

N° d'ordre : 3619

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable

Structure de Recherche : Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement

Discipline : Sciences de la Terre

Spécialité : Géosciences, Risques Géologiques

Présentée et soutenue le 01/04/2022 par :

Désiré KUBWIMANA

Mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (Burundi): apport des géosciences, inventaire, caractérisation et prédiction d'un aléa par les méthodes géostatistiques

JURY

BOUDAD Larbi	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Président
KACIMI Ilias	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur, Examinateur
SAADI Mohammed	PH, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur, Examinateur
BOUABDLI Abdelhak	PES, Faculté des Sciences Université Ibn Tofail, Kenitra	Rapporteur, Examinateur
EL ADRAOUI Abdessamad	PES, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat	Examinateur
DEWITTE Olivier	PH, Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique	Co-Encadrant
AIT BRAHIM Lahsen	PES, Retraité, Expert Risques Géologiques, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat	Encadrant
TARIK Bahaj	PES, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat	Encadrant

Année Universitaire : 2021/2022

Dédicace

Je dédie ce travail

A mon très cher père : **feu NTAWUNDORERA Adrien**

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour, le respect et l'admiration que j'ai pour toi. Tu as supporté toutes mes études. L'amour que tu m'as donné depuis mon enfance, la dignité, l'éducation me servent de modèle. Mon adorable papa, tu es parti avant l'achèvement de cette recherche. Ce travail est le tien.

A ma très chère mère : **NGEZAHAYO Antoinette**

Ma maman d'amour, tu es une adorable mère. Tu as été mon réveil matin lorsque je devrais me rendre à l'école. Je n'oublierai jamais le petit déjeuner servi chaque matin que tu appelais "8heures". Tes larmes lors des pratiques du bizutage "Kunyuzura" quand j'étais orienté au cycle d'internat m'ont témoigné à quel point tu m'aimes. Maman, tu réclames toujours mon retour, cela me montre que tu penses toujours à moi. Je te souhaite encore longue vie pour savourer ensemble les délices de cette recherche.

A mes très chers enfants : **Win Darell & Sancta Dalwin**

Mes chers enfants, aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous. Je sais que mon absence physique vous perturbe et je vous remercie pour la patience. Je n'oublierai jamais que chaque fois que vous voyez l'avion en l'air, vous réclamez que je descende chez vous. Je vous remercie du fond de mon cœur pour avoir supporté l'éloignement lors de la réalisation de ce travail.

A mes frères et sœurs,

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon affection

Je couche mes derniers mots sur papier en dédiant cette thèse à ma plus chère épouse **KWIZERA Aline**. Tu as réussi à supporter mon absence pendant trois ans et tu es toujours restée à mes côtés malgré la distance. Cette thèse est à toi.

Remerciements

Cette thèse a été initiée au sein de la structure de recherche GEORISK (Risques Géologiques, Télédétection et Environnement) de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat; sous la direction du professeur **Lahsen AIT BRAHIM**, de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat de 2017 à 2018. Par la suite du professeur **Abdellah ABDELOUAFI (Rahimah Allah)**, de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat de 2019 à 2021 et le professeur **Tarik BAHAJ** de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V en 2022. Le professeur **Olivier DEWITTE** du Musée royal de l'Afrique centrale en Belgique a assuré la Co-direction de ma thèse dans le cadre d'une collaboration avec la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat.

Je remercie **Monsieur Larbi BOUDAD**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Président du jury. Chef du département des sciences de la terre. Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre. Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'être Président de mon Jury. Je vous adresse mes respects et mes sincères remerciements.

Je remercie **Monsieur Ilias KACIMI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Rapporteur et examinateur. Eminent professeur, merci, pour l'intérêt que vous avez manifesté envers ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma très haute considération. Votre présence dans ce jury, m'honore énormément.

Je remercie **Monsieur Mohammed SAADI**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat. Rapporteur et examinateur. Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre. Je vous adresse mes respects et mes remerciements pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'examiner le présent travail

Je remercie **Monsieur Abdelhak BOUABDI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences Université Ibn Tofail, Kenitra. Rapporteur et examinateur. Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre. Je vous remercie chaleureusement d'avoir accepté de juger ce travail. Votre présence dans ce jury, m'honore énormément.

Je remercie **Monsieur Abdessamad EL ADRAOUI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat. Examinateur. Spécialiste dans le domaine de Géologie et des mouvements de terrain. Merci d'avoir accepté d'examiner ce travail. Votre présence dans ce jury, m'honore énormément. Veuillez agréer le témoignage de mon respect et ma profonde gratitude.

Je remercie **Monsieur Olivier DEWITTE**, Co-directeur, Professeur Habilité, chercheur senior au Musée royal de l'Afrique centrale en Belgique, qui a participé à la direction mes travaux de thèse au cours du stage effectué dans le groupe de recherche dont il fait partie. Rigoureux et serviable, j'ai beaucoup appris avec lui. Je réitère mes remerciements pour votre disponibilité malgré vos nombreuses préoccupations scientifiques pour faire aboutir les articles. Votre disponibilité y compris les jours fériés m'a témoigné le grand sens de responsabilité dans l'encadrement de cette recherche. Merci pour son soutien scientifique, technique et moral avant et pendant la réalisation de cette recherche.

Monsieur Lahsen AIT BRAHIM, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat et Directeur de ma Thèse de 2017 à 2018, c'est avec une vive émotion que je vous remercie pour m'avoir accueilli et proposé ce sujet au sein de votre équipe de recherche Georisk grâce à laquelle j'ai pu découvrir le monde de la gestion des risques géologiques. Je vous suis reconnaissant pour le temps conséquent que vous m'avez accordé aussi bien pendant mon projet de fin d'études de Master que lors de la préparation de mon Doctorat. Vos qualités pédagogiques et scientifiques, votre rigueur et vos précieux conseils m'ont permis de résoudre les différents problèmes scientifiques rencontrés lors de la réalisation de ma thèse. Je réitère mes remerciements pour les efforts déployés pour faire aboutir mes articles dans des revues indexées Scopus. Merci aussi pour votre soutien moral, vos encouragements et votre disponibilité pendant la réalisation de cette thèse et des articles lors des deux dernières années du Covid. Au professeur, à l'expert, à l'homme, je vous exprime ma reconnaissance, ma gratitude, ma très haute considération et ma profonde estime.

Monsieur Abdellah ABDELOUAFI (Rahimah Allah), Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Directeur de ma Thèse de 2019 à 2021, spécialiste en télédétection et les risques géologiques; je vous remercie d'avoir accepté de poursuivre mon encadrement de 2019 à 2021 sur le même thème de recherche. Je vous remercie de vos encouragements et conseils lors des moments difficiles qui m'ont permis de faire aboutir ce travail. Je vous exprime ma reconnaissance, ma gratitude, ma très haute considération et ma profonde estime

Je remercie **Monsieur Tarik BAHAJ**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, directeur de ma thèse de 2021 à 2022). Merci, d'avoir accepté la relève pour assurer la direction de ma thèse. Vous avez toujours manifesté un intérêt envers ce travail. Je vous remercie de vos encouragements pour faire aboutir ce travail Veuillez trouver ici l'expression de ma très haute considération.

Je remercie **Monsieur Pascal NKURUNZIZA** (Que Dieu l'accueille dans son Royaume), Professeur de l'Enseignement Supérieur, Université du Burundi, encadreur local. Merci pour m'avoir accepté de m'encadrer et accompagner sur terrain. Merci pour vos conseils judicieux et encouragements.

Je remercie **Monsieur Mohammed REGRAGUI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et Doyen de la Faculté des Science de Rabat, Université Mohammed V, pour m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes études de recherche doctorale au sein de cette faculté.

Je remercie **Madame Souad EL HAJJAJI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et Directrice du Centre d'Etudes Doctorales et responsable du Centre de Recherche : Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable (CERNE2D); de l'accompagnement que ce centre a fait pour l'aboutissement de ce travail de thèse.

Je remercie **Monsieur Juma SHABANI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et Directeur de l'Ecole doctorale, Université du Burundi pour ses conseils, sa disponibilité et prestigieuses interventions académiques et administratives et son implication pour obtenir un financement de recherche sur terrain auprès de l'ARES-PFS.

Je tiens à remercier d'une façon particulière l'Agence Marocaine de Coopération Internationale (AMCI) et le Gouvernement du Burundi qui ont financé cette recherche doctorale.

Ma plus grande reconnaissance au soutien accordé pour un stage de recherche au Musée royal de l'Afrique centrale en Belgique avec le soutien de la Direction Générale de la Coopération au Développement et de l'Aide Humanitaire de la Belgique dans le cadre des bourses individuelles.

Mes remerciements vont également à **Monsieur François KERVYN** du Musée royal de l'Afrique centrale, coordinateur du projet BELSPO STEREO RESIST (SR/00/305), ainsi qu'à l'Académie de Recherche d'Enseignement Supérieur—Projet de Formation Sud (ARES—PFS), pour le soutien apporté pour les travaux de terrain.

Je n'oublierai pas également de remercier **Monsieur Gaspard NTAKIMAZI**, gestionnaire du projet VLIR-UOS à l'Université du Burundi pour m'avoir octroyé un véhicule pour assurer les déplacements lors de la collecte des données de terrain.

Pour l'acquisition des images Pléiades et des photos aériennes historiques, nos remerciements vont à l'égard des projets RESIST et BELSPO BRAIN PASTECA (BR/165/A3/PASTECA) coordonnés par le Musée royal de l'Afrique centrale, respectivement par **Messieurs François KERVYN** et **Olivier DEWITTE**.

Je remercie les autres collaborateurs pour la publication: **Messieurs Pascal NKURUNZIZA**, **Arthur DEPICKER**, **Antoine DILLE**, **Bousta MAHFOUD** et **Louis NAHIMANA**.

Mes remerciements sont adressés aux collègues de l'Université du Burundi, **Messieurs Anicet SINDAYIHEBURA**, **Aloys NDAYISENGA**, **Athanase NKUNZIMANA**, **Jean Baptiste HAMENYIMANA**, **Laurent HABONIMANA** et **Pierre Claver NGENZEBUHHORO** pour la bonne collaboration lors de la collecte des données de terrain.

Merci à mesdames **Caroline Michellier**, **Nathalie Andries** et **Muriel van Nuffel** pour leur accueil chaleureux pendant tout mon séjour à Tervuren.

A mon collègue de bureau **Monsieur Adalbert MUHINDO**, Directeur Général actuel de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG), je dis merci pour les échanges fructueux pendant mon séjour en Belgique.

Merci également aux familles de **Madame Florence RUKATA** de Gembloux – Belgique et **Monsieur Désiré NDIKURYAYO** de Namur – Belgique pour leur accueil chaleureux. Les week-ends et les sorties passés ensemble m'ont permis de réduire le stress lié à la recherche.

Merci beaucoup à mes collègues doctorants de l'équipe Georisk et du Laboratoire L-G2E et plus spécialement **Messieurs Abderrahmane ELMAHSSANI** et **Mahfoud BOUSTA** pour les échanges fructueux et surtout les séances de travail pour l'installation et le fonctionnement des logiciels AHP, **Théorie de l'évidence TDE** et la **Régression logistique RL**.

Résumé

Un inventaire multi-temporel précis et détaillé des mouvements de terrain (MTs) et la caractérisation de leurs processus sont essentiels pour l'évaluation de l'aléa et la mise en œuvre des stratégies de réduction des catastrophes. De telles informations sont cependant rares dans de nombreuses régions montagneuses d'Afrique tropicale à forte densité de population comme les reliefs de Bujumbura où la recherche sur les MTs est à l'état embryonnaire et non adaptée aux besoins locaux. Une compilation multi-temporelle des processus MTs a été réalisée en combinant une enquête minutieuse de terrain et une analyse visuelle d'images satellitaires, de données topographiques à très haute résolution spatiale et de photographies aériennes historiques. Nous avons identifié ~1300 MTs dont nous avons analysé les caractéristiques morphométriques, spatiales et temporelles. Les processus identifiés sont très différents en termes de taille, profondeur, âge, mécanisme et niveau d'activité notamment. Certains processus, notamment les grands MTs, ont des causes purement naturelles (géomorphologie, incision rapide des rivières, géologie); d'autres, principalement les MTs superficiels et récents (après 1950) sont influencés par des éléments anthropiques (agriculture sur pente, exploitation des carrières, construction de nouvelles routes, ravinement). Ces MTs occupent plus de 20% de l'ensemble des reliefs de Bujumbura. Les résultats fournissent un jeu de données beaucoup plus précis des processus MT et de leurs impacts dans la région. Ensuite, une zonation spatiale de la susceptibilité a été élaborée en combinant des approches d'analyse multicritère basées sur les méthodes heuristique et probabiliste. Dans 10% de la zone d'étude à forte susceptibilité se trouve près de la moitié des occurrences MTs inventoriés. Les résultats de cette recherche apportent des informations nécessaires à l'élaboration de stratégies de réduction des risques et des catastrophes.

Mots clés: Mouvements de terrain, inventaire multi-temporel, incision des rivières, photos aériennes historiques, facteurs de prédisposition, susceptibilité, Afrique.

Abstract

Accurate and detailed multi-temporal inventories of landslides and their process characterization are crucial for landslide hazard assessment and the implementation of disaster risk reduction strategies. Such investigations are however rare in many regions of the tropical African highlands such hillslopes of Bujumbura where landslides research is often at its infancy and not adapted to the local needs. Here, we produce a comprehensive multi-temporal investigation of the landslide processes in the hillslopes of Bujumbura. We inventory ~1,300 landslides by combining careful field investigation and visual analysis of satellite images, very-high resolution topographic data and historical aerial photographs. The causes are natural (geomorphology, rapid river incision, geology) and anthropic (agriculture on slopes, exploitation, quarrying and gullyng). More than 20% of the hillslopes of Bujumbura are affected by landslides. Our results provide a much more accurate record of the landslide processes and their impacts in the region. Then, a spatial landslide susceptibility zonation was carried out by combining multi-criteria analysis approaches based on heuristic and probabilistic methods. The outcome shows that in 10% of the study area with high susceptibility is located almost half of inventoried landslides occurrences. The results of this research provide necessary information for the development of risk and disaster reduction strategies.

Keywords: Multi-temporal inventory, river incision, historical aerial photographs, controlling factors, landslides susceptibility, Africa.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	v
Abstract	vi
Table des matières	vii
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
ABREVIATIONS	xviii
INTRODUCTION GENERALE	1
1. Contexte de la thèse	1
2. Hypothèses	3
3. Objectifs	4
4. Structure de la thèse	4
5. Méthodologie	6
I. PHYSIOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE	9
I.1. Description de la zone d'étude	9
I.2. Caractérisation morphologique, géologique et climatique des reliefs de Bujumbura	10
I.2.1. Relief et morphologie	10
I.2.2. Tectonique du Burundi	11
I.2.3. Géologie	11
I.2.3.1. Aperçu général de la géologie du Burundi	11
I.2.3.2. Géologie des reliefs de Bujumbura	13
I.2.3.2.1. Pléistocène moyen des reliefs de Bujumbura (Pm)	13
I.2.3.2.2. Précambrien	15
I.2.4. Tectonique de la région des reliefs de Bujumbura	16
I.2.5. Climats	16
I.2.5.1. Précipitations	16
I.2.5.2. Températures	17
I.3. Dynamique de l'occupation du sol	18
I.4. Hydrographie	21
I.5. Structure socio-économique des reliefs de Bujumbura	22
II. NOTIONS DE BASE POUR L'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN	25
II.1. Introduction	25

II.2. Notions de glissement de terrain	26
II.2.1. Définitions	26
II.2.2. Parties du glissement de terrain	28
II.2.3. Cartes d'inventaire de glissements de terrain.....	29
II.3. Notion d'échelle pour l'étude des mouvements de terrain	30
II.4. Classification des mouvements de terrain	30
II.4.1. La classification d'Hutchinson (1988).....	31
II.4.2. Classification de Cruden et Varnes (1996)	32
II.4.3. La classification de Varnes (1978).....	32
II.4.3.1. Glissement rotationnel ou circulaire	33
II.4.3.2. Glissement translationnel ou plan	33
II.4.3.3. Coulée de boue ou des débris	34
II.4.3.4. Fauchage	34
II.4.3.5. Reptation ou creeping.....	35
II.4.3.6. Eboulements, chutes de pierres et de blocs.....	35
II.4.3.7. Effondrement, affaissement, glissement latéral (lateral spread).....	35
II.4.3.8. Les avalanches des débris ou de roches.....	36
II.4.3.9. Glissement complexe ou mixte	36
II.5. Facteurs de mouvements de terrain (MT)	39
II.5.1. Facteurs de prédisposition ou environnementaux	39
II.5.1.1. Facteurs topographiques	39
II.5.1.2. Facteurs géologiques.....	39
II.5.1.3. Facteurs pédologiques.....	39
II.5.2. Facteurs de déclenchement.....	40
II.5.3. Facteurs préparatoires (facteurs dynamiques)	40
II.6. Analyse spatiale et modélisation des mouvements de terrain	40
II.6.1. Définitions des notions de base	40
II.6.2. Concept de probabilité ou susceptibilité des MTs	41
II.6.3. Evaluation du risque de mouvement de terrain.....	42
II.7. Répartition des mouvements de terrain	42
II.7.1. Répartition des mouvements de terrain dans le monde	42
II.7.2 Répartition des mouvements de terrain dans la région du Rift Nord Tanganyika – Kivu	43
III. APPORT DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE ET PHOTOGRAPHIE AERIENNE DANS L'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA	46
III.1. Introduction	46
III.2. Données satellitaires et aériennes utilisées	47
III.3. METHODOLOGIE ET PRINCIPAUX TRAITEMENTS UTILISES	52
III.4. CARTOGRAPHIE DES MOUVEMENTS DE TERRAINS	57
III.4.1. Cartographie des mouvements de terrain à partir des images satellitaires accédées via Google Earth.....	57
III.4.2. Cartographie des mouvements de terrain sur les images Pléiades	60
III.4.3. Cartographie des mouvements de terrain sur les photos aériennes historiques.....	60
III.4.4. Cartographie des mouvements de terrain à l'aide des ortho-mosaïques	62
III.4.4.1. Cartographie des mouvements de terrain de Vugizo, Sororezo et Mugoboka	62
III.4.4.2. Cartographie des mouvements de terrain à Nyamutenderi et Rohe	64
III.4.4.3. Cartographie des mouvements de terrain dans la localité du barrage Mugere	66
III.4.4.4. Cartographie des mouvements de terrain à Gikungu rural	68
III.4.4.5. Cartographie des mouvements de terrain autour du campus Kiriri	68

III.4.4.6. Cartographie des mouvements de terrain à Mugoboka-Gikungu.....	69
III.4.4.7. Cartographie des mouvements de terrain dans les milieux non urbanisés.....	70
III.4.5. Synthèse des mouvements de terrain	71
III.5. ANALYSE DE LA LITHOLOGIE.....	72
III.6. ANALYSE DES LINEAMENTS STRUCTURAUX.....	82
III.6.1. Analyse linéamentaire des données satellitaires optiques	83
III.6.2. Linéaments de direction N00	86
III.6.3. Linéaments de direction N135	86
III.7. EXTRACTION DE L'OCCUPATION / COUVERTURE DU SOL	87
III.7.1. Introduction.....	87
III.7.2. Méthodologie	87
III.7.3. Classification multi spectrale supervisée des données Landsat-7 ETM+.....	88
III.7.4. Evaluation de la précision de la classification	90
III.8. CONCLUSION DU CHAPITRE III.....	92
IV. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA	94
IV.1. Introduction.....	94
IV.2. Présentation générale de l'inventaire des MTs et érosions associées	94
IV.2.1. Coulées de débris, coulées boueuses	99
IV.2.2. Les glissements rotationnels, translationnels et avalanches	99
IV.2.3. Coulées de terre lentes et les slide-earthflows	100
IV.2.4. Rockslides et avalanches.....	101
IV.2.5. Grandes déformations des montagnes.....	102
IV.2.6. Erosions par ravinement	102
IV.3. Dégâts occasionnés par les mouvements de terrain sur les infrastructures.....	103
IV.4. Conclusion du chapitre IV.....	108
V. CARACTERISATION ET DISTRIBUTION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN ET DES PROCESSUS D'EROSION ASSOCIES DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA.....	111
V.1. Introduction	111
V.2. Rift du Nord du lac Tanganyika au Kivu et caractéristiques environnementales de Bujumbura	113
V.3. Données et méthodes	115
V.3.1. Inventaire des mouvements: types et processus	115
V.3.2. Facteurs de contrôle et de déclenchement des glissements de terrain	119
V.4. Résultats	122
V.4.1. Types et caractéristiques des mouvements de terrain	122
V.4.2. Causes et déclencheurs des glissements de terrain	133
V.5. Discussion	138
V.5.1. Inventaire des MTs et fiabilité des données.....	138
V.5.2. Processus de glissement de terrain: causes et déclencheurs	143

VI. DEVELOPPEMENT ET ANALYSE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA	149
<i>VI.1. INTRODUCTION</i>	149
<i>VI.2. METHODOLOGIE GENERALE D'APPROCHE : APPROCHE D'ANALYSE MULTI-ECHELLE (AAM)</i>	150
VI.3.1. Choix des facteurs qui pourraient conditionner la présence des MTs	151
<i>VI.3. ZONATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ PAR L'APPROCHE DU PROCESSUS HIÉRARCHIQUE ANALYTIQUE (PHA OU AHP EN ANGLAIS)</i>	154
VI.3.1. Méthodologie : combinaison de cartes d'index	154
VI.3.2. ZONAGE DE LA SUSCEPTIBILITE	156
VI.3.3. Evaluation de la susceptibilité aux MTs	159
VI.3.3. Discussion : zonation de la susceptibilité avec une méthode habituellement utilisée à des échelles plus régionales	160
VI.3.4. Conclusion	161
<i>VI.4. ZONATION DE LA SUSCEPTIBILITE AVEC LES MODELES BASES SUR LES DONNEES</i>	
162	
VI.4.1. Introduction	162
VI.4.2. THÉORIE DE L'EVIDENCE (TDE) : APPROCHE BIVARIÉE	164
VI.4.2.1. Introduction	164
VI.4.2.2. Principes de la Théorie de l'Evidence	164
VI.4.1.3. Sélection des variables	166
VI.4.1.3.1. Variable à modéliser : mouvements de terrain	166
VI.4.1.3.2. Variables prédictives : paramètres de prédisposition et de déclenchement	167
VI.4.1.4. Test de l'indépendance conditionnelle	167
VI.4.1.5. Elaboration de la susceptibilité aux mouvements de terrain	169
VI.4.1.6. Modélisation de la susceptibilité des MTs par la théorie de l'évidence (TDE)	170
VI.4.1.7. Conclusion	174
VI.4.3. LA REGRESSION LOGISTIQUE (RL): APPROCHE MULTIVARIEE	175
VI.4.3.2. Principes de la régression logistique	176
VI.4.3. Conclusion	179
<i>VI.5. Qualité des cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain et validation du modèle</i>	180
<i>VI.6. Comparaison des modèles de susceptibilités dans les reliefs de Bujumbura</i>	181
<i>VI.6. Discussion</i>	185
<i>VI.7. Conclusion du Chapitre VI</i>	187
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	191
1. Conclusion générale	191
2. Impacts des mouvements de terrain et strategies de reduction des risques de catastrophes	
192	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	198
ANNEXES	222
<i>ANNEXE 1 : PRODUCTION SCIENTIFIQUE</i>	222

<i>ANNEXE 2 : CATALOGUE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA</i>	223
--	-----

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Localisation de la zone d'étude : a – Zoom sur les reliefs avec la zone urbanisée de la ville de Bujumbura, b – Position de la zone d'étude par rapport à la branche occidentale du rift est africain. L'ombrage des collines est dérivé du modèle numérique de terrain SRTM à 1 arc seconde de résolution spatiale (Farr et al., 2007). Le réseau routier (en violet) vient de 'OpenStreetMap aerial'. La carte de base en (b) provient de © Stamen Terrain-USA/OSM.....	9
Figure I-2: Relief des (a) reliefs de Bujumbura, (b) les ensembles géomorphologiques du Burundi (modifié de l'©ISABU). Le contour bleu symbolise la zone d'étude.....	10
Figure I-3: Profil topographique ouest-est des reliefs de Bujumbura (coupe AB sur la Figure I-2). L'axe des Y est en m à partir du niveau de la mer et l'exagération verticale est de 3. R abrège le relief et nous montre l'existence des trois paysages (Glacis, paysage rajeuni et paysage relique).	11
Figure I-4: Principales formations géologiques du Burundi (©Burundi Database BRGM; cf. Post et al., 2011). Le contour vert clair représente la zone d'étude.	13
Figure I-5: Géologie des reliefs de Bujumbura ainsi que la rosace des directions des failles (digitalisation de la carte réalisée par Laghmouch et al., 2018)	14
Figure I-6: Coupe géologique ouest-est des reliefs de Bujumbura (coupe A–B sur la Figure I-5); (©Theunissen et al. 1989)	14
Figure I-7: Coupe géologique nord est – sud est des reliefs de Bujumbura (coupe C–D sur la Figure I-5); (©Theunissen et al., 1989)	14
Figure I-8: Affleurement des gneiss sous les colluvions, zone de contact entre le Pléistocène moyen et le complexe de Mugere, photo du 10/01/2019	15
Figure I-9: Carte des isohyètes du Burundi avec la mise en évidence de la région de Bujumbura (Ciza, 2013)	17
Figure I-10: Variations moyennes mensuelles des précipitations (Stations Teza et Mutumba), (Kirasa, 2020)	17
Figure I-11: Variation mensuelle des températures (Station Teza)	18
Figure I-12: Variations interannuelles des températures (Station Teza) selon les calculs effectués dans la partie sud des reliefs de Bujumbura (Kirasa Energy, non publié)	18
Figure I-13: Dynamique de l'occupation du sol des reliefs de Bujumbura. Les rectangles blancs représentent les zones agrandies au Figures I-14, I-15 et I-16	19
Figure I-14: L'occupation du sol sur l'image Google Earth avec discrimination de l'espace bâti et les terres agricoles (Date de l'image: Janvier 2021)	20
Figure I-15: Photo illustrant les principales cultures vivrières pratiquées dans la zone d'étude (Date de la photo: décembre 2019).....	20
Figure I-16: Image Google Earth de l'occupation/couvertures du sol montrant la forêt, des terres agricoles, l'habitation dispersée et des voies de communication dans la partie orientale des reliefs de Bujumbura (Date de l'image: janvier 2021)	21
Figure I-17: Carte du réseau de drainage des reliefs de Bujumbura.....	22
Figure II-1: Effet gravitaire sur le matériau (Nelson, 2013)	27
Figure II-2: Exemple d'un glissement de terrain destructeur ; village de Lidong en Chine	28
Figure II-3: Illustration d'un glissement de terrain	29
Figure II-4: Les types de glissement de terrain les plus fréquents de la classification de Varnes (Wieczorek & Snyder, 2019).....	38
Figure II-5: Carte de localisation des principaux MTs dans le monde (https://data.nasa.gov/Earth-Science/Global-Landslide-Catalog/h9d8-neg4 accédé au 15 décembre 2020).....	43
Figure II-6: (a) Localisation de plus de 9000 occurrences MT dans le rift du NTK à partir du jeu de données collecté à l'aide des images de Google Earth et des levés de terrain (Dewitte et al., 2021), (b) carte sismique d'Afrique sub-saharienne avec un zoom sur le NTK rift (rectangle noir) ; https://hazard.openquake.org/gem/models/SSA/ consulté le 08/04/2022.	44

Figure III-1: Image multispectrale Landsat-7 ETM+, composition colorée infrarouge couleurs 432 avec localisation de la zone d'étude. Les données ETM+ utilisés comprennent six canaux. Les analyses spectrales et spatiales vont être effectuées sur une image mosaïque de ces canaux (bleue, vert, rouge, Proche infrarouge PIR, Infrarouge moyen SWIR1, Infrarouge lointain SWIR2).....	49
Figure III-2: Scène HRVIR de SPOT 4 couvrant les reliefs de Bujumbura, composition colorée 432. Les données SPOT 4 comprennent 4 canaux. Les analyses spectrales et spatiales vont être effectuées sur quatre canaux (bleue, vert, rouge et Proche infrarouge PIR)	49
Figure III-3: Aperçu général de l'interface d'accueil de Google Earth	50
Figure III-4: Une des 4000 images utilisées pour la mosaïque de l'ortho-photo du Burundi. Chaque photographie aérienne a une taille de 2.5km*2.5km avec une résolution spatiale de 0.5m. Toutes les images ont été prises en juillet 2012. Ces images serviront à l'interprétation et la délimitation des cicatrices de MTs qui existaient à cette époque. Sur la base de ces photos aériennes, nous avons produit un MNE de 10m qui est utilisé pour les analyses topographiques.	51
Figure III-5: Méthodologie d'approche	53
Figure III-6: Composition colorée 432 après traitement par l'Analyse en Composante Principale (ACP) de l'image SPOT 4. Analyse par ACP des données SPOT sur toute la scène avec différentes signatures où l'on distingue facilement les différents faciès.	55
Figure III-7: Composition colorée 453 après traitement Decollement Strech (DS) sur les données de Landsat-7 ETM+. Analyse par DS des données SPOT 4 sur toute la scène avec différentes signatures où l'on distingue facilement les différentes formations lithologiques.	56
Figure III-8: Composition colorée 532 après traitement Tasellett Cap (TC) sur les données de Landsat-7 ETM+. Analyse par TC des données ETM sur toute la scène avec différentes signatures où l'on distingue facilement les différents faciès.	57
Figure III-9: Mouvements de terrain dans le quartier Kizingwe, impacts sur l'urbanisation. Les images de Google Earth montrent deux grandes ravines avec des processus de glissements associés qui menacent un quartier non viabilisé (Kamesa) et un autre en cours de viabilisation (Kizingwe) au sud de Bujumbura.	58
Figure III-10: Observation et cartographie du glissement de terrain de Muyira à l'aide des images Digital Globe de Google Earth, analyse sur quatre scènes sur un même endroit. Les trois premières images ont été prises respectivement en 2007, 2008 et 2011 et il n'y a aucun mouvement de terrain observable. La dernière est prise en 2014 et montre un grand MT. Le mouvement a eu lieu donc entre 2011 et 2014. D'autres sources comme les ortho-photos de 2012 et le terrain serviront à la précision de la période d'occurrence du MT.	59
Figure III-11: Identification des MTs à partir des images Pléiades VHR, zoom du quartier Gasekebuye, BV Muha. Le traitement photogrammétrique des images Pléiades a permis de générer un MNT de 1m de résolution. Cette donnée permet en plus de cartographier avec précision des MTs et surtout de déterminer la profondeur de rupture des pentes qui est très utile surtout pour des applications géotechniques.	60
Figure III-12: Interprétation des photos aériennes sous couple stéréoscopique	61
Figure III-13: Les mouvements de terrain des quartiers Vugizo Sororezo et Mugoboka. Les trois grands ravins sont visibles sur les photographies aériennes de 1958 avec une rupture de pente fraîche, ce qui justifie leur activité à ce moment. Sur les photographies aériennes anciennes, les alentours de ces ravins ne sont pas habités. Ce qui n'est pas le cas en 2012. Les ravins restent encore actifs avec des mouvements de terrain qui se déclenchent sur leur flancs.	63
Figure III-14: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, image très HR, bassin versant de Kanyosha (Kubwimana et al., 2018). Du côté de Rohe un grand MT de profondeur environnant 100m est observable. C'est le glissement baptisé de la bananeraie par Nibigira et al., 2018. Du côté de Nyamutenderi, plusieurs MTs sont présents et menacent la route nationale 7 sur plusieurs endroits ainsi que l'école primaire de Nyamutenderi.	64

Figure III-15: Cartographie des MTs sur les ortho-mosaïques de 1958 et 2012. (a) photos aérienne prise à l'époque coloniale avec une route en terre qui traverse un grand ravinement à Gasekebuye et (b) l'ortho photo de 2012 qui montre la même région avec la ravine élargie et un quartier habité aux alentours. Ce qui justifie que la ravine reste active.	66
Figure III-16: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, images très HR, BV Mugere. Aux environs de la route vers la centrale hydroélectrique de la Mugere, se trouve un grand MT de type slide avec plusieurs maisons à l'intérieur. Dans ce mouvement, deux activations récentes s'observent vers la base et démontrent son activité. Du côté de la route, plusieurs MTs sont présents et la coupent de temps en temps.	67
Figure III-17: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, impacts sur les quartiers Gikungu rural. Deux grands ravins actifs entourent le quartier périphérique de Bujumbura (Gikungu rural). Plusieurs MTs rotationnels sont présents sur le ravin qui est plus à l'Est.	68
Figure III-18: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, MTs qui menacent une le campus Kiriri.	69
Figure III-19: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, images très HR, colline Mugoboka-Gikungu. Deux grands MTs translationnels/avalanches se sont déclenchés de part et d'autre de la rivière Ntahangwa. Les cicatrices sont encore fraîches et sont donc actifs et récents. Ils sont profonds vu que leur zone d'arrachement dépasse 5m.	70
Figure III-20: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos dans les champs agricoles, images très HR, Commune Isale. Un grand MT de type flowslide suivi d'une petite activation de la base s'observe vers l'est en amont du bassin versant de la rivière Ntahangwa. Les deux MTs se sont produits dans un sol latéritique très épais issu de l'altération des phyllites.	71
Figure III-21: Carte de synthèse des MTs issue des images satellitaires et des photos aériennes	72
Figure III-22: Reconnaissance des phyllites micashisteuses (Ph) affleurant entre les quartzites (Qz) et granite (Gr) au nord des reliefs de Bujumbura – composition colorée ACP432 de SPOT 4 ..	73
Figure III-23: Reconnaissance des quartzites (Qz) de Rugazi entre les phyllites (Ph) et gneiss (Gn)	74
Figure III-24: Reconnaissance des faciès quartzitiques à Karama	74
Figure III-25: Reconnaissance des dépôts sédimentaires cénozoïques par ACP751 d'ETM+	75
Figure III-26: Reconnaissance des dépôts sédimentaires	76
Figure III-27: Reconnaissance des gneiss (Gn) et des quartzites (Qz) – traitement Tasselet Cap d'ETM 742	77
Figure III-28: Distribution du granite, phyllite/micashiste, quartzites au nord-est de la zone d'étude – traitement ACP342 d'ETM+	77
Figure III-29: Carte des faciès issue de (a) la télédétection optique et (b) celle digitalisée à partir de Laghmouch et al. (2018) des reliefs de Bujumbura. Bien qu'il existe des similarités au niveau des lithologies, la carte de faciès télé-analytique est plus précise. Les sédiments récents manquent sur la carte lithologique. Les gneiss existent au nord et notre analyse spectrale a montré que c'est une lithologie de signature différente probablement des phyllites mais d'autres sources indiquent que ce sont des métapélites, ce qui pourraient justifier l'absence des MTs par rapport aux autres roches métamorphiques moins consolidées (gneiss par ex.).	78
Figure III-30: Carrière quartzitique de Karama, nord de Bujumbura	79
Figure III-31: Affleurement des quartzites en relief et des phyllites en bas sur la colline Sagara, limite exacte.	79
Figure III-32: Superposition des mouvements de terrain sur la carte lithologique issue de la PIAO81	81
Figure III-33: Pourcentage de mouvements de terrain par rapport aux lithologiques	82
Figure III-34: Roche quartzitique fracturée à l'échelle microtectonique, nord de Bujumbura	83
Figure III-35: Exemples de quelques filtres directionnels réalisés avec les images Landsat-7 ETM+ et Spot 4	84
Figure III-36: Cartographie des linéaments à l'aide des images satellitaires SPOT 4.	85
Figure III-37: Cartographie des linéaments à l'aide des images satellitaires landsat-7 ETM+	85

Figure III-38: Carte des linéaments synthétique issue de l'analyse des données satellitaires. La rosace montre une direction générale NW-SE qui est la direction des structures du nord de Tanganyika côté Burundi. Les fracturations de direction NNW-SSE seraient liés au rifting.	86
Figure III-39: Photo montrant le niveau de la végétation faible à moyenne et des sols nus, sud-est Bujumbura, bassin versant de la Mugere (janvier, 2019)	87
Figure III-40: Application de la fonction discriminante par parallélipèdes selon le max de vraisemblance, image ETM 432 (Erdas Imagine).....	88
Figure III-41: Les cartes d'occupation du sol issues (a) de la classification supervisée des données Landsat 7 ETM+, (b) des produits globaux, Globeland30 (Chen et al.,2015) et (c) ESE-worldcover (ESA Woldcover, 2020). Le classe des sols nus comprend aussi les prairies c-à-d la végétation ne dépassent pas 10% (Kubwimana et al., soumis 2022)	91
Figure III-42: Superposition de mouvements de terrain sur les résultats de la classification supervisée des données Landsat 7 ETM+	92
Figure IV-1: Localisation des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura.....	95
Figure IV-2: Coulées boueuse/débris dans le bassin versant de la rivière Ntakangwa (ID=364)	99
Figure IV-3: Glissement translationnel/avalanche dans le bassin versant de la Mugere (ID=383)..	100
Figure IV-4: (a) Partie amont d'une coulées de terre lente (earthflow) à Burima-Mugere (ID=529) et (b) un phénomène de creeping à Mugoboka (ID=990)	101
Figure IV-5: Grands rockslides avec processus d'érosion par ravinement, BV Mugere (ID=9)	101
Figure IV-6: Gros blocs de roches charriés par la rivière Gikoma, photo du 14/08/2014 (ID=1284) .	102
Figure IV-7: Une grande déformation de montagne le long de la rivière Gikoma (ID=992).....	102
Figure IV-8: Erosion par ravinement dans la localité de Kizingwe (ID=618)	103
Figure IV-9: Nouveau pont (a) sur la route vers le barrage Mugere, la flèche noire (b) pointe sur la buse de pont effondré (ID=529)	104
Figure IV-10: MT qui a emporté une partie de l'école primaire de Muyira et plusieurs maisons (ID=472)	105
Figure IV-11: MT menaçant la route reliant les quartiers Mutanga sud et Mugoboka (ID=68)	105
Figure IV-12: Mouvements de terrain de Sororezo présentant un risque aux infrastructures (ID=923)	105
Figure IV-13: Menace du quartier Gikungu rural par un ravin affecté par des mouvements de masse avec des risques d'effondrement des maisons situées au-dessus du bord principal (ID=994)	106
Figure IV-14: Route nationale 1 affouillée par le changement du lit de la rivière Gasenyi de la catastrophe du 10/02/2014, photo prise un jour après le drame (ID=1382)	106
Figure IV-15: Dommages aux infrastructures de la RN 1 et la RN 9 (Photos prises et traitées par © Hermès NIYONDIKO) (ID=1284).....	107
Figure IV-16: Coupure de la route communale par un glissement rotationnel dans la localité de Muyira, photo de décembre 2018 (ID=95)	108
Figure V-1: Localisation de la zone d'étude.....	116
Figure V-2: Carte de localisation des MTs inventoriés dans les reliefs de Bujumbura en fonction de leur type de processus (Kubwimana et al., 2021b)	117
Figure V-3: Collecte des données sur terrain	118
Figure V-4: MTs cartographiés classés en fonction de la profondeur de de leur surface de rupture. L'ombrage (hillshade) provient du MNE de 10 m de résolution (Tableau V-1). Les MTs < 14 000 m ² sont représentés par un point afin qu'ils soient visibles à l'échelle des cartes (Kubwimana et al., 2021b).....	125
Figure V-5: MTs cartographiés en fonction de leur âge relatif. L'ombrage (hillshade) provient du MNE de 10 m de résolution (Tableau V-1). Les MTs < 14 000 m ² sont représentés par un point afin qu'ils soient visibles à l'échelle des cartes (Kubwimana et al., 2021b).....	126
Figure V-6: MTs cartographiés classés en fonction de leur degré d'activité	127
Figure VI-7 : Exemples de MTs de l'inventaire (Kubwimana et al., 2021b).....	128
Figure V-8: Exemples de MTs de l'inventaire (Kubwimana et al., 2021b)	129

Figure V-9: MTs déclenchés par un événement pluvieux intense en février 2014 dans le nord de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b)	130
Figure V-10: Impact des MTs sur la route nationale NR7	133
Figure V-11: Exemple de deux ravines avec processus de glissement de terrain, au niveau de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b)	136
Figure V-12: Distributions de fréquence des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b).....	140
Figure V-13: Distributions de fréquence des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b)(suite)	141
Figure V-14: Distributions de fréquence des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b).....	142
Figure V-15: Distribution de la taille des mouvements de terrain (m ²) à l'aide des box-plots (boîtes à moustaches) ; Kubwimana et al., 2021b).....	145
Figure V-16: Distribution de la taille des mouvements de terrain (m ²) à l'aide des box-plots (boîtes à moustaches) (suite); (Kubwimana et al., 2021b).....	146
Figure VI-1: Les facteurs de contrôle des MTS dans la ville de Bujumbura: (a) l'hypsométrie,(b) exposition des versants, (c) courbure des versants, (d) angle de pente, (e) densité de fracturation,(f) zonation spatiale en rapport des knickpoints, (g) lithologie, (h) fracturation, (i) occupation du sol et (j) distance à la route (Kubwimana et al., 2021a).....	153
Figure VI-2 : Déroulement des différentes étapes pour la cartographie de la susceptibilité aux MTs par combinaison des cartes d'index dans les reliefs de Bujumbura (Kubwimana et al., soumis 2022).	155
Figure VI-3 : Cartes de susceptibilité des MTs par processus d'hierarchisation analytique (PHA) pour les (a) MTs profonds et (b) peu profonds (Kubwimana et al., soumis 2022)	160
Figure VI-4: Courbes de performance AUC obtenues par le PHA pour les MTs profonds (vert) et peu profonds (rouge) ; (Kubwimana et al., soumis 2022)	162
Figure VI-5 : Démarche de la cartographie de la susceptibilité par la TDE et la RL (Kubwimana et al., soumis 2022)	163
Figure VI-6 : Relation entre la variable à modéliser, VM et variable prédictive, VP	165
Figure VI-7 : Organigramme général de la méthodologie adoptée pour l'élaboration de la carte de susceptibilité (Kubwimana et al., soumis 2022).....	167
Figure VI-8 : MTs profonds utilisés pour la modélisation par les approches TDE ((Kubwimana et al., 2021a)	170
Figure VI-9: Cartes de susceptibilité des MTs par la théorie de l'évidence (TDE) pour les (a) MTs profonds et (b) peu profonds (Kubwimana et al., soumis 2022)	174
Figure VI-10: Courbe de performance AUC obtenue par la TDE pour les MTs profonds (vert) et peu profonds (rouges) ; (Kubwimana et al., soumis 2022)	175
Figure VI-11: Cartes de susceptibilité des MTs par la régression logistique (RL) pour les (a) MTs profonds et (b) peu profonds (Kubwimana et al., soumis 2022)	179
Figure VI-12: Courbe de performance AUC obtenue par la RL pour les MTs profonds (vert) et peu profonds (rouge) ; (Kubwimana et al., soumis 2022)	180
Figure VI-13: Taux de prédiction des MTs a) profonds et b) peu profonds. Le taux de prédiction montre la proportion de glissements de terrain en fonction de la proportion de la zone d'étude avec la plus grande susceptibilité. Les différentes classes de susceptibilité sont affichées sur l'axe des abscisses (Kubwimana et al., soumis 2022).	181
FigureVI-14 : Comparaison de la performance des 3 modèles de susceptibilité des MTs: processus d'hierarchisation analytique (PHA) pour les (a) MTs profonds (AUC=0.72) et (b) peu profonds (AUC=0.70), régression logistique (RL) pour (c) les MTs profonds (AUC= 0.84) et (d) peu profonds (AUC=0.74) et la théorie de l'évidence (TDE) pour les (e) MTs profonds (AUC= 0.905) et (f) peu profonds (AUC=0.83) ; (Kubwimana et al., soumis 2022).....	182

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1: Classification d'Hutchinson.	31
Tableau II-2: Echelle des vitesses des mouvements de versant (Cruden et Varnes, 1996).	32
Tableau II-3: Mise à jour de la classification de Varnes (Hung et al., 2014).	33
Tableau III-1: Imageries satellitaires et aériennes utilisées et leurs caractéristiques.....	52
Tableau III-2: Les unités lithologiques issues des traitements spectraux des images satellitaires. ...	80
Tableau III-3: Statistiques mouvements de terrain – lithologie.....	81
Tableau III-4: Matrice de contingence des classes d'occupation du sol issues de la segmentation des données images Landsat-7 ETM+.	90
Tableau IV-1: Caractérisation des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (inventaire complet cf. annexe 2).....	97
Tableau V-1: Jeux de données auxiliaires utilisées dans cette recherche.	120
Tableau V-2: Principales caractéristiques des mouvements de terrain et des ravines inventoriés. ...	123
Tableau V-3: Exemples d'impacts associés aux types de glissements de terrain.....	132
Tableau V-4: Association entre l'occurrence des mouvements de terrain (MTs) et les facteurs de contrôle.....	137
Tableau VI-1: Paramètres sélectionnés dans la présente étude ainsi que les données utilisées.	151
Tableau VI-2: Pondération des différentes classes et poids relatifs des paramètres pris en compte pour la genèse des mouvements de terrain profonds/peu profonds dans les reliefs de Bujumbura.....	157
Tableau VI-3 : Valeurs du test chi-carré X^2 pour mesurer la dépendance entre les variables prédictives et les MTs. D : profond et S : Peu profond.....	168
Tableau VI-4 : Corrélation spatiale entre les variables prédictives et les valeurs de pondération calculées par la théorie de l'évidence.	172
Tableau VI-5: AUC des différences facteurs pour l'occurrence des MTs.	177
Tableau VI-6: Les variables de prédiction utilisées pour la modélisation de la susceptibilité avec la RL	178
Tableau VI-7: Comparaison des performances des modèles de susceptibilité à base de l'AUC	187

ABBREVIATIONS

AMCI	: Agence Marocaine pour la Coopération Internationale
ARES	: Académie de Recherche d'Enseignement Supérieur
AUC	: Area Under the Curve
BBES	: Bureau des Bourses d'Etudes et des Stages
BCG	: Bureau de Centralisation Géomatique
CBUE	: Coopération Burundi – Union Européenne
CNES	: Centre National d'Etudes Spatiales
DSM	: Digital Surface Model
EM-DAT	: The International Disaster Database
ETM+	: Enhanced Thematic Mapper Plus
GIS	: Geographic Information System
HRVIR	: High Resolution Visible Infra-Red
IAEG	: International Association for Engineering Geology
IGEBU	: Institut Géographique du Burundi
ISTEEBU	: Institut National de la Statistique du Burundi
LULC	: Land use/land cover
MNE	: Modèle Numérique d'Elevation
MRAC	: Musée royal de l'Afrique centrale
MT	: Mouvement de Terrain
OVG	: Observatoire Volcanologique de Goma
PCS	: Point de Control au Sol
PFS	: Projets de Formation Sud
PIAO	: Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur
PRC	: Predictive Rate Curve
RESIST	: Remote Sensing and In Situ Detection and Tracking of Geohazards
RGPH	: Recensement Général de la population et de l'Habitation
ROC	: Receiver Operating Characteristics
SDM	: Spatial Data Modeller
SRC	: Success Rate Curve
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SWH	: SPOT WORD HERITAGE
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USGS	: United States Geological Survey
WoE	: Weights of Evidence

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte de la thèse

Les mouvements de terrain (MTs)¹ existent un peu partout dans le monde. Leur évolution joue un rôle important dans la dynamique des paysages terrestres. En interférant avec les activités humaines, les MTs restent un danger, parfois important, et souvent permanent dans plusieurs régions du monde (Highland and Bobrowsky, 2008; Stanley & Kirschbaum, 2017). Les MTs engendrent des conséquences socio-économiques néfastes qui restent largement sous-estimées dans la mesure où les dégâts occasionnés sont souvent associés à leurs facteurs de déclenchement tels que les averses, les tempêtes et séismes (Schuster, 1996). Les MTs sont en effet des phénomènes complexes de la géomorphologie et peuvent être actifs, inactifs ou dormants (McCalpin, 1984).

Les MTs affectent des surfaces réduites à des versants entiers de plusieurs dizaines de km² (p.ex., Kirschbaum et al., 2010; 2015a,b; Crosta et al., 2013). Les plus grands MTs connus dans le monde sont des grandes déformations de montagnes (p.ex., Crosta et al., 2013). La vitesse de déplacement des MTs varie de quelques millimètres par an à des dizaines de mètres par seconde (Hung et al., 2014). La profondeur au niveau de la surface de rupture des MTs peut varier de quelques mètres à des centaines de mètres (Terzaghi, 1960; Sidle & Bogaard, 2016).

La profondeur relative des MTs est évaluée par l'analyse de l'escarpement sur terrain ou à base des images satellitaires à très haute résolution spatiale comme celles disponibles dans Google Earth (par ex., Depicker et al., Soumis). Pour les glissements peu profonds, la profondeur de la rupture ne doit pas dépasser quelques mètres (Sidle & Bogaard, 2016; Depicker et al., 2021). La différenciation des processus est très importante pour évaluer les interactions liées à l'anthropisation. Par exemple, l'enlèvement et/ou la réduction de la couverture végétale rend les pentes plus sensibles aux ruptures de pente car le dépérissement des racines des arbres réduit la résistance du sol (Sidle & Bogaard, 2016); ce qui augmente l'occurrence des glissements superficiels (p.ex., Sidle & Bogaard, 2016; Depicker et al., 2021, Maki Mateso et al., soumis). D'autre part, les modifications de la morphologie des pentes peuvent également être préjudiciables aux MTs: la construction de nouvelles routes entraîne le sapement des pentes et la concentration des eaux de ruissellement (Sidle et al., 2014; McAdoo et al., 2018; Dewitte et al., 2021; Tanyaş et al., 2021), et l'activité minière ou de carrières perturbent la texture des pentes et la

¹ Dans cette recherche, afin d'éviter toute confusion de terminologie entre les glissements de terrain, les ravinements, les effondrements, les affaissements et les coulées, nous les avons renommés sous un terme général « **mouvements de terrain** » abrégé « **MTs** »

surface. Les activités agricoles telles que l'irrigation peuvent augmenter la pression de l'eau interstitielle et accroître également l'occurrence des glissements de terrain (Lacroix et al., 2020). En Afrique, particulièrement dans la zone intertropicale, les MTs sont nombreux et leur déclenchement est le plus souvent associé à l'existence des fortes précipitations (p.ex., Monsieurs et al., 2018). Leur étude tant à échelle régionale que locale est souvent au stade embryonnaire et le continent reste fortement sous-représenté dans la recherche sur les MTs (Gariano & Guzzetti, 2016; Kirschbaum et al., 2015, 2010; Maes et al., 2017; Nadim et al., 2006; Petley, 2012; Reichenbach et al., 2018).

Les recherches approfondies d'inventaire ou de l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa restent faible et se concentrent à l'échelle du rift au nord du lac Tanganyika jusqu'au lac Kivu, le rift NTK (Monsieurs et al., 2018, Depicker et al., 2020, 2021, Dewitte et al., 2021) et démontrent que la région est hautement prédisposée aux MTs. En effet, le rift est africain est naturellement exposé à des taux élevés de mobilisation des sédiments. Outre les pluies importantes qui déclenchent les MTs, les conditions d'humidité importante et de température élevées sont aussi favorable à l'altération des roches et à la formation de régolithe dont les épaisseurs peuvent être aisément supérieures à plusieurs mètres (Dille et al., 2019). En outre, la zone est caractérisée par une activité sismotectonique élevée notamment en relation avec la formation du rift et le soulèvement de la région, dont une des expressions est l'activité volcanique au niveau des montagnes des Virunga (Delvaux, 2001; Ebinger & Furman, 2003; Smets et al., 2016). Outre le déclenchement des MTs, cette activité sismotectonique à plusieurs rôles sur leur occurrence. Primo, la sismicité peut influencer le contrôle des MTs car elle joue aussi un rôle sur l'altération et la formation du régolithe (Depicker et al., 2021). Secundo, la formation du rift et la présence de failles sont responsables d'une topographie surdéveloppée avec la présence d'escarpements. A partir de ces escarpements se forment des incisions importantes au niveau des rivières qui sont liées à la propagation de knickpoints. Cela entraîne un rajeunissement de la topographie avec des pentes qui sont généralement plus fortes; c'est-à-dire des facteurs favorisant l'instabilité des pentes (Larsen & Montgomery, 2012). Cette région du Rift est aussi fortement peuplée et la croissance de la population y est importante (Michellier et al., 2016). Dans de tels environnements, les facteurs naturels et humains qui conduisent à la dégradation du sol sont étroitement liés et il est parfois difficile de démêler leurs contributions.

Au Burundi, plus particulièrement dans les reliefs du rift occidental africain, des dommages liés aux glissements de terrain et à des processus d'érosion associés sont élevés et sont en relation notamment avec la saisonnalité des précipitations (Monsieurs et al., 2018; Dewitte et al., 2021). Sur les versants, les catastrophes liées aux impacts directs sont parfois minimales et très localisées en proximité des zones de départ des glissements. C'est à mettre en opposition par rapport aux dégâts importants qui peuvent être observés en aval des zones de départ de coulées de boues et de débris dont la mobilité est forte et la distance de parcours parfois importante, atteignent dans certains cas plusieurs kilomètres. Des

glissements de terrain peuvent aussi être associés à la présence de crues éclair (p ex., IFRC, 2014). Les MTs dans la région sont aussi associés à de grandes érosions/ravinements, la dynamique des rivières et la géodynamique régionale (Moeyersons & Trefois, 2012; Dewitte et al., 2021). L'érosion étant un déplacement de sol ou de roches sous l'action combinée de la gravité et des éléments naturels tels que le vent, la pluie, le ruissellement de l'eau ou les vagues. Ce phénomène entraîne le transfert progressif des débris depuis l'amont des versants vers l'aval. L'érosion plus importante du sol par les eaux de ruissellement étant désignée par ravinement.

La ville de Bujumbura, capitale économique Burundi, est sujette à une forte demande foncière en raison de la croissance démographique élevée, obligeant son extension vers les collines en périphérie. Dans cette zone, les MTs entraînent des destructions considérables aussi bien sur le plan matériel qu'humain (ensevelissements et destructions de maisons, de ponts, de routes, dérangement de la production agricole, destruction de réseaux électriques, barrages hydro-électriques, etc. (Moeyersons & Trefois, 2012). Ces MTs se présentent sous forme des processus variés (glissements profonds, coulées de boues ou de débris, petits glissements superficiels, effondrements, etc. (Moeyersons & Trefois, 2012; Niragira et al., 2015).

A l'échelle de Bujumbura, les analyses de susceptibilité aux glissements de terrain sont limitées à une étude avec des méthodes heuristiques (indexation matricielle) qui a été réalisée par Niragira et al. (2015). D'autres études ont comparé différentes méthodes probabilistes (Shirambere et al., 2018). Ces études sont basées sur des inventaires (très) incomplets de glissements de terrain pour lesquels une différenciation des processus n'est pas prise en compte.

2. Hypothèses

Le projet de caractérisation et d'évaluation de la susceptibilité aux MTs se concentre sur une zone qui se trouve autour de la ville de Bujumbura. Cette zone connaît des processus de surface très actifs (Moeyersons & Trefois, 2012)). Un inventaire détaillé des MTs sur une période de plusieurs décennies avec description des différents processus est indispensable. Dans le contexte d'anthropisation forte comme le Burundi, une étude détaillée des MTs serait d'importance capitale. Il est souvent suggéré que cela serait dû à la dégradation de l'environnement provoquée par l'action anthropique.

Une autre hypothèse est qu'une connaissance détaillée de ce qui se passe devrait permettre de fournir des documents cartographiques, inventaires, modèles, qui devraient permettre une meilleure gestion du territoire. Elle permettrait de protéger la population et leurs biens d'une part et serait une occasion de la comparer aux inventaires régionaux afin d'introduire des nouvelles données dans la base de données géographique mondiale d'autre part.

En outre, la transformation de l'environnement liée aux pratiques agricoles et au développement des infrastructures peut accélérer les instabilités suite aux modifications des pentes et des propriétés de surface par l'imperméabilisation du sol suite au compactage et aux constructions entraînent des quantités excessives de concentration du ruissellement. Cependant, le tableau est beaucoup moins clair que par rapport à ce que ce raisonnement assez stéréotypé suggère. Des recherches récentes suggèrent que trop souvent l'importance des facteurs naturels est négligée, ce qui conduira inévitablement à la surestimation des effets nuisibles que les humains peuvent avoir sur leur environnement (Kiage, 2013; Zhao et al., 2016).

Notre hypothèse principale de travail est que pour comprendre de telles interactions, des inventaires très détaillés et fiables des glissements et des activités anthropiques (pratiques agricoles, constructions, etc.) en relation avec leur occurrence sont indispensables. Nous faisons l'hypothèse que de tels inventaires ne peuvent être récoltés qu'en combinant des enquêtes et des levés de terrain très poussés avec des données multi-temporelles (télédétection et photographies aériennes historiques).

3. Objectifs

L'objectif général de cette recherche doctorale est de réaliser une caractérisation spatio-temporelle des MTs et des processus d'érosion associés et d'ensuite évaluer la susceptibilité associée dans un contexte d'anthropisation d'un environnement tropical à forte croissance urbaine.

Les objectifs spécifiques sont:

- (1) La caractérisation spatiale multi-temporelle détaillée des MTs au niveau régional en relation avec l'occupation du sol, le ravinement et la dynamique des rivières.
- (2) L'analyse de la susceptibilité et la production de cartes de prédiction.

En plus de la connaissance fondamentale des processus que cette recherche va apporter, l'objectif est aussi d'apporter des résultats qui permettront la mise en place de stratégies plus efficaces de gestion du territoire dans le cadre du développement durable dans cette partie de l'ouest du Burundi.

Cette recherche se veut pluridisciplinaire (télédétection, analyse spatiale, géologie, géomorphologie) en combinant l'analyse des levés de terrain, des données historiques et des images satellitaires et/ou photos aériennes.

4. Structure de la thèse

La thèse permettra de répondre aux objectifs généraux et spécifiques et sera abordée en cinq chapitres qui fournissent une structure logique et qui permettent de délimiter les étapes clés du projet. Pour chaque

Introduction générale

cas, les méthodes utilisées reposeront sur des techniques bien cadrées, complétées par des approches plus novatrices.

Le chapitre I sera consacré à la description détaillée de la zone d'étude dans le cadre régional. Les reliefs de Bujumbura situés dans le rift occidental est africain sont actifs du point de vue géodynamique. La région est caractérisée par des reliefs soulevés et affaiblis par la tectonique qui s'incise par les rivières traversant les fortes pentes et devient ainsi susceptible aux glissements de terrain. Dans ce chapitre, nous décrivons des aspects géomorphologiques, géologiques et climatiques caractéristiques des reliefs de Bujumbura. Cela va aider à la compréhension de la zone d'étude et son évolution morpho-dynamique. Un aspect sur la structure de la population de la région et leur niveau socio-économique sera abordé surtout qu'elle est la cible primaire des impacts liés à ces catastrophes naturelles.

Le chapitre II présentera une description complète théorique sur les glissements de terrain et leur processus de rupture. Il s'agit de comprendre certaines notions et concepts courants de base qui seront abordés au cours de notre recherche. Les différentes classifications des MTs seront expliquées à ce niveau. De plus, nous montrerons la distribution des MTs à différentes échelles dans le but de contextualiser notre thème au niveau global et dans la région.

Le chapitre III abordera la contribution de l'imagerie satellitaire et des photos aériennes dans l'analyse spatiale des MTs et des processus d'érosion associés. La présente étude dispose de plusieurs images de sources et résolutions différentes. Ces images interviendront pleinement dans la collecte des données de base nécessaire pour l'analyse spatiale et la modélisation de la susceptibilité et de l'aléa. La disponibilité d'un tel jeu de données est un atout pour notre recherche et permettra une analyse multi-temporelle.

Le chapitre IV sera dédié à la description physique des mouvements de terrain (MTs) se trouvant dans les reliefs de Bujumbura. Des détails sur la description et la localisation des MTs seront fournis à ce niveau. Il s'agit de parcourir la base de données des MTs collectés à l'aide des jeux de données disponibles à l'échelle régionale.

Le chapitre V sera consacré à la caractérisation des processus variés des MTs (taille, forme, état d'activité, type, profondeur, connexion à la raison de drainage, routes, etc.) selon des critères et des méthodes reconnues. L'environnement dans lequel ces processus se produisent sera également caractérisé. Une attention particulière sera accordée aux aspects physiques (pente, lithologie, géomorphologie, couverture végétale, etc.) et humains.

Le chapitre VI présentera d'abord l'analyse régionale de la susceptibilité aux MTs pour prédire leur occurrence spatiale. Ici quelques données d'inventaires régionaux collectées et décrites précédemment seront introduites dans le modèle et confrontées aux facteurs potentiels naturels capables de déclencher

les mouvements de terrain afin de produire les cartes de susceptibilité. Ici, une attention particulière sera faite pour l'analyse des MTs profonds et superficiels avec l'usage des méthodes appropriées (heuristique d'une part et probabiliste d'autre part).

5. Méthodologie

Le projet a été cadré en fonction de l'échelle d'analyse et de la disponibilité des données. Nous disposons déjà d'un inventaire de plus de 200 MTs (Depicker et al., 2020) et presque de 20 travaux de fin d'études de Licence (Université du Burundi) qui ont récemment été consacrés à des problématiques de glissements dans la zone d'étude. Ces données serviront de base à l'analyse régionale, laquelle suivra une approche Bottom-up où les informations locales serviront à trouver des réponses plus générales.

Une approche clé est le levé et enquête de terrain. Cette approche est primordiale pour les raisons suivantes:

- (1) Elle est le moyen de valider toutes les informations qui sont récoltées à l'aide des images satellitaires, des photographies aériennes anciennes et des archives (Guzzetti et al., 2012). Pour les événements récents responsables de dégâts importants, il peut y avoir des articles de presse par exemple (Monsieurs et al., 2018), mais la description des événements y est souvent confuse et peu précise. Sans validation, il est difficile voire impossible d'apporter des réponses clés liées aux conséquences de l'anthropisation.
- (2) Elle permet d'augmenter la précision et le détail des recherches: beaucoup de processus ne sont pas indentifiables via la télédétection en raison de leur taille et/ou de la couverture végétale étant donné qu'on est en milieu tropicale à forte couverture nuageuse.
- (3) Elle permet de récolter des informations sur les caractéristiques temporelles des processus: quand a eu lieu un glissement? Après quel type de pluie? Combien de temps après un changement d'affectation du sol? Ces questions restent en grande majorité sans réponse en l'absence d'une enquête de terrain.
- (4) Elle permet de récolter des informations précises sur l'affectation du sol, la nature des sols et la lithologie: éléments très difficiles à cerner via des images satellitaires notamment, surtout dans des paysages aussi morcelés que ceux de la zone d'étude. De plus, les photos aériennes de l'époque coloniale disponible sont trop anciennes dans la plupart des cas.

Dans ce contexte d'absence de données sur les occurrences spatiales et temporelles des MTs où la carte géomorphologique et/ou morpho-dynamique n'existe pas, il est utile de réaliser des études bien approfondies du phénomène.

Dans toute analyse de susceptibilité, il est important de faire si possible la distinction entre les différents types de MTs vu que les conditions environnementales qui expliquent leur occurrence varient selon les

Introduction générale

processus (Sidle & Bogaard, 2016). Au moins une distinction sera faite entre glissements profonds et glissements superficiels, ces derniers sont beaucoup plus sensibles à la contrainte climatique journalière et à l'anthropisation et aux changements de couverture végétale. Cette analyse de susceptibilité se fera à l'aide de méthodes quantitatives multicritère et statistiques basées sur les données disponibles suivant l'échelle de travail (Corominas et al., 2014). Ces approches ont été appliquées notamment dans le Rwenzori qui présente un environnement de travail similaire (Jacobs et al., 2018).

CHAPITRE I. PHYSIOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE

I. PHYSIOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Description de la zone d'étude

Les reliefs de Bujumbura sélectionnés pour cette étude sont localisés dans la partie occidentale du rift est africain, à l'ouest de la République du Burundi sur une superficie totale de 490 km² (Figure I-1). Le rift occidental est africain a la direction structurale NW-SE (Delvaux et al., 2012) appelée tanganyikienne et croise la direction albertienne à une trentaine de kilomètres au NW de Bukavu (Ilunga, 1991). Le branche occidentale peut être considérée comme un bon modèle de rift continental jeune, tandis que la branche orientale est représentative d'un système de rift continental mature "raté". Les deux sont caractérisés par de grands systèmes graben remplis de sédiments fluvio-deltaïques et lacustres, et/ou de roches volcaniques et volcanoclastiques (Morley et al., 1999).

La population est élevée (moyenne > 500 habitants au kilomètre carré) et plus concentrée à l'ouest de la zone d'étude, la périphérie de la ville de Bujumbura. L'altitude varie entre 800 m et plus de 2400 m au-dessus du niveau de la mer sur une distance moyenne de ~ 20 km, ce qui explique la topographie abrupte avec des pentes pouvant atteindre 70°.

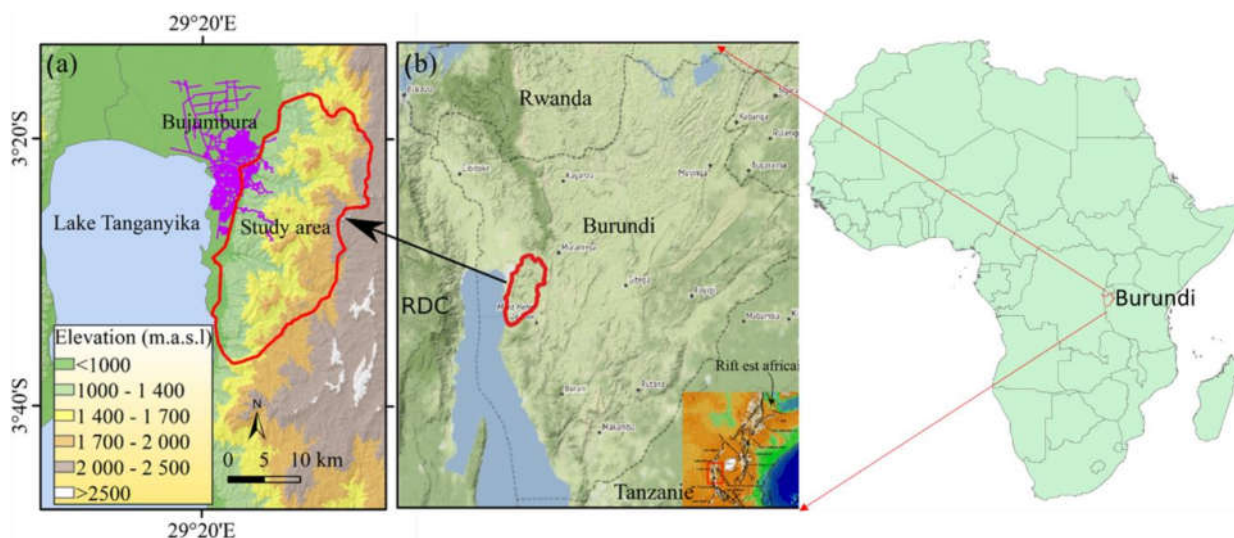


Figure I-1: Localisation de la zone d'étude : a – Zoom sur les reliefs avec la zone urbanisée de la ville de Bujumbura, b – Position de la zone d'étude par rapport à la branche occidentale du rift est africain. L'ombrage des collines est dérivé du modèle numérique de terrain SRTM à 1 arc seconde de résolution spatiale (Farr et al., 2007). Le réseau routier (en violet) vient de 'OpenStreetMap aerial'. La carte de base en (b) provient de © Stamen Terrain-USA/OSM.

La région se trouve dans un contexte de soulèvement tectonique. Les rivières traversent et incisent la topographie abrupte. La topographie basse est située à l'extrémité ouest, suivie d'une topographie abrupte associée à un soulèvement tectonique récent (Figure I-2). L'est présente des pentes plus ou moins modérées avec un paysage relique.

I.2. Caractérisation morphologique, géologique et climatique des reliefs de Bujumbura

I.2.1. Relief et morphologie

Les reliefs de Bujumbura sont caractérisés par un relief très accidenté grâce au rajeunissement avec la présence des failles normales et des blocs basculés. 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 (Figures I-1a & 2). 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 (Figure I-2b). Les escarpements du rift sont séparés de la plaine par le piémont. Il s'agit de la bordure occidentale correspondant au glacis d'érosion avec des altitudes autour de 1000 m (Figure I-3). Le centre correspond au paysage rajeuni qui s'élargit vers l'est par érosion provoquant ainsi le recul des knickpoints/knickzones et est marqué par des pentes fortes (Figure I-3). L'extrémité orientale connaît un paysage relique caractérisé par des pentes faibles à modérées (Figure I-3).

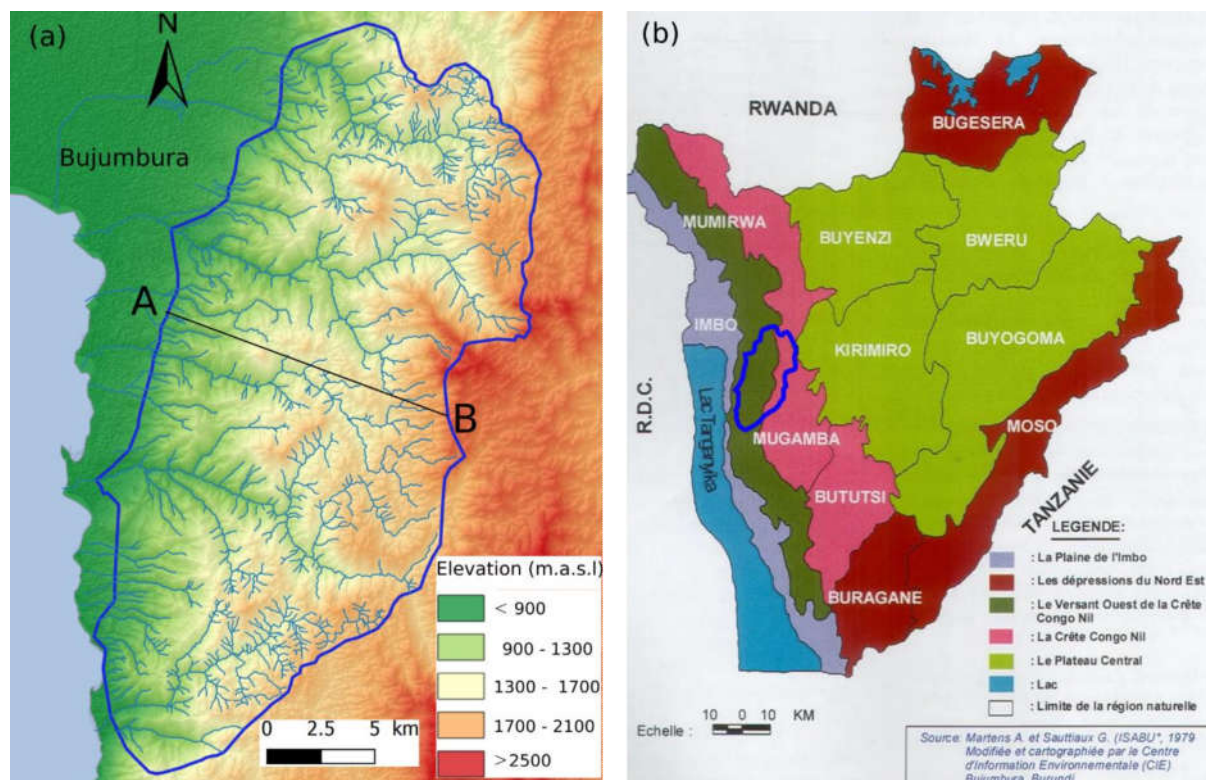


Figure I-2: Relief des (a) reliefs de Bujumbura, (b) les ensembles géomorphologiques du Burundi (modifié de l'©ISABU). Le contour bleu symbolise la zone d'étude.

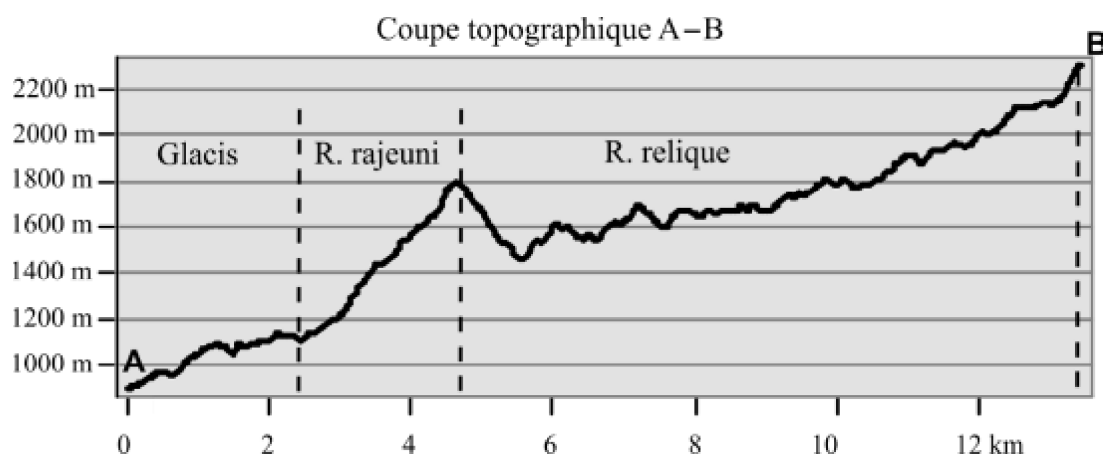


Figure I-3: Profil topographique ouest-est des reliefs de Bujumbura (coupe AB sur la Figure I-2). L'axe des Y est en m à partir du niveau de la mer et l'exagération verticale est de 3. R abrège le relief et nous montre l'existence des trois paysages (Glacis, paysage rajeuni et paysage relique).

I.2.2. Tectonique du Burundi

Nous distinguons deux phases tectoniques principales. Une ceinture de chevauchement et de plis plus ancienne (1250 - 1200 Ma) et une ceinture de plis de cisaillement plus tardive (1200-1100 Ma). La phase tectonique la plus ancienne est observée dans les méta-sédiments et s'exprime par un clivage concordant avec le litage (Claessens & Theunissen, 1988). On pense que cette tectonique est liée à la tectonique d'extension et à un éventuel rifting (Klerkx et al., 1987; Delvaux et al., 2012; Min & Hou, 2018) et qu'elle est coexistant ou postérieure au magmatisme bimodal granitique et mafique/ultramafique de l'événement de Kibara (1375 Ma).

Plus dominantes sont les ceintures de plis de la seconde déformation qui façonnent les structures caractéristiques du relief du Burundi central. Les ceintures de plis se sont formées sous l'effet de la tectonique de compression et sont des plis ouverts, verticaux, orientés NE-SW, une succession de synclinaux et d'anticlinaux (plis redressés), ces derniers étant souvent intrudés par des granites. Les secondes structures majeures sont des zones de cisaillement orientées NW à SE dans la seconde déformation avec des roches mylonitiques et cata clastiques au centre et des plissements intenses sur les marges des zones de cisaillement. Ce que l'on appelle l'événement de Cène qui est supposé avoir été coexistant avec la mise en place d'intrusions ultramafiques le long de l'alignement de Musongati vers 1100 Ma (Klerkx et al., 1987).

I.2.3. Géologie

I.2.2.1. Aperçu général de la géologie du Burundi

La grande partie du Burundi est entièrement couverte par des roches d'âge protérozoïque (> 570 millions d'années). Géologiquement, le Burundi se trouve dans une zone charnière entre le bouclier ancien archéen et un bassin du rifting. Les roches les plus récentes sont d'âge cénozoïque et correspondent à

des dépôts sédimentaires fluvio-lacustres et à des coulées basaltiques affleurant au Nord-Ouest du pays. Le Précambrien est formé de 3 grands ensembles géologiques à savoir l'Archéen, le Burundien et le Malagarazien (Ntungicimpaye; Tack et al., 1994; Klerkx et al., 1987; Tack, 1995).

(1) L'Archéen date d'environ 2600 millions d'années et a été identifié au Sud-Ouest du Burundi, au Nord-Est du pays et au Sud de Bujumbura. Il est essentiellement constitué de gneiss et de granites dans lesquels s'intercalent localement des amphibolites et des méta quartzites.

(2) Le Burundien dont l'âge varie entre 1400 et 950 millions d'années recouvre la majeure partie du territoire du centre à l'Est et du Sud au Nord. Il constitue l'équivalent local de la chaîne orogénique Kibarienne orientée SSW-NNE (Sud de la République Démocratique du Congo au Sud- Ouest de l'Ouganda) et fait partie de plusieurs bassins sédimentaires méso-protérozoïques, grossièrement parallèles, qui ont ensuite subi une déformation métamorphique (Boniface et al., 2014). Il se caractérise par la présence de quartzites, de schistes et de phyllades à l'Est et des gneiss granitiques, de granites souvent porphyriques et d'amphibolites avec des intercalations de méta quartzites et de micaschistes à l'ouest (Figure I-4).

(3) Le Malagarazien est plus jeune que le Burundien et repose en discordance majeure sur ce dernier (Tack, 1995). Il occupe le Sud-Est du pays et se prolonge vers la Tanzanie. Il est caractérisé par des quartzites, des schistes, des conglomérats, des basaltes, des calcaires dolomitiques et silicifiés, des grès et des laves amygdaloïdes (Figure I-4).

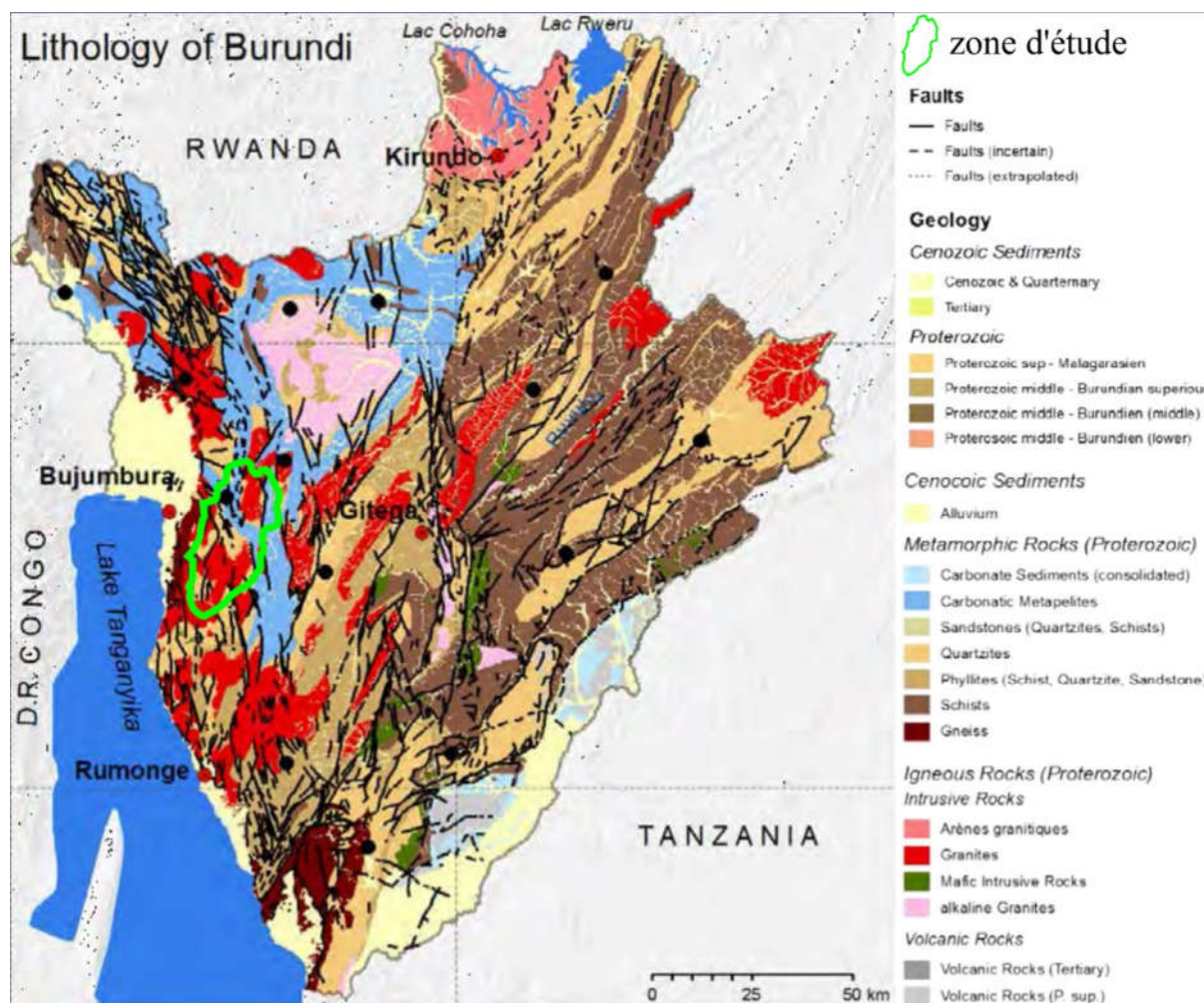


Figure I-4: Principales formations géologiques du Burundi (©Burundi Database BRGM; cf. Post et al., 2011). Le contour vert clair représente la zone d'étude.

I.2.2.3. Géologie des reliefs de Bujumbura

La géologie est dominée par des roches d'âge précambrien complexe. D'après les données de la carte géologique du Burundi, feuille Bujumbura, les principales formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude sont cartographiées à la Figure I-5. Les roches métamorphiques dominent en surface (Figure I-5) avec des intrusions magmatiques massives de granites (Figure I-6) et des lentilles de pegmatites. Les alluvions récentes d'âge Pléistocène sont dans la partie basse à l'ouest. D'ouest à l'est, la région présente des lithologies variées (Figure I-7).

I.2.2.3.1. Pléistocène moyen des reliefs de Bujumbura (Pm)

Il est représenté par des cônes alluviaux à mécanismes sédimentaires du type débris flow-sheet flood suivant une bande s'étendant le long du lac Tanganyika de la ville Bujumbura vers le Sud. Il est constitué par des formations d'épandages aux pieds des escarpements constitués principalement par des sables rouges grossiers aux dépôts fins silto-argileux.

I.2.2.3.2. Précambrien

A l'exception du complexe de la Mugere (Mg), le précambrien est attribué au protérozoïque moyen. Celui-ci comprend des ensembles sédimentaires généralement peu conservés parmi les ensembles métamorphiques et les nombreuses intrusions granitiques et basiques.

a) Complexe de Buhonga (Bg)

C'est un ensemble d'origine sédimentaire préservé sporadiquement et de manière variable du magmatisme granitique. En général très altérés et ne se distinguant de son encaissant plus magmatique que par un fin litage ou rubanement (plus phylliteux ou plus quartzitique) d'origine sédimentaire et/ou tectono-métamorphique. Les quartzites qui représentent pratiquement la totalité du complexe sont identifiés comme des méta sédiments qui ont des caractéristiques semblables à ceux des formations de Rugazi avec des amphibolites souvent concordantes à la structure.

b) Complexe de la Mugere (Mg)

Essentiellement constitué de gneiss migmatiques, rubanés et rubano-lenticulaires avec des niveaux quartzitiques et d'amphibolites (Figure I-8). L'ensemble est injecté en concordance par des granites gneissiques (Figure I-6). Nous avons aussi des niveaux de phyllonites, pegmatites par endroits, granulites basiques, roches basiques à plagioclase anorthitique, gabbros à amphiboles.



Figure I-8: Affleurement des gneiss sous les colluvions, zone de contact entre le Pléistocène moyen et le complexe de Mugere, photo du 10/01/2019

c) Roches intrusives (γ)

On a le granite à texture orientée d'origine magmatique concordante à la structure dominante d'origine tectonique (granite syncinématique). Il est formé des feldspaths (phénocristaux et clastes), quartz, biotite, muscovite, parfois grenat. Les enclaves sont très fréquentes constitués par des méta sédiments.

d) Pointements isolés de roche basiques

Des pointements basiques isolés à petite échelle s'observent dans des formations gneissiques et dans les métas sédiments.

I.2.4. Tectonique de la région des reliefs de Bujumbura

Les reliefs de Bujumbura sont situées dans la branche occidentale du fossé tectonique de l'Afrique orientale. Le contact entre faille et le Précambrien est masqué par des sédiments. Des études néotectoniques visant l'identification du mécanisme de mise en place du rift ont été effectuées (Theunissen et al., 1989). Il semble évident que la mise en place du rift est largement contrôlée par la structuration du socle précambrien dont surtout les zones de faiblesse structurale orientées plus ou moins nord-sud sont rajeunies (Figure I-5).

I.2.5. Climats

Au Burundi, on distingue trois types de climats régionaux (Bidou et al., 1991):

- (1) Climat tropical humide de montagne (Crête Congo Nil et Mirwa)
- (2) Climat tropical humide (Plateaux Centraux)
- (3) Climat tropical sec (Imbo et Kumoso)

I.2.5.1. Précipitations

La zone d'intérêt dans cette étude se trouve dans les reliefs de Mirwa et connaît généralement un climat tropical humide de montagne (Bidou et al., 1991). Ce climat tropical humide (Septembre – Mai) alterne avec la saison sèche qui ne dure que trois mois (Juin – Août) et les mois de mai et septembre enregistrent des précipitations supérieures à 100 mm (Hakiza, 2002). Selon la classification mondiale mis à jour par Peel et al. (2007), le climat de la zone est tropical humide de savane tempéré par l'altitude.

La station Teza peut représenter le climat de la zone d'étude dans la partie en amont. En aval, on utilisera les données des précipitations enregistrées sur la station Mutumba (1956-1999). Ainsi, les précipitations moyennes annuelles sont de 1400mm (Kirasa, 2020). Les précipitations maximales sont de l'ordre de 1650mm/an (Figure I-9). Les mois de novembre et avril sont les plus pluvieux et leur moyenne se situent entre 200 et 250mm (Figure I-10). Les précipitations élevées de la région favorisent l'altération rapide des roches en formant un sol latéritique épais (régolithe) qui est susceptible aux ruptures de pente.

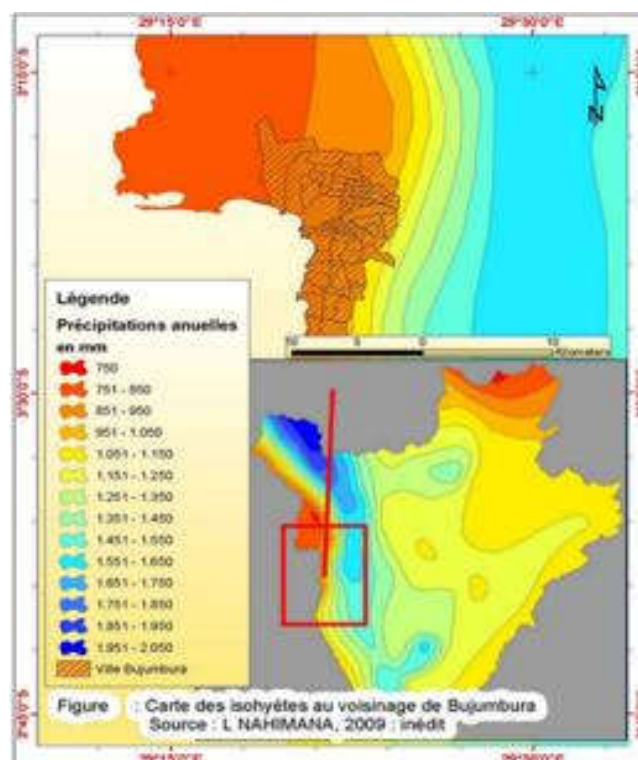


Figure I-9: Carte des isohyètes du Burundi avec la mise en évidence de la région de Bujumbura (Ciza, 2013)

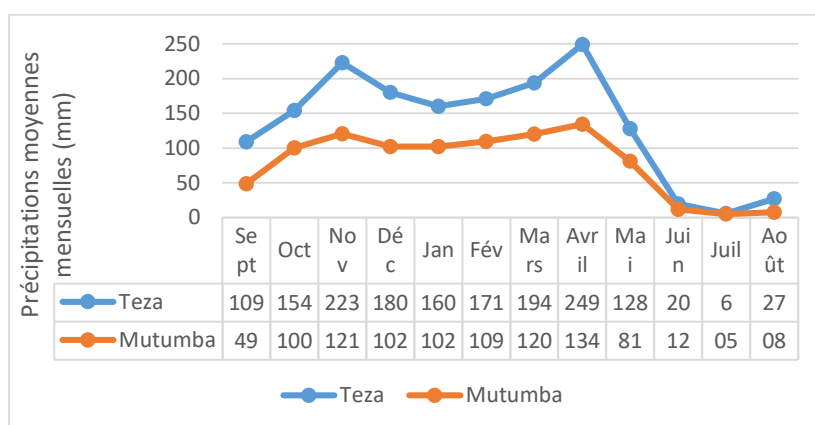


Figure I-10: Variations moyennes mensuelles des précipitations (Stations Teza et Mutumba), (Kirasa, 2020)

Le régime pluviométrique est marqué par une forte variabilité temporelle. En amont des bassins versants, la véritable saison de pluie commencent avec le mois de septembre et se termine au mois mai tandis qu'en aval, elle débute en octobre avec des excédents en novembre, mars et avril (Figure I-10).

I.2.5.2. Températures

Les données que nous avons recueillies auprès de la station Mutumba et celles de Kirasa Energy ne contiennent pas celles des températures (Kirasa Energy, non publié). Pour cette raison, ils ont utilisé les

températures enregistrées par la station Teza qui se trouve dans la région de mêmes conditions climatiques que la zone d'étude en amont. Ces données des températures ont été synthétisées par Hakiza (2002) et sont reprises sur les Figures I-11 et 12. La température moyenne mensuelle varie entre 15.1 et 16.5°C pendant 20 ans avec une moyenne de 16°C.

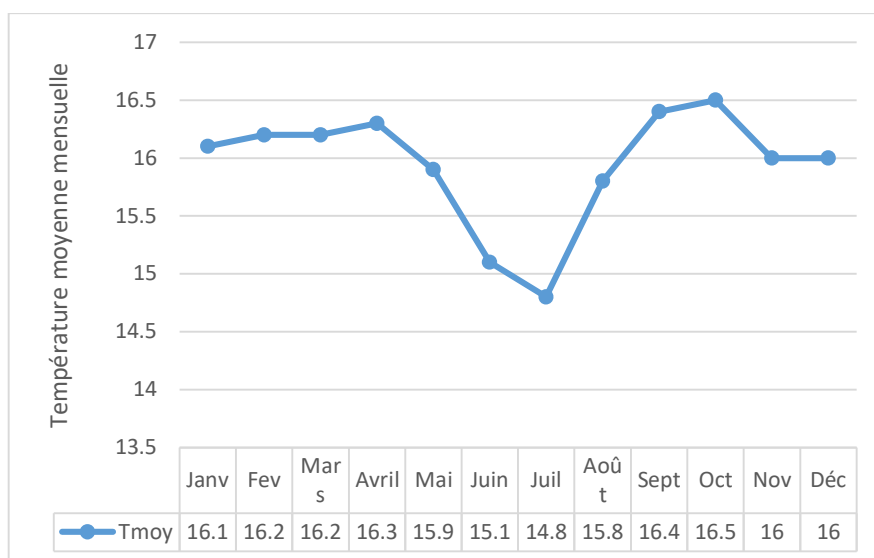


Figure I-11: Variation mensuelle des températures (Station Teza)

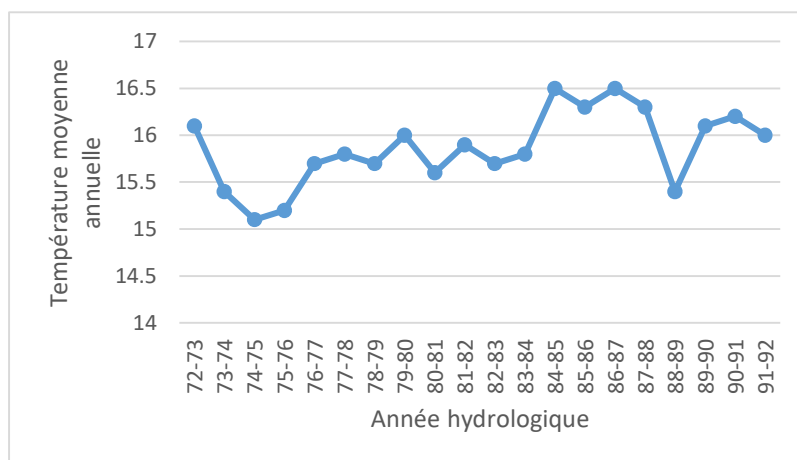


Figure I-12: Variations interannuelles des températures (Station Teza) selon les calculs effectués dans la partie sud des reliefs de Bujumbura (Kirasa Energy, non publié)

I.3. Dynamique de l'occupation du sol

L'occupation du sol ou tout simplement sa couverture est composée de trois unités principales à savoir (Figure I-14):

- (1) La zone bâtie liée plus rependue à l'ouest de la zone d'étude (Figure I-14);
- (2) La forêt de l'est qui disparaît progressivement vers l'ouest pour laisser la place aux activités humaines;

- (3) Les terres agricoles avec une végétation basse à moyenne et des arbres éparpillés (Mboga et al., 2020).

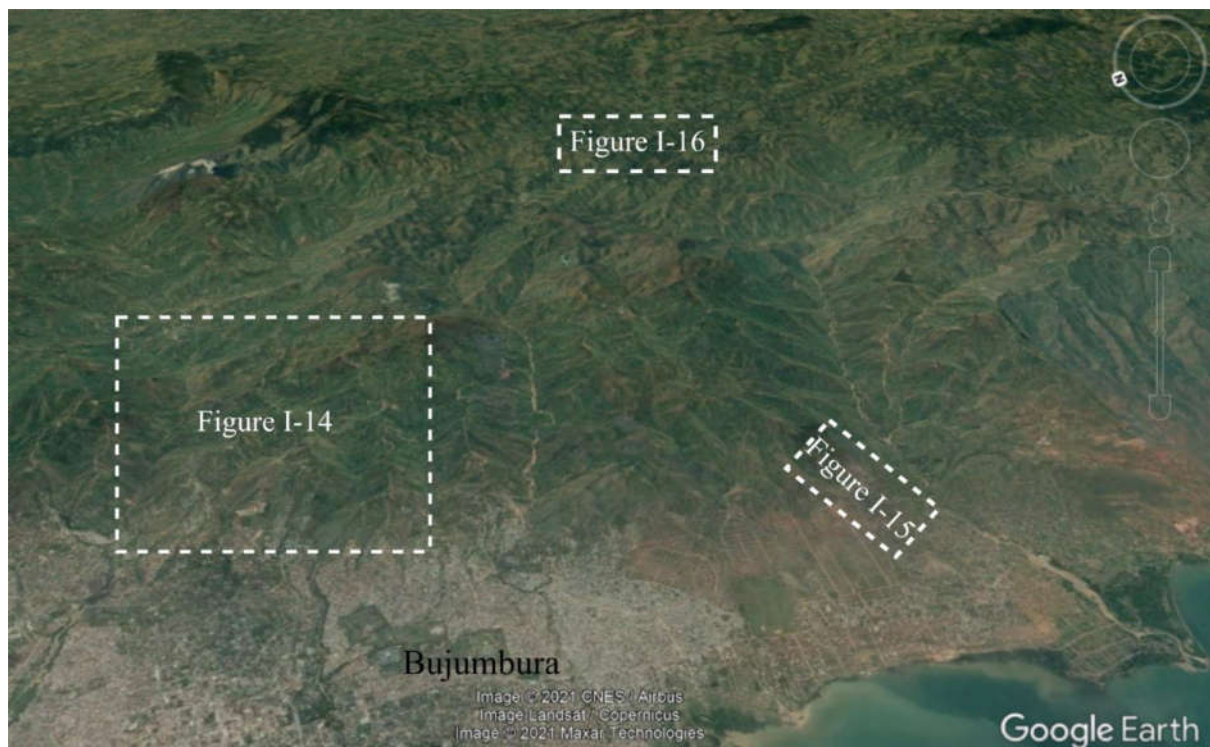


Figure I-13: Dynamique de l'occupation du sol des reliefs de Bujumbura. Les rectangles blancs représentent les zones agrandies au Figures I-14, I-15 et I-16

La grande partie de la zone d'étude est majoritairement dominée par des cultures vivrières telles que les haricots, maïs, patates douces, légumineuses, manioc, bananeraie, palmier à huile, arbre fruitier etc. (Figure I-15). Les boisements existent en hauteur et sont essentiellement dominée par des eucalyptus (Figure I-16). Notons que les voies de communications sont constituées uniquement par des routes nationales menant à l'intérieur du pays et des routes communales en terres (Figure I-16).

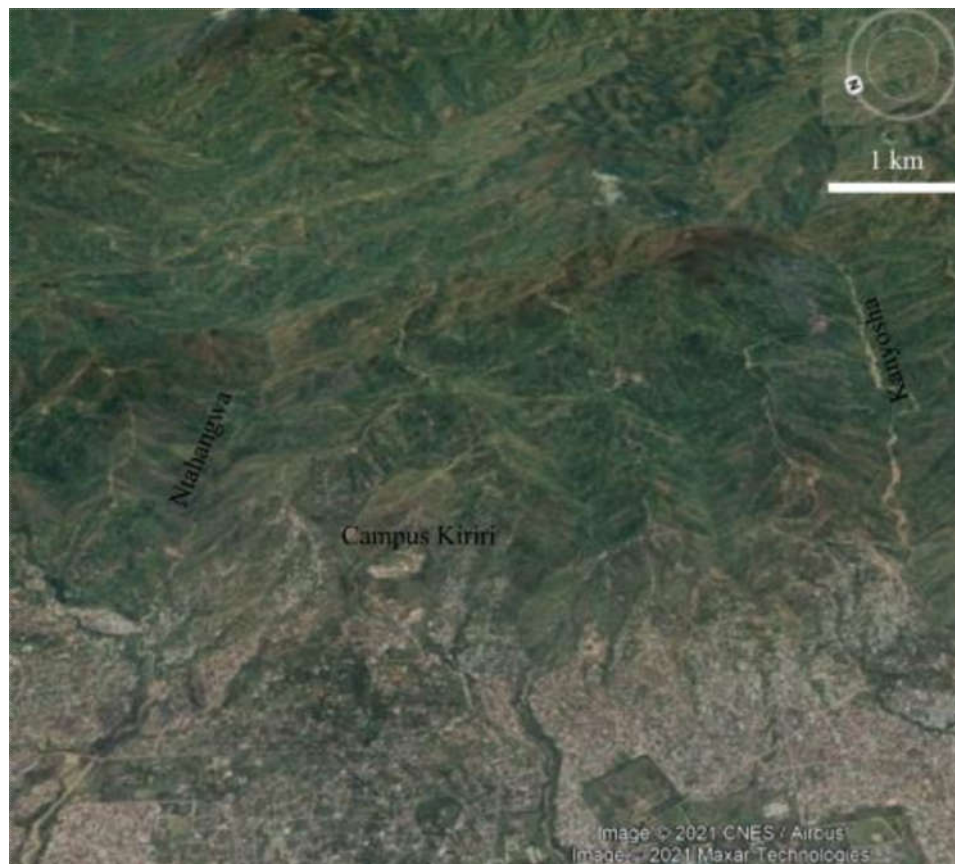


Figure I-14: L'occupation du sol sur l'image Google Earth avec discrimination de l'espace bâti et les terres agricoles (Date de l'image: Janvier 2021)



Figure I-15: Photo illustrant les principales cultures vivrières pratiquées dans la zone d'étude (Date de la photo: décembre 2019)



Figure I-16: Image Google Earth de l'occupation/couverture du sol montrant la forêt, des terres agricoles, l'habitation dispersée et des voies de communication dans la partie orientale des reliefs de Bujumbura (Date de l'image: janvier 2021)

I.4. Hydrographie

Le réseau de drainage est ramifié avec souvent un ordre arrivant à 5 pour une longueur en moyenne de 20 km (Figure I-17). Cette dénivellation élevée sur une longueur réduite justifie le caractère torrentiel des cours d'eau. La zone d'étude se trouve dans le grand bassin du fleuve Congo avec réseau hydrographique où tous les cours d'eau se jettent directement dans le lac Tanganyika.

Les cours d'eau de la zone d'étude sont classés selon l'ordination de Strahler (p.ex., Gleyzer et al., 2007; Ashwin, 2014). Les cours d'eau d'ordre élevé (5) correspondent aux grandes rivières traversant la ville de Bujumbura dont Gikoma, Gasenyi, Ntakangwa, Kanyosha, Mugere et Karonke. Des grands affluents avec un ordre 4 sont observables au niveau des rivières Ntakangwa, Mugere et Karonke. Ces rivières sont les plus drainées du secteur d'étude. Les ordres (0 à 3) correspondent aux petits affluents des grandes rivières d'une part et aux cours d'eau qui se jettent directement au lac Tanganyika d'autre part.

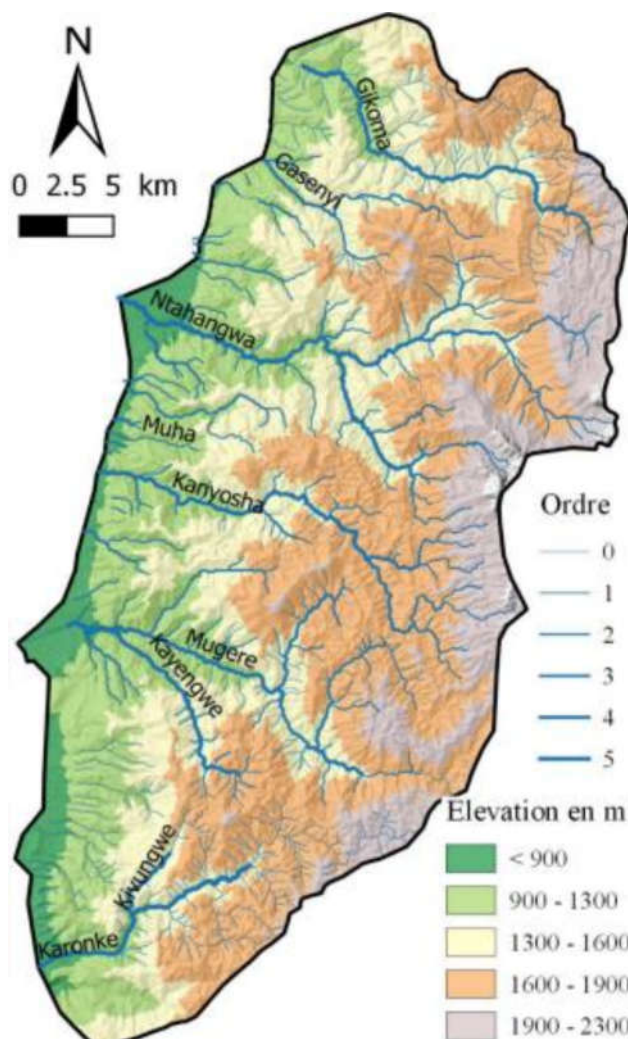


Figure I-17: Carte du réseau de drainage des reliefs de Bujumbura

I.5. Structure socio-économique des reliefs de Bujumbura

Dans les reliefs de Bujumbura, on peut distinguer deux catégories des couches de la population avec des niveaux de vie très différentes. La bordure ouest de la zone d'étude correspondant à la périphérie de la ville de Bujumbura connaît des densités de la population plus élevées (République du Burundi, 2011). La presque totalité de l'espace est bâtie (Kabanyegeye et al., 2021). Dans cette localité, la population mène une vie citadine essentiellement constituée par des services (Belghith et al., 2016; Viator, 2020). Elle a l'avantage d'être connectée à des infrastructures socio-économiques de la ville de Bujumbura (République du Burundi, 2009). La construction sans viabilisation de la plupart de ces quartiers périphériques de Bujumbura reste le problème essentiel, ce qui gêne le drainage des eaux usées et de pluies (Ndikubwayo, 2019).

Vers l'intérieur de la zone d'étude par contre, la population, essentiellement rurale, vit en habitat dispersée (ISTEEBU, 1998; République du Burundi, 2011; Figure I-16). Ces habitats isolés d'une population à faible niveau de vie ainsi que les pentes fortes de la région provoquent un manque des voies

Chapitre I. Physiographie de la zone d'étude

d'accès jusqu'au domicile. Les structures publiques (centre de santé, écoles, marché) manquent ou sont faibles (République du Burundi, 2009). Ainsi, le niveau de vie de population est faible et est essentiellement lié aux petits travaux agricoles (Figure I-15) ou d'élevage (ISTEEBU, 1998; République du Burundi, 2011; Figure I-15).

CHAPITRE II. NOTIONS DE BASE POUR L'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

II. NOTIONS DE BASE POUR L'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

II.1. Introduction

Les MTs font partie des catastrophes naturelles les plus répandus dans le monde (Dilley et al., 2005). Ils interagissent avec d'autres risques naturels fortement destructeurs tels que les averses, les inondations et les séismes (Ritchie & Roser, 2014). Les MTs causent de dommages associés aux destructions des biens (infrastructures socio-économiques) et ensevelissement des êtres humains (Lee and Jones, 2004). Ainsi, la base de données internationale (EM-DAT) indique que les MTs représentent 4.9 % de toutes les catastrophes naturelles (Petley & Froude, 2019).

Une meilleure compréhension des MTs ainsi que leurs causes jouent un rôle clé dans la stratégie de réduction de risques (Dilley et al., 2005). La quantification des risques de MTs s'est développée depuis que la commission de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur (IAEG) a tenté de faire un inventaire des MTs dans le monde pour le résumé annuel de l'information sur les catastrophes naturelles en 1971 (UNESCO). Bien qu'incomplets, cinq années d'enregistrements (1971-1975) ont reconnu que les MTs constituent une menace mondiale importante (Varnes & IAEG, 1981). Depuis cette période, une évaluation des dangers associés aux risques de MTs a suscité un intérêt croissant (Froude & Petley 2018).

Actuellement, des cartes d'inventaire de MTs ne sont disponibles que pour quelques pays du monde et surtout pour des zones limitées (p.ex., Guerrieri et al., 2007; Guzzetti et al., 2012; Ghosh et al., 2020). Pourtant, les cartes d'inventaire sont utiles et fournissent des informations fondamentales sur la localisation, la taille et d'autres caractéristiques des MTs nécessaires pour évaluer la susceptibilité à la stabilité des pentes à n'importe quelle échelle et pour n'importe quel environnement physiographique. Les raisons de cette indisponibilité sont multiples et peuvent dépendre soit de conditions générales et locales (Brabb, 1991, 1993; Guzzetti et al., 2000).

La disponibilité de la carte d'inventaire des MTs ne démontre pas catégoriquement le caractère de la présence ou l'absence potentielle de ruptures de pente. En effet, certains auteurs déclarent souvent que les zones non cartographiées comme des MTs ne peuvent pas être considérées comme exemptes de mouvements de masse, mais représentent plutôt des domaines où l'interprète n'a pas pu identifier une rupture de pente ou tout simplement des zones où des MTs ont disparu complètement au moment de l'enquête (Guzzetti & Cardinali, 1989, 1990; Antonini et al., 1993; Cardinali et al., 1990, 2002; Guzzetti et al., 2000). De plus, dans les cartes d'inventaire des glissements de terrain, il existe des zones qui sont nécessairement exemptes de MTs telles que les grandes plaines alluviales, les fonds de vallée, les sommets de crêtes plates et les surfaces d'eau.

Le présent chapitre nous amènera à la bonne compréhension des notions fondamentales sur les MTs et les concepts de base associés à cet aléa qui seront utilisés au cours de cette recherche. Il sera question aussi de voir comment les MTs existants sont distribués à différentes échelles d'analyse (globale, continentale et régionale).

II.2. Notions de glissement de terrain

II.2.1. Définitions

Un glissement de terrain est un système physique qui s'est développé dans le temps en plusieurs étapes (Terzaghi, 1950; Leroueil & Locat, 2020). L'histoire d'un glissement de terrain est complexe et comprend des déformations avant la rupture, la rupture elle-même ainsi que des déplacements post-rupture (Skempton & Hutchinson, 1969). Les MTs présentent un certain nombre d'épisodes, séparés par de longues ou courtes périodes de stabilité. La définition suivante est d'usage courant: un glissement de terrain appelé en anglais 'landslide' peut être défini comme un mouvement gravitaire d'une masse de roche, de débris ou de la terre sous une pente (Nemčok et al., 1972; Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Courture, 2011; Cruden, 1991; Cruden & Varnes, 1996). Bien que cette définition soit principalement utilisée, le concept de glissement de terrain a beaucoup évolué depuis les premiers jours du sujet. Ainsi, Varnes (1978) a défini un glissement de terrain comme un mouvement vers le bas et vers l'extérieur de matériaux le long d'une pente sous l'influence de la gravité. Selon cette définition, il considère que les MTs comprennent l'écoulement, les glissements, la chute de matériaux, etc. Pierson & Costa (1987), pour leur part, ont décrit les MTs comme des coulées de débris à mouvement rapide composées de boues, de graviers et de débris organiques. Brunsden & David (1984) préfère que les MTs soient appelés mouvement de masse s'ils ne nécessitent pas de milieu de transport tel que l'eau, l'air ou la glace et doivent être appelés transport de masse si ces processus sont impliqués. Crozier (1986) a défini les MTs comme le mouvement gravitationnel vers l'extérieur et vers le bas de la matière terrestre sans l'aide de l'eau courante comme agent de transport. Quelques années plus tard, Hutchinson (1988) a déclaré qu'un glissement de terrain est un processus de perte de masse relativement rapide qui provoque le mouvement vers le bas d'une masse de roche, de débris ou de terre déclenchée par divers stimuli externes. Au fil des jours, le terme a été défini en fonction des différents aspects impliqués. Cruden (1991) a considéré les MTs comme le mouvement d'une masse de roches, de débris ou de terre vers le bas d'une pente. Considérant les ambiguïtés qui peuvent découler de cette définition, il a souligné que la définition englobe toutes sortes de mouvements de masse et ne se limite pas au sol granulaire. Considérant la multi-dimension du phénomène de glissement de terrain, Dynes & Drabek (1994) ont décrit les MTs comme une interaction complexe au sein de l'environnement naturel, une idée qui a ensuite été soutenue par Armbruster (2002). Le terme a vu une extension de ses composantes, car il a été décrit par Dikau et al. (1996) comme ne se limitant pas à la terre et au glissement, mais impliquant également l'affaissement et l'effondrement du sol.

La Figure II-1 est une représentation d'un déplacement gravitationnel d'un matériau sous une pente. Pour la Figure II-1a, le déplacement se réalise sous une forte pente tandis qu'il se déplace sous une pente faible à la Figure II-1b.

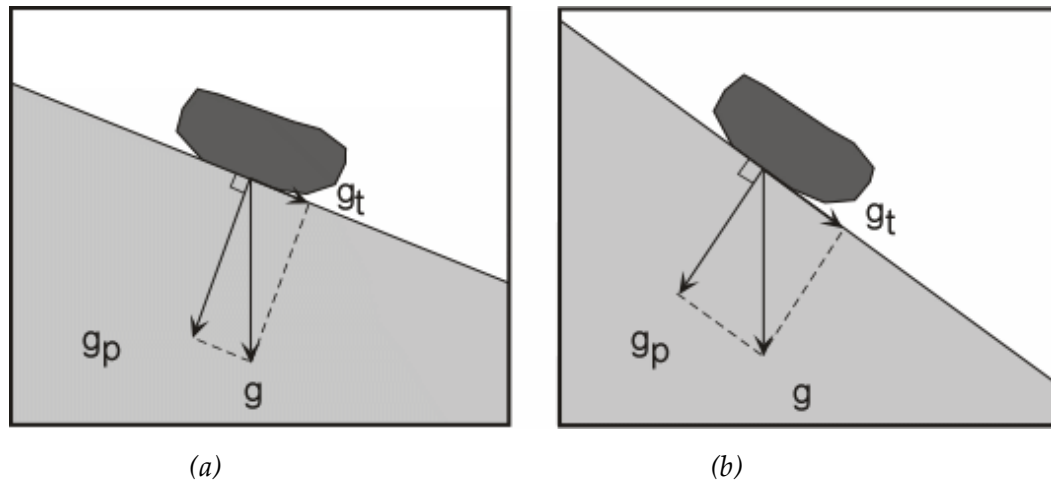


Figure II-1: Effet gravitaire sur le matériau (Nelson, 2013)

La composante perpendiculaire de la gravité (g_p) aide à maintenir le matériau en place sur la pente. La composante tangentielle de la gravité (g_t) provoque une contrainte de cisaillement parallèle à la pente qui tire l'objet vers le bas de la pente parallèlement à celle-ci. Les forces qui résistent au mouvement vers le bas de la pente sont regroupées sous le terme de résistance au cisaillement qui inclut la résistance au frottement et la cohésion entre les particules qui composent l'objet. Lorsque la contrainte de cisaillement devient supérieure à la combinaison des forces qui maintiennent l'objet sur la pente, l'équilibre est rompu et l'objet se déplace vers le bas de la pente.

Par ailleurs, si l'objet est constitué d'un ensemble de matériaux tels que de la terre, de l'argile, du sable, etc. et si la contrainte de cisaillement devient supérieure aux forces de cohésion qui maintiennent les particules ensemble, celles-ci se séparent et se déplacent ou s'écoulent vers le bas de la pente. Ainsi, le mouvement vers le bas de la pente est favorisé par des angles de pente plus prononcés qui augmentent la contrainte de cisaillement, et tout ce qui réduit la résistance au cisaillement, comme la diminution de la cohésion entre les particules ou la diminution de la résistance au frottement. Ceci est souvent exprimé par la constante F_s (Facteur de sécurité) qui est le rapport entre la Résistance au cisaillement (R_c) et la Contrainte de cisaillement (C_c) (Equation II-1).

Équation II-1: $F_s = R_c / C_c$

La résistance au cisaillement est constituée des forces qui maintiennent le matériau sur la pente et peut inclure la friction et les forces de cohésion qui maintiennent la roche ou le sol ensemble. Si le facteur de sécurité devient inférieur à 1, il y a directement une rupture de pente.

Sur une pente plus forte (Figures II-1a & 2), la contrainte de cisaillement ou composante tangentielle de la gravité (g_t) augmente et la composante perpendiculaire de la gravité (g_p) diminue. Ainsi donc, les MTs se produisent lorsque les contraintes gravitationnelles et les contraintes de cisaillement dépassent la résistance au cisaillement des matériaux (Highland & Bobrowsky, 2008). L'exemple de la Figure I-2 représente un glissement de terrain déclenché sur une colline dont l'aval est un village traversé par une autoroute. Ce glissement de terrain s'est déclenché dans le village de Lidong en Chine <https://www.tert.am/am/news/2019/07/29/china/3059514> accédé au 17 Juin 2021. Le glissement de terrain a bloqué la circulation sur une voie de l'autoroute et a enfoui plusieurs maisons d'habitations. Bien que tous les types de matériaux puissent être mobilisés, les MTs se produisent généralement dans les dépôts meubles et surtout argileux



Figure II-2: Exemple d'un glissement de terrain destructeur ; village de Lidong en Chine

II.2.2. Parties du glissement de terrain

Un glissement de terrain comporte trois parties principales (Figure II-3):

- (1) La tête comprenant les escarpements principaux et secondaires au sommet: c'est la partie supérieure du glissement de terrain. Il correspond à la limite supérieure de la surface de rupture.
- (2) Le corps ou la masse déplacée: c'est la partie centrale du glissement de terrain comprise entre la tête et le pied. Comme son nom l'indique, lors du déclenchement, c'est la masse qui se déplace.
- (3) Le pied: c'est la partie inférieure du glissement de terrain. Lorsque le glissement est en contact avec le réseau hydrographique, ce dernier est érodé et alimente graduellement le réseau de drainage. Dans certains cas, le pied du glissement en contact d'une rivière peut bloquer le cours d'eau pour

constituer un barrage superficiel temporaire qui, une fois rompu, cause des inondations destructrices très riches en débris.

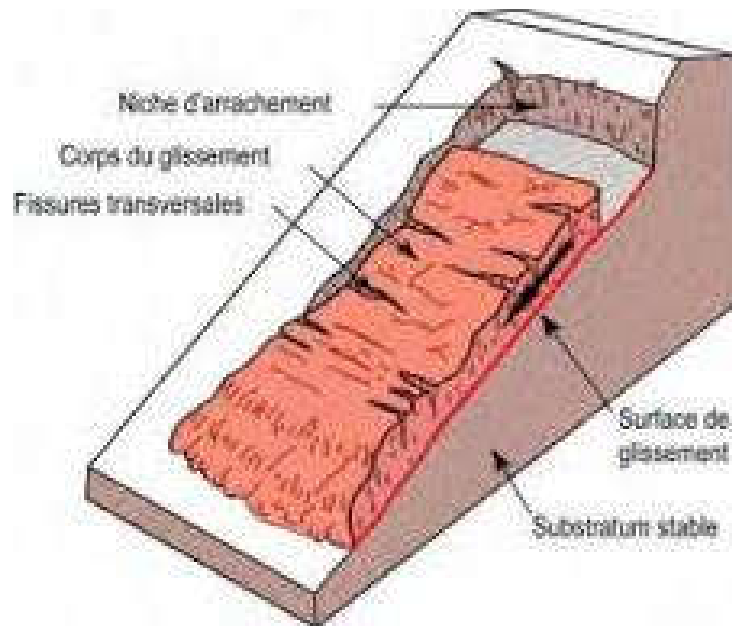


Figure II-3: Illustration d'un glissement de terrain

II.2.3. Cartes d'inventaire de glissements de terrain

Les cartes d'inventaire des MTs sont faciles à lire pour les experts tels que les géomorphologues contrairement aux non-experts comme les décideurs, les planificateurs territoriaux et les responsables de la protection civile. Les cartes d'inventaire sont facilement réalisées par des géomorphologues et ne nécessitent pas de gros investissements, notamment si on les compare à d'autres cartes thématiques présentant des données géoenvironnementales comme par exemple les cartes géologiques et pédologiques. Seules des ressources limitées sont nécessaires pour réaliser les cartes d'inventaire des glissements de terrain, à savoir des photographies aériennes, imageries satellitaires et un stéréoscope de bonne qualité. Des cartes d'inventaire multi-temporelles précises peuvent être préparées avec succès pour des zones s'étendant de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres carrés (Galli et al., 2008; Guzzetti et al., 2005), alors que des cartes d'inventaire géomorphologique de bonne qualité peuvent être préparées pour des zones plus vastes, s'étendant sur des milliers de kilomètres carrés (Antonini et al., 1993, Cardinali et al., 2002; Galli et al., 2008; Guzzetti et al., 2005, 2012; Depicker et al., 2005; Depicker et al., 2020; Dewitte et al., 2021). La carte d'inventaire permet de déterminer l'abondance des MTs dans une région donnée. Ils permettent aussi de mesurer la fréquence statistique des MTs dans la région.

II.3. Notion d'échelle pour l'étude des mouvements de terrain

Les cartes d'inventaire multi-temporelle et géomorphologique des MTs peuvent se préparer suivant l'extension de la zone d'étude, l'échelle des cartes thématiques de base et des photographies/imageries aériennes/satellites ainsi que les ressources disponibles. Il n'existe pas d'échelles standard et de noms spécifiques pour l'analyse des MTs car différents auteurs ont utilisé des termes et des intervalles différents. Par exemple, van Westen (2012) considère qu'une analyse à l'échelle régionale se situe entre 1:100 000 et 1:1 000 000, à l'échelle moyenne 1:25 000 à 1:100 000, à l'échelle large 1:2 000 à 1:25 000 et à l'échelle spécifique 1:200 à 1:2 000. Corominas et al. (2014) par contre subdivisent les échelles en niveaux national (<1:250 000), régional (1:250 000 à 1:25 000), local (1:25 000 à 1:5 000) et spécifique (>1:5 000).

II.4. Classification des mouvements de terrain

Notre étude va se référer à quelques classifications acceptées par une majorité de spécialistes du sujet. Ces spécialistes s'appuient soit au type de matériaux déplacés ou à la vitesse des mouvements gravitaires. Nous montrerons principalement les classifications établies par Hutchinson (1988), Cruden and Varnes (1996) et Varnes (1978) repris respectivement aux tableaux 1, 2 et 3.

II.4.1. La classification d'Hutchinson (1988)

La classification d'Hutchinson (1988) s'appuie plus sur les caractéristiques des processus de déformation et rupture des terrains (Tableau II-1). La zone frontale du glissement peut se déformer de manière complexe. Hutchinson (1988) distingue les types de mouvements de terrain détaillés au (Tableau II-1). Il s'agit des rebonds, des mouvements de creeping (reptation, soluflexion), des affaissements, des glissements, des coulées boueuses/de débris, des fauchages, des chutes et des mouvements de terrain complexes.

Tableau II-1: Classification d'Hutchinson (1988).

A	Rebound		
		1	Movements associated with man-made excavations
		2	Movements associated with naturally eroded valleys
B	Creep		
		1	Superficial, predominantly seasonal creep; mantle creep
		2	Deep-seated, continuous creep; mass creep
		3	Pre-failure creep; progressive creep
		4	Post-failure creep
C	Sagging of mountain slopes		
		1	Single-sided sagging associated with the initial stages of landsliding
		2	Double-sided sagging, associated with the initial stages of double landsliding, leading to ridge spreading
		3	Sagging associated with multiple toppling
D	Landslides		
		1	Confined failures
		2	Rotational slips
		3	Compound failures (markedly non-circular, with listric or bi-planar slip)
		4	Translational slides
E	Debris movements of flow-like form		
		1	Mudslides (non-periglacial)
		2	Periglacial mudslides (gelifluxion of clays)
		3	Flow slides
		4	Debris flows, very to extremely rapid flows of wet debris
		5	Sturzstroms, extremely rapid flows of dry debris
F	Topples		
		1	Topples bounded by pre-existing discontinuities
		2	Topples released by tension failure at rear of mass
G	Falls		
		1	Primary, involving fresh detachment of material; rock and soil falls
		2	Secondary, involving loose material, detached earlier; stone falls
H	Complex slope movements		
		1	Cambering and valley-bulging
		2	Block-type slope movements
		3	Abandoned clay cliffs
		4	Landslides breaking down into mudslides or flows at the toe
		5	Slides caused by seepage erosion
		6	Multi-tiered slides
		7	Multi-storeyed slides

II.4.2. Classification de Cruden et Varnes (1996)

La vitesse de déplacement des différents phénomènes permet de distinguer deux grands ensembles de mouvements de terrain: les mouvements lents et continus pour lesquels la déformation est progressive, parfois accompagnée de rupture mais en principe d'aucune accélération brutale. Il s'agit des phénomènes de fluage ou de solifluxion par exemple. Les mouvements rapides et discontinus, eux-mêmes divisés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux: en masse lorsqu'il s'agit de matériaux rigides (roche), ou à l'état remanié quand il s'agit de matériaux meubles (argile). Ce sont les chutes de pierres et de blocs, les éboulements, les coulées boueuses, etc.

La classification de Cruden et Varnes (1996) fait référence aux vitesses de déplacement des masses glissées (Tableau II-2).

Tableau II-2: Echelle des vitesses des mouvements de versant (Cruden et Varnes, 1996).

Vitesse	Description	Vitesse typique	Réponse
7	Extrêmement rapide	5m/s	Nulle
6	Très rapide	3m/s	Nulle
5	Rapide	1.8m/h	Evacuation
4	Modéré	13m/mois	Evacuation
3	Lent	1.6m/an	Maintenance
2	Très lent	16mm/an	Maintenance
1	Extrêmement lent	-	Nulle

II.4.3. La classification de Varnes (1978)

Dans cette étude, nous adopterons la classification la plus courante qui est celle de Varnes, 1978 qui a été mise à jour par différents auteurs (Cruden & Varnes 1996; Hungr et al., 2014). La classification est en anglais et parfois il est difficile même impossible de trouver des termes équivalents en français. Ainsi, la traduction peut s'avérer compliqué et non authentique. Les termes clés de cette classification seront mis entre parenthèses. On distingue:

- (1) Les MTs rotationnel et translationnel (rotational and translational slides).
- (2) Les éboulements (earth/debris falls) et les chutes de roches/blocs (rockfalls)
- (3) Les fauchages (topples)
- (4) Les effondrements et étalements latéraux (lateral spreads)
- (5) Les coulées de terre lentes (earthflows si très lents), coulées des débris (debris flows), coulées volcaniques (lahars) et les avalanches (debris avalanches)
- (6) Les glissements complexes ou mixtes relevant de la combinaison de deux ou plusieurs mouvements (par exemple les flowslides, slide – earthflows)

La classification de Varnes a été mise à jour et la plus récente est résumée en 29 types de MTs (Hungar et al., 2014) . Cette classification associe la forme de rupture et la nature des matériaux mobilisés.

Tableau II-3: Mise à jour de la classification de Varnes (Hungar et al., 2014).

Type	Rock	Debris	Earth
Fall	1. Rock fall	2. Debris fall	3. Earth fall
Topple	4. Rock toople	5. Debris toople	6. Earth toople
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. Solufluxion	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

Dans ce qui va suivre, nous allons donner quelques types de MTs les plus souvent rencontrés dans le monde selon la classification de Varnes mise à jour (Hungar et al. 2014). Les explications des différents types de processus sont pour la plupart des cas traduites à partir de Highland & Bobrowsky (2008).

II.4.3.1. Glissement rotationnel ou circulaire

C'est un glissement avec une surface de rupture concave. Le mouvement est plus ou moins rotationnel autour 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 en faisant inversion une pente (Figure II-4A).

II.4.3.2. Glissement translationnel ou plan

Ici, la masse se déplace suivant une surface relativement plane avec un petit de mouvement de rotation ou d'inversion de pente (Figure II-5). Ce type de mouvement peut avoir lieu sur de longues distances. Généralement moins profonds que le type rotationnel, la surface de rupture a un rapport distance-longueur inférieur à 0,1 et peut aller de petits à de très grands glissements de terrain.

La masse déplacée peut être un sol meuble non consolidé et/ou de blocs de pierres et a surtout lieu le long des surfaces de discontinuités (zone de faiblesse) comme les failles, les diaclases, les plans de stratification ou entre la roche fraîche non altérée et le sol. Le type translationnel est l'un des types de

MTs les plus courants dans le monde. On les trouve partout dans le monde entier dans tous les types d'environnement physiographique.

Concernant la vitesse, les mouvements peuvent être initialement lents (1,5 m/mois), mais la plupart sont de vitesse modérée (1,5 mètre par jour) à extrêmement rapide. Avec une vitesse accrue, la masse déplacée du glissement translationnel peut développer dans des chenaux abrupts une coulée des débris (Figure II-4F).

Les causes essentielles de déclenchement sont les pluies principalement intenses provoquant ainsi une forte augmentation des eaux souterraines dans le glissement de terrain. La fonte des neiges, les inondations d'eau résultant de l'irrigation ou des fuites de canalisations ou de perturbations d'origine humaine telles que le dégagement de la couverture du sol provoque ce mouvement de terrain. En fin, ce type de glissement de terrain peut être provoqué par des séismes.

Les MTs translationnel peuvent être initialement lent mais endommager des propriétés. Dans certains cas, ils peuvent gagner en vitesse et mettre les vies en danger. Ils peuvent également barrer les rivières, provoquant ainsi des inondations destructrices en aval.

II.4.3.3. Coulée de boue ou des débris

Les coulées de boue 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 m). Ce type de phénomène est caractérisé par un fort remaniement des masses déplacées, une cinématique rapide et une propagation importante (Figure II-4F).

II.4.3.4. Fauchage

Le fauchage gravitaire est l'un des scénarios de rupture de grands volumes de versants montagneux que l'on retrouve invoqué fréquemment. C'est le mécanisme, par exemple, proposé comme origine de MTs alpins de plusieurs millions de m³. Plus généralement, le fauchage est mentionné comme un trait caractéristique des versants montagneux récents où il semble avoir été provoqué par le retrait glaciaire quaternaire. C'est le cas du fauchage de Goms dans les Alpes suisses par exemple. Le mécanisme de fauchage gravitaire est l'un des phénomènes permettant d'expliquer des MTs dans des roches stratifiées, schistosité ou foliées présentant un pendage opposé à la pente du talus (Merrien-Soukatchoff et al., 2001). La figure II-4E illustre un glissement de type d'un fauchage avec la présence des diaclases sub-orthogonales et des plans de diaclase inclinées dans le sens opposé de la topographie naturelle.

II.4.3.5. Reptation ou creeping

Il s'agit d'un déplacement progressif superficiel du sol et des roches altérées, suivant la pente. Le fluage 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 les arbres sont penchés et surtout inclinés dans les sens inverse de la topographie naturelle. Ce mouvement correspond à des faibles vitesses gravitationnelles qui induisent à des glissements de creep (Figure II-4I).

II.4.3.6. Eboulements, chutes de pierres et de blocs

Ce sont des glissements dans des masses rocheuses avec discontinuités internes (Cojean et al., 2009). Ceux-ci sont très fréquents en montagnes et dans les très fortes pentes. Ils forment de grands cônes de déjection au pied de la pente. Ils peuvent parfois développer une quantité de mouvement telle qu'ils peuvent parcourir plusieurs kilomètres, même en terrain plat, on parle alors de coulée de débris (debris flows, Figure II-4F). Ce sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, etc. Les blocs décrochés suivent généralement la ligne de plus grande pente. 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.

Le bloc diagramme (Figure II-4D) représente les chutes de blocs sur la route. Ces roches une fois tombées gênent la circulation routière et peuvent causer des accidents.

II.4.3.7. Effondrement, affaissement, glissement latéral (lateral spread)

Les affaissements (Figure II-4J) 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. 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.

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.

II.4.3.8. Les avalanches des débris ou de roches

Les avalanches (Figure II-4G) 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 II-4F). 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.

Comme les avalanches peuvent parcourir plusieurs kilomètres avant de s'arrêter, leur débris peuvent inonder les agglomérations. Se déplaçant très vite, ils peuvent donc s'avérer mortels. Pour réduire leur conséquence, il faut éviter de construire dans les vallées en bas des pentes raides des montagnes. Aussi, la mise en place des systèmes d'alerte en temps réel peut réduire aussi les dommages. Cependant, ces systèmes d'alerte peuvent s'avérer difficiles en raison de la vitesse à laquelle les avalanches de débris se produisent. En effet, il peut ne pas y avoir assez de temps après le début de l'événement pour que les personnes évacuent. Les avalanches se produisent sur des pentes escarpées altérées ou volcaniques et pour cette raison, ils ne peuvent pas être arrêtées ou évitées par des moyens techniques car les mécanismes de déclenchement associés sont imprévisibles. S'il existe des preuves d'avalanches antérieures dans une zone et si celles-ci peuvent être datées, une période de récurrence probabiliste peut être établie. Pendant les éruptions volcaniques ou des fortes pluies, les chances qu'une avalanche se produise sont plus grandes, de sorte que des mesures de mise en garde appropriées pourraient être adoptées.

II.4.3.9. Glissement complexe ou mixte

C'est un glissement avec plusieurs typologies par exemple à composante rotationnel et plane, à affaissement et effondrement, éboulement induisant une coulée boueuse, etc. Le type de mouvement complexe le plus courant est la combinaison entre le glissement (slide) (p ex., Figure II-4C) et la coulée de boue (flow) (par ex., Figure II-4F), qui se caractérise par un glissement en tête et un certain type d'écoulement plus loin sur son parcours. La plupart des MTs de ce type "slide-flow" impliquent un glissement bien défini à la tête, suivi d'une coulée de débris ou d'un écoulement de terre. Toute combinaison de différents types de mouvements de masse peut être classée comme un mouvement complexe.

La figure II-13 montre une compilation des principaux types de MTs de la classification de Varnes plus souvent rencontrés dans la nature (Wieczorek & Snyder, 2019).

Selon Hungr et al. (2014), les auteurs devraient éviter d'utiliser la classe complexe s'il le trouve avantageux dans le système de classification. D'après ces chercheurs, même au prix d'une certaine simplification, chaque classe doit être unique. Ainsi donc, une classe définie comme complexe n'est pas utile et d'ailleurs tous les MTs sont complexes à un certain degré (Hungr et al., 2014).

En plus de ces types énumérés ci-haut, il existe de grandes déformations de montagnes (mountain/ rock slope deformation) bien étudiés qui sont aussi classés parmi les MTs (Crosta et al., 2014; Hungr et al., 2014).

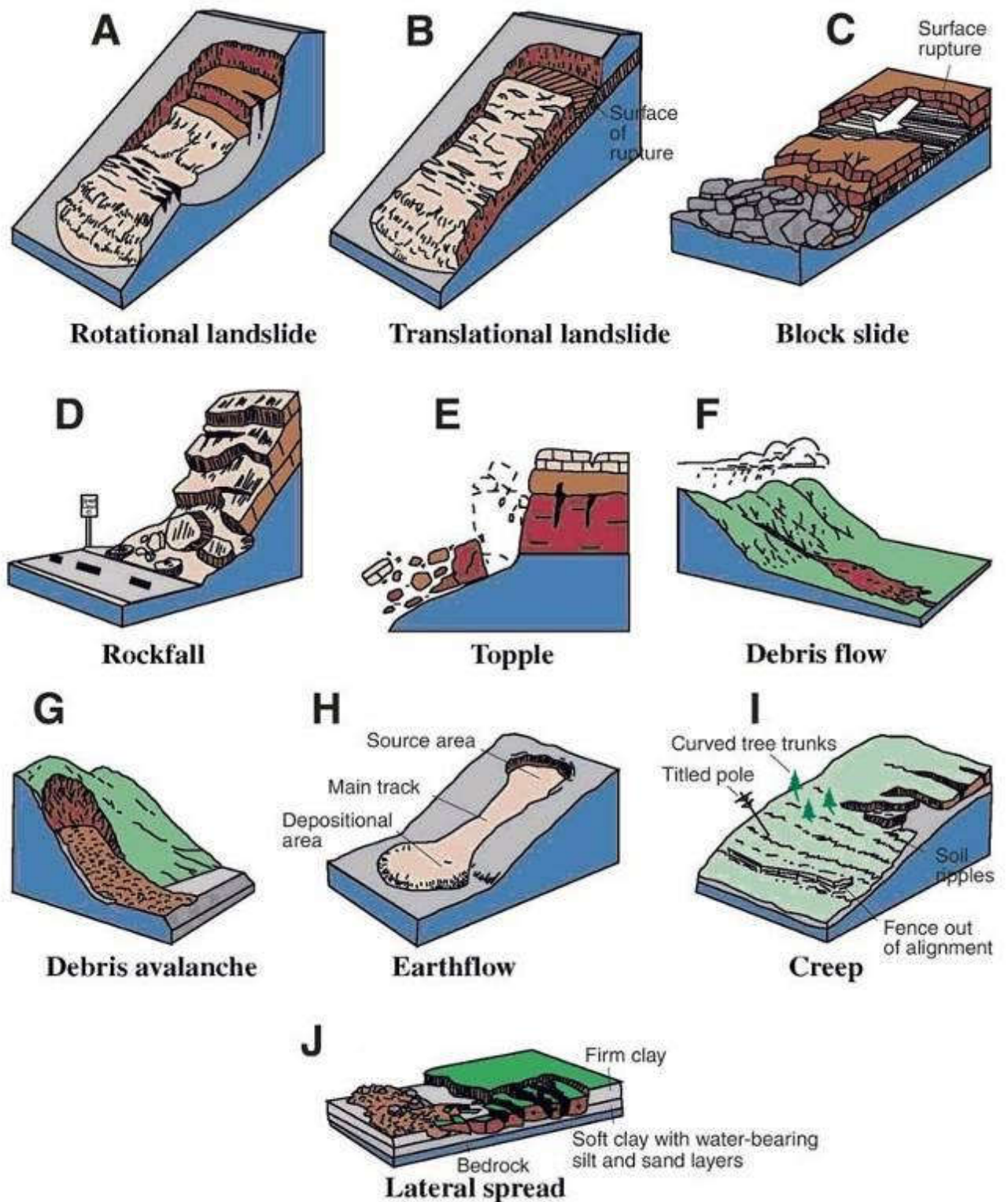


Figure II-4: Les types de glissement de terrain les plus fréquents de la classification de Varnes (Wieczorek & Snyder, 2019).

II.5. Facteurs de mouvements de terrain (MT)

Dans cette partie, nous allons expliquer les principaux facteurs naturels, anthropiques et dynamiques mis en jeu lors de la rupture des pentes.

II.5.1. Facteurs de prédisposition ou environnementaux

II.5.1.1. Facteurs topographiques

Les cartes topographiques sont une excellente source d'information pour la détection des glissements de terrain. La topographie influence énormément l'occurrence des glissements de terrain. Les paramètres tels que l'altitude, la pente, l'orientation de la pente et la courbure sont les principaux facteurs de ces derniers (par ex., Mastere et al., 2010; Nakileza & Nedala, 2020).

II.5.1.2. Facteurs géologiques

La géologie des terrains c'est-à-dire le type de roche en place est l'un des facteurs indispensables pour l'occurrence spatiale des mouvements de masse à côté de la variation en altitude et du gradient de pente (Wu & Qiao, 2009). Dans les mêmes conditions, les roches dures résistent tandis que les roches tendres/meubles sont plus fragiles aux ruptures de pentes. Les discontinuités dues à des contrastes lithologiques peuvent induire des glissements translationnels. Par ailleurs, un litage ou une stratification subparallèle à la pente favoriseront le déclenchement d'instabilités par glissement le long de plans de discontinuités.

De surcroît, les terrains comportant des niveaux particuliers présentent des conditions favorables au déclenchement de mouvements de terrains suivant leur densité et seuil de plasticité (Bahrami et al., 2020). Par exemple, les marnes noires avec un faciès schisteux sont favorables aux MTs (Desodt et al., 2017). Elles deviennent plus sensibles aux MTs lorsqu'elles sont fortement faillées et diaclasées (Maquaire, 2002).

II.5.1.3. Facteurs pédologiques

Le type de sol et sa profondeur contribue 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.

La composition granulométrique du sol peut aussi influencer la localisation des surfaces de rupture. L'analyse granulométrique d'un glissement argilo-silteux a montré que les surfaces de rupture

présentaient un enrichissement en matériau plus grossiers par rapport à l'encaissant, et un appauvrissement du même ordre de grandeur en termes de granulométrie (Summa et al., 2010). L'enrichissement en matériau de plus faible cohésion favoriserait ainsi la localisation des surfaces de rupture au sein de ces niveaux.

II.5.2. Facteurs de déclenchement

Ces facteurs sont les pluies torrentielles, des longues périodes de précipitations, la fonte des neiges rapides qui provoquent des avalanches, des secousses sismiques, un sapement de la pente. Par exemple, les précipitations ont un effet important sur la stabilité des pentes en influençant la forme, l'occurrence et l'étendue des glissements (Polomio et al., 2000; Monsieurs et al., 2018). Les précipitations peuvent saturer les sols résiduels, activant ainsi les glissements de terrain (Massimiliano et al. 2018).

II.5.3. Facteurs préparatoires (facteurs dynamiques)

L'altération, le changement climatique, le soulèvement tectonique, l'érosion, la déforestation et les activités humaines sont les facteurs dynamiques des mouvements de masse. L'érosion peut être naturel ou un résultat des activités humaines. Les agents naturels de l'érosion comprennent: le ruissellement, les eaux souterraines, les vagues, les courants et le vent. L'activité humaine qui provoque l'érosion comprend tout phénomène qui produit une augmentation de la vitesse de l'eau en particulier sur les pentes non protégées. Parmi les principales causes, on peut citer la déforestation, le surpâturage et la présence de certains types de végétation qui n'augmentent pas la résistance du sol à l'érosion. L'érosion peut endommager les fondations structurelles, les trottoirs, les remblais et autres travaux d'ingénierie. En terrain montagneux, l'érosion augmente l'instabilité des versants, ce qui peut entraîner l'endommagement des routes et d'autres structures.

II.6. Analyse spatiale et modélisation des mouvements de terrain

II.6.1. Définitions des notions de base

Il s'agit des notions indispensables pour comprendre le phénomène de glissement de terrain. Les définitions suivantes sont proposées par (Corominas et al, 2014). .

- (1) Susceptibilité: elle représente la prédisposition d'une zone à être touchée par certains phénomènes dangereux, en un temps indéterminé, évaluée à l'aide de critères de prédisposition à ces phénomènes ou actions, sans prendre en compte sa période de retour ou la possibilité de se reproduire.
- (2) Aléa: il correspond à la probabilité de l'occurrence d'un phénomène ou d'une action potentiellement destructrice ou capable de provoquer des dommages d'une certaine brutalité, dans une zone et une période de temps donnée.

(3) Vulnérabilité: elle est le degré de perte d'un élément ou d'un ensemble d'éléments exposés en cas de phénomènes dangereux.

(4) Risque: c'est la possibilité d'occurrence d'un phénomène dangereux (aléa) et estimation respective de ses conséquences sur les personnes et les biens ou sur l'environnement (Equation II-2), exprimés en dommages corporels et/ou préjudices matériels et fonctionnels, directs ou indirects (vulnérabilité).

Équation II-2: $\text{Risque} = f(\text{susceptibilité}, \text{conséquence sur les enjeux})$

Équation II-3: $\text{Conséquence} = f(\text{élément exposé}, \text{vulnérabilité})$

Les conséquences de l'action d'un aléa sur les enjeux sont fonction des éléments exposés et de leur vulnérabilité (Equation II-3.), qui est le plus fréquemment exprimée en termes de valeur ou de degré de dégâts (Glade, 2003).

II.6.2. Concept de probabilité ou susceptibilité des MTs

La complexité des glissements de terrain, tout comme d'autres processus naturels, nécessite une philosophie générale pour la comprendre, car le comportement de la plupart des facteurs intrinsèques qui affectent ces processus n'est pas bien connu. Cette limitation a conduit à l'élaboration de modèles de probabilité pour estimer l'occurrence des événements naturels. Le concept de probabilité est fondamentalement mathématique et est utilisé pour étudier la probabilité d'occurrence d'événements aléatoires. Cela implique de prédire le comportement futur de systèmes définis (Lee et al., 2005). Grâce à des procédures mathématiques, nous pouvons estimer des événements abstraits sur la base de connaissances très limitées. Les modèles de probabilité sont développés en suivant la philosophie selon laquelle la probabilité est une mesure numérique de l'incertitude concernant la nature. La probabilité est exprimée par un nombre compris entre zéro (ne peut jamais se produire) et 1 (se produira toujours). Dans ce concept, la probabilité est le hasard que des MTs se produisent. L'utilisation des concepts de probabilité a permis une évaluation quantitative des risques de glissement de terrain. L'analyse spatiale (sensibilité aux glissements de terrain) et les facteurs déclenchant les glissements de terrain, en particulier les précipitations, sont largement analysés à l'aide de la probabilité (Tien Bui et al., 2013; Jaiswal et al., 2010; Marques et al., 2008; Zêzere et al., 2004; Dai & Lee 2003; Soeters & Van Westen, 1996; Aleotti & Choudhury, 1999).

La probabilité est surtout utilisée dans l'analyse des MTs parce que les processus de rupture des pentes ne sont pas faciles à déterminer dans le temps et que les MTs ne suivent pas la loi de "cause à effet" qui permet de déterminer un effet en fonction de la cause. La rupture de pente est un processus physique qui commence à un certain moment et après un certain temps (Catani et al., 2005). L'intervalle de temps

entre les événements dangereux est certainement irrégulier, ce qui signifie que nous ne pouvons pas prévoir exactement quand un glissement de terrain se produira en raison des connaissances limitées que nous avons sur la nature (Chung & Fabbri, 1999). C'est pourquoi l'analyse des probabilités est essentielle dans l'évaluation des glissements de terrain.

II.6.3. Evaluation du risque de mouvement de terrain

Le thème des risques de MTs est utilisé pour décrire tous les types de rupture de pente, y compris les coulées boueuses à faible vitesse, les effondrements et les glissements rotationnel et translationnel. L'association du terme "danger" signifie la probabilité que possèdent les MTs de causer des dommages. Les risques de MTs, comme tout autre risque naturel, ont été défini différemment au fil des années (Crozier & Glade, 2005). Les définitions des risques de MTs souvent utilisées sont celles de Corominas et al. (2014) qui stipule qu'un risque est l'exposition des éléments à risque et leur vulnérabilité. Son évaluation vise à déterminer la probabilité d'occurrence des MTs dans une région en une période de temps donné, ainsi que leur mode de propagation, leur taille et leur intensité. Une analyse complète doit prendre en compte de tous les modes de rupture possibles, la réactivation des anciens MTs et le dynamisme des MTs actifs. En général, le risque de MT prend en compte la dimension spatiale et le facteur de déclenchement du phénomène (Guzzetti et al., 1999; Van Westen, 1994) qui détermine le moment et la fréquence des événements futurs (Guzzetti et al., 2005a) et l'aspect de l'ampleur est de plus en plus souvent discuté. La composante humaine est également prise en compte par certains auteurs dans l'examen du risque de MTs. Les éléments à risque sont les populations, les propriétés foncières, les activités économiques ainsi que les services publics ou tout autre unités exposé à l'aléa (UN-ISDR, 2004).

II.7. Répartition des mouvements de terrain

II.7.1. Répartition des mouvements de terrain dans le monde

Les MTs comme catastrophe naturel sont phénomènes qui s'observent partout à l'échelle planétaire. Ils causent des pertes en vies humaines, matérielles, biodiversitaires, destruction des espaces cultivables, etc. Ils provoquent ainsi une faible productivité du point de vue socio-économique. 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. Au niveau mondial, les MTs ne sont pas uniformément répartis. On remarque qu'il y a des régions à forte densité que d'autres (Figure II-5). La forte distribution des MTs se situent dans les grandes chaînes de montagnes (p.ex., l'arc himalayen, les Andes, les Alpes et la ceinture du Pacifique (Stanley & Kirschbaum, 2017). Par contre, en Afrique, les MTs sont moins représentés. Le moins de MTs observés se trouvent au niveau du rift est africain et en Afrique de l'Ouest. Le désert du Sahara, l'Asie Centrale et Septentrionale, l'Amérique du Nord et la grande partie de

l'Australie ne montrent pas une distribution des glissements de terrain. Cependant, le catalogue de la NASA n'est pas assez complet et détaillé pour représenter la répartition spatiale exacte et précise des MTs dans le monde, elle peut servir de référence.



Figure II-5: Carte de localisation des principaux MTs dans le monde (<https://data.nasa.gov/Earth-Science/Global-Landslide-Catalog/h9d8-neg4> accédé au 15 décembre 2020)

II.7.2 Répartition des mouvements de terrain dans la région du Rift Nord Tanganyika – Kivu

Avant les cinq dernières années, peu d'attention était accordée au rift Nord Tanganyika – Kivu (rift NTK) en tant que région à risque de MTs (Maes et al., 2017). En 2018, une étude conduite à l'échelle régionale a permis d'inventorier 156 occurrences dans la branche occidentale du rift est africain avec les dates de déclenchement bien précise (Monsieurs et al., 2018). D'autres recherches ont pu démontrer que de nombreuses régions du rift NTK sont fortement affectées par les MTs en raison des fortes précipitations, les taux d'altération élevée et de mobilisation des sédiments par gravité (Dewitte et al., 2021) et surtout que c'est une zone en particulier à topographie abrupte et activité tectonique (Smets et al., 2016). Récemment, un inventaire de plus de 9000 occurrences a été réalisé dans le Rift du NTK avec distinction de la profondeur des processus (Figure II-6) sans toutefois entrer en détail dans l'analyse d'autres processus de déclenchement des mouvements de terrain (Depicker et al., 2020; Dewitte et al., 2021).

D'autre part, le rift au nord de Tanganyika est une région sismiquement active où des séismes ont des magnitudes élevées (Figure II-6b). Les données de 1900-2015 montrent qu'il existe des séismes de magnitude $M_w=7$ (voire supérieure à 7 dans la région) (Figure II-b). Ces séismes provoquent le déclenchement des MTs comme observé en 2008 à Bukavu, vers 140km au nord de Bujumbura où un séisme de magnitude $M_w=6$ a provoqué plusieurs MTs. Un certain nombre de glissements anciens de la région pourraient être d'origine sismique (Dewitte et al., 2021).

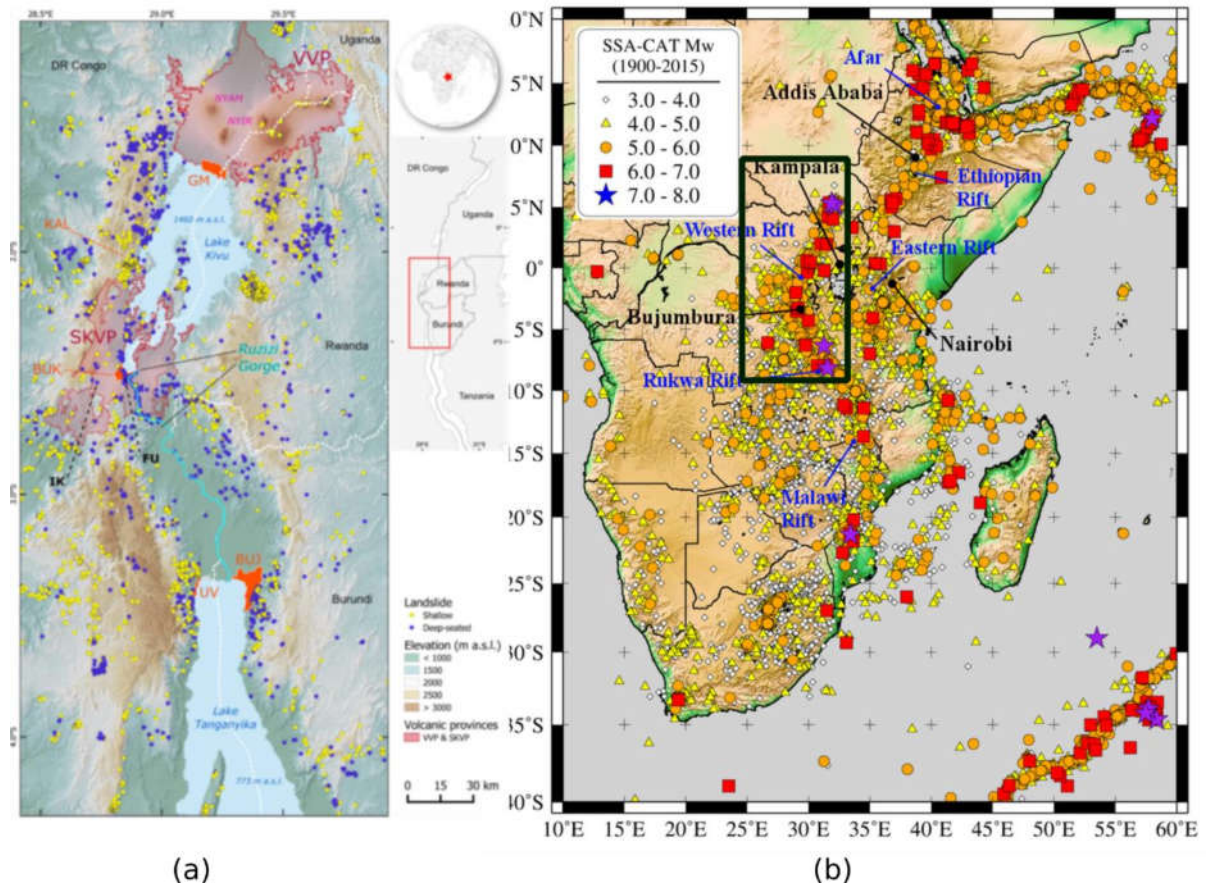


Figure II-6: (a) Localisation de plus de 9000 occurrences MT dans le rift du NTK à partir du jeu de données collecté à l'aide des images de Google Earth et des levés de terrain (Dewitte et al., 2021), (b) carte sismique d'Afrique sub-saharienne avec un zoom sur le NTK rift (rectangle noir) ; <https://hazard.openquake.org/gem/models/SSA/> consulté le 08/04/2022.

CHAPITRE III. APPORT DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE ET AERIENNE
DANS L'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE
BUJUMBURA

III. APPORT DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE ET PHOTOGRAPHIE AERIENNE DANS L'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA

III.1. Introduction

La télédétection spatiale bénéficie désormais de nouvelles avancées technologiques grâce aux progrès qu'ont connus les capteurs et les vecteurs (Ghassemian, 2016). Il est possible de choisir les dates de prise de vues et de les multiplier par la répétitivité; les champs de vision sont de plus en plus divers et les résolutions spatiales et spectrales deviennent de plus en plus fines.

Les images satellitaires optiques de différentes résolutions (spectrale, spatiale et radiométrique) sont de plus en plus utilisées dans des domaines multiples de la recherche en rapport avec l'environnement et notamment dans les sciences de la terre (par ex., Smets et al., 2010; Etemadi et al., 2018).

L'observation de la photographie aériennes et des images satellitaires permet de reconnaître quelle que soit la nature de la roche et leurs conditions d'affleurement:

- des indices de fracture (failles, joints, etc.);
- la morphologie, surtout quand elle est abordée par la stéréoscopie ; ce qui lui permet de délivrer également une large information sur la fracturation ;
- la lithologie par l'étude des réponses spectrales des roches et/ou minéraux ;
- le couvert végétal par les différentes réponses spectrales essentiellement chlorophylliennes
- les dépôts de piedmont ou les éboulis sont aussi des révélateurs à considérer, de même que les dépôts modernes et les formations d'altération.

Le choix de l'utilisation de l'imagerie satellitaire et/ou photographie aérienne au niveau des reliefs de Bujumbura s'impose par le fait que :

- l'extension de la zone d'étude couvre une large superficie de 491 km² ;
- la télédétection reste la méthode primordiale et plus appropriée surtout dans des régions montagneuses surtout à faible données ;
- difficulté d'accès due à la morphologie très accidentée avec des vallées encaissées et un manque des routes.
- une grande disponibilité d'un jeu de données de résolution spatiale fine à très fine variant de 30 m à 0.5 m (Tableau III-1).

Les reliefs de Bujumbura se caractérisent par un climat tropical et humide (cf. Chapitre I, section I.2.3.1). Comme d'autres régions tropicales, les reliefs de Bujumbura sont exposés à une couverture nuageuse intense (Robinson et al., 2019; Wilson & Jetz, 2016). Cette forte couverture en nuages gêne la prise en temps réel des imageries satellitaires/des photos aériennes et reste la contrainte majeure pour l'interprétation spatio-temporelle des images optiques.

La caractérisation spatiale et temporelle des MTs selon les types de processus seront encodés à l'échelle des reliefs de Bujumbura. Le but de ce chapitre est de montrer la contribution des images satellitaires/photos aériennes du domaine optique dans la collecte de l'une ou l'autre information sur les caractéristiques et les causes de déclenchement des MTs à l'échelle régionale.

Dans le présent travail, nous avons réalisé une cartographie "multicapteur", en utilisant les données de Landsat-7 ETM+ et SPOT4 couplées aux techniques de traitements numériques et d'amélioration d'images, dans le but d'extraire l'information géographique concernant la cartographie des mouvements de terrain et l'extraction des trois facteurs conditionnant leur genèse. Quatre objectifs sont attendus dans ce chapitre :

- 1) La cartographie des MTs à l'échelle régionale ;
- 2) Reconnaissance des différents faciès afin d'établir une carte lithologique ;
- 3) La cartographie de la fracturation² responsable de la structuration des reliefs de Bujumbura ;
- 4) La mise en place d'une carte d'occupation du sol à partir de la classification supervisée.

La méthodologie d'approche est basée sur le traitement de l'information satellitaire par l'intermédiaire des techniques de traitement d'images; du complément d'information par les données de terrain, des interprétations d'images pour la cartographie des MTs et ensuite de l'intégration des données géoréférencées dans un Système d'Information Géographique pour des utilisations ultérieures que nous décrirons plus tard.

II.2. Données satellitaires et aériennes utilisées

Les caractéristiques principales des satellites, dont l'imagerie a été utilisée dans ce travail sont présentées dans le Tableau III-1. Ces systèmes acquièrent les données de format numérique. Le capteur de ces systèmes détecte l'énergie électromagnétique réfléchi (p.ex., Aggarwal, 2004). Cette dernière est enregistrée premièrement sous la forme du signal électrique analogue pour la convertir après en

² En géologie, la fracturation désigne toute séparation (cassure) dans une formation géologique (joint, faille, diaclase) qui divise la roche en deux ou plusieurs morceaux. Les fractures sont généralement causées par une contrainte dépassant la résistance de la roche, ce qui entraîne une perte de cohésion de la roche le long de son plan le plus faible. Les diaclases apparaissent à l'affleurement comme des traces généralement continues et rectilignes (Putot et al., 2001).

valeur numérique (Regis, 2011). L'objet de ce chapitre est de présenter une base minimale pour la compréhension des techniques et des applications en télédétection.

Nous avons eu recours aux données optiques Landsat-7 ETM+, SPOT4, Pléiades, les images Google Earth et une série de photographies aériennes (1957-59, 1972, 1981, 2012 et 2016) pour des précisions locales.

❖ Les images Landsat-7 ETM+ ont été tiré 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 une image prise 22/06/2009 qui n'avait pas de nuages du moins au niveau de la zone d'étude (Figure III-1). 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 120m. Disposant des images de résolution fine (0.5 m pour les ortho-photos et la bande panchromatique pléiade par exemples), nous n'allons pas exploiter la bande panchromatique de Landsat-7 ETM+ lors la cartographie des MTs. Par ailleurs, dans la zone d'étude, il y a de petites occurrences de MTs inférieures à la taille du pixel de cette bande. En principe, nous l'aurions utilisé pour l'inventaire des grands MTs tels que les grandes déformations de montagne, les grands glissements et grandes coulées de terre lente et les mouvements complexes mais les images HR disponibles restent efficace aussi bien pour les besoins de cartographie des petits et des grands MTs à l'échelle régionale.

La scène Landsat-7 ETM+ comporte 8 bandes spectrales réparties. La résolution temporelle est de 16 jours et chaque image couvre une scène de 183km x 170km. La scène Landsat-7 ETM+ a un champ de vision instantané (IFOV) de 30 m x 30 m dans les bandes 1–5 et 7, tandis que la bande 6 a un IFOV de 60 m x 60 m au sol et la bande 8 un IFOV de 15 m x 15 m. Note que les bandes 6 (thermique) et 8 (panchromatique) n'ont pas utilisées au cours de notre recherche. Ainsi par exemple, la bande 6 n'intéresse pas ce travail car nous n'avons pas exploité des données relatives à la température au sol.

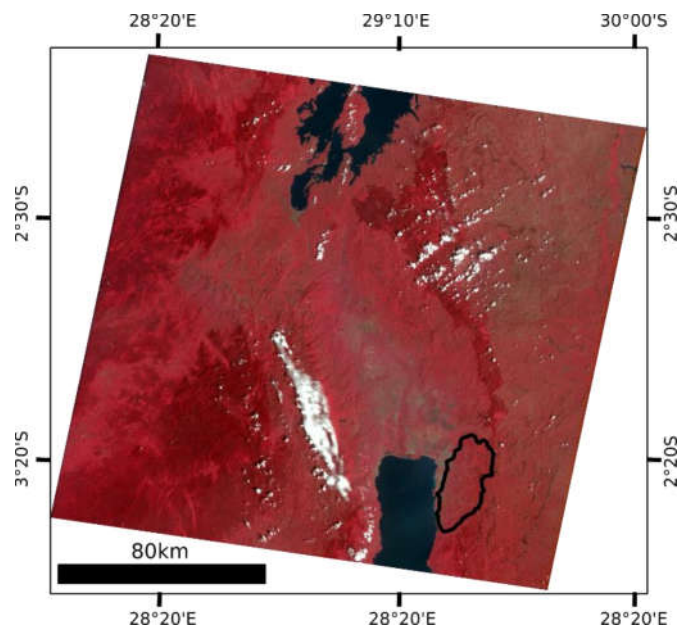


Figure III-1: Image multispectrale Landsat-7 ETM+, composition colorée infrarouge couleurs 432 avec localisation de la zone d'étude. Les données ETM+ utilisés comprennent six canaux. Les analyses spectrales et spatiales vont être effectuées sur une image mosaïque de ces canaux (bleue, vert, rouge, Proche infrarouge PIR, Infrarouge moyen SWIR1, Infrarouge lointain SWIR2)

❖ L'image du satellite SPOT 4 (Satellites Pour l'Observation de la Terre) utilisée est extraite dans les archives de SPOT WORD HERITAGE (SWH) mis en place par le programme CNES. C'est une scène de 60 km x 60 km couvrant la totalité du secteur d'étude qui a été prise le 06/07/2012 (Figure III-2). Sa résolution spatiale est de 20 m.

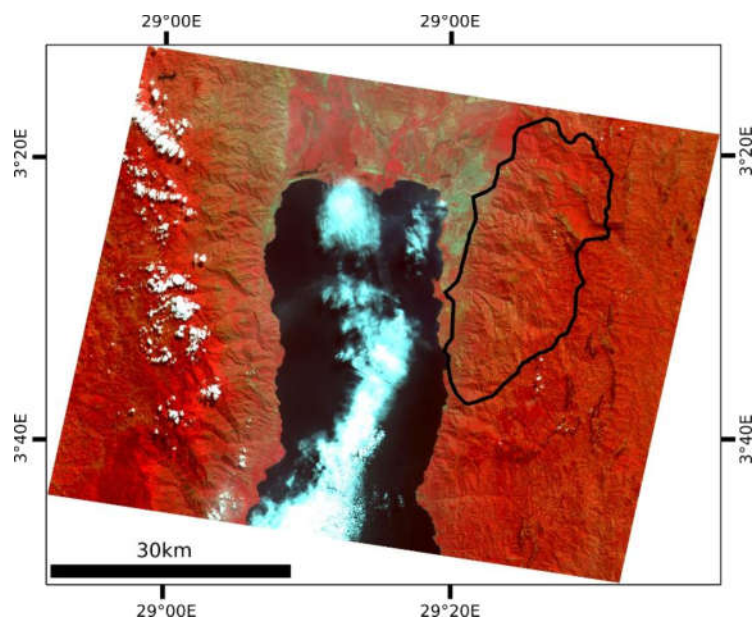


Figure III-2: Scène HRVIR de SPOT 4 couvrant les reliefs de Bujumbura, composition colorée 432. Les données SPOT 4 comprennent 4 canaux. Les analyses spectrales et spatiales vont être effectuées sur quatre canaux (bleue, vert, rouge et Proche infrarouge PIR)

❖ Depuis 2012, le Burundi dispose une couverture nationale des photos aériennes haute résolution (0.5m). Ces photos aériennes totalisant 4000 images rassemblées en en une seule couche qui a une taille de 40GB. Chaque image d'ortho-photo a une couverture de 2.5 km x 2.5 km (Figure III-4). Les ortho-photos du Burundi et le Modèle Numérique d'Élévation dérivé ont été réalisés grâce au financement bilatéral entre l'Union Européenne et la République de Burundi. Au départ, le projet prévoyait l'acquisition d'images satellites. Pour des raisons de la non disponibilité des satellites envisagés et la couverture nuageuse, il a été décidé de passer par l'acquisition de photos aériennes collectées à l'aide d'un avion et son équipage du 23/08/2012 au 30/09/2012 avec une couverture de tout le pays (CBUE, 2013). Un travail important de traitements (aérotriangulation, ortho-rectification et mosaïque) a alors été effectué sur les images collectées et les produits finis ont été livrés au Bureau de Centralisation Géomatique, BCG. Ces données sont accessibles à tous les chercheurs des secteurs publics et privés du Burundi. C'est dans ce cadre que nous avons acquis les ortho-photos et le modèle numérique de terrain que nous avons exploités au cours de cette étude.



*Figure III-4: Une des 4000 images utilisées pour la mosaïque de l'ortho-photo du Burundi. Chaque photographie aérienne a une taille de 2.5km*2.5km avec une résolution spatiale de 0.5m. Toutes les images ont été prises en juillet 2012. Ces images serviront à l'interprétation et la délimitation des cicatrices de MTs qui existaient à cette époque. Sur la base de ces photos aériennes, nous avons produit un MNE de 10m qui est utilisé pour les analyses topographiques.*

Tableau III-1: Imageries satellitaires et aériennes utilisées et leurs caractéristiques.

Données	Types	Années	Résolution (m)	Sources	Informations possible
	Landsat-7 ETM+	2009	30	USGS	Lithologie, Fracturation, Occupation du sol.
	SPOT 4	2012	20	CNES	Lithologie, Fracturation, Occupation du sol
	Google Earth	2000-2021	~0.6	Google	Inventaire MT et Occupation du sol.
	Pléiades	2013, 2016	0.5	MRAC	Inventaire MT, Occupation du sol.
	Ortho-mosaïque	1957-59	0.5	MRAC	Inventaire MT
	Ortho-photos	2012	0.5	BCG	Inventaire MT, Occupation du sol
	Photos aériennes	1957-59, 1972, 1981	1/50000	MRAC	Inventaire MT, Lithologie, Fracturation

III.3. METHODOLOGIE ET PRINCIPAUX TRAITEMENTS UTILISES

La cartographie des MTs, l'analyse et le traitement des données de télédétection spatiale pour l'extraction des facteurs conditionnant les MTs : lithologie, fracturation et occupation du sol ont été effectués selon les étapes suivantes (Figure III-5) :

- Cartographie des MTs à base de la photo-interprétation ;
- Extraction de l'information lithologique à partir de la photo-interprétation assistée à l'ordinateur sur les résultats de rehaussements spectraux ;
- Extraction de la fracturation à partir de l'application de gradient linéaire sur les images ;
- Cartographie de l'occupation du sol par classification multispectrale des données Landsat-7 ETM+ et SPOT 4;
- Confrontation des résultats avec les réalités du terrain et archives ;
- Etablissement d'un document cartographique numérique correspondant aux facteurs lithologie, fracturation et occupation du sol.

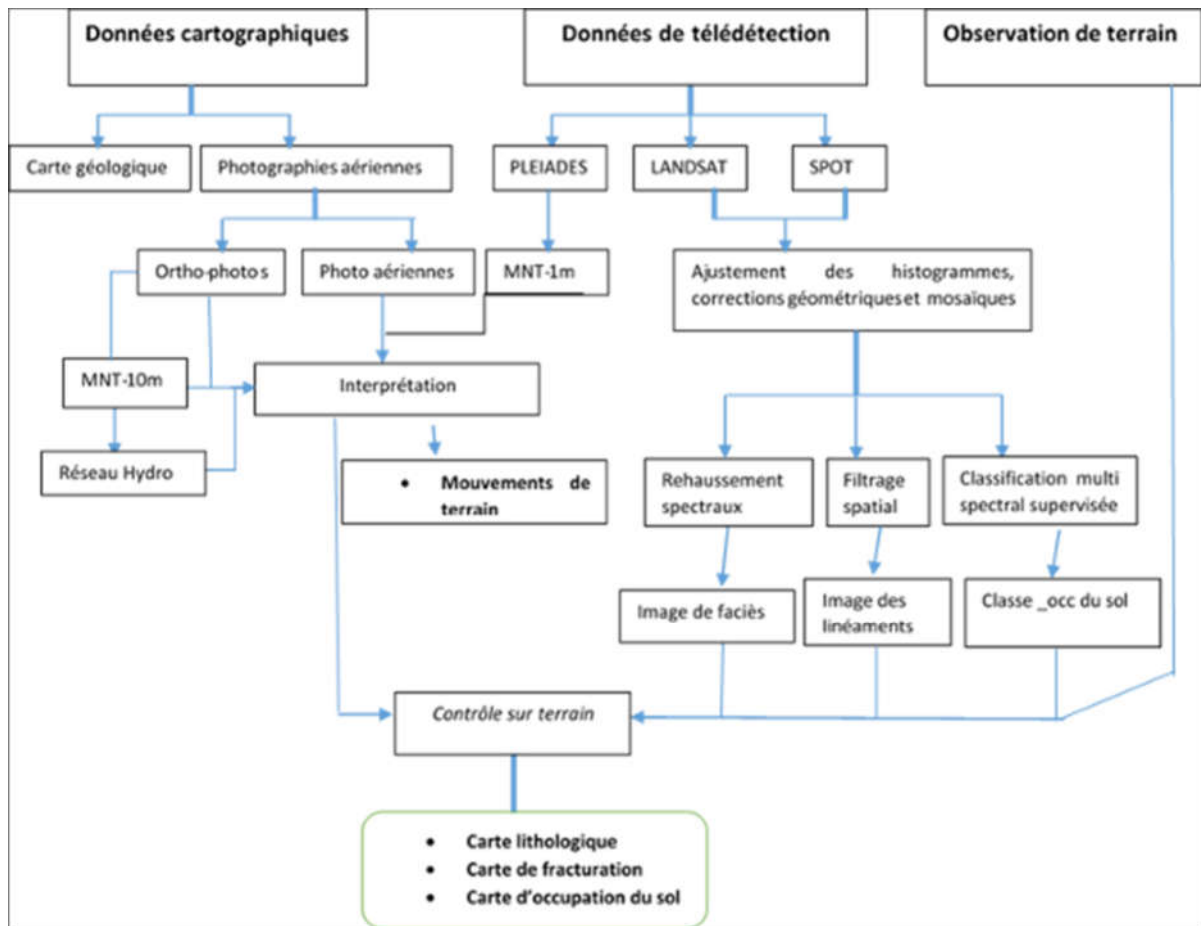


Figure III-5: Méthodologie d'approche

Avant de traiter puis d'interpréter les données de télédétection, nous avons procédé à l'ortho-rectification des images afin de pouvoir cartographier sur base d'un même référentiel cartographique. Pour cela, la méthode que nous avons utilisée consiste en un premier temps à corriger les images non rectifiées à base des ortho-photos déjà ortho-rectifiées. Ainsi, nous avons identifié sur l'image à rectifier des points facilement reconnaissable (croisement de routes, édifices, ponts, etc.) appelé Point de Control au Sol (PCS). Ensuite, nous les avons fait correspondre à leur véritable position coordonnée cartésiennes au sol. Une fois que plusieurs couples de PCS bien distribuées en nombre important (en fonction du degré polynomial choisi) ont été identifiés, l'information est traitée par le programme. Les fonctions et les paramètres de transformation préétablis sont alors appliquées aux coordonnées originales (ligne et colonne) pour obtenir de nouvelles coordonnées par rapport au référentiel choisi qui dans notre cas, s'agit de :

- Projection Transverse Universelle de Mercator
- WGS, version de 1984
- Zone 35 Sud

L'analyse des données satellitaires nécessite au préalable une procédure de sélection de triplets pour la sélection de compositions colorées de façon à couvrir un large éventail de longueur d'onde. Des

compositions colorées sont alors réalisées et examinées pour en déduire des critères de classements, basées sur une perception et la discrimination de l'information à extraire, ici la lithologie et la fracturation.

En cartographie géologique, le meilleur choix est de sélectionner les bandes en fonction des caractéristiques spectrales attribuées à la présence des différents minéraux dans les roches (El Atilah et al., 2018).

Le système SPOT 4 enregistre les données uniquement dans quatre bandes du spectre : le vert, rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge. Habituellement, seulement un type de combinaison de bandes 432 est le plus largement utilisé ; en donnant l'image familiale de la végétation en rouge et approximativement les couleurs naturelles pour les autres types de surface. Cependant, statistiquement, on peut faire plusieurs combinaisons colorées de trois triplets.

Le système Landsat-7 ETM+ offre six bandes dans les parties du visible, proche infrarouge et infrarouge thermique. Les données sont moins corrélées et les possibilités de combinaisons d'images sont très nombreuses. Il est donc possible de réaliser au moins 20 combinaisons qui s'ajoutent à la combinaison en couleurs réelles (321), pour les six bandes réfléchies de Landsat-7 ETM+.

Ainsi, la sélection d'un triplet de canaux pour un affichage en composition colorée peut se faire soit par les méthodes empiriques visuelles soit en se basant sur les calculs statistiques.

Lors de la procédure visuelle, les trois canaux sont sélectionnés de façon à couvrir un large éventail de longueur d'onde, mais également en fonction de compositions colorées classiques (Yéssou, 1993). Des compositions colorées sont alors réalisées et examinées pour en déduire des critères de classement basées sur une perception et la discrimination de l'information à extraire, ici la lithologie et la fracturation.

Pour notre cas, les compositions colorées les plus discriminatives et les plus contrastées de l'image Landsat-7 sont : 321, 531, 752, 741 et 254.

Certains auteurs afin de gagner du temps dans l'analyse des données images, recommandent d'utiliser des approches statistiques pour la sélection des triplets (Moik, 1980, Clavez et al., 1982; Crippen, 1989). La variance calculée à partir de l'écart-type, indique le volume de l'information contenu dans chaque bande. Les corrélations entre canaux permettent de définir dans quelle mesure ils sont redondants.

Ces trois méthodes ont été appliquées aux données Landsat-7 ETM+. Selon la méthode de Moik, 1980; les triplets 541, 741 et 431 respectivement par ordre décroissant sont plus aptes à fournir des compositions colorées optimales. La méthode de Chavez et al., (1982), indique que les meilleures combinaisons possibles par ordre d'importance décroissant, sont les triplets 754, 543 et 541. Et selon l'approche de Crippen (1989), ce sont dans l'ordre les triplets 432, 532 et 732 qui sont les plus pertinents dans l'élaboration des compositions colorées.

On remarque alors que l'ordre du même triplet diffère de rang selon l'approche statistique employée. Ce qui montre la difficulté du choix de compositions optimales selon une méthode et une autre.

Dans le but d'extraire des facteurs lithologie, fracturation et occupation du sol, l'application de nombreuses techniques de rehaussement et de classification de l'image ont été appliquées sur les données de télédétection. Les plus importants sont :

- Le 'Decorellation stretch' ;
- L'Analyse en Composante Principale (ACP) ;
- Le 'Tasselet Cap' ;
- Le filtrage par convolution ;
- Le filtrage Crisp
- Le filtrage statistique (statistical filter)
- Une classification multispectrale supervisée.

Quelques exemples des traitements effectués sur les données de Landsat-7 ETM+ et SPOT, sont illustrés par les Figures III, 4–6 :

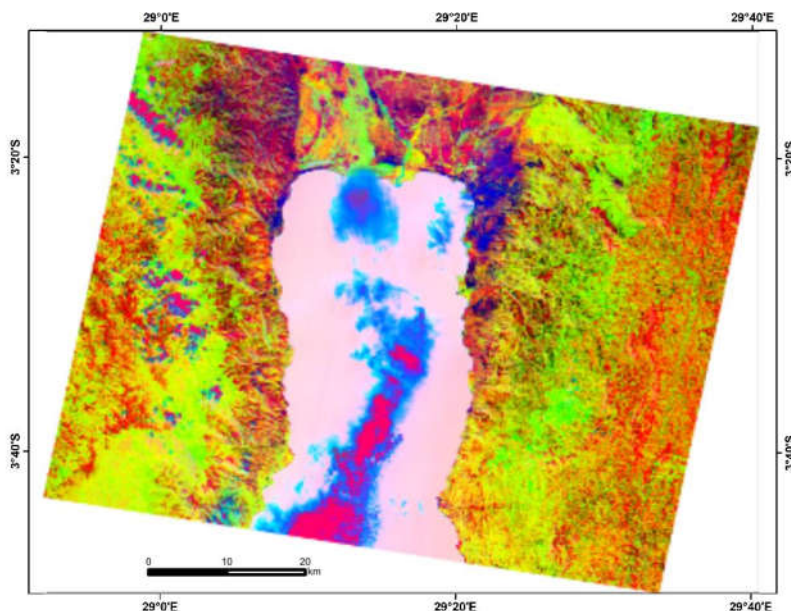


Figure III-6: Composition colorée 432 après traitement par l'Analyse en Composante Principale (ACP) de l'image SPOT 4. Analyse par ACP des données SPOT sur toute la scène avec différentes signatures où l'on distingue facilement les différents faciès.

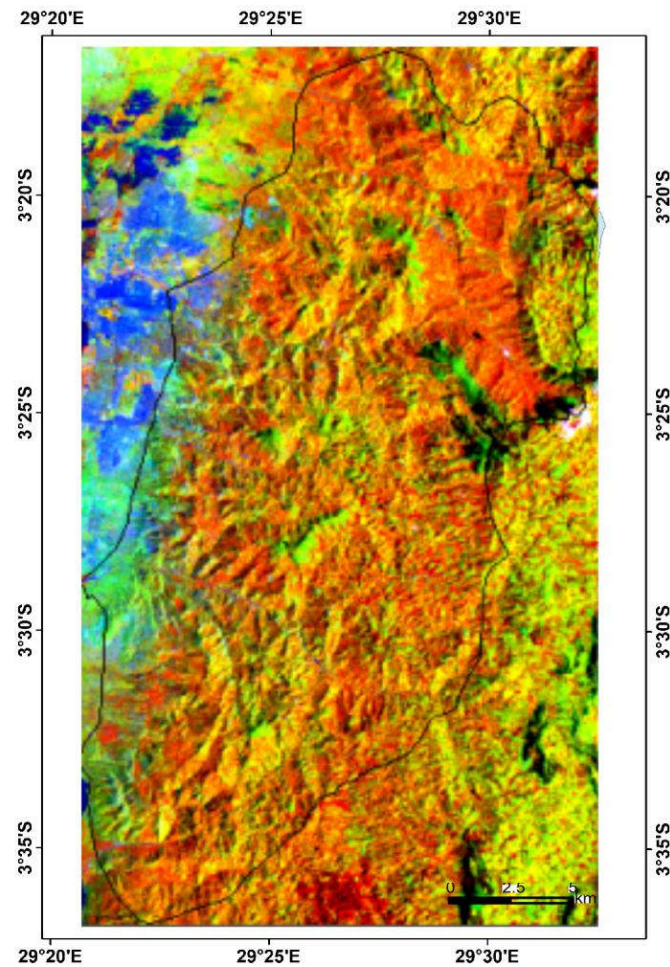


Figure III-7: Composition colorée 453 après traitement Decollation Strech (DS) sur les données de Landsat-7 ETM+. Analyse par DS des données SPOT 4 sur toute la scène avec différentes signatures où l'on distingue facilement les différentes formations lithologiques.

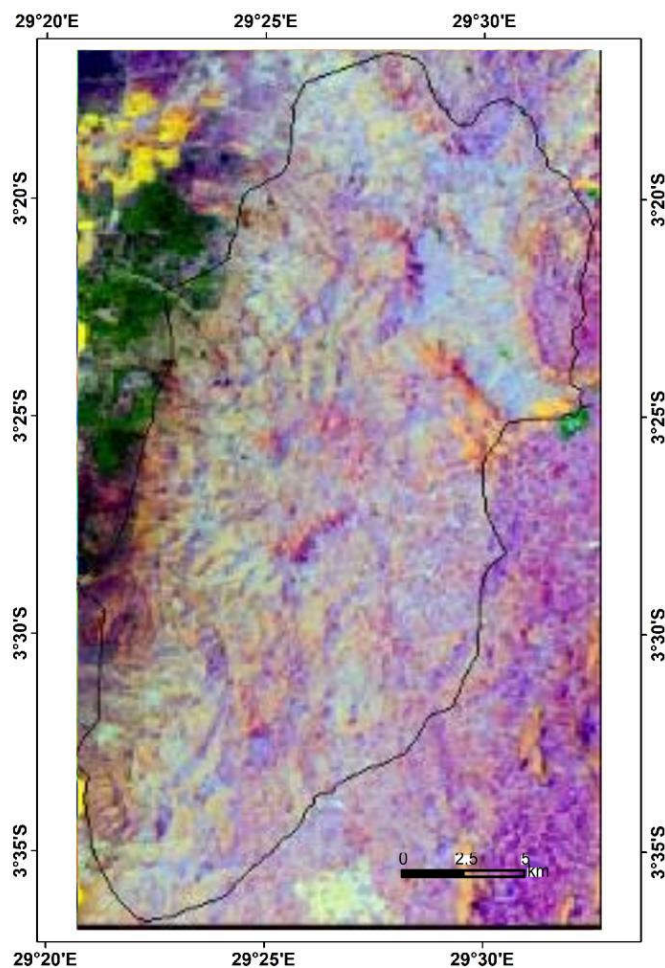


Figure III-8: Composition colorée 532 après traitement Tasellett Cap (TC) sur les données de Landsat-7 ETM+. Analyse par TC des données ETM sur toute la scène avec différentes signatures où l'on distingue facilement les différents faciès.

III.4. CARTOGRAPHIE DES MOUVEMENTS DE TERRAINS

III.4.1. Cartographie des mouvements de terrain à partir des images satellitaires accédées via Google Earth

Dans cette étude, les images satellitaires disponible sur l'interface Google Earth (GE) ont été utilisées pour extraire des informations sur la cartographie et l'évolution multi-temporelle des MTs ainsi que leurs impacts conséquents. La Figure III-9 montre des MTs de terrain de type érosion par ravinement qui est cartographiés sur base des images GE au quartier Kizingwe, sud-est de Bujumbura. De plus, les images satellitaires de GE ont été servies pour valider la carte d'occupation du sol, un des paramètres importants pour le déclenchement des MTs.



Figure III-9: Mouvements de terrain dans le quartier Kizingwe, impacts sur l'urbanisation. Les images de Google Earth montrent deux grandes ravines avec des processus de glissements associés qui menacent un quartier non viabilisé (Kamesa) et un autre en cours de viabilisation (Kizingwe) au sud de Bujumbura.

L'existence des images GE sur plusieurs périodes à l'échelle des reliefs de Bujumbura permet de déterminer la date exacte ou probable de l'occurrence des MTs sur l'ensemble de secteur d'étude. Par exemple, les images GE permettent de faire un suivi spatio-temporel des MTs sur tout notre secteur d'étude. Un exemple du glissements-coulées de Muyira dans la zone Kanyosha, province Bujumbura a été investigué à base des images GE (Figure III-10) :

- La première observation que les images présentées ont de commun est que les trois quarts d'entre elles ont été prises en saison sèche (Juin-Aout). Cela trouve une explication dans le fait que pendant la période pluvieuse, le ciel est pour la plupart de fois couvert. En passant, le satellite a peu de chance de trouver un ciel dégagé. Dans l'étude régionale, Monsieurs et al. (2018) et Dewitte et al. (2021) ont pu montrer que la plupart des MTs récents ont été déclenchés par les précipitations sauf quelques cas rares. Le manque d'image prise en saison pluvieuse pose des difficultés pour établir des corrélations entre les dates des images et la période de déclenchement des MTs.
- En analysant, image par image, nous constatons que l'image de 28 juin 2017 comporte une vieille école et environ une vingtaine de maisons d'habitation. Une année plus tard, au 03 août 2018, l'école disparaît sur les images. Là, il est possible de se poser des questions; est-ce l'école a été démolie

ou s'est effondrée d'elle-même? Cette question reste sans réponse avec l'utilisation des images satellitaires pour le cas présent.

- En 2011, il y a une réapparition d'une école et cette fois-ci avec une toiture neuve. Ici, nous pouvons déduire que pendant la période d'entre 2008 et 2011, l'école a été reconstruite.

- La dernière image présentée est prise au 02 avril 2014 et comporte un glissement de terrain frais qui a effondré une majeure partie de la nouvelle école et plusieurs maisons d'habitation. De cette manière, les images Google Earth nous ont permis de reconstruire l'histoire sur l'évolution du paysage et l'occupation des sols sur une courte période d'observation surtout que les images GE disponibles se trouvent uniquement sur les deux dernières décennies.

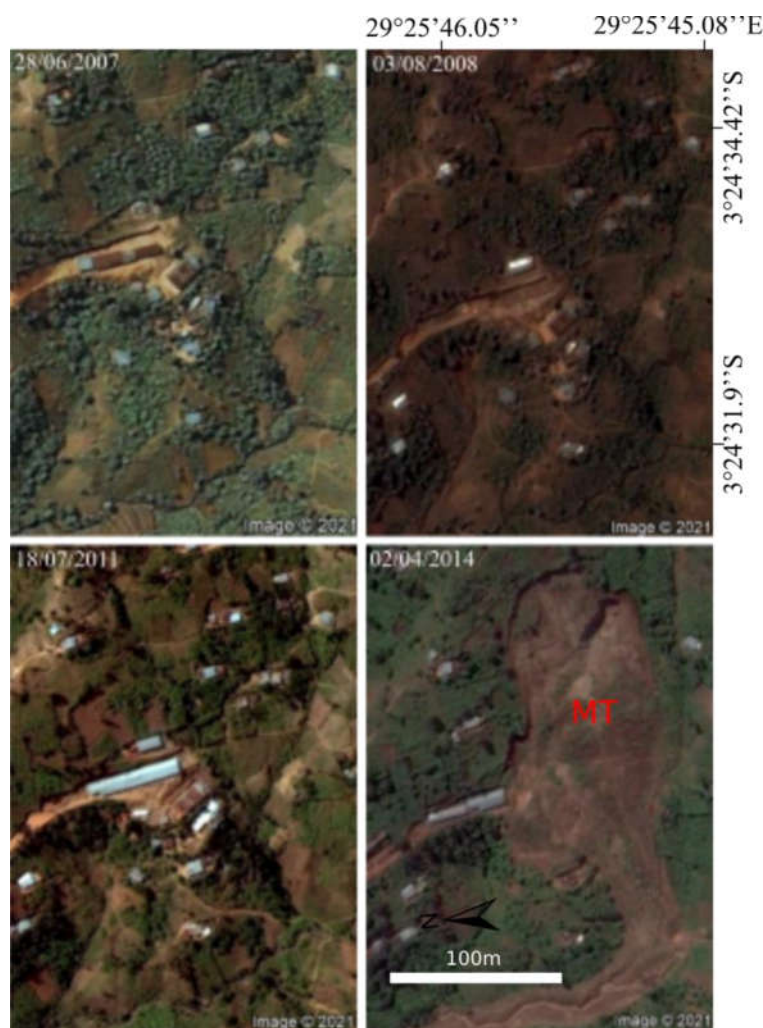


Figure III-10: Observation et cartographie du glissement de terrain de Muyira à l'aide des images Digital Globe de Google Earth, analyse sur quatre scènes sur un même endroit. Les trois premières images ont été prises respectivement en 2007, 2008 et 2011 et il n'y a aucun mouvement de terrain observable. La dernière est prise en 2014 et montre un grand MT. Le mouvement a eu lieu donc entre 2011 et 2014. D'autres sources comme les ortho-photos de 2012 et le terrain serviront à la précision de la période d'occurrence du MT.

III.4.2. Cartographie des mouvements de terrain sur les images Pléiades

Les images Pléiades à notre disposition couvrent la presque quasi-totalité du secteur d'étude. Elles nous ont été fournies en mode multispectrale (résolution=2m) et panchromatique (résolution=0.5m). Le Modèle Numérique de Surface (DSM) a été construit à partir d'images tri-stéréo Pléiades. Le traitement photogrammétrique (ajustement du faisceau d'ajustement, reconstruction de la surface topographique et ortho rectification) a été effectué dans MicMac (Rupnik et al., 2017). Ces ortho-images pléiades ont été traitées pour produire un modèle numérique de surface de haute résolution au mètre (Figure III-11). Le DSM pléiades produit a servi à la cartographie des MTs ainsi que la distinction du processus profondeur (superficiel/ profond) (Figure III-11).

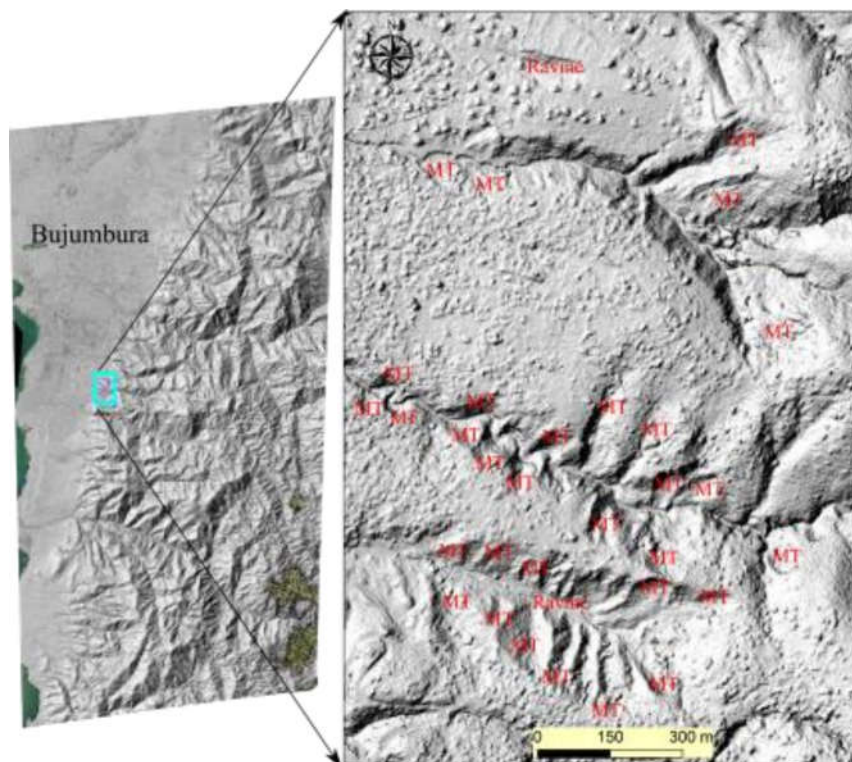


Figure III-11: Identification des MTs à partir des images Pléiades VHR, zoom du quartier Gasekebuye, BV Muha. Le traitement photogrammétrique des images Pléiades a permis de générer un MNT de 1m de résolution. Cette donnée permet en plus de cartographier avec précision des MTs et surtout de déterminer la profondeur de rupture des pentes qui est très utile surtout pour des applications géotechniques.

III.4.3. Cartographie des mouvements de terrain sur les photos aériennes historiques

La caractérisation des processus des MTs telles que la taille, la forme, l'état d'activité, le type, l'âge, etc.) s'est réalisée selon des critères et des méthodes décrites par Hungr et al. (2014). De toutes les méthodes existant dans la littérature classique pour produire un inventaire des MTs, l'interprétation de photographies aériennes et d'images satellitaires prime sur les autres (Guzzetti et al., 2012). Cette méthode n'est néanmoins pas facile à appliquer dans des régions tropicales humides où l'on rencontre

une forte couverture nuageuse et une recolonisation rapide des paysages par la végétation (Jacobs et al., 2017, Dewitte et al., 2021). Un recours à la combinaison de données de terrain, d'archives et des sources suscitées s'avère nécessaire (Jacobs et al., 2017, Monsieurs et al., 2018). Dans cette étude, nous avons fait recours à l'usage des photographies aériennes disponibles sur trois périodes 1957–59, 1972 et 1981.

Ces photographies aériennes ont été analysées et interprétées en stéréoscopie au cours de notre stage de recherche au MRAC – Belgique (Figure III-12) et offrent des informations sur les occurrences spatiales des mouvements de masse anciens, c'est-à-dire datant d'au moins dès l'année 1981.

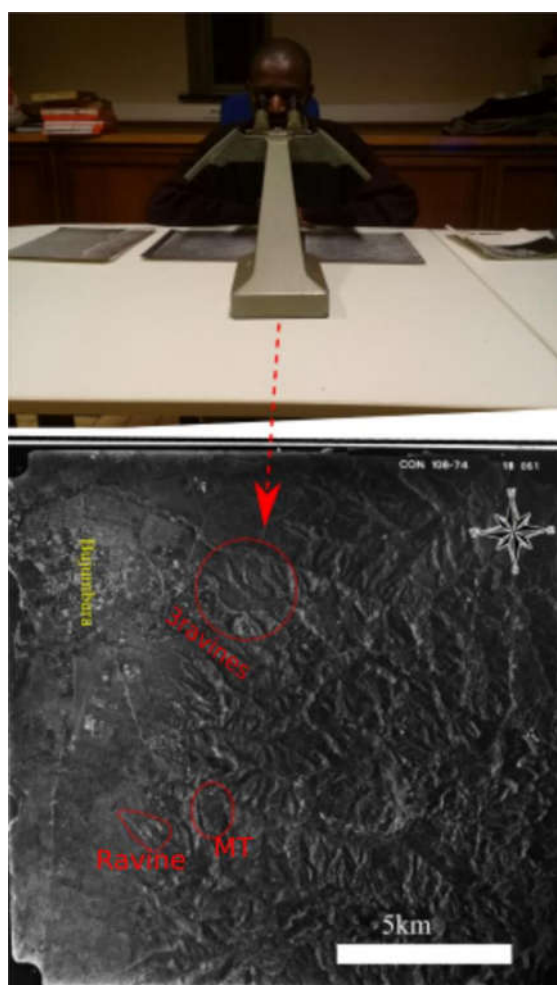


Figure III-12: Interprétation des photos aériennes sous couple stéréoscopique

L'image analysée montre la présence des grands glissements de terrain et des ravinements présents en 1974. Les contours en rouge sur la Figure III-12 montrent la localisation géographique des MTs observés. Le grand cercle au nord correspond à des grandes érosions par ravinement de Vugizo, Sororezo et Mugoboka dans le bassin versant de la rivière Ntakangwa agrandie à la Figure III-13. Les deux contours en bas pointent sur le grand ravin de Nkenga Busoro (ouest) et le glissement de Rohe (grand MT situé au sud : Figure III-14).

III.4.4. Cartographie des mouvements de terrain à l'aide des ortho-mosaïques

Les ortho-photos/ortho-mosaïques ont permis de cartographier les mouvements de terrain survenus pendant et avant la date des images (Figures III, 13–20). Leur plus haute résolution spatiale a facilité la différenciation des différents processus d'occurrence des mouvements de terrain qui n'étaient pas possible en utilisant d'autres sources de données telles que les images Landsat-7 et SPOT 4 de résolution de l'ordre des dizaines de mètres. Pour mieux discerner le processus 'profondeur', nous nous sommes servis du MNE-10m en complément du modèle pléiades à très haute résolution spatiale.

III.4.4.1. Cartographie des mouvements de terrain de Vugizo, Sororezo et Mugoboka

Nous avons effectué la cartographie des MTs se trouvant dans la zone péri-urbaine de Vugizo, Sororezo et Mugoboka (Figure III-13). Le ravin de Vugizo cartographié menace le côté sud du Lycée Notre Dame de Vugizo actuellement abandonné pour des risques d'effondrement. Ce ravin manifeste encore une activité aux mouvements masse gravitaire. D'autre part, le flanc nord en contact avec le quartier Sororezo expose une partie de la route du nouveau quartier avec une menace aux deux maisons y érigées. Entre Sororezo et Mugoboka, deux autres grands ravinements actifs sont observés (Figure III-13). Des maisons haut-standings comme des grands hôtels munis dans certains cas de piscines sont directement au-dessus de la ravine profonde de plusieurs mètres. L'extension des ravines par recul de tête (+ 200m en 70ans) met en danger la population rurale environnante.

A l'intérieur des ravines se sont développé nombreux glissements de terrain. Ce sont des mouvements de terrain déclenchés dans un sol meuble. Selon l'observation visuelle des ortho-photos, l'aval du flanc sud du ravin de Vugizo a tendance à se stabiliser. Cela serait lié à l'abondance des arbres du côté de Vugizo que Sororezo. L'autre cause serait à l'anthropisation. En effet, Vugizo connaît un peu d'habitat contrairement à Sororezo qui est plus urbanisé. Dans tous les cas, les mouvements de terrain dans cette partie manifestent encore une activité élevée.



Figure III-13: Les mouvements de terrain des quartiers Vugizo Sororezo et Mugoboka. Les trois grands ravins sont visibles sur les photographies aériennes de 1958 avec une rupture de pente fraîche, ce qui justifie leur activité à ce moment. Sur les photographies aériennes anciennes, les alentours de ces ravins ne sont pas habités. Ce qui n'est pas le cas en 2012. Les ravins restent encore actifs avec des mouvements de terrain qui se déclenchent sur leur flancs.

III.4.4.2. Cartographie des mouvements de terrain à Nyamutenderi et Rohe

Le bassin versant de Kanyosha concentre des mouvements de terrain de différents types (Kubwimana et al., 2018). Leur distribution spatiale se concentre surtout dans le paysage rajeuni par le recul des knickpoints (Kubwimana et al., 2021b). Sur les ortho-photos, les mouvements de terrain sont nettement visibles sous des tailles variables (Figure III-14). Au nord (Figure III-14), un grand glissement profond s'est déclenché au niveau de l'école primaire Nyamutenderi situé en bas du nouvel axe de la Route Nationale numéro 3. La largeur du MT avoisine 200m sur une longueur légèrement supérieure à 300m. Le MT a une apparence rotationnelle sur les images. Son escarpement principal est frais sur les images, ce qui traduit une activité récente. Dans son corps existe un MT qui ne montre pas une activité récente. Cela déduit que la récente activation aurait concerné uniquement l'escarpement principal et serait celle qui a détruit l'ancienne école un peu avant en 2008. Par ailleurs, d'autres mouvements sont observés sur toute la longueur de la RN3 (Figure III-14). Ce sont des MTs qui ont détruit la RN3 obligeant sa déviation sur une longueur importante. Plus au sud au niveau de la colline Rohe, un glissement de terrain de tendance rotationnelle s'est déclenché. Ce glissement est connecté directement sur la rivière Kanyosha et son escarpement avoisine 200m. Son corps en replat sert comme champs de cultures vivrières.

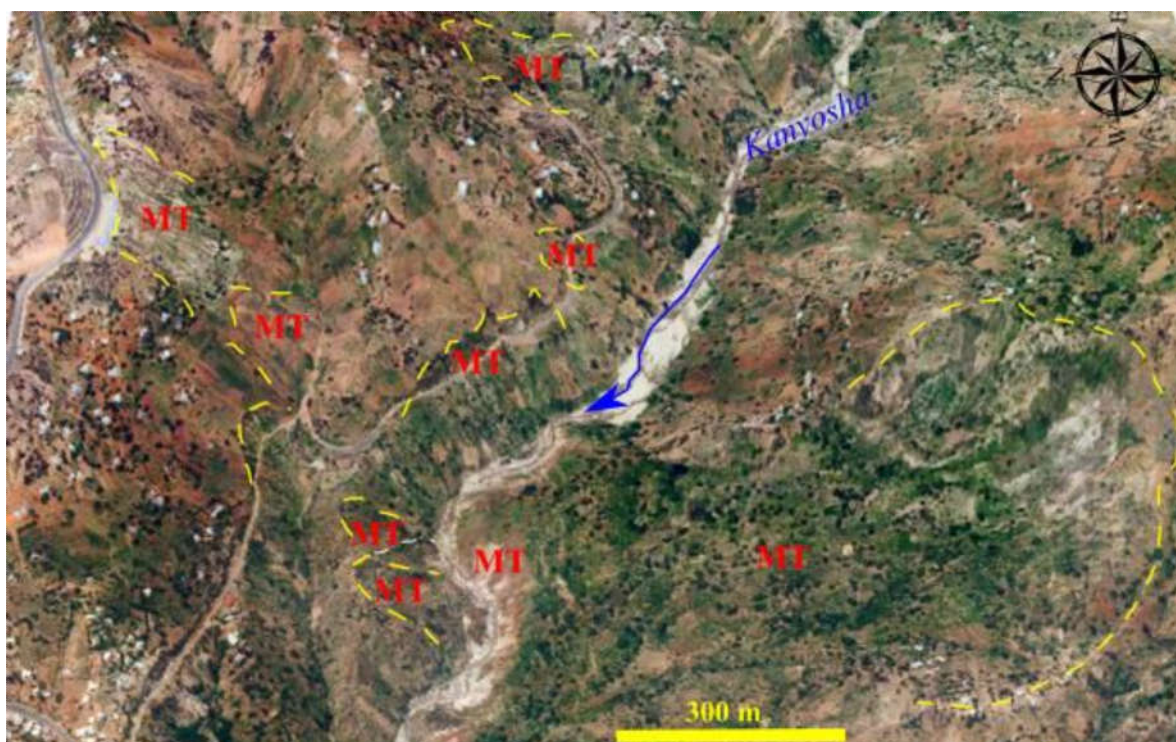


Figure III-14: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, image très HR, bassin versant de Kanyosha (Kubwimana et al., 2018). Du côté de Rohe un grand MT de profondeur environnant 100m est observable. C'est le glissement baptisé de la bananeraie par Nibigira et al., 2018. Du côté de Nyamutenderi, plusieurs MTs sont présents et menacent la route nationale 7 sur plusieurs endroits ainsi que l'école primaire de Nyamutenderi.

III.4.4.3. Cartographie des mouvements de terrain à Gasekebuye

En plus de l'utilisation des ortho-photos pour la cartographie des MTs, nous avons exploité également les ortho-mosaïques datant de 1957–59 qui couvrent sur la presque totalité du secteur d'étude (Figure III-15a). Ces ortho-mosaïques sont octroyées par le Musée royal de l'Afrique centrale (MRAC – Belgique) dans le cadre d'appui à cette recherche. Les ortho-mosaïques sont générées et ortho-rectifiées à base de la couverture aérienne prise à l'époque coloniale. Malgré leur extension limitée; elles ont fourni pas mal d'informations sur la cartographie des MTs anciens à l'échelle régionale ainsi que leur niveau d'activité.

A base des ortho-mosaïques historiques, nous constatons que depuis plusieurs décennies, des phénomènes de mouvements de terrain existent au niveau des reliefs de Bujumbura. Cela est attesté par la présence des cicatrices de grandes érosions par ravinement et des MTs sur les ortho-mosaïques anciennes (Figure III-15a). Ces mouvements de terrain présentent depuis plusieurs années un danger pour les infrastructures en place. Par exemple, la route nationale numéro 3 qui lie Bujumbura aux provinces du sud du pays se montre sur les images de 1950 sans goudron (Figure III-15a). Avant, la route longeait la rivière Muha en traversant une ravine au niveau du quartier Gasekebuye (Figure III-15a). Plus tard, la RN3 a subi une déviation probablement lors de la construction de la nouvelle route bitumée (Figure III-15b). Ainsi, l'axe actuel contourne la ravine en traversant le quartier Musaga-Mairie pour rejoindre l'ancienne route plus loin dans la partie rurale. Les ortho-photos de 2012 montre que ravin de Gasekebuye s'est largement étendu des centaines de mètres et demeure encore actif (Figure III-15b).

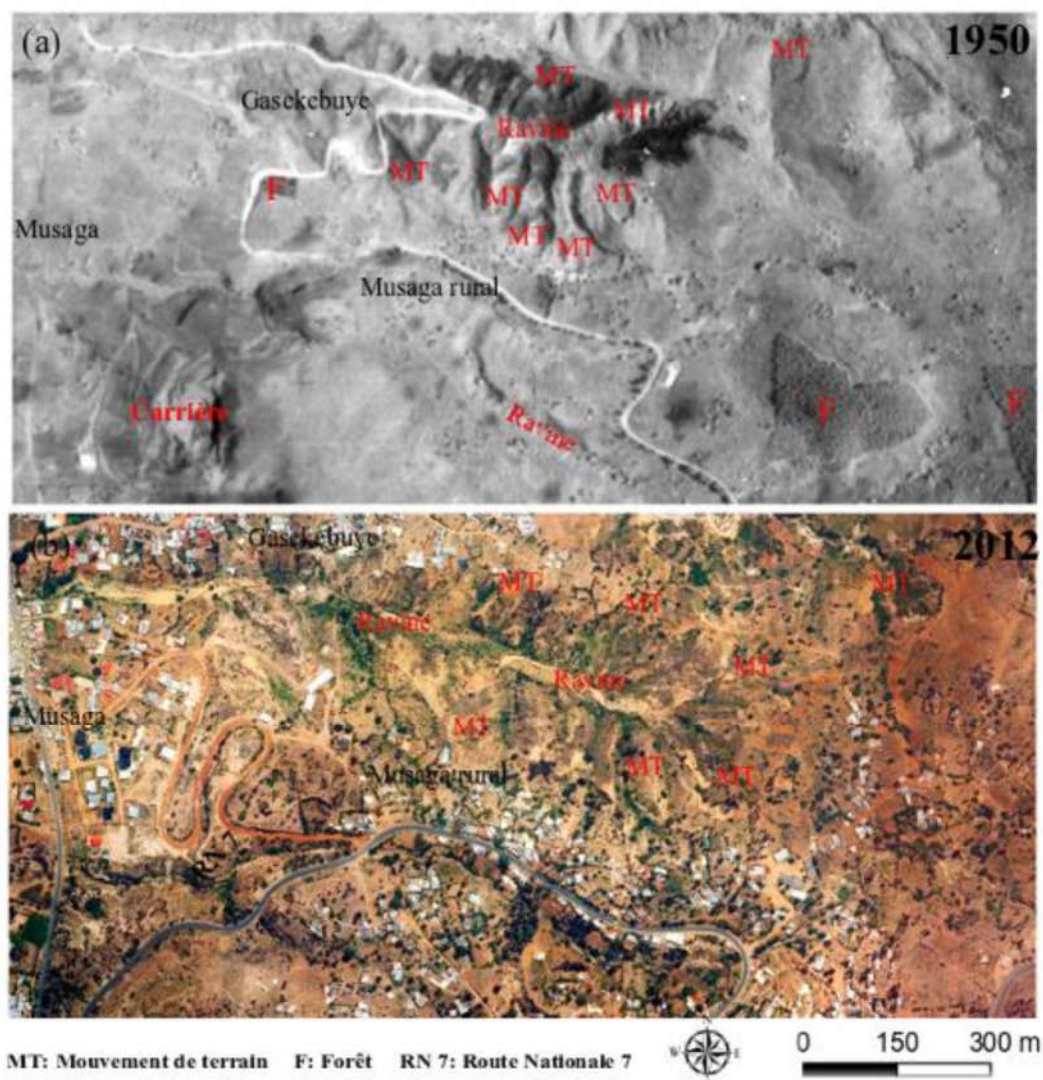


Figure III-15: Cartographie des MTs sur les ortho-mosaïques de 1958 et 2012. (a) photos aérienne prise à l'époque coloniale avec une route en terre qui traverse un grand ravinement à Gasekebuye et (b) l'ortho photo de 2012 qui montre la même région avec la ravine élargie et un quartier habité aux alentours. Ce qui justifie que la ravine reste active.

III.4.4.3. Cartographie des mouvements de terrain dans la localité du barrage Mugere

La route menant vers le barrage hydro-électrique de la Mugere est sous menace des mouvements de terrain. En 2010, un glissement a coupé cette route la rendant impraticable pendant un certain temps (Nibigira et al., 2015). Par après, un pont a été effondré par des coulées de débris juste en bas de la centrale. Ces mouvements de terrain de la localité de la Mugere ont été cartographiés sur les ortho-photos de 2012 (Figure III-16) :

- Le glissement situé au sud-ouest semble être translationnel sur les images. Il est directement connecté à la rivière Mugere.
- Plusieurs petits mouvements ont été cartographiés le long de la route vers le barrage.

- Au nord-est, s'observe un grand glissement de terrain. Ce MT apparemment ancien semble être rotationnelle et connaît dans son corps deux autres réactivations de taille considérable. Ces réactivations sont de tendance rotationnelle sur les images. Au niveau du grand MT, il y a plusieurs maisons dispersées à travers son corps.
- Les mouvements de terrain inventoriés sont en contact avec la rivière de la Mugere. Ils contribuent à l'alimentation en débris de cette dernière.

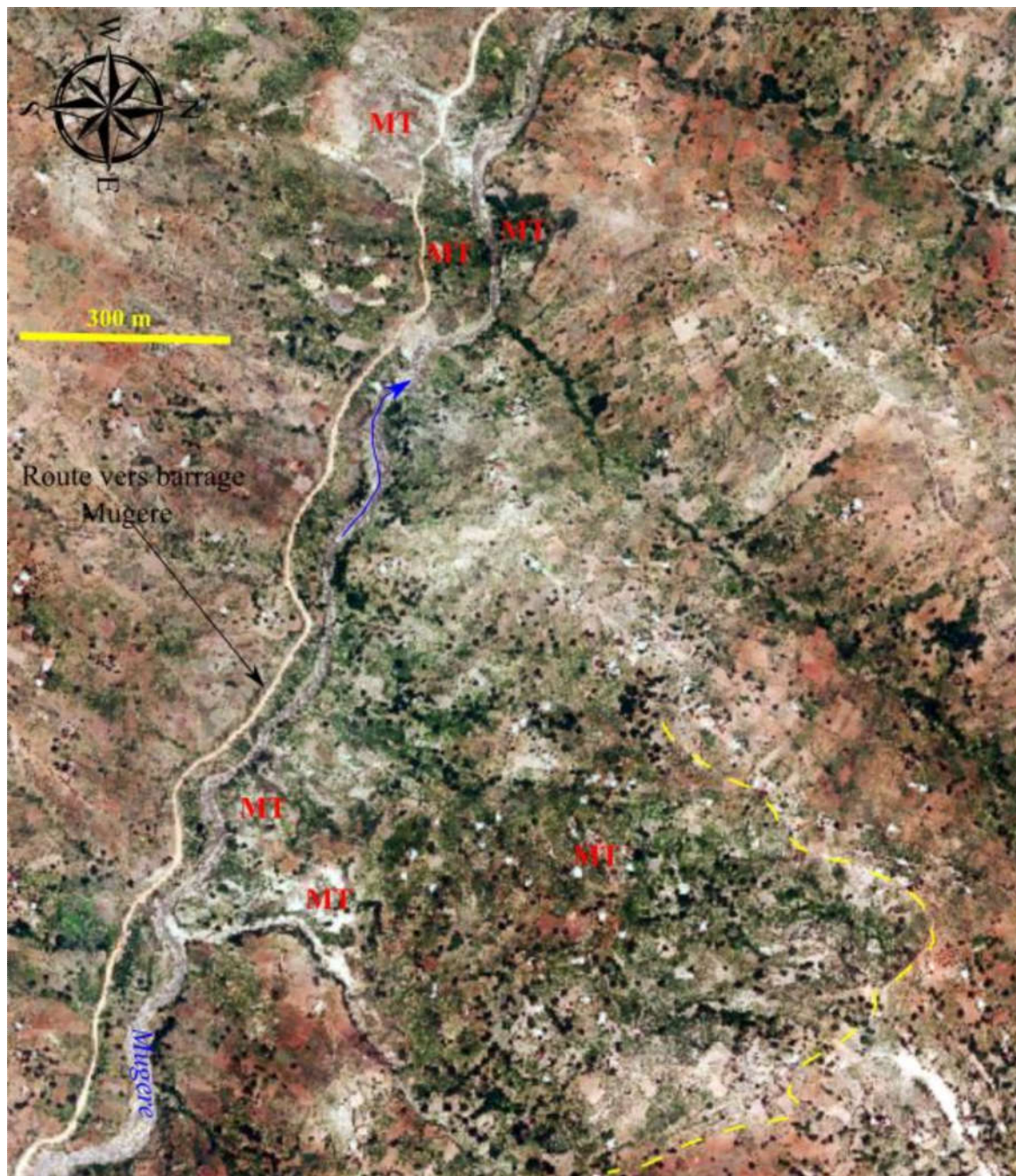


Figure III-16: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, images très HR, BV Mugere. Aux environs de la route vers la centrale hydroélectrique de la Mugere, se trouve un grand MT de type slide avec plusieurs maisons à l'intérieur. Dans ce mouvement, deux activations récentes s'observent vers la base et démontrent son activité. Du côté de la route, plusieurs MTs sont présents et la coupent de temps en temps.

III.4.4.4. Cartographie des mouvements de terrain à Gikungu rural

Dans le quartier Gikungu rural, se sont développées deux ravines et des glissements conséquents (Figure III-17). Ces ravines actives contournent de part et d'autre le quartier Gikungu rural et menacent les habitations. Le plus vaste reste très actif tandis que le petit a tendance à se stabiliser et ne présente pas des dangers directs à la population. Le degré d'activité de ces MTs est également démontré par les surfaces de rupture fraîches sur les images. L'activité est aussi marquée par des destructions des infrastructures, ici les maisons d'habitations. A par ces ravines, plusieurs des glissements rotationnels se sont développés le long du grand ravin (Figure III-17).

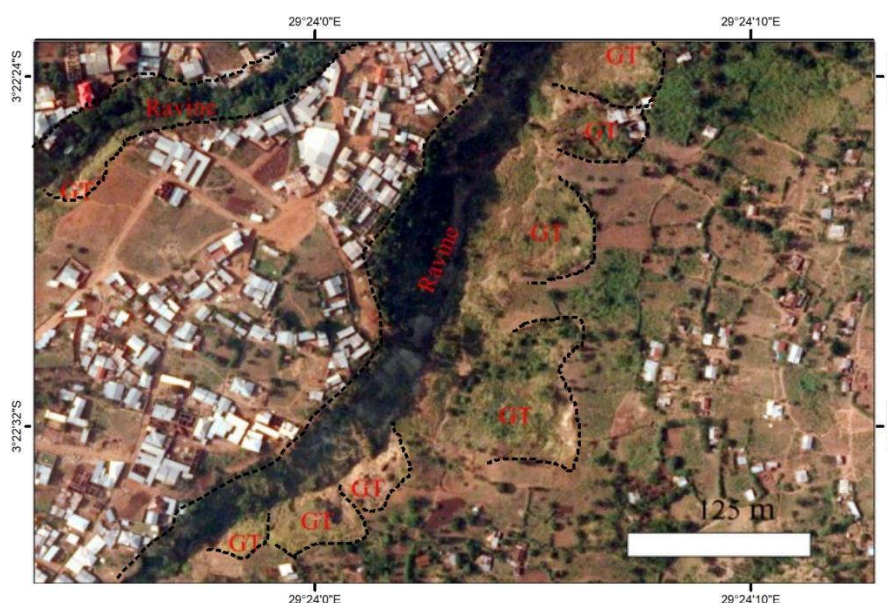


Figure III-17: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, impacts sur les quartiers Gikungu rural. Deux grands ravins actifs entourent le quartier périphérique de Bujumbura (Gikungu rural). Plusieurs MTs rotationnels sont présents sur le ravin qui est plus à l'Est.

III.4.4.5. Cartographie des mouvements de terrain autour du campus Kiriri

En plus du Lycée Notre dame de Vugizo abandonné, Kiriri, un des cinq campus l'Université du Burundi court au risque d'effondrement. Un MT situé derrière le campus a déjà effondré la route et une partie de la clôture et les expose sur plusieurs mètres (Figure III-18). Deux mouvements de terrain se distribuent de part et d'autre de la rivière derrière le campus. De l'autre cote MT du cours d'eau, un MT actif se trouve dans des zones cultivées avec une habitation dispersée (Figure III-18).



Figure III-18: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, MTs qui menacent une le campus Kiriri.

Les mouvements de terrain (Figure III-18) se trouvent au sud du campus Kiriri, Université du Burundi. Nous avons trois instabilités de terrain du côté du campus qui menacent la route vers le couvent. Notons que ce campus était le collège du Saint Esprit vers les années 80 sous la propriété des Pères jésuites. Ces mouvements de terrain étaient actifs en 2012 comme le démontrent leur cicatrices sur les ortho-photos de cette époque mais ne sont pas visibles sur les photos aériennes de 1958, 1972 ou 1981, ce qui confirme qu'ils sont récents. De l'autre côté de la rivière, un mouvement actif avec des occurrences à l'intérieur se manifestent. Ce MT se trouve dans des champs de cultures et menace des maisonnettes environnantes ; ce qui pousse la population rurale y résidant à migrer vers l' amont.

III.4.4.6. Cartographie des mouvements de terrain à Mugoboka-Gikungu

Dans la localité de Mugoboka-Gikungu, deux mouvements de terrain se sont développés dans un sol meuble. Ce sont des mouvements d'apparence translationnelle sur les images. Leur surface de rupture encore fraîche témoigne une activité récente. Les deux mouvements sont en contact avec la rivière Ntakangwa qui est une des rivières qui charrient de gros blocs de roches et contribuent en son alimentation en débris. Sur les images de 2012 ; les deux MTs apparaissent frais, ce qui indique que le mouvement est récent. Comme les ortho-photos utilisés sont des THR, des blocs de roches s'observent dans le lit de la rivière confirmant ainsi sa dynamique d'arracher et de transporter des matériaux grossiers.

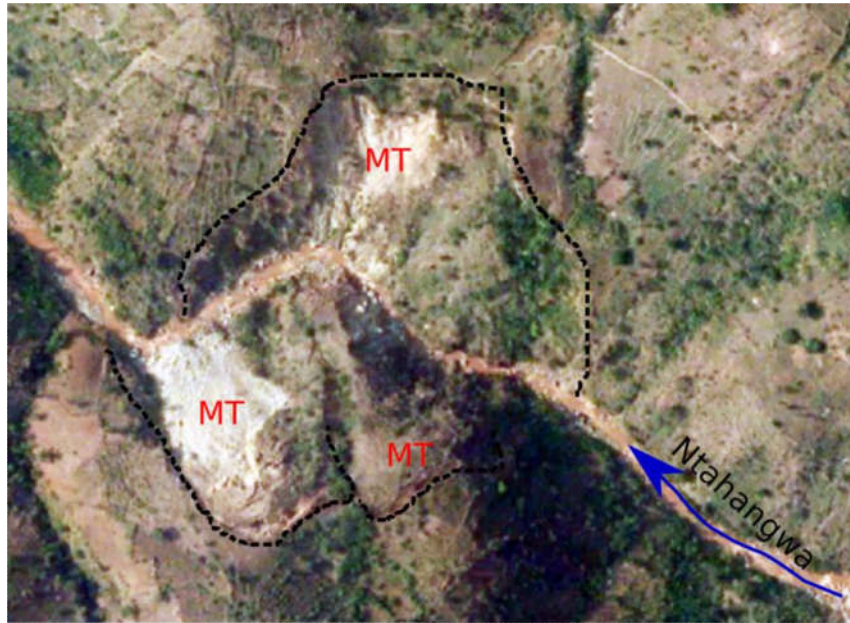


Figure III-19: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos, images très HR, colline Mugoboka-Gikungu. Deux grands MTs translationnels/avalanches se sont déclenchés de part et d'autre de la rivière Ntahangwa. Les cicatrices sont encore fraîches et sont donc actifs et récents. Ils sont profonds vu que leur zone d'arrachement dépasse 5m.

III.4.4.7. Cartographie des mouvements de terrain dans les milieux non urbanisés

A l'aide des ortho-photos, nous avons également cartographié des glissements de terrain dans les milieux non-urbanisés. Dans ces zones, les glissements sont actifs et détruisent des champs de cultures ; ce qui contribue à la réduction des récoltes. Un des exemples est le mouvement de terrain de type glissement-coulée (Figure III-20). Le MT apparaît sous deux surfaces de ruptures de taille différente. Le petit MT est plus fraîche que le grand ; ce qui indique qu'il est postérieur.



Figure III-20: Cartographie des mouvements de terrain à base des ortho-photos dans les champs agricoles, images très HR, Commune Isale. Un grand MT de type flowslide suivi d'une petite activation de la base s'observe vers l'est en amont du bassin versant de la rivière Ntakangwa. Les deux MTs se sont produits dans un sol latéritique très épais issu de l'altération des phyllites.

III.4.5. Synthèse des mouvements de terrain

Les MTs de terrain issu de différentes sources de données ont été répertoriés, cartographiés et synthétisés à la Figure III-21. Il s'agit de 878 MTs cartographiés sur base des images de GE, Pléiades, photos aériennes, ortho-photos, ortho-mosaïques distribuées sur toute l'étendue de la zone d'étude. La carte de synthèse montre que les MTs sont plus répartis à l'ouest qu'à l'est.

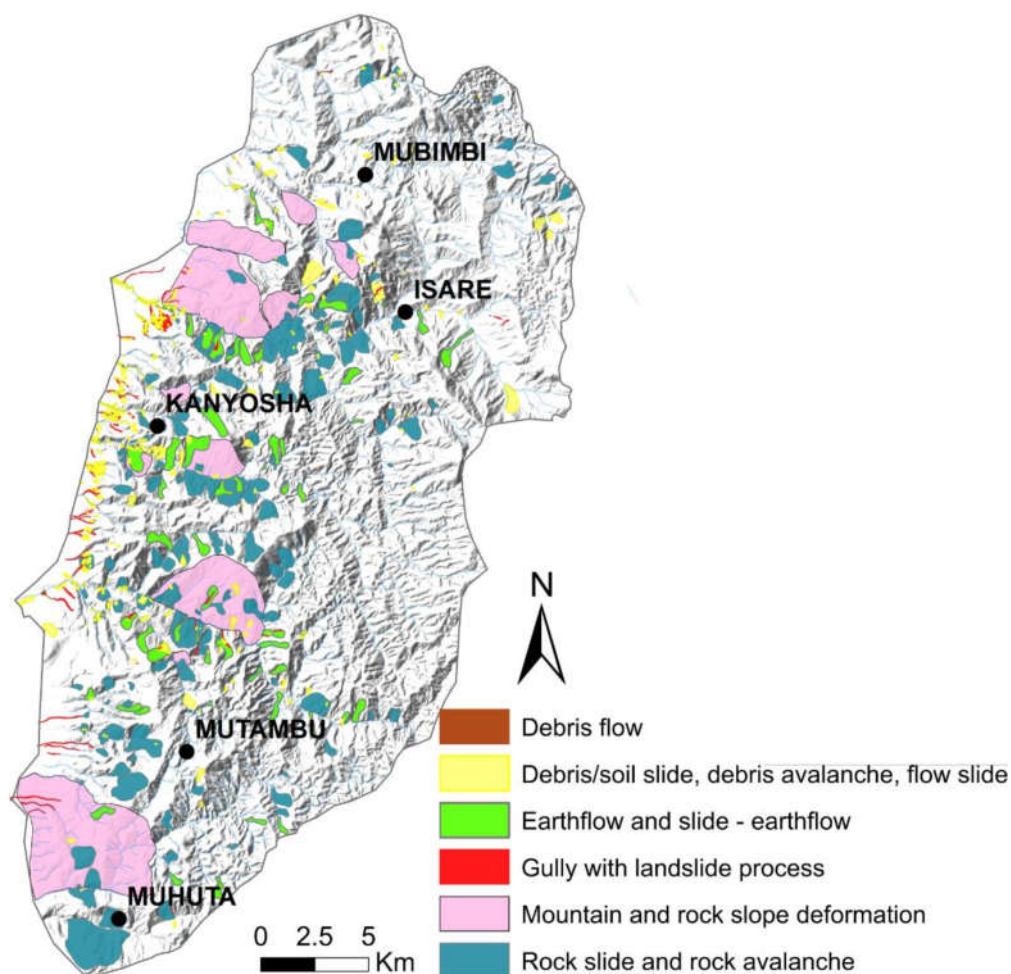


Figure III-21: Carte de synthèse des MTs issue des images satellitaires et des photos aériennes

III.5. ANALYSE DE LA LITHOLOGIE

Les formations lithologiques qui affleurent dans les reliefs de Bujumbura ont été distingués sur les données de Landsat-7 ETM+ et SPOT 4 en observant, en analysant et en interprétant plusieurs images issues de différents traitements multi spectraux. L'utilisation des cartes géologiques aux 1/100 000 et 1/50 000 que nous disposons à l'échelle de Bujumbura ont permis de comparer les résultats à l'identification lithologiques à partir de différents traitements optiques (SPOT 4 et Landsat-7 ETM+). Ensuite, les résultats des interprétations ont fait l'objet d'un contrôle sur le terrain afin de confirmer ou dernier l'information extraite.

- **Formation de Ngozi**

C'est un ensemble important constitués de phyllites parfois micaschisteuses. Leurs cartographies ont été rendues possible en utilisant plusieurs traitements notamment l'ACP par sa composition colorée CP4, CP3, CP2 sur les données SPOT 4 apparaissant sous des teintes vertes sur les images (Figure III-22)

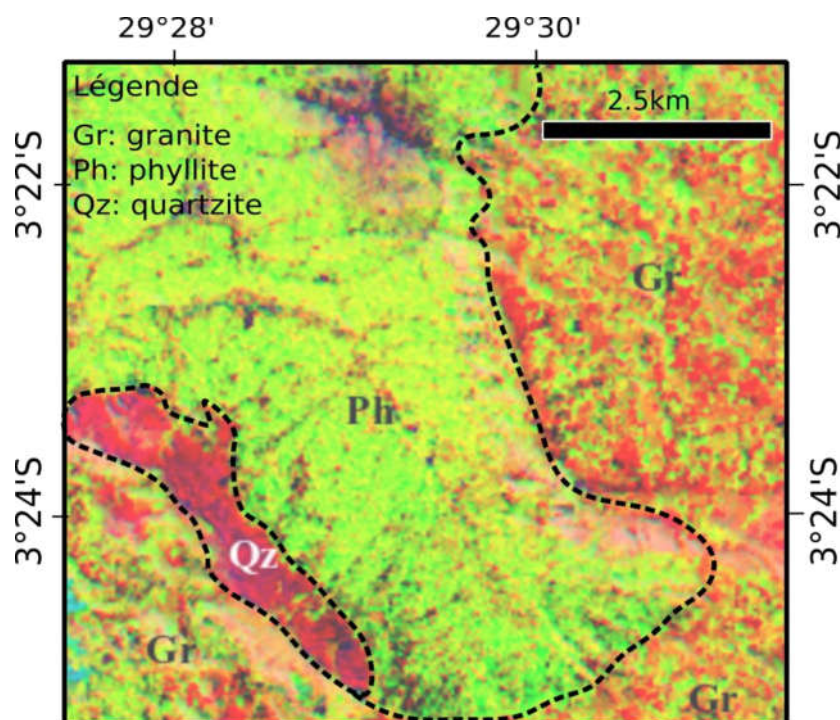
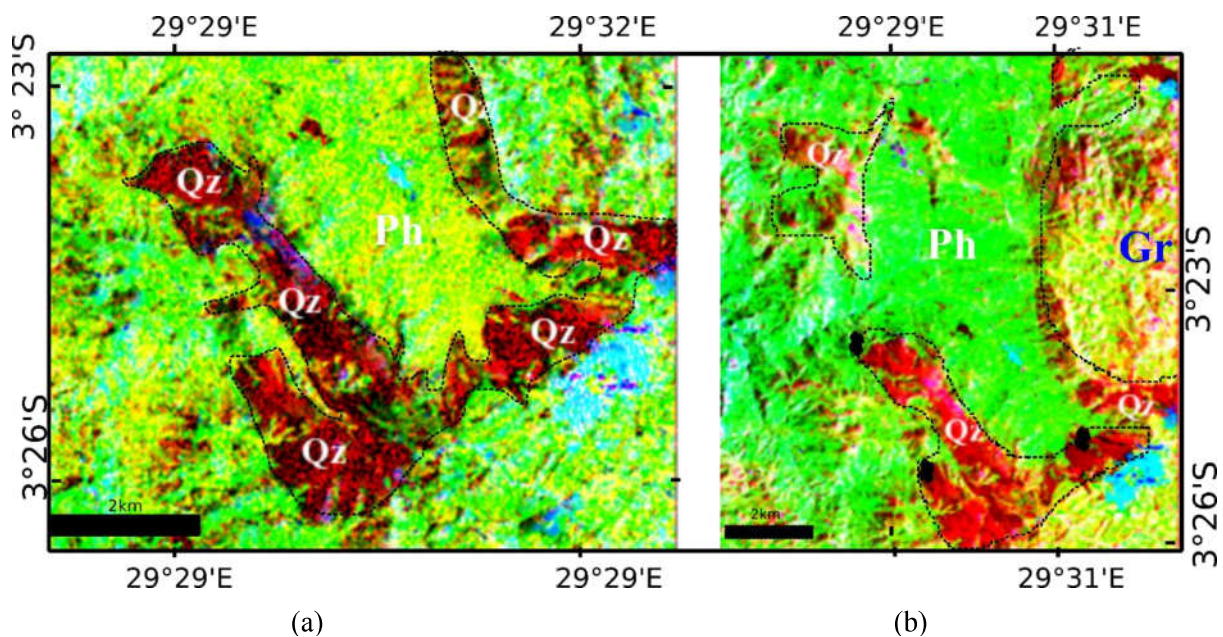


Figure III-22: Reconnaissance des phyllites micashisteuses (Ph) affleurant entre les quartzites (Qz) et granite (Gr) au nord des reliefs de Bujumbura – composition colorée ACP432 de SPOT 4

- **Quartzites de Rugazi**

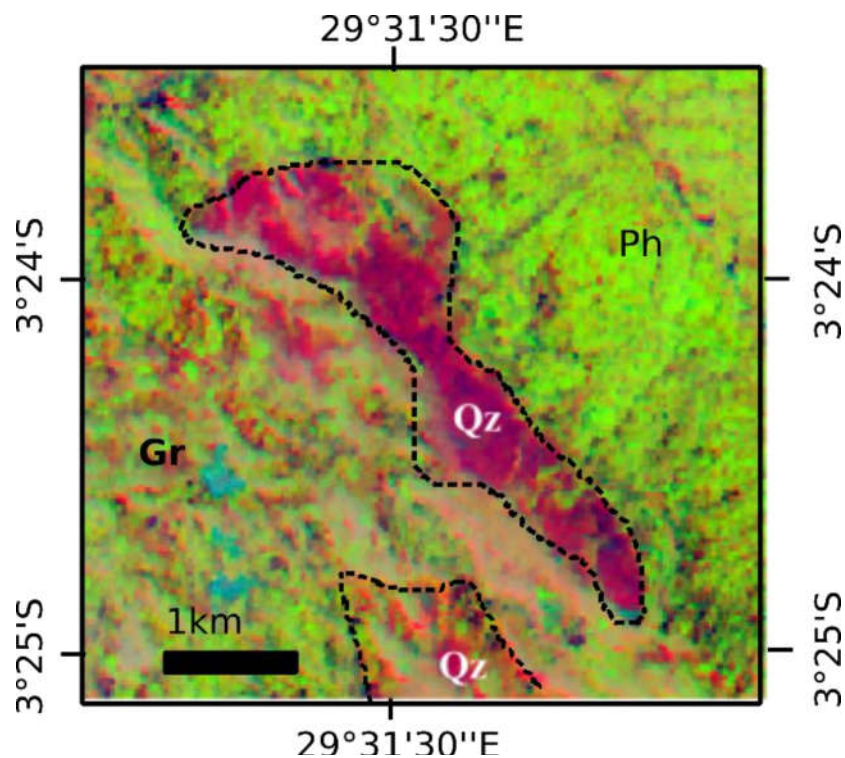
Les quartzites de Rugazi affleurent surtout dans la partie nord du secteur d'étude. Leur mise en évidence a été faite par des traitements spectraux tels que l'ACP721 de Landsat-7 ETM+ où ils affleurent en rouge sur une extension réduite (Figure III-23a,b). On les retrouve aussi en contact avec les roches gneissique de la formation de Mugere. Les quartzites sont aussi bien reconnaissable sur plusieurs compositions colorées comme celles issues des traitement ACP721 et ACP321 des données Landsat-7 ETM+.



Composition colorée a) ACP721 et b) ACP321 – Landsat-7 ETM+

Figure III-23: Reconnaissance des quartzites (Qz) de Rugazi entre les phyllites (Ph) et gneiss (Gn)

Plus au nord du secteur d'étude, affleure un quartzite massif toujours dans la formation de Rugazi. On les a séparé avec les phyllites micashisteuses retrouve à Isale par le traitement ACP432 de l'image SPOT4 (Figure III-24). Ces quartzites affeurent aussi à Buhonga sur le mont Mboza.



Mise en évidence des quartzites – traitement ACP 432 de l'image SPOT 4

Figure III-24: Reconnaissance des faciès quartzitiques à Karama

- **Dépôts sédimentaires**

Les dépôts sédimentaires affleurent à l'ouest de la zone d'étude. On distingue :

- Des dépôts de l'holocène; ces dépôts se trouvent dans la partie basse de la zone d'étude et sont constitués des dépôts fluvio-lacustres. En s'éloignant des reliefs de Bujumbura vers le lac Tanganyika, ces dépôts diminuent en taille depuis des conglomérats grossiers aux sables et argiles fins. Nous les avons mis en évidence par le traitement ACP 751 des images ETM et apparaissent en bleu bic sur la composition colorée (Figure III-25).

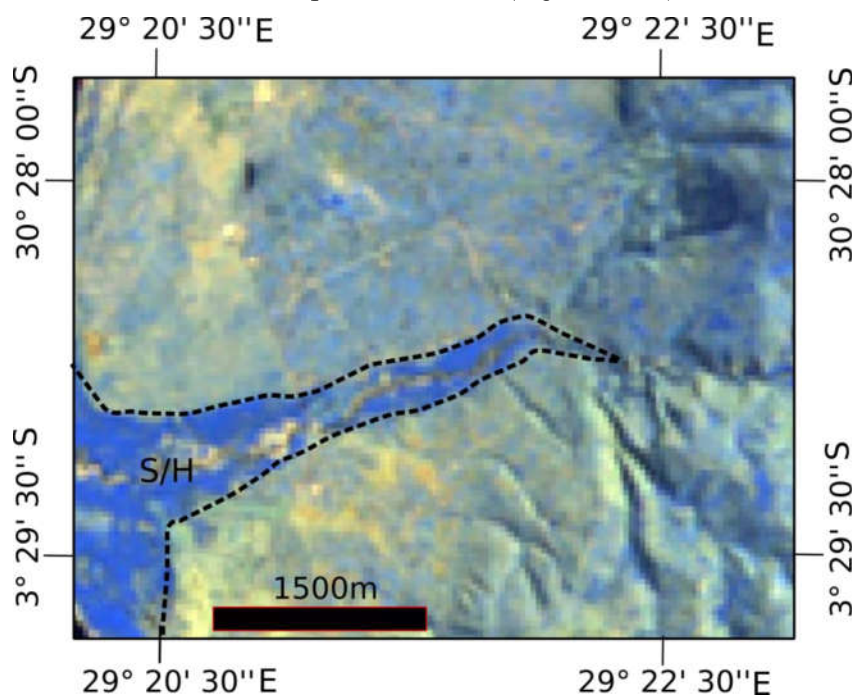
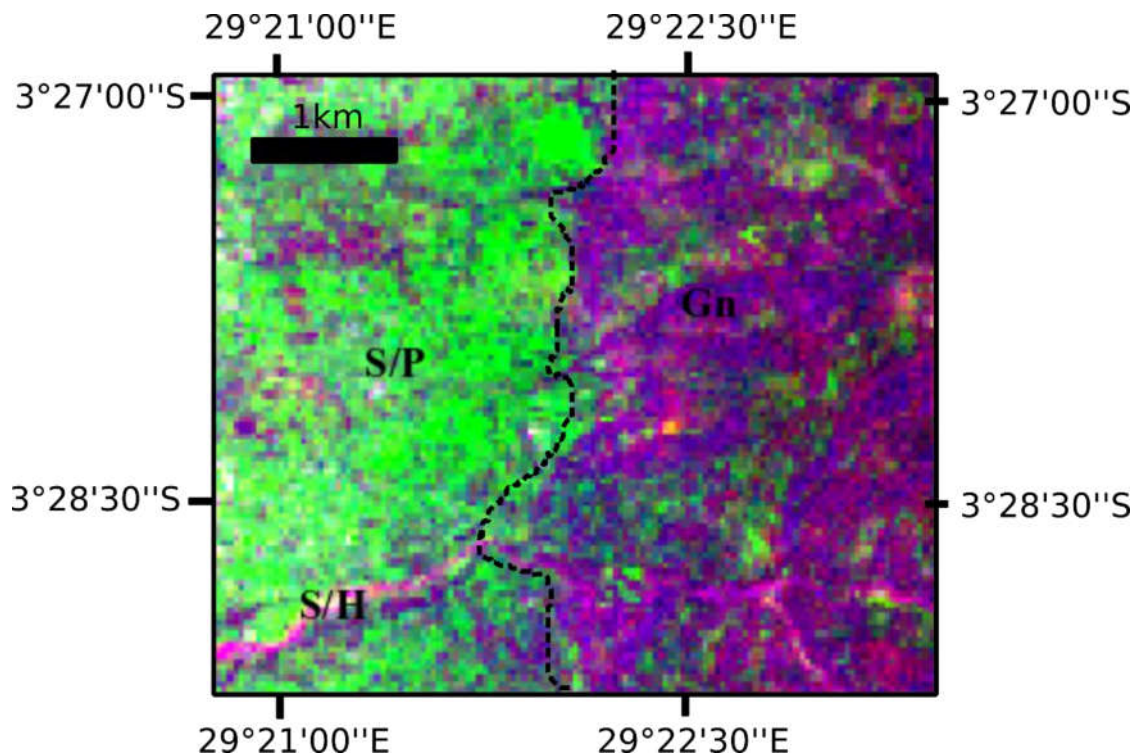


Figure III-25: Reconnaissance des dépôts sédimentaires cénozoïques par ACP751 d'ETM+

- Des dépôts du pléistocène : ils sont constitués par des colluvium provenant d'épandage au niveau de la zone de contact entre les reliefs et la plaine de l'Imbo. Ce sont des tout-venants graveleux et parfois avec des roches grossières. On les a cartographiés grâce au traitement "Decorellation stretch" ETM 271 appliqué sur les données Landsat ETM+ (Figure III-26). Sur cette image traitée avec le DS, les formations du Pléistocène moyen apparaissent vertes. Le traitement a permis aussi la mise en évidence des gneiss qui apparaissent avec une couleur violette. Dans le lit de la rivière, une signature de sédiments récents (blanc) est observable. Il s'agit probablement d'un mélange graveleux qui sont déposés lors des périodes des crues.



Cartographie des dépôts sédimentaires pléistocène (S/P), holocène (S/H) en contact avec les gneiss (Gn) à l'ouest du secteur d'étude – traitement par Decorellation Strech ETM271

Figure III-26: Reconnaissance des dépôts sédimentaires

- **Complexe de la Mugere**

Consistues essentiellement des gneiss massives avec des niveaux de quartzites (Figure III-27). L'ensemble étant injecté en concordance avec des granites gneissiques. Les gneiss ont des teintes bleues claires à foncées, les quartzites sont rouges et les granites sont rosâtres sur la composition coloré ETM742 après traitement Tasselet Cap (Figure III-27).

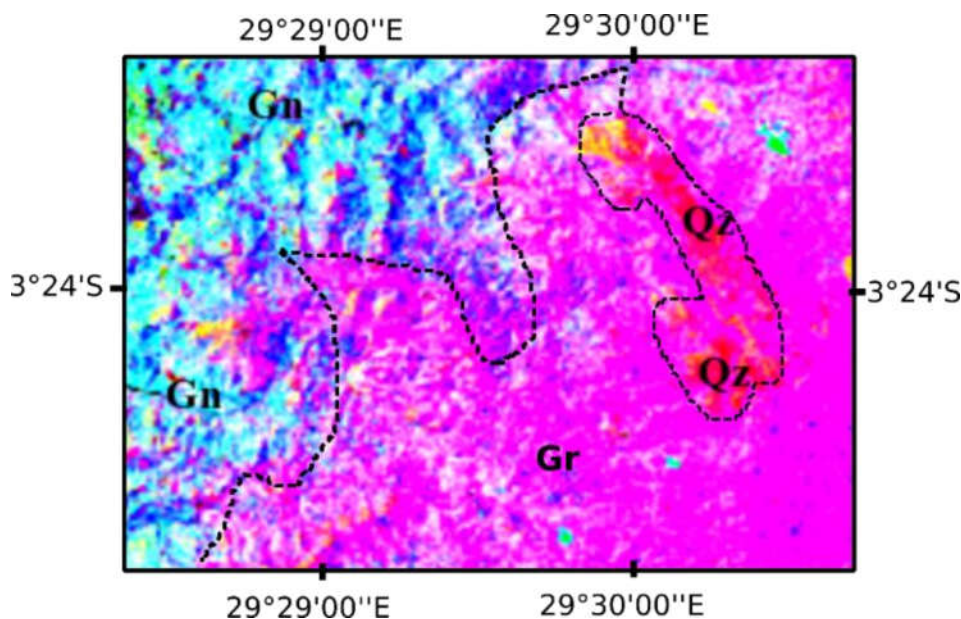


Figure III-27: Reconnaissance des gneiss (Gn) et des quartzites (Qz) – traitement Tasselet Cap d'ETM 742

Le granite massif situé à l'ouest de la zone d'étude se distingue aisément de son encaissant parfois phylliteux, micaschisteux ou quartzitique par le traitement ACP de composition colorée ETM432 avec des couleurs roses violacées (Figure III-28). Sur du granite, des couleurs bleu clair et rouges indiquent les signatures des restes après érosion de l'encaissant (phyllites et des quartzites) qui recouvraient le granite.

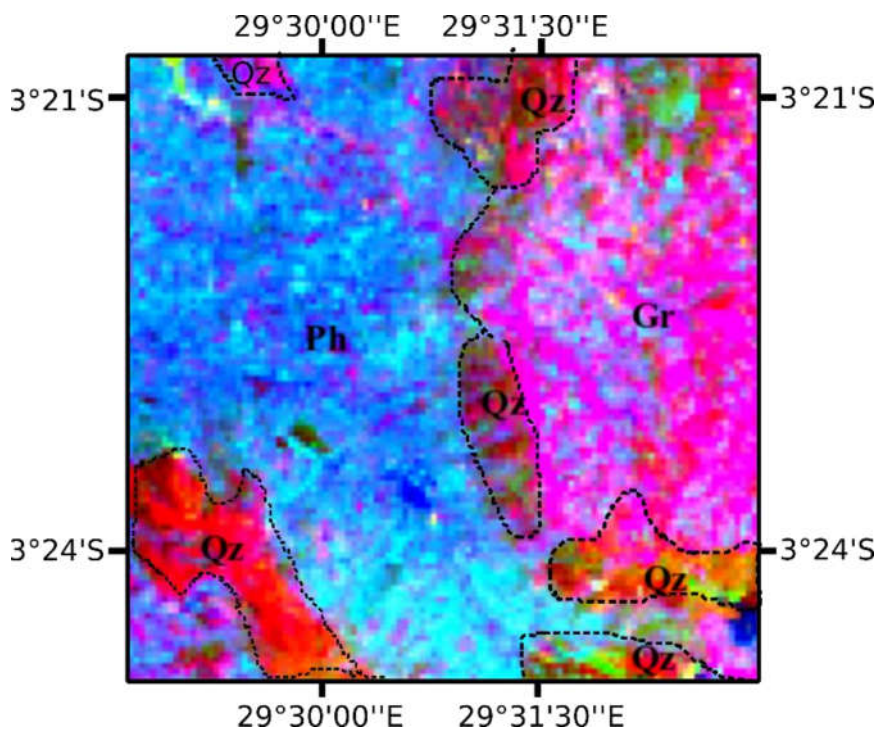


Figure III-28: Distribution du granite, phyllite/micashiste, quartzites au nord-est de la zone d'étude – traitement ACP342 d'ETM+

• Carte des faciès lithologiques des reliefs de Bujumbura

Les résultats de l'analyse spectrale suivie d'une photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO) sur l'ensemble des données Landsat-7 ETM+ et SPOT 4 couvrant les reliefs de Bujumbura, nous ont permis de dresser un document cartographique comportant plusieurs faciès lithologiques (Figure III-29). La nomination des différentes faciès a été réalisée sur base de la carte géologique au 1/100000^{ème} mis à jour par Laghmouch et al. (2018) et des travaux de terrain et comporte sept unités lithologiques (Figure III-29). Toutes les lithologies déjà existantes aux anciennes sources ont été retrouvées sur la nouvelle carte issue de la télédétection et des améliorations de cartographie sont observables, par exemple dans les formations sédimentaires du Pléistocène et de l'Holocène.

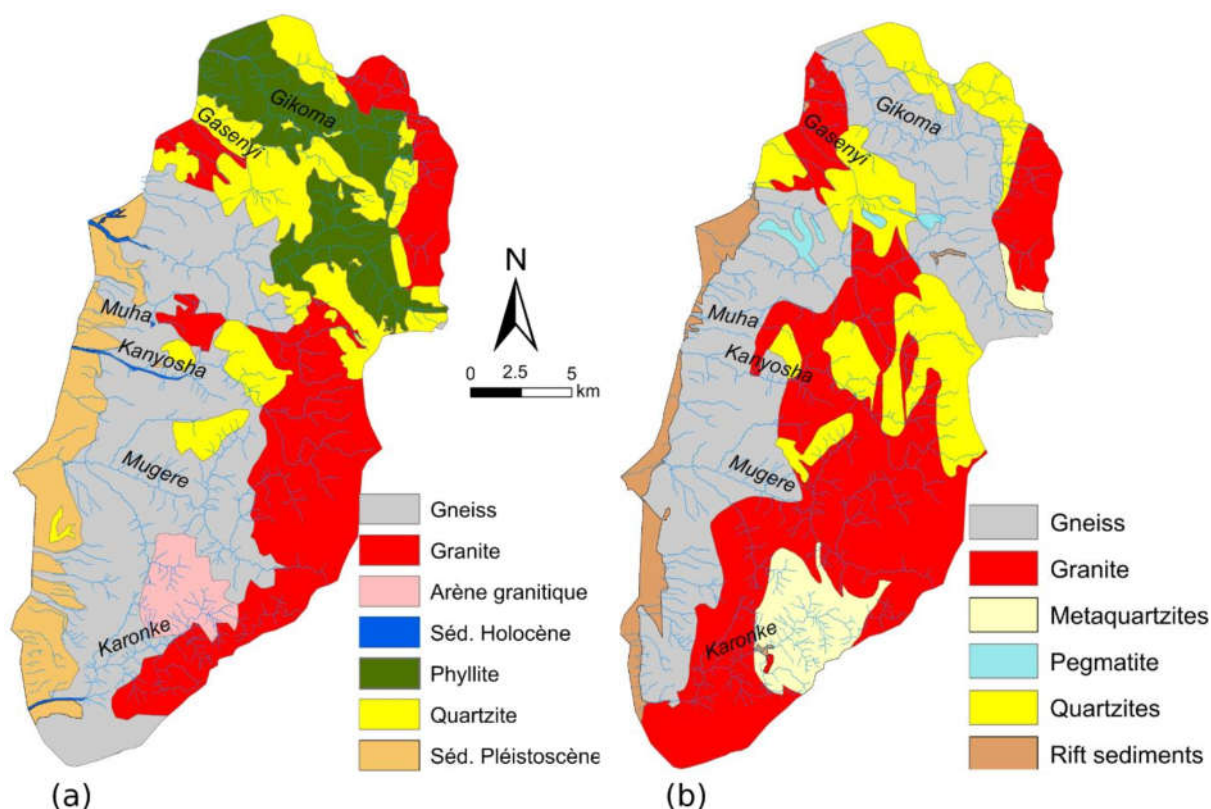


Figure III-29: Carte des faciès issue de (a) la télédétection optique et (b) celle digitalisée à partir de Laghmouch et al. (2018) des reliefs de Bujumbura. Bien qu'il existe des similarités au niveau des lithologies, la carte de faciès télé-analytique est plus précise. Les sédiments récents manquent sur la carte lithologique. Les gneiss existent au nord et notre analyse spectrale a montré que c'est une lithologie de signature différente probablement des phyllites mais d'autres sources indiquent que ce sont des métapélites, ce qui pourraient justifier l'absence des MTs par rapport aux autres roches métamorphiques moins consolidées (gneiss par ex.).

• Validation de la carte de faciès

La validation de la carte faciès a été faite par des visites sur terrain et par photo-interprétation des imageries satellitaires et aériennes de haute résolution et des cartes géologiques existantes. Ainsi, sept couches lithologiques ont été cartographiées sur l'ensemble des reliefs de Bujumbura. Les quartzites affleurent par exemple dans la carrière de Karama comme le montre la photo de la Figure III-30. Sur les

ortho-photos, nous avons pu distinguer les quartzites des autres unités environnantes en analysant le couvert végétal. Ainsi, sur un sol quartzitique, le couvert végétal n'est pas assez bien développé. De plus, grâce à leur faible altération, les quartzites restent en relief par rapport au paysage avoisinant (Figure III-31).



Figure III-30: Carrière quartzitique de Karama, nord de Bujumbura



Figure III-31: Affleurement des quartzites en relief et des phyllites en bas sur la colline Sagara, limite exacte

Par combinaison de ces données de terrain et les documents cartographiques existant à la carte des faciès, sept unités lithologiques existent à l'échelle des reliefs de Bujumbura (Tableau III-3).

Tableau III-2: Les unités lithologiques issues des traitements spectraux des images satellitaires.

Faciès	Traitement	Couleur
Phyllite/micaschiste	ACP – ETM 342	Bleu
Les gneiss	DS – ETM 271	Bleu-rose
	TC – ETM 742	Rose
Les quartzites	ACP-ETM 721	Rouge foncé
	ACP – ETM 321	Rouge
	ACP – ETM432	Rouge
	ACP – SPOT 432	Rouge-violet
	TC – ETM 742	Rouge
	ACP – ETM 342	Rouge
	ACP – ETM 243	Bleu
Les sédiments du pléistocène	DS – ETM 271	Vert
Les sédiments du cénozoïque	DS – ETM 271	Rose
	ACP – ETM 751	Bleu
Granite	TC – ETM 742	Rose
	ACP – SPOT 432	Rouge-vert
	ACP – ETM 342	Rose
	ACP – ETM 721	Vert
	ACP – ETM 742	Bleu-vert

La superposition des mouvements de terrain recensés sur la carte lithologique des reliefs de Bujumbura (Figure III-32) montre que les lithologies les plus susceptibles à l'occurrence des mouvements de masse en termes de surface affectées sont (Tableau III-3) :

- Les sédiments de l'Holocène avec plus de 32% ;
- Les gneiss avec 30% ;
- Les sédiments du Pléistocène avec de 22%
- Les quartzites avec 8% ;
- Les granites avec 3% ;
- Les phyllites/micaschistes avec environ 3%.
- Les pointements de granite avec 2%

Tableau III-3: Statistiques mouvements de terrain – lithologie.

Lithologie	Nombre de MT	Surf des MTs_m²	Surf faciès_m²	MT/litho
Gneiss	393	66776723	1692494	30%
Granite	51	5267640	1176481	3%
Pointement de granite	14	445137	172048	2%
Phyllite/micaschiste	26	2697799	626484	3%
Quartzites	62	7532106	732342	8%
Sédim_Pléist.	284	13787007	491566	22%
Sédim_Cénoz.	48	877455	21366	32%
Total	878	97383869	4912781	100%

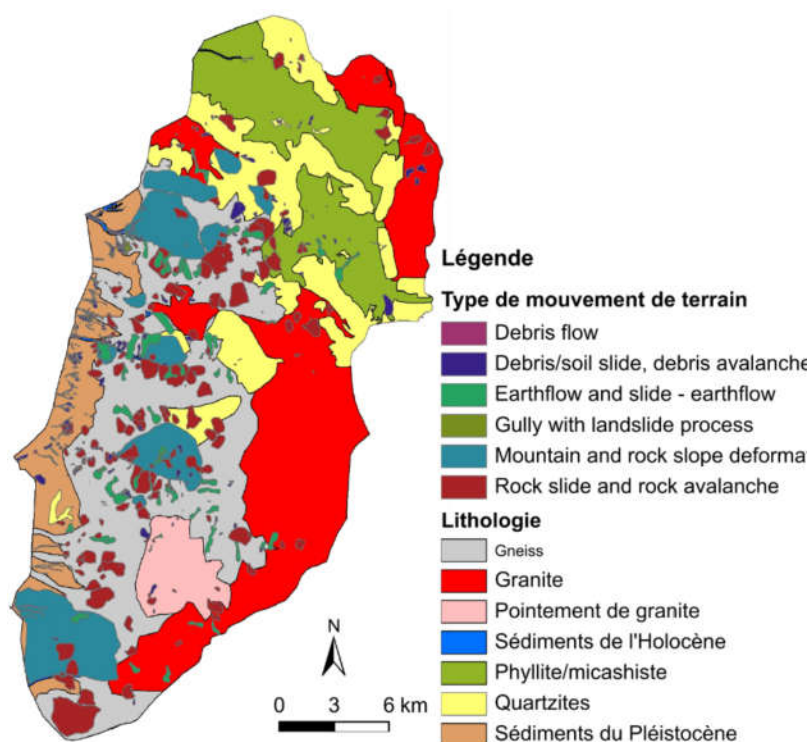


Figure III-32: Superposition des mouvements de terrain sur la carte lithologique issue de la PIAO

En termes de nombre d'occurrence par lithologie, les terrains les plus susceptibles aux mouvements de terrain sont (Figure III-33):

- Les gneiss avec 393 occurrences soient 45% et ;
- Les sédiments du Pléistocène avec 284 occurrences soient 32%.

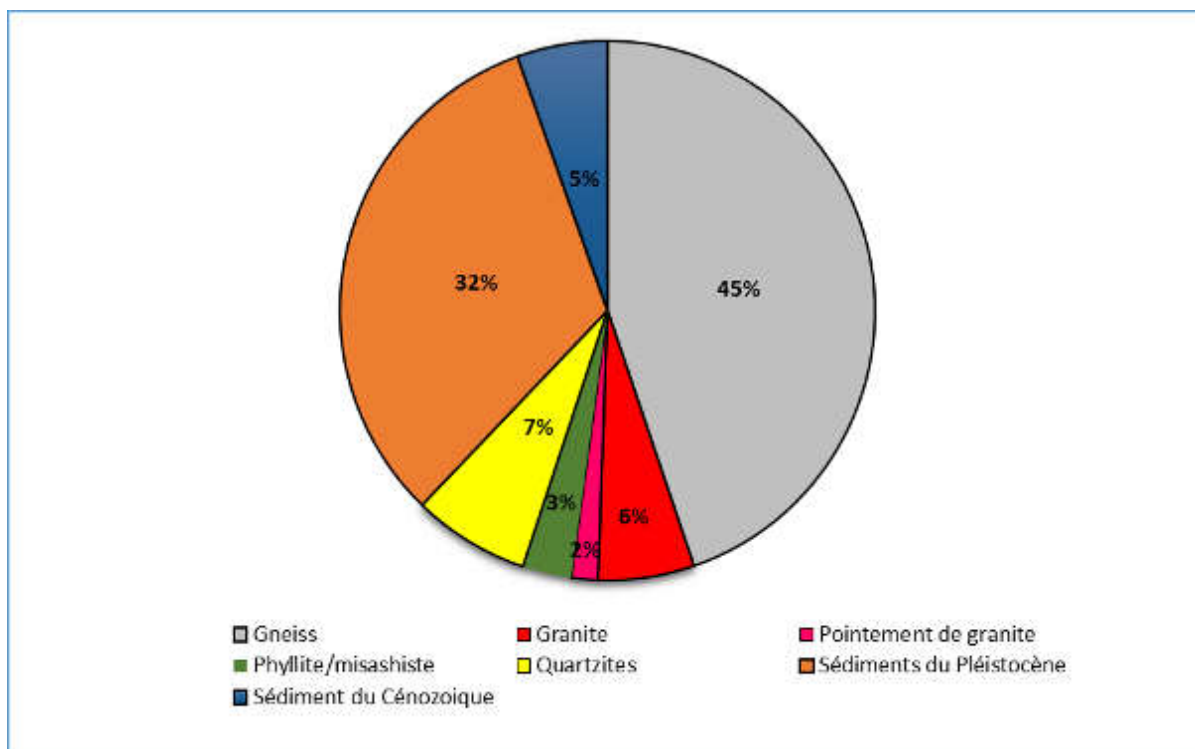


Figure III-33: Pourcentage de mouvements de terrain par rapport aux lithologiques

III.6. ANALYSE DES LINEAMENTS STRUCTURAUX

Dans cette partie d'étude, nous avons utilisé une cartographie "multicapteur", en exploitant les données HR VIR de SPOT 4 et ETM+ de Landsat-7 dans le but d'extraire l'information géographique, notamment la fracturation, non représentée dans les documents cartographiques antérieurs. En effet, on constate que sur les cartes géologiques au 1/50000^{ème} et 1/100000^{ème} disponibles, les principales failles correspondaient aux contacts des quelques unités structurales.

Les missions de terrain que nous avons réalisées ont montré que les affleurements accessibles sont fracturés aussi bien à l'échelle microtectonique qu'à l'échelle pluri-métrique (cf. par exemple la Figure III-34).



Figure III-34: Roche quartzitique fracturée à l'échelle microtectonique, nord de Bujumbura

L'analyse et le traitement des données satellitaires optiques pour l'interprétation de la fracturation ont été effectués selon les étapes suivantes :

- Extraction des linéaments à partir de l'application gradient linéaires sur les images ;
- Complément par photo-interprétation ;
- Confrontation avec les failles de la carte géologique et la réalité du terrain

III.6.1. Analyse linéamentaire des données satellitaires optiques

Dans le but d'extraire l'information structurale à partir des données satellitaires, nous avons procédé à des filtrages multidirectionnels et chaque traitement spatial a donné des linéaments correspondant soit à des fractures ou autres objets linéaires. Nous avons essayé plusieurs tests de filtrages spatiaux sur les canaux ETM+ de Landsat-7 et SPOT 4 (Figure III-35). Ce sont des filtres directionnels de convolution réalisés sous Erdas Imagine suivant les matrices 33 H, 33 V, 55 H, 55 V, 77 V, 77 H, 33 Sobel 1, 33 Sobel 2, 55 Sobel 1, 55 Sobel 2, 77 Sobel 1, 77 Sobel 2. Les traitements et filtrages effectués ont eu pour effet d'accentuer et de faciliter la détection des discontinuités-images, permettant ainsi leur levé par simple observation visuelle. Seuls les linéaments d'origine structurale intéressent cette étude. Ainsi, des objets correspondant à des linéarités d'origine anthropique telles que les routes, pistes, ligne de haute tension, layons de délimitation de forêt et surfaces cultivées... ont été éliminés de l'ensemble de l'inventaire des linéaments du secteur d'étude.

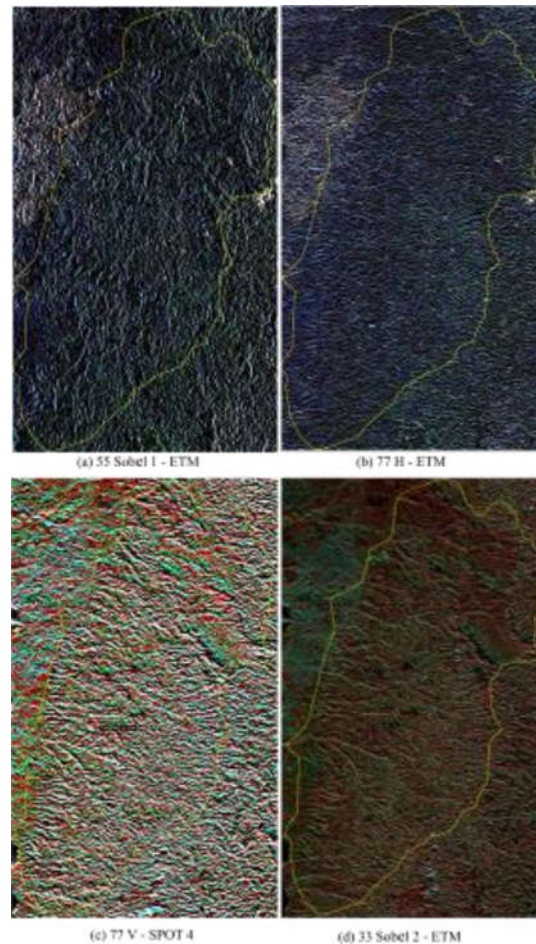


Figure III-35: Exemples de quelques filtres directionnels réalisés avec les images Landsat-7 ETM+ et Spot 4

La cartographie des discontinuités a permis de mettre en place deux cartes de linéaments structuraux générés respectivement sous traitement spatial des données HR VIR de SPOT 4 et Landsat-7 ETM+ respectivement (Figure III-36&37). Pour les deux catégories, le traitement Sobel parvient à mieux rehausser les discontinuités-images par rapport aux autres filtres de convolution.

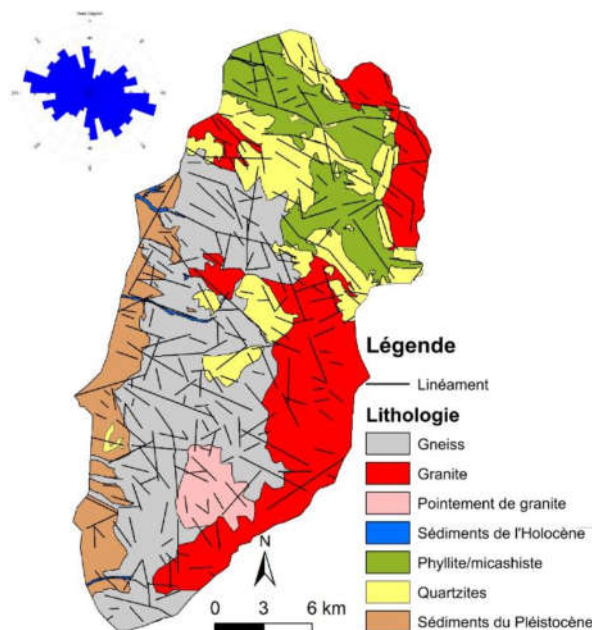


Figure III-36: Cartographie des linéaments à l'aide des images satellitaires SPOT 4.

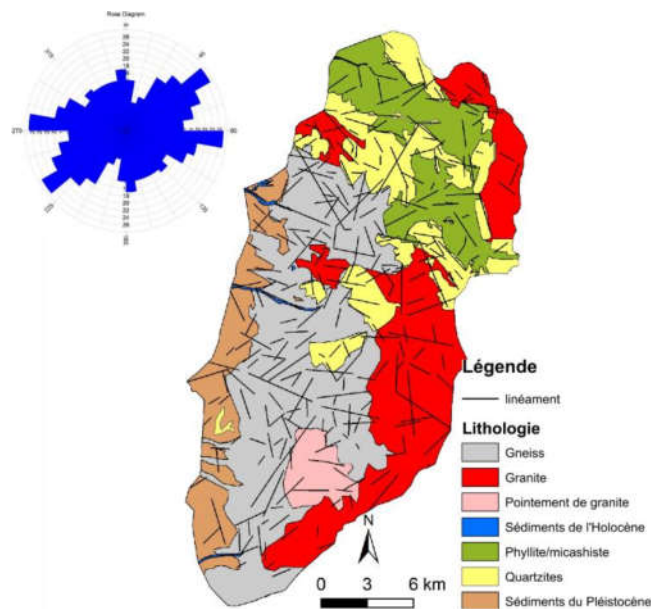


Figure III-37: Cartographie des linéaments à l'aide des images satellitaires landsat-7 ETM+

Par combinaison des deux sources de données et après élimination de toutes les linéarités d'origine anthropique, la confrontation du résultat avec la vérité de terrain et l'analyse des archives, nous avons abouti à la carte linéamentaire synthétisée à la Figure III-38. L'élimination des structures linéaires tels les routes, les lignes électriques a été faite en superposant les linéaments à l'ortho-photos très haute résolution (1m).

L'analyse géostatistique des linéaments a permis de déceler deux directions principales dans les reliefs de Bujumbura à savoir:

- Les NW – SE. Ils affectent essentiellement le terrain méta-sédimentaire essentiellement les quartzites, les phyllites et les micaschistes. Les linéaments montrent l'allure générale parallèle aux structures et seraient liés à la tectonique responsable de leur mise en place.
- Les direction Nord – Sud sont des failles de tendance régionale affectant à la fois les roches métamorphiques, sédimentaires et plutoniques.

Les filtres directionnels réalisés ont permis cartographier des failles dont la majorité se retrouve sur la carte géologique du Burundi établie par IGN, 1989.

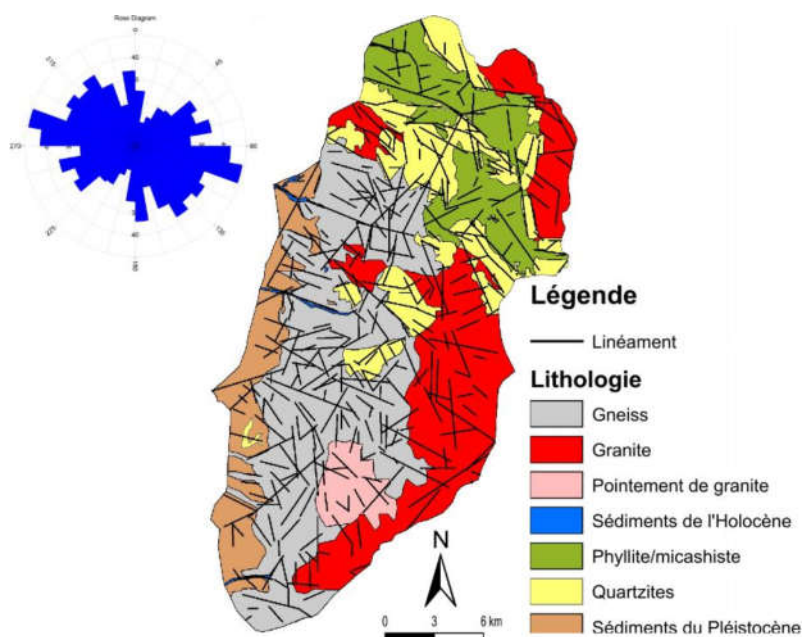


Figure III-38: Carte des linéaments synthétique issue de l'analyse des données satellitaires. La rosace montre une direction générale NW-SE qui est la direction des structures du nord de Tanganyika côté Burundi. Les fracturations de direction NNW-SSE seraient liés au rifting.

III.6.2. Linéaments de direction N00

Les linéaments de direction presque nord-sud se répartissent sur l'ensemble des reliefs de Bujumbura. Ce sont des fractures qui seraient liées à l'effondrement du fossé du Lac Tanganyika. Vu l'extension de ces failles sur une majeure partie de la zone d'étude, nous pourrions les qualifier de régionale. Leur direction nord-sud à l'échelle régionale nous permet de les corréler aux failles normales du rift est africain (Delvaux et al., 2012).

III.6.3. Linéaments de direction N135

Les linéaments de directions NW-SE dominent notre zone d'étude comme le montre la fracturation structurale des reliefs de Bujumbura et le diagramme de rosace directionnelle correspondant (Figure III-38). La plupart de ces failles suit les directions des structures géologiques de la zone d'étude.

III.7. EXTRACTION DE L'OCCUPATION / COUVERTURE DU SOL

III.7.1. Introduction

Les reliefs de Bujumbura ne sont pas très diversifiées en termes d'occupation du sol. Du côté de la ville de Bujumbura, les reliefs sont occupées par des agglomérations. En évoluant vers l'est, nous avons la présence des champs de cultures vivrières sur les pentes. A l'intérieur des contreforts, le bâti est marqué par des habitants dispersés. Les sols nus se trouvent surtout vers l'ouest dans les nouveaux quartiers viabilisés pour l'extension de la ville de Bujumbura. On les retrouve également en petit nombre dans les zones agricoles non exploité ou défriché. La Figure III-39 est un exemple d'occupation du sol à l'intérieur des reliefs de Bujumbura.



Figure III-39: Photo montrant le niveau de la végétation faible à moyenne et des sols nus, sud-est Bujumbura, bassin versant de la Mugere (janvier, 2019)

La région visée par notre étude est dominée par des zones de cultures. Le couvert végétal est constitué par des cultures et des arbres comme les des palmiers à l'huile et fruitiers. La région est dépourvue de la végétation naturelle mais plus à l'est certains lambeaux sont reboisés d'eucalyptus.

L'intérêt de l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans la cartographie de l'occupation du sol, réside par le fait que l'on peut suivre facilement et rapidement l'évolution de l'occupation du sol dans l'espace et dans le temps en utilisant des données multi-dates. Dans notre secteur d'étude, ce suivi reste complexe car l'utilisation des terres agricoles est très dynamique en raison de de la diversité des cultures, leur rotation ainsi que leur association. A cela s'ajoute des précipitations intenses qui favorisent la croissance rapide de la végétation dans les région à climat tropical.

III.7.2. Méthodologie

Dans cette partie, nous traiterons du détail de la classification que nous avons appliqué aux données Landsat-7 ETM+ couvrant les reliefs de Bujumbura et nous allons effectuer une comparaison avec

quelques données existantes pour décider celles qui seront exploitées pour des analyses ultérieures. Pour ce faire, nous avons procédé aux étapes suivantes :

1. Une correction géométrique, a été faite pour que l'image puisse être superposée correctement avec d'autres données déjà corrigées suivant le référentiel du Burundi comme les ortho-photos.
2. Une amélioration du contraste vise à améliorer la présentation visuelle de l'image par étalement des valeurs de l'histogramme.
3. Une amélioration de la résolution des images multispectrales (de 30m à 15m) par le rehaussement à l'aide de la bande panchromatique (bande 8 d'ETM+).
4. Une classification de l'image rehaussée radiométriquement. La règle de la segmentation de l'espace spectrale utilisée lors de la classification est la "Segmentation par parallélépipèdes" suivant le maximum de vraisemblance (Figure III-40).

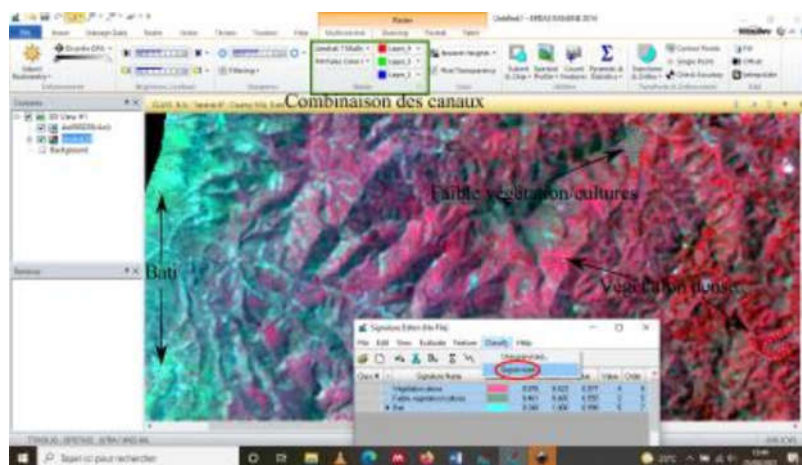


Figure III-40: Application de la fonction discriminante par parallélépipèdes selon le max de vraisemblance, image ETM 432 (Erdas Imagine)

La carte d'occupation du sol obtenue par classification multispectrale aura une résolution spatiale de 15m. Cette carte sera confrontée avec d'autres sources très utilisées de résolution différentes (p.ex., Chen et al. (2015), 30m et ESA WorldCover (2020), 10m). Sur base de la de la réalité du terrain, nous retiendrons la carte d'occupation du sol la plus fiable qui sera utilisée dans nos analyses ultérieures.

III.7.3. Classification multi spectrale supervisée des données Landsat-7 ETM+

La carte d'occupation du sol a été réalisée sur base de l'analyse de la signature spectrale des objets de surface à l'aide les images Landstat-7 ETM+ sous Erdas Imagine 2014. En effet, à chaque objet de la terre, il correspond une signature spectrale qui lui est propre. Le traitement spectral dans une zone végétalisée comme les reliefs de Bujumbura et où la couverture végétale varie très rapidement selon la saison n'est pas aisée et n'offre pas de bons résultats d'occupation du sol. En effet, un sol nu en été sur une image peut se retrouver couvert sur une autre image quelques mois après pendant la saison pluvieuse.

Pour extraire l'occupation/la couverture du sol, il existe deux modes de traitement supervisé et non supervisé. Pour notre cas, nous avons préféré d'utiliser une classification supervisée ou dirigée. La classification par voie dirigée suppose que l'on connaisse la localisation de certaines zones d'entraînement sur l'image. Dans notre cas, il s'agit de l'occupation du sol et sa distribution spatiale dans les reliefs de Bujumbura. Les sites d'entraînement ont été pris sur les images satellitaires et photos aériennes haute résolution comme les Pléiades (0.5 m pour la bande panchromatique) et les Ortho-photos (0.5 m). Plusieurs sites ont été pris sur toute la zone d'étude pour établir des signatures spectrales.

Dans l'entièreté, la réponse spectrale a fait sortir l'existence de quatre classes (Figure III-41a)

- Le bâti réparti sur 7,3 km² soit 1.5%
- Le sol nu réparti sur 49,1 km² soit 10%
- Les champs de cultures répartis sur 298 km² soit 61%
- La végétation répartie sur 137 km² soit 30%

Pour mieux nuancer la végétation dense des autres objets, nous avons effectué une combinaison colorée ETM 432 et de là, une distinction de la végétation, des sols nus et du bâti est nette. Nous avons extrait facilement le milieu urbain et la zone végétalisée avec la composition colorée ETM 432. En fin, le reste a été classé comme sol agricole ou basse végétation. La faible végétation est formée par des cultures vivrières.

Le résultat de notre classification supervisée se retrouve à la Figure III-41a. La zone complètement occupée par le bâti se trouve dans la partie urbaine de la mairie de Bujumbura et ses environs c'est-à-dire à la bordure ouest de la zone d'étude. Les terrains nus dans notre zone d'étude sont des parties viabilisées pour l'extension de la ville de Bujumbura comme le nouveau quartier Kizingwe au sud de Bujumbura. La zone à faible végétation (cultures) se trouve sur une grande étendue du secteur d'étude et est dominée par des cultures vivrières et des savanes. La forêt existe plus l'est mais souvent isolée. Les cartes d'occupation du sol des figures III-41b et c sont extraits des produits globaux qui existent en libre accès (Chen et al., 2015; ESE WorldCover, 2020). L'occupation du sol fournit par Globeland30 a une résolution faible (30m) par rapport à celle de notre classification, cette donnée sera exclue dans nos analyses. Par contre, les données issues de ESE WorldCover (2020) sont de meilleure résolution (10m) comparativement à celle de notre classification multispectrale supervisée (15m). Le seul problème est que certaines classes sont surestimées. Par exemple, on constate qu'une partie du nord-ouest est complètement couvert par la végétation, ce qui n'est pas le cas. Cela serait dû peut-être à la date de l'image source. En effet, pendant la saison pluvieuse, la végétation pousse plus rapidement et disparaît en saison sèche. Notre image multispectrale utilisée pour la classification de l'occupation du sol étant pris au mois de septembre (fin de la saison sèche) représenterait plus ou moins la vérité du terrain pour la classe végétation mais sous-estime la classe bâtie. Les deux sources seront exploitées pour nos futures analyses car elles sont complémentaires.

III.7.4. Evaluation de la précision de la classification

L'évaluation de la précision est une étape importante dans la classification. C'est elle qui détermine la valeur et la fiabilité de l'information obtenue. Il existe diverses approches de validation; cependant, notre choix a porté sur la matrice de contingence dont les résultats sont illustrés dans le Tableau III-4. Nous avons choisi de manière aléatoires 106 pixels distribués sur toute l'étendue du secteur d'étude. Après leur distribution dans les différentes classes de la carte d'occupation du sol obtenu, nous avons vérifié leur véracité sur les images Google Earth et les ortho-photos.

Les éléments de la diagonale de cette matrice dénombrent les pixels correctement classifiés. Les éléments de la première ligne indiquent les erreurs d'omission associées au système de traitement d'image aux pixels non classés (ce qui n'existe pas puisque tous les pixels ont été classés) tandis que les éléments en dehors de la diagonale dénombrent les erreurs de commission.

La mesure de la précision d'une classe particulière est donnée par les éléments de la diagonale. L'exactitude de l'ensemble de la classification s'établit de la même façon, soit la somme des éléments de la diagonale sur la somme totale des éléments. Dans notre cas la classification est vraie à :

Nombre de pixels bien classés (89) / nombre total des pixels (106) soit environ **84 %**.

Tableau III-4: Matrice de contingence des classes d'occupation du sol issues de la segmentation des données images Landsat-7 ETM+.

Données classifiées	Bâti	Sol nu	Cultures	Végétation	Total
Bâti	24	3	0	0	27
Sol nu	0	17	0	0	17
Cultures	1	2	21	2	26
Végétation	0	2	7	27	36
Total	25	24	28	29	106

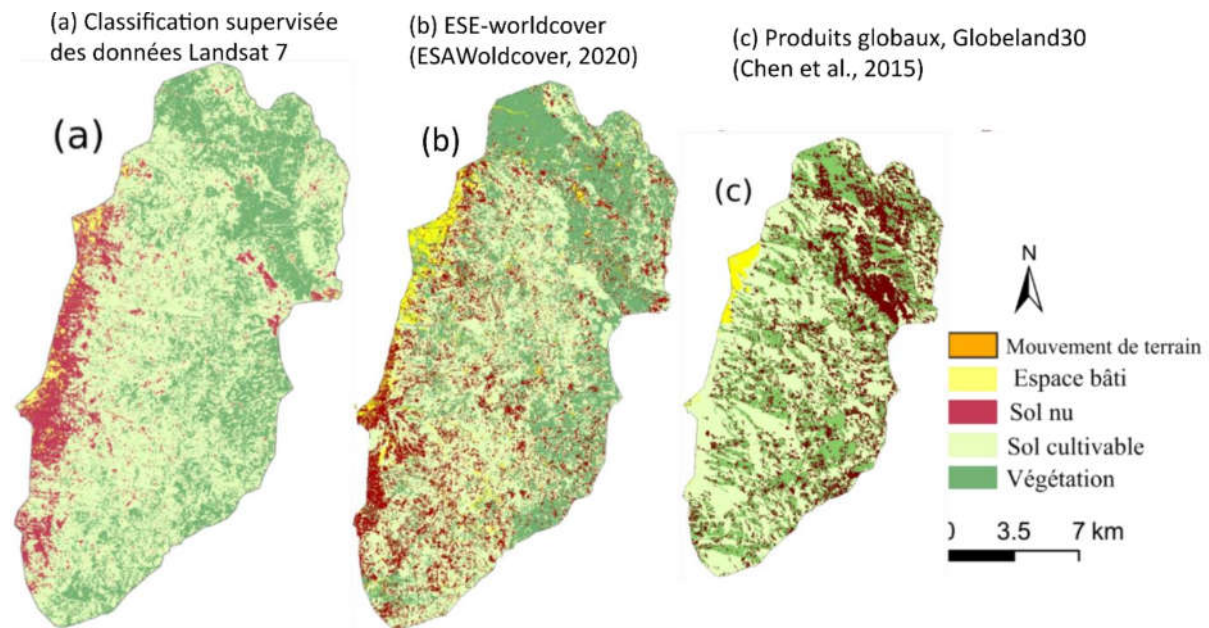


Figure III-41: Les cartes d'occupation du sol issues (a) de la classification supervisée des données Landsat 7 ETM+, (b) des produits globaux, Globeland30 (Chen et al., 2015) et (c) ESE-worldcover (ESA Worldcover, 2020). Le classe des sols nus comprend aussi les prairies c-à-d la végétation ne dépassent pas 10% (Kubwimana et al., soumis 2022)

La superposition des mouvements de terrain aux résultats de cette classification utilisée comme un facteur déterminant dans le modèle de cartographie des MTs (Figure III-42) montre que :

- Les classes les plus atteintes par les phénomènes de mouvements de masses sont les terres arables avec 683 cas, les sols nus avec 353 cas, les régions végétalisées avec 184 cas et la zone urbanisée 62 cas.
- Les classes les plus affectées par les mouvements de terrain en termes de superficie sont essentiellement les terrains nus et les terres arables 32% pour chaque classe ainsi que les zones végétalisée 20% et en fin les terrains bâtis 15%.

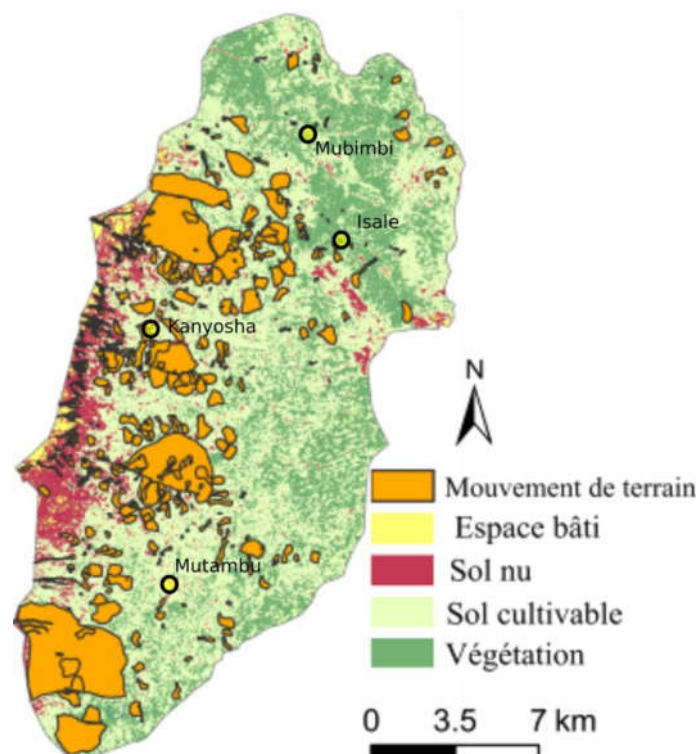


Figure III-42: Superposition de mouvements de terrain sur les résultats de la classification supervisée des données Landsat 7 ETM+

III.8. CONCLUSION DU CHAPITRE III

Dans un contexte où les versants sont montagneux avec un manque des voies d'accès, l'appréhension et la spatialisation des mouvements de terrain grâce à la télédétection permettent d'ajouter de nouvelles pistes au suivi et à la gestion de l'aléa. Pour y arriver l'étude des MTs nécessite plusieurs méthodes dont l'usage des techniques d'interprétation géomorphologique basées sur l'utilisation des images satellitaires et/ou photos aériennes. Elles offrent des avantages par rapport aux techniques in situ mais présentent également des limites, pour certaines indépassables.

L'ensemble des traitements effectués sur les données satellitaires optiques (Landsat-7 ETM+ et SPOT 4) nous a permis d'extraire trois facteurs conditionnant les mouvements de terrain. Les facteurs "lithologie et occupation du sol" ont été obtenus respectivement par photo-interprétation et par classification multispectrale supervisée. Concernant la fracturation, l'extraction de l'information a été réalisée par interprétation de données de télédétection et élaboration d'une carte télé-analytique.

L'interprétation des images reste cependant subjective et parfois incertaine. Il faut donc envisager des visites de validation sur terrain des observations sur les images satellitaires ou aériennes. Le travail de terrain permettra en outre de mener des enquêtes auprès de la population locale pour des détails plus approfondis, ce qui n'est pas possible par l'exploitation des images satellitaires ou des photos aériennes.

**CHAPITRE IV. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN
(MTs) DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA**

IV. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA

IV.1. Introduction

La campagne de prospection de terrain a été effectuée depuis 2013 dans le cadre du projet de recherche des géo-risques dans la région du rift Nord Tanganyika (RA_S1_RGL_GEORISK). Elle a été complétée par des visites de terrain menées en été 2016 au cours de notre recherche de master en Géologie Océanologie, Eau et SIG. Depuis 2018, des nouvelles investigations intensives de terrain ont été menées sur la totalité de la zone d'étude dans le projet de thèse. Le but était de localiser cartographier, décrire et faire un inventaire exhaustif de tous les mouvements de terrain actuels et anciens existant dans notre secteur d'étude afin de fournir une base de données bien complète des MTs et des processus d'érosion associés.

IV.2. Présentation générale de l'inventaire des MTs et érosions associées

Le phénomène de MTs existe au Burundi et la majorité se trouve concentré dans les reliefs de Mirwa, partie en escarpement du rift est africain. Pour mener cette étude, des recherches antérieures ont servi de base pour la localisation et la description des mouvements de masse. Ainsi par exemple, Moeyersons et Trefois (2010) ont cartographié des grands MTs de type reptation dans notre secteur d'étude. De surcroît, l'étude de Moeyersons et Trefois (2010) montre qu'au sud de la ville de Bujumbura, des glissements suivis par des coulées boueuses ont menacé le centre de santé Curgo le 8 janvier 2010. D'autre part, Nkunzimana (2012) montre que des mouvements de masse s'intensifient dans le bassin Nyabage localisé au centre ouest de la zone d'étude. D'autres chercheurs comme Nibigira et al. (2013) ont cartographié 243 MTs à l'ouest du Burundi avec 89 directement autour de Bujumbura.

Se basant sur les recherches précitées et interprétations des imageries satellitaires/photos aériennes, plusieurs mouvements de terrain correspondant à différents types ont été cartographiés et une base de données correspondante a été compilée (Tableau IV-1 et Figure IV-1). Cette base de données reprend plusieurs caractéristiques des MTs (type, profondeur, activité, taille, connexion au drainage/route, etc.) détaillé au chapitre V.

Dans ce chapitre nous montrerons quelques exemples des types inventoriés (Figure VI-1).

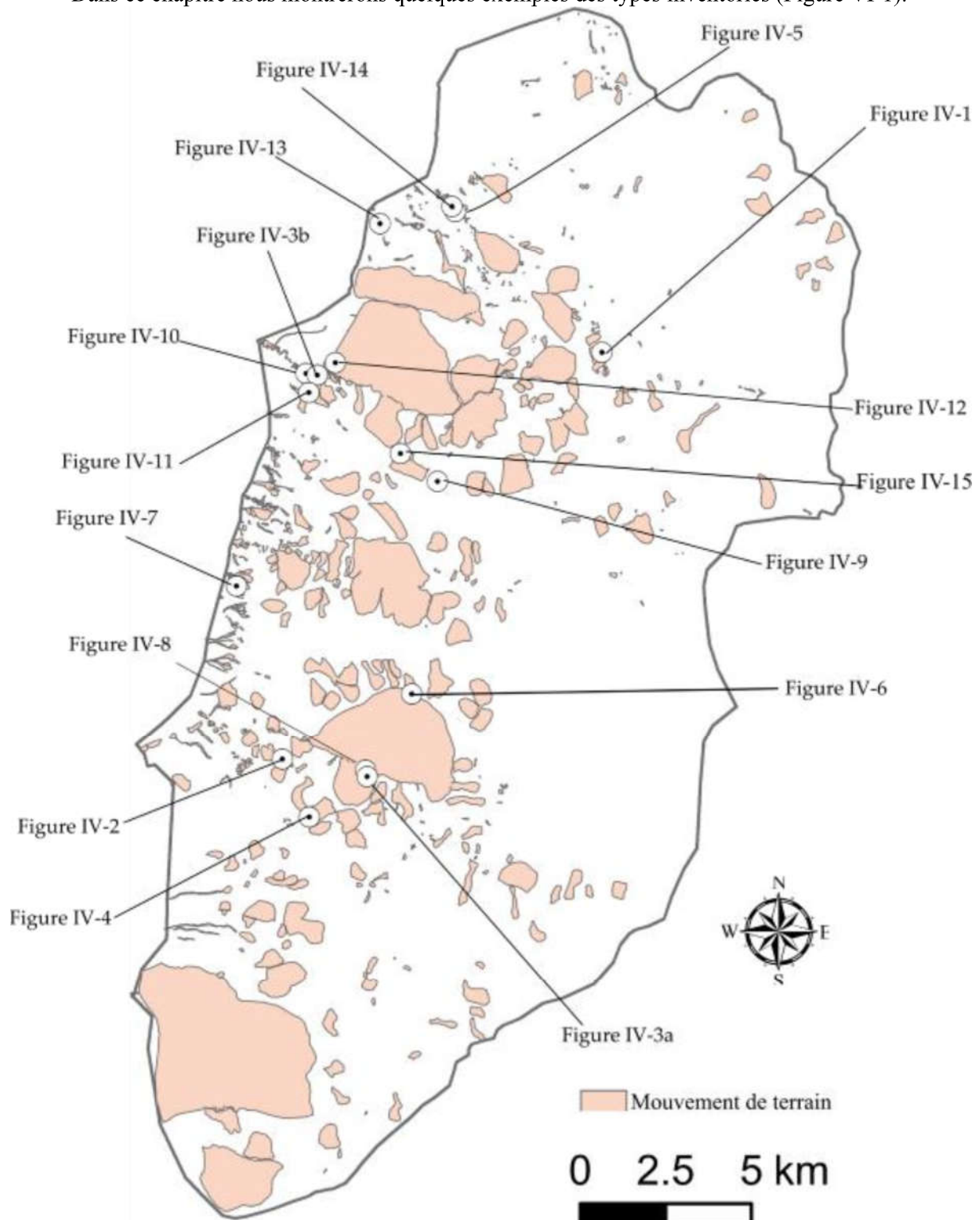
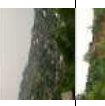
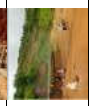


Figure IV-1: Localisation des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura

La distinction des typologies se base sur la forme de rupture ainsi que la nature des matériaux déclenchés. Notre paysage est vieux de plusieurs milliers d'années et par conséquent, les MTs ont évolué sur plusieurs phases. Il est alors difficile et même impossible de distinguer les différents types surtout pour les mouvements de terrain plus ancien. Ainsi, pour éviter toute ambiguïté, nous les regrouperons en six classes selon leur similarité géométrique suivant la classification la plus récente (Hungar et al., 2014).

Tableau IV-1: Caractérisation des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (inventaire complet cf. annexe 2)

ID	Longitud e_m	Latitude m	Processus	Localité	Activité	Profondeur	Age	Surface m²	Périmètre_m	Contact_hydr	Contact_rote	Matériel	Réactivation	Période	Facteur Déclencheur	Photo
27	763360	9615058	Glissement rotationnel	Gaza	Non actif	> 5m	Avant 1957	65106	1064	Connecté	Non connecté	Roche	-	Ancien	-	
60	763786	9619720	Ravine	Gihinga		> 5m	Avant 1957	47653	918	Connecté	Non connecté	Alluvion	-	Ancien	-	
77	763762	9614447	Glissement rotationnel	Gaza	Actif	> 5m	2010	1925	193	Connecté	Non connecté	Sol	-	Récent	Pluie	
100	773959	9630457	Glissement-coulée	Karunga	Actif	> 5m	2013	3915	245	Non connecté	Non connecté	Sol	-	Récent	-	
104	762912	9615745	Glissement-coulée	Kinama	Actif	< 5m	2010	980	151	Connecté	Non connecté	Débris	-	Récent	pluie	
270	764151	9614320	Glissement rotationnel	Gaza	Actif	> 5m	2014	5723	324	Connecté	Non connecté	Sol	-	Récent	Pluie	
324	765629	9614833	Glissement translationnel	Kigage	Actif	> 5m	2010		1063	Connecté	Connecté	Débris	-	Récent	Pluie	
530	767694	9613754	Coulées des débris	Burima	Actif	> 5m	2000-2006	8349	396	Connecté	Non connecté	Débris	-	Récent	Pluie	
824	768612	9612913	Glissement translationnel	Burima	Actif	> 5m	Avant 2013	6485	464	Non connecté	Connecté	Débris	-	Récent	-	
827	768843	9613193	Avalanche	Burima	Actif	> 5m	2008	3278	249	Connecté	Connecté	Débris	-	Récent		
859	768337	9614890	Déformation des montagnes	Gikoma	Non actif	> 5m	-	8950632	12785	Connecté	Non connecté	Roche	-	Très ancien	-	
860	766625	9614988	Glissement rotationnel	Nkombe	Non actif	> 5m	Avant 1957	521342	3351.15886	Connecté	Non connecté	Sol	Pas de réactivation	Ancien	-	
976	766855	9614692	Glissement rotationnel	Nkombe	Actif	> 5m	1974-2000	34439	1036	Connecté	Non connecté	Débris	-	Récent	-	

1005	769493	9625705	Glissement rotationnel	Nyambuye	Non actif	> 5m	1974-2000	5756	289	Non connecté	Non connecté	Roche	-	Récent	-	
1148	770251	9631427	Glissement translationnel	Gikoma	Actif	< 5m	2014	1294	156	Connecté	Connecté	Débris	-	Récent	Pluie	
1166	764801	9623953	Glissement-coulée	Ngongo	Actif	> 5m	2010	3637	279	Connecté	Connecté	Colluvion	Réactivation	Récent	Pluie	
1272	770361	9631254	Glissement-coulée	Gikoma	Actif	< 5m	2014	1294	188	Connecté	Connecté	Débris	Réactivation	Récent	Pluie	
288	767162	9625971	Avalanche	Mugoboka	Actif	> 5m	Avant 1957	18338	558	Connecté	Connecté	Débris	Réactivation 2012	Récent	Pluie	
303	770112	9631617	Glissement translationnel	Gikoma	Actif	> 5m	2014	9898	420	Connecté	Connecté	Débris	-	Récent	Pluie	
887	763088	9615294	Glissement rotationnel	Gitoboro	Actif	> 5m	2010	12717	439	Connecté	Connecté	Débris	-	Récent	Pluie	
9	766257	9612804	Glissement de type rockslide	Kinyamakara	Actif	> 5m	Avant 1957	423678	2695	Connecté	Connecté	Roche	-	Ancien	-	
1247	766475	9626295	Glissement rotationnel	Mugoboka	Actif	> 5m	-	4347	331	Connecté	Connecté	Alluvion	-	Récent	-	
1217	766160	9626245	Creeping	Mugoboka	Actif	> 5m	Avant 1957	9778	477	Connecté	Connecté	Sol	-	Ancien	-	
995	766893	9626823	Glissement rotationnel	Gikungu	Actif	> 5m	Avant 1957	7114	328	Connecté	Connecté	Alluvion	-	Ancien	-	
974	766479	9625735	Erosion par ravinement	Mugoboka	Actif	> 5m	Avant 1957	222982	2322	Connecté	Connecté	Alluvion	-	Ancien	-	
1011	766779	9626703	Erosion par ravinement	Gikungu	Actif	> 5m	-	2985	232	Connecté	Connecté	Alluvion	-	Récent	-	
228	767451	9625439	Coulée boueuse lente	Bisekuro	Actif	> 5m	Avant 1957	159358	2082	Connecté	Connecté	Sol	-	Ancien	-	
590	769066	9630829	Glissement des berges	Gasenyi	Actif	> 5m	2014	1617	158	Connecté	Connecté	Sol	Réactivation en 2018	Récent	Pluie	
472	769825	9622918	Glissement-coulée	Muguye	Actif	> 5m	2013	42050	948	Connecté	Connecté	Débris	-	Récent	Pluie	

IV.2.1. Coulées de débris, coulées boueuses

Les coulées de débris et boueuses sont localisées uniquement sur les fortes pentes dans la partie rajeunie du paysage. Les débris sont transportés par des réseaux de drainage loin de la surface de rupture de pente. Les coulées de débris les plus connues dans la zone d'étude sont celles issues de la catastrophe meurtrière de Gatunguru du 10 février 2014 (IFRC, 2014). L'image ci-dessous (Figure IV-2) représente une coulée dans le bassin versant Ntakangwa aux coordonnées géographiques 3°22'20.88''S, 29°27'00.06''E, altitude variant entre 1587m et 1765m.



Figure IV-2: Coulées boueuses/débris dans le bassin versant de la rivière Ntakangwa (ID=364)

IV.2.2. Les glissements rotationnels, translationnels et avalanches

Ces glissements sont localisés soit dans les colluvions du glacis ou dans les roches dures altérées. La plupart sont connectés aux réseaux de drainage. Leur taille est petite par rapport aux autres types. Ils sont également plus fréquents dans le paysage rajeuni que reliqué. Les formes rotationnelles sont surtout plus profondes que les autres. Les avalanches sont surtout difficiles à être distinguées du glissement translationnel car notre observation a été réalisée après plusieurs années de rupture de pente. La photo de la Figure IV-3 représente un glissement translationnel/avalanche déclenché dans des sédiments/colluvions.



Figure IV-3: Glissement translationnel/avalanche dans le bassin versant de la Mugere (ID=383)

IV.2.3. Coulées de terre lentes et les slide-earthflows

Ce sont des mouvements ayant une faible vitesse de rupture. Par rapports aux glissements rotationnels/plans/avalanches, ceux-ci sont de plus grande taille et atteigne même 0.6 km². Leur corps est le plus souvent érodé (Figure IV-4a). Une autre observation est que dans certains coulées de terre lentes et slide-earthflows (p.ex. les glissements de Rohe et de Kabumba), il y existe des eaux qui stagnent en permanence sur une dizaine de m² dans les zones plates et à pente inversée. D'autre part, le corps de ces MTs manifeste des effondrements. C'est celui explique la présence de plusieurs destructions (maisons, routes...) liés aux coulées de terre lentes et le manque des habitations par rapport aux environs immédiats. L'autre constat est que les glissements sont anciens et restent actifs pendant plusieurs années. Dans cette catégorie, nous avons intégré des glissements de types creeping ou reptation dont leur activité est manifestée par des arbres inclinés (Figure IV-4b).



Figure IV-4: (a) Partie amont d'une coulée de terre lente (earthflow) à Burima-Mugere (ID=529) et (b) un phénomène de creeping à Mugoboka (ID=990)

IV.2.4. Rockslides et avalanches

Ce sont des grands glissements très profonds dont la rupture affecte la roche mère. De même que le type précédent, ces glissements semblent être de faible vitesse de rupture. Ils sont anciens. Ce qui est remarquable est que dans les corps plusieurs activités sont présentes (Figure IV-5). Ils restent très actifs pendant plusieurs années et alimentent le réseau de drainage en débris. Les blocs de roches très nombreux charriés par la rivière Gikoma (Figure IV-6) est un indicateur des érosions des pieds des rockslides/avalanches dans la région.



Figure IV-5: Grands rockslides avec processus d'érosion par ravinement, BV Mugere (ID=9)



Figure IV-6: Gros blocs de roches charriés par la rivière Gikoma, photo du 14/08/2014 (ID=1284)

IV.2.5. Grandes déformations des montagnes

Ce sont des grandes déformations de montagnes de plusieurs km² (Figure IV-7). Sur terrain, il est difficile de les appréhender mais sont facilement visible sur des images satellitaires ou photos aériennes. La Figure IV-7 montre une grande déformation de montagne au Nord du bassin de la Mugere. La photo a été prise à partir de la colline située au Sud du bassin versant de la Mugere.



Figure IV-7: Une grande déformation de montagne le long de la rivière Gikoma (ID=992)

IV.2.6. Erosions par ravinement

Ces sont des grands ravinements liés aux MTs (Figure IV-8). Au départ, ce sont des petites érosions qui par après évoluent sous forme de grandes ravines. Dans les reliefs de Bujumbura, l'érosion constitue une source importante de sédiments dans les systèmes fluviaux en place. Les sédiments érodés dans les grandes ravines sont principalement constitués de sables et les habitants en profitent pour des fins de construction. Lors des grands orages, ces sables bouchent des caniveaux et ainsi provoquent des inondations. C'est ce qu'on remarque souvent pour le caniveau drainant la rivière Nyabage au sud de Kanyosha qui est souvent bouché par des sables provenant des ravines. Dans notre recherche, nous

n'avons pas quantifié des sédiments érodés ou déposés mais notre observation de terrain confirme que le bilan volumique est élevé et varie selon l'intensité des précipitations.



Figure IV-8: Erosion par ravinement dans la localité de Kizingwe (ID=618)

IV.3. Dégâts occasionnés par les mouvements de terrain sur les infrastructures

Des risques liés aux MTs d'ampleur significatif s'observent en grand nombre dans notre secteur. Plusieurs aspects ont été observés. Il y a des destructions des routes d'intérêt national, des ponts, des infrastructures scolaires et sanitaires, des maisons d'habitation, des champs de cultures, des canaux d'irrigation, etc.

La photo de la Figure IV-9a par exemple montre une nouvelle construction du pont sur la route vers le barrage de la Mugere. L'ancien pont représenté pour ici par les restes de buse (Figure IV-9b) a été effondré vers les années 2015. La route traverse l'aval d'une coulée boueuse/débris active (Figure IV-9).



Figure IV-9: Nouveau pont (a) sur la route vers le barrage Mugere, la flèche noire (b) pointe sur la buse de pont effondré (ID=529)

D'autre part, des routes d'intérêt national comme la RN 7 sont effondrées sur plusieurs kilomètres, raison pour laquelle la route a été déviée à plusieurs reprises (plus de détail cf. chapitre V). Sur le nouveau tracé, au niveau du poteau kilométrique 16, la route est affaissée de l'ordre de plus d'un mètre de 2014 à 2016. Il en est de même pour la partie de Buhonga réhabilitée en 2014 et connaissant actuellement un affaissement considérable. Cela montre que le mouvement vertical de ces glissements est assez rapide malgré que nous n'ayons pas eu l'occasion de faire des mesures sur terrain ou GPS pour plus de précision.

Par ailleurs, d'autres conséquences liées aux MTs se manifestent sur les effondrements des écoles, tel est le cas par exemple de l'école primaire Nyamutenderi et Muyira (ex., Figure IV-10) et des infrastructures sanitaires comme le centre de santé Nyabibondo dans la localité de la commune Nyabiraba qui est érigé au-dessus d'un escarpement du glissement de terrain. Les maisons d'habitations et les routes situées près des MTs sont également exposées à l'effondrement. Ici nous montrons par exemple la seule route Mutanga - Mugoboka coupée en 2019 (Figure IV-11) et un quartier haut standing (Sororezo) exposé aux risques de MTs (Figure IV-12a) avec des infrastructures de grandes valeurs (Figure IV-12b). Ces lourdes destructions causent des pertes énormes à la population et au gouvernement. Les menaces des MTs s'étendent vers les quartiers populaires et les risques augmentent car ils n'ont pas des moyens de déménager. La figure IV-13 montre un ravin actif qui expose une centaine de maisons à l'écroulement.



Figure IV-10: MT qui a emporté une partie de l'école primaire de MUYIRA et plusieurs maisons (ID=472)

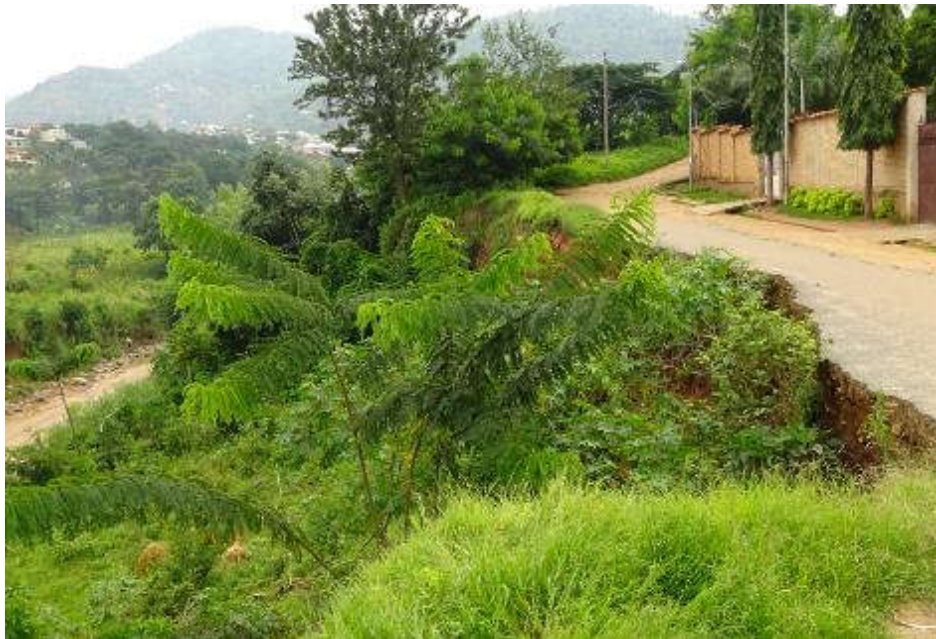


Figure IV-11: MT menaçant la route reliant les quartiers Mutanga sud et Mugoboka (ID=68)



Figure IV-12: Mouvements de terrain de Sororezo présentant un risque aux infrastructures (ID=923)



Figure IV-13: Menace du quartier Gikungu rural par un ravin affecté par des mouvements de masse avec des risques d'effondrement des maisons situées au-dessus du bord principal (ID=994)

Des dégâts considérables liés aux mouvements de masse ont été observés sur RN 1 et RN 9 lors de la catastrophe du 9 février 2014 dans le Nord de Bujumbura (cf. rapport du Projet de Développement du Secteur Routier; PDSR pour plus de détails). Ils sont causés par les mouvements de masse et des inondations associées. Ils ont entraîné des affaissements, la destruction de la chaussée, la destruction des ponts sur RN 1 et sur RN 9 par affouillement et la destruction des ouvrages d'assainissement et de drainage (par exemple, Figure IV-14).



Figure IV-14: Route nationale 1 affouillée par le changement du lit de la rivière Gasenyi de la catastrophe du 10/02/2014, photo prise un jour après le drame (ID=1382)

Les mouvements de masse sur la route RN 1 ont provoqué l'effondrement des remblais à Muberure, la destruction du pont sur la rivière Gikoma et le débordement des eaux à Rubirizi (pont) sur RN 9 lors des fortes précipitations de 9 février 2014. Les photos de la Figure IV-15 suivantes témoignent les gros impacts sur les infrastructures nationales RN 1 et RN 9.



Figure IV-15: Dommages aux infrastructures de la RN 1 et la RN 9 (Photos prises et traitées par © Hermès NIYONDIKO) (ID=1284)

En milieu rural, avec absence des bonnes routes, des coupures des sentiers (piste) assurant la liaison entre les communes sont également affectés par les MTs. La Figure IV-16 montre la route qui lie les communes Kanyosha et Isale qui est coupé au niveau de la zone Muyira. Ce mouvement de terrain de type rotationnel s'est déclenché dans un sol altéré et profond.



Figure IV-16: Coupure de la route communale par un glissement rotationnel dans la localité de Muyira, photo de décembre 2018 (ID=95)

IV.4. Conclusion du chapitre IV

Les sorties sur le terrain nous ont permis de localiser, cartographier, décrire et faire un inventaire exhaustif des MTs rencontrés dans notre secteur d'étude. Avec l'usage des outils SIG, l'interprétation des photos aériennes et images satellitaires, plusieurs glissements de terrains ont été relevés. Actuellement, nous disposons d'une base de données complète exploitable pour des recherches ultérieures. Les photos de ce rapport sont quelques exemples tirés dans des milliers d'images dont nous disposons (Figure IV-1).

Les MTs les plus dangereux sont les grands glissements comme les coulées boueuses à vitesse lente, reptation (earthflows) et les grandes ruptures de pentes complexes (slide-earthflows). L'ignorance de

quelques habitants interrogés au cours de notre recherche leur attribuent aux forces surnaturelles, à la punition divine ou à des litiges fonciers.

Lors des constructions de grandes envergures telles que les routes nationales, les écoles et les centres de santé, des études plus approfondies manquent pour se rendre compte de l'ampleur de l'aléa MT dans la région afin de mener des infrastructures y adéquates. C'est un des défis majeurs car on ne peut pas comprendre une route nationale peut s'effondrer en moins d'une année après sa construction ou sa réhabilitation.

Pour éviter des dommages éventuels inestimables dans la région, un bon suivi des lieux d'implantation des travaux géotechniques s'avère nécessaire car c'est une zone à haute probabilité de l'aléa mouvement de terrain.

CHAPITRE V. CARACTERISATION ET DISTRIBUTION DES MOUVEMENTS DE
TERRAIN ET DES PROCESSUS D'EROSION ASSOCIES DANS LES RELIEFS DE
BUJUMBURA

V. CARACTERISATION ET DISTRIBUTION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN ET DES PROCESSUS D'ÉROSION ASSOCIÉS DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA

V.1. Introduction

Les hauts plateaux de l'Afrique tropicale se distinguent comme des zones sensibles aux mouvements de terrain (MTs) à l'échelle du continent, où l'on trouve en outre des densités de population élevées, souvent en forte croissance et associées à une grande vulnérabilité sociétale (Seto et al., 2012; Bizimana and Sönmez, 2015; Kervyn et al., 2015; Michellier et al., 2016; Balegamire et al., 2017; Broeckx et al., 2018; Emberson et al., 2021). Malgré la fréquence des MTs et la grande vulnérabilité de la population, ces régions montagneuses, comme beaucoup d'autres endroits dans les tropiques africains, sont moins étudiées que des paysages similaires dans d'autres parties du monde (Lacroix et al., 2020; Maes et al., 2017; Reichenbach et al., 2018). En particulier, les inventaires multi-temporels complets de MTs avec une caractérisation précise, basée sur le terrain, des processus et la compréhension des facteurs expliquant leur apparition restent rares (Broeckx et al., 2018, Che et al., 2011; Maes, et al., 2016). Ces informations sont essentielles dans le contexte de la compréhension de l'évolution du paysage, de l'évaluation des risques et des stratégies de réduction des risques de catastrophes (Guzzetti et al., 2012; Sidle & Bogaard, 2016; van Westen et al., 2008). Ces connaissances à l'échelle locale, à haute résolution spatiale, sont particulièrement nécessaires dans les régions densément peuplées. Cependant, comme l'ont souligné (Dewitte et al., 2021), plusieurs conditions rendent difficile la collecte de telles informations sur les MTs dans les régions tropicales:

- (1) la régénération rapide de la végétation naturelle après une perturbation, dissimulant rapidement les cicatrices des glissements de terrain.
- (2) les modèles hétérogènes complexes dans le paysage dus aux pratiques de brûlis et à la culture itinérante, et
- (3) l'altération profonde et le développement d'un régolithe épais. En outre, des politiques efficaces de collecte de données sur l'occurrence des MTs sont rarement en place (Maes et al., 2017) et l'accessibilité du terrain ainsi que les conditions de travail peuvent être en comparaison plus difficiles (Jacobs et al., 2017; Monsieurs et al., 2017).

Comprendre en détail les processus de glissement de terrain est complexe, en particulier lorsque le paysage naturel est façonné par une variété de facteurs environnementaux en interaction qui influencent le type et le moment des instabilités de pente ainsi que leurs conditions de cause et de déclenchement. Qu'ils soient statiques ou dynamiques, les facteurs qui conditionnent la stabilité des pentes ne conduisent à la rupture que lorsqu'une combinaison de facteurs (non) favorable est rencontrée (McColl, 2015; Roering et al., 2005; Sidle & Bogaard, 2016) Les structures géologiques héritées ou la morphologie des

pentent sont généralement considérées comme des facteurs de pré-conditionnement. Ils sont considérés comme des composants statiques qui peuvent faciliter l'action de facteurs dynamiques déstabilisants (Glade & Crozier, 2005; Bogaard & Greco, 2016). Les facteurs qui préparent progressivement la pente à la rupture à long terme sont généralement considérés comme des causes sous-jacentes des MTs (par exemple, la perte de résistance au cisaillement due à l'altération, aux changements climatiques ou au soulèvement tectonique). Il s'agit de facteurs dynamiques qui agissent généralement sur des échelles de temps géomorphiques. Les processus dynamiques qui conduisent le versant à un état activement instable (c'est-à-dire qui provoquent une réponse quasi-immédiate) sont considérés comme des déclencheurs (Bogaard & Greco, 2016; Rosenberg, 2007). Les déclencheurs dynamiques les plus courants sont les changements dans la pression de l'eau interstitielle de la pente avec les précipitations et les tremblements de terre (Keefer 1994; Sidle and Bogaard 2016), mais par exemple, le décollement de la pente est également connu pour déclencher des MTs (Lacroix et al., 2020). Aucune rupture de pente ne peut cependant être attribuée à une cause unique et définitive, les facteurs de pré-conditionnement et de déclenchement agissant simultanément pour définir la stabilité actuelle de la pente (Sidle & Bogaard, 2016). Même si la plupart des études décrivent des exemples où le moment de la rupture d'un glissement de terrain est associé à un événement déclencheur clairement défini, les pentes peuvent aussi se rompre sans aucun déclencheur apparent (Casagli et al., 2017, McColl, 2015). Dans ce cas, la pente cède par des mécanismes progressifs qui impliquent l'affaiblissement du matériau du versant au fil du temps jusqu'à ce que la stabilité soit compromise par un déclencheur d'une magnitude insignifiante (Casagli et al., 2017; McColl, 2015). La complexité de la compréhension des MTs est encore accrue lorsque le paysage est affecté par les activités humaines (Jaboyedoff et al., 2016, Sidle & Bogaard, 2016). Les activités humaines jouent un rôle non seulement sur l'apparition de nouveaux glissements de terrain, comme les instabilités de pente associées à la déforestation et à la présence de routes (Dewitte et al., 2021; Yunus et al., 2021), mais aussi sur la dynamique des MTs existants (Van Den Eeckhaut et al., 2007; Troncone et al., 2021).

Nous ciblons ici les pentes des reliefs de Bujumbura, une ville du Burundi située dans l'environnement montagneux de la région du Rift Nord Tanganyika-Kivu. Au cours des dernières années, plusieurs études ont montré que les MTs sont fréquents autour de la ville et que leurs impacts sont importants (Depicker et al., 2020; Dewitte et al., 2021; Kubwimana et al., 2018, 2021ab); Moeyersons & Trefois, 2012; Monsieurs et al., 2018; Nibigira et al., 2015, 2018). Cependant, ces études sont soit trop régionales dans leur analyse, soit au contraire se concentrent sur des questions très locales, ne fournissant au final qu'un aperçu général des problèmes liés aux MTs dans la région. Par exemple, Depicker et al. 2020 ont évalué la susceptibilité aux MTs du Rift NTK en se basant sur un inventaire régional relativement peu détaillé des glissements de terrain, sans tenir compte de la typologie des ruptures de pente. Nibigira et al. (2018) se sont concentrés sur la dynamique d'un grand glissement de terrain à déplacement lent en relation avec l'endiguement de la rivière et son potentiel de risque d'inondation en cascade. Par conséquent, il est

actuellement impossible de tirer de ces études une image claire et précise du problème des MTs et des processus en jeu dans la région de Bujumbura.

L'objectif principal de cette recherche est de produire un inventaire multi-temporel complet des MTs dans les reliefs de la ville de Bujumbura afin d'améliorer la compréhension des processus de rupture de pente et des risques associés. Plus spécifiquement, nous visons à localiser les différents types d'instabilités de pente et à identifier leur chronologie et leurs principaux facteurs de contrôle et de déclenchement. Nous présentons une analyse des processus en jeu en combinant une enquête minutieuse de terrain et une analyse visuelle d'images satellites, de données topographiques à très haute résolution et de photographies aériennes historiques. Une attention particulière est accordée au rôle des activités humaines dans les schémas de distribution des glissements de terrain.

V.2. Rift du Nord du lac Tanganyika au Kivu et caractéristiques environnementales de Bujumbura

Le Rift du nord du lac Tanganyika au Kivu, dans lequel se trouve Bujumbura, est situé dans la section centrale de la branche occidentale du rift est africain (Figure V-1). Dans cette région, le soulèvement tectonique, accompagné d'une activité sismique et de la formation de failles, a initié un rajeunissement du paysage par le retrait des points de contact (knickpoints), renforçant ainsi le raidissement topographique (Delvaux et al., 2017; Depicker et al., 2021; Dewitte et al., 2021; Smets et al., 2016). Ce contexte tectonique, combiné à un climat tropical qui favorise l'apparition d'événements pluvieux intenses et d'altérations profondes, fait de la région un lieu privilégié des MTs en Afrique (Broeckx et al., 2018; Dewitte et al., 2021). Elle est caractérisée par une grande diversité de MTs de tailles (jusqu'à des dizaines de km²) et d'âges différents (Depicker et al., 2020, 2021; Jacobs et al., 2017; Jacobs et al., 2018), certains ayant plus de 10 000 ans (Dewitte et al., 2021). La plupart des MTs récents, souvent peu profonds (c'est-à-dire d'une profondeur inférieure à 5 m), qui se sont produits au cours des dernières décennies, ont été déclenchés par des précipitations. Dans la région, un lien général entre la saisonnalité des précipitations et l'apparition des glissements de terrain a été récemment démontré (Dewitte et al., 2021; Monsieurs et al., 2018). Au cours de cette même période, aucun des MTs observés dans la région n'a été déclenché par des séismes (Dewitte et al., 2021). Bien que nous ne puissions pas exclure que les tremblements de terre puissent déclencher des MTs (ou jouer un rôle dans leur apparition), leur période de retour peut être longue et leurs impacts en tant que facteur de déclenchement peuvent passer inaperçus sur une fenêtre d'observation aussi courte (Delvaux et al., 2017; Dewitte et al., 2021). De plus, les MTs profonds dans la région peuvent se produire sans aucun déclencheur apparent en raison de l'évolution à long terme des seuls facteurs de pré-conditionnement tels que l'altération des roches et la formation du régolithe (Dille et al., 2019). Cette observation a une implication pour notre interprétation des nombreux MTs qui se produisent de manière isolée.

Dans le rift NTK, on a observé que les taux d'érosion dus à des MTs récents et peu profonds étaient plus élevés dans les paysages rajeunis (c'est-à-dire activement incisés et plus récents) que dans les paysages reliques environnants, en amont des points de contact qui reculent et en dehors des épaulements du rift (Depicker et al., 2021). Cette différence s'explique principalement par la topographie plus abrupte des paysages rajeunis. Les MTs dans les paysages rajeunis sont plus abondants mais plus petits. Cela peut être la conséquence d'une activité sismique plus importante qui fracture et affaiblit le matériau des pentes et d'une épaisseur de régolithe plus faible dans les paysages rajeunis (Depicker et al., 2021). De nombreux MTs récents se produisent également le long des routes. Là, les facteurs du paysage sont parfois fortement altérés (par exemple, par l'affaissement des pentes, des systèmes de drainage inadéquats, la surcharge et les décharges), de sorte que les conditions de déclenchement sont plus souvent réunies (Dewitte et al., 2021). Une autre perturbation humaine importante dans la région est associée à la déforestation. Depicker et al. (2021) ont montré que la déforestation dans le Rift NTK provoque généralement un pic de MTs qui dure environ 15 ans et augmente l'érosion des MTs de 2 à 8 fois pendant cette période avant de retomber à un niveau similaire à celui des conditions forestières. L'exploitation des lits de rivières pour l'obtention de matériaux de construction fréquente à proximité des centres urbains a également un impact sur les systèmes fluviaux et, par conséquent, sur l'activité des glissements de terrain. L'exploitation de ces carrières entraîne un manque de charge de fond, une forte altération de la dynamique fluviale et une augmentation globale de l'incision des rivières. En conséquence, les berges sont souvent surcreusées et s'effondrent (Dewitte et al., 2021).

La ville de Bujumbura est délimitée par le lac Tanganyika à l'Ouest, et par l'un des épaulements vallonnés du rift NTK à l'Est (Figure V-1a,b). C'est l'une des principales villes de la région, comptant actuellement environ un million d'habitants. La ville connaît également une expansion urbaine rapide et soutenue, généralement incontrôlée (Michellier et al., 2016). En raison de la présence du lac Tanganyika, cette expansion a également lieu à l'Est du centre-ville, c'est-à-dire dans les environs vallonnés de la ville. La population de Bujumbura est globalement très exposée aux risques tels que les MTs en raison d'infrastructures urbaines et d'un réseau routier mal conçus qui ne tiennent souvent pas compte des contraintes du contexte environnemental local. En outre, la vulnérabilité locale est élevée et la résilience aux impacts des MTs est faible en raison de la pauvreté (Pollock & Wartman 2020). Trouver des alternatives pour un emplacement plus sûr est souvent impossible pour une grande partie de la population en raison de ressources financières limitées. C'est particulièrement vrai pour la population vivant dans les environs vallonnés de Bujumbura, dont le niveau de vie est généralement plus bas et qui dépend de petites activités agricoles et de travaux de construction à petite échelle.

Outre les glissements de terrain, la ville de Bujumbura est également gravement touchée par l'érosion par ravinement. Les interactions entre les MTs et les ravines sont généralement complexes et impliquent parfois des rétroactions auto-renforcées. La présence d'une érosion par ravinement sur un glissement de

terrain peut à la fois attester du type de mouvement de pente et de son niveau d'activité (Mackey & Roering, 2011; Poesen, 2018). De grands systèmes d'érosion par ravinement dans lesquels des MTs sont présents sont identifiés à Bujumbura (Dewitte et al., 2021). L'origine de ces grandes ravines est supposée être en partie associée aux infrastructures urbaines (comme cela a été observé dans d'autres environnements urbains comme à Kinshasa (Makanzu Imwangana et al., 2014). Cependant, un inventaire complet fait encore défaut.

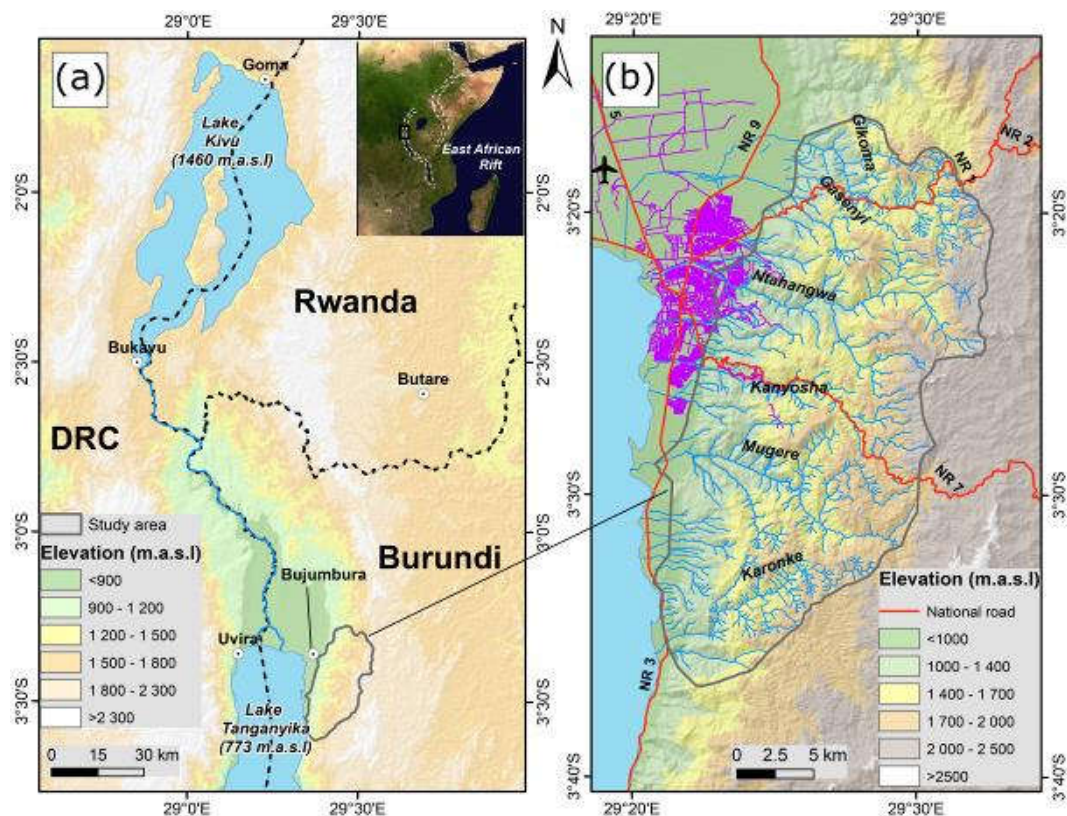
En analysant le paysage, on constate que les pentes des collines à l'Est de la ville sont typiquement incisées par des rivières qui s'écoulent vers l'Ouest en direction du centre-ville (Figure V-1b). Les cours inférieurs des rivières se trouvent dans le paysage rajeuni et sont affectés par plusieurs points d'entaille (knickpoints). En amont, les rivières évoluent dans le paysage relique, où les pentes des bassins versants sont moins abruptes (Figure V-2a). La lithologie est constituée de roches métamorphiques (gneiss, quartzites et méta-quartzites) et ignées (granites) précambriennes, ainsi que de sédiments du rift pléistocène (Figure V-2b). Les sédiments consistent en un mélange de régolithe et de gravier (colluvium). Les gneiss et les sédiments de rift dominent la partie Ouest de la zone d'étude tandis que les granites prédominent à l'Est. Le méta-quartzite et le quartzite sont dispersés et souvent utilisés pour l'extraction de matériaux de construction, des bandes de pegmatite sont intercalées dans les unités de gneiss et de quartzite. Les sédiments du rift sont épais tandis que les gneiss et les granites sont généralement très altérés. La région est traversée par des failles actives liées à la dynamique du rift (Delvaux et al., 2017; Smets et al., 2016). Typique du rift NTK, le climat de Bujumbura est tropical, avec des précipitations annuelles moyennes de 1400 mm (bassin versant sud de Bujumbura (Kirasa Energy, non publié), la plupart des précipitations se produisant pendant la saison des pluies d'octobre à mai (Bidou et al., 1991).

V.3. Données et méthodes

V.3.1. Inventaire des mouvements: types et processus

En utilisant © l'imagerie de Google Earth avec un temps de recherche limité par image, Depicker et al. 2020 ont cartographié 272 MTs sur la zone d'étude - ces MTs faisant partie d'un inventaire régional à l'échelle du Rift NTK. Cet inventaire a fait une seule différenciation entre les processus peu profonds et profonds sans aucune caractérisation temporelle. Dans cette étude, nous présentons un inventaire multi-temporel complet des MTs qui constitue une mise à jour significative de l'inventaire compilé par Depicker et al. (2020) et mis à jour (Dewitte et al., 2021). Nous nous appuyons ici sur une interprétation visuelle plus minutieuse et détaillée des images à très haute résolution spatiale © Google Earth, combinée à l'analyse des orthomosaïques historiques et actuelles des photographies aériennes (Tableau V-1). Les photographies aériennes historiques disponibles au Musée royal de l'Afrique centrale (Belgique) pour les périodes 1957-1959 et 1974 ont également été utilisées pour obtenir une vision

stéréoscopique de la morphologie du paysage. Il est à noter que la qualité des photographies n'est pas toujours optimale car elles ont été conservées en format papier et, dans certains cas, souffrent d'une mauvaise qualité d'image (par exemple, flou, sous-exposition et surexposition) et d'effets du vieillissement (Mboga et al., 2020). Une orthomosaïque d'une résolution spatiale de 1 m a été construite à partir des photographies de 1957-1959 en appliquant des approches récentes de stéréophotogrammétrie multi-vues (MVS) (Bakker & Lane, 2017; Mboga et al., 2020; Smets et al., 2021) dans Metashape Pro (Agisoft Metashape Pro, 2020). Nous avons également interprété visuellement un ensemble de produits (angle de pente, courbes de niveau et hillshade) dérivés d'un modèle numérique d'élévation (MNE) à très haute résolution spatiale de 1 mètre. Le MNE a été construit à partir d'images tri-stéréo Pléiades. Le traitement photogramétrique (ajustement des faisceaux, reconstruction de la surface topographique et ortho rectification) a été effectué dans MicMac (Rupnik et al., 2017).



(a) Partie centrale de la branche occidentale du Rift est-africain, (b) Reliefs de Bujumbura avec le réseau de drainage des principaux bassins versants (délimité par la ligne grise). L'ombrage des collines est dérivé des données SRTM 1 Arc-Seconde (Farr et al., 2007). Le réseau routier en violet et les routes nationales en rouge proviennent d'OpenStreetMap.

Figure V-1: Localisation de la zone d'étude

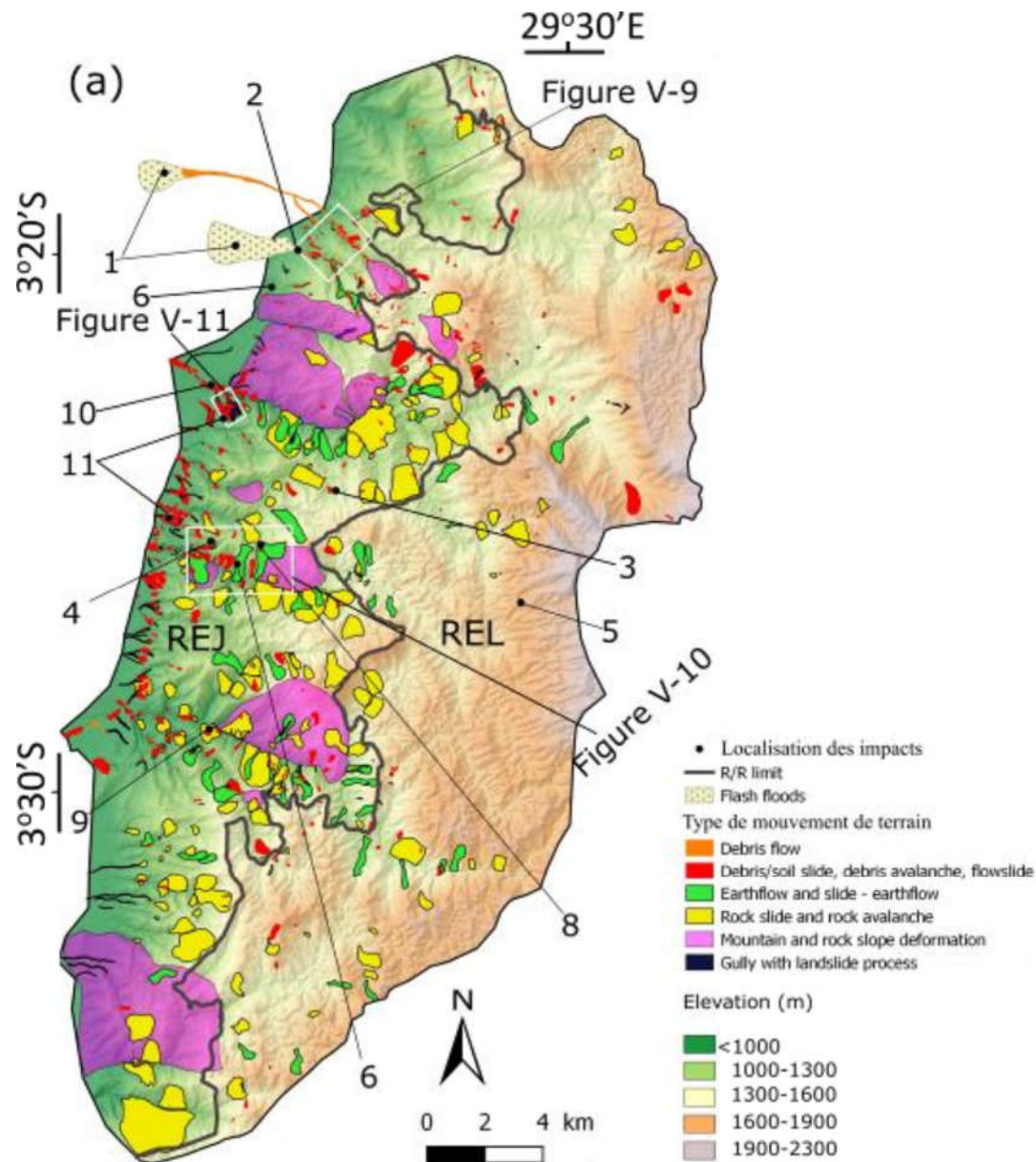


Figure V-2: Carte de localisation des MTs inventoriés dans les reliefs de Bujumbura en fonction de leur type de processus (Kubwimana et al., 2021b)

La ligne "limite R/R" montre la position du contact entre les paysages rajeunis (ouest) et reliques (est) (RAJ et REL), notez la différence de densité des glissements de terrain. Les chiffres représentent l'emplacement des événements récents de glissement de terrain dont les impacts ont été évalués (voir le Tableau V-3 pour plus de détails). Les rectangles blancs représentent l'emplacement des figures V, 9-11.

En complément de l'analyse visuelle de ces données auxiliaires (Tableau V-2), nous avons mené une enquête géomorphologique intensive sur le terrain dans toute la zone d'étude, où nous avons recueilli des informations sur la chronologie des ruptures de pente par le biais d'entretiens avec des agriculteurs locaux (Figure V-3). Des enquêtes de terrain complètes et systématiques ont été menées de juin à

septembre 2016, en septembre et décembre 2018, et de janvier à mars 2019. Ces campagnes de collecte de données viennent en complément des enquêtes spécifiques au site qui ont été menées dans la zone d'étude depuis 2014, généralement après l'apparition de MTs dommageables.



Figure V-3: Collecte des données sur terrain

Nous avons utilisé la classification actualisée de Varnes par Hungr et al., (2014) pour définir la typologie des glissements de terrain. En outre, la superficie du glissement de terrain, sa profondeur, son âge relatif, son activité et sa connexion aux lignes de drainage/route ont été évalués. La profondeur du glissement de terrain est un élément important lors de l'analyse des causes et des déclencheurs du glissement de terrain, l'occurrence des MTs peu profonds étant par exemple beaucoup plus sensible aux perturbations de la surface du paysage (par exemple, les changements d'utilisation/couverture du sol) et aux conditions de précipitations que les MTs profonds (Sidle & Bogaard, 2016). La profondeur de la surface de rupture des MTs peu profonds est généralement définie dans une fourchette de 2 à 5 m (Mackey & Roering, 2011; Sidle & Bogaard, 2016). Ici, à l'instar de ce qui a déjà été utilisé dans le Rift NTK (Dewitte et al., 2021), nous avons considéré les MTs comme peu profonds lorsque leur profondeur estimée est < 5 m. La distinction entre les processus peu profonds et profonds a été effectuée à partir de données topographiques et d'observations de terrain. Les MTs ont été classés en (i) mouvements récents, (ii) mouvements anciens et (iii) mouvements très anciens selon l'approche proposée par Dewitte et al., (2021). Les MTs récents sont tous de nouvelles ruptures de pente qui n'étaient pas visibles sur les photographies aériennes historiques des années 1950, ou visibles à cette époque mais montrant des signes clairs d'activité. Les MTs ont été considérés comme actifs lorsqu'ils présentent des patrons de

végétation perturbés et des surfaces de sol nues. Les observations sur le terrain d'arbres inclinés, de déformations/fissures dans les matériaux déplacés et de dommages aux infrastructures (comme les routes et les maisons) sont également des indicateurs de MTs actifs. Les MTs ont été classés comme anciens s'ils étaient présents sur les photographies historiques avec des caractéristiques morphologiques claires mais ne montrant aucun signe d'activité récente. De nombreuses coulées de terre lentes flows entrent dans cette catégorie. Les coulées de terre lentes sont des MTs profonds à déplacement lent, avec une morphologie de type flux, qui sont connus pour rester actifs pendant plusieurs décennies et dont les phases d'activité peuvent alterner avec des périodes de dormance relative (p.ex., Mackey & Roering, 2011). Par conséquent, le fait que les coulées de terre lentes présentent actuellement des signes d'activité ne signifie pas qu'elles sont récentes. Nous avons classé les MTs comme très anciens lorsqu'ils sont partiellement (ou fortement) démantelés par l'érosion et ne montrent aucun signe d'activité. Les déformations de montagnes et de pentes rocheuses sont incluses dans cette catégorie. Ce type de glissement de terrain peut être sujet à des MTs anciens ultérieurs.

V.3.2. Facteurs de contrôle et de déclenchement des glissements de terrain

Sur la base des connaissances régionales/locales antérieures, nous avons sélectionné quatre variables (l'angle de pente, l'exposition de la pente, la lithologie et la différenciation du relief en paysages rajeunis et reliques) pour analyser les contrôles sur la distribution spatiale des MTs distribution (Depicker et al. 2020, 2021; Dille et al. 2019; Jacobs et al. 2017; D. Kubwimana et al. 2018). Nous avons utilisé un MNE local de 10 m (Tableaux V-1) pour calculer les deux dérivés topographiques (angle de pente et aspect de la pente) car il saisit mieux les conditions environnementales que les données SRTM de 1 arc-seconde (Farr et al., 2007). Le MNE haute résolution de 1 m des Pléiades n'a pas été utilisé car il contient trop d'artefacts et fournirait, même s'il était corrigé, des informations trop complexes pour une telle analyse spatiale (Dewitte et al., 2010; Jacobs et al., 2018).

Tableau V-1: Jeux de données auxiliaires utilisées dans cette recherche (Kubwimana et al., 2021b).

Types	Année	Echelle/résolution	Données associée	Sources
Photos aériennes historiques	1957-59, 1974, 1981	~1:40,000	Inventaire des MTs	MRAC
Ortho-mosaïques tirées des photos aériennes historiques	1957-1959	1 m	Inventaire des MTs	MRAC
Ortho-photos à base des photos aériennes	08-09/2012	0.5 m	Inventaire des MTs	BCG
Images Satellite	2000 - 2021	0.3 to 0.6 m	Inventaire des MTs	© images Google Earth
Images Pléiades	09/07/2013, 01/2016	0.5 m (panchromatique)	Inventaire des MTs	Airbus
DEM à base des ortho photos	08-09/2012	10 m	Pente, exposition, ombrage, contour des MTs	BCG
DEM à base des (tri-) stéréo Pléiades	09/07/2013	1 m	Pente, exposition, ombrage, contour des MTs	Cette étude
Rapport des journaux	2014-2021	N.A	Impacts des MTs	Medias, blogs
Carte géologique	2018	1:50 000	Lithologies, failles	Laghmouch et al., 2018

Afin d'étudier les MTs indépendamment de leur taille et d'éviter les problèmes d'autocorrélation spatiale (p.ex., Depicker et al., 2020; Hussin et al., 2016, Jacobs et al., 2018), nous avons attribué manuellement un point d'initiation pour chaque glissement de terrain dans sa zone d'épuisement. Nous avons ensuite utilisé un test statistique non paramétrique χ^2 pour mesurer l'association entre chaque variable de contrôle et l'occurrence des glissements de terrain, en d'autres termes, nous avons cherché à savoir si chaque variable de contrôle a un impact significatif sur la distribution spatiale des MTs (p.ex., Dewitte et al., 2010). Nous avons appliqué un niveau de confiance de 95 %. Si une variable avait un impact significatif sur les MTs ($p < 0,05$), nous avons calculé le rapport de fréquence (FR) pour analyser l'importance de ses différentes classes (Lee & Pradhan, 2007). Nous avons effectué une analyse stratifiée par zonage spatial en fonction des paysages rajeunis/reliques, de la lithologie, de la différenciation entre les processus profonds et peu profonds, ainsi que de l'état actuel de l'activité des glissements de terrain. Nous avons identifié visuellement les knickpoints et les niveaux d'incision de la rivière pour délimiter les paysages rajeunis et relictuels, ces derniers étant situés dans chaque bassin versant en amont du knickpoint le plus élevé. Pour les contrôles lithologiques, nous avons analysé uniquement les distributions des MTs profonds. Afin d'approximer les conditions de pente avant la rupture, nous avons donné au point d'initiation des MTs profonds une valeur moyenne d'angle de pente dérivée de plusieurs points sélectionnés autour de la tête du glissement (Depicker et al., 2020; Jacobs et al., 2018). Pour une analyse plus précise de la distribution des glissements de terrain, nous avons retiré de l'analyse les grandes déformations des montagnes (Mountain and rock slope deformation), c'est-à-dire les processus de MTs profonds qui répondent à des conditions structurales et géodynamiques qui ne peuvent être étudiés qu'à une échelle régionale (Crosta et al., 2013). Nous avons également exclu les MTs dans les zones d'exploitation de carrières, ainsi que ceux associés aux coupures de routes et à l'incision récente des berges des rivières, car ils sont associés à des conditions spécifiques au site induites par l'homme qui ne peuvent pas être tenu en compte au cours de notre analyse (Dewitte et al., 2021). Enfin, nous avons également exclu les MTs associés à des ravines, car leur contexte environnemental est très différent des autres processus de glissement de terrain. Une approche stratifiée similaire a été utilisée pour l'analyse de la taille des glissements de terrain. Ceci a été réalisé en utilisant des Boîte à moustaches (p.ex., Guns & Vanacker, 2014, Santangelo et al., 2013).

Pour les MTs récents collectés sur le terrain, nous avons recueilli des informations supplémentaires à partir de témoignages, de l'Internet et de la littérature grise afin d'élaborer sur le rôle potentiel des précipitations et des tremblements de terre comme facteurs de déclenchement. Ces données supplémentaires sont complémentaires à l'analyse effectuée par Dewitte et al. (2021) qui ont étudié l'occurrence des tremblements de terre déclencheurs de MTs dans la région au cours des 60 dernières années. Cette analyse était basée sur le catalogue de données sismiques de l'USGS et sur le réseau local KivuSNet, le réseau sismique dense mis en place dans la région depuis 2016 qui contient une station sismique à Bujumbura (Oth et al., 2017).

V.4. Résultats

V.4.1. Types et caractéristiques des mouvements de terrain

Nous avons inventorié 1 286 MTs de différents types (Figures V-2a, 4-8). Tous les MTs cartographiés ont été regroupés en six catégories présentant des caractéristiques similaires en fonction des mécanismes de rupture de pente et des matériaux impliqués (Figure V-2a & Tableau V-2). La différenciation entre les glissements, coulées et avalanches n'a pas toujours été possible pour les MTs plus anciens dont les morphologies fraîches n'ont pas pu être observées avec précision. La différenciation entre coulées de boue et coulées de débris était également parfois complexe, et nous les avons donc ici toutes considérées comme des coulées de débris.

Un grand nombre des MTs peu profonds inventoriés sont des déclenchements des débris (debris slides) et des avalanches relativement petits (Figures V-2a, 4&5). La signature des MTs peu profonds a tendance à disparaître rapidement du paysage, parfois déjà après quelques mois. Par conséquent, tous les MTs peu profonds cartographiés ont été détectés sur des images satellites récentes à haute résolution et/ou sur le terrain, leur identification sur les photographies aériennes historiques étant difficile en raison de leur qualité inférieure (Mboga et al., 2020). Les plus petits MTs observés sur le terrain n'étaient pas non plus visibles sur les images satellites, en particulier lorsqu'ils se produisaient le long de coupures de routes ou de berges de rivières.

Tableau V-2: Principales caractéristiques des mouvements de terrain et des ravines inventoriés.

CRi: MT en contact à la rivière, CRo: MT en contact à la route, R: réactivation, MR: MT lié à la berge de la rivière/à la route, Tot: total , RAJ: paysage rajeuni , REL: paysage relique, TA: MT très ancien , A: Ancien, Re: MT récent , MP: MT profond , MS: MT peu profond, MA: MT actif , MN: MT non actif , O: oui, N: non , NA: Non applicable (Kubwimana et al., 2021b).

Types	Nombre #		Superficie (km ²)			Age		Profondeur			Activité		CRi		CRo		R	M	R
			RE	Tot	Rej	Rel	T	A	Re	MP	MS	MA	M	N	O	N			
Coulées des débris	Tot	RAJ	REL																
	10	7	3	0.5	0.51	0.01	0	0	10	7	3	10	0	10	0	4	6	0	0
Debris slide, debris avalanche, flowslides	919	773	146	7.1	5.5	1.6	0	18	73	558	361	866	53	706	21	89	830	7	385
								1	8					3				6	
Earthflow and slide – earthflows	64	45	19	11.6	8.9	2.7	0	58	6	64	0	26	38	60	4	14	50	6	0
Rock slides and rock avalanches	189	142	47	38.2	31.5	6.7	5	13	46	189	0	124	65	183	6	29	160	0	5
Déformations des montagnes	11	10	1	47.8	31.5	16.4	11	0	0	11	0	0	11	11	0	5	6	0	0
Ravines et MTs associés	93	83	10	1.9	1.79	0.07	0	38	55	54	39	79	14	62	31	15	78	0	0
Total	128	106	226	107	79.6	27.4	16	41	85	883	403	110	181	103	25	15	113	8	494
	6	0						5	5			5		2	4	6	0	2	

Nous avons collecté de MTs superficiels en groupe qui se produisant après de fortes précipitations (points rouges dans la Figure V-4). On y a observé des processus en cascade où les glissements de débris et les avalanches sont reliés aux coulées de débris. Un exemple clair d'un tel amas - et des événements en cascade qui y sont liés - s'est produit le 9 février 2014 et a touché la route nationale RN1 (Dille et al. 2019; Monsieurs et al. 2018). Un inventaire précis sur le terrain, réalisé quelques semaines après l'événement et complété par une analyse d'images satellite, a permis de cartographier 307 MTs récents et peu profonds (Figure V-9). La plupart des ruptures étaient des glissements de débris et des avalanches, beaucoup étant liés à des coulées de débris et au réseau fluvial. Les matériaux apportés par ces MTs ont contribué aux crues rapides riches en débris longues de plusieurs kilomètres qui ont été associées à cet événement pluvieux intense. Il faut noter que quelques MTs profonds se sont également produits à ce moment (Dille et al., 2019). Un glissement de terrain, en partie associé aux activités d'extraction minière et à la mobilisation des résidus, a été suffisamment important pour créer un barrage temporaire sur la rivière Gasenyi qui s'est rompu et a exacerbé les crues éclair, entraînant des impacts dramatiques dans la ville de Bujumbura (Figure 9c et Tableau V-3).

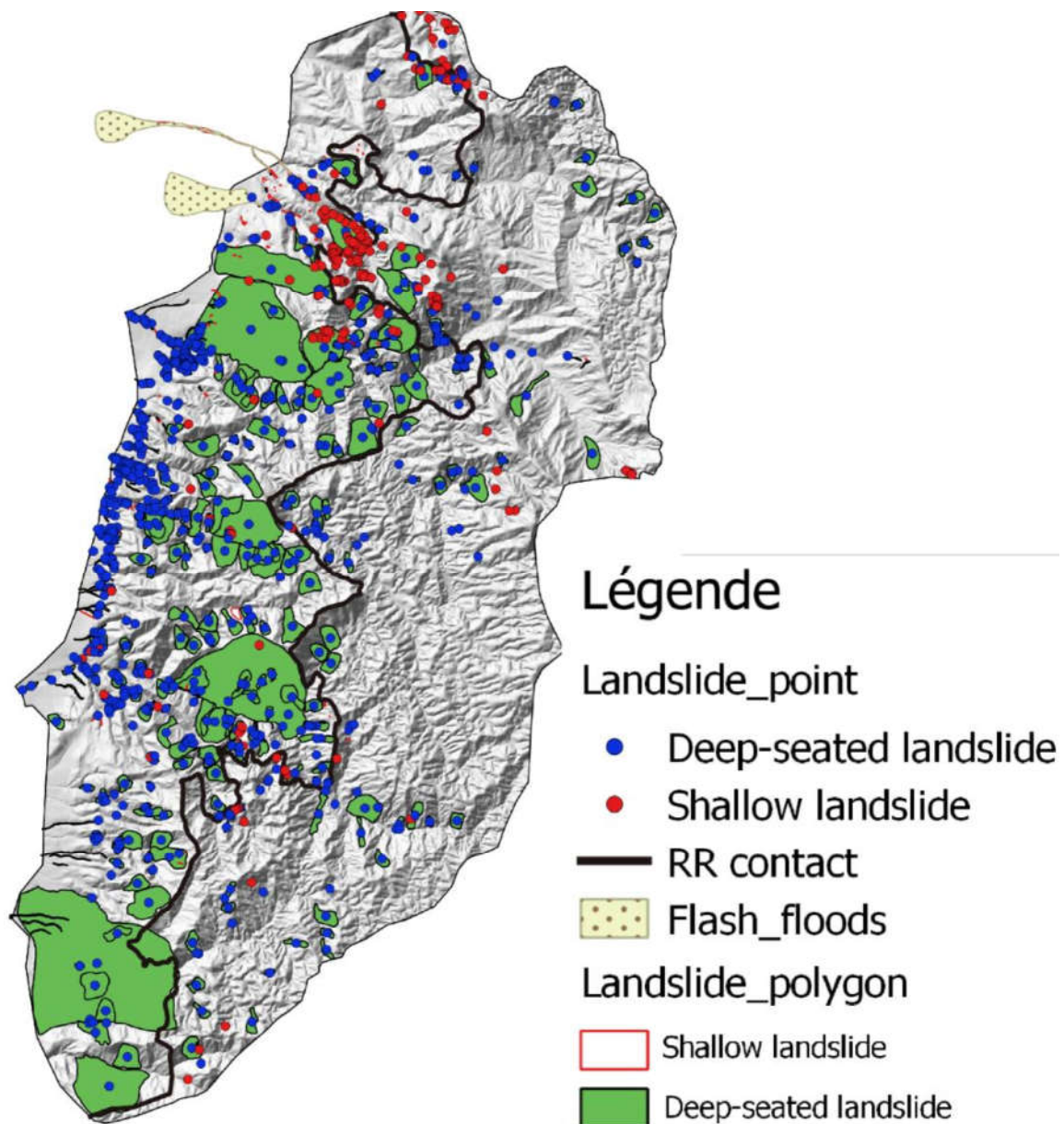


Figure V-4: MTs cartographiés classés en fonction de la profondeur de de leur surface de rupture. L'ombrage (hillshade) provient du MNE de 10 m de résolution (Tableau V-1). Les MTs < 14 000 m² sont représentés par un point afin qu'ils soient visibles à l'échelle des cartes (Kubwimana et al., 2021b).

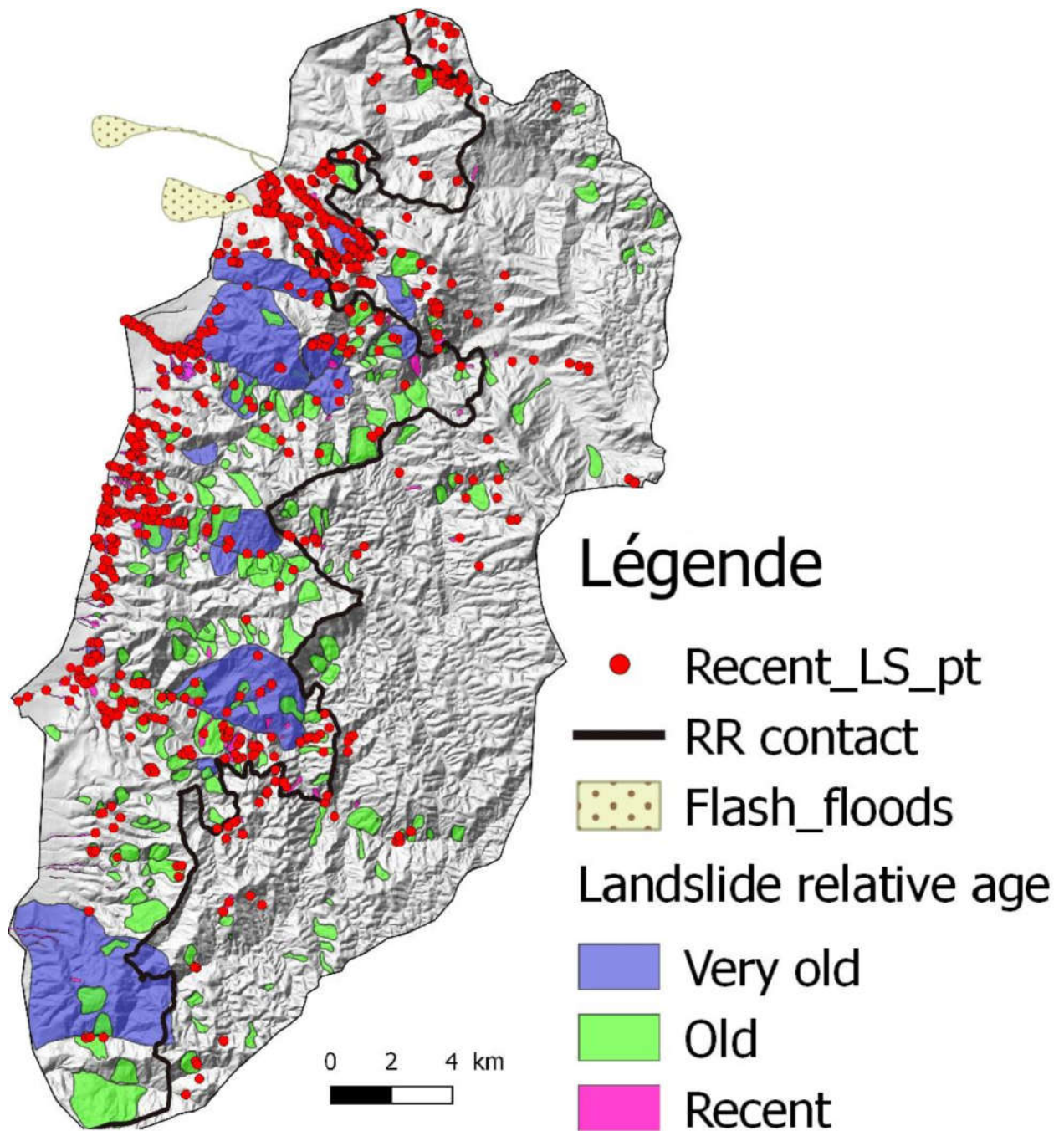
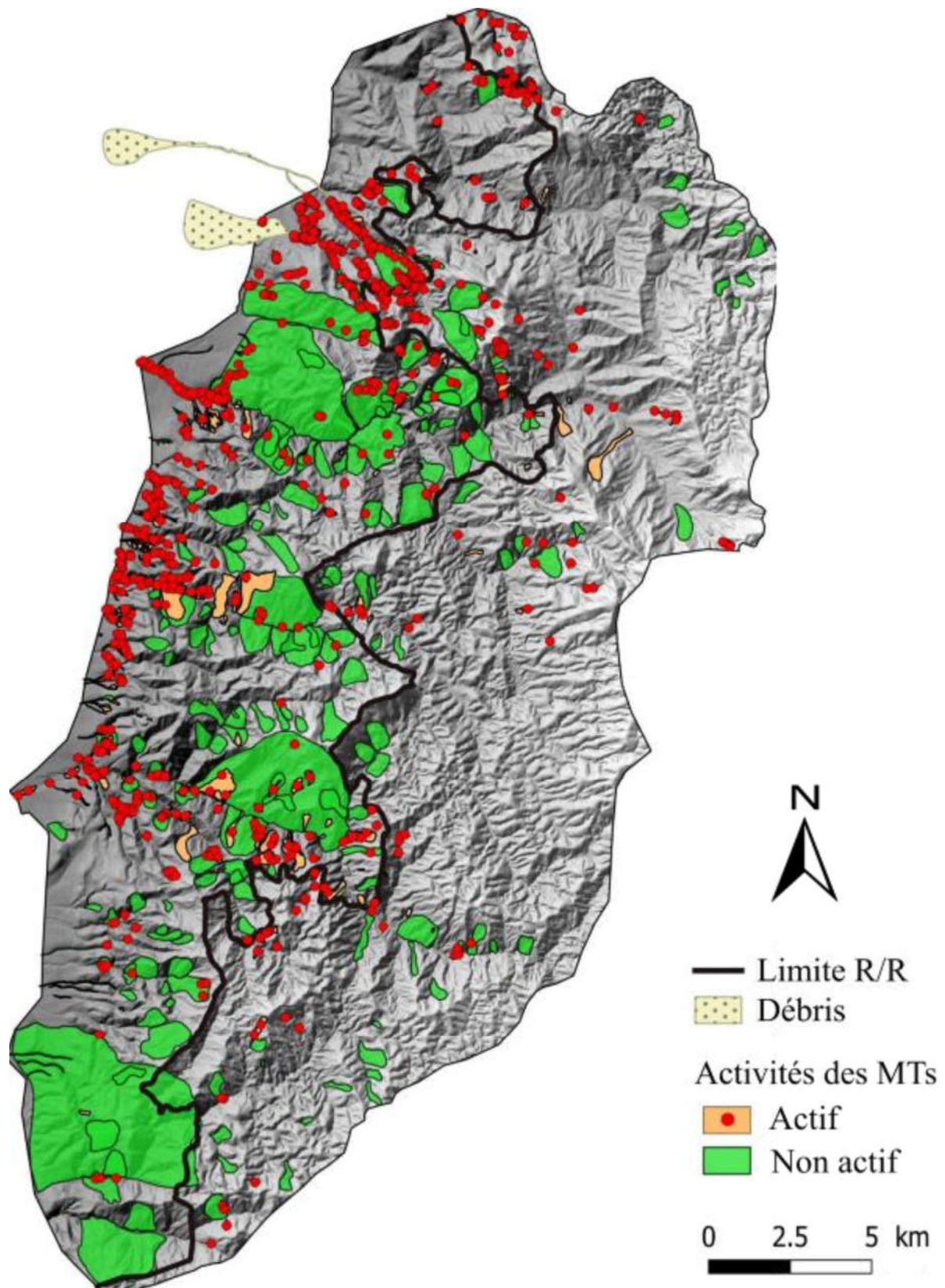


Figure V-5: MTs cartographiés en fonction de leur âge relatif. L'ombrage (hillshade) provient du MNE de 10 m de résolution (Tableau V-1). Les MTs < 14 000 m² sont représentés par un point afin qu'ils soient visibles à l'échelle des cartes (Kubwimana et al., 2021b).



L'ombrage (hillshade) provient du MNE de 10 m de résolution (tableau V-1). Les MTs < 14 000 m² sont représentés par un point afin qu'ils soient visibles à l'échelle des cartes Kubwimana et al., 2021b).

Figure V-6: MTs cartographiés classés en fonction de leur degré d'activité

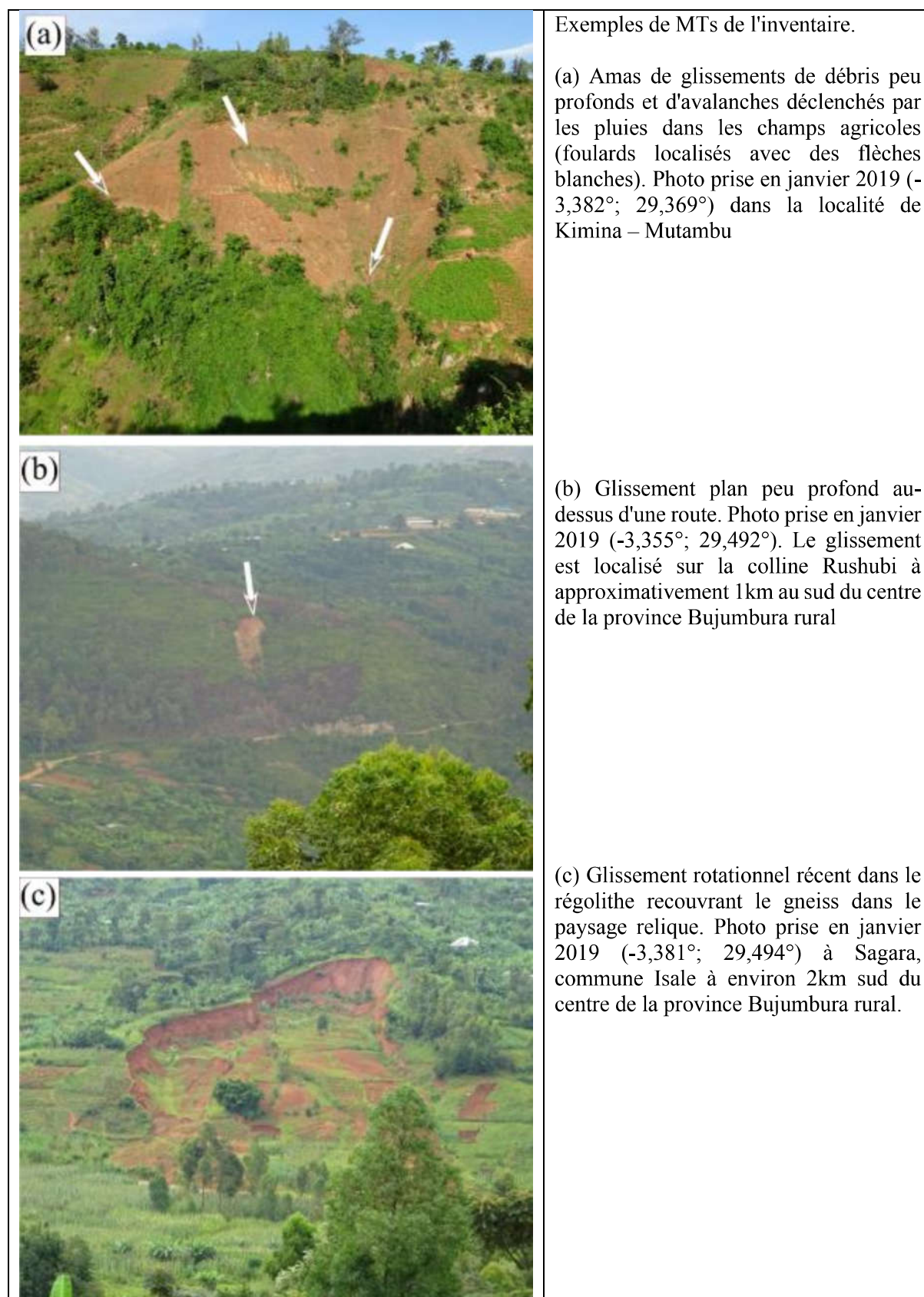


Figure VI-7 : Exemples de MTs de l'inventaire (Kubwimana et al., 2021b)

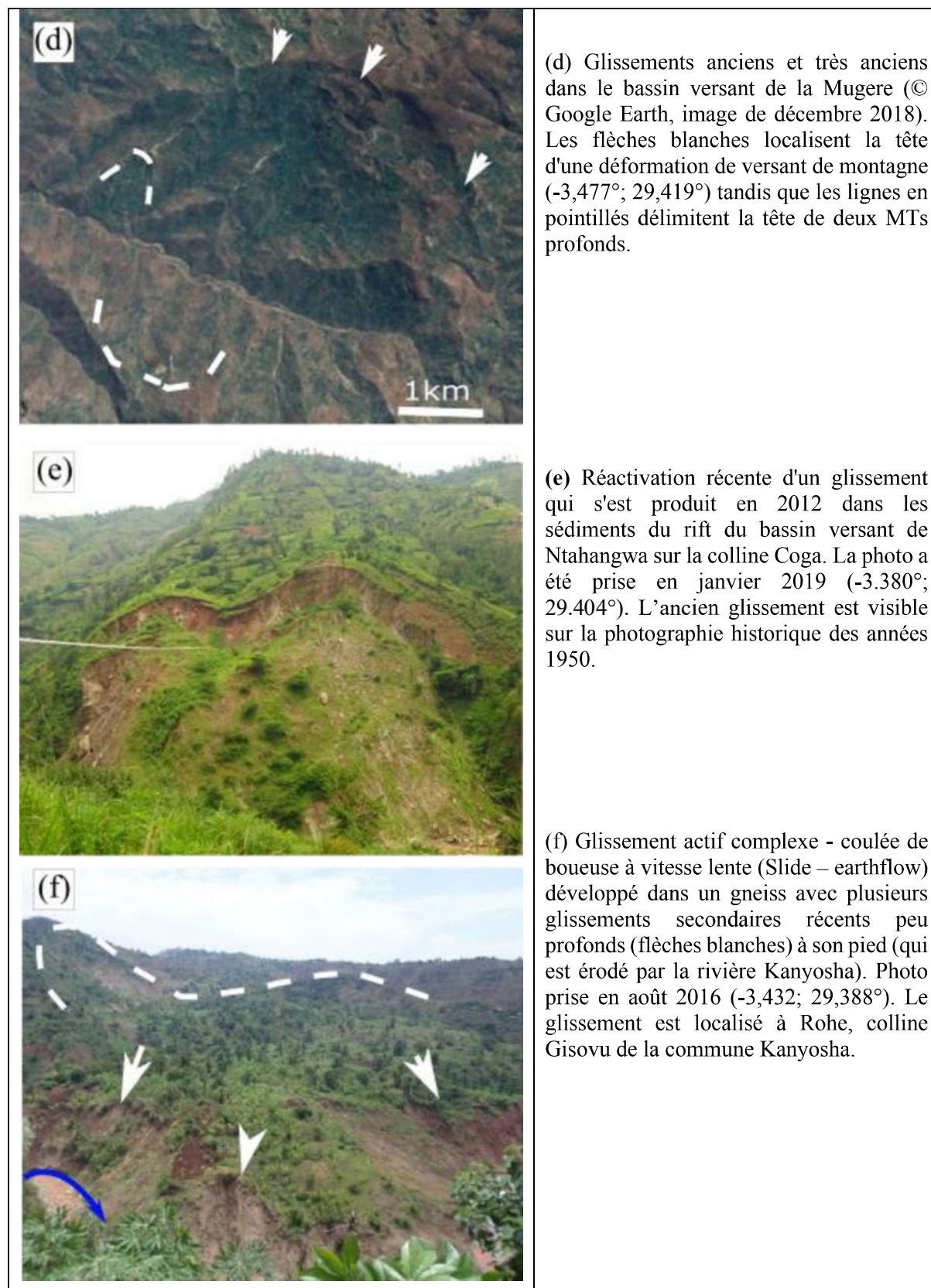


Figure V-8: Exemples de MTs de l'inventaire (Kubwimana et al., 2021b)

Les MTs profonds présentent un large éventail de tailles (entre 106 m² et 18,4 km²) et sont présents dans toutes les tranches d'âge (Figure 8c-f). La majorité de ces MTs sont anciens ou très anciens, et toutes les déformations de montagnes appartiennent à cette dernière catégorie.

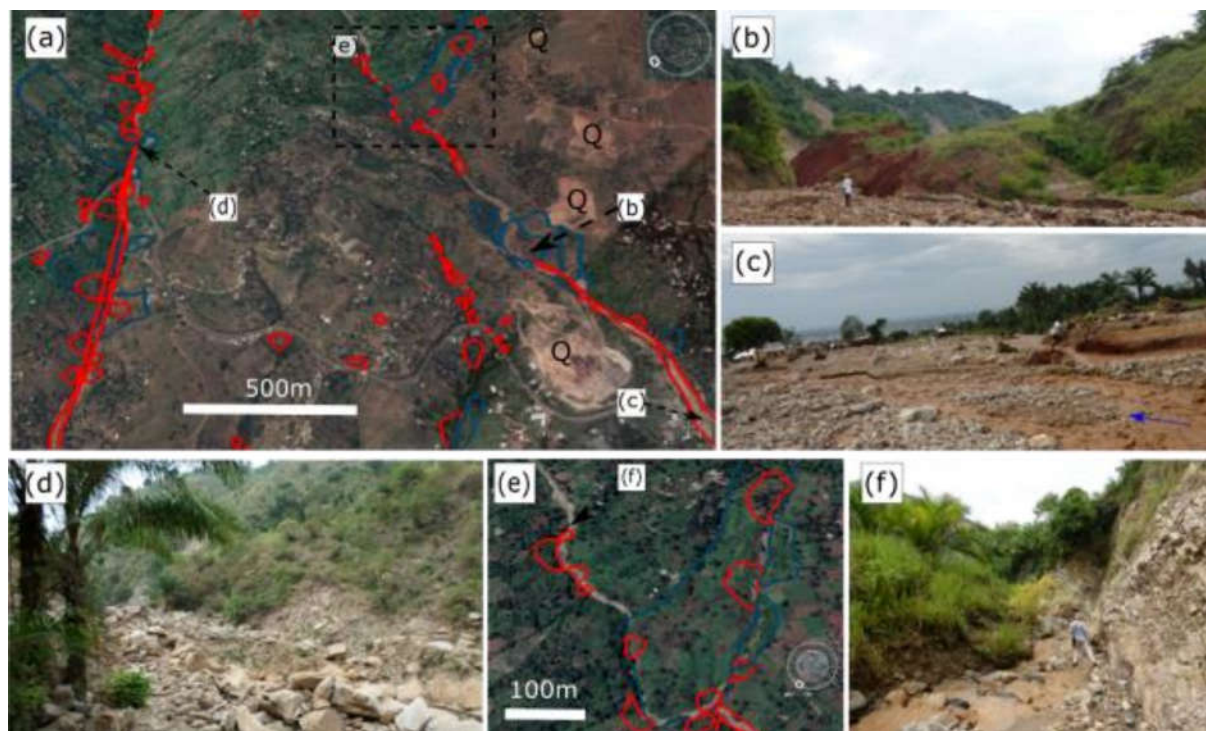


Figure V-9: MTs déclenchés par un événement pluvieux intense en février 2014 dans le nord de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b)

Les MTs peu profonds et profonds sont respectivement en rouge et en bleu. Notez également la présence de carrières et de mines (Q), (b) Pied d'un barrage de glissement de terrain en partie associé aux activités de carrières et de mines qui ont bloqué la rivière. Photo prise en juillet 2014, (c) Exemple d'impact de crue éclair riche en débris dans la rivière Gasenyi résultant de la rupture du barrage de glissement de terrain en amont. La photo a été prise quelques heures après l'événement à ~1,5 km en aval du point indiqué par la flèche C, (d) Coulées de débris avec apport latéral de sédiments provenant d'avalanches de débris. Photo prise en juillet 2014, (e) © Image Google Earth (07 mars 2018) d'une coulée de terre active en contact avec la rivière Gasenyi, (f) Pied de la coulée de terre et apport de sédiments dans le système fluvial. Photo prise en juillet 2014.

Nous avons observé 82 réactivations d'anciens MTs (Figure V-8e) qui ont été classées comme des processus récents et actifs. Ces réactivations concernent 76 glissements et six earthflows. Bien que seulement 0,03% des MTs actifs soient des coulées de terre lentes, elles constituent plus de 34% des zones de glissement de terrain actives. Comme tous les coulées de terre lentes sont déjà présentes dans les années 1950 et que 44% d'entre elles sont actives, cela montre qu'elles peuvent facilement rester actives sur une période de plusieurs décennies. L'observation de terrain et confrontée aux interviews

permet de déduire une déformation du sol de ~ 1 m/an. D'autres grands glissements de types slide-earthflows comme celle de la Figure V-8f, montrent des schémas de déformation qui attestent de mouvements plus actifs. Dans ce cas, nous pouvons certainement supposer que certaines parties du glissement de terrain ont des déplacements de plusieurs mètres par an. La grande majorité des coulées de terre lentes sont connectées à des rivières, elles contribuent donc activement à fournir des sédiments aux systèmes fluviaux (par exemple, Figure V-8f, Figure V-9e,f et Figure V-10b). Les tronçons de rivière situés en aval des coulées de terre lente sont en effet généralement riches en débris (Figure V-9).

Le Tableau V-3 montre des exemples d'impacts des MTs sur les infrastructures et les personnes. Le glissement de terrain et la crue rapide du 9 février 2014 (voir la section V.4.1 pour la description des processus, Figure V-9) ont été l'un des événements les plus destructeurs de la région au cours de la dernière décennie. Un autre exemple de l'impact des MTs a été observé sur la route nationale RN 7 (Figure V-10). La route initiale, construite entre 1980 et 1984, était parallèle au côté nord de la rivière Kanyosha. Cependant, sa conception ne tenait pas compte de la présence de nombreux glissements de terrain, notamment la présence de deux grandes coulées de terre lentes actives. En raison des dommages constants infligés à la route, les autorités n'ont eu d'autre choix que d'abandonner un tronçon d'environ trois kilomètres. Dans l'ensemble, les grandes coulées de terre lentes de la région sont souvent associés à des dommages généralisés, ce qui explique pourquoi elles sont généralement moins habitées que leurs environs. Des dommages envahissants sont également observés le long des systèmes de ravines dans les alluvions (Figure V-11) et le long de certains tronçons de rivière. Les impacts que nous avons décrits (Tableau V-3) sont clairement une sous-estimation des problèmes auxquels la région est confrontée.

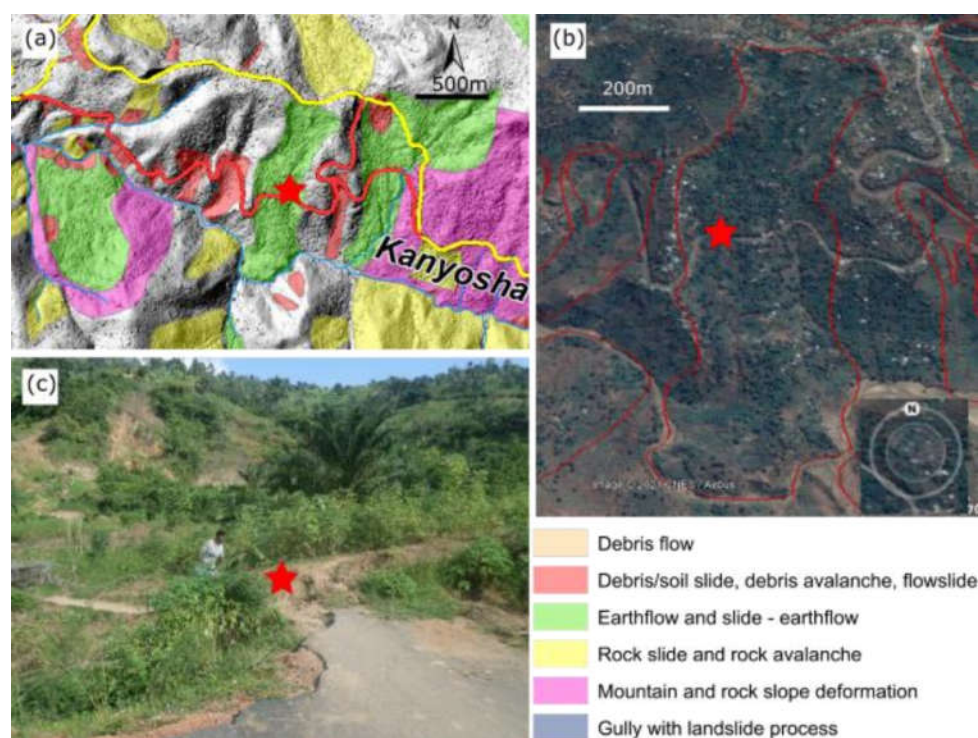
Tableau V-3: Exemples d'impacts associés aux types de glissements de terrain (Kubwimana et al., 2021b).

Type des MTs	ID	Description des impacts
Coulées de débris (Debris flows, flash floods)	1	09/02/2014: Les fortes précipitations qui se sont produites dans cinq communes du nord de Bujumbura ont déclenché de nombreux glissements de terrain, plusieurs coulées de débris et des crues soudaines connexes (, Figure V-9). Faits marquants, 940 maisons, un grand marché ont été détruits, 20 000 sans-abris et 64 décès, dommages à la RN1 et à d'autres routes, ponts et système électriques (IFRC, 2014).
	2	3/2018: six morts dans une un glissement des berges au nord de Bujumbura (Radio Isanganiro, www.isanganiro.org) qui s'est produite après de fortes pluies.
	3	2014: destruction de l'école primaire de Muyira et environ 10 maisons d'habitations
Débris/soil slides, debris avalanches, flowslides	4	2010: destruction de l'EP Nyamutenderi par un MT rotationnel
	5	2016: Grandes fissures dans la construction d'un centre de santé au-dessus de la tête d'un MT
	6	2018-2020: destruction de plus de 35 maisons par MT dans le nord de Bujumbura, pas de victimes
Coulées de terre lentes (Earthflows), MT complexe (slide – earthflows)	7	Destruction complète de certaines parties de la NR7 et des maisons voisines (50) en raison du mouvement généralisé de deux coulées de terre.
	8	2014-2016: affaissement de certaines parties de la NR 7 au PK 14
MTs dans les roches (Rock slides et rock avalanches)	9	2010: La route menant à la centrale hydroélectrique de Mugere a été détruite par une avalanche après de fortes pluies (Nibigira et al. 2015).
Effondrement des berges	10	L'incision des rivières due à l'exploitation des carrières entraîne un surcreusement et un effondrement des berges. Ce processus est omniprésent et s'observe le long de toutes les rivières qui traversent la région.
Ravines avec processus de MT	11	Dommages généralisés aux maisons et aux infrastructures en raison des processus d'érosion généralisés et du recul des ravines. La plupart des ravines étant actives, ce processus est observé en de nombreux endroits.
Déformations de montagne	12	Aucun impact enregistré, ni observé sur le terrain

Ces impacts ont été enregistrés dans des sources d'archives et/ou observés directement sur le terrain. Ils sont localisés dans la Figure V-2a avec leurs identifiants.

V.4.2. Causes et déclencheurs des glissements de terrain

Nos données montrent que l'angle de la pente est le principal facteur de contrôle des MTs (Tableau V-4). Ce contrôle est particulièrement important pour les MTs peu profonds. Ils ont tendance à se concentrer sur des pentes $> 25^\circ$ (Figure V-12) et cet effet est légèrement plus marqué dans le paysage relique. Dans l'ensemble, les MTs profonds se produisent sur des pentes moins abruptes, cependant, ce contrôle est plus important pour les MTs actifs, généralement plus petits. Les sédiments du rift et le gneiss sont tous deux favorables aux MTs (Figure V-12k-m). Ces deux lithologies sont les roches dominantes dans le paysage rajeuni (la lithologie des sédiments du Rift ne se trouve que dans cette région). Globalement, le contrôle de l'angle de pente est plus important dans ces deux lithologies (Figure V-12n-q). L'exposition des versants n'est pas significative pour les MTs profonds et, à cette échelle spatiale de cette étude, un lien entre la présence de failles ne peut être mis en évidence. Pour les processus actifs, une petite association est observée pour les pentes orientées sud à sud-ouest (Figure V-12j).



a – Localisation de la route nationale 7 dans le bassin versant de la Kanyosha avec la distribution des MTs inventoriés. La route actuelle est en jaune, l'ancienne section est en rouge. L'ombrage des collines est dérivé d'un DSM de résolution 1-m construit à partir d'images tri-stéréo de Pléiades (Tableau V-1); b – Zoom sur l'une des coulées boueuses à vitesse lente active (© image Google Earth du 05 août 2018); c – Section endommagée de l'ancienne route RN 7. Photo prise en juin 2016 ($-3,431^\circ$; $29,393^\circ$) ; (Kubwimana et al., 2021b).

Figure V-10: Impact des MTs sur la route nationale NR7

La zone d'étude s'étend sur 490 km², dont 237 km² et 253 km² se trouvent respectivement dans les paysages rajeunis et reliques. Près du cinquième de la zone d'étude (98,3 km²) est affecté par des glissements de terrain. En outre, de nombreux MTs se sont développés dans des ruptures de pente préexistantes. Lorsque les MTs sont considérés séparément (c'est-à-dire sans superposition), leur superficie totale cumulée est de 107 km² (Tableau V-2), ce qui signifie que 8,7 km² de ruptures de pente sont situés dans des MTs antérieurs.

Il existe une différence importante dans le pourcentage du paysage affecté par les MTs dans les paysages rajeunis (79,6 km², 34% de la superficie totale) et relictuels (27,4 km², 11%). Si l'on ne tient pas compte des déformations des pentes des montagnes, les zones de glissement de terrain représentent 48 km² et 11 km² (23 % et 5 %) pour les paysages rajeunis et reliques, respectivement.

-La présence de MTs profonds est positivement associée au rajeunissement du paysage (Tableaux V-2&4). La superficie totale couverte par les MTs profonds est beaucoup plus importante que celle des MTs peu profonds (102,5 km² contre 4,5 km²).

-Les MTs récents couvrent une superficie de 5,3 km². 88% de cette superficie est liée à l'apparition de 458 glissements profonds assez importants.

-Les MTs actifs couvrent une superficie de 14,2 km². L'analyse de la distribution des tailles montre que les MTs ont plus importants dans le paysage rajeuni (Figure V-13e).

Les différences de population sont beaucoup plus importantes lorsqu'on examine l'activité des glissements de terrain, les MTs actifs sont plus petits quelle que soit la position dans le paysage (relique/rajeuni) ou la profondeur (Figure V, 9a-d). Les MTs récents sont plus petits (Figure V-13f). La plupart des plus grands MTs récents se trouvent dans le paysage rajeuni.

-Les ravines sont principalement observées dans le paysage rajeuni (Figure V-2a). Les ravines qui se développent dans les MTs sont en général associées à des arthflows actifs. Cependant, la majorité des ravines ne sont pas la conséquence d'un processus de glissement de terrain. De telles ravines se trouvent dans la partie inférieure de la zone d'étude, à la périphérie de la ville de Bujumbura, dans les sédiments non consolidés du Rift (Figures V-2a & 11). Sur les 93 ravines cartographiées dans cette région, 55 ont été initiées après les années 1950. 79 ravines sont actives et montrent des signes clairs d'extension avec un recul moyen de la coupe de tête de ~100 m au cours des 70 dernières années, le recul le plus important étant > 250 m. Les MTs sont fréquents le long des berges de ces ravines. Dans certains cas, l'érosion des ravines déclenche des ruptures de pente relativement importantes (Figure V-11).

Depuis les années 1950, la zone bâtie et le réseau routier se sont largement étendus, notamment à la périphérie de la ville (Figure V-11). Les MTs qui sont directement liés au réseau routier sont

généralement de petits glissements/avalanches/coulées de débris et des chutes de pierres, généralement observés après une tempête de pluie. Ils sont observés le long des coupures de routes ainsi qu'au niveau des caniveaux routiers et autres zones de concentration des eaux de ruissellement associées aux surfaces imperméables. Des MTs sont également observés le long des berges des cours d'eau (fréquemment de type slide) et sur les sites d'exploitation de carrières et de mines (Figure V-9). Au cours des dernières décennies, l'extraction de matériaux du lit des rivières a augmenté (parallèlement à la croissance de la ville). En conséquence, les schémas sédimentaires des rivières sont fortement perturbés et donc le débit des rivières. Une vague d'incision accrue des rivières est observée en de nombreux endroits. Cela conduit à une érosion locale et à un sapement des berges, ce qui peut provoquer des glissements de terrain, en particulier dans les alluvions.

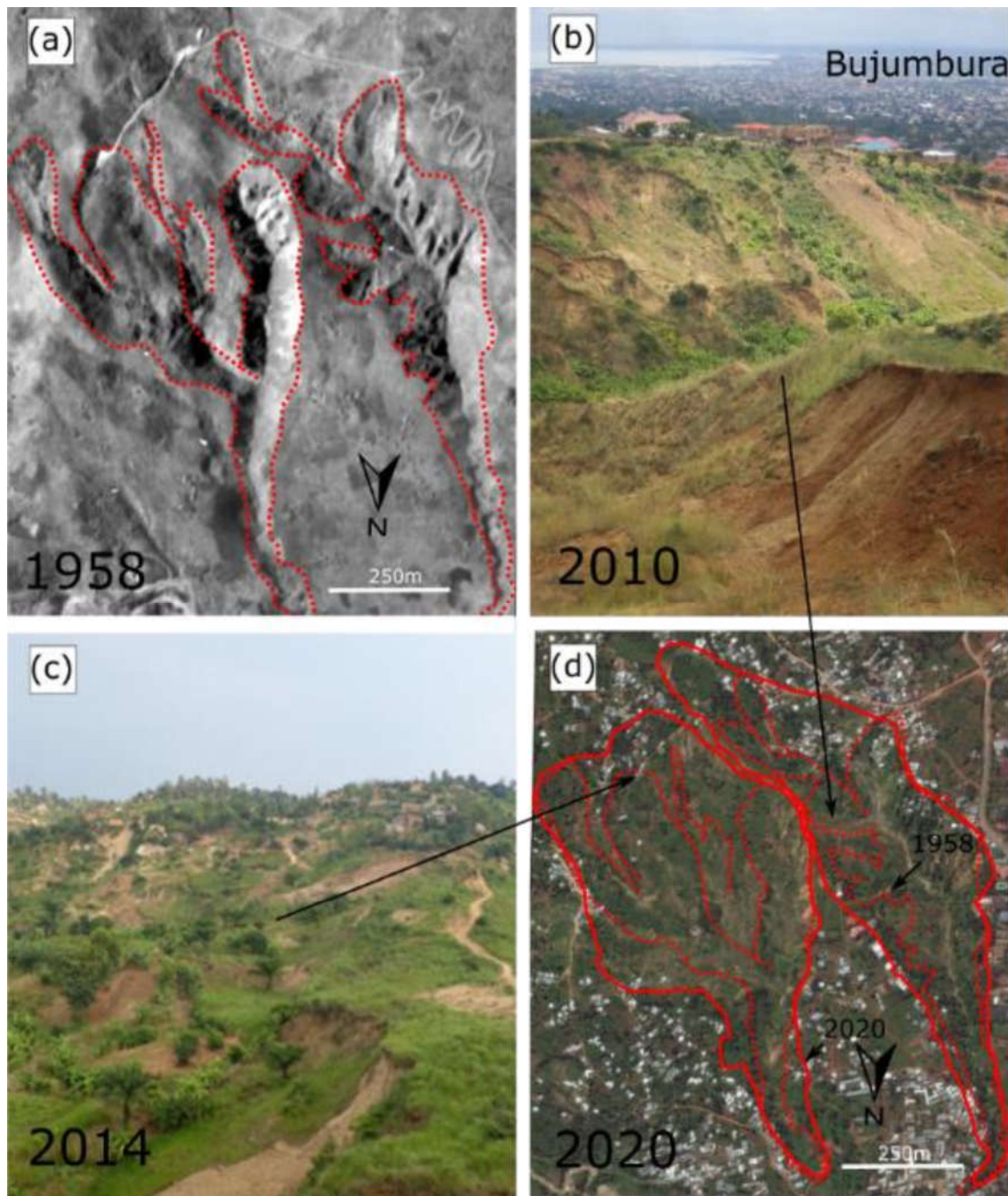


Figure V-11: Exemple de deux ravines avec processus de glissement de terrain, au niveau de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b)

La séquence d'images illustre l'évolution rapide des ravines et de la zone bâtie entre 1958 et 2020. (a) Orthomosaïque historique de 1958, (b) Photo récente de la ravine de droite (©Alexis Ciza), (c) Photo récente du grand glissement de terrain qui s'est développé dans la ravine de gauche, (d) © Image Google Earth du 28 janvier 2020. Les lignes en pointillés représentent les limites des ravines en 1958.

Tableau V-4: Association entre l'occurrence des mouvements de terrain (MTs) et les facteurs de contrôle.

MP: MT profond, MS: MT peu profond, MA: MT actif, MN: MT non actif, MPA: MT profond actif profond, MSA: MT peu profond actif, RR: différenciation du relief en paysages rajeunis et reliques (Kubwimana et al., 2021b).

Factor de contrôle	Type	Zone concernée	Nb des MTs	Degré de liberté	Chi-2	Valeur critique (p=0.05)
RR	MT	Zone d'étude	792	1	213.2	3.8
RR	MP	Zone d'étude	598	1	262.8	3.8
RR^a	MS	Zone d'étude	194	1	1	3.8
Lithologie	MP	Zone d'étude	598	5	119.3	11.1
Lithologie	MP	Paysage rajeuni	487	5	27.7	11.1
Lithologie^a	MP	Paysage relique	111	5	8.2	11.1
Lithologie	MA	Zone d'étude	409	5	164.4	11.1
Pente	NL	Zone d'étude	189	5	10.6	11.1
Pente	MP	Zone d'étude	490	8	72.2	15.5
Pente	SL	Zone d'étude	194	8	374.4	15.5
Pente	MT	Paysage rajeuni	588	8	146.4	15.5
Pente	MP	Paysage rajeuni	487	8	76.6	15.5
Pente	MS	Paysage rajeuni	111	8	83.9	15.5
Pente	MP	Paysage relique	111	8	33.7	15.5
Pente	MT	Paysage relique	204	8	166.5	15.5
Pente	MS	Paysage relique	93	8	176.4	15.5
Pente	MP	Gneiss	332	8	54.5	15.5
Pente	MP	Granite	156	8	26.7	15.5
Pente	MP	Quartzite	64	8	34.8	15.5
Pente	MP	Rift sediments	32	7	58.9	14.1
Pente	MT	Zone d'étude	792	8	231.1	15.5
Pente	MA	Zone d'étude	599	8	251	15.5
Pente	MN	Zone d'étude	193	8	45.1	15.5
Pente	MP _A	Zone d'étude	409	8	208.9	15.5
Pente	MS _A	Zone d'étude	190	8	547.4	15.5
Exposition	MA	Zone d'étude	599	7	16.4	14.1
Exposition^a	MN	Zone d'étude	193	7	3.3	14.1

^a Facteur de contrôle des MTs non significatif (niveau de confiance = 95%)

Nous avons inventorié quatre groupes de MTs récents (10 février 2014, 307 glissements de terrain, 2007, 36 glissements de terrain, 2010, 44 glissements de terrain, mars 2018, 13 glissements de terrain). Ces MTs (pour la plupart peu profonds), ont tous été signalés comme étant déclenchés par de fortes précipitations. Les entretiens nous ont également permis de contraindre le moment de l'apparition de 14 autres glissements de terrain, tous associés à des précipitations. Cependant, seule la chronologie des occurrences les plus problématiques a pu être contrainte, pour la plupart des MTs récents (en particulier ceux de taille/impact limité ou qui se sont produits de manière isolée), les informations sur la chronologie ou l'événement déclencheur n'ont pas pu être obtenues à partir des entretiens avec les résidents locaux. Le timing contraint entre deux images satellites ultérieures dans © Google Earth montre que ces MTs se produisent généralement pendant la saison des pluies. En ce qui concerne le rôle potentiel des tremblements de terre dans l'apparition des glissements de terrain, aucune activité de glissement de terrain n'a été signalée ou mentionnée par les résidents interrogés, ce qui corrobore avec les conclusions de Dewitte et al. (2021).

V.5. Discussion

V.5.1. Inventaire des MTs et fiabilité des données

Avec un inventaire de plus de 1200 glissements de terrain, nous avons identifié quatre fois plus de ruptures de pente que l'étude à l'échelle régionale de Depicker et al. 2020. Si l'on compare avec les études locales précédentes qui ont identifié quelques dizaines de MTs (Nibigira et al., 2015; Shirambere et al. 2018), le contraste est encore plus grand. Une telle amélioration de l'inventaire montre clairement qu'avec des moyens limités (travail de terrain, entretiens, © *images Google Earth*), il est possible de collecter des connaissances à l'échelle locale très explicites sur le plan spatial. L'utilisation de photographies aériennes historiques était importante pour déterminer davantage la chronologie des MTs profonds et des ravines. L'accès à ces photographies, pour autant qu'elles existent, est plus difficile car les institutions auprès desquelles elles peuvent être obtenues ne sont pas toujours faciles à identifier.

Bien que notre inventaire fournisse un ensemble de données unique, il souffre encore d'incomplétude. La part réelle des MTs peu profonds est sous-estimée car ils ont tendance à disparaître assez rapidement après leur déclenchement, un processus qui est également observé dans d'autres régions tropicales (Broeckx et al., 2018; Jacobs et al., 2017). En outre, de nombreux MTs sont trop petits pour être identifiés dans © Google Earth. L'imagerie © Google Earth couvre 20 ans dans les reliefs de Bujumbura, avec parfois jusqu'à 20 images sur cette période (Depicker et al., 2021). Cependant, la plupart de ces images couvrent les 5 dernières années, ce qui introduit un biais temporel supplémentaire dans l'inventaire. Bien qu'une telle fenêtre temporelle de 20 ans reste relativement étroite par rapport à ce qui

peut être réalisé dans des régions où plusieurs couvertures de photographies aériennes de bonne qualité sont disponibles et où le travail de terrain a été systématiquement mené pendant plusieurs décennies (p.ex., Samia et al., 2017)), notre ensemble de données de 403 MTs peu profonds est suffisamment robuste pour analyser les modèles spatiaux des ruptures de pente (Depicker et al., 2020). Pour les MTs profonds, nous manquons certainement certains des éléments les plus anciens/petits dont la morphologie se modifie avec le temps, en particulier en ce qui concerne l'altération profonde qui est présente dans cet environnement tropical (Dille et al., 2019). Les MTs de type avalanche, dont la signature topographique est généralement moins prononcée que celle des types slides, sont certainement sous-représentés aussi. Malgré ces problèmes d'exhaustivité de l'inventaire, si l'on considère les données auxiliaires utilisées dans cette recherche ainsi que les investigations de terrain qui ont été menées, on peut affirmer que cet inventaire multi-temporel est suffisamment exhaustif et précis pour comprendre comment les MTs profonds se produisent dans les reliefs de Bujumbura.

Les visites de terrain ont permis d'identifier des MTs actifs dont les déformations du sol étaient trop limitées pour être cartographiés visuellement à partir d'images © Google Earth. Cependant, une telle évaluation n'a pas pu être effectuée de manière exhaustive partout dans la zone d'étude et plusieurs MTs actifs ont probablement été manqués. En théorie, une meilleure compréhension des déformations lentes du sol et de l'état d'activité des MTs pourrait être évaluée par télédétection radar (Dini et al., 2019), une technique qui a été appliquée avec succès dans la ville voisine de Bukavu (Jacobs et al., 2018).

Cependant, le nombre relativement faible de zones naturelles cohérentes telles que les affleurements rocheux par rapport aux environnements moins altérés et l'orientation dominante Nord-Sud de nombreuses collines sont des facteurs limitant pour une telle approche. De plus, bien que reliefs soient peuplés, l'environnement bâti n'est pas aussi dense qu'à Bukavu (Nobile et al., 2018). Ces raisons expliquent pourquoi une analyse quantitative de l'activité des MTs basée sur le radar est restée jusqu'à présent difficile dans les reliefs de Bujumbura (Dille et al., 2019).

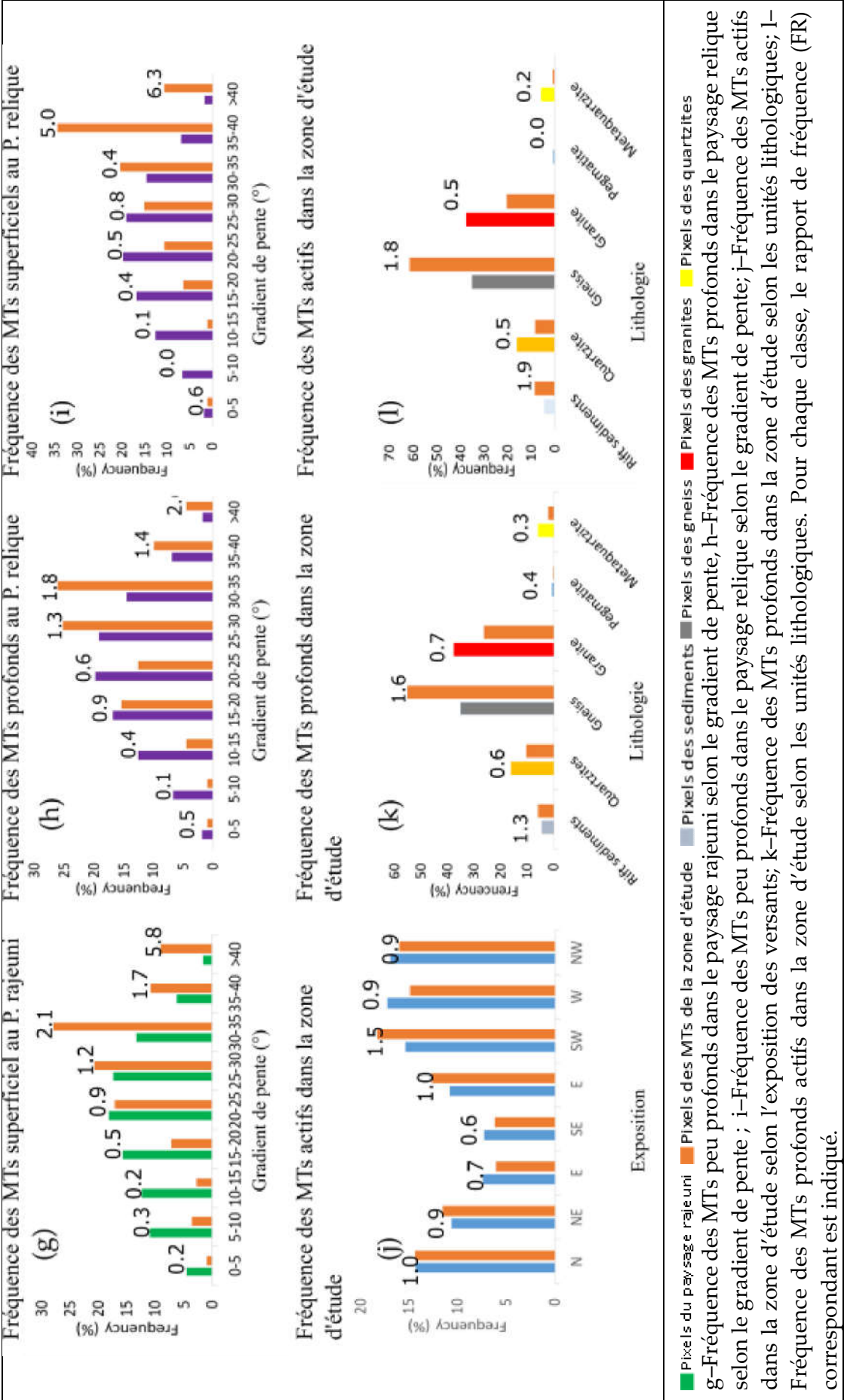


Figure V-13: Distributions de fréquence des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b)(suite)

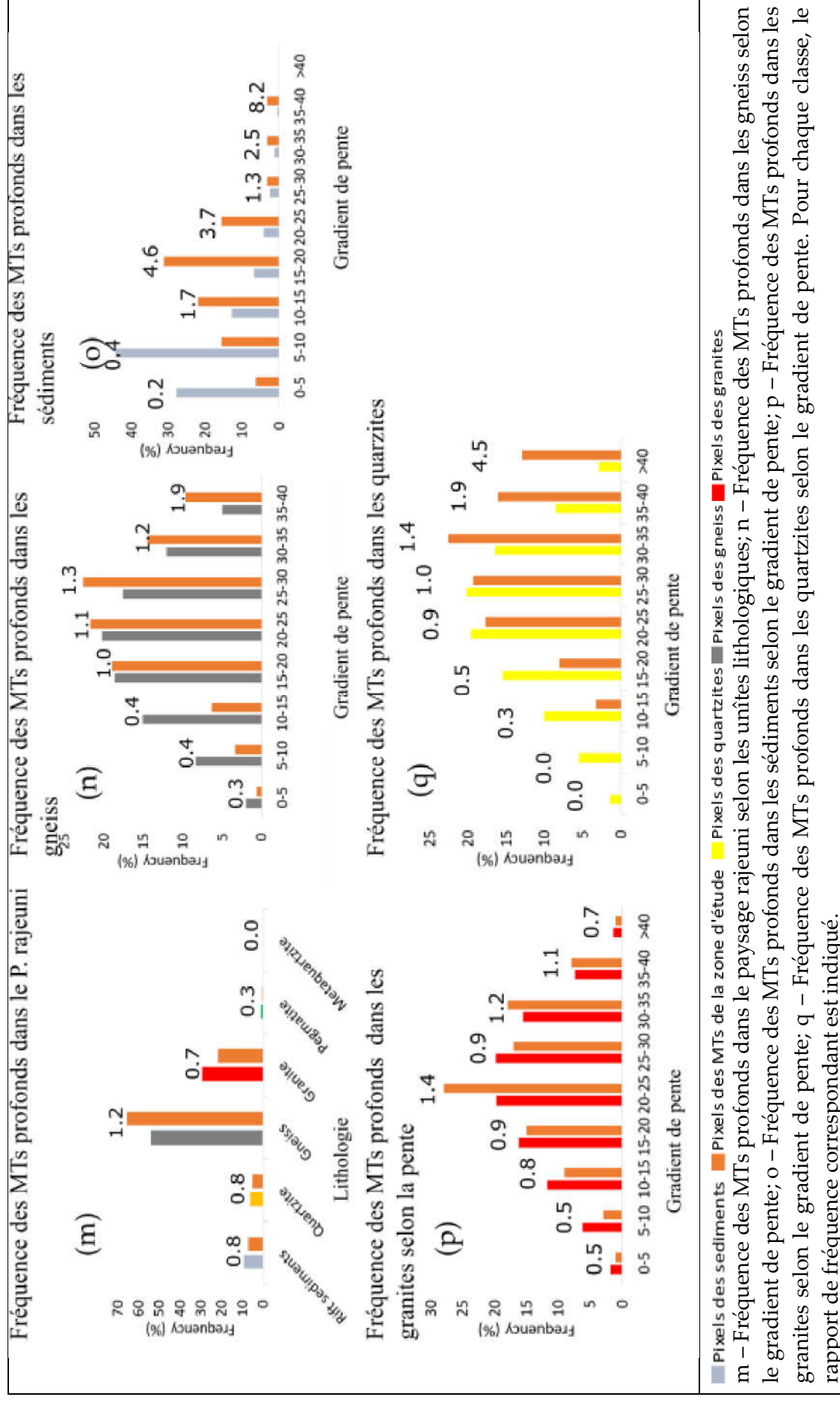


Figure V-14: Distributions de fréquence des mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura (Kubwimana et al., 2021b).

-Les barres orange représentent la distribution de fréquence des MTs selon la zonation spatiale. Chaque glissement de terrain est représenté par un pixel sur sa zone de rupture pour tous les pixels en dehors des corps de glissement de terrain dans l'ensemble de la zone d'étude, des paysages rajeunis et reliques (barres bleues, vertes et violettes respectivement).

-Les autres barres (gris, bleu-gris, rouge et jaune) représentent la distribution des MTs dans les différentes unités de lithologies, respectivement dans le gneiss, les sédiments de rift, le granite et le quartzite.

V.5.2. Processus de glissement de terrain: causes et déclencheurs

Le paysage des pentes des collines de Bujumbura est fortement dominé par les processus de destruction massive. Même si l'on ne tient pas compte des mountain et rock slope deformation, 12 % du paysage est affecté par des glissements de terrain. Cette densité est comparable à celle d'autres régions fortement exposées aux MTs dans des contextes climatiques différents (p.ex, Samia et al., 2017; Handwerger et al., 2019). Le rajeunissement du paysage est clairement un facteur important dans l'apparition des MTs profonds, leur densité étant particulièrement élevée dans cette partie du paysage. L'importance de la migration des knicpoints sur la distribution des MTs est fréquemment mise en évidence dans les pentes de seuil (Larsen & Montgomery, 2012). Notre étude met clairement en évidence que, même au niveau local, la caractérisation des processus de glissement de terrain doit tenir compte du contexte géomorphologique associé à l'évolution à long terme du paysage. Contrairement à ce qui est démontré par Depicker et al. (2021) à l'échelle du Rift NTK, le rajeunissement du paysage ne semble pas avoir d'impact sur la distribution en taille des glissements peu profonds dans les collines de Bujumbura. Cette différence doit probablement être recherchée dans l'étendue plutôt limitée de notre zone d'étude qui ne présente pas un grand gradient d'activité sismique, alors que la fracturation sismique des versants a été identifiée par Depicker et al. 2021 comme un mécanisme important pour expliquer les différences dans les distributions de taille entre les paysages rajeunis et relictuels.

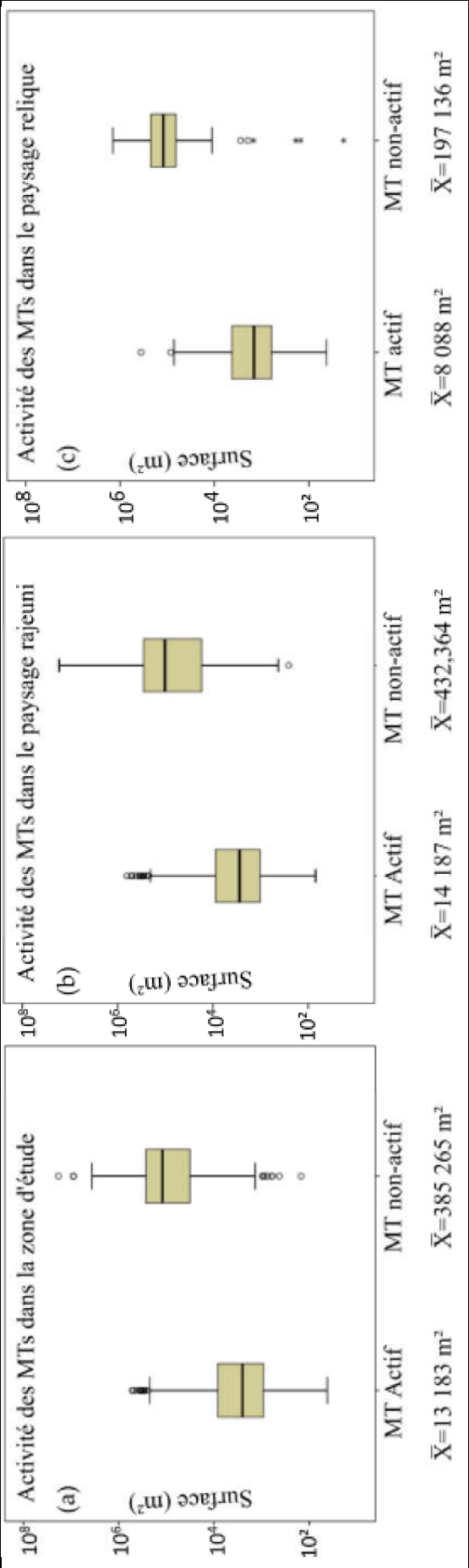
La distribution non-homogène des types de roches et de leur altération dans la zone d'étude explique certaines des différences dans les modèles de glissement de terrain. Par exemple, le gneiss offre ici des conditions plus favorables aux MTs que le granite, ce qui pourrait être lié aux différences de résistance des masses rocheuses. Le rôle du gneiss a également été mis en évidence dans un environnement similaire, juste au nord du rift NTK, dans les montagnes Rwenzori (Jacobs et al., 2017). Le contexte sismo-tectonique et la variété des âges et des expositions des lithologies sont des facteurs qui sont pris en compte dans les différences de résistance des masses rocheuses (Clarke & Burbank, 2011). En outre, l'altération climatique et le développement associé d'un régolithe épais ne peuvent pas être ignorés (par exemple la Figure V-7c). La formation du régolithe peut dépendre fortement de conditions géologiques

et topographiques très locales (Dille et al., 2019). Les eartflows sont des processus lents qui dépendent de la disponibilité de matériaux mobiles tels que le régolithe. Leur distribution et leur dynamique en sont certainement influencées.

La différence significative de taille des MTs observée entre les MTs actifs (généralement récents) et les MTs profonds non actifs (Figures V-2a,15a-c,16d) pourrait être due au fait que la période d'observation est trop courte pour saisir l'impact d'événements déclencheurs de grande magnitude tels que les grands tremblements de terre (Dewitte et al., 2021; Marc et al., 2019). En outre, nous savons que les conditions climatiques ont changé au cours des dernières dizaines de milliers d'années (Felton et al., 2007; Wassmer et al., 2013), le climat étant également un facteur clé agissant comme cause et déclencheur des MTs profonds (Dille et al., 2019; LaHusen et al., 2020). Il est important de noter que la taille des anciens glissements de terrain, comme par exemple le glissement de terrain d'Ikoma dans la région voisine de Bukavu en R.D. Congo (Dille et al., 2019), reflète une histoire d'accumulation de phases de déformation de la pente (Tanyaş et al., 2018). En d'autres termes, la taille réelle d'un ancien glissement de terrain n'est pas nécessairement la conséquence d'une seule rupture de pente associée à un événement déclencheur de forte magnitude. Les nombreuses réactivations que nous avons détectées dans la région de Bujumbura soutiennent ce scénario de dépendance où la taille des MTs augmente avec le temps (Temme et al., 2020).

Notre étude atteste que presque tous les MTs récents sont déclenchés par les pluies. Ceci est cohérent avec l'analyse régionale de (Dewitte et al., 2021; Monsieurs et al., 2018). Ces glissements/avalanches/coulées de débris, généralement de petite taille, sont également observés le long des coupures de routes, des caniveaux et d'autres zones de concentration des eaux de ruissellement. Ainsi, ces interventions humaines dans le paysage exacerbent l'impact des précipitations sur les glissements de terrain. L'analyse des photographies historiques révèle que l'étendue de la forêt sur les pentes des reliefs de Bujumbura était déjà limitée dans les années 1950. La déforestation ne peut donc pas être invoquée comme un facteur de glissement de terrain peu profond (Dewitte et al., 2021).

L'exploitation incontrôlée de matériaux de construction dans les lits/flancs des rivières modifie profondément la dynamique et la morphologie de ces dernières. Dans de nombreux endroits, l'incision accrue des rivières déclenche l'apparition ou l'accélération des glissements de terrain. Les modifications de l'hydrologie de surface et de subsurface associées à l'extension des zones bâties et du réseau routier, ainsi que les modifications de la dynamique fluviale liées à l'exploitation des matériaux, seraient également à l'origine de l'émergence de nouveaux ravins. Le développement rapide et continu des ravines et les processus de glissement de terrain associés suggèrent que la plupart d'entre elles n'ont pas encore atteint leur équilibre.



Distribution de la taille des MTs en m^2 en fonction de leur activité dans (a) l'ensemble de la zone d'étude ; (b) le paysage rajeuni et ; (c) le paysage relique. Les box-plots donnent les quartiles inférieurs, supérieurs et la médiane. Les moustaches de chaque boîte représentent 1,5 fois l'écart interquartile. Les valeurs aberrantes sont représentées par des points. Pour chaque box-plot, la surface moyenne des MTs est fournie

Figure V-15: Distribution de la taille des mouvements de terrain (m^2) à l'aide des box-plots (boîtes à moustaches) ; Kubwimana et al., 2021b).

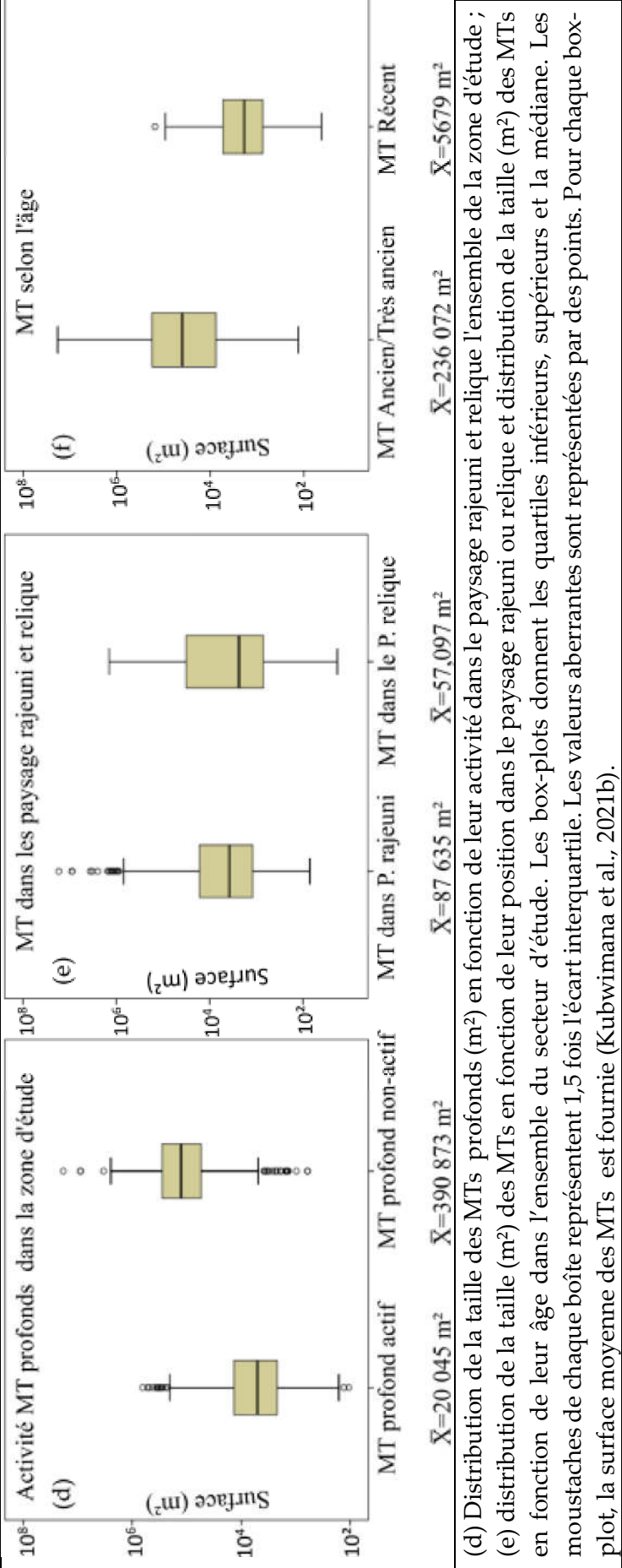


Figure V-16: Distribution de la taille des mouvements de terrain (m²) à l'aide des box-plots (boîtes à moustaches) (suite); (Kubwimana et al., 2021b).

V.6. Conclusion du chapitre V

Dans ce travail, nous avons cherché à caractériser et à mieux comprendre les occurrences des MTs dans les reliefs autour de Bujumbura. Nous avons montré que cette région est très exposée aux glissements de terrain, avec >20% du paysage affecté par diverses ruptures de pente. Ceci est similaire à certaines des régions les plus exposées aux MTs dans différents contextes climatiques. Nous avons produit un inventaire multi-temporel contenant 1 286 MTs et ravines. **Les MTs étant classés en processus actifs et non actifs, anciens/très anciens et récents, peu profonds et profonds.**

-Nos données montrent que la plupart des **MTs récents**, c'est-à-dire ceux qui se sont produits depuis les années 1950, sont des ruptures de pente relativement petites et peu profondes. Ces MTs, généralement des coulées de débris et des avalanches de débris, sont favorisés par les pentes les plus raides et sont généralement déclenchés par de fortes précipitations. Pour les événements pluvieux les plus importants, des groupes de MTs sont observés avec la présence de processus en cascade qui conduisent à la formation de coulées de débris.

-**Les MTs peu profonds** peuvent être influencés par les interactions avec le réseau routier et l'exploitation des carrières des rivières.

- **Les MTs profonds** sont les plus importants en termes de surface couverte, ils sont contrôlés par la lithologie et l'altération des roches et se produisent principalement dans les paysages rajeunis. La taille plus importante des anciens MTs profonds suggère qu'ils pourraient être liés à des événements déclencheurs de grande magnitude tels que des tremblements de terre qui n'ont pas été capturés pendant notre courte période d'observation. L'évolution des conditions climatiques au cours des derniers milliers d'années pourrait également expliquer cette différence de taille. Cependant, la présence de nombreuses réactivations montre également que l'augmentation de la taille du glissement de terrain au fil du temps est un processus commun qui ne nécessite pas de faire appel à des conditions environnementales extrêmes et/ou changeantes. Les coulées de terre lentes (Earthflows) sont parmi les processus profonds avec les ruptures de pente qui montrent les signes d'activité les plus évidents. Ils sont généralement connectés au système fluvial et contribuent de manière significative en tant que fournisseur de sédiments.

La plupart des ravines sont actives, en dehors de celles qui sont associées à la dynamique des coulées de terre lentes. Elles ont une forte association avec le développement urbain de la région et leur développement déclenche souvent des glissements de terrain.

**CHAPITRE VI. DEVELOPPEMENT ET ANALYSE DE LA
SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS
LES RELIEFS DE BUJUMBURA**

VI. DEVELOPPEMENT ET ANALYSE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA

VI.1. INTRODUCTION

Des analyses détaillées de la susceptibilité aux MTs sont nécessaires au niveau local pour mieux comprendre les processus de MTs. En effet, les analyses de susceptibilité permettent d'étudier les relations entre des facteurs de contrôle et des processus de MTs, etc. Les analyses de susceptibilité à ces échelles permettent aussi de fournir des documents qui peuvent être exploités par les autorités qui s'occupent de l'aménagement du territoire et la gestion de catastrophes.

Dans de très nombreux cas, les analyses de susceptibilité sont faites à base d'inventaires de glissements de terrain qui sont fortement incomplets (p.ex., Van Den Eeckhaut, 2012). En outre, des données auxiliaires telles que les données géotechniques et hydrologiques notamment sont souvent absentes pour des analyses plus fines. Plusieurs études de susceptibilité, en effet, se contentent d'utiliser les données disponibles et facile d'accès à l'échelle régionale telles les données topographiques, géomorphologiques et géologiques.

L'analyse de la susceptibilité se fait selon les différents types de modèles. Les modèles dirigés par les données (data-driven method), déterministes et heuristiques. Les premiers sont basés sur les données et sont faites à base des inventaires des MTs. Les seconds sont basés sur les données (p.ex. géotechniques et hydrologiques) qui sont très souvent difficile à obtenir, voire qui sont simplement inexistantes. Les troisièmes étant basés sur l'expérience et l'expertise de l'analyste et ne nécessitant pas nécessairement de données d'inventaire des MTs.

Dans les chapitres précédents, nous avons produit un inventaire très détaillé des MTs. Notre but est donc de faire une analyse détaillée de la susceptibilité à base de ces données et du jeu de données auxiliaires disponibles. D'un point de vue méthode, nous utiliserons trois modèles différents. Une méthode heuristique (Processus d'Hierarchisation Analytique, PHA) et deux méthodes basées sur les données (Théorie de l'Evidence, TDE et Régression Logistique, RL). Cela nous permettra en plus de la compréhension des processus MTs, de voir quelle est la valeur ajoutée de l'inventaire pour produire des cartes de prédiction fiables à l'échelle locale. A cette échelle, ces méthodes ont été utilisées pour la première fois par Nibigira et al. (2015) et Shirambere et al. (2018). Cependant, ces études sont basées sur un inventaire incomplet et non détaillé et un manque de données auxiliaires.

Les cartes de susceptibilité résultant de cette étude seront des outils efficaces d'aide à la décision pour les autorités locales en charge du système d'alerte précoce et permettra de réduire les impacts liés aux à cet aléa. Ces cartes seront aussi indispensables aux gestionnaires territoriaux afin de mieux appréhender

les zones sensibles aux MTs où ils vont concentrer beaucoup d'efforts lors de l'aménagement du territoire. De plus, elles pourraient être exploitées par la protection civile en charge de la gestion des catastrophes naturels. Ces cartes serviront également de base aux futures chercheurs pour l'analyse de l'aléa MT et/ou du risque associé.

VI.2. METHODOLOGIE GENERALE D'APPROCHE : APPROCHE D'ANALYSE MULTI-ECHELLE (AAM)

A l'instar des différents aléas, la gestion des mouvements de terrain est une étape indispensable qui doit précéder tout projet d'aménagement s'inscrivant dans le cadre d'un développement durable. Une de ces étapes est l'évaluation de la susceptibilité, qui représente une composante indispensable dans le processus de gestion interactive de la prévention du risque MT.

Les reliefs de Bujumbura constituent l'une des zones qui présente une fréquence élevée en mouvements de versant en réponse à une importante variabilité morphologique, lithologique et structurale. Cette situation nous a motivé à appliquer une analyse de la susceptibilité aux MTs. Une autre raison pour cette motivation est la disponibilité d'un jeu de données requises pour une telle approche dans ce secteur. Nous allons utiliser des approches adaptées pour l'analyse de la susceptibilité à l'échelle de la zone d'étude.

- La première analyse correspond à l'utilisation d'une approche heuristique par combinaison de cartes d'index (par ex., Mastere et al., 2009).
- La deuxième analyse correspond à une approche statistique ou probabiliste bivariable connue sous le nom de la théorie de l'évidence (p.ex., Sujatha et al., 2014; Ilia, 2016), et une autre multivariable et connue sous le nom de la régression logistique (p.ex., Hemasinghe, 2016). L'objectif est de modéliser la susceptibilité par l'utilisation de ces deux approches différentes. Cela permet, pour l'évaluation de la susceptibilité dans un environnement montagneux, de sélectionner le modèle le plus adapté en comparant la qualité et la pertinence des résultats obtenus par les deux méthodes.

La démarche méthodologique utilisée pour chaque niveau d'analyse sera détaillée dans la partie correspondante. Pour tous les niveaux d'analyse, des facteurs de prédispositions interviendront dans la modélisation de la susceptibilité (Tableau VI-1). La modélisation se fera en différenciant les processus profonds et peu profonds. Les premiers sont supposés être liés à des facteurs purement naturels tandis que les seconds sont liés aux conditions géoenvironnementales de surface tels que l'altération des roches et à l'anthropisation (Sidle & Bogaard, 2016). Enfin, une comparaison entre les modèles se fera en analysant leur performance. Le modèle de susceptibilité de meilleure performance sera comparée à des modèles de susceptibilité régional, continental et global disponibles (Stanley & Kirschbaum, 2017; Broeck et al., 2018; Depicker et al., 2021).

Tableau VI-1: Paramètres sélectionnés dans la présente étude ainsi que les données utilisées (Kubwimana et al., 2021a).

Groupes	Source	Echelle ou résolution	Paramètres
Occupation des sols	Ortho photos, Pléiades, Landsat, ESE worldcover, 2020	0.5m, 1m, 15m, 10m	Occupation du sol
Géologie	Carte IGN; Laghmouch et al., 2018; Landsat 7 ETM+ et Spot 4	1/100000, 1/50000, 30m, 20m	Unités lithologiques
			Densité de Fracturation
Géomorphologie	MNE issu des ortho photos	10m	Zonation spatiale selon le recul des knickpoints
			Pente
			Hypsométrie
			Exposition
			Courbure
Hydrologie	Ortho photos, cartes topographiques	0.5m, 1/50000	Densité du réseau de drainage

VI.3.1. Choix des facteurs qui pourraient conditionner la présence des MTs

Dans notre analyse de susceptibilité, nous utiliserons les facteurs de prédisposition susceptibles de jouer un rôle sur l'occurrence des MTs (Figures VI, 1a-h). Notre choix étant basé sur l'analyse des facteurs présentés aux chapitres V et à la littérature (par exemple, Reichenbach et al., 2018). Outre les facteurs de prédisposition, des facteurs préparatoires (dynamiques) seront également utilisés (Figures VI-1i,j). En effet, nous sommes dans une région peuplée où des facteurs naturels et humains sont supposés avoir une influence sur la dégradation de l'environnement.

La disponibilité d'un jeu de données a permis de produire un ensemble de facteurs qui pourraient conditionner l'occurrence des MTs dans les reliefs de Bujumbura. La plupart de ces facteurs ont été développés dans les chapitres précédents (Chapitre III et V). Dans l'ensemble, nous avons produit huit facteurs naturels (facteurs de prédisposition) et deux facteurs anthropiques (facteurs préparatoires ou dynamiques). Du point de vue naturel, les facteurs sont représentés par des variables topographiques (hypsométrie, exposition des versants, courbure des versants, l'angle de pente et la densité du réseau hydrographique; Figure VI, 1a-j), géomorphologique (zonation spatiale selon la position des knickpoints; Figure V-1f) et géologique (lithologie et densité de fracturation, Figures VI-1g,h). Les facteurs anthropiques ou humains sont représentés par l'occupation ou la couverture du sol et la distance aux routes (Figures VI-1i,j). Tous ces facteurs sont communs pour conditionner l'occurrence des mouvements de terrain dans plusieurs régions du monde (Reichenbach et al., 2018). Ils ont été utilisés dans des contextes montagneux pour l'analyse de la susceptibilité des MTs (p.ex., Elmoulat et al., 2018; Ait Brahim et al., 2014, 2018; Ait Brahim & Elmoulat, 2018; Bousta & Ait Brahim, 2018; Elmoulat &

Ait Brahim, 2018).

Les facteurs topographiques sont dérivés du MNE de 10m de résolution. L'altitude est utilisée comme indicateur des conditions climatiques telles les précipitations car la résolution des produits dérivés du climat régional est trop faible pour saisir avec précision l'effet de l'altitude sur les précipitations (Monsieurs et al., 2018a; Van de Walle et al., 2020; Monsieurs, 2020; Depicker et al., 2021b). Quant à la densité de fracturation (chapitre III, section III.6), il est utilisée pour déterminer l'éventuelle contribution de l'activité sismique dans l'apparition de glissements de terrain profonds, non seulement comme facteur de déclenchement (par exemple, Keefer, 1984), mais aussi comme facteur d'altération des roches (Vanmaercke et al., 2017). Pour les facteurs humains, l'occupation du sol/couverture du sol est conditionnée par l'implantation humaine et peut être à l'origine des MTs superficiels. Enfin, l'imperméabilisation du sol et la concentration des eaux de ruissellement lors des constructions des routes constitue aussi l'une des causes des ruptures des pentes. Dans notre secteur, le réseau routier est moins développé et est représenté par deux routes principales (route nationale no 1 et 7) et d'autres petites routes secondaires en terre assurant la liaison entre les communes administratives.

La sélection des variable de prédiction des MTs a été basée sur une procédure itérative en testant un large éventail de combinaisons d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Par exemple, la plausibilité géomorphologique des relations modélisées i.e l'exclusion des variables qui représentant le même effet, l'exclusion des classes améliorant la performance qui sont responsables de la propagation d'un biais spatial (Steger et al., 2016, 2017, 2021). Ainsi, l'hypsométrie (relief) représente le même effet que la zonation géomorphologique selon la position des knickpoints. Les deux variables ne peuvent pas être considérées simultanément pour éviter l'effet de plausibilité géomorphologique. Quant à la pente et l'exposition, des classes correspondant aux zones plates ont pas été éliminées lors de la modélisation de la susceptibilité.

Pour la modélisation de la susceptibilité des MTs peu profonds, les variables liés à la géologie "lithologie et la fracturation" ont été exclues car elles ne les conditionnement pas directement. De plus dans le chapitre V, nous avons montré qu'il n'a pas de relation entre la distribution des MTs peu profonds en fonction des knickpoints. Cette variable géomorphologique sera exclue lors de l'analyse des MTs peu profonds. Quant aux glissements profonds, seuls les variables liés à l'anthropisation (occupation du sol et distance aux routes) ne seront pas soumises à l'analyse de susceptibilité.

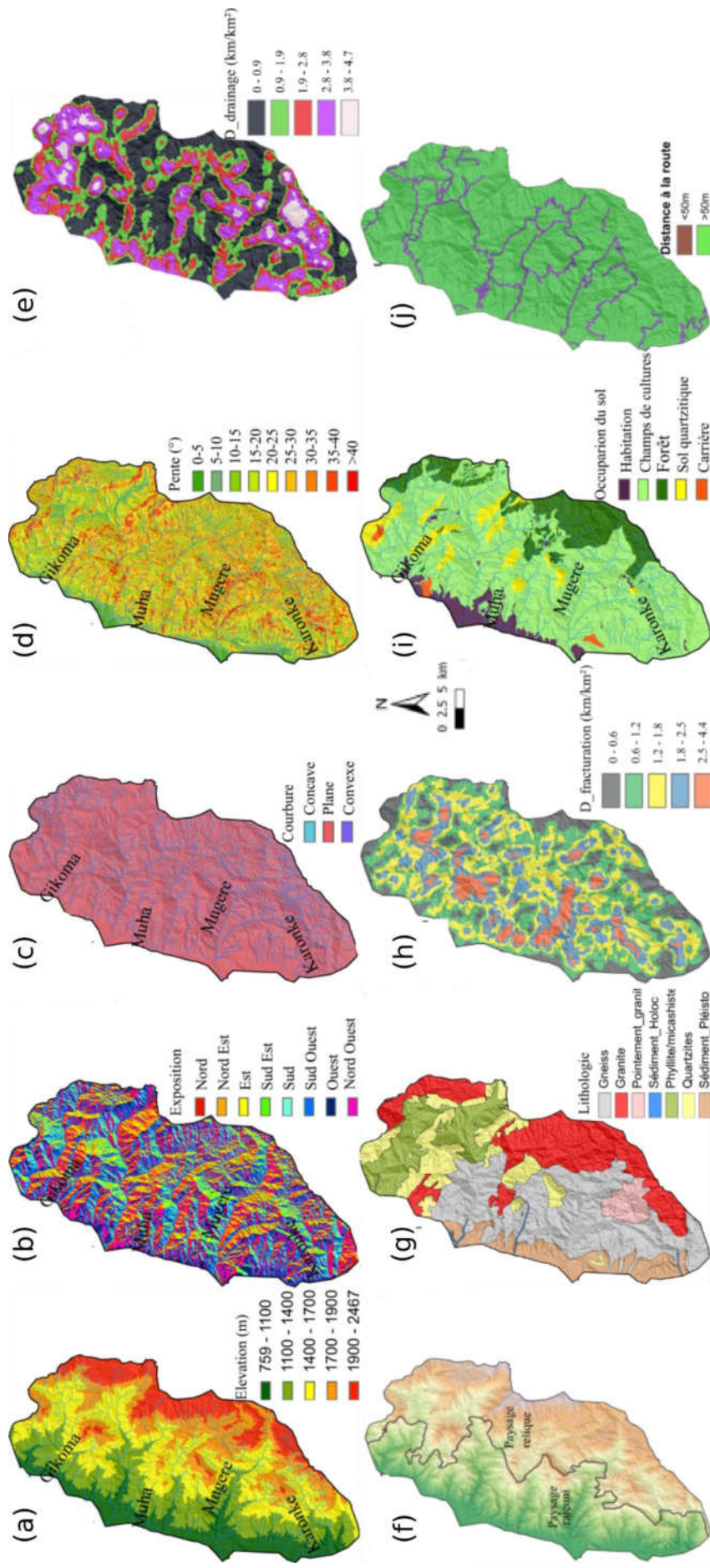


Figure VI-1: Les facteurs de contrôle des MTS dans la ville de Bujumbura: (a) l'hypsométrie, (b) exposition des versants, (c) courbure des versants, (d) angle de pente, (e) densité de fracturation, (f) zonation spatiale en rapport des knickpoints, (g) lithologie, (h) occupation du sol et (j) distance à la route (Kubwimana et al., 2021a).

VI.3. ZONATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ PAR L'APPROCHE DU PROCESSUS HIÉRARCHIQUE ANALYTIQUE (PHA OU AHP EN ANGLAIS)

VI.3.1. Méthodologie : combinaison de cartes d'index

La cartographie de la susceptibilité par combinaison des cartes d'index avec la méthode PHA a été développée par Saaty (1980). Il s'agit d'une méthode heuristique indirecte et qualitative. Elle permet d'évaluer la susceptibilité en se basant sur la hiérarchisation des différents paramètres significatifs (matérialisés par des cartes), en procédant à l'attribution des poids relatifs à chaque classe (ou subdivision) de ces derniers selon leur importance relative dans la genèse des MTs (Figure VI-2). Chaque comparaison est une question en deux parties de déterminer quel critère est plus important, et comment beaucoup plus important, en utilisant une échelle avec les valeurs de l'ensemble: {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}. Le nombre de cartes en entrée (paramètres) dépend de l'avis du chercheur effectuant l'analyse, lequel choisit, généralement à l'avance, les facteurs importants, à cartographier et numériser. Cela peut influencer significativement la pertinence de la carte finale. Quant à leurs poids relatifs, les valeurs peuvent être attribuées en se basant sur les connaissances de l'expert analyste (géologue, géomorphologue...). Ce dernier peut aussi s'appuyer sur une analyse statistique de la relation entre phénomènes inventoriés (MT) et les paramètres significatifs (p.ex., les fréquences des MTs au Chapitre V).

Une fois que les différents poids sont assignés, tous les paramètres sont rassemblés dans une seule et unique carte d'index de l'AMT (IA_{MT}), et ce à l'aide de la formule (Equation VI-1) proposée par Voogd, 1983, et permettant le calcul des sommations linéaires pondérées. La démarche est résumée à la Figure VI-2.

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

Avec :

IA_{MT} : Index de la susceptibilité aux mouvements de terrain
(Mass movements susceptibility index).

W_j : Valeur de la pondération assignée au paramètre 'j'
(Weight value of parameter 'j')

w_{ij} : Valeur de la pondération assignée à la classe 'i' paramètre 'j'
(Weight value of class 'i' in parameter 'j')

n: Nombre de paramètres

Afin de faciliter la lecture et l'interprétation des cartes de prédiction, il est essentiel de traduire les valeurs de susceptibilité obtenues en termes de niveaux (classes) de susceptibilité. Ceci, n'est pas du tout évident à réaliser, puisqu'aucune démarche automatique n'existe pour l'effectuer (Ayalew et al., 2004; Ayalew et Yamagishi, 2005). En effet, dans la plupart des études antérieures, les cartographes de l'aléa se basent sur leurs propres expériences et avis pour passer d'une carte présentée en valeurs continues (continuous data) à des classes ou niveaux d'une façon manuelle (Süzen et Doyuran 2004;

Guzzetti et al., 1999; Lee et Min, 2001; Dai et Lee, 2002; Ohlmacher & Davis, 2003). Une telle démarche, en plus de sa subjectivité, est inutilisable dans le cas d'une distribution multimodale (Süzen et Doyuran, 2004). Pour cette raison, nous avons opté pour une méthode de reclassification manuelle basée sur la zonation spatiale en termes de pourcentages de la zone d'étude. En plus de son objectivité, la méthode permet de faire des comparaisons entre les modèles (Depicker et al., 2020; Maki Mateso, in review). La qualité des modèles a été jugée par (i) le taux de prédiction, (ii) une inspection visuelle des cartes de susceptibilité après avoir reclassé chaque carte en quatre classes de susceptibilité croissante qui couvrent 10 %, 20 %, 30 % et 40 % du territoire et (iii) la valeur de l'aire sous la courbe AUROC (Area Under Receiver Operating Characteristic) aussi appelée AUC. Bien que l'AUC soit une bonne indication, elle ne sert pas de mesure autonome de la qualité du modèle. Tout d'abord, il a été démontré que des valeurs élevées de l'AUC peuvent être obtenues avec des cartes de susceptibilité irréalistes, et deuxièmement, une réduction de la qualité des données par inclusion d'un biais pourrait améliorer la performance prédictive (Steger et al., 2016).

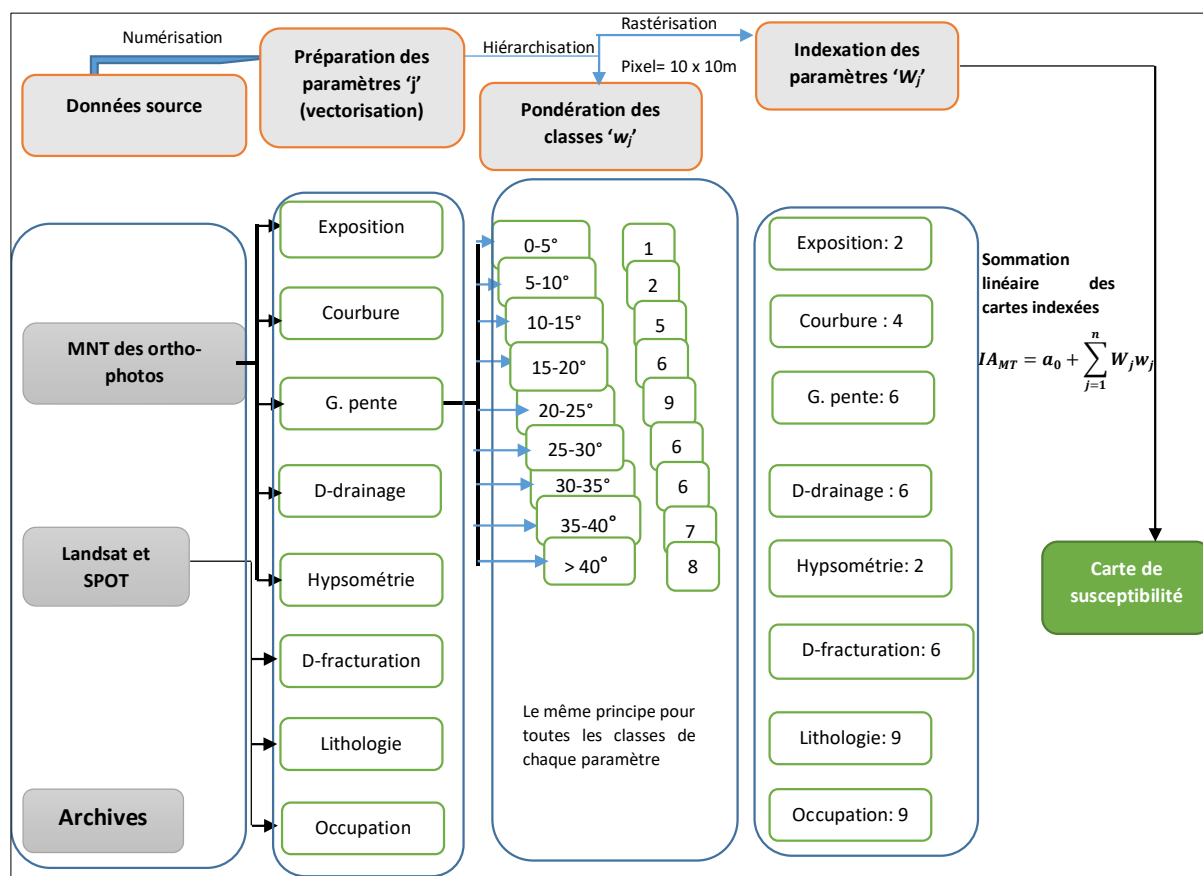


Figure VI-2 : Déroulement des différentes étapes pour la cartographie de la susceptibilité aux MTs par combinaison des cartes d'index dans les reliefs de Bujumbura (Kubwimana et al., soumis 2022).

VI.3.2. ZONAGE DE LA SUSCEPTIBILITE

Pour obtenir la carte de susceptibilité des reliefs de Bujumbura, l'importance de chaque facteur a été exprimée par le produit des valeurs pondérales des différentes classes et le poids du paramètre lui-même (Tableau VI-2). Après quoi, il a été possible de générer la carte de la susceptibilité aux MTs par sommation linéaire des cartes indexées à l'aide de l'équation VI-1. Le poids de chaque classe a été calculé selon l'importance du nombre de MTs y inventoriés et estimé selon leur fréquence au Chapitre V reproduite et complétée au Tableau VI-2. Pour la pondération des différentes variables prédictives, nous avons utilisé la méthode de l'expert en jouant sur notre connaissance approfondie du terrain et de la région. Ainsi, pour le processus MT profond, des faibles poids ont été attribués aux expositions des versants, la pente et relief. Pour l'exposition et la courbure, la situation géographique de la zone d'étude ne permet pas une variation climatique selon leur position par rapport au soleil. Selon le relief, il n'y a pas une variation importante des pluies dans la zone d'étude. L'étude étant réalisée à l'échelle locale, il est probable que la variation des précipitations ne soit pas très prononcées. Cela reste une hypothèse à cause du manque de données sur les précipitations de résolution adéquate à l'échelle locale. Les autres paramètres comme la zonation en fonction des knickpoints et la géologie ont été pondérés au maximum. L'occurrence des MTs est très lié au rajeunissement du paysage (Chapitre V). La géologie a aussi été montrée comme un des facteurs principaux contrôlant la stabilité des pentes dans la région (Chapitre V; Jacobs et al., 2017). La densité de fracturation et hydrologique et la courbure ont été pondérées avec un même poids de 6. La région se trouve dans le rift est africain avec la tectonique active. La fracturation est intense et peut influencer la distribution spatiale des mouvements de terrain. Quant à l'hydrographie, la zone d'étude connaît un réseau hydrographique dense qui incise les pentes abruptes qu'il traverse. Cette incision déstabilise les versants en provoquant des MTs (par ex., Moeyersons & Trefois, 2012). La courbure convexe retient beaucoup l'eau et favorise l'occurrence des MTs profonds. La pente a été pondérée avec un poids maximale pour les processus superficiels. Dans la plupart des cas, les occurrences MTs de terrain peu profonds sont liés sur des fortes pentes (p. ex., Sidle & Bogaard, 2016). L'occupation du sol contrôle également l'occurrences des mouvements de versants superficiels comme prouvé dans la branche occidentale du rift Kivu (Depicker et al., 2021; Maki Mateso et al., in review). Ainsi, un poids maximal de 9 lui a été attribué. Le réseau routier n'étant pas intense, son influence pour le contrôle des MTs superficiels est supposé être moins important (Chapitre V). Nous avons attribué à cette variable une petite valeur pondérale de 2.

Tableau VI-2: Pondération des différentes classes et poids relatifs des paramètres pris en compte pour la genèse des mouvements de terrain profonds/peu profonds dans les reliefs de Bujumbura.

A : superficie de la classe en km²; FCP/S : Fréquence de la classe; NMTP/S : Nombre de mouvement de terrain profonds/superficiels; FR : Ratio de Fréquence des MTs profonds/superficiels; PRCP/S : Poids relatifs de chaque classe pour les MTs profonds/superficiels W_{ij} ; et PRFP/S : Poids relatif de chaque facteur pour les MTs profonds/ superficiels (W_j = valeur max du PRC du paramètre). Le tiret signifie que la variable en jeu ne conditionne pas ce processus. Les valeurs des processus superficiel et profond sont séparés par une barre oblique '/' (Kubwimana et al., soumis 2022).

Paramètre	Classe	A (km ²)	FC	NMTP/S	FRP/S	PRCP/S	PRFP/S
Exposition	N	69	14.2	92/17	1/1	6/6	2/2
	NE	51	10.5	53/32	0.8/1	5/6	
	E	35	7.2	28/21	0.6/0.8	4/5	
	SE	34	7	32/15	0.7/0.8	5/5	
	S	53	10.7	84/23	1.3/1.1	7/6	
	SW	75	15.4	114/31	1.2 /1.1	7/6	
	W	85	17.3	92/31	0.8/0.8	5/5	
	NW	84	17.1	103/18	1.0/0.9	6/6	
Courbure	Concave	112	22.9	211/44	0.3/0.9	3/6	6/4
	Plane	226	56	306/105	0.5/0.9	3/6	
	Convexe	102	20.8	81/45	0.1/1.1	1/7	
Zonation knickpoints	R. Rajeuni	237	48	487/101	1.7/1	9/-	9/ -
	R. Relique	254	52	111/93	0.4/0.9	3/-	
Gradient de pente (°)	0 – 5	13	2.9	0	0/0.2	1/1	3/9
	5 – 10	37	8.5	16	0.3/0.1	2/2	
	10 – 15	55	12.4	47	0.6/0.2	5/3	
	15 – 20	72	16.2	94	1.0/0.3	6/4	
	20 – 25	84	19	137	1.2/0.5	7/5	
	25 – 30	81	18.3	116	1/0.9	6/6	
	30 – 35	62	14	113	1.3/1.5	7/7	

	35 – 40	29	6.5	56	1.4/4. 9	7/8	
	> 40	7	1.6	16	1.6/6. 8	8/9	
D-drainage	0 - 0.9	185	37.8	150/83	0.7/1. 1	0/6	6/7
	0.9 - 1.9	104	21.3	119/56	0.9/1. 3	6/7	
	1.9 - 2.8	92	18.8	173/37	1.5/1	8/7	
	2.8 - 3.8	90	18.4	148 /17	1.3/0. 4	7/2	
	3.8 - 4.7	18	3.7	8/1	0.3/0. 1	2/1	
Densité de fracturation (km/km²)	0-0.6	73	14.9	49	0.5	3/-	6/-
	0.6-1.2	140	28.6	171	0.9	5/-	
	1.2-1.8	144	29.3	176	1.0	6/-	
	1.8-2.5	96	19.6	154	1.3	7/-	
	2.5-4.4	36	7.3	48	1.0	6/-	
Relief	759 – 1100	81	16.6 3	278	2.96	9/6	2/2
	1100 – 1400	100	20.5	123	1.06	6/6	
	1400 – 1700	120	24.4 9	102	0.74	3/3	
	1700 – 1900	127	25.9 2	44	0.3	1/4	
	1900 – 2467	61	12.4 5	19	0.27	1/6	
Unités lithologiques	Quartzite	73	14.9	62	0.6	2/-	9 / -
	Sédiments	51	10.4	35	1.3	7/-	
	Gneiss	169	34.5	309	1.6	9/-	
	Granite	117	23.9	158	0.7	6/-	
	Métaquartzites	17	3.5	12	0.5	4/-	
	Phyllites	62	12.8	20	0.3	2/-	
Occupation du sol	Habitation	26	5.4	0	0	-/1	- / 9
	Champs de culture	352	71.6	126	0.9	-/6	
	Forêt	75	15.3	16	0.5	-/4	
	Carrière	4	6.5	9	5.1	-/9	
Distance route	-50m	29.2	6	10	0.8	-/4	- / 2
	+50m	462	94	184	1.0	-/6	

VI.3.3. Evaluation de la susceptibilité aux MTs

Le modèle susceptibilité des MTs profonds et peu profonds a été obtenu avec la combinaison des cartes d'index (Tableau VI-2).

- Pour les MTs profonds, le résultat montre que parmi les sept variables prédictives introduit dans le modèle, quatre sont les plus importants (+80%). Ils s'agissent de la zonation spatiale selon la position des knickpoints et la courbure qui viennent en premier avec 28% chacun, la densité de la fracturation (18%) et la lithologie (11%). Les autres facteurs comme la densité du réseau hydrographique (7%), la pente 5% et l'exposition des versants (3%) occupent le reste. Ils interviennent dans l'occurrence des MTs à un faible degré.

- Pour les MTs peu profonds, aussi sept variables interviennent dans la modélisation de la susceptibilité. Ils s'agissent de la pente (33%), l'occupation du sol/couverture du sol (24%), la densité de drainage (12%), l'hypsométrie (11%), la courbure (6%), la densité de drainage (5%) et l'exposition des versants (3%).

La combinaison de ces variables a permis de produire les cartes de susceptibilités pour les MTs profonds et peu profonds qui ont été reclassés en quatre classes de susceptibilité (Figures VI-3a,b).

- [60, 100% : faible] : cette couche renferme 40% des valeurs de faible susceptibilité/ elle couvre essentiellement les zones de grande forêt et des plateaux anciens stables du paysage relique ainsi que les sommets des montagnes quartzitiques situés très essentiellement à l'est de la zone d'étude. L'existence de cette classe est en conformité totale avec la réalité de terrain, caractérisées par l'absence d'instabilités de versants de cette zone, les facteurs environnementaux ne l'y permettent pas. Cette classe englobe également de la zone basse du piémont constitué par des dépôts sédimentaires.
- [30, 60% : modéré] renferme 30% des valeurs de susceptibilité intermédiaire situé en grande partie aux zones du paysage relique avec les pentes douces et couverts. Elle domine généralement dans le domaine de transition entre la zone surélevée et relique. A ce niveau, la densité de la fracturation devient assez importante, ce qui rend cette zone moyennement prédisposée au déclenchement d'instabilités des versants.
- [10, 30% : élevé] constitué par 20% des valeurs de susceptibilité élevée qui caractérise les versants et surtout les zones bien drainées avec des pentes concaves, ce qui montre le rôle primordial exercé par le paramètre densité du réseau de drainage et courbure des versants dans le conditionnement des MTs.
- Top 10% (très élevée) c'est-à-dire le dixième du territoire fortement susceptible aux ruptures de pente situé essentiellement dans le paysage rajeuni, ils sont retrouvés sur des versants très accidentés dans des roches gneissiques bien altérées. Par rapport aux autres unités géologiques, cette unité est plus susceptible aux MTs.

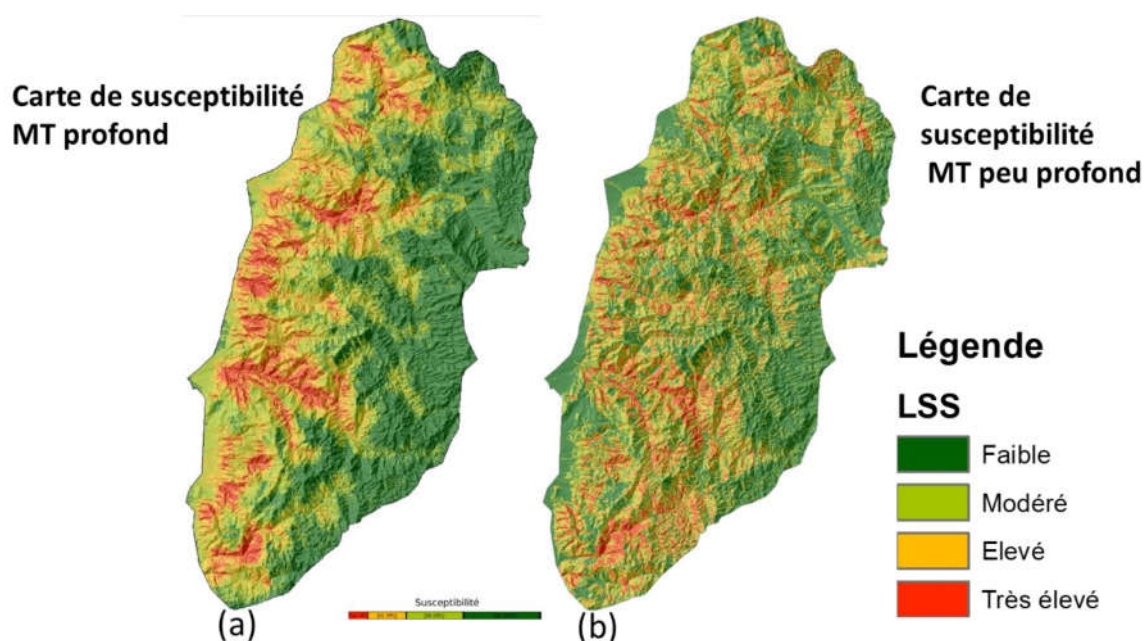


Figure VI-3 : Cartes de susceptibilité des MTs par processus d'hiérarchisation analytique (PHA) pour les (a) MTs profonds et (b) peu profonds (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.3.3. Discussion : zonation de la susceptibilité avec une méthode habituellement utilisée à des échelles plus régionales

La combinaison des cartes d'index est une méthode généralement facile à mettre en place pour l'évaluation de la susceptibilité (p.ex., Hasekioğulları et al., 2012). D'habitude ce modèle est utilisé à des échelles régionales, continentales ou globales car ne nécessitant pas des données d'inventaire dont la collecte consomme du temps (p.ex., Kirschbaum et al. 2016; Stanley, T., & Kirschbaum, 2017). Si de nouvelles données (paramètres) sont disponibles, il est facile de les indexer et les intégrer dans le modèle pour améliorer la qualité des résultats. En effet, le modèle a montré des taux prédiction faibles. En d'autres termes la prédiction dans la classe de susceptibilité très élevée n'est pas très bonne (Figure VI-10). Ainsi, le modèle n'est pas le plus approprié pour la caractérisation de la susceptibilité de mouvements de terrain de notre zone d'étude. En effet, les modèles de l'expert sont généralement utilisés pour des régions plus grandes que la nôtre. La modélisation de la susceptibilité à l'échelle locale par des méthodes statistiques pourrait produire une meilleure prédiction des mouvements de terrain à l'échelle de notre secteur d'étude.

D'un point de vue spatial, la localisation de la susceptibilité très élevée est tout à fait logique, et en concordance avec la vérité du terrain. Toutes les conditions propices (environnementales et anthropiques) sont bien réunies pour correspondre au degré maximal de l'aléa mouvements de terrain dans les reliefs de Bujumbura. A titre d'exemple, la densité de la fracturation est très forte dans cette partie. Mais également, l'occupation des sols est caractérisée par une absence d'une couverture forestière et une dominance des terrains agricoles ainsi que par des terrains nus générateurs d'instabilités. Des plus, les versants sont accidentés avec des pentes dépassant 70°. La lithologie est

représentée par les terrains les plus tendres et fragiles constitués essentiellement par du régolithe issu de l'altération des gneiss et des granites.

VI.3.4. Conclusion

Cette partie a porté sur la réalisation de la carte de la susceptibilité des MTs par l'utilisation d'une approche heuristique analytique hiérarchisée (PHA) en analysant différemment les processus profonds et superficiels. Il s'agit de la combinaison des cartes d'index où dix paramètres intervenant dans la genèse des MTs ont été intégrés, après leur hiérarchisation et pondération qui s'est déroulée à deux niveaux (pour les différentes classes et puis pour le paramètre dans sa globalité). L'importance de chaque classe, a été définie objectivement (qualitativement) à l'aide des statistiques établies sur les données réelles de la région et la connaissance approfondie du terrain. Ainsi, pour les MTs profonds, les paramètres sélectionnés sont: la zonation spatiale en fonction de la géomorphologie et la lithologie, auquel nous avons affecté une pondération maximale puisqu'ils sont les plus prépondérants dans le contrôle des instabilités des versants de la région. La densité fracturation, la courbure et la densité de drainage vient au second rang, suivie par le gradient de la pente et finalement les paramètres géométriques (hypsométrie et exposition). Pour des MTs superficiels, la pente et l'occupation du sol ont été pondérées aux maximum. La courbure, qui est décrite dans la littérature comme conditionnant les glissements de terrain profonds a été pondérée avec une faible valeur pour les MTs superficiels. L'exposition, le relief et la densité à la route ont été pondérées aux minimum grâce à notre connaissance du terrain. Les cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain obtenues par la modélisation PHA comprend quatre classes de fréquence. Elles ont été utilisées en association avec les mouvements de terrain inventoriés (glissements, écroulements, coulées de débris, et les glissements – sapements) pour la construction d'une courbe AUC (Area Under a Curve) afin de mesurer leur performance. Les valeurs de l'AUC trouvées (Figure VI- 4) sont bonnes pour évaluer la susceptibilité aux MTs dans notre secteur. Enfin, la combinaison des cartes d'index est une méthode généralement facile à mettre en place pour l'évaluation de la susceptibilité. Si de nouvelles données (paramètres comme par exemple des données géotechniques, hydrologiques ou sismiques) sont disponibles, il est facile de les indexer et les intégrer dans le modèle pour améliorer la qualité des résultats.

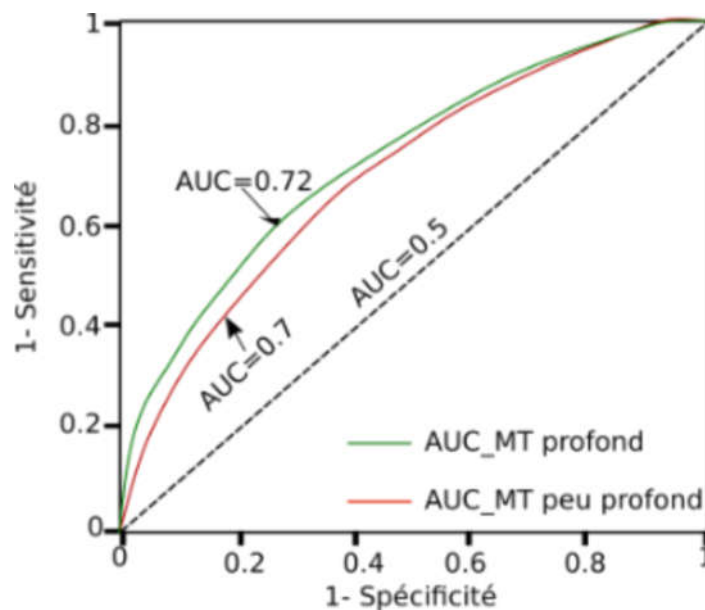


Figure VI-4: Courbes de performance AUC obtenues par le PHA pour les MTs profonds (vert) et peu profonds (rouge) ; (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.4. ZONATION DE LA SUSCEPTIBILITE AVEC LES MODELES BASES SUR LES DONNEES

VI.4.1. Introduction

Cette partie se focalise sur l'analyse de la susceptibilité dans un environnement montagneux au voisinage de la ville de Bujumbura. La disponibilité de la carte de mouvements de terrain (Cf. chapitre V, Figure V-2) démontre que le secteur des reliefs de Bujumbura présente une forte prédisposition aux mouvements gravitaires. Nous traiterons de l'accessibilité aux données disponibles et nécessaires pour la cartographie de la susceptibilité MT. C'est par exemple le cas du MNE de 10m de résolution disponible à partir desquelles une partie de l'information est extraite.

L'approche de cartographie de la susceptibilité s'articule sur l'utilisation de deux approches probabilistes statistiques. Il s'agit d'une méthode bayésienne bivariée connue sous le nom de la théorie de l'évidence (TDE/WoE), et, une autre, multivariée qui est connue sous le nom de régression logistique (RL/LR). Ces deux approches sont prouvées comme donnant étant souvent adaptées pour fournir des résultats pertinent dans le cadre de modélisation de la susceptibilité aux MTs. Elles ont été appliquées plusieurs fois dans différents contextes montagneux (Carrara et al., 2003; Van Westen et al., 2003; Zahiri et al., 2006; Neuhäuser et Terhorst, 2007; Thiery, 2007; Thiery et al., 2007; Nandi et Shakoore, 2010; Regmi et al., 2010; Yalcin et al., 2011; Ait Brahim, L. & Elmoulat, M., 2015, Ait Brahim & Elmoulat, 2018; Jemmah & Ait Brahim, 2018).

La démarche adoptée est représentée à la figure VI-4, et peut être résumée en trois grandes étapes.

- Les différents principes des deux méthodes probabilistes choisies, nous allons procéder à la sélection des différents paramètres à intégrer pour la modélisation de la susceptibilité aux MTs.

- Cette étape sera suivie par la mise en œuvre de deux différents tests selon la méthode à utiliser (TDE et RL). Cette partie de base a pour objectif d'éviter les problèmes de biaisement des calculs des probabilités algorithmiques par les deux approches.
- En dernier lieu, le degré de performance du meilleur résultat obtenu par chacune des deux méthodes sera évalué, afin déduire laquelle des deux est la plus adaptée pour la cartographie de la susceptibilité aux MTs des reliefs au voisinage de Bujumbura.

Pour les deux approches, l'analyse a été effectuée en distinguant les glissements de terrain profonds et peu profonds ou superficiels. L'analyse a été réalisée à l'échelle d'un point (pixel) par glissement de terrain afin d'éviter toute autocorrélation spatiale (plus de détail cf. chapitre V). Le point est positionné manuellement au centre de la zone de déclenchement du glissement de terrain pour les glissements superficiels. Pour les glissements de terrain profonds, un point situé à l'extérieur de la zone de déclenchement où la topographie ne semble pas avoir été perturbée par l'instabilité pris en compte pour le calcul de la pente associée à l'origine du glissement de terrain. Il s'agit des MTs utilisés dans l'analyse au chapitre V complétés par des instances liés à la route et au réseau de drainage.

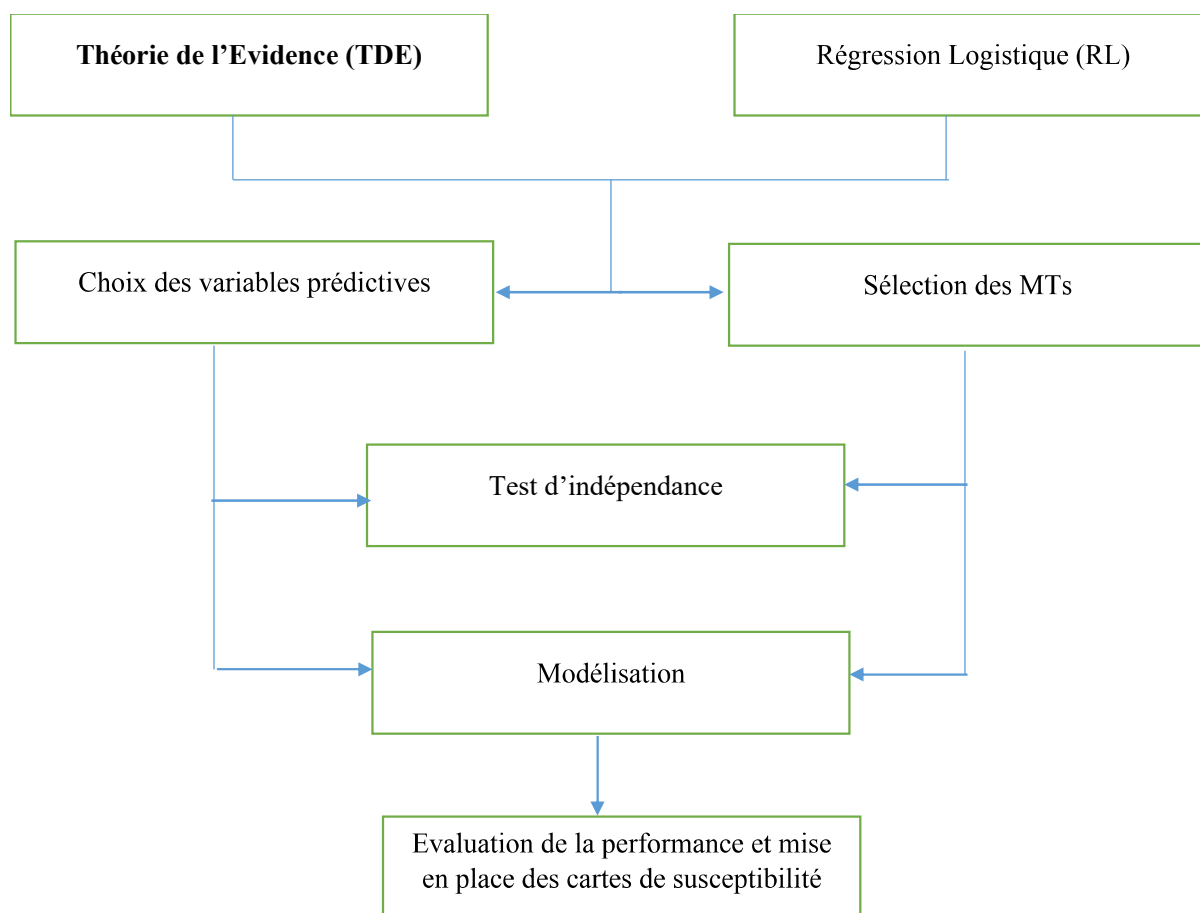


Figure VI-5 : Démarche de la cartographie de la susceptibilité par la TDE et la RL (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.4.2. THÉORIE DE L'EVIDENCE (TDE) : APPROCHE BIVARIÉE

VI.4.2.1. Introduction

L'approche bivariée par la Théorie de l'Evidence (Weight of Evidence) est l'une des approches adoptées pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans les collines au voisinage de Bujumbura. Cette approche a été employée pour la première fois en médecine (Spiegelhalter et Kill-Jones, 1984), puis en géologie dans le domaine de l'exploration minière (Bonham-Carter et al., 1990, Bonham-Carter, 1994, et Agterberg et al., 1990). C'est une version log-linéaire du théorème général de Bayes utilisant les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité à priori et de probabilité à posteriori. Elle a été utilisée et testée par plusieurs auteurs Van Westen et al., (2003); Thiery et al., (2004); Zahiri et al., (2006); Neuhäuser et Terhorst (2007); Thiery (2007); Thiery et al. (2007); Poli et Strelacchini (2007); Song et al. (2008); Nandi et Shakoore, (2009); Regmi et al., (2010); Yalcin et al. (2011), Bousta & Ait Brahim, (2018); Ebrahim et al. (2018) dans le domaine des instabilités des versants, et s'accordent que les résultats obtenus par cette approche sont très prometteurs. Elle peut être efficace, à condition que la phase de calage soit bien établie (Thiery, 2007; Thiery et al., 2007). C'est une des principales raisons du choix de la théorie de l'évidence pour son application dans un secteur du rift est africain (environnement montagneux).

VI.4.2.2. Principes de la Théorie de l'Evidence

Comme la plupart des approches de cartographie de susceptibilité, l'hypothèse fondamentale de la théorie de l'évidence suggère que, le phénomène étudié (MT) se déclenchera selon les mêmes conditions ou paramètres que par le passé, c'est-à-dire que : les paramètres en question auront un effet similaire ou égal sur les MTs à venir (Neuhäuser et Terhorst, 2007 ; Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007). Ledit phénomène représente la variable à modéliser (VM), et les facteurs qui conditionnent sa formation constituent les variables prédictives (VP). La TDE identifie une relation mathématique entre l'occurrence spatiale du phénomène étudié (VM), à travers ses données historiques spatialisées, et les facteurs prédictifs (VP). Une deuxième présomption qui n'est pas de moindre importance dans l'application de la TDE réside dans l'indépendance conditionnelle de l'ensemble des VP. Ce qui s'exprime mathématiquement par l'équation VI-1, dans le cas de deux variables prédictives VP_1 et VP_2 .

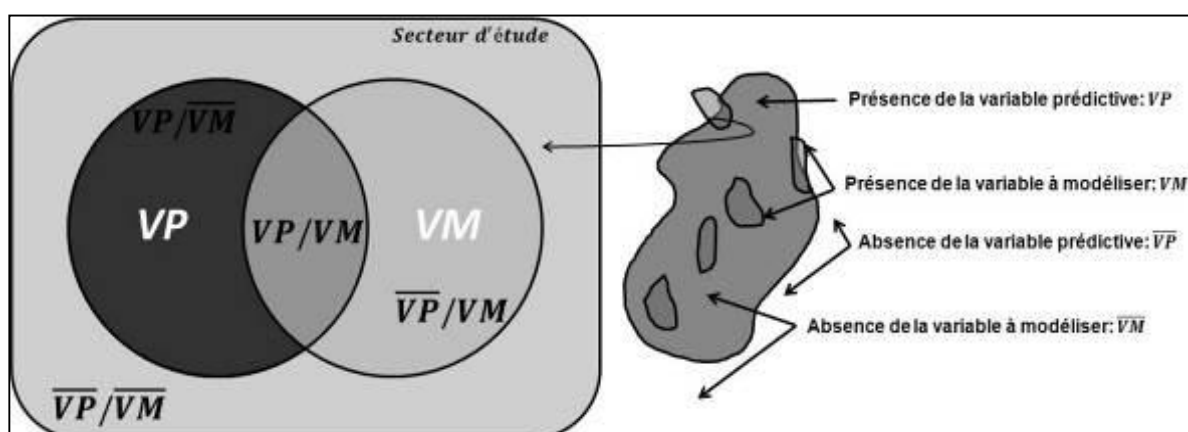
$$\text{Équation VI-4 : } P \{ VP_1 \cap VP_2 ; VM \} = P \{ VP_1 ; VM \} * P \{ VP_2 ; VM \}$$

Le calcul de la probabilité d'occurrence de la VM, fait appel à la version log-linéaire du théorème général de Bayes et passe par le calcul des notions de probabilité à priori et de probabilité à posteriori. La probabilité à priori, est la probabilité qu'une unité de terrain (une cellule ou un pixel) contienne le phénomène à étudier (VM), sans intégrer les variables prédictives (VP). Cette probabilité $P(VM)$ est

estimée en se basant sur la densité de cellules sur la totalité du site d'étude. La probabilité a posteriori, exprime la probabilité d'occurrence d'un événement sous la présence d'une condition ou évidence (VP). Elle est calculée en intégrant la densité des (VM) pour chaque (VP). Ces deux notions (la probabilité à priori et à posteriori) sont reliées par l'équation VI-2.

Équation VI-5: $P\{VM/VP\} = (P\{VM\} \cdot P\{VP/VM\}) / P\{VP\}$

La relation mathématique et statistique entre les facteurs intervenant dans la genèse des MTs (prédisposant et déclenchant) et la répartition des mouvements de terrain est identifiée en intégrant et en superposant l'ensemble de données dans un Système d'Information Géographique. Pour chaque VP, deux poids sont calculés, un positif (W^+) (Equation VI-3) et un autre négatif (W^-) (Equation VI-4) dont les valeurs dépendent de la relation spatiale entre les VP et les VM survenus dans le passé (Bonham-Carter 1990). Ces poids positifs et négatifs sont calculés selon les ratios des logarithmes naturels des côtes (odds), appelé aussi logit (une côte représentant la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène), qui décrit la répartition probable du phénomène. Cette répartition est illustrée à la Figure VI-5.



(VM : mouvement de terrain), (VP : paramètre causal), illustrant la présence et l'absence du paramètre causal (VP) en relation avec les MTs par l'utilisation du diagramme (Regmi et al., 2010, modifiée)

Figure VI-6 : Relation entre la variable à modéliser, VM et variable prédictive, VP

Équation VI-6 : $W^+ = \ln \frac{P\{VP;VM\}}{P\{VP;\overline{VM}\}}$

Équation VI-7 : $W^- = \ln \frac{P\{\overline{VP};VM\}}{P\{\overline{VP};\overline{VM}\}}$

Où W^+ est le poids positif, W^- poids négatif, VM ou $\overline{VM}$ présence ou absence de la variable à modéliser. VP ou $\overline{VP}$ présence ou absence de la variable prédictive. Ces poids renseignent sur la présence d'une corrélation positive ou négative entre chaque VM et VP. Le type de cette corrélation est mesuré par le calcul du contraste 'C' ($C = W^+ - W^-$). Dans le cas d'une corrélation positive, 'C'

est positif. Il tend vers 0 quand la distribution est spatialement indépendante. Il est négatif pour des associations négatives. Les pondérations peuvent être ajoutées pour actualiser les probabilités (équations VI-5 et VI-6), en considérant que les cartes de variables sont statistiquement indépendantes par rapport à la VM introduite. Dans ce calcul, les probabilités sont exprimées sous forme de côtes 'O' ($O = P / (1 - P)$) (une côte représente la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène):

$$\text{Équation VI-8: } \ln O \{ VM / VP_1 \cap VP_2 \cap VP_3 \cap VP_4 \cap \dots VP_n \} = \ln O \{ VM \} + \sum_{i=1}^n W^+$$

$$\text{Équation VI-9: } \ln O \{ VM / \overline{VP}_1 \cap \overline{VP}_2 \cap \overline{VP}_3 \cap \overline{VP}_4 \cap \dots \overline{VP}_n \} = \ln O \{ VM \} + \sum_{i=1}^n W^-$$

VI.4.1.3. Sélection des variables

VI.4.1.3.1. Variable à modéliser : mouvements de terrain

Pour la TDE et la RL, tout comme pour les autres approches spatiales, les MTs du secteur d'analyse correspondent à la variable à modéliser. Ces derniers ont été inventoriés et cartographiés antérieurement (Cf. Chapitre V) pour toutes les reliefs de Bujumbura, à l'aide des données satellitaires et aériennes associées aux observations de terrain.

Pour leur classification, il faut rappeler que nous avons distingué deux grandes catégories à savoir :

- des MTs purement naturels et contiennent les glissements (slides), les coulées boueuses et de débris, et les avalanches.
- des MTs qualifiés d'induits par les activités humaines incluant les ravinements, les sapements de berges des rivières et des routes.

La méthodologie utilisée pour la modélisation de l'aléa MT par la méthode de la Théorie de l'Evidence se trouve à la Figure VI-6. Après le choix des paramètres, s'en est suivie leur reclassification à l'aide d'un SIG sous format raster GRID. C'est ainsi que ces facteurs sont ajoutés à la TDE avec une partie des MTs reclassifiés également pour générer une carte de probabilités des MTs qui est ensuite validée par le reste des MTs afin d'établir une carte de susceptibilité.

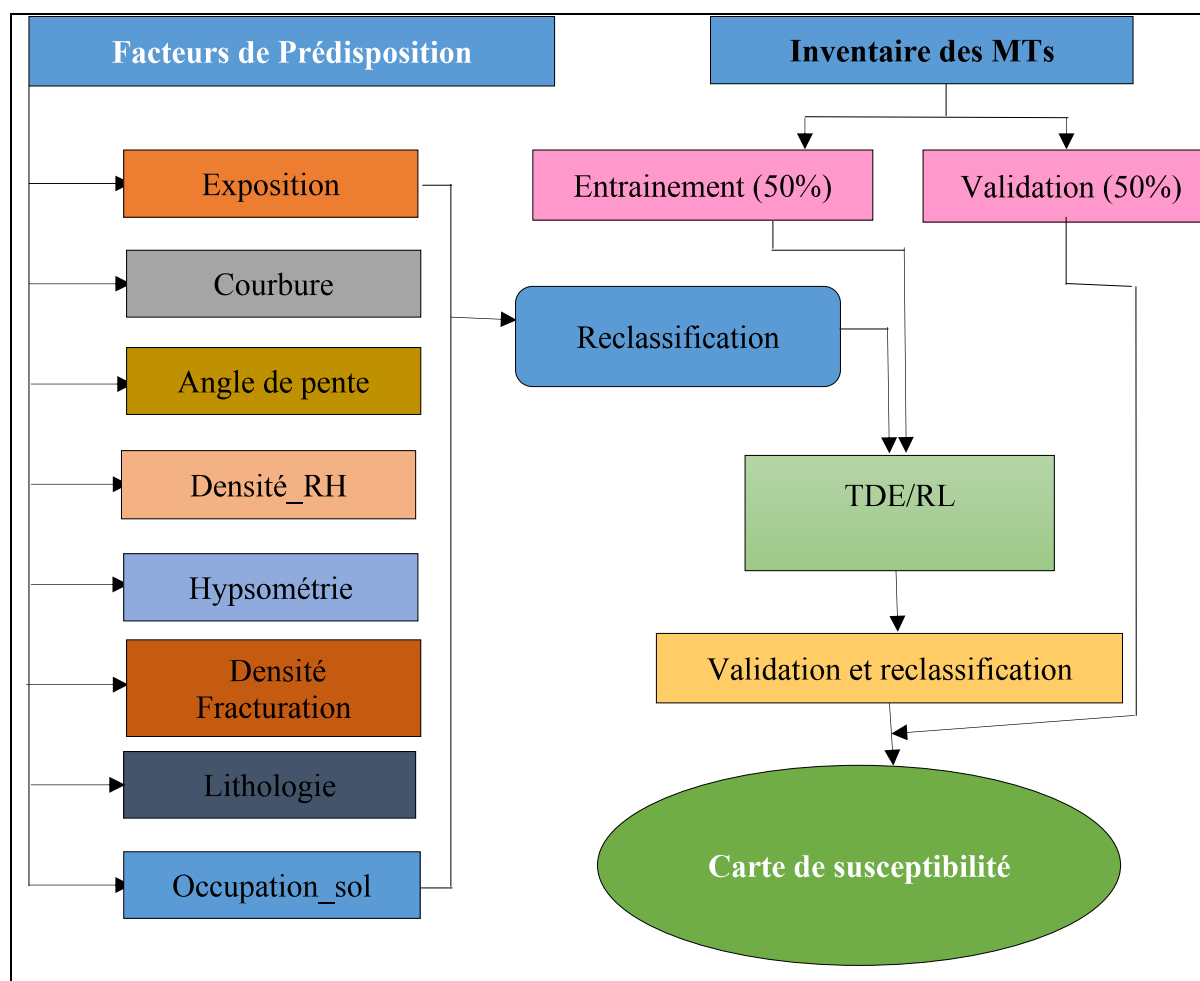


Figure VI-7 : Organigramme général de la méthodologie adoptée pour l'élaboration de la carte de susceptibilité (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.4.1.3.2. Variables prédictives : paramètres de prédisposition et de déclenchement

Les variables prédictives utilisées dans cette étude sont au nombre de dix, et comportent : i. l'exposition des versants, ii. La courbure des versants, iii. Le gradient de pente, iv. La fracturation (densité) v. le réseau hydrographique (densité), vi. L'hypsométrie (relief), vii. La lithologie et viii. Occupation des sols, ix. La zonation spatiale selon le recul des knickpoints et la distance à la route. Ensuite, pour explorer la relation entre les différentes VP et VM, nous avons réalisé un test chi-carrée pour tester la dépendance des variables prédictives et les mouvements de terrain Tableau VI-3).

VI.4.1.4. Test de l'indépendance conditionnelle

La modélisation de la susceptibilité passe par l'évaluation de l'indépendance conditionnelle des variables prédictives sélectionnées avec les mouvements de terrain. Il s'agit d'une présomption fondamentale de cette approche (Bonham-Carter et al 1989) ainsi que pour toute autre approche probabiliste statistique. La violation de cette étape, peut engendrer une surestimation ou une sous-estimation de la probabilité. Parmi les approches préconisées pour évaluer l'indépendance

conditionnelle, le test statistique chi-carré χ^2 est largement utilisé dans ce genre d'études (Van Westen et al., 2003; Poli et Sterlacchini, 2007; Neuhäuser & Terhorst, 2007; Thiery, 2007; Thiery et al., 2007; Dewitte et al., 2010).

Ce test porte les valeurs de χ^2 pour chaque facteur et pour l'ensemble des variables à modéliser, selon un degré de liberté et un seuil de signification (P-value = 0.05) (Bonham-Carter 1994). Lorsque la valeur de χ^2 est inférieure à la valeur critique, cela signifie qu'il y a une n'y a pas dépendance conditionnelle. Dans ce cas, le paramètre concerné ne peut pas être intégré dans le processus de modélisation.

Pour notre cas, le test Khi-carré a été utilisé pour établir une corrélation entre VM et VP. Ainsi, le tableau VI-3 montre les résultats des calculs Khi-2 pour les différentes variables prédictives et les mouvements de terrain dans la région. Les résultats du calcul du degré de liberté entre chaque paire de variables pour des valeurs critique P-value à 5% ont été aussi calculé et permet d'apprécier la relation entre VM et VP.

Pour déterminer l'indépendance entre les VP, nous avons utilisé le test d'Agterberg automatiquement sous Spatial Data Modeller (SDM).

Tableau VI-3 : Valeurs du test chi-carré χ^2 pour mesurer la dépendance entre les variables prédictives et les MTs. D : profond et S : Peu profond (Kubwimana et al., soumis 2022).

Variable	ddl	Khi-2	Processus	(P-value= 5%)
Exposition ^a	7	11.7	D	14.1
Exposition ^a	7	3.3	S	14.1
Courbure	2	33.7	D	5.9
Courbure ^a	2	0.48	S	5.9
Distance à la route ^a	2	1.9	D	3.8
Distance à la route	1	6.4	S	3.8
Zonation des knickpoints	1	229.1	D	3.8
Zonation des knickpoints ^a	1	1.0	S	3.8
Pente	8	354.9	D	15.5
Pente	8	39.7	S	15.5
Densité RH	8	51.0	D	15.5
Densité RH	8	22.0	S	15.5
Fracturation	8	55.5	D	15.5
Relief	6	226.0	D	12.5
Relief	6	107.6	S	12.5
Unités lithologiques	5	34.4	D	11.0
Occupation sol	4	100.6	S	9.5

^aFacteur de contrôle des MTs non significatif (niveau de confiance = 95 %).

Les résultats de Khi-2 montrent que sur dix paramètres choisis, huit présentent une corrélation positive avec les mouvements de terrain profonds. Ces variables sont la courbure des versants, le gradient de pente, la densité du réseau de drainage, la densité de la fracturation, l'hypsométrie (relief), la lithologie

et l'occupation du sol, la zonation par des knickpoints. L'exposition des versants n'a pas été significatif (Tableau VI-3). En effet, la zone d'étude se situe en plein milieu tropical où tous les versants sont ensoleillés de la même façon et de là, ils sont soumis aux mêmes conditions climatiques. Par contre la courbure montre une corrélation négative aux MTs superficiels. La distance au réseau routier n'est pas aussi positivement corrélée avec les glissements de terrain profonds. Pour les MTs peu profonds sont niveau de corrélation est aussi faible. Ces facteurs seront donc éliminés du modèle lors des processus de modélisation de la susceptibilité.

VI.4.1.5. Elaboration de la susceptibilité aux mouvements de terrain

Dans la région des reliefs de Bujumbura, deux grandes catégories de mouvements de versants ont été inventoriés. Il s'agit des MTs profonds (68%) et superficiels (32%). De ce fait, la susceptibilité de ce secteur doit être caractérisée en deux étapes indépendantes vu que les deux processus sont déclenchés par des facteurs de prédisposition complètement différents.

Parmi les 32% des MTs superficiels, au moins trois quarts ont été déclenchés au Nord de Bujumbura par des fortes pluies survenues au 10 février 2014 (IFRC, 2014). Ces glissements ne sont donc pas indépendants étant donné qu'ils sont liés au même événement. La modélisation de la susceptibilité à l'aide de ces variables entraînerait un biais des résultats vu la forte concentration d'instabilité de pente dans une région limitée. Pour cela, lors de l'analyse de la susceptibilité, nous avons sélectionné de façon aléatoire un nombre égale des glissements superficiel pour chaque événement (chapitre V).

Pour la modélisation de la susceptibilité des processus profonds, nous avons sélectionné à partir de la base de données produit au chapitre V, 566 mouvements de terrain dont la moitié a été servi pour la modélisation et le reste pour tester le pouvoir prédictif du modèle (Figure VI-6). Pour permettre une meilleure modélisation de la susceptibilité, nous avons utilisé uniquement les MTs dont la rupture de pente est nettement visible sur terrain ou imageries satellitaire et photographies aériennes et les ont classés en fonction de leur âge afin de nous assurer de l'indépendance entre les deux populations de MT l'une par rapport à l'autre. Une classe est constituée par des mouvements déclenchés avant les années 2000 (MT d'entraînement) et une autre avec ceux activés plus tard (MT de validation) (Figure VI-6). Cette catégorisation a été possible grâce à l'interprétation des images de Google Earth accessible en plusieurs scènes depuis les années 2000, les ortho photos et les images Pléiades à très haute résolution spatiale disponible sur toute l'étendue de la zone d'étude, ainsi que l'observation de terrain et des interviews. Cette catégorisation temporelle a été possible uniquement pour les MTs profonds (Figure VI-7) car les glissements superficiels disparaissent dans quelques années. Notre inventaire des MTs peu profonds ne dépasse pas une dizaine d'années (Chapitre V). Le choix des MTs peu profonds de calibration et de validation s'est fait d'une façon aléatoire.

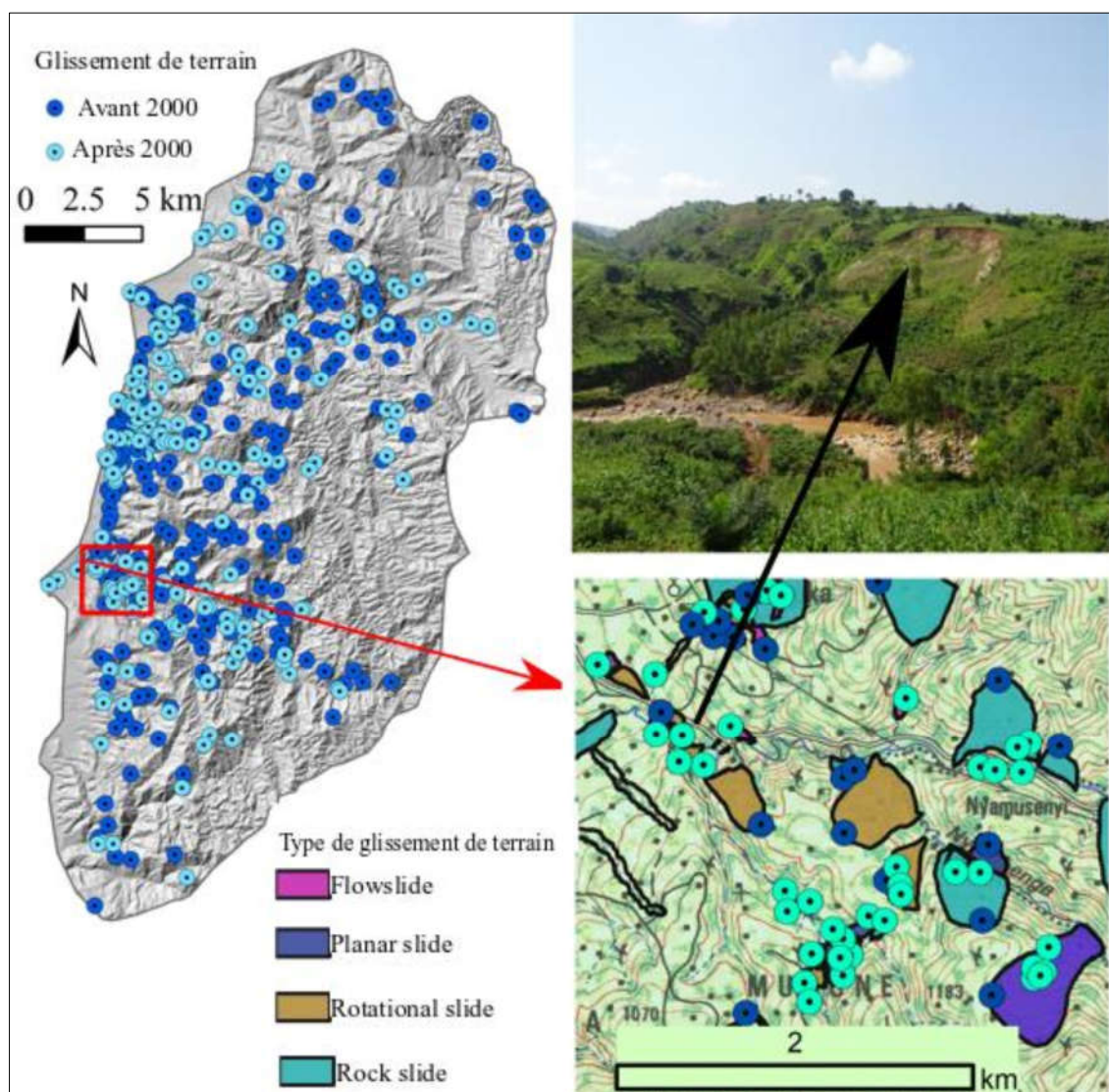


Figure VI-8 : MTs profonds utilisés pour la modélisation par les approches TDE ((Kubwimana et al., 2021a)

VI.4.1.6. Modélisation de la susceptibilité des MTs par la théorie de l'évidence (TDE)

Tout d'abord l'ensemble des variables prédictives ont été intégrées dans notre modèle. A l'issue de cette étape, les poids positifs (W^+) et négatifs (W^-), ainsi que leurs contrastes ($C = W^+ - W^-$) ont été calculés pour chaque classe de variables pour les MTs des collines au voisinage de Bujumbura (Tableau VI-4). Ce calcul ne prend seulement en compte que le centre de la zone de déplétion. Cela nous a permis d'identifier les variables ou les classes de variables qui sont positivement corrélées ($W^+ > 0$ et $W^- < 0$) ou négativement corrélées ($W^+ < 0$ et $W^- > 0$) et les variables non corrélées ($W^+ = W^- = 0$) aux glissements de terrain.

Les classes de variables qui présentent une corrélation positive avec les glissements sont présentées dans le tableau VI-4 en gris. Il est intéressant de noter que plusieurs classes comme la partie rajeunie par le retrait des knickpoints, les pentes entre 25-30° pour la variable gradient de pente, la densité du

drainage (1.3-3.8), le relief autour de 1200m d'altitude, la zone d'exploitation de la carrière et l'unité des gneiss (Tableau VI-4) présentent une corrélation spatiale positive sur la mise en place des glissements de terrain profonds du secteur avec des valeurs de contraste >1 . Ces tendances sont les mêmes pour la distribution des glissements peu profonds saufs que pour ceux-ci on les retrouve sur forte pente à partir de 30° ; dans des champs de cultures mais aussi dans des zones à forte densité du réseau hydrographique (Tableau VI-5).

Tableau VI-4 : Corrélation spatiale entre les variables prédictives et les valeurs de pondération calculées par la théorie de l'évidence.

A : superficie de chaque classe, NMT : Nombre de MTs ; W⁺ : Poids positif ou probabilité à priori ; W⁻ : Poids négatif ou probabilité à postérieur ; C : Contraste qui est la différence entre le poids positif et celui négatif. Les variables surlignées en gris sont les classes de variables qui sont positivement corrélées (W⁺ > 0 et W⁻ < 0). Les valeurs nulles sont non défini par le modèle en d'autres termes le modèle n'a pas trouvé la relation entre VM et VP (Kubwimana et al., soumis 2022).

Facteur	Classe	A (km ²)	NMT	W+	W-	Contraste
Courbure	Concave	46	17	-0.853778	0.090124	-0.943902
	Plane	400	212	-0.19113	0.991242	-1.182372
	Convexe	44	54	0	0	0
Zonation_knickpoint	P. rajeunie	235	234	4.989457	-1.74798	6.737438
	P. relique	256	49	-1.74798	4.989457	-6.737438
Pente (°)	0-5	13	5.0	-1.240366	0.039021	-1.279386
	5-10	40	16.0	-1.119727	0.112642	-1.23237
	10-15	61	26.0	-0.996649	0.160321	-1.15697
	15-20	80	35.0	-0.946782	0.210378	-1.15716
	20-25	69	53	0.514545	-0.075189	0.589735
	25-30	8	21	0	0	0
	30-35	90	55	-0.231513	0.054319	-0.285832
	35-40	93	53	-0.421073	0.107196	-0.528269
	> 40	32	62	0	0	0
Dens_drainage (km/km ²)	0 – 0.9	185	95	-0.253717	0.157754	-0.411471
	0.9 – 1.9	104	54	-0.231977	0.063544	-0.29552
	1.9 – 2.8	92	69	0.757345	-0.158062	0.915407
	2.8 – 3.8	90	64	0.579629	-0.120937	0.700566
Relief (m)	759-1100	83	113	0	0	0
	1100-1400	104	63	0.119993	-0.031867	0.15186
	1400-1700	122	59	-0.380338	0.129987	-0.510325
	1700-1900	122	32	-1.344462	0.448755	-1.793217
	1900-2467	59	16	-1.300113	0.174333	-1.474446
Dens_fract. (km/km ²)	0-0.6	73	20	-1.288342	0.222836	-1.511178
	0.6-1.2	136	70	-0.249342	0.097683	-0.347025
	1.2-1.8	145	101	0.509972	-0.200238	0.71021
	1.8-2.5	98	69	0.543556	-0.12681	0.670366
	2.5-4.4	37	23	0.143602	-0.011764	0.155366
U-lithologiques	Quartzite	73	35	-0.394955	0.070799	-0.465754
	Sédiments	51	86	0	0	0
	Gneiss	169	125	0.731899	-0.344019	1.075918
	Granite	117	25	-1.616505	0.495991	-2.112497
	Métaquartzites	17	1	-3.09188	0.077457	-3.169337
	Pélites	62	11	-1.853137	0.245345	-2.098482

Les poids relatifs de tous les facteurs ont été combinés ensemble et la probabilité à posteriori a été calculée pour les MTs profonds et superficiels. Cette implémentation a été menée par la réalisation du test avec combinaison de paramètres (variables prédictives) pour pouvoir examiner l'influence de chaque variable sur le pouvoir prédictif de notre modèle de susceptibilité, et ce par l'établissement de la courbe de probabilité d'occurrence des MTs (Figure VI-10). Le test a été fait par la combinaison de toutes les variables contrôlant le types de processus sauf celles qui n'étaient pas statistiquement corrélées avec les MTs (Tableau VI-4).

De façon générale, on s'aperçoit que la grande probabilité pour le déclenchement des futurs MTs se trouve à l'ouest de la zone d'étude. Ce qui est cohérent avec notre inventaire qui montrent plusieurs MTs vers l'ouest du secteur (Chapitre V). La distribution spatiale des classes de la susceptibilité corrobore avec la réalité du terrain.

Ainsi, il a été nécessaire d'identifier les différentes classes de susceptibilités en se basant sur l'analyse à postériori de la courbe cumulative de probabilité. Cette étape, a permis de reconnaître quatre classes de susceptibilité (Figure VI-8).

La probabilité d'occurrence des MTs profonds est plus élevée dans le paysage rajeunie marqué par des reliefs faibles de l'ouest de la zone d'étude. De plus, Les MTs sont plus susceptibles aux pentes moyenne entre 20° et 25° pour les processus profonds et sur des pentes très fortes pente pour les processus peu profonds comme démontré précédemment au chapitre V. Par rapport à la lithologie, le gneiss est beaucoup plus sensible aux MTs en raison des propriétés physico-chimiques qui lui confère une altérabilité élevée. Les zones très fracturées sont plus susceptibles aux ruptures de pente profondes (Tableau VI-4). Cela prouve l'importance de la tectonique pour l'occurrence des MTs profonds dans la zone d'étude et dans la région. Le drainage élevé favorise l'occurrence des MTs profonds. La courbure des versant contrôle uniquement les glissements profonds (Tableau VI-3). En effet, les versants concaves retiennent l'eau de surface et leur infiltration augmente la susceptibilité de rupture des MTs profonds. La pente, le relief et l'occupation du sol restent les principaux de conditionnement des processus peu profonds (Tableau VI-3). Le réseau routier existant en faible densité dans la zone n'est pas une cause de déclenchement des MTs.

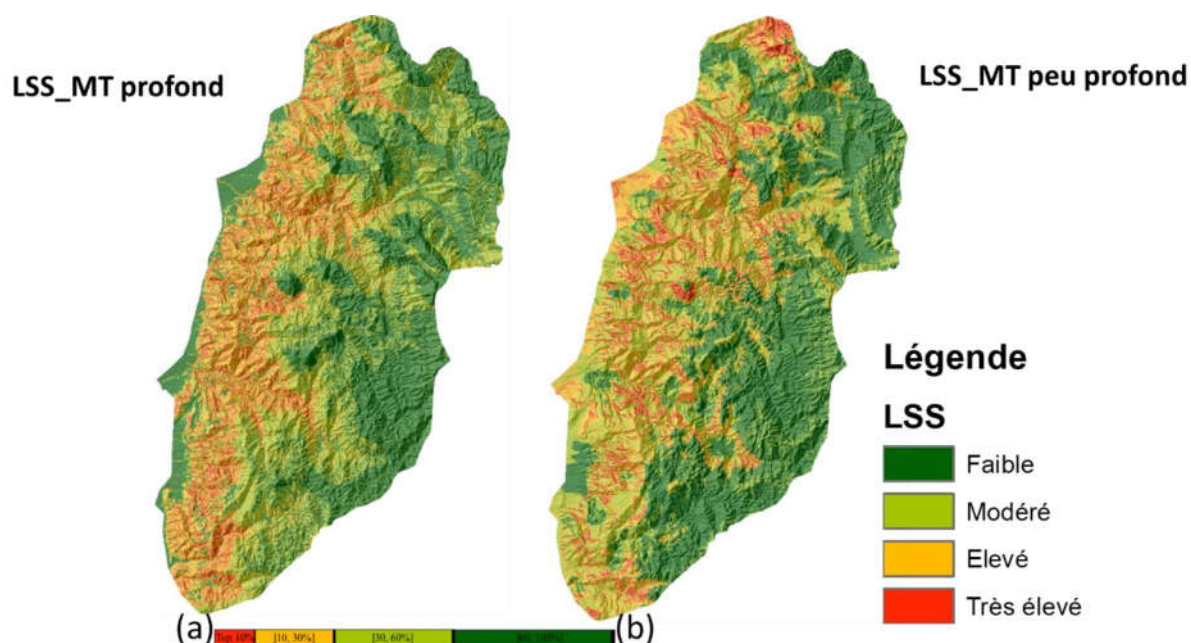


Figure VI-9: Cartes de susceptibilité des MTs par la théorie de l'évidence (TDE) pour les (a) MTs profonds et (b) peu profonds (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.4.1.7. Conclusion

Cette étude constitue la première tentative mettant en œuvre une approche probabiliste bivariable à l'échelle locale, pour l'évaluation la susceptibilité aux mouvements de terrain dans un relief montagneux (collines à la périphérie de Bujumbura). Il s'agit d'une approche exploratoire basée sur l'utilisation de la théorie de l'évidence (TDE) qui est une des méthodes statistiques indirectes. L'analyse a été menée à une taille de cellule (grid cell) ou de pixel de 10m x 10m, qui correspond à la résolution spatiale des données MNE utilisées. Les paramètres de base pour conduire une telle procédure sont les mouvements de terrain du secteur d'étude (variable à modéliser) et les facteurs de prédisposition intervenant dans la genèse des MTs (variables prédictives). Nous avons tout d'abord vérifié la dépendance des variables à modéliser avec le test statistique Khi-2. Les variables prédictives comme l'exposition des versants pour les MTs profonds et peu profonds, la courbure pour les MTs peu profonds, la distance à la route pour les MTs profonds n'ont pas montré une corrélation significative avec les MTs et pour cette raison, nous ne les avons pas intégrées dans le processus de modélisation. Leur violation aurait donné des résultats biaisés et/ou erroné. Les variables restant ont permis d'effectuer la modélisation et la performance du modèle a été calculée par l'aire sous la courbe (AUC) qui est le rapport entre la sensibilité et la spécificité. D'une façon visuelle, les cartes de susceptibilité réalisées corroborent bien avec la vérité de terrain. Il faut noter que la susceptibilité élevée se trouvent dans les secteurs avec des gradients de pentes très importants,

où on assiste beaucoup plus aux phénomènes, d'écroulements et de coulées de débris caractéristiques du domaine de la haute montagne (paysage rajeuni par le rifting), mais aussi ceux avec des gradients de pentes moyens (20-30°) où on rencontre d'avantage les glissements et les effondrements. L'AUC a permis de retenir que la TDE présentent une performance excellente pour les MTs profonds et très bonne pour les MTs peu profonds (Figure VI-10) et les cartes de susceptibilité sont adaptées pour la prédiction des glissements de terrain à l'échelle considérée.

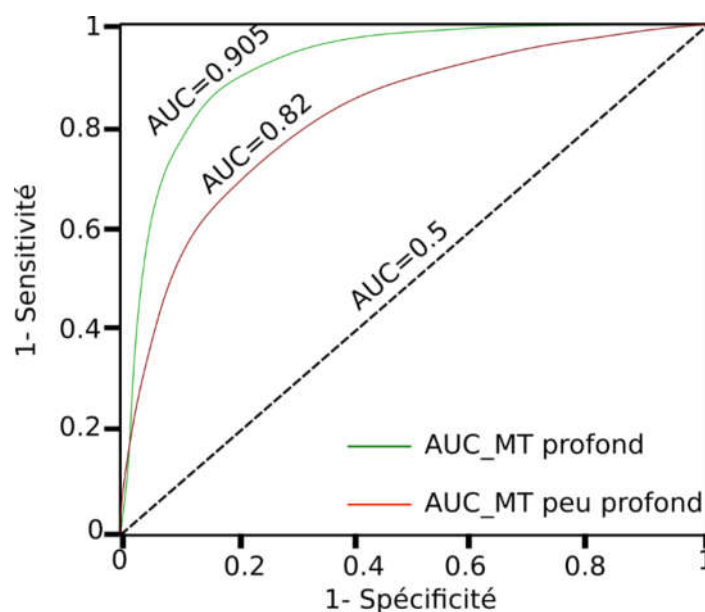


Figure VI-10: Courbe de performance AUC obtenue par la TDE pour les MTs profonds (vert) et peu profonds (rouges) ; (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.4.3. LA REGRESSION LOGISTIQUE (RL): APPROCHE MULTIVARIEE

VI.4.3.1. Introduction

La régression logistique est utilisée pour décrire la relation entre une variable dépendante binaire (la présence ou l'absence de glissements de terrain) et une ou plusieurs variables prédictives indépendantes (Hosmer et Lemeshow, 2000). Nous avons utilisé la régression logistique intégrée dans Arc SDM (Spatial Data Modeller). Les données de glissements de terrain pour entraînement et les facteurs de contrôle sont les même que pour la TDE. Les points sont choisis en dehors des zones de glissements car la topographie actuelle diffère de celle du moment de la rupture (voir chapitre V; Maki Mateso, in review). Les valeurs de l'AUC pour les modèles de susceptibilité aux glissements de terrain qui ne s'appuient que sur le facteur prédicteur considéré, afin d'évaluer dans quelle mesure ce prédicteur peut être utilisé pour différencier les emplacements de glissement de terrain. Cela a permis de quantifier la contribution de chaque variable au modèle de susceptibilité (Depicker et al., 2020). Il est à noter que seuls les prédicteurs dont la valeur de l'AUC était comprise entre 50 et 100 ont été retenus (Tableau VI-5).

VI.4.3.2. Principes de la régression logistique

La régression logistique est une des approches statistiques les plus utilisées pour l'évaluation de l'AMT (Carrara et al., 1991; Atkinson et Massari, 1998; Chung et Fabbri, 1999; Lee et Min, 2001; Dai et Lee, 2002; Ohlmacher et Davis, 2003; Can et al., 2005; Ayalew and Yamagishi, 2005; Chang et al., 2007; Greco et al., 2007; Thiery, 2007; Thiery et al., 2007; Dong et al., 2010; Shirambere et al., 2018; Depicker et al., 2020). Il s'agit d'une méthode multivariée correspondant à un modèle non-linéaire, et permettant de calculer la probabilité d'occurrence spatiale d'un mouvement de terrain en fonction de différents paramètres de prédisposition et de déclenchement, en se basant sur une fonction de répartition sigmoïdale. Les variables prédictives peuvent y être intégrées aussi bien sous une forme numérique que catégorielle. Par contre la variable à modéliser devrait être obligatoirement sous forme catégorielle, c'est-à-dire, traduite en termes de présence ou absence (0 ou 1) du phénomène dans le pixel. Cette méthode est largement décrite dans la littérature, notamment par Hosmer et Lemeshow, 2000; Kleinbaum et Klein, 2002. Dans la présente étude, la régression logistique est utilisée pour décrire et prédire l'influence plusieurs paramètres de prédisposition et de déclenchement sur l'absence ou la présence de MT. Cette analyse nous permettra de modéliser la probabilité pour qu'un événement (MT) survienne pour différentes valeurs d'un ensemble de variables descriptives quantitatives et/ou qualitatives (gradient de pente, fracturation, lithologie...etc.). Les probabilités et les différents coefficients sont calculés à l'aide d'un modèle de logits s'exprimant en équation linéaire :

Équation VI-10: $\text{logit}(y) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots e$

Avec :

-y : la variable dépendante (ou à modéliser),

- x_1, x_2, x_3 : sont les variables prédictives,

- b_1, b_2, b_3 : sont les coefficients obtenus par régression et mesurant la contribution de chaque facteur de prédisposition ou de déclenchement,

-a : une constante,

-e : erreur.

Le logit de 'y' est le logarithme naturel des odds

Équation VI-11 : $\text{logit}(y) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$

Quand 'p' présente la probabilité d'occurrence de 'y', et que 'p (1-p)' présente les odds ; pour convertir les logit(y) en termes de probabilité l'équation 2 s'écrit sous forme de l'équation 9.

Equation VI-12:

$$p = \exp(b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots) / (1 + \exp(b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots))$$

$$p = \exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots) / (1 + \exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots))$$

Tableau VI-5: AUC des différences facteurs pour l'occurrence des MTs (Kubwimana et al., soumis 2022).

Variables prédictives	AUCi en pourcentage	
	Glissements profonds	Glissement peu profonds
Distance aux routes	-	52.3
Réseau hydrographique	55.9	56.1
Courbure	56.1	52.2
Occupation du sol	-	59.8
Exposition des versants	-	57.8
Pente	59.4	59.9
Fracturation	60	-
Hypsométrie	63.8	63.4
Lithologie	65.5	-
Zonation du paysage selon les knickpoints	67.4	-

Le choix des variables a été fait en spécifiant les classes de référence et les variables dummies (Tableau VI-6). Pour y arriver, nous nous sommes référés sur les fréquences des MTs dans les différentes classes des variables de prédiction au chapitre V. Les variables prédictives (zonation du paysage selon le retrait des knickpoints par érosion, la lithologie, l'hypsométrie (relief), la fracturation et la pente constituent les plus importants paramètres qui expliquent la distribution spatiale des MTs profonds aux environs de Bujumbura. Les autres facteurs comme la courbure et le réseau de drainage viennent en second lieu. Ces facteurs sont responsables pour la genèse des glissements de terrain voire tous les autres types de mouvements gravitaires de notre secteur. Les MTs peu profonds sont plus contrôlés par l'hypsométrie, la pente et l'occupation des sol.

Tableau VI-6: Les variables de prédiction utilisées pour la modélisation de la susceptibilité avec la RL

Variables	Types												
Hypsométrie	Exposition		Courbure en long	Courbure en profile	Pente	Drainage	Knickpoints		Litho		Fracturation	Occupation du sol	
Continue	Catégorique		Continue	Continue	Continue	Continue	Catégorique		Catégorique		Continue	Catégorique	
	N	Dumie					Rajeunissement	Dumie	Gneiss	Dumie		Bati	Dumie
	NE	Dumie					Relique	Reference	Granite	Dumie		Champs	Dumie
	E	Reference							Pointement Gr	Dumie		Forêt	Reference
	SE	Dumie							Sediments	Dumie		Grassland	Dumie
	S	Dumie							Metapelites	Reference		Carrière	Dumie
	SW	Dumie							Quartzite	Dumie			
	W	Dumie											
	NW	Dumie											

Comme réalisé avec l'approche bivariée de la TDE, la carte par approche multivariée de la régression logistique de la susceptibilité aux glissements de terrain profonds et peu profonds (Figures VI-9a,b) a été reclassifiée manuellement. Les deux processus se répartissent en général dans le paysage rajeuni. Pour les deux processus, la zone occupée par un couvert forestier montre une stabilité aux ruptures de pente. Comme pour les modèles précédents, La figure 3c,d montre que la susceptibilité est la plus élevée du cote ouest de la zone d'étude. L'est de la région est prédite comme moins sujettes aux MTs par les différents modèles que nous avons testés y compris la RL. L'algorithme TDE a donné l'AUC la plus élevée surtout lorsqu'elle est calculée pour les glissements profonds. Cela signifie que la TDE est plus performant pour la modélisation des MTs dans la zone d'étude.

Bien que la hiérarchie des variables de prédiction des MTs diffèrent pour les trois modèles, une tendance générale a pu être observée. La géomorphologie, la géologie, la densité de la fracturation sont des facteurs principaux de contrôle des MTs profonds. La pente et l'occupation du sol sont de loin des facteurs le plus importants dans l'occurrence des processus superficiels. L'hydrologie et la courbure

concave sont des facteurs intermédiaire dans le contrôle des instances profondes. Les pentes concaves ont tendance à être les plus sujettes aux glissements de terrain.

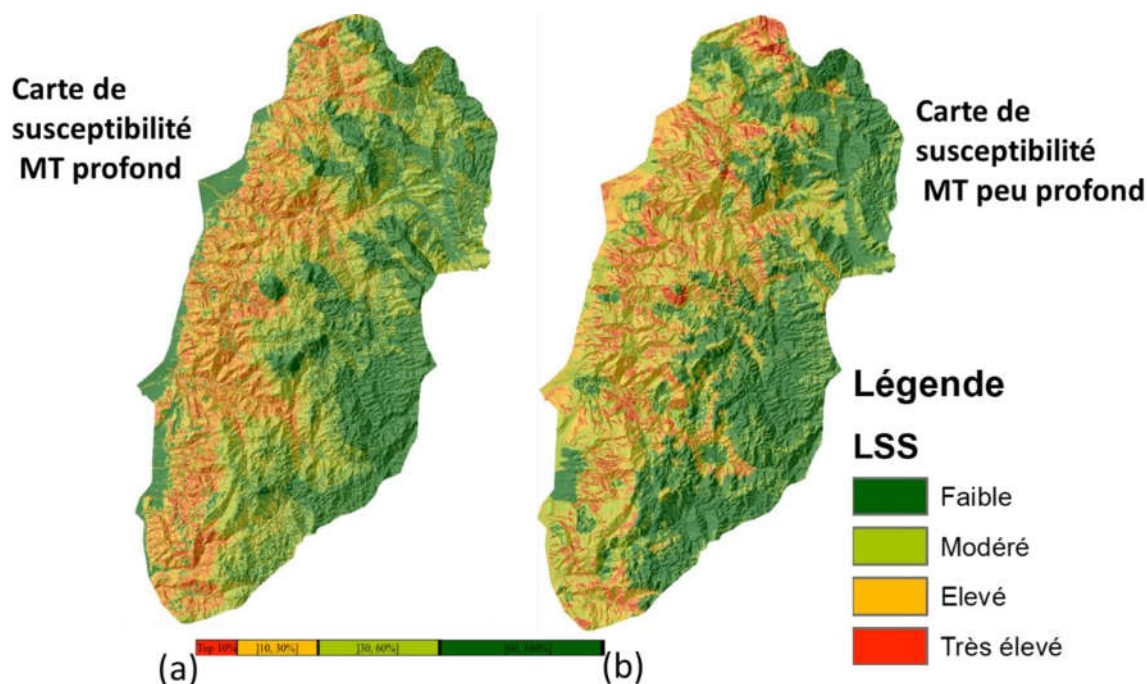


Figure VI-11: Cartes de susceptibilité des MTs par la régression logistique (RL) pour les (a) MTs profonds et (b) peu profonds (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.4.3. Conclusion

La modélisation par régression logistique a permis de classer les différents paramètres selon leur importance dans le contrôle de la présence/absence des MTs dans les reliefs montagneux périphériques de la ville de Bujumbura. Selon leur influence dans le conditionnement des MTs, il s'agit de la zonation du paysage selon la géomorphologie, la lithologie, l'hypsométrie (relief), la densité de la fracturation, le gradient de pente, la courbure des versants, la densité du réseau hydrographique et la lithologie pour les MTs profonds. Pour les MTs peu profonds, il s'agit du relief, la pente, l'exposition des versant, l'occupation des sols, la courbure, la densité du réseau hydrographique et la densité de route. Le calcul de l'AUC (Figure VI-12) a permis de retenir que la RL présente une très bonne performance pour les MTs profonds et bonne pour les MTs peu profonds. Ainsi, la RL s'avère plus adaptée à la prédiction des glissements de terrain à l'échelle du présent de travail.

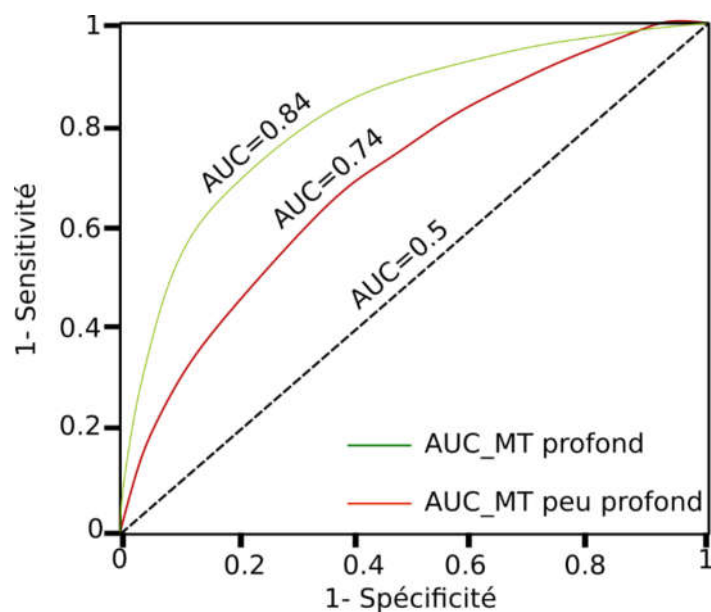


Figure VI-12: Courbe de performance AUC obtenue par la RL pour les MTs profonds (vert) et peu profonds (rouge) ; (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.5. Qualité des cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain et validation du modèle

Pour évaluer la performance des modèles de susceptibilité, les MTs cartographiés au chapitre V ont été ensuite réutilisés pour la construction des courbes de prédiction (Figure VI-10) et le calcul de l'AUC correspondante (Figures VI-13). Ceux-ci nous ont permis de vérifier la validité de notre modèle de susceptibilité.

Le modèle de susceptibilité PHA montre que le nombre de MTs atteints par les classes 1, faible (10% de la zone plus susceptible) est respectivement de 33% et 29% pour les processus profonds et peu profonds. Les résultats de l'AUC sont de 72% et 70% pour les le modèle des processus profonds et peu profonds. Le taux de prédiction et les résultats de l'AUC confirment la validité de notre modèle de susceptibilité. Cette approche semble être un bon outil de prédiction des MTs dans notre secteur.

Pour la TDE, la superficie occupée par chaque classe de susceptibilité ainsi que l'intervalle des probabilités ont été observés à la Figure VI-12. Le taux de prédiction des processus profonds et peu profonds est respectivement de 48% et 29% dans les 10% de la zone à forte susceptibilité. Les résultats de l'AUC sont 0.905 et 0.84 pour les processus profonds et superficiels. Il ressort que les deux tests fournissent généralement de bons résultats et surtout la modélisation des MTs profonds.

Pour la RL, les valeurs de l'AUC obtenues montrent une meilleure performance avec une aire sous la courbe AUC égale à 84% et 74% respectivement pour les MTs profonds et les MTs peu profonds (Figure VI-3). La carte de susceptibilité obtenue (Figure VI-9) montre une concentration dans les 10%

de la zone plus susceptible 38% des glissements profonds (Figure VI-10a). Il est de même pour les MTs peu profonds où nous avons une prédiction de 36% (Figure VI-10b).

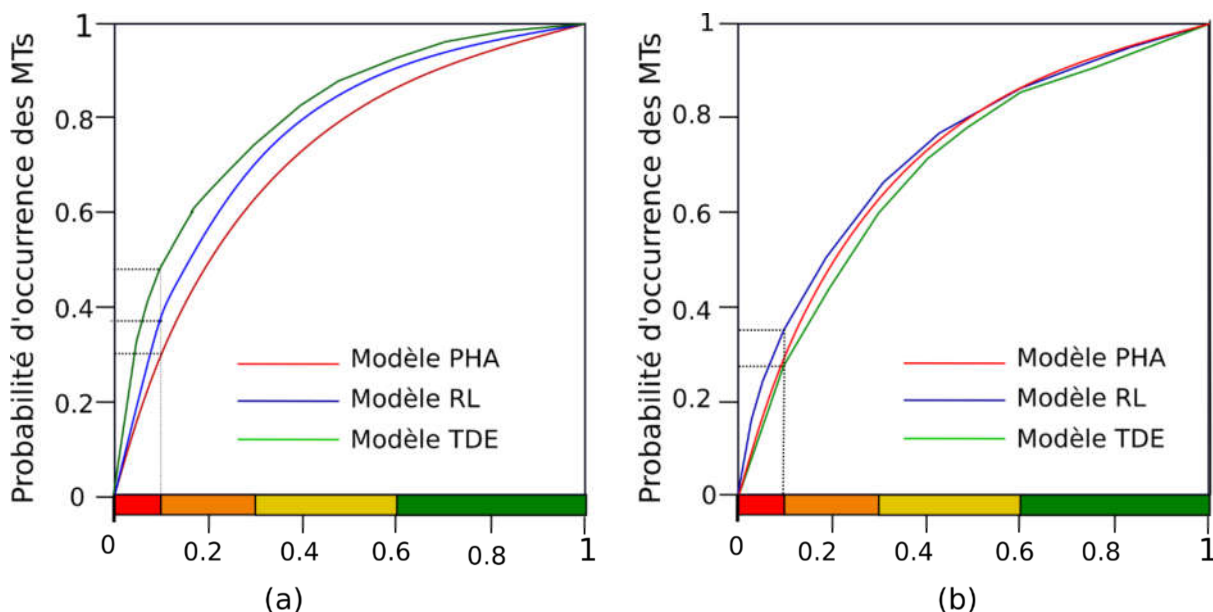


Figure VI-13: Taux de prédiction des MTs a) profonds et b) peu profonds. Le taux de prédiction montre la proportion de glissements de terrain en fonction de la proportion de la zone d'étude avec la plus grande susceptibilité. Les différentes classes de susceptibilité sont affichées sur l'axe des abscisses (Kubwimana et al., soumis 2022).

VI.6. Comparaison des modèles de susceptibilités dans les reliefs de Bujumbura

L'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain s'est réalisée avec trois approches. Une approche qualifiée d'expert (PHA) deux autres basées sur les données (TDE et RL). L'aire sous la courbe AUC est plus élevée pour la TDE que la RL et le PHA. Il est en de même pour les taux de prédiction comme c'est démontré au point VI.5 et la TDE vient en première position pour la modélisation des MTs profonds. Les différentes cartes de susceptibilité aux MTs de terrain suivant les trois approches ont été combinées à la figure VI-11.

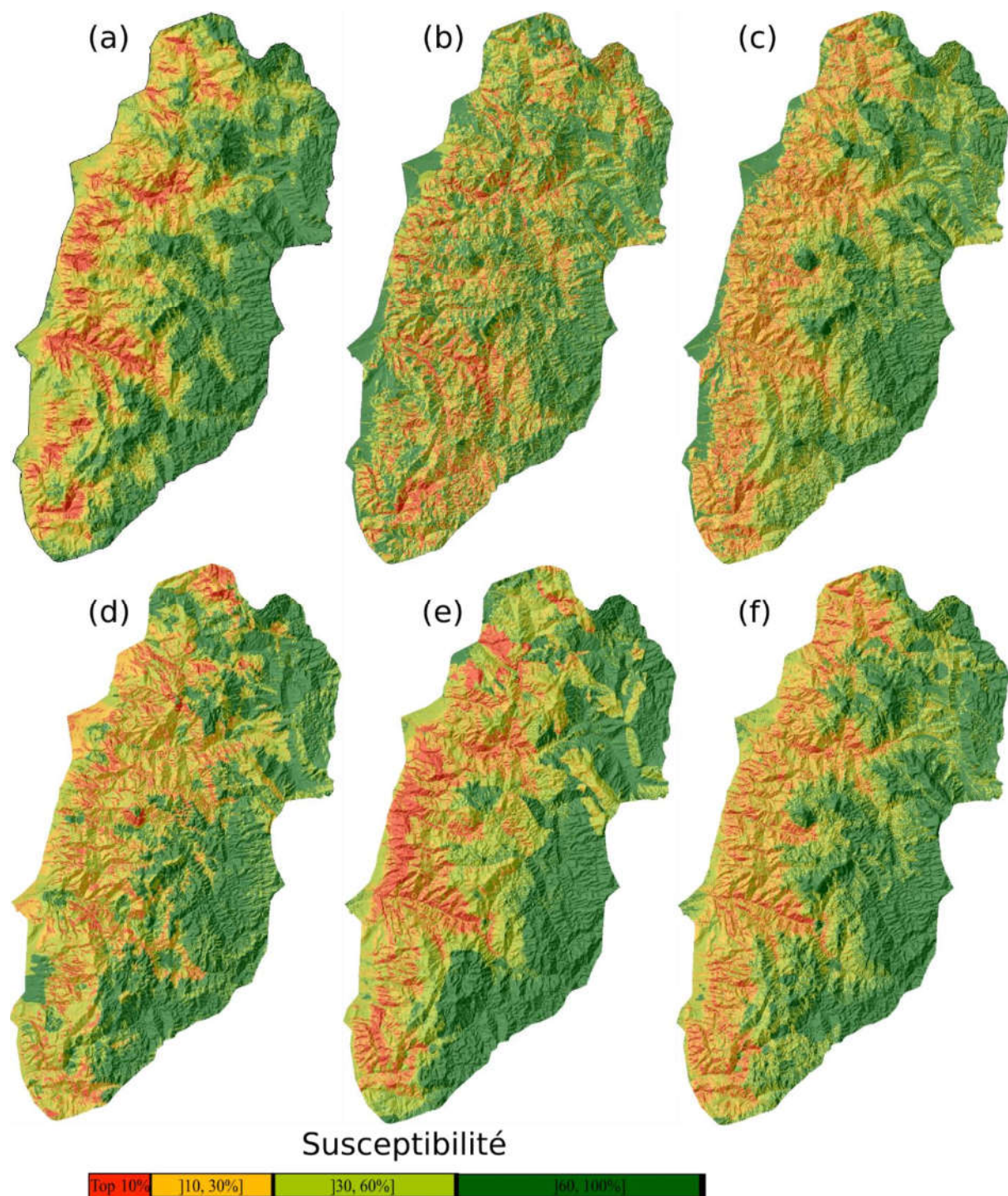


Figure VI-14 : Comparaison de la performance des 3 modèles de susceptibilité des MTs: processus d'hierarchisation analytique (PHA) pour les (a) MTs profonds (AUC=0.72) et (b) peu profonds (AUC=0.70), régression logistique (RL) pour (c) les MTs profonds (AUC= 0.84) et (d) peu profonds (AUC=0.74) et la théorie de l'évidence (TDE) pour les (e) MTs profonds (AUC= 0.905) et (f) peu profonds (AUC=0.83) ; (Kubwimana et al., soumis 2022)

VI.6. Discussion

La méthode statistique a montré une meilleure performance pour la TDR et la RL par rapport à la méthode heuristique représentée par le modèle PHA. Ces analyses ont été réalisées en différenciant les processus profonds et peu profonds. C'est pour la première fois dans la zone d'étude. Les études antérieures ont évalué la susceptibilité en considérant les glissements de terrain dans l'ensemble (Nibigira et al., 2015; Shirambere et al., 2018; Depicker et al., 2020). L'usage d'un inventaire d'environ 600 MTs lors de la modélisation de la susceptibilité est unique à l'échelle de Bujumbura. Les recherches récentes ont utilisé moins de 100 glissements de terrain; le sixième de notre variable modélisée (Nibigira et al., 2015; Shirambere et al., 2018). Malgré quelques différences dans l'ordre d'importance des facteurs, les modèles montrent que la zonation spatiale selon le recul des knickpoints, la lithologie, le relief, la fracturation et la courbure sont des principaux facteurs qui contrôlent les mouvements de terrain dans le secteur. En d'autres mots, le contrôle de la géomorphologie, géologie et sismicité semble avoir un rôle très important dans l'occurrence des MTs profonds du secteur. Cela vient confirmer les résultats du chapitre V obtenus avec l'analyse de la fréquence des MTs (Frequency Ratio). Par exemple, l'ouest montre une forte susceptibilité aux ruptures de pente que l'est de la zone d'étude. L'ouest a un relief accidenté par le soulèvement tectonique et le retrait des knickpoints par érosion, ce qui le rend fragile aux ruptures de pente. Cette zone est également formée par des roches facilement altérables en régolithe comme des gneiss. Pour l'importance de la fracturation, il semble étrange que leur densité semble jouer un rôle majeur, malgré notre observation que tous les glissements de terrain récents ont été déclenchés par la pluie (cf. Chapitre V). Cependant, pour les glissements de terrain plus anciens ainsi que les plus grands, leur cause de déclenchement reste inconnu, donc un déclenchement sismique pour ces caractéristiques ne peut donc pas être exclu. Une autre raison possible de l'importance de cette variable pourrait être le rôle de l'activité sismo-tectonique comme facteur préparatoire aux glissements de terrain plutôt qu'un facteur de déclenchement. Dans d'autres régions, il a été démontré que l'activité sismo-tectonique affaiblit le substrat et diminue la stabilité des pentes (Huang et al., 2013; Marc et al., 2015; Havenith et al., 2015; Carlini et al., 2016).

L'est, grâce à son paysage relique, connaît des pentes faibles par rapport à la moyenne de la zone d'étude. Ainsi, les faibles valeurs de susceptibilité se trouvent à l'est, zone à couverture végétale élevée. Ce qui montre le contrôle de l'occupation du sol dans l'occurrence des MTs peu profonds. Les valeurs positives de susceptibilité dans les champs de cultures et les exploitations de la carrière montrent le rôle de l'action anthropique dans le déclenchement de MTs. L'exploitation des matériaux de construction se fait d'une façon anarchique sans respect des règles environnementales et serait la cause des occurrences des MTs liés. Dans les champs agricoles, la forte susceptibilité des MTs peu profonds pourrait être liée à l'érosion du régolithe. Ce processus de diminution du régolithe est encore accentué dans les terres cultivées. Wilken et al. (2021) ont mesuré dans la région que l'érosion des terres cultivées en Afrique tropicale peut atteindre environ 40 cm en 55 ans. Une deuxième hypothèse qui peut expliquer la configuration

des glissements de terrain dans un environnement anthropisé est que, parallèlement à l'érosion du régolithe, il y a aussi la sédimentation et la formation de colluvions (Wilken et al., 2021), ce qui entraîne une accumulation locale de matériaux. Ce matériau forme un dépôt sédimentaire meuble, généralement dans des endroits où les angles de pente sont plus faibles. Cela expliquerait une forte sensibilité des MTs à l'extrémité de la ville de Bujumbura i.e au contact plaine–contreforts, le piémont dans des dépôts colluvionnaires.

Les méthodes utilisées pour la cartographie de la susceptibilité sont effectives. Le calcul de l'AUC, du taux de prédiction (ajustement des classes de susceptibilité), et la construction ont permis de retenir que la théorie de l'évidence présente de meilleures performances que la régression logistique et est mieux adaptée pour la prédiction des MTs dans les collines surplombant Bujumbura. La carte de susceptibilité de la figure VI-3e est meilleure pour définir la sensibilité locale des MTs. La modélisation des glissements de terrain peu importe le processus n'a pas intégré les variables facteur déclencheur. Or les précipitations sont connu le principal facteur de déclenchement des MTs dans la zone d'étude et la région (Monsieurs et al., 2018; Dewitte et al., 2021, Chapitre V). Cette donnée manque et sa présence augmenterait la précision de nos modèles.

Les résultats cette recherche cadre bien avec le modèle régional de Depicker et al. (2020) qui indiquent que les variables topographiques, géologiques et géomorphologique sont au contrôle des MTs dans la région. Comme dans ce travail; ils indiquent les variables comme la pente, la courbure plane, l'accélération, la géologie et la densité des failles actives contrôle la rupture de pente dans la région. Comme pour notre cas, Depicker et al. (2020) ne tiennent pas compte des variables de déclenchement. Les cartes produites à l'échelle régionale, résolution 30m, montrent une susceptibilité très élevée au flanc est de la branche occidentale du rift est africain où est localisée notre zone d'étude. Cette similitude avec des modèles régionaux confirme le caractère relatif de la sortie du modèle présenté et supporte nos résultats de l'échelle locale. De plus, même si nos cartes de susceptibilité ont été dirigées à l'échelle Bujumbura, notre inventaire peut être comparé avec les données présentées dans les cartes de susceptibilité de l'Afrique. A l'échelle du continent, Broeck et al. (2018) ont produit des cartes de susceptibilité avec un modèle basée sur les données – RL. Au niveau du Burundi (58fois notre zone d'étude), Broeck et al. (2018) ont modélisé la susceptibilité continentale avec 204 MTs de l'inventaire de Nibigira et al., 2013; environ le tiers des données utilisées dans le cadre de ce travail à l'échelle locale. Les cartes de susceptibilités de l'échelle continentale ont une résolution 12'' et montrent simplement que l'ouest du Burundi fait partie des grandes zones sensibles aux MTs par rapport à la situation moyenne de l'ensemble du continent. Enfin, notre étude peut aussi être comparée à la susceptibilité globale. Stanley & Kirschbaum (2017) ont produit un modèle globale de susceptibilité des MTs. Leurs cartes n'ont pas été calibrées avec les données mais sont base de la méthode expert et fournissent moins de détail en termes de la résolution spatiale (30''). Néanmoins, la tendance générale des cartes correspond à notre modèle. Les quelques régions présentant une susceptibilité modérée aux

glissements de terrain correspondent aux régions très sensibles du rift est africain, au sein desquelles appartiennent notre secteur étudié.

Au niveau de la performance, notre modèle approche les valeurs de l'AUC du modèle régional (Tableau VI-7). Par contre, le taux de prédiction dans les 10% plus susceptible est inférieur aux modèle de Depicker et al. (2020). Une possible plausibilité géomorphologique et/ou des erreurs de la calibration qui aurait augmenté la performance du modèle AUC ne peuvent pas donc être ignorées (Stager et al., 2016).

Tableau VI-7: Comparaison des performances des modèles de susceptibilité à base de l'AUC

Modèle	AUC (%)	Source
Modèle local	90.5	Cette étude
Modèle régional	92.4	Depicker et al., 2020
Modèle continental	74.1	Broeck et al., 2018
Modèle global	74.8	Stanley & Kirschbaum, 2017

En perspective, notre étude pourrait servir de base pour la modélisation de l'aléa MT. Nous avons montré que dans 10% de la zone à forte susceptibilité, il y a eu occurrence de 48% des MTs profonds activés après les années 2000. Dans ce cas, nous nous attendons au même nombre de MTs profonds dans les 20 prochaines années. Ce chiffre pourrait être biaisé par des réactivations car en effet, les glissements de terrain se produisent là où les autres se sont produits dans le passé (Samia et al., 2017). Pour les MTs peu profonds, dans 10% de la zone plus susceptible se produiront 38% des processus peu profonds dans les 10 prochaines années. Néanmoins, l'inventaire des glissements de terrain peu profonds utilisé représente une fenêtre d'observation trop étroite. En tant que telle, la distribution spatiale des glissements de terrain peu profonds pourrait être biaisée par le modèle stochastique des événements récents de fortes pluies et des perturbations anthropogéniques.

VI.7. Conclusion du Chapitre VI

A l'échelle de Bujumbura, une première évaluation précise de la susceptibilité aux MTs a été entreprise. Trois modèles différents ont été construits, l'un incluant l'analyse d'expert et deux autres basés sur les données. Tous les modèles se réalisent en différenciant les processus profonds et peu profonds. Dans l'ensemble, les trois modèles sont mieux pour la modélisation de la susceptibilité à l'échelle de Bujumbura. Cependant, les modèles basées sur les données surtout la TDE fournissent des meilleurs performances. Ce modèle de susceptibilité est robuste et performant en termes de la modélisation de susceptibilité. Ledit modèle montre qu'en plus des facteurs topographique, géomorphologique et géologique qui contrôlent les processus profonds, il s'est avéré qu'il existe d'autres facteurs de contrôle des MTs. Il s'agit des facteurs humains entre autres l'occupation du sol qui contrôlent les processus de surface.

Comparativement aux modèles existant, cette recherche constitue une valeur ajoutée dans l'évaluation de la susceptibilité à l'échelle locale. Les cartes de susceptibilité réalisées possèdent une résolution élevée que les modèles régional, continental et global. Au niveau de la performance, notre modèle est comparable à celui de l'échelle régionale en terme d'AUC. Notre modèle a utilisé un inventaire de MTs précis et détaillé pour la calibration et la validation ainsi que des données auxiliaires de haute résolution. Malgré la différence de résolution des cartes de susceptibilité, notre modèle présente une similitude aux modèles régional, continental et global qui montrent que la région du rift est africain est prédisposée aux MTs. La différenciation de processus de MTs vient de nouveau comme un point fort pour l'évaluation de la susceptibilité à l'échelle locale car d'autres modèles n'ont pas considéré cet aspect.

Les cartes de susceptibilité produites pourraient constituer un outil de base indispensable aux autorités en charge de l'aménagement du territoire. De plus, les résultats de cette étude pourraient encore être améliorés en intégrant une simulation d'écoulement des MTs et une inclusion de la dynamique des précipitations, donnée non disponible pour le moment. Cela constituerait un document intéressant aux décideurs à intégrer dans le plan de gestion et de prévention des catastrophes naturels. Cette étude constitue une recherche préliminaire qui pourrait être suivi par une évaluation de l'aléa MT et du risque associé.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1. Conclusion générale

Depuis 2013, un inventaire exhaustif des mouvements de terrain à l'échelle de la région nord Tanganyika en général et dans les reliefs de Bujumbura en particulier a été mené en utilisant des interprétations visuelles des images satellitaires de très haute résolution, des photographies aériennes actuelles et historiques dès les années 1950s ainsi que des investigations de terrain.

Les reliefs de Bujumbura visées par cette recherche sont caractérisées par une forte densité de mouvements de versants. Le secteur d'étude a été sélectionné grâce à la disponibilité d'un jeu de données indispensable pour décrire, comprendre et évaluer le processus de rupture des pentes dans la région. Ce qui a motivé ce travail, c'est que les MTs restent l'un des aléas naturels les plus fréquents dans les régions de montagnes tropicales comme la nôtre. Dans ces régions, des techniques d'inventaire quantitatif avec l'utilisation de modèles de prédiction dans l'évaluation des mouvements de terrain manquent.

Pour répondre aux objectifs de cette recherche, une méthodologie basée sur l'inventaire et la caractérisation de la distribution spatiale et temporelle des MTs a été établie. L'évaluation des mouvements de terrain constitue une étape nécessaire pour l'aide à la prise de décision, et aussi pour le bien-être des habitants de la région. La zone d'étude connaît une variation géologique, géomorphologique et climatique du secteur d'étude. Il en ressort que ce secteur met en évidence des formations géologiques variées avec de fréquentes lithologies diversifiées (colluvion, gneiss, granites, pegmatites, quartzites, et méta quartzites) sous un climat tropical humide favorisant une altération rapide avec formation du sol latéritique épais susceptible aux ruptures de pente. La tectonique est justifiée par la localisation de la zone d'étude dans le domaine d'effondrement du rift est africain, branche occidentale. Tectoniquement, la région est caractérisée par l'effet du rifting qui affectent les roches en place, et provoquant un rajeunissement du paysage favorable aux MTs. Cette position particulière au rift se traduit actuellement par une sismicité et du volcanisme associé. De ce fait, les différentes unités géologiques s'y trouvant sont fragilisées par la réactivation et l'intensification de la fracturation et deviennent très susceptibles aux MTs. L'inventaire, la cartographie, la classification et la caractérisation des mouvements de terrain, correspondent à des éléments cruciaux pour mener à bien notre recherche. Cette étape a permis de mettre en place un catalogue et une base de données cartographique détaillée de 1286 mouvements de terrain. Ces MTs ont été reclassés en six grandes familles de mouvements de versant, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit notamment des glissements, des avalanches, des coulées, des sapements de berges/bord des routes, des MTs complexes ainsi que des érosions par ravinement. Les MTs sont inventoriés en distinguant la profondeur, l'âge et l'état d'activité. L'analyse du processus âge des MTs s'est réalisé à base des photographies aériennes historiques depuis les années 1950 et ont permis de faire une analyse de l'activité sur une période assez grande du moins à l'échelle humaine (environ 70ans). Les MTs profonds

sont généralement anciens à très anciens et dominent en taille et en nombre tandis que les MTs peu profonds sont récents, actifs et essentiellement déclenchés en groupe lors des événements extrêmes liés aux fortes pluies. Géomorphologiquement, les MTs actifs sont plus importants dans le paysage rajeuni que relique. Généralement de petite taille à moyenne, les MTs actifs englobent aussi des MTs larges tels que coulées de terres lentes et les MTs complexes glissement-coulées qui restent actifs pendant une longue période dans la nature. L'inventaire élaboré est de bonne qualité comparativement aux autres disponibles à l'échelle de Bujumbura. L'échelle d'analyse, la qualité et la résolution des données de base, le temps de réalisation et la qualité de l'outillage mis à disposition, sans oublier le degré d'expérience de la personne menant l'étude et son encadrement, sont les facteurs les plus importants qui ont influencé la qualité et la pertinence de l'inventaire produit. Cet inventaire et une série de données auxiliaires dont nous disposons tels que les données topographiques haute résolution ont permis d'examiner la susceptibilité d'occurrence des glissements de terrain dans le secteur considéré. Enfin, nous avons procédé à l'analyse de la susceptibilité aux MTs par différents modèles les plus utilisés et acceptés par la littérature scientifique. Trois modèles dont l'expert et deux basés sur les données ont été utilisés. Nous avons produit des cartes de susceptibilités pour les processus profonds et superficiels qui sont valides vu leur performance et le niveau de prédiction élevé ainsi que la confrontation avec la vérité du terrain. Parmi les modèles utilisés, la théorie de l'évidence se montre plus performante car elle exige l'indépendance conditionnelle des variables, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres. Il s'est suivi la régression logistique, la plus utilisée dans la littérature. Enfin, il vient le PHA souvent utilisé à l'échelle des régions plus grandes. Avec ces modèles, des similitudes dans les paramètres de contrôle des MTs ont été observées. Les MTs profonds sont contrôlés par le rajeunissement du paysage par le recul des knickpoints, la lithologie et la fracturation. Les MTs superficiels sont conditionnés par la pente et l'occupation des sols. Les pluies restent le seul facteur déclencheur des MTs récents. Pour les MTs anciens et très anciens, leur facteur déclencheur reste à préciser. L'hypothèse est qu'ils seraient liés à une activité sismique. L'inventaire des MTs élaboré au cours de ce travail est original et est un des plus complets et détaillés dans la région. On remarque qu'un cinquième de la zone d'étude est affecté par des mouvements de terrain. Néanmoins, notre inventaire reste incomplet surtout pour l'inventaire de MTs peu profonds. En effet, la couverture aérienne historique ne permet pas de collecter des petits glissements. De plus, bien qu'on puisse consulter des images de Google Earth THR sur une vingtaine d'années, la plupart se concentrent sur les 5 dernières années. La seule possibilité pour collecter les données des MTs peu profonds est de procéder à un enregistrement régulier.

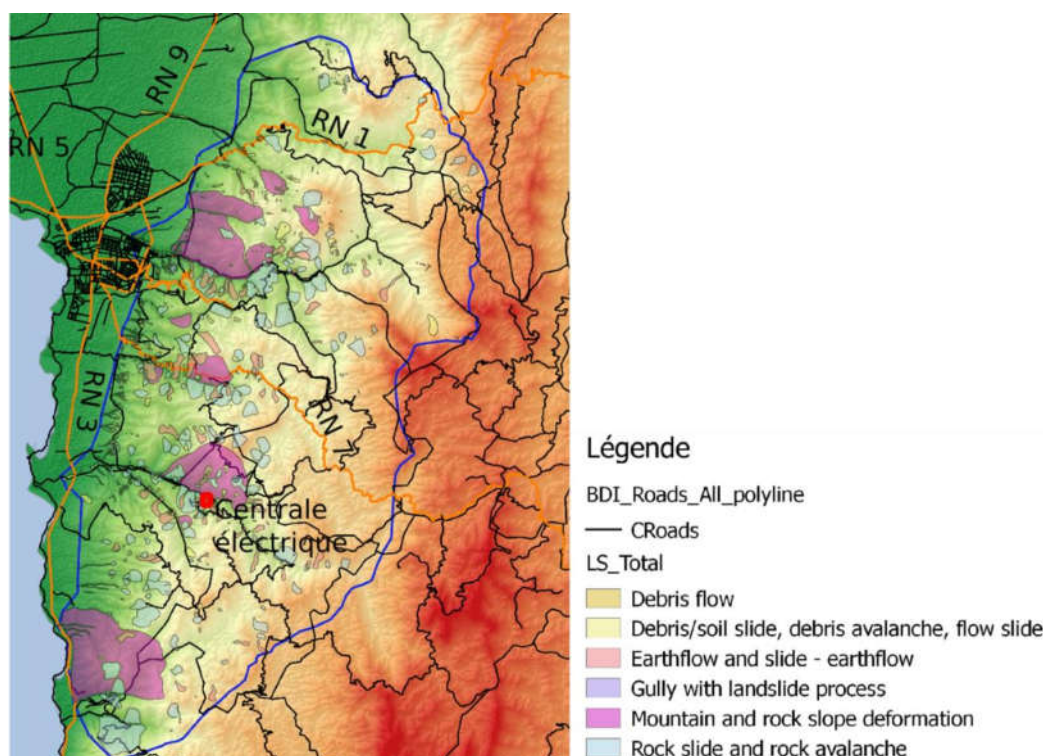
2. Impacts des mouvements de terrain et stratégies de réduction des risques de catastrophes

Les MTs affectent les infrastructures et par conséquent les moyens de subsistance de nombreuses personnes dans la région - ce qui n'est pas surprenant si l'on considère que >20% de la zone d'étude est affectée par des MTs, dont une partie importante des processus est active. Si les MTs sont

intrinsèquement un phénomène naturel, les données que nous avons recueillies montrent que les perturbations humaines amplifient leurs occurrences et leurs impacts. Bien qu'il n'existe pas de solution facile pour atténuer les impacts des glissements de terrain, cette étude offre pour la première fois un aperçu clair de l'étendue des phénomènes de glissement de terrain dans la région. L'inventaire des MTs et la compréhension acquise sur leurs mécanismes, causes et déclencheurs constituent les connaissances élémentaires - et cruciales - sur lesquelles peuvent être construites les stratégies de réduction des risques de catastrophes. Nous identifions également les zones qui sont actuellement les plus problématiques et les zones qui pourraient être impactées par la réactivation des pentes instables existantes. Les informations fournies ici sont également cruciales pour toute étude ultérieure de l'évolution du paysage et des dangers qu'il présente. En tant que telle, cette étude constitue un premier pas vers une amélioration de la gestion du paysage et la conception de stratégies de réduction des risques de catastrophes. Idéalement, ces stratégies devraient non seulement prendre en compte les impacts directs des glissements de terrain, tels que ceux que nous avons mis en évidence ici, mais aussi les impacts indirects (dégradation des sols, qualité de l'eau des systèmes fluviaux, sédimentation des lacs et perte de biodiversité, etc.).

3. Utilité de nos résultats: impact sur l'aménagement et l'urbanisme

La carte d'inventaire des MTs, la carte de densité des MTs, et les différentes cartes de susceptibilité réalisées dans le cadre de cette recherche constituent un bon moyen de communication (sensibilisation du public) sur les zones susceptibles de mouvements ou « **sensibles** ». Elle constitue un puissant outil d'aide à la décision pour présenter, comparer et discuter des scénarios d'aménagement du territoire, d'aménagement urbains et de projets de constructions d'ouvrages et les nouveaux tracés de routes. Une telle démarche pourrait atténuer les impacts socio-économiques habituellement constatés, lors de déclenchement des MTs dans des zones habitées ou au niveau des routes. Toutefois, une totale prise en compte des phénomènes de MTs dans les processus d'aménagement et d'urbanisme, nécessiterait la caractérisation des zones à risque en tenant compte des enjeux et de la vulnérabilité. Il s'agit d'une recherche importante en tant que tel qui vient à l'aval de notre étude et qui n'aurait pas pu être réalisée dans le cadre de cette thèse.



Impact des mouvements de terrain sur les infrastructures

4. Recommandations et perspectives

Les MTs actifs peuvent être très destructeurs et causer des pertes socio-économiques considérables. Un enregistrement régulier des MTs et des études prédictives peuvent être envisagés pour mieux comprendre le mécanisme et l'évolution des MTs à long terme dans cette région peuplée du Burundi. Des mesures de suivi et d'alerte précoce doivent être envisagées comme une des stratégies pour réduire le risque de catastrophes naturelles. La surveillance régulière de anciens MTs ainsi que leur réactivation est indispensable. Les services en charges de la météorologie et de la gestion des catastrophes doivent travailler en synergie pour alerter la population de l'éventuelle occurrences des événements extrêmes afin de prendre de précautions avant le drame. Avant les pluies extrêmes déclencheurs des MTs, la population doit être alertés quant à la trajectoires des crues éclairées conséquentes.

Les services publics ont besoin d'un document qui leur permettra de mettre en place un plan de contingence et des systèmes d'alerte précoce. Ainsi, les futures recherches doivent envisager d'implémenter des cartes de vulnérabilité et de risque. Une enquête minutieuse visant à déterminer les enjeux exposés aux MTs est indispensable. La combinaison de cette donnée avec les cartes de susceptibilité produites au cours de cette recherche mise à jour avec l'introduction de la dynamique des précipitations permettra de produire des cartes d'aléa. Cela permettra de prédire la période de retour des MTs ainsi que leur intensité. Ce qui conduira à la prévention et à l'atténuation du risque associé aux MTs. L'installation des stations climatologiques fonctionnelles avec une couverture de toute la zone d'étude permettra le collecte des données des précipitations.

A l'instar des différentes méthodes et approches existantes pour la cartographie de la susceptibilité, ce travail constitue une modeste contribution et une base de travail, imparfaite, certes, pour la compréhension de la relation entre les mouvements gravitaires et les différents facteurs environnementaux cartographiques disponibles dans la région de Bujumbura. Elle constitue une initiative exploratoire pour l'analyse spatiale de la susceptibilité par une approche probabiliste multi-échelle dans un environnement d'accès difficile. Cette recherche, par son approche originale basée sur la réduction de l'aspect subjectif dans la cartographie de la susceptibilité par combinaison de cartes d'index, en introduisant des poids et des pondérations basés sur des calculs réels. Le fusionnement des paramètres doit avoir une signification géologique ou géomorphologique effective (exemple : hypsométrie, ou réseau hydrographique – fracturation). Le calage et la validation des cartes par confrontation aux données réelles de terrain servent de base de données afin que le géologue garde la maîtrise du processus de cartographie. Toutefois, ces résultats sont exploratoires et nécessitent des vérification et améliorations. Pour ce, quelques recommandations sont nécessaires :

Procéder à la cartographie précise des MTs et leurs facteurs de prédisposition et ceux de déclenchement sur le reste du territoire sur tout le Burundi, puisque c'est l'étape de base à mener avant tout projet de modélisation de la susceptibilité. **Effectuer des enquêtes sur longues durées pour la collecte des données de modélisation de la susceptibilité des MTs peu profonds.** Cela permettra de se rassurer de l'indépendance totale des variables à modéliser et à la compréhension de leur cause de déclenchement. Ainsi, les données collectées seront aussi utilisées pour le zonage spatial de l'aléa MT peu profond qui n'a pas été possible pour le moment. Procéder régulièrement à **la réévaluation de** la susceptibilité dans notre secteur par l'utilisation de méthodes nouvelles, actuellement en gestation, ce qui est tout à fait envisageable au vu de la base géologique et phénoménologique numérique créée dans le cadre de ce travail. Cela réduira considérablement le temps d'analyse, et permettra de sélectionner les meilleures méthodes et les résultats les plus proches de la réalité terrain.

Malgré les nombreux résultats acquis durant cette thèse de doctorat, plusieurs aspects, méthodologiques ou de modélisation sont à développer. Ils constituent des perspectives de recherches à engager dans future proche. Cela concerne en particulier :

- La **vérification** de la reproductibilité de la démarche proposée sur des sites à caractéristiques environnementales comparables par la transposition des meilleures simulations obtenues dans le cadre de ce travail (itération modélisation-retour terrain). A ce moment, il serait bénéfique de créer un programme avec une interface simple qui permettra la zonation automatique de l'aléa sur des sites ayant plus ou moins les mêmes caractéristiques.

- Quantification des MTs de grande ampleur (modélisation), évaluer les enjeux et la vulnérabilité, évaluer et pondérer les conséquences socio-économiques, afin de cartographier le risque MT et pouvoir le gérer.
- suivre de près et essayer de corriger les zones problématiques. La base de données détaillée des MTs est le document le plus fiable (bien mieux que les cartes de susceptibilité) pour localiser avec certitude ces zones. Pour anticiper les problèmes futurs, il est intéressant d'éviter les problèmes dans le présent.

Enfin, pour une bonne prévention du phénomène des MT au Burundi, il est nécessaire, voire impératif 1° de **coordonner d'abord des actions transversales entre les différents départements et organismes concernés** (Ministère en charge de la gestion des catastrophes, .etc.). Ensuite, 2° pour valoriser ce travail, il semble important de conjuguer tous les efforts en vue de minimiser les retombées négatives de ces phénomènes de MT par le développement de **l'éducation préventive**. Il est aussi important de le prendre en considération pour réaliser une **planification adaptée de l'aménagement, une définition des règles d'urbanisme et de constructions**, et aussi, pour **l'élaboration de plans de secours**.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abella, E.A. (2008). Multi-scale landslide risk assessment in Cuba. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. ITC Dissertation 154, 273 p. ISBN: 978-90-6164-268-8.
2. Aggarwal, S. (2004). Principles of remote sensing. Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology, 23, 23-28.
3. Agisoft Metashape Pro (2020). Available online: <https://www.agisoft.com> (accessed on 16 June 2021).
4. Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., & Wright, D. F. (1990). Statistical pattern integration for mineral exploration. In *Computer applications in resource estimation* (pp. 1-21). Pergamon.
5. Ait Brahim, L. & Elmoulat, M. (2018). Application Of Logistic Regression Method To Produce Landslide Susceptibility Map: A Case Study Of Tetouan Mazari, Morocco. MATEC Web of Conferences N 149, pp. 02082. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902082> CMSS-2017.
6. Ait Brahim, L., Jemmah, A. I., Boustia, M., El Hamdouni, I., Abdelouafi, A., El Mahsani, A., ... & Merouni, F. E. (2018). Spatial correlation between the predictor variables and the weighting values calculated during the mapping of the environmental factors of mass movements in the Beni Idder region (northern Rif). In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 149, p. 02074). EDP Sciences.
7. Ait Brahim, L., Boustia, M., Jemmah, I. A., El Hamdouni, I., El Mahsani, A., Abdelouafi, A., Sossey alaoui, F. & Lallout, I. (2018). Landslide susceptibility mapping using AHP method and GIS in the peninsula of Tangier (Rif-northern morocco). MATEC Web of Conferences N°149, pp.02084 (2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902084> CMSS-2017
8. Aït Brahim, L et al. (2004). Approche multisources pour l'étude de l'éboulement en masse d'Amtrasse dans le Rif interne, Maroc. Revue Télédétection- photo interprétation. Editions ESKA, France N° 4, pp.3-40.
9. Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the environment, 58(1), 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>.
10. Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering geology*, 32(4), 269-277.
11. Antonini, G., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Sorrentino, A. (1993). Carta inventario dei fenomeni franosi della regione Marche ed aree limitrofe. CNR Gruppo per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche Publication, 580(2).
12. Armbruster, V. (2002). Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Mémoire de master en hydrologie, University of Freiburg, Germany, 305p. Ashwin, C. A., & Babu, S. (2014). Drainage analysis

of extended area of bannerghatta national park using GIS. *International Journal of Innovation and Scientific Research*. 9, 494-501.

13. Atkinson, P. M., & Massari, R. (1998). Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences*, 24(4), 373-385.

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

15. Ayalew, L., Yamagishi, H., & Ugawa, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1(1), 73-81.

16. Bahrami, S., Rahimzadeh, B., & Khaleghi, S. (2020). Analyzing the effects of tectonic and lithology on the occurrence of landslide along Zagros ophiolitic suture: A case study of Sarv-Abad, Kurdistan, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(3), 1619-1637.

17. Bakker, M., & Lane, S. N. (2017). Archival photogrammetric analysis of river–floodplain systems using Structure from Motion (SfM) methods. *Earth Surf Process Landforms*, 42, 1274–1286. <https://doi.org/10.1002/esp.4085>.

18. Balegamire, C., Michellier, C., Muhigwa, J. B., Delvaux, D., Imani, G., & Dewitte, O. (2017). Vulnerability of buildings exposed to landslides: A spatio-temporal assessment in Bukavu (DR Congo). *Geo-Eco-Trop*, 41, 263–278.

19. Barlow, J., Martin, Y., & Franklin, S.E. (2003). Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. *Canadian journal of remote sensing*, 29(4), 510–517.

20. Belghith, N. B. H., Bundervoet, T., Beko, A. S., & Tsimpo, C. (2016). *Évaluation de la pauvreté au Burundi* (No. 107047, pp. 1-208). The World Bank.

21. Bennett, G. L., Roering, J. J., Mackey, B. H., Handwerger, A. L., Schmidt, D. A., & Guillod, B. P. (2016). Historic drought puts the brakes on earthflows in Northern California. *Geophysical Research Letters*, 43(11), 5725–5731.

22. Bibentyo, T.M. (2018). Distribution des MTs dans un environnement en mutation : Focus sur la gorge de la Rusizi. Université de Liège, Mémoire de master.

23. Bidou, J.E., Ndayikengurukiye, S., Ndayishimiye, J.P., & Sirven (1991). *Géographie du Burundi*. Hâtier, Paris.

24. Bijukchhen, S.M., Kayastha, P. & Dhital, M.R. A comparative evaluation of heuristic and bivariate statistical modelling for landslide susceptibility mappings in Ghurmi–Dhad Khola, east Nepal. *Arab J Geosci* 6, 2727–2743 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0569-7>.

25. Bizimana, H., & Sönmez, O. (2015). Landslide occurrences in the hilly areas of Rwanda, their causes and protection measures. *Disaster Science and Engineering*, 1(1), 1–7.
26. Bogaard, T. A., & Greco, R. (2016). Landslide hydrology: from hydrology to pore pressure. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), 439–459. <https://doi.org/10.1002/wat2.1126>
27. Bonham-Carter, G. F., & Agterberg, F. P. (1990). Application of a microcomputer-based geographic information system to mineral-potential mapping. In *Microcomputer applications in geology 2* (pp. 49-74). Pergamon.
28. Boniface, N., Schenk, V., & Appel, P. (2014). Mesoproterozoic high-grade metamorphism in pelitic rocks of the northwestern Ubendian Belt: Implication for the extension of the Kibaran intra-continental basins to Tanzania. *Precambrian Research*, 249, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.05.010>.
29. Bousta, M., & Ait Brahim, L. (2018). Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping in Tangier, Morocco. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 149, p. 02042). EDP Sciences.
- Brabb, E. E. (1991). The world landslide problem. *Episodes Journal of International Geoscience*, 14(1), 52–61.
30. Brabb, E. E. (1993). Proposal for worldwide landslide hazard maps. In *Seventh International Conference and Field Workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics* (pp. 15-27).
31. Brabb, E.E. (1995). The San Mateo County California GIS project for predicting the consequences of hazardous geologic processes. In: Carrara, A. & Guzzetti, F. (Eds.). *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, the Netherlands, 299–234. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_15.
32. Brabb, E.E., & Harrod, B.L. (1989). *Landslides: Extent and Economic Significance*. Balkema Publisher, Rotterdam. 385p.
33. Broeckx, J., Vanmaercke, M., Duchateau, R., & Poesen, J. (2018). A data-based landslide susceptibility map of Africa. *Earth-Science Rev*, 185, 102–121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.002>.
34. Brunsden, D., & David B. (1984). *Slope instability*, D. Brunsden and D. B. Prior (eds), Wiley, Chichester, 620p. <https://doi.org/10.1002/esp3290110214>.
35. Burton, I., Kates, R. W., & White, G. F. (1978). *The environment as hazard*. New York: Oxford University Press, 240p. <https://doi.org/10.1177/030913337900300408>.
36. Campy, M., & Macaire, J. J. (2003). *Géologie de la surface: érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. Paris: Editions Dunod, 440.
37. Can, T., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., & Duman, T. Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, 72(1-4), 250-271.

38. Cardinali, M., Guzzetti, F., & Brabb, E. E. (1990). Preliminary maps showing landslide deposits and related features in New Mexico (No. 90-293). US Geological Survey.
39. Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., ... & Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 57-72. <https://doi.org/10.5194/nhess-2-57-2002>.
40. Carlini, M., Chelli, A., Vescovi, P., Artoni, A., Clemenzi, L., Tellini, C., & Torelli, L. (2016). Tectonic control on the development and distribution of large landslides in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 253, 425-437. doi:10.1016/j.geomorph.2015.10.028.
41. Carrara, A. (1978). Digital terrain analysis for land evaluation.
42. Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 16(5), 427-445.
43. Carrara, A., Crosta, G., & Frattini, P. (2003). Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(10), 1125-1142.
44. Casagli, N., Yin, Y., Sassa, K., & Formis, L. (2017). Advancing Culture of Living with Landslides. Volume 1 ISDR-ICL Sendai Partnerships 2015-2025. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59469-9>.
45. Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., & Menduni, G. (2005). Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Landslides*, 2(4), 329-342. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0021-0>.
46. CBUE, 2013. Atelier de restitution des ortho-photographies aériennes du Burundi – 27 Juin 2013, Bujumbura, Burundi.
47. Chang, Y. F., Lin, C. J., Chyan, J. M., Chen, I. M., & Chang, J. E. (2007). Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan. *Journal of environmental management*, 85(4), 891-899.
48. Che, V. B., Kervyn, M., Ernst, G. G. J., Trefois, P., Ayonghe, S., Jacobs, P., ... & Suh, C. E. (2011). Systematic documentation of landslide events in Limbe area (Mt Cameroon Volcano, SW Cameroon): geometry, controlling, and triggering factors. *Natural Hazards*, 59(1), 47-74. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9738-3>.
49. Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 65(12), 1389-1399. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470012659.ch4>.

50. Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 65(12), 1389-1399.
51. Ciza A. (2013). Contribution à l'étude de l'évolution des glissements de terrain dans le périmètre urbain de Bujumbura : Cas de Mugoboka-Sororezo et Rubanza. *Memoire de Licence*, Université du Burundi, Bujumbura.
52. Claessens, W., & Theunissen, K. (1988). Ministère des travaux publics, de l'énergie et des mines. Musée royal de l'Afrique centrale. Département de géologie et de minéralogie. Turvuren, Belgique.
53. Clarke, B. A., & Burbank, D. W. (2011). Quantifying bedrock-fracture patterns within the shallow subsurface: Implications for rock mass strength, bedrock landslides, and erodibility. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4). <https://doi.org/10.1029/2011JF001987>.
54. Cojean, R., Durville, J. L., Gauchez, J., & Pothérat, P. (2009). MTs et barrages naturels induits par le séisme du 12 mai 2008 au Sichuan (Chine). *Retours d'expérience*. Rapport CFGI.
55. Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>.
56. Couture, R.-M., & Van Cappellen, P. (2011). Reassessing the role of sulfur geochemistry on arsenic speciation in reducing environments. *Journal of hazardous materials*, 2011, 189(3), 647-652.
57. Crosta, G.B., Frattini, P., Agliardi, F. (2013). Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 605, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.028>.
58. Crozier, & Michael, J. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology*, 124(3-4), 260–267.
59. Crozier, M.J., & Glade, T. (2005). Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: Glade, T., Anderson, M.G. & Crozier, M.J. (eds.). *Landslide risk assessment*. John Wiley, 1–40.
60. Cruden, D. M. (1991). A suggested method for a landslide summary. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 101–110.
61. Cruden, D.M. & Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, Washington D.C., pp. 36–75.
62. Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.

63. Delvaux, D. (2001). Tectonic and palaeostress evolution of the Tanganyika-Rukwa-Malawi rift segment, East African rift System. *Peri-Tethys Memoir*, 6, 545-567. Delvaux, D., Kervyn, F., Macheyek, A. S., & Temu, E. B. (2012). Geodynamic significance of the TRM segment in the East African Rift (W-Tanzania): Active tectonics and paleostress in the Ufipa plateau and Rukwa basin. *Journal of Structural Geology*, 37, 161-180.
64. Delvaux, D., Mulumba, J. L., Sebagenzi, M. N. S., Bondo, S. F., Kervyn, F., & Havenith, H. B. (2017). Seismic hazard assessment of the Kivu rift segment based on a new seismotectonic zonation model (western branch, East African Rift system). *Journal of African Earth Sciences*, 134, 831–855. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.004>.
65. Depicker, A., Govers, G., Jacobs, L., Campforts, B., Uwihirwe, J., & Dewitte, O. (2021). Interactions between deforestation, landscape rejuvenation, and shallow landslides in the North Tanganyika–Kivu rift region, Africa. *Earth Surface Dynamics*, 9(3), 445–462. <https://doi.org/10.5194/esurf-2020-87>.
66. Depicker, A., Jacobs, L., Delvaux, D., Havenith, H. B., Mateso, J. C. M., Govers, G., & Dewitte, O. (2020). The added value of a regional landslide susceptibility assessment: The western branch of the East African Rift. *Geomorphology*, 353, 106886. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106886>.
67. Depicker, A., Jacobs, L., Mboga, N., Smets, B., Van Rompaey, A., Lennert, M., ... & Govers, G. (2021). Historical dynamics of landslide risk from population and forest-cover changes in the Kivu Rift. *Nature Sustainability*, 4(11), 965-974.
68. Desodt, C, Launay, J, Horsin Molinaro, H. Les Glissements de terrain, modélisation et prévision. Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay.
69. Dewitte, O. (2006). Cinématique de MTs et prédiction de leur réactivation : approche probabiliste dans la région d’OUDENAARDE. Université de Liège. Thèse de doctorat.
70. Dewitte, O., Chung, C. J., Cornet, Y., Daoudi, M., & Demoulin, A. (2010). Combining spatial data in landslide reactivation susceptibility mapping : A likelihood ratio-based approach in W Belgium. *Geomorphology*, 122 (1-2), 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.010>.
71. Dewitte, O., Dille, A., Depicker, A., Kubwimana, D., Mateso, J. C. M., Bibentyo, T. M., ... & Monsieurs, E. (2021). Constraining landslide timing in a data-scarce context: from recent to very old processes in the tropical environment of the North Tanganyika-Kivu Rift region. *Landslides*, 18(1), 161–177. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01452-0>.
72. Dikau, R., Cavallin, A., & Jäger, S. (1996). Databases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology*, 15(3-4), 227–239. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00072-D](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00072-D).
73. Dille, A., Kervyn, F., Bibentyo, T. M., Delvaux, D., Ganza, G. B., Mawe, G. I., ... & Dewitte, O. (2019). Causes and triggers of deep-seated hillslope instability in the tropics—Insights from a 60-year record of Ikoma landslide (DR Congo). *Geomorphology*, 345, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106835>.

74. Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., & Arnold, M. (2005). Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376> License: CC BY 3.0 IGO.”
75. Dini, B., Daout, S., Manconi, A., & Loew, S. (2019). Classification of slope processes based on multitemporal DInSAR analyses in the Himalaya of NW Bhutan. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111408. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111408>.
76. Dong, G., Lai, K. K., & Yen, J. (2010). Credit scorecard based on logistic regression with random coefficients. *Procedia Computer Science*, 1(1), 2463-2468.
77. Dynes, R. R., & Drabek, T. E. (1994). The structure of disaster research: Its policy and disciplinary implications. *International Journal Of Mass Emergencies and Disasters*, 12(1), 5–23. <http://www.ijmed.org/articles/424/download>.
78. Ebinger, C., & Furman, T. (2003). Geodynamical setting of the Virunga volcanic province, East Africa. *Acta Vulcanologica*, 14(1/2), 9.
79. Ebrahim, M., Amir Ahmadi, A., & Zangeneh Asadi, M. A. (2018). Comparison of Gully Erosion Susceptibility Mapping Using Weight of Evidence and Frequency Ratio Models at Sanganeh Kalat Basin. *Geographical Researches Quarterly Journal*, 32(4), 105-126.
80. El Atillah, A., El Abidine Ali El Morjani, Z., Mustapha, S. (2018). Utilisation De L'image Multispectrale Pour L'exploration Et La Recherche Des Ressources Minérales : État Des Connaissances Et Proposition D'un Modèle De Traitement. *European Scientific Journal* 14(24). DOI:[10.19044/esj.2018.v14n24p350](https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n24p350).
81. Elmoulat, M., & Ait Brahim, L. (2018). Landslides susceptibility mapping using GIS and weights of evidence model in Tetouan-Ras-Mazari area (Northern Morocco). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 1306-1325.
82. Elmoulat, M., Brahim, L. A., Mastere, M., & Jemmah, A. I. (2015). Mapping of mass movements susceptibility in the Zoumi Region using satellite image and GIS technology (Moroccan Rif). *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(2), 210-217.
83. Emberson, R., Kirschbaum, D., Stanley, T. (2021). Global connections between El Nino and landslide impacts. *Nature communications*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22398-4>.
84. Etemadi, H., Smoak, J. M., & Karami, J. (2018). Land use change assessment in coastal mangrove forests of Iran utilizing satellite imagery and CA–Markov algorithms to monitor and predict future change. *Environmental earth sciences*, 77(5), 1-13.
85. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of geophysics*, 45, RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.

86. Felton, A. A., Russell, J. M., Cohen, A. S., Baker, M. E., Chesley, J. T., Lezzar, K. E., ... & Tiercelin, J. J. (2007). Paleolimnological evidence for the onset and termination of glacial aridity from Lake Tanganyika, Tropical East Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(3-4), 405–423. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.04.003>.
87. Fisher, G. B., Amos, C. B., Bookhagen, B., Burbank, D. W., Godard, V., & Whitmeyer, S. J. (2012). Channel widths, landslides, faults, and beyond: The new world order of high-spatial resolution Google Earth imagery in the study of earth surface processes. *Geological Society of America Special Papers*, 492(01), 1–22.
88. Froude, M.J., & Petley, D. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>.
89. Gallart, F., & Clotet, N. (1988). Some aspects of the geomorphic processes triggered by an extreme rainfall event: the November 1982 flood in the Eastern Pyrenees. *Catena supplement*, 13, 79-95.
90. Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*, 94(3-4), 268-289. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.023>.
91. Ghassemian, H. (2016). A review of remote sensing image fusion methods. *Information Fusion*, 32, 75-89.
92. Ghosh, T., Bhowmik, S., Jaiswal, P. *et al.* (2020). Generating Substantially Complete Landslide Inventory using Multiple Data Sources: A Case Study in Northwest Himalayas, India. *J Geol Soc India* **95**, 45–58 <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1385-4>
93. Glade, T. & Crozier, M. J. (2005). The nature of landslide hazard impact. *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, 43-74.
94. Glade, T. (2003). Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Dierde*, 134, 123–146. <https://homepage.univie.ac.at/thomas.glade/Publications/Glade2003b.pdf>. Gleyzer, A., Denisyuk, M., Rimmer, A., & Salingar, Y. (2007). A Fast Recursive Gis Algorithm For Computing Strahler Stream Order In Braided And Nonbraided Networks 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40(4), 937-946. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01057.x>
95. Greco, R., Sorriso-Valvo, M., & Catalano, E. (2007). Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: the Aspromonte case study, Calabria, Italy. *Engineering geology*, 89(1-2), 47-66.
96. Guerrieri, L., Trigila, A & Iadanza, C (2007). The IFFI project (Italian landslide inventory): methodology and results. JRC, ISPRA 23-24 october 2007.
97. Guns, M. & Vanacker, V. (2014). Shifts in landslide frequency-area distribution after forest conversion in the tropical Andes. *Anthropocene*, 6, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.08.001>.

98. Guzzetti, F. (2003). Landslide hazard assessment and risk evaluation. *Mediterranean Storms*, CNR – IRPI, via della Madonna Alta 126, 06128 Perugia, pp. 1–4.
99. Guzzetti, F. (2005). Landslide hazard and risk assessment. Thèse de doctorat.
100. Guzzetti, F., & Cardinali, M. (1990). Landslide inventory map of the Umbria region, Central Italy. *Proceedings ALPS*, 90, 273-284.
101. Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., & Carrara, A. (2000). Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental Management*, 25 (3), 247–363.
102. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, 31, 181–216.
103. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, 31, 181-216.
104. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216. Lee et Min, 2001.
105. Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>.
106. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1-4), 272–299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>. Hakiza, G. (2002). Potentialités aquifères de la plaine de la Rusizi (au Nord du lac Tanganyika). Thèse de doctorat, Université de Liège, 442 p.
107. Handwerger, A. L., Fielding, E. J., Huang, M. H., Bennett, G. L., Liang, C., & Schulz, W. H. (2019). Widespread initiation, reactivation, and acceleration of landslides in the northern California Coast Ranges due to extreme rainfall. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(7), 1782–1797. <https://doi.org/10.1029/2019JF005035>.
108. Havenith, H. B., Torgoev, A., Schlögel, R., Braun, A., Torgoev, I., & Ischuk, A. (2015). Tien Shan geohazards database: Landslide susceptibility analysis. *Geomorphology*, 249, 32-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.019>.
109. Hemasinghe, H., Rangali, R. S., Deshapriya, N. L., & Samarakoon, L. (2018). Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla District, Sri Lanka). *Procedia engineering*, 212, 1046-1053.
110. Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

111. Hosmer, D.W., Lemeshow, S., 2000. Applied Logistic Regression, 2nd ed. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, <http://dx.doi.org/10.1002/0471722146>.
112. Huang, H. P., Yang, K. C., & Lin, B. W. (2013). Statistical evaluation of the effect of earthquake with other related factors on landslide susceptibility: using the watershed area of Shihmen reservoir in Taiwan as a case study. *Environmental earth sciences*, 69(7), 2151-2166.[doi:10.1007/s12665-012-2044-x](https://doi.org/10.1007/s12665-012-2044-x).
113. Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
114. Hussin, H. Y., Zumpano, V., Reichenbach, P., Sterlacchini, S., Micu, M., van Westen, C., & Bălteanu, D. (2016). Different landslide sampling strategies in a grid-based bi-variate statistical susceptibility model. *Geomorphology*, 253, 508–523. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.030>.
115. Hutchinson, J. N. (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: C. Bonnard (Editor), Fifth International Symposium on Landslides. A.A. Balkema, Lausanne.
116. IFRC (2014). Burundi: Floods—DREF Operation No. MDRBI010, Final Report, IFRC: Bujumbura, Burundi. Ilia, I., Tsangaratos, P. Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map. *Landslides* 13, 379–397 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0576-3>.
117. Ilia, I., Tsangaratos, P. (2016). Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map. *Landslides* 13, 379–397. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0576-3>.
118. Ilunga, L. (1991). Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du Sud-Kivu. *Bull - Soc Geogr Liege*, 27, 209–228.
119. Imwangana, F. M., Dewitte, O., Ntombi, M., & Moeyersons, J. (2014). Topographic and road control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Geomorphology*, 217, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.021>.
120. IOM (2021). Évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain au Burundi (Note technique). Document Prepared by the Consortium: IDOM/RAMBOLL/EURAC/METEOSIM/GIIS-UPM/APRN-BEPB, Bujumbura, Burundi.
121. ISTEERBU (1998). Etude nationale sur les conditions de vie des populations, Bujumbura, Burundi.
122. Jaboyedoff, M., Michoud, C., Derron, M. H., Voumard, J., Leibundgut, G., Sudmeier-Rieux, K., ... & Leroi, E. (2018). Human-induced landslides: toward the analysis of anthropogenic changes of the slope environment. In *Landslides and engineered slopes. Experience, Theory and Practice* (pp. 217-232). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21520-20>.

123. Jacobs, L., Dewitte, O., Poesen, J., Delvaux, D., Thiery, W., & Kervyn, M. (2016a). The Rwenzori Mountains, a landslide-prone region?. *Landslides*, 13(3), 519–536. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0582-5>.
124. Jacobs, L., Dewitte, O., Poesen, J., Maes, J., Mertens, K., Sekajugo, J., & Kervyn, M. (2017). Landslide characteristics and spatial distribution in the Rwenzori Mountains, Uganda. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 917–930. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.05.013>.
125. Jacobs, L., Dewitte, O., Poesen, J., Sekajugo, J., Nobile, A., Rossi, M., ... & Kervyn, M. (2018). Field-based landslide susceptibility assessment in a data-scarce environment: the populated areas of the Rwenzori Mountains. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 105–124. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-105-2018>.
126. Jacobs, L., Maes, J., Mertens, K., Sekajugo, J., Thiery, W., Van Lipzig, N., ... & Dewitte, O. (2016b). Reconstruction of a flash flood event through a multi-hazard approach: focus on the Rwenzori Mountains, Uganda. *Natural hazards*, 84(2), 851-876. 84:851–876. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2458-y>.
127. Jaiswal, K., Wald, D., & Porter, K. (2010). A global building inventory for earthquake loss estimation and risk management. *Earthquake Spectra*, 26(3), 731–748. <https://doi.org/10.1193/1.3450316>.
128. Jemmah, A., & Ait Brahim, L. (2018). Mass movement susceptibility mapping-A comparison of logistic regression and Weight of evidence methods in Taounate-Ain Aicha region (Central Rif, Morocco). In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 149, p. 02094). EDP Sciences.
129. Kabanyegeye, H. (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), 203-2015.
130. Keefer, D. K. (2002). Investigating landslides caused by earthquakes—a historical review. *Surveys in geophysics*, 23(6), 473–510.
131. Keefer, D. K.: Landslides caused by earthquakes., *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95(4), 406–421, doi:10.1130/0016-7606(1984)95, 1984.
132. Keefer, D.K. (1994). The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. *Geomorphology*, 10, 265–284. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90021-3).
133. Kervyn, M., Jacobs, L., Maes, J., Bih Che, V., de Hontheim, A., Dewitte, O., ... & Mertens, K. (2015). Landslide resilience in equatorial Africa: Moving beyond problem identification!. *Belgeo. Revue belge de géographie*, 1, 1–22. <https://doi.org/10.4000/belgeo.15944>.
134. Kiage, L. M. (2013). Perspectives on the assumed causes of land degradation in the rangelands of Sub-Saharan Africa. *Progress in Physical Geography*, 37(5), 664–684. <https://doi.org/10.1177/0309133313492543>.

135. Kirasa Energy, 2020. Etude de l'évaluation de la vulnérabilité de l'aménagement hydroélectrique de deux centrales en cascade sur la rivière Kirasa à la variabilité et aux changements climatiques de la région. Bujumbura, Burundi. Rapport non publié.
136. Kirschbaum, D., Stanley, T., & Yatheendradas, S. (2016). Modeling landslide susceptibility over large regions with fuzzy overlay. *Landslides*, 13(3), 485-496.
137. Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou Y. (2015a). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>.
138. Kirschbaum, D.B., Adler, R., Hong, Y., et al. (2010). A global landslide catalog for hazard applications: Method, results, and limitations. *Nat Hazards*, 52, 561–575. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9401-4>.
139. Kirschbaum, D.B., Stanley, T., & Simmons, J. (2015b). A dynamic landslide hazard assessment system for Central America and Hispaniola. *Nat Hazards Earth Syst. Sci*, 15, 2257–2272. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2257-2015>.
140. Klerkx, J., Liegeois, J.P., & Lavreau, J. (1987). Crustal evolution of the Northeastern Kibaran belt, eastern and central Africa. In: Kro'ner, A. (Ed.), *Proterozoic Lithospheric Evolution*. American Geophysical Union, Geodynamic Series, pp. 217–233.
141. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., Bahaj, T., Abdelouafi, A., Sindayihebura, A & Dewitte, O (Soumis 2022). Comparison of heuristic (AHP) and data-driven (WoE and LR) approach for landslide susceptibility mapping in the populated hillslopes of Bujumbura (Burundi). *EUREKA Physics and Engineering*.
142. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., & Abdelouafi, A. (2021a). 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. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001724>.
143. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., Bousta, M., Dewitte, O., Abdelouafi, A., Bahaj, T. (2018). Landslide susceptibility assessment using AHP method in Kanyosha watershed (Bujumbura-Burundi): Urbanisation and management impacts. In: *MATEC Web of Conferences*, p. 02071. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902071>.
144. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., Nkurunziza, P., Dille, A., Depicker, A., Nahimana, L., ... & Dewitte, O. (2021b). Characteristics and Distribution of Landslides in the Populated Hillslopes of Bujumbura, Burundi. *Geosciences*, 11(6), 259. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060259>.
145. Lacroix, P., Handwerker, A.L., & Bièvre, G. (2020). Life and death of slow-moving landslides. *Nat Rev. Earth Env*, 1, 404–419. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0072-8>.
146. Laghmouch, M., Nimpagaritse, G., Mudende, L., Minani, M., Ndereyimana, J., Icitetse, I., ...& Kervyn, F. (2018). Numérisation de la Carte Géologique au 50,000 ème, Ministère de l'Hydraulique, de l'Energie et des Mines, République du Burundi & Musée royal de l'Afrique centrale (MRAC): Tervuren, Belgium, ISBN 978949224429.

147. LaHusen, S. R., Duvall, A. R., Booth, A. M., Grant, A., Mishkin, B. A., Montgomery, D. R., ... & Wartman, J. (2020). Rainfall triggers more deep-seated landslides than Cascadia earthquakes in the Oregon Coast Range, USA. *Science advances*, 6(38), eaba6790. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba6790>.
148. Larsen, I. J., & Montgomery, D. R. (2012). Landslide erosion coupled to tectonics and river incision. *Nature Geoscience*, 5(7), 468–473. <https://doi.org/10.1038/ngeo1479>.
149. Lee, S., & Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental geology*, 40(9), 1095-1113.
150. Lee, E. M., & Jones, D. K. (2004). *Landslide risk assessment* (Vol. 10). London: Thomas Telford. <https://qiegh.lyellcollection.org/content/39/4/402>.
151. Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33–41. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y>.
152. Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
153. Lee, S., & Talib, J.A (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environ Geol* 47, 982–990. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>.
154. Lee, S., Ryu, J. H., Won, J. S., & Park, H. J. (2004). Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, 71(3-4), 289-302.
155. Leroueil, S., & Locat, J. (2020). Slope movements—geotechnical characterization, risk assessment and mitigation. In *Geotechnical Hazards* (pp. 95-106). CRC Press.
156. Iunga, L. (1984). *Le Quaternaire de la Plaine de la Ruzizi. Etude Morphologique et Lithostratigraphique*. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Bruxelles, Belgium.
157. Mackey, B. H., & Roering J. J. (2011) Sediment yield, spatial characteristics, and the long-term evolution of active earthflows determined from airborne LiDAR and historical aerial photographs, Eel River, California. *Bull Geol Soc Am*, 123, 1560–1576. <https://doi.org/10.1130/B30306.1>.
158. Maes, J., Kervyn, M., de Hontheim, A., Dewitte, O., Jacobs, L., Mertens, K., ... & Poesen, J. (2017). Landslide risk reduction measures: A review of practices and challenges for the tropics. *Progress in Physical Geography*, 41(2), 191–221. <https://doi.org/10.1177/0309133316689344>.
159. Maki Mateso J.-C., & Dewitte, O. (2014). Towards an inventory of landslide processes and the elements at risk on the Rift flanks West of Lake Kivu (DRC). *Geo-Eco-Trop* 38:137–
160. Maki Mateso, J.-C., Bieters, C., Monsieurs, E., Depicker, A., Smets, B., Tambala, T., Bagalwa Mateso, L., and Dewitte, O. (in review, 2021): Natural and human-induced landslides in a tropical mountainous region: the Rift flank west of Lake Kivu (DR Congo), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-336>, in review, 2021.

161. Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons.
162. Maquaire, O., & Malet, J.-P., 2006, Shallow landsliding. In Boardman, J. & Poesen, J. (eds): Soil erosion in Europe, Wiley, London, 583-598.
163. Maquaire, O., Ritzenthaler, A., Fabre, D., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., ... & Monnet, J. (2002). Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable: application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Comptes Rendus Geoscience*, 334(11), 835-841. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(02\)01788-1](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(02)01788-1).
164. Marc, O., Behling, R., Andermann, C., Turowski, J. M., Illien, L., Roessner, S., & Hovius, N. (2019). Long-term erosion of the Nepal Himalayas by bedrock landsliding: the role of monsoons, earthquakes and giant landslides. *Earth Surface Dynamics*, 7(1), 107–128. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-107-2019>.
165. Marc, O., Hovius, N., Meunier, P., Uchida, T., & Hayashi, S. (2015). Transient changes of landslide rates after earthquakes. *Geology*, 43(10), 883-886. doi:10.1130/G36961.1
166. Marques, R., Zêzere, J., Trigo, R., Gaspar, J., & Trigo, I. (2008). Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(4), 478–494. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.6879>.
167. Massimiliano, B., Roberto, Claudia, M., Marco, B., & Silvia, C. (2018). Simplified Approach to Assess the Soil Saturation Degree and Stability of a Representative Slope Affected by Shallow Landslides in Oltrepò Pavese (Italy). *Geosciences* 8, 472/ doi:10.3390/geosciences8120472.
168. Mastere, M, Ait Brahim, L., & Van Vliet-Lanoë, B. (2010). Utilization of Digital Photogrammetry in Spatiotemporal Knowledge of Landslides. *Actes of GeoCanada 2010—Working with the Earth*. Calgary, Alberta, Canada.
169. Mastere, M., Ait Brahim, L., Elfahchouch, N., Guelzim, E., & Abdelouafi, A (2009). Synergie de la photogrammétrie numérique et du MNT à l'étude Spatiotemporelle des mouvements de terrain: Application à la coulée de pierres d'Amtrass, Maroc Nord Occidental.
170. Mboga, N., Grippa, T., Georganos, S., Vanhuysse, S., Smets, B., Dewitte, O., ... & Lennert, M. (2020). Fully convolutional networks for land cover classification from historical panchromatic aerial photographs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167, 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.005>.
171. McAdoo, B., Quak, M., Gnyawali, K., Adhikari, B., Devkota, S., Rajbhandari, P., and Sudmeier, K (2018). Brief communication: Roads and landslides in Nepal: How development affects risk, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 18, 1–6, <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-461>.
172. McCalpin, J. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. In *Proceedings 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium* (pp. 5–6).

173. McColl, S.T. (2015) Landslide Causes and Triggers. In: Landslide Hazards, Risks, and Disasters. Elsevier Inc., pp. 17–42.
174. Merrien-Soukatchoff, V., Quenot, X., & Guguelmi, Y. (2001). Modélisation par éléments distincts du phénomène de fauchage gravitaire. Application au glissement de la Clapière (Saint-Etienne-de-Tinée, Alpes-Maritimes). *Revue française de géotechnique*, (95-96), 133–142.
175. Michellier, C., Pigeon, P., Kervyn, F., & Wolff, E. (2016). Contextualizing vulnerability assessment: a support to geo-risk management in central Africa. *Natural hazards*, 82(1), 27–42. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2295-z>.
176. Moeyersons, J. & Trefois, P. (2012). La protection du site CURGO - Kabezi -Bujumbura contre les risques hydrologiques dans le bassin de la rivière Nyabage Etude de formulation d'une opération de conservation. Turvuren, Belgium. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:3e6a844d-e90e-4234-b83e-6215846ca652?collection=research>. Accessed on 16 June 2021.
177. Monsieurs, E., Jacobs, L., Michellier, C., Tchangaboba, J. B., Ganza, G. B., Kervyn, F., ... & Dewitte, O. (2018b). Landslide inventory for hazard assessment in a data-poor context: a regional-scale approach in a tropical African environment. *Landslides*, 15(11), 2195–2209. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1008-y>.
178. Monsieurs, E., Kirschbaum, D. B., Tan, J., Maki Mateso, J.-C., Jacobs, L., Plisnier, P.-D., Thiery, W., Umutohi, A., Musoni, D., Bibentyo, T. M., Ganza, G. B., Mawe, G. I., Bagalwa, L., Kankurize, C., Michellier, C., Stanley, T., Kervyn, F., Kervyn, M., Demoulin, A. and Dewitte, O. (2018a): Evaluating TMPA Rainfall over the Sparsely Gauged East African Rift, *J. Hydrometeorol.*, 19(9), 1507–1528, doi:10.1175/JHM-D-18-0103.1.
179. Monsieurs, E., Kirschbaum, D. B., Thiery, W., van Lipzig, N., Kervyn, M., Demoulin, A., ... & Dewitte, O. (2017). Constraints on Landslide-Climate Research Imposed by the Reality of Fieldwork in Central Africa. In: 3rd North American Symposium on Landslides, Roanoke, VA, June 4-8, 2017. pp 158–168. Monsieurs, E.: the Potential of Satellite Rainfall Estimates in Assessing Regional Landslide Hazard in Central Africa, University of Liège., 2020.
180. Morley, C.K., Ngenoh, D.K., & Ego, J.K. (1999). Introduction to the East African Rift System, in C.K. Morley ed., *Geoscience of Rift Systems—Evolution of East Africa: AAPG Studies in Geology* No. 44, p. 1–18.
181. Nagarajan, 2000 Nagarajan, R., Roy, A., Kumar, R. V., Mukherjee, A., & Khire, M. V. (2000). Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(4), 275–287.
182. Nakileza, B. R., & Nedala, S. (2020). Topographic influence on landslides characteristics and implication for risk management in upper Manafwa catchment, Mt Elgon Uganda. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1), 1–13.

183. Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110(1-2), 11-20.
184. NASA (2020). Global Landslide Catalog. In: NASA's Open Data Portal. <https://data.nasa.gov/Earth-Science/Global-Landslide-Catalog/h9d8-neg4>. Accessed 21 Sep 2020.
185. 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 péri-urbain de la partie nord de la mairie de Bujumbura, Burundi". Mémoire, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi.
186. Nelson, S.A. (2013). Slope Stability, Triggering Events, Mass Movement Hazards. http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/slopestability.htm. Accessed 26 May 2021
187. Nemčok, A., Pašek, J., & Rybář, J. (1972). Classification of landslides and other mass movements. *Rock mechanics*, 4(2), 71–78.
188. Neuhauser, B., & Terhorst, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1-2), 12-24.
189. Nibigira, L., Draidia, S., Havenith, H. (2015). Landslide Susceptibility Mapping in the Great Lakes Region of Africa, Case Study of Bujumbura Burundi. In: Lollino G. et al. (eds.) *Engineering Geology for Society and Territory/ Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, Volume 2*, pp. 985–988. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_172.
190. Nibigira, L., Draidia, S., Havenith, H. (2013). La vallée du rift est-africain face aux risques gravitaires: cas de Bujumbura (Burundi). *Troisièmes Journées Aléas Gravitaires, 2013 Sep 17-18, Grenoble (France)*.
191. Nibigira, L., Havenith, H. B., Archambeau, P., & Dewals, B. (2018). Formation, breaching and flood consequences of a landslide dam near Bujumbura, Burundi. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(7), 1867–1890.
192. Nkuzimana, A., 2012. Etude de l'influence des changements climatiques sur les torrentialités des rivières des montagnes de l'Ouest du Burundi et leurs impacts sur l'aménagement du territoire. Cas du bassin versant de la Nyabage, Mugoyi et Mutimbuzi. Université du Burundi, Mémoire de licence.
193. Nobile, A., Dille, A., Monsieurs, E., Basimike, J., Bibentyo, T. M., d'Oreye, N., ... & Dewitte, O. (2018). Multi-temporal DInSAR to characterise landslide ground deformations in a tropical urban environment: Focus on Bukavu (DR Congo). *Remote Sensing*, 10(4), 626. <https://doi.org/10.3390/rs10040626>.
194. Nsengiyumva, J. B., Luo, G., Nahayo, L., Huang, X., & Cai, P. (2018). Landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation model in Rwanda. *International journal of environmental research and public health*, 15(2), 243. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020243>.

195. Ntungicimpaye, A. 1984. Contribution à L'Étude du Magmatisme Basique dans le Kibarien de la Partie Occidentale du Burundi. Ph.D Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium.
196. Ohlmacher, G. C., & Davis, J. C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering geology*, 69(3-4), 331-343.
197. Oth, A., Barrière, J., d'Oreye, N., Mavonga, G., Subira, J., Mashagiro, N., ... & Kervyn, F. (2017). KivuSNet: The first dense broadband seismic network for the Kivu Rift region (western branch of East African Rift). *Seismological Research Letters*, 88(1), 49–60. <https://doi.org/10.1785/0220160147>.
198. Pierson, T.C., Costa, J.E., & Vancouver, W. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Reviews in Engineering Geology. Geological Society of America, 7, 1–12.
199. Pistocchi, A., Luzi, L., & Napolitano, P. (2002). The use of predictive modeling techniques for optimal exploitation of spatial databases: a case study in landslide hazard mapping with expert system-like methods. *Environmental geology*, 41(7), 765-775.
200. Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surf Process Landforms*, 43, 64–84. <https://doi.org/10.1002/esp.4250>.
201. Poli, S., & Sterlacchini, S. (2007). Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique. *Natural Resources Research*, 16(2), 121-134.
202. Pollock, W., & Wartman, J. (2020). Human Vulnerability to Landslides. *GeoHealth*, 4, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2020GH000287>.
- Putot, C., Chastanet, J., Cacas, M. C., & Daniel, J. P. (2001). Fracturation naturelle d'un massif rocheux. Diaclases et couloirs de fracturation. *Oil & Gas Science and Technology*, 56(5), 431-449.
203. Post, V. E. A., Vassolo, S. I., Tiberghien, C., Baranyikwa, D., & Miburo, D. (2017). High uranium concentrations in groundwater in Burundi. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 524-527. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.132>.
204. Ray, R.L., Lazzari, M., & Olutimehin, T. (2020). Remote sensing approaches and related techniques to map and study landslides. *Landslides-Investigation and Monitoring*, 10, 11. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93681>.
205. Regis, G. (2011). Conception de circuits analogique-numérique pour le conditionnement de micro-capteurs embarqués (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
206. Regmi, N. R., Giardino, J. R., & Vitek, J. D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187.
207. Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Ardizzone, F. (2005). Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria

- Region of central Italy. In: Glade, T., Anderson, M.G. & Crozier, M.J. (eds.), *Landslide risk assessment*. John Wiley, Chichester, 429–468. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch15>.
208. Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B.D., et al (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>.
209. République du Burundi (2009). Document de politique nationale de décentralisation du Burundi, Bujumbura, Burundi.
210. République du Burundi (2011). Recensement général de la population et de l’habitat du Burundi 2008 : synthèse des résultats définitifs, Bujumbura Burundi.
211. Rezig, S., Favre, J., Leroi, E. (1996). The probabilistic evaluation of landslide risk. In: Pardeshi, et al. 2013, Springer Plus, 11p.
212. Ritchien, H. & Roser, M. (2014). Natural Disasters. <https://ourworldindata.org/natural-disasters>. [Accédé au 27 Juin 2021].
213. Robinson, T. R., Rosser, N., & Walters, R. J. (2019). The spatial and temporal influence of cloud cover on satellite-based emergency mapping of earthquake disasters. *Scientific reports*, 9(1), 1– 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49008-0>.
214. Roering, J. J., Kirchner, J. W., & Dietrich, W. E. (2005). Characterizing structural and lithologic controls on deep-seated landsliding: Implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range, USA. *Bull Geol Soc Am* 117:654–668. <https://doi.org/10.1130/B25567.1>.
215. Rosenberg, L. I. (2007). *Landslide Hazard and Risk*: (Thomas Glade, Malcolm Anderson, and Michael J. Crozier, editors). <http://dx.doi.org/10.1002/9780470012659>.
216. Rupnik, E., Daakir, M., & Pierrot Deseilligny, M. (2017). MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. *Open geospatial data, softw. Stand*, 2, 14. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0027-2>.
217. Saaty Thomas, L. (1980). *The analytic Hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
218. Saha, A. K., Gupta, R. P., & Arora, M. K. (2002). GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *International journal of remote sensing*, 23(2), 357-369.
219. Samia, J., Temme, A., Bregt, A., et al. (2017). Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory. *Landslides* 14:547–558. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0739-x>.
220. Santangelo, M., Gioia, D., Cardinali, M., et al (2013). Interplay between mass movement and fluvial network organization: An example from southern Apennines, Italy. *Geomorphology* 188:54–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.008>.

221. Santangelo, M., Marchesini, I., Bucci, F., Cardinali, M., Fiorucci, F., & Guzzetti, F. (2015). An approach to reduce mapping errors in the production of landslide inventory maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(9), 2111–2126.
222. Schuster, R.L. (1996). Landslides: Investigation and Mitigation. In: *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Washington (DC): National Academy Press, 12–35.
223. Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>.
224. Shirambe, G., Nyadawa, M. O., & Nyomboi, T. (2018). Comparative assessment of landslide susceptibility by logistic regression and first order second moment method: Case study of Bujumbura Peri-Urban Area, Burundi. *J Eng Res Appl*, 8, 28–37. <https://doi.org/10.9790/9622-0808022837>.
225. Sidle, R. C., & Bogaard, T. A. (2016). Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides. *Earth-science reviews*, 159, 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.05.013>.
226. Sidle, R. C., Ghestem, M., and Stokes, A. (2014): Epic landslide erosion from mountain roads in Yunnan, China-challenges for sustainable development, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 3093–3104, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3093-2014>.
227. Skempton, A. W., & Hutchinson, J. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. In *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/*. <https://trid.trb.org/view/125702>. Accédé au 04 Juillet 2021.
228. Smets, B., Delvaux, D., Ann, K., et al. (2016). The role of inherited crustal structures and magmatism in the development of rift segments : Insights from the Kivu basin, western branch of the East African Rift. *Tectonophysics*, 683, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.022>.
229. Smets, B., Wauthier, C., & d'Oreye, N. (2010). A new map of the lava flow field of Nyamulagira (DR Congo) from satellite imagery. *Journal of African Earth Sciences*, 58(5), 778-786.
230. Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides: investigation and mitigation*, 247, 129–177.
231. Stanley, T., Kirschbaum, D.B., 2017. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Nat. Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y>.
232. Steger, S. (2017). Spatial analysis and statistical modelling of landslide susceptibility-pitfalls and solutions (Doctoral dissertation, Dissertation thesis. University of Vienna, Vienna. <http://othes.univie.ac.at/47980> (Accessed 20 February 2019)).
233. Steger, S., Brenning, A., Bell, R., Glade, T., 2017. The influence of systematically incomplete shallow landslide inventories on statistical susceptibility models and suggestions for improvements. *Landslides* 14, 1767–1781. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0820-0>.

234. Steger, S., Brenning, A., Bell, R., Petschko, H., Glade, T., 2016. Exploring discrepancies between quantitative validation results and the geomorphic plausibility of statistical landslide susceptibility maps. *Geomorphology* 262, 8–23. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.015>.
235. Steger, S., Mair, V., Kofler, C., Pittore, M., Zebisch, M., Schneiderbauer, S., 2021. Correlation does not imply geomorphic causation in data-driven landslide susceptibility modelling – Benefits of exploring landslide data collection effects. *Science of The Total Environment* 145935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145935>.
236. Sujatha, E. R., Kumaravel, P., & Rajamanickam, G. V. (2014). Assessing landslide susceptibility using Bayesian probability-based weight of evidence model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(1), 147-161.
237. Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental geology*, 45(5), 665-679.
238. Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285-1293. Chung et Fabbri, 1999
239. Tack, L. The Neoproterozoic Malagarazi supergroup of SE Burundi and its equivalent Bukoban System in NW Tanzania: A current review. In *Annales-Musée Royal de L’Afrique Centrale Série in 8vo Sciences Géologiques/Royal Museum of Central Africa: Tervuren, Belgium*, 1995/ pp. 121–130.
240. Tack, L./ Liégeois, J.P./ Deblond, A./ Duchesne, J.C. Kibaran A-type granitoids and mafic rocks generated by two mantle sources in a late orogenic setting (Burundi). *Precambrian Res.* 1994, 68, 323–356.
241. Tanyaş, H., Allstadt, K.E., van Westen, C.J. (2018). An updated method for estimating landslide-event magnitude. *Earth Surf Process Landforms*, 43, 1836–1847. <https://doi.org/10.1002/esp.4359>. Tanyaş, H., Görüm, T., Kirschbaum, D. *et al* (2022). Could road constructions be more hazardous than an earthquake in terms of mass movement?. *Nat Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05199-2>
242. Temme, A., Guzzetti, F., Samia, J., & Mirus, B. B. (2020). The future of landslides’ past—a framework for assessing consecutive landsliding systems. *Landslides*, 17(7), 1519–1528. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01405-7>.
243. Terzaghi, K. (1950). *Geologic Aspects of Soft-Ground Tunneling*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Incorporated.
244. Terzaghi, K. (1960). *Mechanism of Landslides. From theory to practice in soil mechanics*. New York, Wiley, pp. 202–245.

245. Theunissen K. 1989. Carte géologique du Burundi, Feuille Bujumbura. Ministère des Travaux publics, de l'Energie et des Mines, Bujumbura, Burundi.
246. Thiery, Y. (2007). Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux 'mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste (Doctoral dissertation, Université de Caen).
247. Thiery, Y., Malet, J. P., Sterlacchini, S., Puissant, A., & Maquaire, O. (2007). Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, 92(1-2), 38-59. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.020>.
248. Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O. et al. Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh province, Vietnam. *Nat Hazards*, 66, 707–730 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0510-0>.
249. Troncone, A., Pugliese, L., Lamanna, G., & Conte, E. (2021). Prediction of rainfall-induced landslide movements in the presence of stabilizing piles. *Engineering Geology*, 288, 106143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106143>. UN-ISDR (2004) Terminology of disaster risk reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva. <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.htm>.
250. Van de Walle, J., Thiery, W., Brousse, O., Souverijns, N., Demuzere, M., & van Lipzig, N. P. (2020). A convection-permitting model for the Lake Victoria Basin: Evaluation and insight into the mesoscale versus synoptic atmospheric dynamics. *Climate Dynamics*, 54(3), 1779-1799. doi:10.1007/s00382-019-05088-2, 2020.
251. Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Jaedicke, C. et al. (2012). Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. *Landslides* 9, 357–369. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0299-z>.
252. Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Dewitte, O., Demoulin, A., De Bo, H., & Vanmaercke-Gottigny, M. C. (2007). Reactivation of old landslides: lessons learned from a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Soil use and management*, 23(2), 200-211. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00079.x>.
253. Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering geology*, 102(3-4), 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>.
254. van Westen, C. J., Jaiswal, P., Ghosh, S., Martha, T. R., & Kuriakose, S. L. (2012). Landslide inventory, hazard and risk assessment in India. In *Terrigenous Mass Movements* (pp. 239-282). Springer, Berlin, Heidelberg.
255. Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30(3), 399-419.

256. Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65(2), 167-184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>.
257. Van Westen, C.J. (1994). GIS in landslide hazard zonation A review with examples from the Colombian Andes. In: Price M.F. & Heywood D.I. (eds.), Taylor and Francis, London, 135-165.
258. Vanmaercke, M., Ardizzone, F., Rossi, M. and Guzzetti, F.: Exploring the effects of seismicity on landslides and catchment sediment yield: An Italian case study, *Geomorphology*, 278, 171–183, doi:10.1016/j.geomorph.2016.11.010, 2017.
259. Varnes, D. J., & IAEG (1981). The principles and practice of landslide hazard zonation. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 23(1), 13–14.
260. Varnes, D. J., & IAEG (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. The UNESCO Press, Paris, 63p.
261. Varnes, D. J., 1978. Slope movements: 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, 11–33. Washington D.C.
262. Viator, N. (2020). Développement dans les quartiers périphériques du nord de la ville de Bujumbura. *Journal of University of Burundi*, 17(1), 63-80.
263. Wassmer, P., Schwartz, D., Gomez, C., Ward, S., & Barrere, P. (2013). Geomorphology and sedimentary structures of Upper Pleistocene to Holocene alluvium within the Nyabarongo valley (Rwanda). Palaeo-climate and palaeo-environmental implications. *Geogr. Fis. Din. Quat*, 36, 199–210. <https://doi.org/10.4461/GFDQ.2013.36.17>.
264. Wiecezorek, G.F., Snyder, J.B. (2019). Monitoring slope movements. *Geol. Monit*, 245–271. [https://doi.org/10.1130/2009.monitoring\(11\)](https://doi.org/10.1130/2009.monitoring(11)).
265. Wilken, F., Fiener, P., Ketterer, M., Meusburger, K., Muhindo, D. I., Van Oost, K., & Doetterl, S. (2021). Assessing soil redistribution of forest and cropland sites in wet tropical Africa using 239+ 240 Pufallout radionuclides. *Soil*, 7(2), 399-414. doi:10.5194/soil-7-399-2021.
266. Wilson, A.M., Jetz, W. (2016). Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. *PLoS Biol* 14(3) e1002415. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002415>.
267. Wu, C., & Qiao, J. (2009). Relationship between landslides and lithology in the Three Gorges Reservoir area based on GIS and information value model. *Frontiers of Forestry in China*, 4(2), 165–170.

268. Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287.
269. Yao, T., Fouché-Grobla, O., Oga, M. S., & Assoma, V. (2012). Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. *Télédétection*, 10(4), 161-178.
270. Yunus, A. P., Fan, X., Subramanian, S. S., Jie, D., & Xu, Q. (2021). Unraveling the drivers of intensified landslide regimes in Western Ghats, India. *Science of the total environment*, 770, 145357. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145357>.
271. Zahiri H, Palamara DR, Flentje P, Brassington GM, Baafi E (2006) A GIS-based weights-of-evidence model for mapping cliff instabilities associated with mine subsidence. *Environ Geol* 51:377–386.
272. Zêzere, J. L., Rodrigues, M. L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Vieira, G., & Ferreira, A. B. (2004, June). Spatial and temporal data management for the probabilistic landslide hazard assessment considering landslide typology. In *Landslides, evaluation & stabilization. Proceedings of the 9th international symposium on Landslides, Rio de Janeiro (Vol. 1, pp. 117-125)*.
273. Zhao, C., Zhang, Q., He, Y., Peng, J., Yang, C., & Kang, Y. (2016). Small-scale loess landslide monitoring with small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar technique—case study of Xingyuan landslide, Shaanxi, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2), 026030. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.10.026030>.

ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE 1 : PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Les travaux réalisés et présentés dans ce mémoire de thèse ont été valorisés dans les publications indiquées ci-dessous :

Revues Internationales (3)

1. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., & 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. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001724>.
2. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., Nkurunziza, P., Dille, A., Depicker, A., Nahimana, L., ... & Dewitte, O. (2021). Characteristics and Distribution of Landslides in the Populated Hillslopes of Bujumbura, Burundi. *Geosciences*, 11(6), 259. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060259>.
3. Dewitte, O., Dille, A., Depicker, A., **Kubwimana, D.**, Maki Mateso, J-C, Bibentyo, T. M., ... & Monsieurs, E. (2021). Constraining landslide timing in a data-scarce context: from recent to very old processes in the tropical environment of the North Tanganyika-Kivu Rift region. *Landslides*, 18(1), 161–177. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01452-0>.

Conférences nationales et internationales (1)

4. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., Bousta, M., Dewitte, O., Abdelouafi, A., Bahaj, T. (2018). Landslide susceptibility assessment using AHP method in Kanyosha watershed (Bujumbura-Burundi): Urbanisation and management impacts. In: *MATEC Web of Conferences*, p. 02071. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902071>.

Article soumis 2022 à la revue *EUREKA Physics and Engineering* indexée Scopus (1)

5. **Kubwimana, D.**, Ait Brahim, L., **Bahaj, T.**, Abdelouafi, A., Sindayihebura, A & Dewitte, O. (Soumis 2022). Comparison of heuristic (AHP) and data-driven (WoE and LR) approach for landslide susceptibility mapping in the populated hillslopes of Bujumbura (Burundi). *EUREKA Physics and Engineering*.

ANNEXE 2 : CATALOGUE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES RELIEFS DE BUJUMBURA

ID	Processus	Activity	Deep_m	Age	Contact_RH	Contact_Road	Material	Area	Gpe_types	Timing	X_m	Y_m
0	Flowslide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	89939.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766344	9620526
1	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	1	Earth	416360	Earthflow and slide - earthflow	Old	766762	9620484
2	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	6826.95	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763697	9618554
3	Slide	1	1	2010	1	0	Earth	39105.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	764872	9620266
4	Slide	1	1	2014	1	0	Earth	2587.34	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764423	9622309
5	Gully	1	1	Older than 1957	1	1	Debris	31087.9	Gully with landslide process	Old	765603	9627424
6	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	7353.15	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764584	9627138
7	Flowslide	1	1	2008	1	0	Debris	2514.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764499	9627203
8	Gully	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	184110	Gully with landslide process	Old	766188	9625661
9	Slide - earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	423679	Earthflow and slide - earthflow	Old	766257	9612804
10	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	18915	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763352	9616303
11	Gully	1	1	1974-2000	1	0	Earth	33407	Gully with landslide process	Recent	762770	9615103
12	Gully	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	58251.5	Gully with landslide process	Old	763271	9617413
13	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	8484.56	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763696	9619055
14	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	4685.67	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763910	9619114
15	Slide	1	1	2014	1	0	Debris	4103.09	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764260	9622385
16	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	4593.62	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764247	9622335

17	Slide		1	1	2014	1	0	Debris		1507.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764347	9622338
18	Slide		1	1	1974-2000	1	0	Debris		1940.86	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763937	9622475
19	Gully		1	1	Older than 1957	1	0	Earth		13625.4	Gully with landslide process	Old	765190	9621973
20	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Debris		37024.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764872	9622576
21	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Earth		20144.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764783	9622806
22	Rotational slide		1	1	2007	1	0	Debris		4852.43	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764929	9622792
23	Flowslide		1	0	2010	1	0	Earth		1009.33	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765099	9615293
24	Gully		1	1	2007	1	1	Debris		21301.6	Gully with landslide process	Recent	764589	9621474
25	Gully		0	1	2014	1	0	Debris		76456.1	Gully with landslide process	Recent	770267	9628164
26	Flowslide		1	1	2000-2006	1	0	Earth		4516.19	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763815	9619130
27	Rotational slide		1	1	Older than 1957	1	0	Earth		65106	Rock slide and rock avalanche	Old	763360	9615058
28	Slide		1	1	2014	1	0	Earth		3830.98	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764368	9622251
29	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Earth		5016.09	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764438	9622231
30	Slide		1	1	2011	1	0	Earth		20597	Rock slide and rock avalanche	Recent	770801	9629954
31	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Earth		18424.1	Rock slide and rock avalanche	Old	767864	9610537
32	Rotational slide		1	1	2000-2006	1	0	Debris		14683.4	Rock slide and rock avalanche	Recent	770747	9619941
33	Flowslide		1	1	1974-2000	1	1	Earth		4406.98	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767563	9627669
34	Flowslide		0	1	Older than 1957	1	0	Debris		22592.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	772036	9626263

35	Flowslide	0	1	Older than 1957	1	1	Debris	31975.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	774074	9628006
36	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	3521.29	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769091	9611661
37	Flowslide	1	1	2013	1	0	Earth	2388.26	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772599	9623408
38	Flowslide	1	0	2000-2006	1	0	Debris	1414.08	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	781177	9621960
39	Flowslide	1	0	2000-2006	1	0	Debris	1099.21	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	781109	9622000
40	Flowslide	1	0	2000-2006	1	0	Debris	769.808	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	781055	9622018
41	Flowslide	1	0	2000-2006	1	0	Debris	681.674	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	781011	9622044
42	Flowslide	1	0	2000-2006	1	0	Debris	840.274	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	781225	9621926
43	Flowslide	1	0	2000-2006	1	0	Debris	510.651	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	781210	9621909
44	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	6129.19	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764334	9620990
45	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	1087.23	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764234	9620977
46	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	6323.16	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774631	9626848
47	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	37052.1	Earthflow and slide - earthflow	Old	768139	9610774
48	Flowslide	1	0	2012	1	0	Earth	673.742	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768093	9610772
49	Flowslide	1	0	2012	1	0	Earth	1168.49	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768044	9610744
50	Flowslide	1	0	2012	1	0	Debris	1169.97	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767991	9610706
51	Gully	1	0	2013	1	0	Earth	5827.61	Gully with landslide process	Recent	767750	9610204
52	Gully	1	1	1974-2000	1	1	Earth	49713.5	Gully with landslide process	Recent	762581	9614680

53	Flowslide	1	1	2007	1	0	Earth	5784.65	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764273	9615571
54	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	27731.5	Rock slide and rock avalanche	Old	765161	9615235
55	Flowslide	1	0	2007	0	1	Earth	1274.82	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767828	9620040
56	Flowslide	1	0	2010	0	1	Debris	11705.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767148	9620426
57	Flowslide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	12672.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765854	9620593
58	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Rock	4154.6	Rock slide and rock avalanche	Old	764084	9621014
59	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	0	Mud	11233.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763877	9619829
60	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	47653.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763786	9619720
61	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	31088.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	773095	9627241
62	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	4687.48	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764657	9622214
63	Planar slide	1	1	2010	1	0	Debris	12869.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765908	9623063
64	Flowslide	1	1	2010	1	0	Debris	16428.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766625	9614317
65	Slide	1	1	2007	1	0	Debris	6548.68	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764719	9614652
66	Gully	1	0	2010	1	1	Debris	453.062	Gully with landslide process	Recent	763288	9615327
67	Gully	1	0	2010	1	1	Debris	232.724	Gully with landslide process	Recent	763239	9615364
68	Rotational slide	1	1	2018	1	1	Earth	1755.26	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765843	9626282
69	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	1	Debris	3861.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766038	9626276
70	Rotational slide	1	1	2014	1	0	Earth	3451.93	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769814	9630480

71	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	1	Earth	21586.1	Rock slide and rock avalanche	Old	771134	9624061
72	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	53559.3	Earthflow and slide - earthflow	Old	772748	9625348
73	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	22687.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	777173	9625899
74	Avalanche	1	0	2013	1	1	Debris	2335.29	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775182	9628489
75	Flowslide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	59399.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766105	9620605
76	Rotational slide	1	1	2007	1	0	Debris	3693.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763680	9614442
77	Rotational slide	1	1	2010	1	0	Debris	1925.17	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763762	9614447
78	Gully	1	1	2007	1	1	Earth	8601.23	Gully with landslide process	Recent	764591	9621603
79	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	56456.1	Rock slide and rock avalanche	Old	764302	9614630
80	Flowslide	1	1	2000-2006	1	0	Debris	4407.28	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763737	9619114
81	Rotational slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	34039.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763510	9617538
82	Rotational slide	1	1	2007	1	0	Debris	13871.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771781	9613382
83	Flowslide	1	1	2016	1	0	Debris	11049.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771323	9610910
84	Debris flow	1	0	1974-2000	1	0	Debris	7045.63	Debris flow	Recent	769746	9611893
85	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	103857	Earthflow and slide - earthflow	Old	773454	9610233
86	Flowslide	1	0	2014	1	0	Earth	2744.96	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773840	9610424
87	Flowslide	1	1	2007	1	0	Debris	1128.03	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764870	9621741
88	Gully	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	10403	Gully with landslide process	Old	764692	9623215

89	Rotational slide	1	1	2008	1	0	Debris	1974.42	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763378	9616212
90	Gully	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	2446.76	Gully with landslide process	Old	763881	9618412
91	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	11638.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763731	9619886
92	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Mud	10850.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763798	9619951
93	Flowslide	1	1	1974-2000	0	1	Debris	5173.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765089	9621071
94	Rotational slide	1	1	2008	1	0	Debris	6541.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763806	9614170
95	Rotational slide	1	1	2014	1	1	Debris	19565.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	769045	9623703
96	Slide	1	1	2000-2006	1	0	Earth	29548.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	766958	9625663
97	Flowslide	1	0	2018	1	0	Debris	2164.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769923	9631723
98	Flowslide	1	0	2017	0	0	Earth	1358.13	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771314	9631917
99	Flowslide	1	1	2014	1	1	Earth	9533.45	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771085	9632279
100	Flowslide	1	1	Older than 1957	0	0	Earth	3915.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	773959	9630457
101	Flowslide	1	1	2014	1	1	Earth	8373.52	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	777888	9625963
102	Rotational slide	1	1	2014	1	0	Earth	4249.57	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769859	9630316
103	Planar slide	1	1	2014	1	0	Earth	6610.02	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769380	9630837
104	Flowslide	1	0	2010	1	0	Earth	980.084	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	762912	9615745
105	Rotational slide	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	15691.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	762741	9615719

106	Flowslide	1	1	2010	1	0	Earth	9431.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	762627	9615814
107	Rotational slide	1	1	2014	1	0	Earth	3675.69	Rock slide and rock avalanche	Recent	776738	9627676
108	Avalanche	1	0	2018	1	1	Debris	9333.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	776926	9628755
109	Slide	1	1	Older than 1957	1	1	Debris	158102	Rock slide and rock avalanche	Old	767892	9612859
110	Flowslide	1	1	2007	1	0	Earth	6663.01	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771835	9613534
111	Rotational slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	27061.6	Rock slide and rock avalanche	Old	765311	9620794
112	Flowslide	1	1	2017	1	1	Earth	3367	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771011	9611360
113	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	22034.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	771083	9611635
114	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	52947.8	Rock slide and rock avalanche	Old	770706	9611665
115	Earthflow	1	0	Older than 1957	1	0	Debris	5575.57	Earthflow and slide - earthflow	Old	771389	9612426
116	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	3599.83	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764958	9622131
117	Flowslide	1	1	1974-2000	1	1	Debris	60518.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767118	9620320
118	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	4448.33	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769114	9611727
119	Avalanche	1	1	2009	1	0		6402.33	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775414	9622038
120	Debris flow	1	1	2012	1	0		2007.8	Debris flow	Recent	772062	9619565
121	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	13238.5	Rock slide and rock avalanche	Old	769898	9631731
122	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0		18862.3	Rock slide and rock avalanche	Old	770850	9613103

123	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	4806.52	Earthflow and slide - earthflow	Old	770706	9612551
124	Rotational slide	1	1	2007	1	0	Earth	3823.13	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771952	9613561
125	Gully	1	0	2014	1	0		1453.45	Gully with landslide process	Recent	771758	9613046
126	Rotational slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	58992.1	Rock slide and rock avalanche	Old	772185	9626936
127	Rotational slide	1	1	2014	1	0	Earth	2102.76	Rock slide and rock avalanche	Recent	779069	9625840
128	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	18254.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764237	9621936
129	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	2587.52	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764421	9622048
130	Slide	0	1	1974-2000	1	0	Debris	1854.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764012	9622468
131	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	3675.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764305	9622300
132	Slide	0	1	1974-2000	1	0	Debris	1546.76	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764081	9622444
133	Rotational slide	1	1	2010	1	0	Earth	2476.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763552	9618621
134	Rock slope deformation	0	1	Relict	1	0	Debris	1159889	Mountain and rock slope deformation	Very old	771677	9630002
135	Planar slide	1	1	2011	1	0	Debris	11822.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770807	9629941
136	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1620.68	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770629	9630076
137	Mountain slope deformation	0	1	Relict	1	1		2478279	Mountain and rock slope deformation	Very old	768453	9620258
138	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		346052	Rock slide and rock avalanche	Old	768403	9619201
139	Slide	0	1	Relict	1	0		699678	Rock slide and rock avalanche	Very old	767659	9619369

140	Slide		0	1	Older than 1957		1	0		60744	Rock slide and rock avalanche	Old	767061	9619475
141	Slide		1	1	Older than 1957		1	0		14099.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766831	9619836
142	Slide		1	1	Older than 1957		0	0		10949.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766751	9619708
143	Mountain slope deformation		0	1	Relict		1	0	earth	882744	Mountain and rock slope deformation	Very old	765441	9620206
144	Gully		1	1	Older than 1957		1	0		47274.7	Gully with landslide process	Old	763675	9619012
145	Gully		1	0	2012		0	0		861.162	Gully with landslide process	Recent	763966	9619021
146	Mountain slope deformation		0	1	Relict		1	0		1.8E+07	Mountain and rock slope deformation	Very old	763403	9605599
147	Slide		0	1	Relict		1	0		339492	Rock slide and rock avalanche	Very old	763446	9616360
148	Gully		1	1	Older than 1957		1	0	Debris	25041	Gully with landslide process	Old	763046	9616456
149	Slide		1	1	2008		1	0		29392.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	760913	9614714
150	Slide		1	1	2008		1	0		59370.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	761210	9614847
151	Mountain slope deformation		0	1	Relict		1	1	Earth	3626566	Mountain and rock slope deformation	Very old	769199	9628738
152	Slide		0	1	Older than 1957		1	0		284578	Rock slide and rock avalanche	Old	764740	9608248
153	Slide		0	1	Older than 1957		1	0		1032335	Rock slide and rock avalanche	Old	765121	9607611
154	Slide		0	1	Older than 1957		1	0		51297.2	Rock slide and rock avalanche	Old	765254	9608694
155	Slide		0	1	Older than 1957		1	0		69313.5	Rock slide and rock avalanche	Old	765110	9609111

156	Slide - earthflow		0	1	Older than 1957		1		0		620140	Rock slide and rock avalanche	Old	765812	9609138
157	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		322396	Rock slide and rock avalanche	Old	765538	9609716
158	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		180997	Rock slide and rock avalanche	Old	766280	9612260
159	Mountain slope deformation		0	1	Relict		1		0		371653	Mountain and rock slope deformation	Very old	767131	9612491
160	Earthflow		1	1	Older than 1957		1		0		285450	Earthflow and slide - earthflow	Old	765706	9613296
161	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		175692	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	762047	9613667
162	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		429532	Rock slide and rock avalanche	Old	764453	9609712
163	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		78686.4	Rock slide and rock avalanche	Old	764094	9609408
164	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		75133.2	Rock slide and rock avalanche	Old	763370	9609871
165	Flowslide		1	1	2014		1		0		2437.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763303	9609795
166	Slide		1	1	2014		1		0		5763.83	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763377	9609787
167	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		73218	Rock slide and rock avalanche	Old	763076	9611452
168	Slide		0	1	1974-2000		1		0		6790.88	Rock slide and rock avalanche	Recent	763972	9611239
169	Slide - earthflow		0	1	Older than 1957		1		0		120918	Earthflow and slide - earthflow	Old	763586	9611170
170	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		180993	Rock slide and rock avalanche	Old	764323	9611593
171	Slide		0	1	1974-2000		1		0		25261.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	764267	9610872
172	Slide		1	1	1974-2000		1		0		16736.6	Rock slide and rock avalanche	Recent	764045	9610540
173	Slide		0	1	1974-2000		1		0		39093.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	763442	9610374
174	Slide		1	1	2014		1		0		18584.8	Rock slide and rock avalanche	Recent	763351	9609686

175	Gully		1		Older than 1 1957		1		0		68711.3	Gully with landslide process	Old	762683	9609238
176	Slide		1	1	1974-2000		1		0		25203.2	Rock slide and rock avalanche	Recent	763234	9607768
177	Slide		0	1	Older than 1 1957		1		0		79574.5	Rock slide and rock avalanche	Old	765015	9610806
178	Slide		0	1	Older than 1 1957		1		0		111501	Rock slide and rock avalanche	Old	767130	9612337
179	Slide		1	1	Older than 1 1957		1		1		187391	Rock slide and rock avalanche	Old	768065	9613359
180	Slide		0	1	Older than 1 1957		1		1		1340339	Rock slide and rock avalanche	Old	767327	9613656
181	Slide		0	1	Older than 1 1957		1	Earth	1		272050	Rock slide and rock avalanche	Old	765696	9614759
182	Slide		1	1	Older than 1 1957		1		0		284824	Rock slide and rock avalanche	Old	767125	9616985
183	Earthflow		1	1	Older than 1 1957		1		0		350818	Earthflow and slide - earthflow	Old	766298	9617146
184	Slide		0	1	Older than 1 1957		1		0		196319	Rock slide and rock avalanche	Old	766618	9616199
185	Slide		0	1	Older than 1 1957		1		0		248219	Rock slide and rock avalanche	Old	766194	9616446
186	Slide		0	1	Older than 1 1957		1		1		146419	Rock slide and rock avalanche	Old	764363	9616192
187	Slide		1	1	Older than 1 1957		1		0		3897.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764025	9615263
188	Slide		1	1	Older than 1 1957		1		0		11394.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763936	9615251
189	Rotational slide		0	1	Older than 1 1957		1		0		153953	Rock slide and rock avalanche	Old	764135	9615028
190	Avalanche		0	1	Older than 1 1957		1		0		161258	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	767422	9610916
191	Slide		1	1	1974-2000		1		0		17048.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	767468	9610521
192	Slide		0	1	Older than 1 1957		1		0		160650	Rock slide and rock avalanche	Old	772891	9609068

193	Slide - earthflow		0	1	Older than 1957		1		0		242755	Earthflow and slide - earthflow	Old	773992	9610546
194	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		61472.2	Rock slide and rock avalanche	Old	774476	9610327
195	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		184135	Rock slide and rock avalanche	Old	775391	9610362
196	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		718442	Rock slide and rock avalanche	Old	772320	9610777
197	Slide		1	1	Older than 1957		1		0		27367.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	772057	9611318
198	Earthflow		0	1	Older than 1957		0		0		133845	Earthflow and slide - earthflow	Old	770907	9612132
199	Earthflow		1	1	Older than 1957		1		1		320166	Earthflow and slide - earthflow	Old	768779	9613083
200	Earthflow		0	1	Older than 1957		1		0		214046	Earthflow and slide - earthflow	Old	770714	9613096
201	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		193400	Rock slide and rock avalanche	Old	770619	9614190
202	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		289734	Rock slide and rock avalanche	Old	771190	9615604
203	Slide		0	1	Older than 1957		1		1		530865	Rock slide and rock avalanche	Old	769904	9616835
204	Slide		0	1	Older than 1957		1		1		114724	Rock slide and rock avalanche	Old	768993	9616778
205	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		155735	Rock slide and rock avalanche	Old	768419	9617009
206	Earthflow		0	1	Older than 1957		1		0		234348	Earthflow and slide - earthflow	Old	767901	9616940
207	Slide		0	1	Older than 1957		1	Debris	1		108693	Rock slide and rock avalanche	Old	768544	9617166
208	Slide - earthflow		0	1	Older than 1957		1		0		230525	Earthflow and slide - earthflow	Old	765088	9614012
209	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		133176	Rock slide and rock avalanche	Old	764664	9614555

210	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0		205037	Earthflow and slide - earthflow	Old	770696	9613524
211	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		74151.5	Rock slide and rock avalanche	Old	766250	9620053
212	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		251336	Rock slide and rock avalanche	Old	766065	9619326
213	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0		132454	Earthflow and slide - earthflow	Old	766378	9619168
214	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		416474	Rock slide and rock avalanche	Old	770487	9618286
215	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		290163	Rock slide and rock avalanche	Old	770130	9619283
216	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		302003	Rock slide and rock avalanche	Old	769786	9618954
217	Slide	0	1	Older than 1957	1	1		954016	Rock slide and rock avalanche	Old	769091	9619056
218	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	353963	Earthflow and slide - earthflow	Old	770721	9620602
219	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	110482	Earthflow and slide - earthflow	Old	771040	9620740
220	Earthflow	1	1	1974-2000	1	0	Earth	24665.1	Earthflow and slide - earthflow	Recent	770348	9620019
221	Slide	0	1	Older than 1957	0	0		84221.5	Rock slide and rock avalanche	Old	776900	9622389
222	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0		359133	Earthflow and slide - earthflow	Old	777700	9624527
223	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		442401	Rock slide and rock avalanche	Old	773519	9624404
224	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		504304	Rock slide and rock avalanche	Old	774042	9624852
225	Slide	0	1	Older than 1957	1	1		74132.6	Rock slide and rock avalanche	Old	772506	9625417
226	Slide	0	1	Older than 1957	0	0		105448	Rock slide and rock avalanche	Old	773138	9625494

227	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0		276345	Earthflow and slide - earthflow	Old	769600	9624392
228	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	1	Earth	159359	Earthflow and slide - earthflow	Old	767451	9625439
229	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0		4914.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765521	9626541
230	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		155312	Rock slide and rock avalanche	Old	765970	9623395
231	Mountain slope deformation	0	1	Relict	1	0		560265	Mountain and rock slope deformation	Very old	766932	9622848
232	Slide	0	1	Older than 1957	1	1		67282.2	Rock slide and rock avalanche	Old	767962	9623066
233	Avalanche	0	1	Older than 1957	1	0		57735.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	768433	9622927
234	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		492710	Rock slide and rock avalanche	Old	768970	9623369
235	Slide	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	387515	Rock slide and rock avalanche	Old	770560	9624443
236	Slide	0	1	Relict	1	1		1521883	Rock slide and rock avalanche	Very old	771183	9624997
237	Mountain slope deformation	0	1	Relict	1	0		1493258	Mountain and rock slope deformation	Very old	770969	9626116
238	Slide	0	1	Relict	1	0		1305712	Rock slide and rock avalanche	Very old	773287	9626512
239	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		244554	Rock slide and rock avalanche	Old	767120	9616463
240	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		908584	Rock slide and rock avalanche	Old	772245	9623143
241	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0		24145.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	775774	9625756
242	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0		482875	Earthflow and slide - earthflow	Old	768386	9621736
243	Slide	0	1	Older than 1957	1	1		80481.2	Rock slide and rock avalanche	Old	767737	9622527

244	Slide		0	1	Older than 1957	1			160744	Rock slide and rock avalanche	Old	767165	9621955
245	Slide - earthflow		0	1	Older than 1957	1			304680	Rock slide and rock avalanche	Old	767008	9621533
246	Slide - earthflow		1	1	Older than 1957	1			162447	Rock slide and rock avalanche	Old	765689	9621805
247	Slide		1	1	2010 Older than 1957	0			1134.57	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764103	9621690
248	Slide		0	1	Older than 1957	0			13804.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763952	9621491
249	Slide		1	1	1974-2000	0	Debris		1185.61	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763813	9621478
250	Flowslide		0	1	2007 Older than 1957	1			3751.43	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765262	9621640
251	Slide		0	1	Older than 1957	1	Debris		149548	Rock slide and rock avalanche	Old	770989	9627966
252	Avalanche		0	1	Older than 1957	1			419917	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	772183	9627486
253	Slide		0	1	Older than 1957	1			436238	Rock slide and rock avalanche	Old	771677	9631992
254	Slide		1	1	2014	1	Debris		2293.11	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770926	9632160
255	Slide		1	1	2014	1	Debris		6351.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770572	9631924
256	Avalanche		0	1	Older than 1957	1	Rock		152113	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	774697	9626842
257	Avalanche		1	1	2009 Older than 1957	1	Debris		23982.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775360	9631863
258	Avalanche		1	1	Older than 1957	1	Debris		49814.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	775947	9632108
259	Slide		0	1	Older than 1957	1			365278	Rock slide and rock avalanche	Old	774292	9635147
260	Slide - earthflow		0	1	Older than 1957	1	Debris		63568.9	Rock slide and rock avalanche	Old	775364	9634786

261	Slide	1	1	2014	1	1	Debris	2922.75	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770051	9631550
262	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Debris	261462	Rock slide and rock avalanche	Old	767362	9611939
263	Planar slide	1	1	2014	1	0	Debris	2426.59	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763456	9609775
264	Gully	0	1	Older than 1957	1	0	Debris	56086.1	Gully with landslide process	Old	762473	9610232
265	Flowslide	1	1	2010	1	0	Earth	52395.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766358	9613008
266	Gully	1	0	1974-2000	1	1	Earth	1931.91	Gully with landslide process	Recent	762891	9615541
267	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	11467.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	762978	9615508
268	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	134185	Rock slide and rock avalanche	Old	764839	9615498
269	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	14976.1	Rock slide and rock avalanche	Old	765791	9615016
270	Slide	1	1	2014	1	0	Debris	5723.41	Rock slide and rock avalanche	Recent	764151	9614320
271	Planar slide	1	1	2010	1	0	Debris	10464.4	Rock slide and rock avalanche	Recent	764057	9614335
272	Flowslide	1	1	2008	1	0	Debris	4220.46	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764015	9614219
273	Planar slide	1	1	2008	1	1	Debris	22870.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763918	9614128
274	Planar slide	1	1	2010	1	0	Debris	5226.56	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	762919	9615448
275	Flowslide	1	0	2011	0	0	Debris	2411.34	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769889	9620140
276	Flowslide	1	1	2010	1	0	Debris	3060.49	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764809	9622886
277	Slide	1	1	2007	1	0	Debris	2110.71	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764749	9623204
278	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	2352.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764687	9623396

279	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0		2267.18	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764814	9623307
280	Slide	1	1	1974-2000	1	0		1552.64	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764946	9623233
281	Gully	1	1	Older than 1957	1	0		3128	Gully with landslide process	Old	764815	9623281
282	Planar slide	1	1	2011	1	0		905.311	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764574	9623388
283	Slide	1	1	2010	1	0	Debris	7796.38	Rock slide and rock avalanche	Recent	764794	9623949
284	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	16431.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764943	9623467
285	Planar slide	1	1	2008	1	1	Earth	14020.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766114	9624279
286	Slide	1	1	1974-2000	1	0		10676.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765770	9626378
287	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0		10887.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765650	9626431
288	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	18338.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	767162	9625971
289	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0		306248	Earthflow and slide - earthflow	Old	770249	9629729
290	Planar slide	1	0	2013	1	0	Debris	7560.49	Rock slide and rock avalanche	Recent	775331	9635072
291	Rotational slide	1	1	2013	1	0		2669.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772582	9635126
292	Debris flow	1	1	2016	1	0	Debris	18256.1	Debris flow	Recent	772714	9635257
293	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Rock	10695.2	Rock slide and rock avalanche	Recent	764002	9620924
294	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Rock	14111.9	Rock slide and rock avalanche	Old	763942	9621004
295	Slide	1	1	2007	1	0	Earth	9397.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763761	9620946
296	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	4340.43	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764003	9620534
297	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	16662.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763963	9618791

298	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	26840.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764858	9623719
299	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	3000.54	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764940	9623775
300	Planar slide	1	1	1974-2000	1	0		1482.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764733	9623345
301	Planar slide	1	1	1974-2000	1	0		1367.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764579	9623430
302	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		660745	Rock slide and rock avalanche	Old	773668	9629138
303	2014 events	1	1	2014	1	1	Debris	9868.05	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770112	9631617
304	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	12447.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763695	9618453
305	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		24132.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764074	9620150
306	Gully	1	1	Older than 1957	1	0		20298.9	Gully with landslide process	Old	763602	9619826
307	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	15179.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763575	9619960
308	Gully	1	1	Older than 1957	1	0	Mud	6581.66	Gully with landslide process	Old	763593	9620044
309	Avalanche	1	0	2014	1	1	Debris	6973.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773706	9630660
310	Flowslide	1	1	2012	1	0	Debris	8402.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768915	9619575
311	Slide	1	1	2007	1	1	Mud	11288.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765973	9621470
312	Gully	1	0	Older than 1957	1	0	Earth	13214.2	Gully with landslide process	Old	763415	9613704
313	Flowslide	1	1	2014	1	0	Debris	1391.89	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770299	9631364
314	Gully	0	1	Older than 1957	1	0		70850.1	Gully with landslide process	Old	761428	9607149

315	Slide	1	1	1	2013	1	0		9042.29	Rock slide and rock avalanche	Recent	763137	9603606
316	Slide	0	1	1	Older than 1957	1	0		28328.3	Rock slide and rock avalanche	Old	763172	9603728
317	Slide	1	1	1	Older than 1957	1	1	Earth	71875.3	Rock slide and rock avalanche	Old	770692	9620238
318	Rotational slide	1	1	1	1974-2000	1	1	Mud	16012.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	770691	9620080
319	Slide	1	1	1	2014	1	0	Debris	2769.89	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769164	9630863
320	Slide	1	1	1	2014	1	0	Debris	1359.62	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769223	9630897
321	Flowslide	1	1	1	2014	1	0	Earth	6125.51	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769137	9630783
322	Gully	1	1	1	2017	1	0	Earth	5835.62	Gully with landslide process	Recent	770367	9613447
323	Rotational slide	1	1	1	Older than 1957	1	0		2754.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763093	9615997
324	Planar slide	1	1	1	2010	1	1	Earth	61561.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765629	9614833
325	Planar slide	1	1	1	2000-2006	1	1		1589.69	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765084	9621642
326	Rotational slide	1	1	1	2000-2006	1	0		1053.47	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765103	9621652
327	Rotational slide	1	1	1	2000-2006	1	0		666.371	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764972	9621740
328	Rotational slide	1	1	1	2000-2006	1	0		1102	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764963	9621721
329	Gully	1	1	1	1974-2000	1	0	Debris	1702.88	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765022	9621700
330	Slide	1	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	12377.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764677	9622104
331	Planar slide	1	1	1	2009	1	0		3708.16	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764569	9622179
332	Slide	1	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	4965.98	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764908	9622084

333	Gully	1	0	1974-2000	1	0		1587.08	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764866	9622061
334	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	60235.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	765747	9621084
335	Gully	1	0	1974-2000	1	0		2623.81	Gully with landslide process	Recent	765046	9620927
336	Gully	1	1	Older than 1957	1	0		12239.9	Gully with landslide process	Old	762181	9608873
337	Gully	1	1	Older than 1957	1	0		39591.1	Gully with landslide process	Old	762479	9609118
338	Gully	0	1	Older than 1957	1	0		18296.2	Gully with landslide process	Old	761511	9606652
339	Gully	0	1	Older than 1957	1	0		56290.1	Gully with landslide process	Old	761545	9606870
340	Flowslide	1	1	2012	1	0	Earth	24917	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773362	9610090
341	Rotational slide	1	1	2015	1	0		9393.34	Rock slide and rock avalanche	Recent	773481	9610087
342	Gully	1	0	2012	0	0	Earth	3940.59	Gully with landslide process	Recent	773436	9610277
343	Gully	1	0	2017	1	0		3164.63	Gully with landslide process	Recent	770960	9613050
344	Gully	1	1	2017	0	0		7157.59	Gully with landslide process	Recent	770837	9613611
345	Gully	1	1	2010	1	0		39899.7	Gully with landslide process	Recent	768825	9613283
346	Gully	1	1	2013	0	0	Debris	11734.2	Gully with landslide process	Recent	779379	9625756
347	Gully	1	0	2013	0	0	Debris	2816.51	Gully with landslide process	Recent	779688	9625727
348	Gully	1	1	2013	0	0	Debris	10520.9	Gully with landslide process	Recent	779671	9625574
349	Flowslide	1	0	2018	1	0		9057.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772863	9634225
350	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	8802.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763477	9615967
351	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0		8511.67	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763372	9616067
352	Rotational slide	1	1	2010	1	0	Debris	5430.82	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763336	9616154

353	Slide	1	1	2014	1	0		1398.34	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763194	9616107
354	Flowslide	1	1	2000-2006	1	0	Debris	4732.36	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763588	9616134
355	Gully	1	0	Older than 1957	1	0		1590.8	Gully with landslide process	Old	763221	9616018
356	Planar slide	1	0	2000-2006	1	0		1219.52	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763198	9615987
357	Gully	1	1	Older than 1957	1	0		27414.7	Gully with landslide process	Old	763169	9616015
358	Rotational slide	1	1	2012	1	0	Earth	3211.95	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763488	9616248
359	Planar slide	1	0	2010	1	0	Debris	3563.89	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763453	9616208
360	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	25085.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763551	9616373
361	Slide	1	1	2010	1	0	Debris	3104.92	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763978	9614286
362	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	1760.13	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763430	9613868
363	Rotational slide	1	0	2007	1	0	Earth	3137.49	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763631	9614563
364	Gully	1	1	1974-2000	1	0	Debris	23176	Gully with landslide process	Recent	774741	9626780
365	Debris flow	1	1	2019	1	0	Debris	4562.06	Debris flow	Recent	772297	9619824
366	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0		20670.8	Earthflow and slide - earthflow	Old	767714	9610144
367	Flowslide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	8461.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773644	9625120
368	Flowslide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	6754.71	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770227	9623762
369	Avalanche	1	0	2000-2006	1	0		489.114	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766435	9623573
370	Avalanche	1	0	2000-2006	1	0		410.402	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766453	9623577

371	Slide	1	1	2007	1	0		3701.47	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763300	9616645
372	Planar slide	1	1	2008	1	0	Debris	39011.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763428	9616614
373	Gully	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	9270.28	Gully with landslide process	Old	763494	9616758
374	Gully	1	0	Older than 1957	0	0		9211.49	Gully with landslide process	Old	763144	9617209
375	Flowslide	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	12883.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763434	9617311
376	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	27526	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763427	9617221
377	Rotational slide	1	1	2009	1	0	Earth	3831.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763840	9619090
378	Flowslide	1	1	2000-2006	1	0	Debris	3538.31	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763672	9619123
379	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		4337.47	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765716	9625351
380	Rotational slide	1	1	2009	1	0		1171.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765696	9625311
381	Rotational slide	0	1	Older than 1957	1	0		12458	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765671	9625668
382	Planar slide	0	1	Older than 1957	1	0		27747	Rock slide and rock avalanche	Old	764765	9614742
383	Slide	1	1	2007	1	0		12147.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764590	9614705
384	Rotational slide	1	1	2017	1	1	Debris	8692.92	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765213	9626917
385	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	1	Earth	35505.6	Rock slide and rock avalanche	Recent	765342	9620967
386	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	1		20886.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765614	9620737
387	Avalanche	1	1	2008	1	0	Debris	9339.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764831	9620807

388	Planar slide	1	1	2010	1	0	Debris		3955.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763553	9619868
389	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0			3227.78	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763974	9619721
390	Gully	1	1	Older than 1957	1	0			79765.4	Gully with landslide process	Old	764776	9622804
391	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris		5437.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764731	9622211
392	Slide	1	1	2011	1	0	Debris		1127.66	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764838	9622154
393	Slide	1	1	2009	1	0	Debris		759.324	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764890	9622147
394	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0			2119.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763987	9618923
395	Planar slide	1	1	2010	1	0			7026.26	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763890	9614190
396	Slide	1	1	2015	0	0	Debris		10906	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768839	9611380
397	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris		7934.07	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763328	9615980
398	Slide	1	1	2015	1	0	Debris		2472.48	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763316	9615985
399	Slide	1	1	2011	1	0	Earth		3604.98	Rock slide and rock avalanche	Recent	769783	9620207
400	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth		16945.5	Rock slide and rock avalanche	Old	770958	9619824
401	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris		71521.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	774774	9626505
402	Slide	1	1	2008	1	0			55998.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	762454	9615378
403	Rotational slide	1	1	2010	1	0	Debris		1868.97	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763143	9615260
404	Flowslide	1	1	2017	1	0			989.844	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770565	9613509

405	Planar slide	1	1	1	2017	1	0		399.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770526	9613523
406	Slide	1	1	1	2017	1	0		1859.17	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770457	9613514
407	Gully	1	0	0	2017	1	0		2717.34	Gully with landslide process	Recent	770692	9613477
408	Planar slide	1	1	1	2016	1	0		13069.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771080	9611594
409	Gully	1	0	0	2016	0	0		5457.94	Gully with landslide process	Recent	771005	9614279
410	Flowslide	1	1	1	2019	1	0		7266.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765058	9626897
411	Slide	1	1	1	2008	1	0		4630.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765001	9627035
412	Slide	0	1	Older than 1957		1	0	Earth	72933.7	Rock slide and rock avalanche	Old	775463	9635312
413	Flowslide	1	1	1	2007	1	0	Debris	4246.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	776086	9619183
414	Planar slide	1	1	1	2010	1	0		1169.29	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763516	9619936
415	Rotational slide	1	1	1	2010	1	0	Earth	377.198	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763508	9619983
416	Rotational slide	1	1	1	2014	1	0	Debris	2308.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763533	9620098
417	Rotational slide	1	1	1	1974-2000	1	0		7953.23	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764003	9619786
418	Gully	1	0	0	1974-2000	1	0	Earth	1244.84	Gully with landslide process	Recent	764079	9618760
419	Rotational slide	1	1	1	2013	1	0		14644.2	Rock slide and rock avalanche	Recent	763713	9603622
420	Flowslide	1	1	1	2000-2006	1	0	Debris	1319	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763966	9619766
421	Slide - earthflow	1	1	Older than 1957		1	0	Soil	494694	Earthflow and slide - earthflow	Old	765342	9620301
422	Rotational slide	0	1	Older than 1957		1	0		354947	Rock slide and rock avalanche	Old	766557	9602785

423	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		545950	Rock slide and rock avalanche	Old	764411	9602490
424	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		3347227	Rock slide and rock avalanche	Old	763806	9601513
425	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		381292	Rock slide and rock avalanche	Old	763689	9604021
426	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		443288	Rock slide and rock avalanche	Old	763347	9603299
427	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		661454	Rock slide and rock avalanche	Old	763331	9604863
428	Flowslide		1	1	Older than 1957		1	Earth	0		29190.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	762824	9605506
429	Earthflow		1	1	Older than 1957		1		0		91421.1	Earthflow and slide - earthflow	Old	769989	9611946
430	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		390258	Rock slide and rock avalanche	Old	771172	9616442
431	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		246220	Rock slide and rock avalanche	Old	770799	9615967
432	Avalanche		1	0	2014		1		0		1356.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775296	9636703
433	Flowslide		1	0	2009		1		0		29780.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774583	9636417
434	Gully		1	0	2012		1	Debris	0		2664.19	Gully with landslide process	Recent	774633	9637059
435	Avalanche		1	0	2012		0	Debris	0		1835.55	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774453	9637072
436	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		347783	Rock slide and rock avalanche	Old	772701	9624103
437	Mountain slope deformation		0	1	Relict		1	Debris	1		1059161	Mountain and rock slope deformation	Very old	773427	9628040
438	Slide		0	1	Relict		1		1		1201722	Rock slide and rock avalanche	Very old	768242	9624783
439	Slide		0	1	Older than 1957		0		0		91631.7	Rock slide and rock avalanche	Old	764065	9608917

440	Earthflow		0	1	Older than 1957		1		0		263090	Earthflow and slide - earthflow	Old	769154	9624536
441	Slide		0	1	Older than 1957		1	Earth	1		354928	Rock slide and rock avalanche	Old	771009	9622866
442	Rotational slide		0	1	Older than 1957		1	Earth	0		131393	Rock slide and rock avalanche	Old	771408	9622734
443	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		203322	Rock slide and rock avalanche	Old	769903	9621081
444	Flowslide		0	1	Older than 1957		1	Earth	0		65213	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	769717	9620894
445	Earthflow		1	1	Older than 1957		1		0		50619.6	Earthflow and slide - earthflow	Old	773915	9621734
446	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		136060	Rock slide and rock avalanche	Old	775232	9621987
447	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		485473	Rock slide and rock avalanche	Old	776008	9621468
448	Slide		1	1	Older than 1957		1		0		22690.6	Rock slide and rock avalanche	Old	775208	9620040
449	Flowslide		0	1	Older than 1957		1	Earth	0		365892	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	779893	9622604
450	Slide		0	1	2014		1		1		166415	Rock slide and rock avalanche	Old	773988	9625785
451	Earthflow		1	1	Older than 1957		1		0		181864	Earthflow and slide - earthflow	Old	776461	9625528
452	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		98865.2	Rock slide and rock avalanche	Old	775386	9625487
453	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		68894.7	Rock slide and rock avalanche	Old	775635	9625498
454	Slide		0	1	Older than 1957		0		0		221850	Rock slide and rock avalanche	Old	764857	9619104
455	Flowslide		0	1	Older than 1957		1		0		87085.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765206	9618675
456	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		76470.7	Rock slide and rock avalanche	Old	765083	9619662

457	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		69529.7	Rock slide and rock avalanche	Old	764809	9620538
458	Slide		1	1	Older than 1957		1		1		117798	Rock slide and rock avalanche	Old	779377	9634204
459	Rotational slide		1	1	Older than 1957		1		0	Earth	190687	Rock slide and rock avalanche	Old	779683	9632455
460	Slide		1	1	Older than 1957		1		0	Earth	355782	Rock slide and rock avalanche	Old	779657	9631473
461	Slide		1	1	Older than 1957		1		0		207614	Rock slide and rock avalanche	Old	781236	9631099
462	Slide		1	1	Older than 1957		1		0		208978	Rock slide and rock avalanche	Old	781977	9630606
463	Flowslide		1	1	Older than 1957		1		0		120601	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	781638	9629630
464	Flowslide		1	1	Older than 1957		1		0		120828	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	780992	9629428
465	Flowslide		1	1	Older than 1957		1		0	Earth	58626.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	781382	9628978
466	Rotational slide		1	1	Older than 1957		1		0		8170.79	Rock slide and rock avalanche	Old	763873	9608521
467	Earthflow		0	1	Older than 1957		1		0	Earth	235925	Earthflow and slide - earthflow	Old	764074	9606589
468	Avalanche		1	1	2010		1		1		9002.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769338	9612890
469	Gully		1	1	2015		1		0		4098.94	Gully with landslide process	Recent	769235	9613525
470	Rotational slide		1	1	Older than 1957		1		0	Debris	24266.8	Rock slide and rock avalanche	Old	768559	9613371
471	Slide		0	1	Older than 1957		1		1	Earth	80468.1	Rock slide and rock avalanche	Old	767806	9619954
472	Flowslide		1	1	2013		1		1	Earth	42050.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769825	9622918
473	Slide		1	1	2014		1		0	Earth	3721.32	Rock slide and rock avalanche	Recent	774735	9626310
474	Avalanche		0	1	Older than 1957		1		0	Rock	95630.1	Rock slide and rock avalanche	Old	774592	9627316

475	2014_events	1	1	1	2014	0	0	Earth	3039.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774597	9627799
476	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	330.905	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774603	9627842
477	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	312.454	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774561	9627850
478	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	338.228	Gully with landslide process	Recent	774708	9627798
479	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	356.943	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774727	9627780
480	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	1206.54	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774574	9627565
481	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	1178.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774591	9627617
482	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	1177.21	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774740	9627693
483	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	296.019	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774781	9627564
484	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	180.837	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774760	9627563
485	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	226.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774750	9627498
486	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	273.279	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774671	9627523
487	2014_events	1	0	0	2014	0	0	Debris	553.186	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774705	9627513
488	2014_events	1	0	0	2014	0	0		228.635	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774715	9627485
489	Rotational slide	1	1	1	1974-2000	1	0		2335.54	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773456	9622250
490	Slide	0	1	1	Older than 1957	1	0		176503	Rock slide and rock avalanche	Old	774836	9621543
491	Flowslide	1	1	1	2011	1	0		1024	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769502	9618484

492	Rotational slide	1	1	1	2010	1	1	Debris	6033.84	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764797	9615294
493	Rotational slide	1	1	1	2010	1	1	Debris	6289.86	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764731	9615278
494	Rotational slide	1	1	1	2013	1	0		7025.43	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763601	9610999
495	Flowslide	1	1	1	2013	1	0		1784.88	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766132	9609251
496	Gully	1	0	0	2013	0	0		2229.61	Gully with landslide process	Recent	766283	9609263
497	Gully	1	0	0	2012	0	0		1786.79	Gully with landslide process	Recent	766184	9608907
498	Avalanche	1	1	1	1974-2000	1	0	Debris	84459.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767847	9608056
499	Rotational slide	1	1	1	1974-2000	1	0		13227.3	Rock slide and rock avalanche	Recent	767650	9607756
500	Flowslide	1	0	0	2012	0	0	Debris	1759.08	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768548	9608273
501	Flowslide	1	0	0	2012	0	0	Debris	3907.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767672	9603506
502	Flowslide	1	1	1	1974-2000	1	0	Debris	19658.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766866	9602271
503	Flowslide	1	0	0	2016	0	0	Earth	4099.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768301	9610324
504	Slide	1	1	1	2009	1	0	Debris	60988.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766576	9612934
505	Gully	1	1	1	2000-2006	0	0		6295.96	Gully with landslide process	Recent	766292	9612968
506	Slide	1	1	1	2008	0	0		2646.06	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766408	9613020
507	Rotational slide	1	1	1	2000-2006	1	0		1998.66	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766442	9613092
508	Flowslide	1	1	1	2000-2006	1	0		9330.26	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766414	9612972
509	Flowslide	1	0	0	2010	1	0	Earth	3650.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769383	9612453

510	Rotational slide	1	1	2016	1	0		1038.33	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769380	9612074
511	Flowslide	1	0	2013	0	0		2121.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769657	9612033
512	Gully	1	0	2008	0	0		492.256	Gully with landslide process	Recent	771145	9613830
513	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	earth	14653	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	776631	9626144
514	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	8824.61	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766821	9625776
515	Slide	1	1	2000-2006	1	0	Debris	2277.62	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766897	9625762
516	Gully	1	1	Older than 1957	1	1	Debris	121911	Gully with landslide process	Old	765715	9625426
517	Slide	1	1	Older than 1957	0	0		9620.63	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765818	9625548
518	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	0		3386.18	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765579	9625770
519	Planar slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	4299.38	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765613	9625664
520	Flowslide	1	1	2012	1	0		5596.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765745	9625297
521	Slide	1	1	1974-2000	1	0		7156.98	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765636	9625256
522	Planar slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	6041.05	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765723	9625237
523	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	7785.22	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765189	9620694
524	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0		9293.96	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765089	9620753
525	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	14416.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765343	9620684
526	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0		11338.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765536	9620665

527	Flowslide	1	1	1	1974-2000	1	0	Earth	5184.97	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765339	9620813
528	Earthflow	1	1	1	1974-2000	1	1	Earth	152009	Earthflow and slide - earthflow	Recent	767061	9613684
529	Earthflow	1	1	1	1974-2000	1	1	Earth	55470	Earthflow and slide - earthflow	Recent	767713	9613574
530	Slide	1	1	1	2000-2006	1	1		8349.55	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767694	9613754
531	Gully	1	1	1	2007	1	1	Debris	12232	Gully with landslide process	Recent	767658	9613888
532	Flowslide	1	1	1	2015	0	0	Earth	8437.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766725	9615313
533	Slide	1	1	1	2014	1	0	Earth	18269	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768440	9619592
534	Flowslide	1	0	0	2007	0	0		3207.22	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767884	9619928
535	Flowslide	1	1	1	2007	1	0		2438.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767773	9619774
536	Earthflow	0	1	1	Older than 1957	1	1		184920	Earthflow and slide - earthflow	Old	768730	9619121
537	Planar slide	1	1	1	2008	1	0		15131.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765682	9621000
538	Gully	1	0	0	2010	1	0		1992.54	Gully with landslide process	Recent	765794	9621034
539	Slide	1	1	1	Older than 1957	1	0		18868.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763353	9616303
540	Flowslide	1	1	1	2012	0	0		3698.88	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763554	9616630
541	Slide	1	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	2187.95	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766078	9625594
542	Earthflow	0	1	1	Older than 1957	1	0		258376	Earthflow and slide - earthflow	Old	768136	9624959
543	Slide	1	1	1	2012	1	0	Earth	1124.87	Rock slide and rock avalanche	Recent	775452	9620108
544	Gully	1	1	1	2000-2006	0	0		5502.53	Gully with landslide process	Recent	766747	9602823
545	Flowslide	1	0	0	2000-2006	0	0		1361.16	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766803	9602728

546	Earthflow		0	1	Older than 1957	1	1		125697	Earthflow and slide - earthflow	Old	769319	9619311
547	Flowslide		1	1	1974-2000	1	0	Earth	5914.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767784	9629800
548	Slide		0	1	1974-2000	1	0	Debris	1369.66	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767595	9629480
549	Slide		1	0	1974-2000	1	1	Debris	1273.36	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767517	9629458
550	Gully		1	0	2014	1	0	Debris	2977.59	Gully with landslide process	Recent	768865	9629799
551	Avalanche		1	0	2018	0	0	Debris	3509.59	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769032	9629873
552	Slide		1	1	1974-2000	1	0	Debris	3737.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768696	9629769
553	Slide		1	1	1974-2000	1	1	Debris	5193.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768591	9629763
554	Gully		0	1	Older than 1957	1	1		29679.4	Gully with landslide process	Old	765019	9624991
555	Slide		0	1	Older than 1957	1	0		3131.38	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765057	9624942
556	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Debris	2575	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765187	9624944
557	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Debris	6182.88	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765659	9625685
558	Slide		0	1	Older than 1957	1	0	Debris	1915.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765502	9625813
559	Slide		0	1	Older than 1957	1	0	Debris	968.892	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765436	9625861
560	Slide		0	1	Older than 1957	1	0	Debris	601.435	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765461	9625839
561	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Debris	3051.38	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764896	9624266
562	Gully		0	0	2000-2006	1	0		878.895	Gully with landslide process	Recent	765481	9624506
563	Slide		1	1	2007	1	0	Debris	664.12	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764468	9622247

564	Slide	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	3358.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764523	9622141
565	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		3378.03	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764700	9622140
566	Slide	1	1	2007	1	0	Debris	795.92	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765186	9621972
567	Gully	1	0	2007	1	0		995.724	Gully with landslide process	Recent	764649	9620875
568	Gully	1	0	1974-2000	1	0		3573.71	Gully with landslide process	Recent	764545	9620844
569	Slide	1	1	2018	1	0	Debris	967.008	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764419	9620942
570	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	1458.51	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764379	9620933
571	Slide	1	1	2013	1	0	Debris	1351.32	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763662	9620980
572	Gully	1	0	1974-2000	0	0		519.84	Gully with landslide process	Recent	764433	9620782
573	Planar slide	1	1	2000-2006	1	0	Debris	2509.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763869	9620951
574	Slide	1	1	2008	1	0	Debris	2646.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763864	9620605
575	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	394.873	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763714	9620639
576	Slide	1	1	2018	1	0	Debris	210.516	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763634	9620685
577	Avalanche	1	1	1974-2000	1	0	Debris	161.247	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763615	9620691
578	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	4090.79	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763274	9619359
579	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	524.539	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763753	9619398
580	Gully	1	1	2000-2006	0	0	Debris	1062.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763853	9619354
581	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		68313.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763963	9619968

582	Rotational slide	1	1	2014	1	0	Debris	1760.88	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763430	9620090
583	Flowslide	1	1	2010	1	1	Debris	4121.84	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765225	9621402
584	Slide	1	1	Older than 1957	1	1	Earth	15863.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765283	9621548
585	Slide	1	1	2007	1	1	Earth	13975.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765348	9621404
586	Slide	1	1	2007	1	0		560.231	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763895	9621261
587	Slide	0	1	1974-2000	0	1		1468.71	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763876	9621336
588	Flowslide	1	1	2007	1	0		2567.96	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764806	9621703
589	Planar slide	1	1	2010	1	1	Debris	12844.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764930	9615248
590	Avalanche	1	1	2014	1	0	Debris	1617.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769066	9630829
591	Flowslide	1	0	2014	1	0	Debris	371.328	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770488	9631168
592	Gully	1	0	2014	0	1	Debris	3430.88	Gully with landslide process	Recent	768282	9630372
593	Gully	1	0	2018	0	0	Earth	521.473	Gully with landslide process	Recent	768287	9630235
594	Gully	1	0	2014	0	0	Debris	571.338	Gully with landslide process	Recent	768284	9630267
595	Earthflow	0	1	Older than 1957	0	0	Earth	15141.3	Earthflow and slide - earthflow	Old	775017	9626340
596	Earthflow	0	1	Older than 1957	0	0	Earth	19834.2	Earthflow and slide - earthflow	Old	774940	9626323
597	Debris flow	1	0	2014	1	0	Debris	1228.52	Debris flow	Recent	772322	9628590
598	Slide	1	0	2014	1	0	Debris	1280.29	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770777	9628913
599	Avalanche	1	0	2014	1	1	Debris	441.881	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770868	9628867
600	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	910.576	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771360	9628877

601	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1577.08	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771658	9628345
602	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	274.678	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771584	9628341
603	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	348.326	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771539	9628318
604	Rotational slide	1	1	2011	1	0	Debris	1924.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770769	9628060
605	Slide	1	1	2014	1	0	Debris	307.758	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770823	9628067
606	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	528.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771394	9628336
607	Slide	1	1	2014	0	0	Debris	1887.56	Rock slide and rock avalanche	Recent	774708	9626716
608	Avalanche	1	1	2014	1	0	Earth	2824.11	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775719	9627450
609	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	1		638347	Earthflow and slide - earthflow	Old	767677	9620658
610	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	1602.75	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769559	9623316
611	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0		19721.7	Earthflow and slide - earthflow	Old	770189	9624679
612	Rotational slide	1	1	2018	1	0	Debris	6349.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765930	9626289
613	Slide	1	1	2000-2006	1	0	Mud	3537.2	Rock slide and rock avalanche	Recent	770751	9620053
614	Rotational slide	1	1	2000-2006	0	0		2205.29	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764016	9620877
615	Avalanche	1	1	1974-2000	0	1		18649.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766344	9620644
616	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	13230.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765663	9622055
617	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		17881	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764090	9621992
618	Gully	1	1	Relict	1	0	Debris	139066	Gully with landslide process	Very old	764513	9621925

619	Gully	1	Older than 1957	1	1	1	24241.2	Gully with landslide process	Old	764191	9622023
620	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	1410.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764138	9622109
621	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	3012.09	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764202	9622103
622	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	2874.21	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764256	9622080
623	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	5912.23	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764317	9622069
624	Avalanche	1	2014	0	0	Debris	1804.33	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	776680	9621424
625	Avalanche	1	2014	1	0	Debris	4216.17	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775653	9621420
626	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	4979.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764746	9621983
627	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	7612	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764627	9621856
628	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	6003.64	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764507	9622012
629	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	11194.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764601	9621981
630	Slide	1	Older than 1957	1	0	Debris	17761.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764392	9621915
631	Avalanche	1	2014	1	0	Debris	775.309	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771238	9629355
632	Avalanche	1	2014	0	0	Debris	495.243	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771346	9629379
633	Avalanche	1	2014	0	0	Debris	631.523	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771383	9629378
634	Avalanche	1	2014	0	0	Debris	1414.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771265	9629502
635	Avalanche	1	2014	0	0	Debris	595.857	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771277	9629473

636	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	790.715	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771274	9629300
637	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	212.413	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771278	9629237
638	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	869.389	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771225	9629229
639	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	200.031	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771270	9629263
640	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1486.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771250	9629120
641	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	426.175	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771339	9629123
642	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1279.49	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771313	9629164
643	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	444.877	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771337	9629194
644	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	234.596	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771371	9629078
645	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1072.64	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771437	9629041
646	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1876.14	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771695	9629279
647	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	172.21	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771745	9629341
648	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	593.464	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771777	9629350
649	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1126.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772077	9629505
650	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	935.026	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772081	9629462
651	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	208.296	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772193	9629351
652	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	348.619	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772188	9629364

653	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1114.33	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772248	9629430
654	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	622.32	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772416	9629595
655	2014 events	1	0	2014	1	0	Debris	1429.14	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772432	9629654
656	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	351.305	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772414	9629702
657	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	508.82	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772370	9629716
658	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	365.916	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772299	9629875
659	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	578.884	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772165	9629938
660	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	388.883	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772172	9630033
661	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	269.261	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772040	9630094
662	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	699.371	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771730	9629839
663	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	435.29	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771876	9629715
664	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1877.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772107	9629718
665	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	717.299	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772167	9629830
666	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	593.03	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772025	9629644
667	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	270.13	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771996	9629615
668	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	655.934	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771814	9629731
669	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1102.32	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771799	9629684

670	Debris flow	1	0	2014	0	0	0	Debris	8282.49	Debris flow	Recent	772005	9629590
671	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	2326.36	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771926	9629636
672	Avalanche	1	0	2014	1	0	0	Debris	474.908	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772481	9629350
673	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	972.817	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772909	9629532
674	Flowslide	0	1	2014	1	0	0	Earth	65373.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772799	9630073
675	Flowslide	0	1	Older than 1957	1	0	0	Debris	31606.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	772502	9630266
676	Avalanche	1	1	2014	1	0	0	Debris	879.033	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772111	9630482
677	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	234.217	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771659	9630307
678	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	219.712	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771470	9630455
679	Avalanche	1	0	2014	1	0	0	Debris	165.704	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771173	9630589
680	Avalanche	1	0	2014	1	0	0	Debris	280.507	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771210	9630588
681	Avalanche	1	0	2014	1	0	0	Debris	227.096	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771256	9630568
682	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	286.498	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770985	9630399
683	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	188.974	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770968	9630543
684	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	148.008	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770881	9630623
685	Rotational slide	1	0	2014	1	0	0	Debris	716.369	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770988	9630722
686	Avalanche	1	0	2014	0	0	0	Debris	2416.22	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770651	9628826

687	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	641.955	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771510	9628391
688	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	569.838	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771438	9628411
689	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	429.256	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771407	9628391
690	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	488.887	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771470	9628370
691	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1103.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771356	9628369
692	Flowslide	1	0	1974-2000	0	0	Debris	1996.83	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770748	9627843
693	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		120625	Rock slide and rock avalanche	Old	773645	9628308
694	Slide	0	1	2014	1	0	Earth	11326.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774001	9628199
695	Slide	1	1	2014	1	0	Earth	822.891	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774112	9628159
696	Slide	1	0	2014	1	0	Earth	483.834	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774111	9628130
697	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1412.08	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774339	9628401
698	Flowslide	1	0	2014	1	0	Debris	2290.28	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772190	9628505
699	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	700.857	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772181	9628587
700	Slide	1	0	2014	0	0	Debris	927.806	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772370	9628502
701	Slide	1	0	2014	1	0	Debris	546.806	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772290	9628516
702	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	619.192	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772530	9628471
703	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	443.357	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772051	9628994

704	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	189.977	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772103	9628981
705	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	538.351	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771873	9629093
706	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	128.076	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771861	9629048
707	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1256.42	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771841	9628994
708	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	335.461	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772065	9629068
709	Planar slide	1	1	2014	1	0	Debris	3808.26	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770424	9629400
710	Rotational slide	1	1	2014	1	0	Debris	2398.34	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770476	9629323
711	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1259.71	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769812	9628394
712	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	799.51	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771851	9627536
713	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1572.69	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771785	9627621
714	Slide	1	0	2014	1	0		563.228	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772825	9627407
715	Slide	1	0	2014	1	0		186.064	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772747	9627340
716	Avalanche	1	0	2014	0	0		149.406	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772824	9627349
717	Avalanche	1	0	2014	0	0		291.078	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772781	9627236
718	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	231377	Earthflow and slide - earthflow	Old	773701	9623506
719	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1362.17	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	776388	9623339
720	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	379.346	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	777324	9620712

721	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	282.121	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	777129	9620699
722	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1038.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	776719	9622027
723	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	121687	Earthflow and slide - earthflow	Old	771776	9618976
724	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0		82458.2	Earthflow and slide - earthflow	Old	771131	9619139
725	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	156106	Earthflow and slide - earthflow	Old	770221	9625425
726	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	earth	71480.1	Rock slide and rock avalanche	Old	771444	9626208
727	Avalanche	1	0	2014	0	0		831.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771547	9626410
728	Slide	1	0	2014	1	0	Debris	2526.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771869	9626285
729	Slide	1	0	2014	1	0		1398.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771799	9626242
730	Avalanche	1	0	2014	1	0		2397.24	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771651	9626654
731	Avalanche	1	0	2014	0	0		821.804	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771596	9626586
732	Slide	1	1	2014	0	0		166.619	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771751	9626163
733	Avalanche	1	0	2014	0	0		1204.63	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770815	9626446
734	Avalanche	1	0	2014	0	0		227.573	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770627	9626488
735	Avalanche	1	0	2014	0	0		500.249	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770589	9626425
736	Avalanche	1	0	2014	0	0		641.476	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771037	9626410
737	Avalanche	1	0	2014	0	0		826.957	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771170	9626591

738	Slide	1	1	2000-2006	1	0	7717.24	Rock slide and rock avalanche	Recent	768413	9617392
739	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	55463.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	770551	9631375
740	Avalanche	1	0	2014	0	0	467.514	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770673	9631131
741	Slide avalanche	1	1	2014	0	1	10275.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774409	9632034
742	Slide avalanche	1	1	2014	0	1	14352.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774264	9632029
743	Avalanche	1	0	2014	0	0	457.805	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775104	9636687
744	Avalanche	1	0	2014	0	0	186.342	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775134	9636702
745	Avalanche	1	0	2014	1	0	393.93	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775067	9636905
746	Avalanche	1	0	2014	1	0	306.325	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774990	9636923
747	Avalanche	1	0	2014	1	0	1247.31	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774150	9637326
748	Avalanche	1	0	2014	0	0	3058.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773546	9637162
749	Avalanche	1	0	2014	0	0	6853.35	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774904	9635679
750	Avalanche	1	0	2014	0	0	1488.93	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775049	9635494
751	Avalanche	1	0	2014	0	0	343.478	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774972	9635202
752	Avalanche	1	0	2014	0	0	164.197	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774965	9635168
753	Avalanche	1	0	2014	0	0	124.205	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774950	9635147
754	Avalanche	1	1	2014	1	0	5657.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774937	9635051

755	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1989.02	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775007	9635092
756	Avalanche	1	1	2014	0	0	Debris	2021.65	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774871	9635103
757	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	739.053	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775053	9635017
758	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	1962.12	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775130	9635021
759	Avalanche	1	1	2014	1	0	Debris	2985.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775311	9635069
760	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	789.325	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775440	9634964
761	Avalanche	1	1	2014	1	0		6647.87	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775414	9634776
762	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	326.427	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775716	9634876
763	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	985.094	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775516	9635358
764	Avalanche	1	1	2014	0	0	Debris	2120.49	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775538	9635325
765	Avalanche	1	1	2014	0	0	Debris	800.42	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775549	9635286
766	Avalanche	1	1	2014	0	0	Debris	1874.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775559	9635247
767	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	302.841	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775542	9635143
768	Avalanche	1	1	2014	0	0	Debris	1116.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775584	9635179
769	Avalanche	1	0	2013	1	0	Debris	274.105	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	776257	9634517
770	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	2104.46	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	778635	9634333
771	Slide	1	1	2014	1	0	Earthflow	806.092	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	778637	9634291

772	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	2148.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773749	9635815
773	Slide	1	1	2014	1	0	Debris	2655.57	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773946	9632517
774	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	979.972	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774688	9635351
775	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	2781.41	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774012	9635416
776	Avalanche	1	1	2014	0	0	Debris	9000.23	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774173	9635417
777	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	1422.23	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774177	9635342
778	Avalanche	0	0	2014	0	0		1939.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774526	9628925
779	Avalanche	0	0	2014	0	0		149.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774166	9629133
780	Avalanche	1	0	2014	0	0		920.452	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773533	9629498
781	Avalanche	1	0	2014	0	0	Debris	174.853	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771926	9630218
782	Avalanche	1	0	2014	0	0		421.076	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770953	9626690
783	Avalanche	1	0	2014	0	0		197.025	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771026	9626659
784	Avalanche	1	0	2014	0	0		817.515	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771093	9626670
785	Slide - earthflow	0	1	Older than 1957	1	0		165115	Earthflow and slide - earthflow	Old	771965	9626443
786	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		62370.4	Rock slide and rock avalanche	Old	772340	9625819
787	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	84757.8	Rock slide and rock avalanche	Old	772539	9625936
788	Avalanche	1	1	2014	1	0	Debris	1758.31	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	775899	9622006

789	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	127547	Earthflow and slide - earthflow	Old	772189	9609953
790	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	268208	Earthflow and slide - earthflow	Old	770778	9610591
791	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	340947	Rock slide and rock avalanche	Old	771019	9607167
792	Slide	1	1	2000-2006	1	0	Earthflow	18396.7	Rock slide and rock avalanche	Recent	768930	9607967
793	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	126654	Rock slide and rock avalanche	Old	767772	9607450
794	Avalanche	0	1	Older than 1957	0	0	Earth	15043.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	767898	9606923
795	Slide	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	216509	Rock slide and rock avalanche	Old	766584	9606282
796	Slide	1	1	2014	1	0	Earth	1443.32	Rock slide and rock avalanche	Recent	766783	9605915
797	Avalanche	1	1	2014	1	0	Earth	886.029	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766715	9605929
798	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	51072	Rock slide and rock avalanche	Old	769156	9605280
799	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	113551	Earthflow and slide - earthflow	Old	770036	9606264
800	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	100499	Rock slide and rock avalanche	Old	771061	9606603
801	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	110097	Earthflow and slide - earthflow	Old	771044	9606050
802	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	128727	Earthflow and slide - earthflow	Old	766895	9604016
803	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	170864	Rock slide and rock avalanche	Old	766706	9604865
804	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	32859.5	Rock slide and rock avalanche	Old	771152	9608068
805	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	108482	Earthflow and slide - earthflow	Old	765616	9610533
806	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	179344	Earthflow and slide - earthflow	Old	765122	9610643

807	Slide		0	1	Older than 1957		1		0		52175	Rock slide and rock avalanche	Old	765186	9611497
808	Slide		0	1	Older than 1957		1	Earth	0		77662	Rock slide and rock avalanche	Old	764121	9609673
809	Planar slide		1	1	2012		1	Debris	0		10506.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764165	9609560
810	Earthflow		0	1	Older than 1957		1	Earthflow	0		184170	Earthflow and slide - earthflow	Old	768567	9603654
811	Avalanche		1	0	2014		1	Earth	0		2541.63	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766427	9601738
812	Earthflow		0	1	Older than 1957		1	Earth	0		130923	Earthflow and slide - earthflow	Old	770112	9624315
813	Avalanche		1	0	2014		1	Earth	0		3694.09	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770732	9624610
814	Earthflow		0	1	Older than 1957		1	Earth	0		324936	Earthflow and slide - earthflow	Old	773007	9626237
815	Gully		0	0	1974-2000		0		0		3823.67	Gully with landslide process	Recent	772774	9626258
816	Slide		0	1	Older than 1957		1	Earth	0		266608	Rock slide and rock avalanche	Old	773113	9626607
817	Flowslide		1	0	2013		0	Debris	0		1664.76	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773387	9626641
818	Flowslide		1	1	2011		0	Debris	1		4737.45	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771439	9625167
819	Flowslide		1	1	1974-2000		0	Debris	0		3178.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771480	9624601
820	Flowslide		1	1	Older than 1957		1	Earth	0		10215.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	772408	9624258
821	Flowslide		1	1	Older than 1957		0	Debris	0		47336.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	767189	9616344
822	Slide		1	1	Older than 1957		1	Earth	0		26505.7	Rock slide and rock avalanche	Old	767099	9617076
823	Flowslide		1	1	2015		1	Debris	0		12363.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764095	9615170

824	Avalanche	1	1	2013	0	0	Earthflow	6485.96	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768612	9612913
825	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	403.248	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768723	9613010
826	Slide	1	1	2008	1	0	Debris/rock	11949.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768768	9613224
827	Avalanche	1	1	2008	1	0	Debris/rock	3278.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768843	9613193
828	Avalanche	1	1	2014	1	0	Debris	1485.01	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768638	9613238
829	Flowslide	1	0	2013	0	0	Earth	2221.89	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768270	9612850
830	Earthflow	0	1	Older than 1957	1	1	Earth	88096.5	Earthflow and slide - earthflow	Old	768148	9612636
831	Slide	0	1	Older than 1957	0	0	earth	8019.17	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764668	9616916
832	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	3978.19	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764379	9617024
833	Slide	1	1	2010	0	0	Debris	317.873	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763853	9618117
834	Slide	1	1	2018	1	0	Debris	430.314	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763791	9618081
835	Slide	1	1	2008	1	0	Debris	202.954	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763781	9618107
836	Slide	1	1	2011	1	1	Debris	5817.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765935	9614860
837	Slide	1	1	2013	1	1	Debris	12278.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765966	9614830
838	Flowslide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	35273.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765688	9614099
839	Rotational slide	1	1	2017	1	0	Earth	1800.61	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765426	9614164
840	Slide	1	1	2010	1	0	Earth	568.311	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764591	9613525

841	Slide	1	1	1	1974-2000	1	0	Debris		106.497	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765301	9612367
842	Slide	1	1	1	2013	1	0	Earth		538.947	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765284	9612365
843	Slide	1	1	1	2013	0	0			1552.23	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765199	9612515
844	Avalanche	1	0	0	2013	0	0	Earth		924.463	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765186	9612472
845	Slide	1	1	1	2013	1	0	Earth		2340.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763909	9614351
846	Slide	0	1	1	Older than 1957	1	0	Earth		15378.1	Rock slide and rock avalanche	Old	764054	9614203
847	Slide	1	1	1	2007	1	0	Earth		7996.11	Rock slide and rock avalanche	Recent	763815	9613952
848	Rotational slide	1	1	1	2007	1	0	Debris		10663.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763791	9614055
849	Slide	1	1	1	1974-2000	1	0	Debris		1318.56	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765528	9622173
850	Slide	1	1	1	2007	1	0	Debris		2686.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765589	9622150
851	Slide	1	1	1	2000-2006	1	0	Debris		560.154	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764776	9622145
852	Slide	1	1	1	1974-2000	1	0	Debris		1327.91	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764824	9622130
853	Flowslide	1	0	0	2007	0	1	Earth		8983.65	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766519	9621423
854	Rotational slide	1	1	1	2016	1	0	Debris		2502.15	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763032	9615443
855	Slide	1	1	1	1974-2000	0	0	Earth		1591.31	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768142	9612818
856	Slide	1	1	1	1974-2000	1	0	Debris		567.187	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763424	9618779
857	Slide	1	1	1	2012	1	0	Earth		1045.66	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763621	9618531

858	Slide		0	1	2019	1	0	Earth	2641.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763583	9618531
	Mountain slope deformation									Mountain and rock slope deformation	Very old		
859			0	1	Relict	1	1		8950633			768337	9614890
					Older than 1957								
860	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Earth	521342	Rock slide and rock avalanche	Old	766625	9614988
861	Slide		1	1	Older than 1957	1	0	Earth	47922.8	Rock slide and rock avalanche	Old	766639	9614690
862	Gully		1	0	2009	1	0		2933.63	Gully with landslide process	Recent	766393	9614816
										Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent		
863	Flowslide		1	1	2015	1	0	Debris	8507.69			766725	9615313
					Older than 1957								
864	Earthflow		0	1	Older than 1957	1	0	Earthflow	244423	Earthflow and slide - earthflow	Old	768225	9614921
865	Gully		1	1	2014	1	0		30529	Gully with landslide process	Recent	768211	9614893
866	Rotational slide		1	1	2014	1	0	Earth	30309	Rock slide and rock avalanche	Recent	767769	9614342
					Older than 1957								
867	Slide		0	1	Older than 1957	1	0		134299	Rock slide and rock avalanche	Old	768556	9614502
868	Slide		1	1	2008	1	0	Debris	91133.1	Rock slide and rock avalanche	Recent	768881	9614986
869	Flowslide		1	1	1974-2000	1	0	Debris	56274.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769230	9615237
					Older than 1957								
870	Slide		0	1	Older than 1957	1	1		353004	Rock slide and rock avalanche	Old	769899	9614479
871	Flowslide		1	1	Older than 1957	1	0		58829.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	769137	9613935
					Older than 1957								
872	Flowslide		1	1	Older than 1957	1	0		29271.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	769776	9613904
					Older than 1957								
873	Flowslide		1	1	Older than 1957	1	0		14885	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	769581	9613504
874	Flowslide		1	1	2016	1	0		3060.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770193	9613359
875	Slide		1	1	2012	1	0	Debris	991.436	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763896	9618033

876	Slide	1	1	2012	1	0	Debris	490.548	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763863	9618064
877	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	9662.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763839	9619451
878	Rotational slide	1	1	2008	1	0	Earth	4008.25	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764993	9615326
879	Rotational slide	1	1	2010	1	0	Earth	2532.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764899	9615331
880	Slide	1	1	2008	1	0	Debris	3625.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766622	9612939
881	Slide	0	0	2013	1	0		1486.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768199	9613361
882	Slide	0	0	2008	1	0		4527.61	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768137	9613287
883	Gully	0	0	2010	0	0		427.31	Gully with landslide process	Recent	767825	9613688
884	Gully	1	0	2018	0	1		877.767	Gully with landslide process	Recent	767823	9613541
885	Slide	0	0	1974-2000	1	0		757.904	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768226	9613488
886	Gully	0	0	2008	1	1		5464.8	Gully with landslide process	Recent	768044	9612979
887	Rotational slide	1	1	2010	1	0	Debris	12717.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763088	9615294
888	Slide	1	1	2000-2006	1	0		1197.06	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764063	9614252
889	Slide	1	1	2000-2006	1	0		1083.67	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764196	9614235
890	Slide	0	1	2008	1	0		1404.83	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766526	9613115
891	Avalanche	1	1	2018	0	0	Debris	2335.14	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765321	9612517
892	Gully	1	1	2014	0	0		1390.17	Gully with landslide process	Recent	765413	9612381
893	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	3895.73	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	767814	9610518
894	Rotational slide	1	1	2016	1	0	Earth	2057.49	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767823	9610575

895	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		3023.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763897	9619740
896	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		4802.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763820	9619779
897	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		5350.98	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763756	9619782
898	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		8339.25	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764478	9621847
899	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		10579.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764551	9621827
900	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		13931	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766159	9625451
901	Debris flow	0	1	2018	1	0		26745.6	Debris flow	Recent	761891	9615047
902	Planar slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	6121.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772545	9623457
903	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	18528.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765744	9625465
904	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		75795	Rock slide and rock avalanche	Old	769040	9624432
905	Slide	0	1	2000-2006	1	0		5813.24	Rock slide and rock avalanche	Recent	769160	9624444
906	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0		3878.69	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764998	9623751
907	Slide	1	1	2009	1	0		3945.88	Rock slide and rock avalanche	Recent	776017	9627173
908	Gully	1	1	Older than 1957	0	0	Mud	36462.8	Gully with landslide process	Old	763291	9618171
909	Rotational slide	1	1	2000-2006	1	0	Debris	1225.15	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763480	9618174
910	Planar slide	1	1	2017	1	0	Debris	1070.84	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763502	9618220
911	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	16656.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763640	9617857
912	Slide	1	0	2012	1	0		839.06	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772789	9623614

913	Avalanche	1	1	2000-2006	1	0	Debris	3208.63	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763268	9603630
914	Slide	1	1	2000-2006	1	0		3239.09	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768028	9625124
915	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	1433.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764603	9621835
916	Slide	1	1	2010	1	0	Earth	832.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767850	9613725
917	Slide	1	1	2012	1	0	Earth	2102.32	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766108	9623748
918	Flowslide	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	4839.07	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	772755	9610806
919	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		2327.34	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764108	9622391
920	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		2215.47	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764037	9622405
921	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1479.68	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766068	9625800
922	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	10227	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765993	9625776
923	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	1355.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765998	9625678
924	Slide	1	1	2000-2006	0	0		540.802	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766178	9625621
925	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	3779.98	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765991	9625623
926	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	1845.76	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765998	9625634
927	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		908.664	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766024	9625875
928	Slide	1	1	2000-2006	1	0		486.307	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766919	9625808
929	Slide	1	1	1974-2000	1	0		1195.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766842	9625713

930	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		12889	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766093	9625720
931	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		4874.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766154	9625662
932	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		3273.44	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766052	9625622
933	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1572.24	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766012	9625938
934	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	8376.03	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766852	9626035
935	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0		1726.87	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765750	9625148
936	Rotational slide	1	1	2000-2006	1	0		707.483	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765749	9625116
937	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	7856.13	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766056	9624202
938	Planar slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	1218.15	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765743	9624351
939	Rotational slide	1	1	2014-2016	0	1	Earth	37763.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767414	9621027
940	Slide	1	1	2009	1	0	Debris	4977.59	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764930	9627059
941	Slide	1	1	2007	1	0	Debris	3187.31	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764983	9626979
942	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Debris	3865.97	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764687	9627071
943	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	2315.13	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764375	9622041
944	Gully	1	1	2000-2006	1	0	Earth	36195.3	Gully with landslide process	Recent	765144	9614187
945	Slide	0	1	2010	1	0		3847.18	Rock slide and rock avalanche	Recent	765136	9614185
946	Slide	1	1	2014	1	0		827.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765069	9614096
947	Slide	1	1	2014	1	0		629.387	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765042	9614072

948	Slide	1	1	2014	1	0		759.951	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765030	9614092
949	Slide	1	1	2014	1	0		574.638	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765018	9614061
950	Flowslide	1	1	2008	1	0	Debris	6631.79	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764319	9614734
951	Rotational slide	1	1	2008	1	0	Earth	8032.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764319	9614613
952	Rotational slide	1	1	2014	1	0	Earth	4340.59	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764316	9614512
953	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		3240.53	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764444	9622866
954	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		2101.36	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764381	9622861
955	Rotational slide	1	1	1974-2000	0	0	Earth	17076.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765120	9620219
956	Slide	1	1	1974-2000	1	0		3925.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764850	9623832
957	Slide	1	1	1974-2000	0	0	debris	2215.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764912	9623778
958	Avalanche	1	0	2014	1	0	Debris	648.369	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774854	9635340
959	Flowslide	1	0	2014	0	0		1567.12	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768799	9616207
960	Flowslide	1	1	2015	1	0	Debris	9078.22	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769979	9619056
961	Slide	1	1	2010	1	0	Earth	1049.14	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763509	9618709
962	Flowslide	1	1	2015	1	1	Debris	7691.45	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763367	9615432
963	Flowslide	1	0	2010	1	0	Debris	1035.93	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765117	9615266
964	Slide	1	1	2012	1	0		419.469	Rock slide and rock avalanche	Recent	775483	9625742

965	Flowslide	1	1	2011	0	0	Debris	2324.54	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772297	9627712
966	Slide	1	1	2007	1	0	Earth	33580.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772151	9626917
967	Flowslide	1	0	2009	0	0	Debris	1505.68	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	773254	9626682
968	Flowslide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	13541.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	772632	9626540
969	Rotational slide	0	1	2007	1	0	Debris	70228.2	Rock slide and rock avalanche	Old	771261	9625815
970	Avalanche	1	1	Older than 1957	1	0		21665.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	775446	9624234
971	Rotational slide	1	1	2008	0	1	Earth	5566.91	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770823	9622879
972	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	2576.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765555	9625721
973	Gully	0	1	Older than 1957	1	0	Debris	7550.15	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	765440	9625836
974	Gully	1	1	Older than 1957	1	0		222983	Gully with landslide process	Old	766479	9625735
975	Slide	1	1	2014	1	0		4249.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763696	9611017
976	Slide	1	1	1974-2000	1	0		34439.5	Rock slide and rock avalanche	Recent	766855	9614692
977	Slide	1	1	2009	1	0		1059.47	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763722	9618507
978	Gully	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	30537.9	Gully with landslide process	Old	763282	9617928
979	Slide	1	1	2013	1	0	Mud	2017.55	Rock slide and rock avalanche	Recent	770651	9620085
980	Flowslide	1	1	2010	1	0		9247.78	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765658	9620997
981	Slide	1	0	2012	0	0		1753.67	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763883	9618010
982	Slide	1	1	2012	1	0		1092.26	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764894	9620799

983	Gully	1	0	2010	1	0		196.46	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764785	9622118
984	Slide	0	0	1974-2000	0	0		957.033	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770794	9627862
985	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		13763.3	Rock slide and rock avalanche	Old	775476	9625779
986	Avalanche	1	1	2009	1	0		5737.95	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774906	9636225
987	Slide	1	1	Older than 1957	0	0		1100.24	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764811	9621948
988	Gully	0	1	Older than 1957	1	0		14879.5	Gully with landslide process	Old	763699	9620497
989	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		778.223	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766253	9626189
990	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0		9778.86	Earthflow and slide - earthflow	Old	766160	9626245
991	Flowslide	1	1	2017	1	1	Debris	3326.03	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766133	9626280
992	Mountain slope deformation	0	1	Relict	1	1	Earth	8842302	Mountain and rock slope deformation	Very old	768522	9626718
993	Slide	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	245260	Rock slide and rock avalanche	Old	769265	9627339
994	Gully	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	35989.3	Gully with landslide process	Old	766855	9626695
995	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	7114.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766893	9626823
996	Planar slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	11237	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766819	9626578
997	Rotational slide	1	1	1974-2000	1	0	Mud	6200.14	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766696	9626494
998	Slide	1	1	1974-2000	1	0	Earth	1060.27	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766602	9626439
999	Gully	0	1	Older than 1957	1	0	Earth	17350.2	Gully with landslide process	Old	766533	9626644

1000	Planar slide	1	1	Older than 1957	1	0	Mud	16415.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	767217	9626065
1001	Flowslide	1	1	2007	1	0	Debris	1148.25	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766747	9626232
1002	Flowslide	1	1	2007	1	0	Debris	2026.25	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766650	9626272
1003	Flowslide	1	1	2008	1	0	Debris	1156.65	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766700	9626233
1004	Slide	1	1	2014	1	0		730.78	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769577	9625678
1005	Slide	1	1	2011	1	0		5756.77	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769493	9625705
1006	Slide	1	1	2017	1	0	Debris	6403.54	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767450	9627584
1007	Gully	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	3402.96	Gully with landslide process	Old	767203	9627497
1008	Gully	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	1607.25	Gully with landslide process	Old	767255	9627525
1009	Gully	1	0	Older than 1957	1	0		11110.2	Gully with landslide process	Old	767392	9627905
1010	Gully	1	1	Older than 1957	0	0	Debris	2778.13	Gully with landslide process	Old	767346	9627680
1011	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	2985.01	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766779	9626703
1012	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	6619.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766844	9626694
1013	Gully	1	1	2010	0	0	Earth	17435.8	Gully with landslide process	Recent	767716	9612831
1014	Earthflow	1	1	Older than 1957	1	0		340048	Earthflow and slide - earthflow	Old	768509	9624709
1015	Gully	1	1	1974-2000	1	0		27571.9	Gully with landslide process	Recent	768479	9624650
1016	Avalanche	1	0	2007	0	0	Debris	423.843	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768624	9624395
1017	Rotational slide	1	1		1	0		7252.36	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764407	9627244

1018	Rotational slide	1	1				1	0	28073.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764686	9627182
1019	Rotational slide	1	1				1	0	11339.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764485	9627278
1020	Rotational slide	1	1				1	0	4641.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764828	9627019
1021	Rotational slide	1	1				1	0	4496.67	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765247	9626749
1022	Rotational slide	1	1				1	0	21888.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766070	9626380
1023	Rotational slide	1	1				1	0	3217.98	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766196	9626388
1024	Slide	1	1				1	0	1510.52	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766354	9626344
1025	Rotational slide	1	1				1	0	9066.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766890	9626200
1026	Gully	1	1				0	0	8615.96	Gully with landslide process	Recent	766819	9626395
1027	2014_events	1	0				1	0	1096.41	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767097	9626884
1028	2014_events	1	0				1	0	942.329	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767139	9626866
1029	2014_events	1	0				1	0	7232.38	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766948	9626906
1030	2014_events	1	0				0	0	2186.7	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767203	9627186
1031	2014_events	1	0				1	0	1078.18	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767333	9626925
1032	2014_events	1	0				1	0	2852.42	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766884	9626761
1033	Flowslide	1	0				0	0	17267	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767394	9625362
1034	Rotational slide	0	1				1	0	3505.36	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766854	9624731

1035	Rotational slide	1	1			1	0	debris	2425.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766818	9624806
1036	Slide	1	0			1	0		3053.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765358	9626654
1037	2014 events	1	0			0	0		4254.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769104	9629498
1038	Slide	1	0			1	0		1757.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770160	9629679
1039	Slide	1	0			1	0		972.768	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770131	9629649
1040	2014 events	1	0			1	0		1719.96	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770325	9629514
1041	Slide	1	0			1	0		246.59	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770273	9629525
1042	2014 events	1	0			1	0		616.958	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770309	9629489
1043	2014 events	1	0			1	0		1033.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770437	9629436
1044	2014 events	1	0			0	0		495.783	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770479	9629238
1045	2014 events	1	0			0	0		119.813	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770493	9629251
1046	2014 events	1	0			0	0		531.136	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770501	9629215
1047	2014 events	1	0			0	0		107.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770511	9629173
1048	2014 events	1	0			1	0		335.254	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771092	9629506
1049	2014 events	1	0			1	0		460.501	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771125	9629469
1050	2014 events	1	0			1	0		176.826	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771093	9629540
1051	2014 events	1	0			1	0		688.839	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770871	9629738

1052	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770855	9629843
1053	Earthflow	1	0			0	0		Earthflow and slide - earthflow	Recent	770727	9629788
1054	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770095	9630529
1055	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770157	9630462
1056	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770145	9630504
1057	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768892	9630848
1058	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768991	9630888
1059	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769043	9630887
1060	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769147	9631210
1061	2014_events	1	0			0	1		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769118	9631148
1062	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769204	9631132
1063	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769309	9631056
1064	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769227	9631120
1065	2014_events	1	0			0	1		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769089	9631166
1066	2014_events	1	0			0	1		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769155	9631137
1067	2014_events	1	0			0	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769132	9631097
1068	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769264	9631076

1069	2014_events	1	0			1	0		249.708	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769252	9631092
1070	2014_events	1	0			1	0		270.393	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769334	9631067
1071	2014_events	1	0			1	0		558.298	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769260	9631109
1072	2014_events	1	0			1	0		359.906	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769437	9631004
1073	2014_events	1	0			1	0		280.197	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769410	9631016
1074	2014_events	1	0			1	0		71.1943	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769388	9631034
1075	2014_events	1	0			1	0		181.365	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769371	9631035
1076	2014_events	1	0			1	0		100.652	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769360	9631050
1077	2014_events	1	0			1	0		81.7759	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769331	9631045
1078	2014_events	1	0			1	0		129.055	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769353	9631040
1079	2014_events	1	0			1	0		2921.75	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769055	9631416
1080	2014_events	1	1			1	0		4880.89	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769039	9631380
1081	2014_events	1	0			0	0		505.296	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769343	9631347
1082	2014_events	1	0			0	1		839.793	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769313	9631463
1083	2014_events	1	0			1	1		1371.99	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769511	9631533
1084	2014_events	1	0			1	0		191.212	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769044	9631714
1085	2014_events	1	0			1	0		160.773	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769019	9631715

1086	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768916	9631720
1087	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768957	9631648
1088	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768962	9631769
1089	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768947	9631744
1090	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769337	9631861
1091	Rotational slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769202	9631928
1092	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769155	9632040
1093	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769398	9631788
1094	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769311	9631854
1095	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769278	9631880
1096	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769383	9631816
1097	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769225	9631976
1098	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769268	9631924
1099	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769842	9631858
1100	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769811	9631891
1101	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769853	9631923
1102	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769911	9631850

1103	2014_events	1	0				1	0		876.481	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770687	9631783
1104	2014_events	1	0				1	0		1096.46	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770655	9631817
1105	2014_events	1	0				1	1		1194.63	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770621	9631845
1106	2014_events	1	0				0	1		556.252	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770571	9631859
1107	Rotational slide	1	1				1	0		12040.1	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770892	9632288
1108	2014_events	1	0				1	1		4686	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770826	9632177
1109	2014_events	1	0				0	1		764.346	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771135	9632327
1110	2014_events	1	0				0	1		695.811	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771068	9632350
1111	2014_events	1	0				0	1		849.336	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771030	9632385
1112	2014_events	1	0				0	1		783.146	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770981	9632455
1113	2014_events	1	0				1	1		513.082	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771195	9632287
1114	2014_events	1	0				0	1		722.889	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771044	9632126
1115	2014_events	1	0				0	1		786.044	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770961	9632096
1116	2014_events	1	0				0	1		654.715	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770918	9632107
1117	2014_events	1	0				1	0		439.828	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771205	9632255
1118	Avalanche	1	0				0	1		1782.87	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772076	9632698
1119	2014_events	1	0				0	1		1733.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772259	9632590

1120	2014_events	1	0			0			829.813	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771564	9632706
1121	2014_events	1	0			0			612.093	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	772120	9632870
1122	2014_events	1	1			1			5073.24	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770108	9631751
1123	2014_events	1	0			1			5246.68	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770017	9631718
1124	2014_events	1	0	2014		0			849.303	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770268	9631557
1125	2014_events	1	0			0			436.916	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770232	9631589
1126	2014_events	1	0			1			477.324	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770738	9630932
1127	2014_events	1	0			1			677.268	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770707	9630965
1128	2014_events	1	0			1			3597.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770656	9631079
1129	2014_events	1	0			1			1996.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770523	9631197
1130	2014_events	1	0			1			1721.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770470	9631240
1131	2014_events	1	0			1			1944.85	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770432	9631263
1132	2014_events	1	1			1			2743.71	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768795	9630853
1133	2014_events	1	0			1			1155.08	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770862	9630816
1134	2014_events	1	0			1			1305.42	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770962	9630752
1135	2014_events	1	0			1			399.39	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770918	9630748
1136	2014_events	1	0			1			433.313	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770892	9630772

1137	Slide	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771025	9630626
1138	2014_events	1	0			0	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770485	9630677
1139	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769973	9630050
1140	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769876	9630412
1141	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769792	9630644
1142	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769936	9630588
1143	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770586	9630192
1144	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770762	9630052
1145	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770838	9629795
1146	Planar slide	1	0			1	1		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767029	9624552
1147	2014_events	1	0			1	1		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770227	9631514
1148	2014_events	1	0	2014		1	1		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770251	9631427
1149	2014_events	1	0			1	1		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770273	9631440
1150	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770767	9631031
1151	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770589	9631082
1152	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770513	9631143
1153	2014_events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770552	9631096

1154	2014 events	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771120	9629429
1155	Slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764682	9624027
1156	Slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765148	9623849
1157	Slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764983	9623843
1158	Gully	0	1			1	1	Debris	Gully with landslide process	Recent	765042	9623115
1159	Rotational slide	0	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764975	9623174
1160	Slide	1	0			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764145	9619965
1161	Slide	1	1	Older than 1957		1	0	Debris	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763987	9620050
1162	Gully	0	1			0	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764552	9622404
1163	Slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764780	9623887
1164	Slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764722	9623937
1165	Slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764663	9623968
1166	Flowslide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764801	9623953
1167	Slide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764900	9623529
1168	Slide	1	1	Older than 1957		1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764801	9623173
1169	Gully	0	1			1	0		Gully with landslide process	Recent	764667	9623298
1170	Flowslide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764630	9622894
1171	Flowslide	1	1			1	0		Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764689	9622891

1172	Flowslide	1	1			1	0	Debris	2961.69	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764704	9622861
1173	Rotational slide	1	1			1	0	Debris	5090.92	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764657	9622769
1174	Slide	1	1	Older than 1957		1	0		6388.97	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764530	9622846
1175	Slide	1	1			0	0		4600.41	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764828	9622954
1176	Slide	1	1			0	0	Debris	1489.61	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764773	9622929
1177	Flowslide	1	1			0	0	Debris	5973.95	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764775	9623043
1178	Flowslide	1	1			0	0	Debris	2186.59	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764794	9623125
1179	Slide	1	1			1	1	Debris	12310.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765492	9620984
1180	Slide	1	0			1	1		8818.63	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765301	9620994
1181	Flowslide	1	0			0	1	Debris	8529.54	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766188	9620661
1182	Slide	1	1	Older than 1957		1	0	Debris	39845.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763755	9621075
1183	Slide	1	1			1	0		9534.71	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764052	9619679
1184	Rotational slide	1	0			1	0		2042.07	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763613	9619810
1185	Slide	1	0			1	0		1690.78	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767887	9631312
1186	Slide	1	0			1	0		1592.62	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767892	9631343
1187	2014 events	1	0			0	0		42.1021	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	771016	9628796
1188	Rotational slide	1	1			0	1	Rock	843.389	Rock slide and rock avalanche	Recent	763856	9621426

1189	Slide	1	0	2020	1	1	Soil/Debris	390.469	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763810	9621752
1190	Rotational slide	1	0		1	0	Debris	1121.06	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763863	9621708
1191	Slide	1	1	Older than 1957	1	0	Debris	2609.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764597	9622816
1192	Slide	1	1		1	0	Debris	2816.32	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765775	9626285
1193	Slide	1	1		1	0	Debris	5830.09	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765666	9626347
1194	Slide	1	1		1	0		3662.43	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765562	9626407
1195	Slide	1	1		1	0		6554.64	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765459	9626479
1196	2014_events	1	0		0	0		1796.05	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770657	9628876
1197	2014_events	1	0		0	0		2291.16	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770686	9628808
1198	2014_events	1	0		1	0		121.362	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770053	9630537
1199	2014_events	1	0		1	0		94.0046	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769988	9630542
1200	2014_events	1	0		1	0		480.194	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769757	9630636
1201	2014_events	1	0		1	0		520.483	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769796	9630545
1202	2014_events	1	0		1	0		565.305	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769802	9630612
1203	2014_events	1	0		1	0		1170.63	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769862	9630673
1204	2014_events	1	0		1	1		641.635	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770167	9631431
1205	2014_events	1	0		0	1		871.539	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770168	9631774

1206	2014 events	1	0			1	0		3895.02	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769639	9630671
1207	Slide	1	1			1	0	1	2831.37	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769092	9630866
1208	Rotational slide	1	1			0	0		7108.74	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763921	9620006
1209	Slide	0	1	Older than 1957		1	0	Debris	9135.52	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763709	9621077
1210	Slide	1	1			1	0	Debris	14071.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763804	9621052
1211	Slide	0	1			1	0	Rock	1491.29	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763956	9620973
1212	Planar slide	0	0			1	0		3600.9	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764991	9622658
1213	Slide	1	1	Older than 1957		1	0		3751.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766213	9625555
1214	Slide	1	1			1	0		2711.55	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766247	9625519
1215	Slide	1	1			0	0		5416.96	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766375	9625333
1216	Slide	1	1			1	0		14052.4	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766263	9625415
1217	Earthflow	1	1			1	0		32516	Earthflow and slide - earthflow	Recent	766672	9626127
1218	Planar slide	1	1	Older than 1957		1	0		4383.28	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766381	9625980
1219	Slide	1	1	Older than 1957		1	0		4938.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766287	9625748
1220	Gully	1	1	Older than 1957		0	0		6157.43	Gully with landslide process	Old	766659	9625566
1221	Slide	1	1	Older than 1957		0	0		1920	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766532	9625750
1222	Slide	1	1	Older than 1957		0	0		787.24	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766480	9625751

1223	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		2288.13	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766339	9625671
1224	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		800.181	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766286	9625613
1225	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1381.99	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766298	9625577
1226	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		734.324	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766310	9625534
1227	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		2716.84	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766377	9625772
1228	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		2648.84	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766418	9625755
1229	Slide	1	1	Older than 1957	0	0		2079.12	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766608	9625479
1230	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1238.57	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766351	9625706
1231	Slide	1	1	Older than 1957	0	0		1119.18	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766459	9625676
1232	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1056.04	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766439	9625705
1233	Slide	1	1		1	0		2040.71	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766327	9625920
1234	Slide	1	1		1	0	Debris	131.097	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766325	9625871
1235	Slide	1	1		1	0		487.831	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766319	9625855
1236	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		872.403	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766331	9625983
1237	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		709.467	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766287	9626038
1238	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		756.786	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766300	9626108
1239	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1134.73	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766353	9625602

1240	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1125.91	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766363	9625581
1241	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		870.245	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766377	9625560
1242	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1350.84	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	766382	9625526
1243	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		2128.2	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766219	9626142
1244	Slide - earthflow	1	1	Older than 1957	1	1		30979.4	Earthflow and slide - earthflow	Recent	766485	9626210
1245	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		1050.28	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766324	9626064
1246	Slide	1	1		1	0		14320.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765886	9626367
1247	Rotational slide	1	1		1	0		4347.68	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766475	9626295
1248	Slide	1	1		1	0	Debris	1840.09	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766858	9626204
1249	Slide	1	1		1	0		5061.32	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766780	9626170
1250	Rotational slide	1	1		1	0		1415.81	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763898	9621665
1251	Slide	1	0		0	0	Debris	267.765	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764112	9621638
1252	Slide	1	0		1	0		340.952	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764135	9621625
1253	Slide	1	1	Older than 1957	1	0		6703.01	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764530	9622290
1254	Slide	1	0		1	0	Debris	10914.5	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765443	9623723
1255	Slide	0	1		1	0	Debris	1460.47	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765385	9623787
1256	Slide	1	1		1	0	debris	1801.96	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765442	9623747

1257	Planar slide	0	1			1	0		6725.06	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	765644	9623503
1258	Slide	1	0			1	0		1917.75	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766409	9626303
1259	Slide	1	1			1	0	Debris	15245.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	766615	9626200
1260	Slide	1	1			1	0	Debris	6449.34	Rock slide and rock avalanche	Recent	764868	9623880
1261	2014 events	1	0	04/07/2017		0	0	Debris	431.229	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774655	9627652
1262	2014 events	1	0	04/07/2017		0	0	Debris	120.259	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	774767	9627670
1263	Slide	1	0			1	1		875.117	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767478	9629455
1264	Debris avalanche	1	0			0	0		1025.72	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768173	9629165
1265	Rotational slide	1	0			0	0		818.004	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768130	9629173
1266	Rotational slide	1	0			1	0		504.736	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768021	9629211
1267	Slide	1	0			1	0		491.418	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767976	9629222
1268	Slide	1	0			1	0		247.661	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767984	9629206
1269	Slide	1	0			1	0		211.511	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	767929	9629209
1270	Slide	1	1			1	0	Rock	20457.6	Rock slide and rock avalanche	Recent	769266	9630792
1271	Rotational slide	1	1			1	0		12110.3	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	769270	9630824
1272	Debris avalanche	1	1	2014		1	0	Debris	1884.58	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770361	9631254
1273	Slide	1	1			1	0		714.523	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	770363	9629456
1274	Slide	1	0			1	0	Debris	533.92	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768062	9629511

1275	Slide	1	0	2018	1	0	Debris	7584.73	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	768442	9628386
1276	Slide	0	1	Older than 1957	1	0		5673.05	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	764927	9624931
1277	Slide	0	0		1	0	Debris	79229.8	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	768026	9617261
1278	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0	Earth	6611.6	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763834	9620132
1279	Rotational slide	1	1	Older than 1957	1	0		4987.51	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Old	763913	9620116
1280	Slide	1	0		1	0	Debris	2170.67	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	764004	9620106
1281	Slide	1	0		1	0	Debris	1334.94	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide	Recent	763966	9620111
1282	Debris flow	1	0		0	0		14471.2	Debris flow	Recent	768829	9630938
1283	Debris flow	1	0		0	0		47410.2	Debris flow	Recent	768952	9632264
1284	Debris flow	1	0		0	0		400714	Debris flow	Recent	767100	9632892
1285	Rotational slide	1	1		1	0		6177.91	Debris/soil slide, debris avalanche, flow slide		769943	9630201