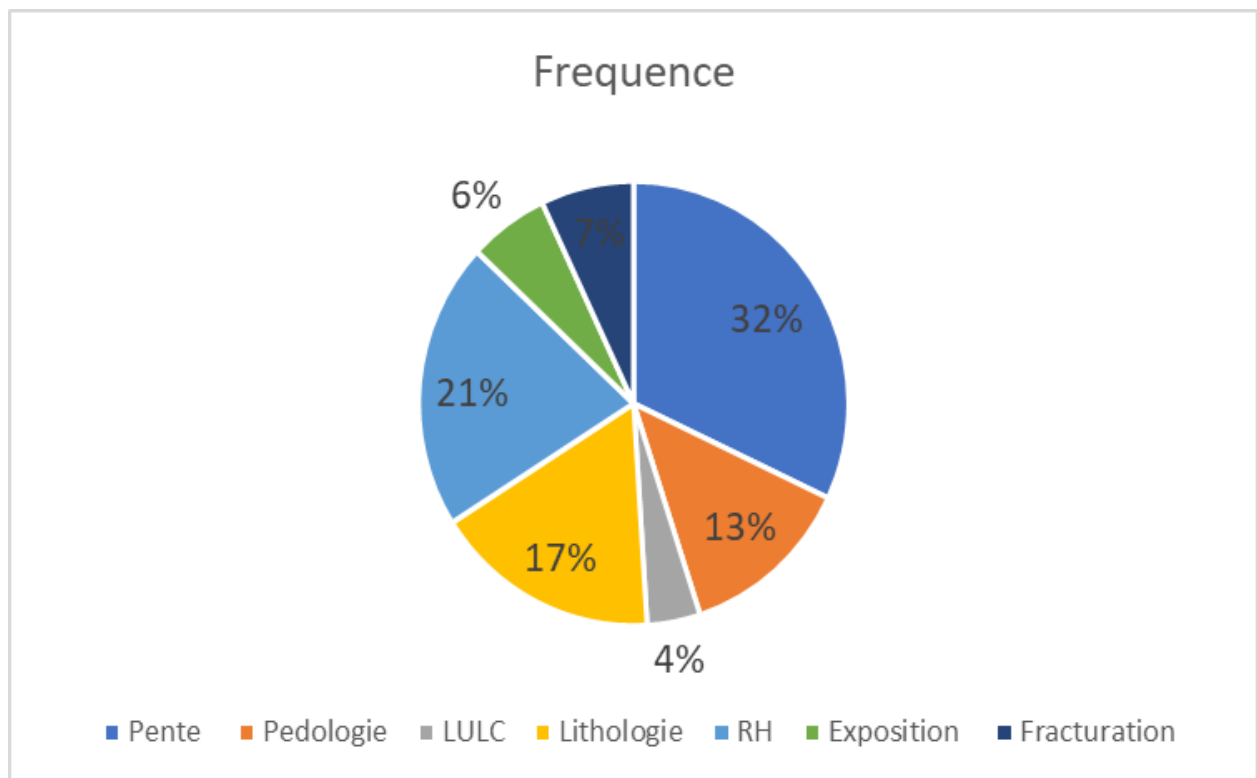


Figure 28: Pondération des différents paramètres susceptible d'influencer les glissements de terrain

La carte de susceptibilité a permis de montrer les différentes zones à risque des mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma. Le bassin versant de la rivière Gikoma est une zone où se produisent divers phénomènes naturels

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Il se subdivise en deux zones principales à savoir la zone des Mirwa qui est une région à haut risque des mouvements de terrain et la zone de la plaine de l'Imbo est une région à risque d'inondation (Figure 23).

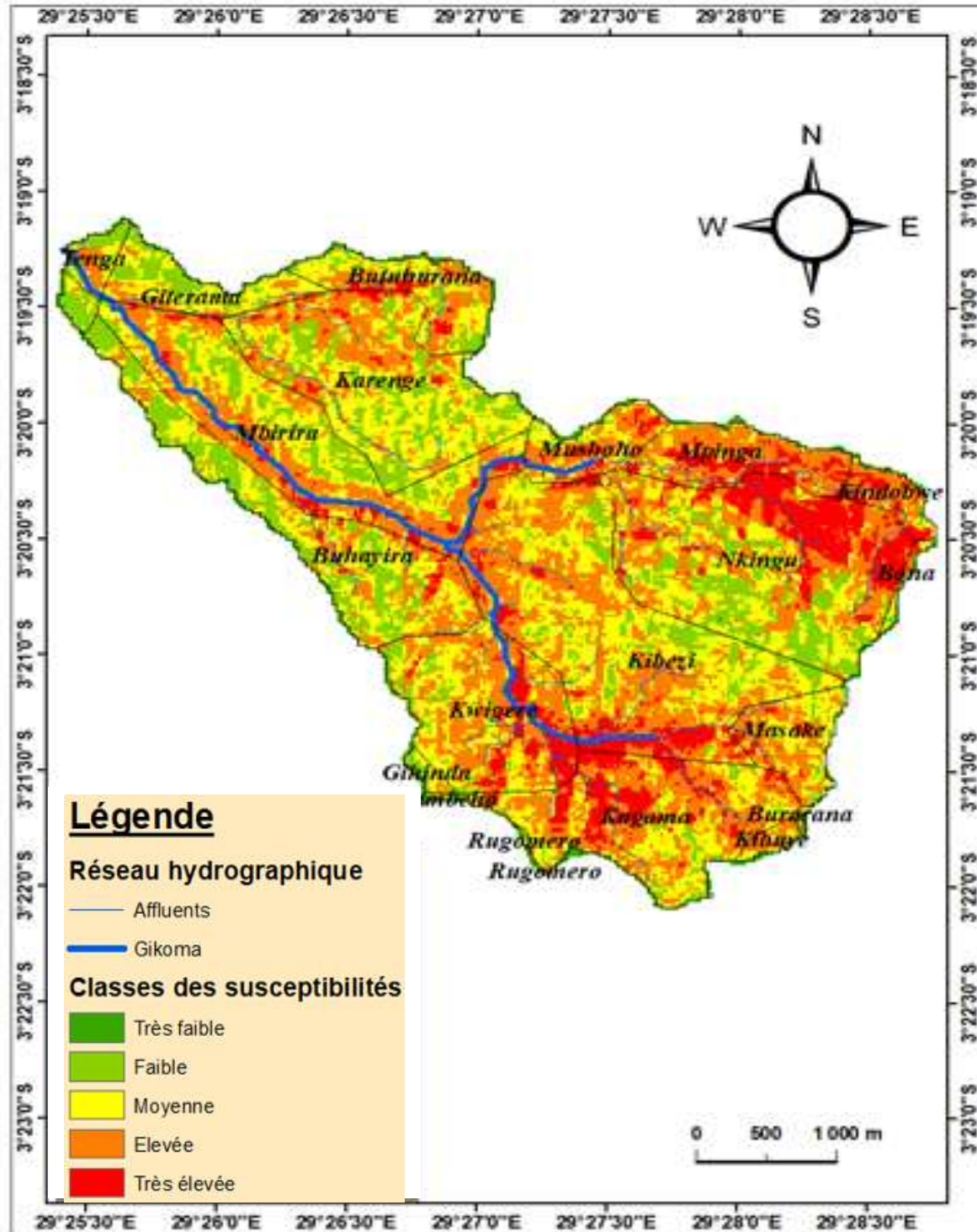


Figure 29: Carte de probabilité aux instabilités de terrain du bassin versant Gikoma

III.5. Interprétation et discussion des résultats**III.5.1. Interprétation des résultats**

La vulnérabilité face aux mouvements de terrain de la zone d'étude est due à son substrat géologique qui est dans sa majeure partie constituée de roches très susceptibles à l'altération, mais également à la permanence de longues et raides pentes. Le substrat géologique de la zone d'étude est constitué par les schistes, granites et quartzites.

Ces roches sont susceptibles aux mouvements de terrain notamment les glissements de terrain, éboulements, effondrements, érosion hydrique, fissure de terrain, etc.

Dans notre zone d'étude, les pentes sont très fortes et variables. Les valeurs des pentes varient entre 0 à 57 %. La plaine est caractérisée par les vallées en U et l'absence des glissements de terrain. Les Mirwa sont caractérisées par les vallées en V et les glissements de terrain pendant la période des précipitations torrentielles.

La pente est un facteur important de l'érosion hydrique à la surface de la terre. Dans la nature, plus la pente est longue, plus le ruissellement est fréquent et s'accompagne du délabrement des versants. Les glissements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma sont dus à des facteurs variés entre autres la topographie très accidentée, la nature de la roche en place, la pédologie, le réseau hydrographique, l'exposition des versants, la pente et l'occupation du sol. Ces facteurs ont une influence sur l'accélération de l'instabilité de la zone d'étude.

Pour étudier la dynamique d'occupation du sol, nous avons utilisé des images satellitaires de Landsat 7, 8 et 9 ayant des capteurs respectifs ETM+, OLI/TIRS. Ainsi, l'analyse des images satellitaires nous a permis de voir les changements d'affectation des terres depuis les années de 2002 à 2024.

La classification non supervisée a été utilisée lors de l'analyse des images satellitaires de 2002, 2014 et 2024. Les résultats obtenus ont permis de montrer la dynamique d'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Gikoma sur une période de vingt-deux ans. Les résultats montrent également que la végétation et forêt ont connu une grande régression au moment où la zone bâtie a augmenté de façon exponentielle pendant cette période. Les classes d'occupation du sol occupent des superficies qui sont variables.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

La végétation et la forêt naturelle occupent un pourcentage respectif de 45,85 % et 54,15 % en 2002. Le sol de la zone d'étude est couvert d'une végétation naturelle. Au cours de cette période de 2002, on observe l'absence de l'anthropisation du bassin versant de la rivière Gikoma.

Après plus d'une décennie, l'homme commence à occuper le bassin versant de la rivière Gikoma en pratiquant les activités champêtres. Vers les années 2014, la figure 13 montre que la végétation a connu une forte augmentation en passant de 45, 85% en 2002 à 74,30% en 2014.

Cette variation de la classe de végétation est due au fait que l'homme a commencé à pratiquer l'agriculture, ce qui a occasionné l'augmentation de la superficie occupée par la végétation (champs de cultures). Par conséquent, l'anthropisation de la zone d'étude vers 2014 a entraîné aussi la diminution de la superficie occupée par la forêt car l'homme dégradait la forêt en cherchant du bois pour le chauffage, construire les maisons, faire l'extension des espaces cultivables etc. La zone bâtie est occupée par 4,37 % en 2014 et cela montre que c'est le début de la déstabilisation du bassin versant de la rivière Gikoma.

La zone bâtie a fortement augmenté en passant de 4,37 % en 2014 à 29,58 % en 2024. Le fait que la zone bâtie est élevée, cela explique que la classe de forêt est menacée par les activités de l'homme. La variation de la classe de forêt a passé de 21,33 % en 2014 à 11,3 % en 2024. Cette diminution de la classe de forêt montre que la présence de l'homme dans le bassin versant de la rivière est un facteur qui joue un rôle primordial dans la dégradation du milieu naturel.

La figure 24 montre l'évolution de l'occupation du sol dans la zone d'étude. L'affectation de la classe de forêt a été l'un des facteurs qui a contribué à la déstabilisation du bassin versant de la rivière Gikoma. Cette déstabilisation a aussi contribué à des mouvements de terrain actuellement observés au niveau dans la zone d'étude. D'une manière générale, l'occupation du sol peut aussi exacerber ou atténuer les risques des mouvements de terrain. Une zone occupée par la végétation présente souvent un risque faible par rapport à un sol nu.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

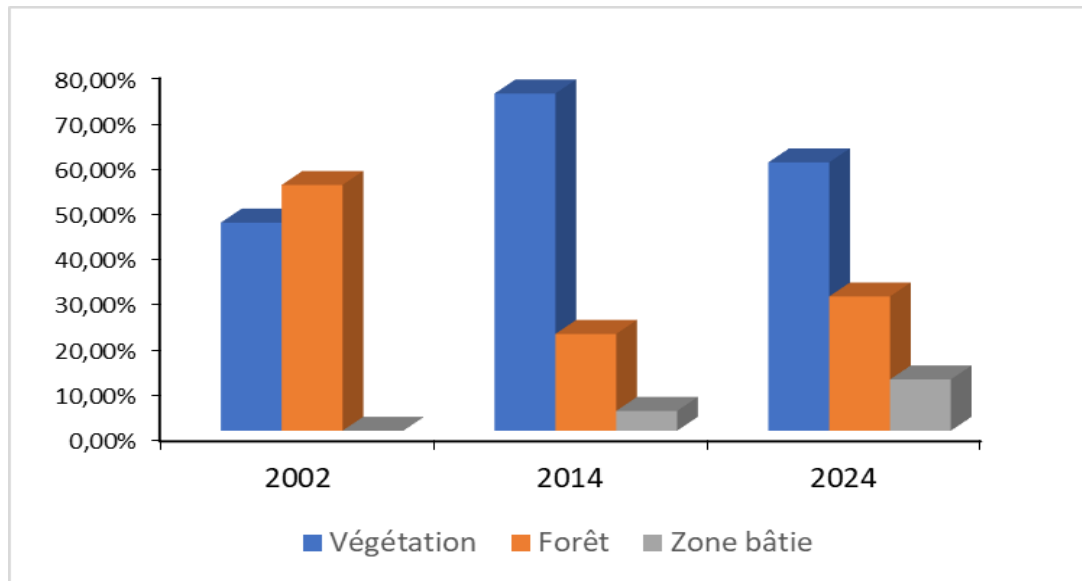


Figure 30: Evolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de Gikoma

Le constat fait à partir de l'analyse comparative des différents travaux de recherche sur le bassin versant de Gikoma, nous pouvons dire que le nombre de mouvements de terrain a continué à augmenter au fur et à mesure du temps. L'évolution de l'occupation du sol montre que la zone bâtie prend le devant dans le bassin versant de la rivière Gikoma en 2024.

III.5.2. Discussion des résultats

Les mouvements de terrain sont dus à plusieurs facteurs entre autres la lithologie, la pédologie, fracturation des roches, l'occupation du sol, réseau hydrographique, la pente et l'exposition des versants de la rivière Gikoma. La zone d'étude est caractérisée par la topographie très accidentée, les pluies torrentielles et une diminution de la couverture végétale entraînant une augmentation de ruissellement sur la surface du sol au détriment de l'infiltration dans le sol.

Les précipitations jouent un rôle important et direct dans le déclenchement des instabilités de terrain. L'altération résulte de l'action des agents climatiques sur les roches ou sur tout autre objet présent à la surface de la terre. Elle est donc fonction du climat, de la nature de la roche, de la structure géologique et du relief.

L'érosion hydrique est le facteur le plus important de la dégradation de l'environnement dans le bassin versant de la rivière Gikoma. La pente est alors un facteur important de l'érosion hydrique à la surface de la terre. Dans la nature, plus la pente est longue, plus le ruissellement est fréquent et s'accompagne du délabrement des versants.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Dans notre travail d'étude, les types de mouvements de terrain ont été inventoriés comme la figure 15 le montre. Il s'agit : éboulements, glissements rotationnels et translationnels, complexes, effondrements, fissures, érosion hydrique et coulées boueuses.

Une étude a été faite sur le bassin versant de la rivière Gikoma durant la période de 2015. Cette étude était centrée sur la typologie et l'évaluation de l'impact des mouvements de masse sur le plan socio-économique. Selon (Sindayihebura, 2015), sur 37 glissements répertoriés, 22 étaient en contact avec les cours d'eau. Le cas est observable sur tous les cours d'eau de la zone d'étude : plus fréquent sur Gikoma.

Avec un inventaire des mouvements de terrain lors de notre visite sur terrain et à l'aide des images Google Earth, nous avons identifiés 78 mouvements de terrain (Eboulements (37,20 %), glissements rotationnel (7,69%) et translationnel (26,92%), complexes (6,41%), effondrements (8,97%), fissures (3,85%), érosion hydrique (3,85%), coulées boueuses (2,56%), affouillements (1,28%) et affaissements (1,28%) Notre étude montre que les éboulements sont plus dominants par rapport aux mouvements de terrain énumérés ci-dessus.

De tous les autres mouvements de terrain, nous devons signaler en passant que les éboulements des berges sont le facteur pesant des glissements le long de la rivière Gikoma et ses affluents à savoir Kgezi, Nkuri et Karunga. Pour les mouvements de terrain qui se déclenchent au contact des cours d'eau, les conditions de drainage comptent en premier lieu. Dans le bassin versant de la rivière Gikoma où l'écoulement est torrentiel, les hautes eaux font des chocs aux berges par sapements. Des fois, ces berges s'écroulent dans les lits des rivières et la stabilité des versants se retrouve menacée.

Par conséquent, les mouvements de terrain sont nombreux à cause de la présence de l'homme dans le bassin versant de la rivière Gikoma. L'homme déstabilise la zone d'étude en déboisant les forêts pour des fins agricoles, construction des maisons, excavation des matériaux de construction, le déboisement etc. Cependant, le plus souvent, on construit dans des zones marginales en violant ainsi les normes de l'environnement et d'aménagement. L'extraction anarchique des moellons, graviers et le sable dans la rivière Gikoma contribue également à la fragilisation des berges du cours d'eau et provoque à long terme l'effondrement des berges.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Etant donné que l'étude précédente n'a pas pu réaliser une carte de susceptibilité aux mouvements de terrain du bassin versant de la rivière Gikoma, le présent travail de recherche vient de produire une carte de susceptibilité aux mouvements de terrain de la zone d'étude.

La cartographie montre la vulnérabilité causée par les mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma. Parmi les sous collines les plus susceptibles aux mouvements de terrain sont entre autres : Kindobwe, Kagoma, Kwigere, Masake et le long des cours d'eau (Gikoma, Kigezi, Nkuri et Karunga).

Plusieurs facteurs sont à la base de la vulnérabilité de la région des Mirwa. Il s'agit des facteurs naturels et des facteurs humains ou les activités anthropiques. La géomorphologie du bassin versant de la rivière Gikoma montre un caractère très sensible aux mouvements de terrain. La présente zone d'étude se trouve dans la région bordant le grand fossé Est-africain et qui est constitué par des pentes très raides. Par conséquent, cela explique ainsi la vulnérabilité grandissante des Mirwa, associé directement aux mouvements de terrain. La zone des piémonts correspond à des formations du pléistocène moyen et supérieur composés de dépôts lacustres et fluvio-lacustres. La lithologie de la zone d'étude est très favorable à des crises morphogénétiques à cause de leur vulnérabilité. La lithologie dominante de notre zone d'étude est constituée par des schistes, granites et quartzites.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La zone d'étude a une superficie de 1644,42 ha et un périmètre de 20783,16 m. Selon l'ordre de grandeur, nous avons distingué 3 grands affluents de la rivière Gikoma : Kigezi, Nkuri et Karunga. Cette zone d'étude a une forme allongée et favorise la collecte des eaux pluviales vers l'exutoire commun.

Le bassin versant de la rivière Gikoma s'étend sur deux parties principales : la partie de la plaine de l'Imbo caractérisée par une topographie moins accidentée à risque d'inondation et la partie de la région des Mirwa caractérisée par une topographie très accidentée à risque des mouvements de terrain.

Au terme de notre travail, il apparaît que les mouvements de terrain du bassin versant dans le bassin versant de la rivière Gikoma sont influencés par les différents facteurs d'origine naturels et anthropiques.

La nature des roches des Mirwa, classées généralement dans la catégorie des roches précambriennes. Elles sont constituées par un ensemble des roches métamorphiques, des intrusions granitiques, des intrusions basiques, des gneiss et le complexe de Buhonga (granites, quartzites et des schistes) et favorisant les mouvements de masse (les glissements de terrain, éboulements, effondrements, érosion hydrique, fissures de terrain).

Les précipitations élevées de la région des Mirwa favorisent l'altération rapide des roches et la susceptible aux ruptures de pente. Les Mirwa sont les sièges des fortes précipitations pendant la période pluvieuse.

Le bassin versant de la rivière Gikoma est constituée par des roches suivantes : les granites, quartzites et schistes. Ces structures rocheuses ne s'opposent pas aux mouvements de terrain sous un climat aux séquences sèches et humides. La plupart des mouvements de terrain se produisent après la tombée d'une forte pluie. L'eau s'infiltré rapidement au cours des fortes précipitations et augmente le degré de saturation et la fréquence des glissements de terrain.

Les résultats obtenus après le traitement des images satellitaires ont montré que les activités anthropiques contribuent à la déstabilisation de la zone d'étude. On a constaté que la forêt a connu une grande dégradation au moment où la zone bâtie a augmenté de façon exponentielle pendant cette période.

Dans la zone d'étude, l'agriculture se fait sans tenir compte des pentes car elle se fait dans le sens de la pente. La susceptibilité aux mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma augmente alors avec la pente. Le paysage géomorphologique de la zone d'étude est caractérisé par un relief accidenté car les pentes sont abruptes.

En outre, nous pouvons dire que nos hypothèses sont vérifiées et que la cause de la déstabilisation du bassin versant en amont de la rivière Gikoma serait due à la dégradation de l'environnement émanant des facteurs d'origine naturelle et anthropique. En plus, le paysage géomorphologique accidenté de la zone d'étude est aussi à l'origine des mouvements de terrain. Le relief de la zone d'étude favorise une forte érosion hydrique causée des eaux pluviales car la pente est abrupte.

Ensuite, la pente est l'un des principaux facteurs pris en compte dans l'étude de la susceptibilité aux instabilités de terrain. Notre zone d'étude est sous menace des instabilités comme les glissements de terrain, éboulements, effondrements, complexes, érosion hydrique, fissures de terrain, affouillements et affaissements. Ces mouvements de terrain sont causés par les facteurs suivant : la pente, le réseau hydrographique, la lithologie, la pédologie, fracturation des roches, l'occupation du sol et l'exposition des versants de la rivière Gikoma. Ces instabilités ont pour conséquences la destruction des champs de cultures, des maisons d'habitation et les infrastructures publiques notamment la RN1 et le mur de soutènement de la berge de la rivière Gikoma etc. Ces destructions ont un impact sur le plan socio-économique, et parfois entraînent des pertes de vies humaines.

Pour atténuer les mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma, le présent travail nous pousse à formuler quelques recommandations ci-après :

- Eviter à construire et cultiver sur les zones instables ;
- Faire le curage normé des matériaux de construction dans la rivière Gikoma et ses affluents ;
- Remettre en état les sites d'exploitation des matériaux de construction ;
- Aménager le bassin versant de la rivière Gikoma ;
- Reboiser des arbres en amont du bassin versant de la rivière Gikoma afin de restaurer le paysage forestier ;
- Stabiliser les berges de la rivière Gikoma et ses affluents par le génie de végétal ;

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

- Continuer des recherches pouvant nous compléter ou apporter encore plus de la lumière sur les mouvements de terrain dans le bassin versant de la rivière Gikoma. Ces recherches permettront de constituer une base de données qui servira à la gestion du bassin versant de la rivière Gikoma en tenant compte des risques probables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abderrahim, A. (2014). *Analyse du glissement de terrain du versant de Tizirt. (parie Ouest)*
[PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou].
<https://dspace.ummto.dz/items/aa24ba18-7ae6-411d-835c-60011fd4310d>
- Bachinyaga Mugisho,. (2024). *Evolution récente des glissements de terrain dans les collines de Bujumbura : Une analyse spatio-temporelle des processus et des impacts associés.*
- Baga Wendzoodo A,. (2023). *Travail de fin d'études [BR]-Travail de recherche personnel [BR]-Travail d'expertise interdisciplinaire Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar.*
<https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/18895>
- Chebbani R., R., Djilli, K., & Roose, E. (1999). Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bulletin ORSTOM, Réseau Erosion*, 19, 85-95.
- Chhun, S. (2013). *Etude de la stabilité des berges de rivière soumises à la marée* [PhD Thesis, INSA de Rennes]. <https://theses.hal.science/tel-00957294/>
- Guirous L., L., Dubois, L., & Melbouci, B. (2014). Contribution à l'étude du mouvement de terrain de la ville de Tizirt (Algérie). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(4), 971-986. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0624-6>
- Hakiza, G. (2002). *Potentialités Aquifères de la Plaine de la Rusizi (Au nord du lac Tanganika, Burundi).* Université de Liege (Belgium).
<https://search.proquest.com/openview/d1e60ab58081c975f0f818ae55592b8c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

- Harmouzi H., Dekayir, A., Rouai, M., & Mb Afechkar. (2018). Analyse géomorphologique et géologique du glissement de terrain d'Akchour (Rif, Maroc). *Geo-Eco-Trop*, 42(1), 19-32.
- Kabanyegeye, H., Useni Sikuzani, Y., Sambieni, K. R., Masharabu, T., Havyarimana, F., & Bogaert, J. (2021). Trente-trois ans de dynamique spatiale de l'occupation du sol de la ville de Bujumbura, République du Burundi. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 18(1). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/256070>
- Kouadio B.H., Kouame, K. J., Sika, B., Ake, G. E., N'Guessan Bi, V. H., & Yapi, A. F. (2020). Utilisation des SIG et de la télédétection pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant dans l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Risque hydrométéorologique. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 1(221), 3-21. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2019.428>
- 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>
- Kubwimana D, Brahim, L. A., & Abdelouafi, A. (2021). A new approach in the development and analysis of the landslide susceptibility map of the hillslopes of Bujumbura, Burundi. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 26-34.
- Kubwimana D., Mahfoud, B., Olivier, D., Abdellah, A., & Tarik, B. (2018). Landslides susceptibility assessment using AHP method in Kanyosha watershed (Bujumbura-Burundi) : Urbanisation and management impacts. *MATEC web of conferences*, 149, 02071. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/08/mateconf_cmss2018_02071/mateconf_cmss2018_02071.html

- Lahmidi Alla E. (2021). *Utilisation des SIG pour la modélisation de la susceptibilité des terrains aux glissements de terrain dans la région de Bouira* [PhD Thesis, Faculté des Sciences et Technologies]. <https://dspace.univ-bba.dz/items/1643cc8c-edc8-4997-9ba9-4f37598007d8>
- Locat, J., & Leroueil, S. (2019). *Changements climatiques et mouvements de terrain*. Travaux d'élaboration du plan d'électrification et de changements climatiques.
- Martins-Campina, B. (2005). *Le rôle des facteurs géologiques et mécaniques dans le déclenchement des instabilités gravitaires : Exemple de deux glissements de terrain des Pyrénées Atlantiques (Vallée d'Ossau et Vallée d'Aspe)*. [PhD Thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I]. <https://theses.hal.science/tel-00324072/>
- Mateso, J.-C. M., & Dewitte, O. (2014). Vers un inventaire des glissements de terrain et des éléments à risque sur les versants du Rift à l'ouest du lac Kivu (RDC). *Geo-Eco-Trop*, 38(1), 137-154.
- Mebirouk, N., Messat, S., & Ambrane, M. (19). *Note d'information technique paramètres et méthodes utilisés pour la cartographie des glissements de terrain parameters and methods used for landslide mapping*.
http://revue.enstp.edu.dz/images/68/article_mebirouk_RAE68.pdf
- Mohamed, Y., Noureddine, E., Khadija, N., Hadi, H. A., Abdelaziz, Y., & Fouad, B. (2017). Gestion Des Risques Majeurs Au Maroc : Les Instabilités De Terrain. *European Scientific Journal, ESJ*, 13(12), 46. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n12p46>
- Mouffok, M. (2014). *Etude de la stabilité du glissement de terrain de Tala Alem par pieux* [PhD Thesis].
<https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/ummtto/2615/1/Mouffok%2C%20Massinissa.pdf>

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

- 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>
- Nahimana, L. S. (2019). Nature et importance de l'érosion catastrophique dans la région du Kivu, Congo (ROC). *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens Contribution à l'agroécologie*, 34.
- 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. *Environnement urbain*.
- 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*. Université de Liège (Belgium).
<https://search.proquest.com/openview/b301b26b22e695d0f4ddbcbcbcccb7252/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Novotný Jan., (1978). *Varnes landslide classification*. November.
http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2_Varnes_landslide_classification.pdf
- Petley D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927-930.
- Pireh, H., Sarkar, A., Shrestha, S., Srinivasan, S., Okamoto, S., Turkeli, S., Chapagain, D., Kumar, N., Khawas, N. S., & Noubactep, C. (2025). Établissements humains et réduction des risques de catastrophes. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau: Montagnes et Glaciers: des châteaux d'eau*, 64.

Republique du Burundi. (2018). *Plan de contingence de la commune Isare*.

https://ewdata.rightsindevelopment.org/files/documents/13/WB-P160613_gyZde59.pdf

Roose, E., Cherbani, R., & Bourougaa, L. (2001). Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 11(4), 317-326.

Sabushimike J.M. (2015). *Vulnérabilité des bassins versants de la région des Mirwa : Impacts socioéconomiques et environnementaux*.

Sindayihebura B. (2005). *De l'Imbo au Mirwa. Dynamique de l'occupation du sol, croissance urbaine et risques naturels dans la région de Bujumbura (Burundi)* [PhD Thesis, Toulouse 2]. <https://theses.fr/2005TOU20013>

Sindayihebura F. (2015). *Glissements de terrain dans le Bassin Versant de la rivière Gikoma : Des processus aux effets*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33443.84007>

Tameur N.I. (2019). *Risques majeurs naturels en Algérie*. <https://dspace.univ-constantine3.dz/jspui/handle/123456789/3133>

Toko, Y. B., Dangnisso, B., Kankpenandja, L., & Gnongbo, T. Y. (2023). Les facteurs déterminants de l'érosion dans le bassin versant de la rivière AKA au Sud-Ouest du TOGO. *Espace Géographique et Société Marocaine*, 1(69). <https://revues.imist.ma/index.php/EGSM/article/download/37961/19585>

Tomety, Y. D. (2017). *Exposition et vulnérabilité face aux risques d'inondation au Burkina Faso : Cas de la ville de Dori*. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/3277>

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In : Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds), *Landslide Analysis and control*, National Academy of Sciences. Transportation Research Board Special Report, 176, p. 11-33. Washington D.C. *Special report*, 176(11), 33.

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

Warda, H., & El Houda, S. N. (2017). *Rôle de la Végétation sur la stabilité de l'érosion hydrique et qualité des sols sur les piémonts nord du Dahra Ouest de Mostaganem Commune de Sidi Ali*. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/7126/HADID%20Warda.pdf>

ANNEXES

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

TYPE DE MOUVEMENTS DE TERRAIN IDENTIFIES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE GIKOMA EN 2024								
ID	Longitude	Latitude	Processus	Localité	Profondeur	Année	Contact	Matériau déplacé
01	29,42419°	-3,322822°	Erosion en rigole	Tenga	Superficielle	2024	Roche	Terre
02	29,425552°	-3,3242°	Erosion ravine	Tenga	Peu profonde	2024	Roche	Terre
03	29,424445°	-3,32261°	Eboulement	Tenga	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
04	29,42493°	-3,322881°	Eboulement	Tenga	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
05	29,428009°	-3,326909°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
06	29,428131°	-3,327189°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2019	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
07	29,426452°	-3,324933°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse
08	29,427525°	-3,326518°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2019	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
09	29,430870°	-3,331220°	Affaissement	Mbirira	Superficielle	2024	Route (RN1)	Terre
10	29,432047°	-3,331718°	Affouillement	Mbirira	Superficielle	2024	Rivière Gikoma	Terre
11	29,426963°	-3,325585°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
12	29,427502°	-3,325682°	Translationnel	Mbirira	Peu profond	2024	Roche	Terre
13	29,428372°	-3,327209°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
14	29,428664°	-3,327995°	Effondrement	Mbirira	Peu profond	2024	Roche	Terre
15	29,428911°	-3,3285°	Eboulement	Mbirira	Profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
16	29,42995°	-3,330005°	Eboulement	Mbirira	Profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
17	29,431785°	-3,331281°	Eboulement	Mbirira	Profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
18	29,432423°	-3,332138°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
19	29,433125°	-3,332816°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
20	29,433702°	-3,332979°	Effondrement	Mbirira	Profond	2024	Rivière Gikoma	Terre
21	29,434086°	-3,333678°	Eboulement	Mbirira	Profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
22	29,434472°	-3,334044°	Eboulement	Mbirira	Profond	2019	RG	Pierre rocheuse et terre
23	29,436305°	-3,335955°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	RG	Pierre rocheuse

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

								et terre
24	29,437418°	-3,336784°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	RG	Pierre rocheuse et terre
25	29,438831°	-3,338721°	Eboulement	Mbirira	Peu profond	2024	RG	Pierre rocheuse et terre
26	29,439644°	-3,338617°	Translationnel	Mbirira	Peu profond	2022	Roche	Terre
27	29,445656°	-3,340528°	Translationnel	Mbirira	Profond	2019	Roche	Terre
28	29,429442°	-3,328945°	Eboulement	Buhayira	Peu profond	2024	Rivière Gikoma	Pierre rocheuse et terre
29	29,446068°	-3,347629°	Eboulement	Buhayira	Peu profond	2024	Roche	Pierre rocheuse et terre
30	29,442098°	-3,344485°	Translationnel	Buhayira	Peu profond	2024	Roche	Terre
31	29,439292°	-3,343358°	Translationnel	Buhayira	Peu profond	2024	Roche	Terre
32	29,428182°	-3,329053°	Rotationnel	Buhayira	Peu profond	2024	Roche	Terre
33	29,426572°	-3,324487°	Eboulement	Giterama	Peu profond	2024	Rivière Karunga	Pierre rocheuse et terre
34	29,429721°	-3,324379°	Eboulement	Giterama	Peu profond	2024	Rivière Karunga	Pierre rocheuse et terre
35	29,431205°	-3,325156°	Translationnel	Giterama	Peu profond	2024	Roche	Terre
36	29,45029°	-3,358192°	Translationnel	Kwigere	Profond	2024	Roche	Terre
37	29,450522°	-3,358008°	Fissure	Kwigere	Peu profonde	2024	Roche	Terre
38	29,447919°	-3,355251°	Translationnel	Kwigere	Peu profond	2024	Roche	Terre
39	29,447911°	-3,357563°	Translationnel	Kwigere	Peu profond	2019	Roche	Terre
40	29,463913°	-3,355018°	Rotationnel	Kibezi	Peu profond	2024	Roche	Terre
41	29,461370°	-3,351538°	Coulée boueuse	Kibezi	Superficielle	2024	Roche	Terre
42	29,467718°	-3,353932°	Complexe	Masake	Peu profond	2024	Roche	Terre
43	29,461128°	-3,351700°	Eboulement	Kibezi	Profond	2022	Rivière Kivugwe	Pierre rocheuse et terre
44	29,46128°	-3,35167°	Eboulement	Kibezi	Profond	2024	Rivière Kivugwe	Pierre rocheuse et terre
45	29,461568°	-3,350905°	Eboulement	Kibezi	Profond	2022	Rivière Kivugwe	Pierre rocheuse et terre
46	29,462517°	-3,350440°	Translationnel	Kibezi	Peu profond	2024	Roche	Terre
47	29,460617°	-3,352752°	Translationnel	Kibezi	Peu profond	2024	Roche	Terre
48	29,460367°	-3,353147°	Complexe	Kibezi	Peu profond	2024	Roche	Terre
49	29,460233°	-3,353337°	Complexe	Kibezi	Profond	2022	Roche	Terre
50	29,459927°	-3,35366°	Complexe	Kibezi	Peu profond	2024	Roche	Terre
51	29,45991°	-3,353747°	Translationnel	Kibezi	Peu profond	2022	Roche	Terre
52	29,459435°	-3,35456°	Complexe	Kibezi	Profond	2024	Roche	Terre

Contribution à l'étude des mouvements de masse dans le bassin versant de la rivière Gikoma

53	29,459362°	-3,354582°	Eboulement	Kibezi	Profond	2024	Rivière Kivugwe	Pierre rocheuse et terre
54	29,458927°	-3,355017°	Translationnel	Kibezi	Profond	2024	Roche	Terre
55	29,458903°	-3,355107°	Eboulement	Kibezi	Profond	2024	Rivière Kivugwe	Pierre rocheuse et Terre
56	29,458998°	-3,354853°	Fissure	Kibezi	Superficielle	2024	Roche	Terre
57	29,459362°	-3,354582°	Translationnel	Kibezi	Peu profond	2024	Roche	Terre
58	29,461387°	-3,351552°	Fissure	Kibezi	Peu profond	2024	Roche	Terre
59	29,46351°	-3,355018°	Rotationnel	Kibezi	Profond	2024	Roche	Terre
60	29,458539°	-3,355564°	Translationnel	Kibezi	Peu profond	2014	Roche	Terre
61	29,464218°	-3,357845°	Rotationnel	Kagoma	Profond	2024	Roche	Terre
62	29,464232°	-3,357837°	Translationnel	Kagoma	Peu profond	2024	Roche	Terre
63	29,46421°	-3,357842°	Effondrement	Kagoma	Profond	2024	Roche	Terre
64	29,464303°	-3,357937°	Eboulement	Kagoma	Profond	2024	Roche	Pierre rocheuse et terre
65	29,463913°	-3,357708°	Effondrement	Kagoma	Profond	2024	Roche	Terre
66	29,461671°	-3,360226°	Translationnel	Kagoma	Peu profond	2014	Roche	Terre
67	29,461567°	-3,365562°	Translationnel	Kagoma	Peu profond	2014	Roche	Terre
68	29,478632°	-3,340678°	Effondrement	Kindobwe	Peu profond	2024	Route latéritique	Terre
69	29,477513°	-3,339427°	Eboulement	Kindobwe	Peu profond	2024	Route latéritique	Pierre rocheuse et terre
70	29,477068°	-3,338872°	Eboulement	Kindobwe	Profond	2024	Route latéritique	Pierre rocheuse et terre
71	29,476978°	-3,338633°	Translationnel	Kindobwe	Peu profond	2022	Roche	Terre
72	29,46762°	-3,353662°	Rotationnel	Masake	Profond	2024	Roche	Terre
73	29,467638°	-3,354068°	Coulée boueuse	Masake	Superficielle	2024	Roche	Terre
74	29,472420°	-3,354728°	Effondrement	Masake	Peu profond	2024	Roche	Terre
75	29,471358°	-3,354375°	Effondrement	Masake	Superficielle	2024	Roche	Terre
76	29,471162°	-3,354215°	Translationnel	Masake	Peu profond	2019	Roche	Terre
77	29,470505°	-3,354358°	Translationnel	Masake	Profond	2019	Roche	Terre
78	29,470867°	-3,354605°	Erosion en rigole	Masake	Superficielle	2019	Roche	Terre

Caractéristiques des satellites Landsat 7, 8, et 9 utilisées

Landsat 7 ETM+ Bands (mm)	Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514
	Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601
	Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692
	Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898
	Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749
	Band 6	60 m TIR-1	10.31 - 12.36
	Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345
	Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896
Landsat 8 ou 9 OLI and TIRS Bands (mm)	Band 1	30 m Coastal/Aeros	0.435 - 0.451
	Band 2	30 m Blue	0.452 - 0.512
	Band 3	30 m Green	0.533 - 0.590
	Band 4	30 m Red	0.636 - 0.673
	Band 5	30 m NIR	0.851 - 0.879
	Band 6	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651
	Band 7	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294
	Band 8	15 m Pan	0.503 - 0.676
	Band 9	30 m Cirrus	1.363 - 1.384
	Band 10	100 m TIR-1	10.60 - 11.19
	Band 11	100 m TIR-2	11.50 - 12.51