

Vers un inventaire des glissements de terrain et des éléments à risque sur les versants du Rift à l'ouest du lac Kivu (RDC)

Towards an inventory of landslide processes and the elements at risk on the Rift flanks West of Lake Kivu (DRC)

Jean-Claude MAKI MATEO¹ & Olivier DEWITTE²

Abstract : The Rift flanks west of Lake Kivu (DRC) are one of the Congolese regions most affected by fatal landslides. However, quantitative information on the regional distribution of those processes and their impacts is still lacking. The aim of this research is to carry out a first landslide inventory and to identify the elements at risk using open-source ancillary data. The use of Google Earth imagery allowed us to detect different types of landslides and to identify risk issues in an area of about 5700 km² between Bukavu and Goma. In total, more than 600 landslides were mapped. Several predisposing factors explain their distribution. The elements at risk are numerous and landslides have caused direct and indirect damage in recent years. This inventory is a very first step towards the understanding of the landslide processes in the region. Further studies are needed to complete and validate the information and to compute susceptibility and risk maps.

Keywords: Landslide, Inventory, Elements at risk, Google Earth, Lake Kivu

Résumé ; Les versants du Rift à l'ouest du lac Kivu (RDC) sont une des régions congolaises les plus touchées par les glissements de terrain. Malgré les conséquences souvent désastreuses de ces processus, des informations régionales quant à leur distribution et leurs impacts ne sont pas disponibles. Le but de cette recherche est de réaliser à partir de données ancillaires en libre accès un premier inventaire de ces phénomènes et d'identifier les éléments à risque. L'utilisation des images Google Earth a permis de détecter plus de 600 glissements de différents types et d'en déterminer les enjeux sur une zone de 5700 km² située entre Bukavu et Goma. Leur occurrence est liée à une combinaison de plusieurs facteurs de prédisposition. L'inventaire met en évidence de nombreux éléments à risque face aux glissements de terrain ; ces derniers ayant déjà causé de nombreux dommages directs et indirects aux cours de ces dernières années. Cet inventaire constitue une première étape dans l'étude de glissements de terrain dans la région. Il devra être complété et validé sur le terrain afin de servir de base à la production de cartes de susceptibilité et de risque face à ces phénomènes.

Mots clés : Glissement de terrain, Inventaire, Eléments à risque, Google Earth, Lac Kivu

INTRODUCTION

Les glissements de terrain causent de nombreuses victimes dans le monde et les pays les moins développés s'avèrent être particulièrement vulnérables (PETLEY, 2012). Au niveau de la République Démocratique du Congo (RDC) les mouvements gravitaires sont responsables chaque année de nombreuses victimes (Plan ORSEC RDC, 2012) et parmi les régions les plus touchées figurent les versants du Rift est-africain à l'ouest du lac Kivu. Les médias tant locaux qu'internationaux et les rapports des organismes humanitaires y relatent chaque année plusieurs catastrophes meurtrières liées principalement à des précipitations importantes (NEUCHATEL, 1968 ; RADIOOKAPI, 2009 ; DIGITALCONGO, 2010 ; RDC HUMANITAIRE, 2012 ; CATNAT, 2013, ALLAFRICA, 2014, CATNAT, 2014).

¹ Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Département de Géophysique, Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro, RD Congo. E-mail : makigeo2013@gmail.com / makigeo2006@yahoo.fr

² Department of Earth Sciences, Royal Museum for Central Africa, Belgique.
E-mail : Olivier.Dewitte@africamuseum.be

Cette région en bordure du lac Kivu est sujette à la présence de glissements de terrain en raison de prédispositions tant naturelles qu'anthropiques (NDYANABO *et al.*, 2010). Il s'agit notamment de son relief accidenté, des sols argileux, de la pluviosité intense, de la sismicité régionale et des constructions et autres aménagements dus aux activités socio-économiques. Les centres ruraux, les routes de desserte agricole, les champs ainsi que les cours d'eau se trouvent être menacés directement ou indirectement par les mouvements de masse.

Quelques études couvrent la problématique des glissements de terrain dans la région. MUNYOLOLO *et al.* (1999) notent leur recrudescence dans Bukavu et ses environs ; l'activité sismique étant évoquée comme facteur de déclenchement. Sur base d'une cartographie détaillée délimitant 15 % du territoire de Bukavu comme étant affecté par des glissements de terrain, MOEYERSONS *et al.* (2004) montrent cependant que la détermination de leur cause reste complexe en raison du manque de données sur l'emplacement exact des failles actives et la pression hydrostatique. Un séisme de magnitude M 6.2 sur l'échelle de Richter, dont l'épicentre se situe dans la partie centrale du lac Kivu dans la zone de Kalehe (Figure 1), est évoqué dans la réactivation de glissements de terrain dans la même région en octobre 2002 (MAVONGA, 2007). Dans une communication sur les vulnérabilités, les glissements de terrain sont reconnus comme causant des dommages importants sur les populations en bordure du lac Kivu (WAFULA *et al.*, 2007). Le séisme du 3 février 2008 de magnitude M_w 5.9 dont l'épicentre est proche de Bukavu et Cyangugu (Rwanda) est lui aussi à l'origine de mouvements de masse (d'OREYE *et al.*, 2011). La surveillance de fissures sur des bâtiments de la région montrent la dynamique lente et continue de certains glissements (MAKI MATEO *et al.*, 2014b).

Ces travaux ne donnent cependant aucune information fiable sur la distribution des processus à l'échelle régionale et leurs impacts alors que ce type de données est crucial non seulement pour la compréhension des processus mais également pour une gestion plus durable du territoire (GUZZETTI *et al.*, 2012). Ainsi, le but de notre recherche consiste à faire un premier état des lieux des glissements de terrain sur les versants du Rift à l'ouest du lac Kivu en essayant de répondre aux questions essentielles sur leur distribution spatiale et temporelle, leur morphométrie, leur processus et les conditions naturelles et anthropiques de leur occurrence. Il est donc nécessaire de les inventorier, de les classer, de présenter un diagnostic de leur fonctionnement et de proposer un aperçu des aléas et des éléments à risque qui y sont associés. Les enjeux humains et socio-économiques liés à l'exposition aux glissements de terrain sont donc inventoriés également. En se basant sur l'utilisation de données en libre accès uniquement, notre étude utilise une méthode facilement transposable qui contribue à la connaissance générale des glissements de terrain dans cette région du Rift est-africain.

ZONE D'ETUDE

L'inventaire sur les glissements de terrain a été mené dans une zone de 5700 km² dans le Rift à l'ouest du lac Kivu située entre Bukavu et Goma dans les Territoires de Kabare, de Kalehe et de l'île d'Idjwi en Province du Sud Kivu et le Territoire de Masisi en Province du Nord Kivu à l'est de la RDC (Figure 1).

Cette partie de la RDC se situe dans la branche occidentale du Rift est-africain. Elle est formée des reliefs précambriens orientés sud-nord de la chaîne de Mitumba culminant à plus de 3000 m (Figure 1). Ces reliefs incisés par des rivières aux vallées profondes sont rajeunis sans cesse par le rifting divergent qui agit depuis le Tertiaire (CHOROWICZ, 2005; DELVAUX & BARTH, 2010). La lithologie est formée de roches métamorphiques (granites, gneiss, micaschistes) au niveau des reliefs précambriens, de roches volcaniques et de coulées de lave au sud et au nord du lac Kivu et de dépôts calcaires d'origine lacustre qui tapissent le fond des vallées principales au bord du lac (LUTUMBA, 1991). Le climat est pluvieux (1500 mm) et tempéré par l'altitude (20°C en moyenne annuelle) avec une saison sèche de juin à août (Données 2003-2013 de la Station météorologique de Lwiro).

Du lac Kivu à la lisière du parc de Kahuzi-Biega (Figure 1), la forêt naturelle a laissé place à des cultures, des zones de pâturage et des centres ruraux le long des routes principales. La conquête de nouvelles terres arables et l'approvisionnement en ressources ligneuses poussent les populations

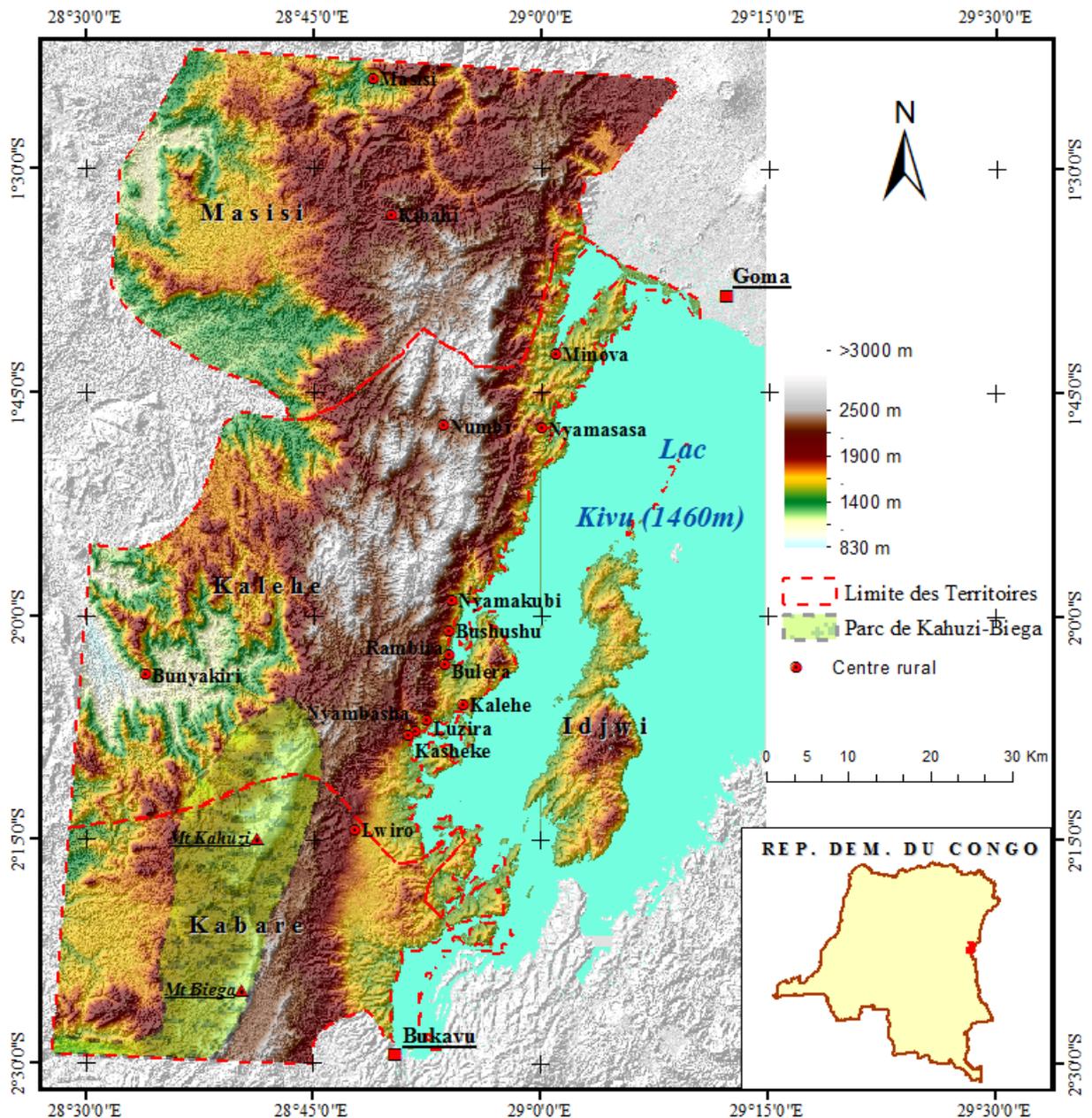


Figure 1 : Relief et entités administratives de la zone d'étude.

riveraines du parc à détruire de plus en plus la forêt dont il ne subsiste que quelques reliques (BROWN & KASISI, 2009 ; MOKOSO *et al.*, 2012 ; MUDINGA *et al.*, 2013).

La région est une des zone les plus densément peuplée de la RDC avec une densité > 200 habitants/km² (BISHAKABALYA & ALINGILYA, 2014 ; CIVAVA *et al.*, 2013). Le peuplement est constitué de groupes ethniques bantous et des pygmées vivant à la lisière du parc. Les activités économiques sont surtout basées sur l'agriculture vivrière et commerciale, des fermes de bovins et des petits ruminants. La pêche et la navigation sont développées sur le lac Kivu. L'exploitation artisanale des ressources minières comme l'or, la cassitérite et le coltan est en pleine expansion. L'axe routier de la Nationale 2 Bukavu-Goma permet l'évacuation des produits agricoles vers les villes précitées et l'approvisionnement des centres ruraux importants. La beauté du paysage est favorable au tourisme qui se remet peu à peu des affres de la guerre ; les gorilles de montagnes restent l'une des grandes attractions du parc de Kahuzi-Biega.

DONNEES ET METHODES

Pour cette zone d'étude, comme pour beaucoup d'autres, non seulement en RDC, mais aussi en Afrique et dans de nombreuses autres régions du monde, le manque de données sur des processus géomorphologiques comme les glissements de terrain est une réalité (JACOBS *et al.*, sous presse). Devant la nécessité d'obtenir une première estimation de la distribution régionale de ces processus avant de pouvoir orienter des études plus ciblées, le but de notre recherche est aussi de développer une méthode facile à mettre en place et à transposer en se basant uniquement sur des données en libre accès. La Figure 2 résume la méthodologie utilisée à partir de ce type de données pour acquérir des informations nécessaires à l'étude des glissements. Les détails techniques quant à l'utilisation des logiciels, la préparation des données et la manipulation des fichiers sont expliqués par MAKI MATESO (2014a)

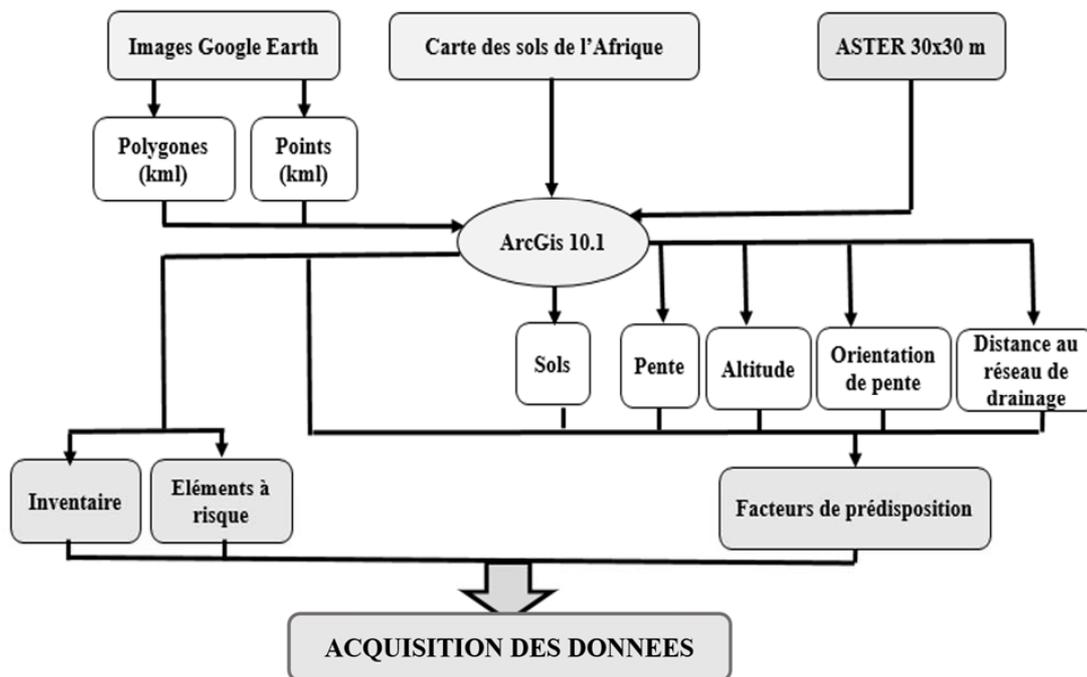


Figure 2 : Etapes essentielles de l'acquisition des données.

Acquisition de l'information avec Google Earth

Les méthodes employées pour la récolte, le traitement et l'analyse des données sont basées sur l'analyse des images Google Earth (Figures 2 et 3). Depuis 2005, Google Earth fournit en libre accès une couverture dans le monde entier d'images à haute et très haute résolution spatiale. Cette mine d'informations a fourni de nouvelles possibilités d'exploiter les images satellites pour la détection et la cartographie de glissements de terrain notamment en exploitant la visualisation en 3D et les couvertures multi-temporelles (FISHER *et al.*, 2012 ; GUZZETTI *et al.*, 2012 ; COROMINAS *et al.*, 2014). Il faut cependant reconnaître quelques difficultés dues au fait que les images peuvent être de qualité variable et que des décalages peuvent exister au niveau des jointures (FISHER *et al.*, 2012). Pour la zone d'étude les images sont de sources différentes (p. ex., Landsat, SPOT) impliquant des résolutions variables et des qualités différentes en fonction de la couverture nuageuse et de la hauteur du soleil au moment de leur acquisition. Au stade actuel, il est difficile d'avoir des informations plus précises sur les résolutions vu que Google Earth ne publie pas les caractéristiques spécifiques des images (FISHER *et al.*, 2012).

La reconnaissance de différents processus de mouvement gravitaire n'est pas aisée d'autant qu'il existe de nombreux types de mouvements ayant chacun des caractéristiques morphologiques

plus ou moins différentes (HUNGR *et al.*, 2013). Même si l'interprétation d'images satellitaires ne permet pas une identification rigoureuse de tous les types de processus (GUZZETTI *et al.*, 2012), il est important d'en différencier au minimum les grandes catégories. Chaque type de glissements de terrain répond à des conditions environnementales qui ne sont pas nécessairement identiques et leurs impacts peuvent être très différents (CRUDEN & VARNES, 1996 ; GLADE & CROZIER, 2005). Dans l'analyse des risques liés aux glissements de terrain, COROMINAS *et al.* (2014) recommandent de prendre en compte les éléments à risque qui peuvent être affectés par l'apparition de phénomènes dangereux, tels que la population, les biens ou l'environnement. Les images Google Earth sont utilisées pour l'identification de ces éléments.

Analyse des facteurs de prédisposition pour l'occurrence de nouveaux glissements de terrain

Les facteurs de prédisposition (aussi appelés facteurs de contrôle) qui expliquent l'occurrence de nouveaux glissements de terrain peuvent varier selon le type de processus (CRUDEN & VARNES, 1996 ; GLADE & CROZIER, 2005). Généralement les facteurs dérivés des informations topographiques jouent un rôle crucial dans l'explication de l'occurrence des glissements de terrain (COROMINAS *et al.*, 2014). Ici, nous avons utilisé l'information en provenance du modèle numérique d'élévation ASTER GDEM à 30 m de résolution (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) qui constitue la meilleure source d'information en libre accès dans la région (ALBINO *et al.*, sous presse). De ces données topographiques, nous avons dérivé quatre facteurs de prédisposition : altitude, pente, orientation de la pente et distance au réseau de drainage (Figure 2). Avec une résolution de 30 m, nous n'avons pas jugé réaliste d'utiliser des paramètres topographiques d'écoulement qui s'avèrent être beaucoup plus sensibles à la taille des pixels et par conséquent pas assez fiables dans ce contexte (DEWITTE *et al.*, 2010). Dans notre analyse, les données sur les sols ont été obtenues à partir la carte actualisée du « Soil Atlas of Africa » disponible en libre accès (http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/africa_atlas/data.html).

La nouvelle carte harmonisée à l'échelle continentale montre la répartition des principaux types de sols dominants qui peuvent être trouvés en Afrique tels que définis par le système de classification mondial WRB (DEWITTE *et al.*, 2013 ; JONES *et al.*, 2013). Pour la région, les données sont cartographiées aux 1 :1 M et 1 :2 M (DEWITTE *et al.*, 2013).

L'analyse des facteurs de prédisposition requiert de considérer uniquement les conditions environnementales au niveau de la niche d'arrachement du glissement, c'est-à-dire là où elles sont la cause et non la conséquence des instabilités. Dès lors, pour l'analyse, un seul point représentatif de la niche a été sélectionné manuellement pour chaque glissement en tenant compte de la morphologie du site et du fait que les matériaux de cette niche ont été mobilisés par rapport à leur position initiale sur la pente (DONATI & TURRINI, 2002 ; VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2006). Chaque point analysé correspond à un pixel (30x30m) du modèle numérique d'élévation.

Afin d'avoir un aperçu de l'influence des facteurs de prédisposition sur la présence des glissements de terrain au niveau régional, des calculs ont été réalisés suivant une méthode de rapport de vraisemblance décrite par LEE & PRADHAN (2007) qui considèrent chaque facteur de prédisposition individuellement (p.ex., pente), et classe ses valeurs en une série de catégories bien définies (p.ex., <5°, 5-10°, 10-15°). Un rapport de vraisemblance est alors calculé pour chaque catégorie comme étant le pourcentage de pixels de glissement de terrain dans cette catégorie divisé par le pourcentage de pixels de la zone d'étude dans la même catégorie. Le rapport s'écrit comme suit :

$$Rv_{fc} = \frac{\text{nbre pixels glissement de terrain } fc / \text{nbre pixels glissement de terrain } T}{\text{nbre pixels zone d'étude } fc / \text{nbre pixels zone d'étude } T}$$

où Rv est la valeur du rapport de vraisemblance pour chaque facteur de prédisposition $f = (1, 2, \dots, m)$ au niveau de la catégorie $c = (1, 2, \dots, n)$, et T est la superficie totale des glissements de terrain ou de la zone d'étude.

La valeur du rapport de vraisemblance suggère que lorsque $R_v = 1$, la proportion de glissements de terrain dans la catégorie du facteur est similaire à la proportion de glissements de terrain dans la zone d'étude et plus la valeur du rapport s'éloigne de $R_v = 1$ plus le facteur de prédisposition a une influence sur l'occurrence des glissements (LEE & PRADHAN, 2007 ; KANNAN *et al.*, 2012 ; KIRSCHBAUM *et al.*, 2012).

RESULTATS ET DISCUSSION

Inventaire et typologie des glissements de terrain

Sur base de différents critères morphologiques (forme de la niche d'arrachement, trace de coulée, déplacement superficiel, bourrelet, drainage superficiel, forme générale du glissement, position sur le versant, dimensions) et de l'aspect de la couverture végétale nous sommes parvenu à réaliser un inventaire incluant une typologie des processus à l'aide de Google Earth. L'état de la végétation et plus particulièrement la présence de zone sans végétation nous a renseigné sur l'âge relatif de l'instabilité (SIDLE *et al.*, 2006). Nous sommes dans une région où la croissance naturelle de la végétation est très rapide. De plus, les parcelles cultivées mises à nu par un mouvement de terrain sont très souvent replantées dans l'année qui suit l'évènement. La présence de zones sans végétation (ou avec une couverture plus clairsemée) dans un glissement témoigne donc d'une activité qui remonte à quelques mois voire à quelques années maximum. C'est un des critères qui nous a permis de différencier les glissements dits « anciens » (ou moins récents) des autres glissements plus récents. Selon le type de processus, la couverture végétale est plus ou moins affectée (CRUDEN & VARNES, 1996). En général, en présence d'un mouvement profond, c'est-à-dire dont la surface de rupture est au moins à 3 m de profondeur (KEEFER, 1984), la végétation de la masse déplacée peut rester presque intacte au niveau des blocs homogènes ; à cette profondeur, la rupture affecte peu la zone d'enracinement. Par contre, dans le cas d'un glissement de type coulée, une grande partie de la couverture végétale peut disparaître suite au déplacement.

Quatre types de processus associés aux glissements de terrain ont été inventoriés (Figure 3) :

Glissement rotationnel. De manière générale, ce sont les glissements dont les escarpements sont les plus marqués et dont les dimensions peuvent être les plus grandes. Leur impact sur la topographie peut être important et pérenne. Ils peuvent affecter l'entièreté d'un versant. La présence de plusieurs escarpements secondaires est fréquente et en corolaire la présence de zonation dans la couverture végétale ;

Glissement translationnel. Ces mouvements se différencient des glissements rotationnels par la forme de la niche d'arrachement et la zone sans végétation présente à l'aval de l'escarpement principal. Généralement, ils sont caractérisés par un seul escarpement et une plus grande superficie visible de leur surface de rupture à l'aval de ce dernier ;

Glissement coulée. Ces mouvements sont pour la plupart superficiels ou du moins leur impact sur la topographie est relativement peu important et moindre que pour les deux autres types. Par conséquent, seuls les mouvements récents pas encore recouverts par la végétation sont visibles. De par leur nature, ces glissements sont le plus souvent dans le fond des thalwegs ;

Glissement ancien. Dans ce cas, les caractéristiques de la végétation ne nous indiquent pas de preuve d'activité récente. En outre, la morphologie générale nous montre des formes plus altérées et moins identifiables. Les anciens glissements que nous sommes à même d'identifier sont de glissements rotationnels et translationnels profonds colonisés par la végétation et reconnaissables par leur morphologie qui rappelle les anciens processus qui étaient en place. Plus les glissements sont grands et profonds, plus leur impact sur le paysage est important et pérenne et plus leur identification reste possible à travers le temps.

Certains glissements de terrain présentent des formes complexes qui sont parfois difficiles à délimiter en raison de la présence conjointe de plusieurs processus. Plus la superficie d'un glissement est importante, plus les chances d'être en présence d'une interaction de plusieurs processus d'instabilité sont grandes. On peut très bien avoir un grand glissement rotationnel profond

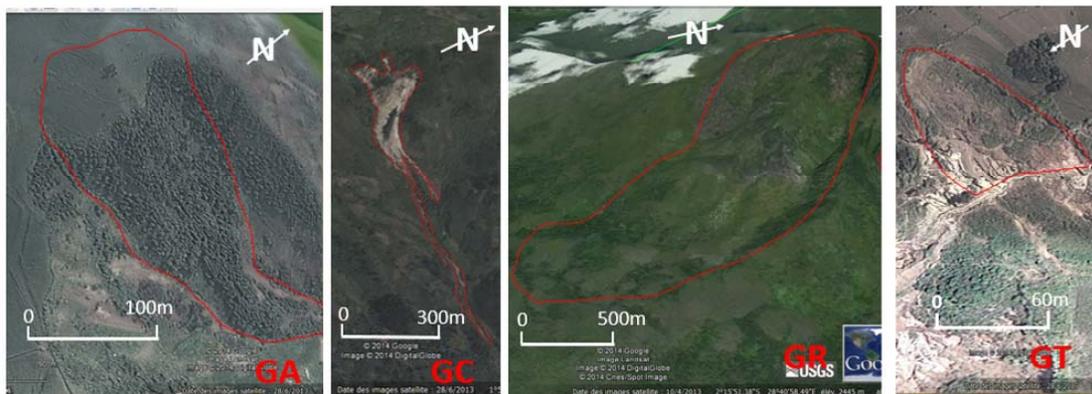
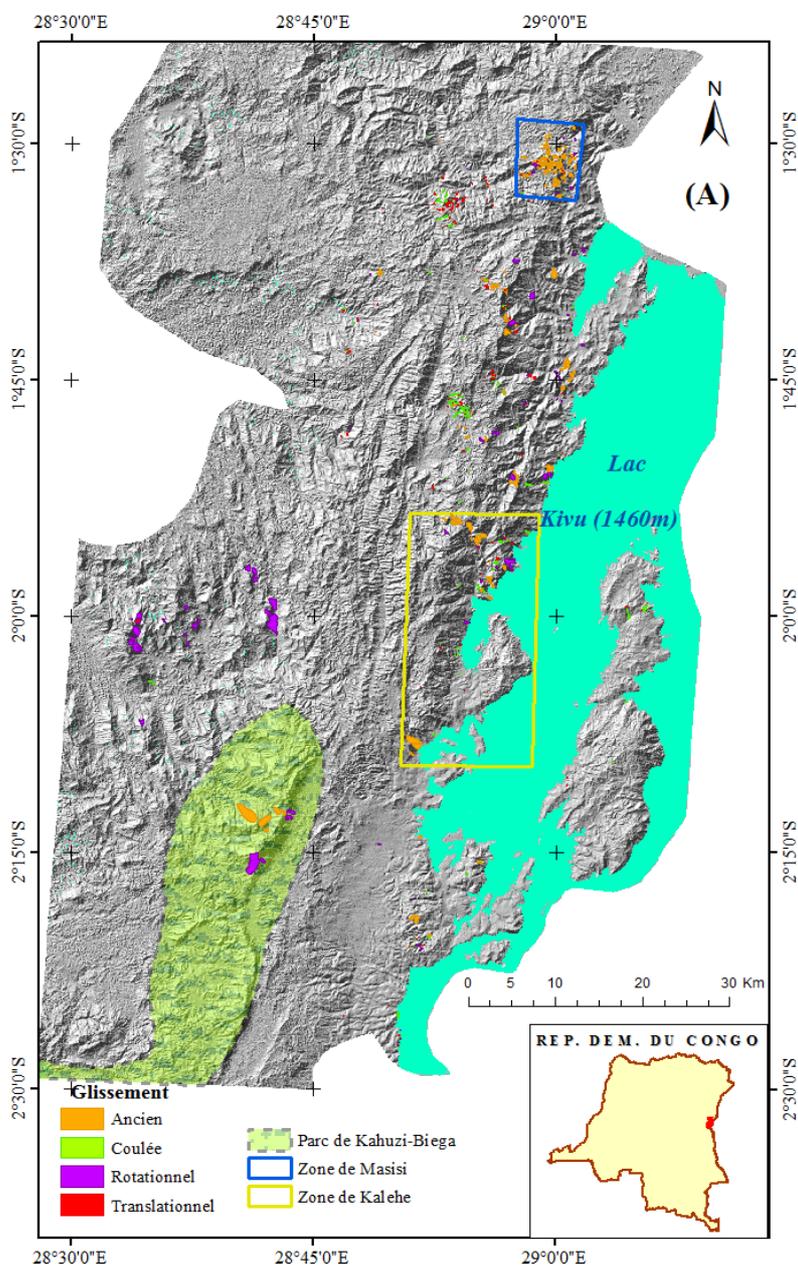


Figure 3 : Quatre types de processus liés aux glissements de terrain sont identifiés sur les images Google Earth. (GA : glissement de terrain ancien, GC : glissement de terrain coulée, GR : glissement de terrain rotationnel, GT : glissement de terrain translationnel).



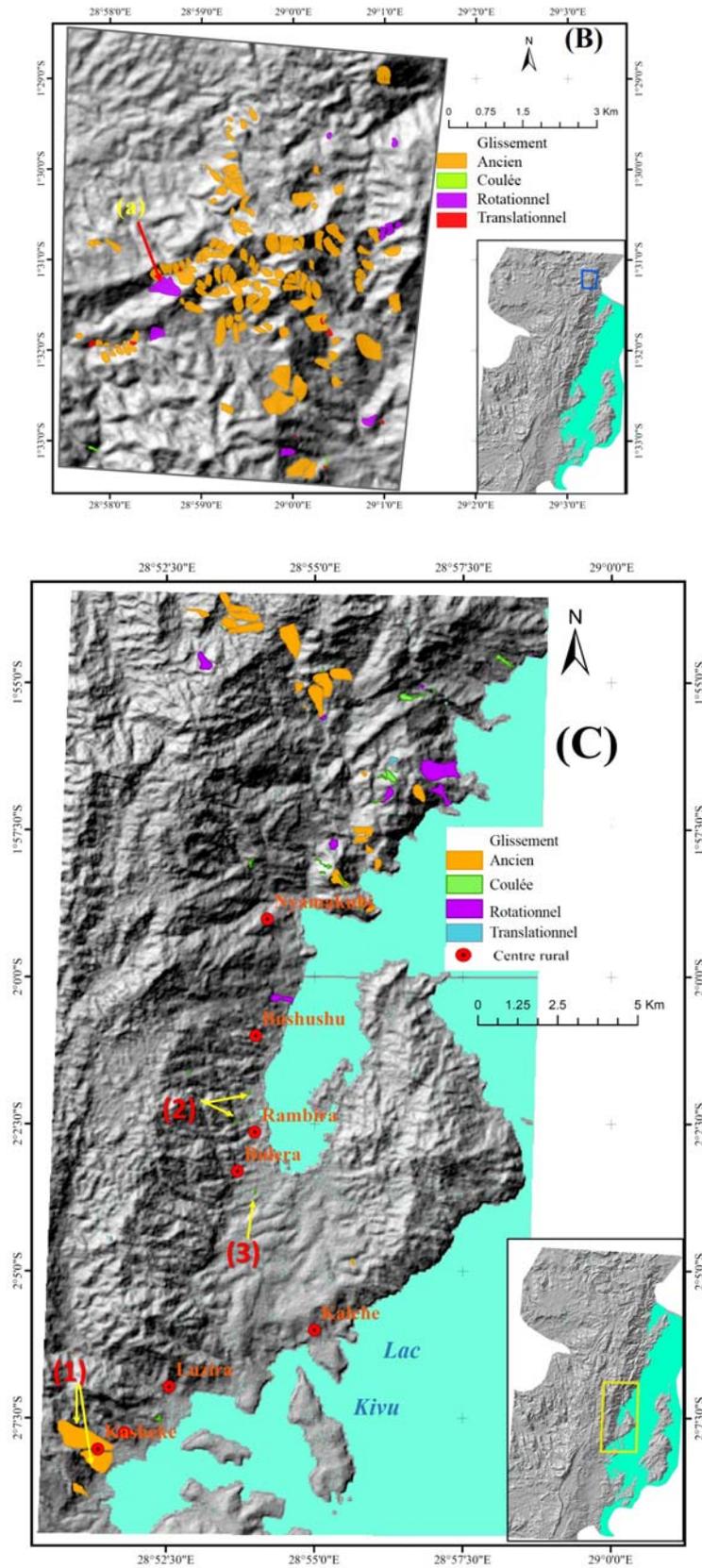


Figure 4. Inventaire des glissements de terrain. (A) Vue régionale de l'ensemble des éléments cartographiés. En raison de l'échelle de la carte, seuls les mouvements de grandes superficies sont visibles. Zooms sur deux régions (B) Masisi et (C) Kalehe où plusieurs processus de types différents apparaissent côte à côte. Les symboles (1) (2) et (3) localisent les glissements survenus récemment (Figures 08 et 09).

dont les dimensions excèdent plusieurs centaines de mètres avec des processus de type coulée dans la zone de déplacement. Dans pareille situation, nous avons autant que possible cherché à identifier le processus principal. Dans certains cas il est possible d’observer sur un même versant plusieurs glissements adjacents. Dans ces situations nous avons fait attention à bien les délimiter en plusieurs polygones afin d’éviter tout problème d’amalgamation (MARC & HOVIUS, 2014).

L’inventaire nous a permis de cartographier 619 glissements de terrain répartis inégalement dans la zone d’étude (Figure 4). Suivant les territoires administratifs, on compte 310 glissements de terrain dans le Territoire de Masisi, 250 dans le Territoire de Kalehe, 46 dans le Territoire de Kabare au nord de la ville de Bukavu et 13 glissements de terrain sur l’île d’Idjwi (Figure 1). L’ensemble des glissements de terrain inventoriés représente 0.6% de la superficie de l’ensemble de la zone d’étude.

A ce stade il est important de signaler que la Figure 4 donne seulement un aperçu général de la réalité et que l’inventaire n’est pas complet. Il faut rappeler que la qualité des images a beaucoup joué pour la reconnaissance des glissements et que cela explique certainement une partie de la distribution inégale des occurrences. Une meilleure résolution des images aurait permis de détecter plus facilement des glissements dans certains secteurs où les éléments répertoriés sont rares.

Table 1. Statistiques sur les superficies des glissements de terrain inventoriés. Les données sont en hectare. GA : glissement de terrain ancien, GC : glissement de terrain coulée, GR : glissement de terrain rotationnel, GT : glissement de terrain translationnel.

Types	Nombre	Max	Minimum	Moyenne	Ecart-type	Superficie totale	%
GA	213	230	0.3	8	20	1650	49
GC	107	12	0.02	2	3	180	5
GR	98	220	0.1	15	30	1400	42
GT	201	8	0.02	1	1	145	4
Ensemble	619	230	0.02	6	15	3400	100

La superficie des processus cartographiés couvre plusieurs ordres de grandeur, indépendamment du type de glissement (Table 1). Les glissements les plus grands sont les glissements rotationnels et les glissements anciens. Pour les premiers, cela peut être dû au fait que les caractéristiques de leur escarpement font qu’ils sont plus facilement détectables, même dans les régions où la qualité moins bonne des images ne permet la détection que des plus grands mouvements. Pour les glissements anciens, ce sont logiquement les formes les plus grandes qui sont les plus pérennes. Il est probable que ces contrastes de superficie soient liés à la diversité des paysages et des contraintes dans lesquels évoluent les glissements de terrain suivant l’influence combinée de plusieurs facteurs.

Facteurs de prédisposition aux glissements de terrain

Les rapports de vraisemblance calculés selon la méthodologie de LEE & PRADHAN (2007) ont permis de déterminer pour la pente, l’altitude, l’orientation de la pente, la distance au réseau de drainage et les types sols des relations qui existent entre ces facteurs de prédispositions et l’occurrence des glissements de terrain (Figure 5). En raison du caractère exploratoire de cette recherche et de la fiabilité relative de l’inventaire, l’analyse des facteurs de prédispositions a été faite sans distinction des processus (KIRSCHBAUM *et al.*, 2012). Pour les variables continues comme la pente, les catégories ont été choisies afin de pouvoir rendre compte des subtilités de l’environnement tout en ayant conscience de la qualité de l’inventaire et de la fiabilité des données ancillaires.

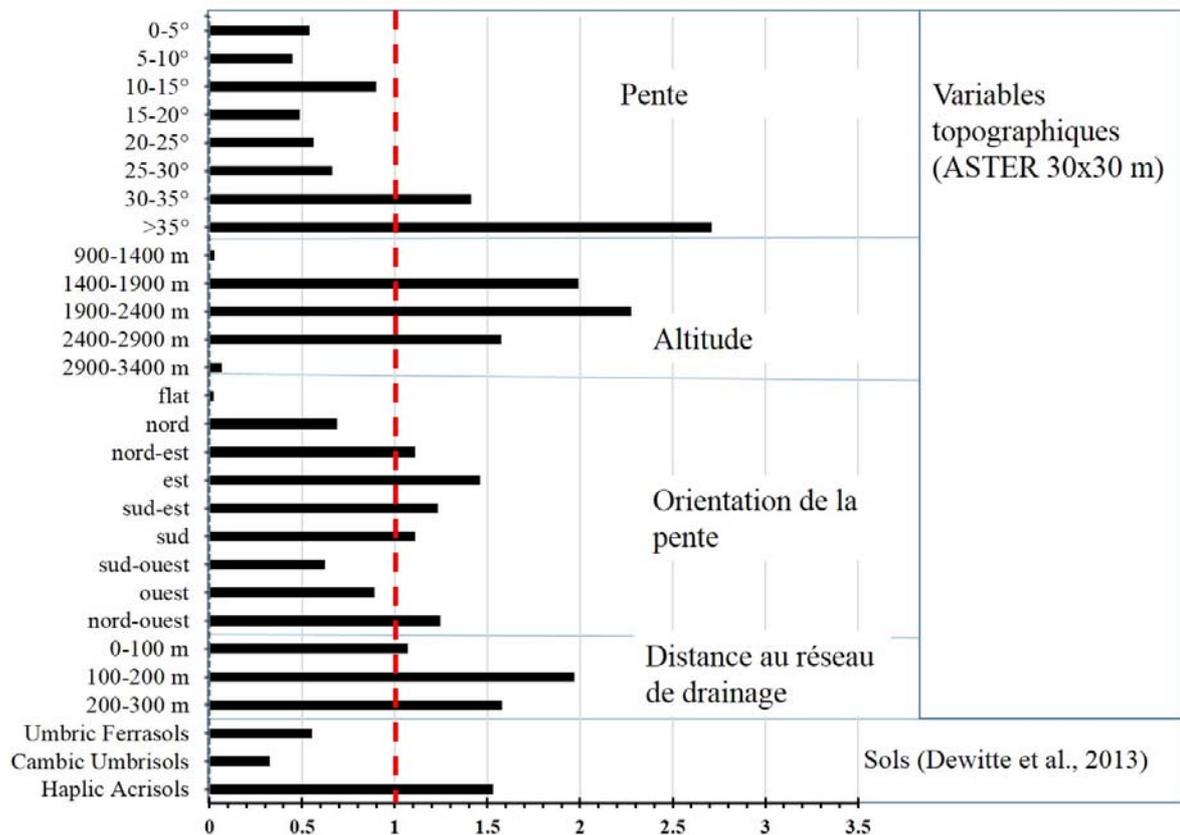


Figure 5. Rapports de vraisemblance des catégories des facteurs de prédisposition aux glissements de terrain. Plus la valeur du rapport s'éloigne de 1 (ligne pointillée verticale) plus le facteur de prédisposition a une influence sur l'occurrence des glissements.

Sur base des résultats présentés à la Figure 5, les observations suivantes peuvent être faites :

- Les pentes jouent un rôle sur la présence des glissements de terrain lorsqu'elles sont supérieures à 30 degrés. Cela correspond à des valeurs quelques peu supérieures à ce que l'on trouve dans d'autre région du monde (p.ex., FISHER *et al.*, 2012 ; KANNAN *et al.*, 2012 ; JACOBS *et al.*, sous presse). Une des explications pourrait être le fait que pour les glissements anciens, notre estimation régionale se base sur des données ASTER post-événement et que de manière générale, pour les grands glissements de terrain profonds, les pentes au niveau de l'escarpement principal (c'est-à-dire là où les pixels représentatifs des glissements de terrain ont été sélectionnés) sont généralement plus importantes que celles qui sont à l'origine du phénomène.
- Pour l'altitude, les relations positives sont marquées entre 1400-1900 m, 1900-2400 m et 2400-2900 m. Les deux premières tranches d'altitudes correspondent aux versants du rift situés entre le lac Kivu et le parc Kahuzi-Biega où se succède de nombreux centres ruraux le long grands axes routiers comme la nationale n°2 entre Bukavu et Goma. La deuxième tranche d'altitude correspond essentiellement aux hautes terres agricoles notamment celles de la région de Masisi. Enfin, la dernière tranche d'altitude correspond aux glissements se trouvant sur les crêtes de certaines montagnes ;
- Pour l'orientation de la pente, le rapport est très positif pour l'est. Cette distribution pourraient être due à l'influence des pluies apportées par les vents humides d'est qui arrivent perpendiculairement aux montagnes orientées selon les failles dominantes du Rift (LUTUMBA, 1991) ;
- La distance au réseau de drainage suggère l'influence de l'hydrologie sur les occurrences ;
- L'ensemble de glissements de terrain inventoriés se trouvent sur trois types de sols : Ferrasols, Umbrisols et Acrisols. A priori, il semble que ces derniers soient les plus favorables aux glissements.

Éléments à risque associés aux glissements de terrain

Les conséquences d'un glissement de terrain et le risque qui en découle dépendent des éléments à risque qui sont présents dans sa zone d'impact (COROMINAS *et al.*, 2014). Le but étant d'avoir un premier aperçu au niveau régional, notre approche se veut purement empirique. Nous avons considéré quatre groupes d'éléments à risque : habitation, route, champ (culture) et rivière (Table 2). Nous avons aussi considéré des zones que nous appelons « zone en friche », c'est-à-dire des zones où aucun des quatre éléments à risque n'est présent. Nous n'avons pas fait de différenciation intra-groupe et nous ne sommes pas rentrés dans l'estimation de la vulnérabilité de ses éléments. Pour chaque glissement, nous avons analysé l'environnement immédiat (amont, sur et aval) en considérant le type de processus en présence. Chaque cas a été traité suivant la particularité des paysages observés. A partir de quatre groupes d'éléments à risque, 15 combinaisons sont possibles et elles ont toutes été rencontrées dans l'inventaire (Table 2). Pour des facilités de représentation cartographique, nous les avons codées. Au total, nous avons 16 codes en incluant le groupe zone en friche dans la liste; chaque glissement étant identifié par un de ces codes (Table 2, Figure 6). La table 2 montre que parmi les éléments à risque ce sont les cours d'eau qui sont les plus fréquents et qu'il y a très peu de glissements où des habitations sont concernées. Un cinquième des glissements sont dans le groupe zone en friche et de ce fait ne présentent aucun risque selon notre première estimation. La Figure 6 montre un zoom de la région illustrant la variabilité des enjeux rencontrés.

Table 2. Eléments à risque liés aux glissements de terrain inventoriés. Chaque groupe d'éléments ou combinaison de groupes a un code permettant une représentation cartographique plus aisée. GA : glissement ancien; GC : glissement coulée ; GR : glissement rotationnel, GT : glissement translationnel.

NATURE DES ENJEUX	Code	GA	GC	GR	GT	Total
Champ	002	28	10	8	24	70
Cours d'eau	003	61	11	21	65	158
Cours d'eau + champ	010	27	6	7	28	68
Habitation	001	0	4	1	2	7
Habitation + champ	008	4	7	2	4	17
Habitation + champ + cours d'eau	013	4	0	0	0	4
Habitation + cours d'eau	009	0	2	1	2	5
Route	004	14	19	15	21	69
Route + champ	005	3	2	1	4	10
Route + champ + cours d'eau	014	6	2	0	1	9
Route + champ + cours d'eau + habitation	015	8	8	3	2	21
Route + cours d'eau	006	12	5	3	10	30
Route + Habitation + cours d'eau	016	1	1	0	3	5
Route + champ + habitation	012	5	0	2	0	7
Route + habitation	007	2	0	5	3	10
Zone en friche	000	38	30	29	32	129
TOTAL		213	107	98	201	619

Peu d'informations sont disponibles sur les événements catastrophiques qui surviennent dans la région, en raison notamment de l'enclavement de certains villages. Cet inventaire permet de se faire une idée pour ces zones des impacts rencontrés et de voir que les glissements de terrain y ont déjà causé des nombreux dommages directs et indirects. La Figure 7 montre des exemples de glissements de terrain inventoriés; leurs caractéristiques sont présentées dans la Table 3.

Table 3. Caractéristiques des glissements de terrain de la Figure 7. Les données sur les facteurs de prédispositions sont celles qui correspondent au pixel représentatif pris pour chaque glissement dans l'analyse de la distribution présentée à la Figure 5.

Localisation	Processus en place	Superficie	Facteurs de prédisposition	Eléments à risque	Images Google Earth
a					
Lat. 1° 31'32'' sud Long. 28°58'36'' est	Glissement rotationnel	15 ha	Pente : 57° Orientation : nord-est Altitude : 2330m Drainage : 400m Sols : Acrisols	- Lac de barrage en amont de plusieurs villages - Cultures sur le versant instable	Image Landsat 28 juin 2013
b					
Lat. 1°33'37'' sud, Long. 28°53'4'' est	Coulée boueuse	5 ha	Pente : 47° Orientation : sud-est Altitude : 2400 m Drainage : 400m Sols : Acrisols	- Champs de culture	Image Landsat 10 avril 2013
c					
Lat. 1°35'55'' sud, Long. 28°53'9'' est	Glissement translationnel	2 ha	Pente : 31° Orientation : nord Altitude : 2340m Drainage : 135 m Sols : Acrisols	- Village menacé par érosion régressive - Champs de cultures	Image Landsat 10 avril 2013
d					
Lat. 1° 47'3'' sud Long. 28°53'35'' est	Coulée boueuse	10 ha	Pente : 32° Orientation : ouest Altitude : 2500m Drainage : 85m Sols : Ferrasols	- Village envahi par les matériaux boueux.	Image Nasa 27 août 2013
e					
Lat. 2°0'50'' sud Long. 28°34' est	Glissement rotationnel	60 ha	Pente : 40° Orientation : sud-est Altitude : 2000m Drainage : 290m Sols : Umbrisols	- Pas d'enjeux dans l'environnement immédiat	Image Astrium 13 avril 2003

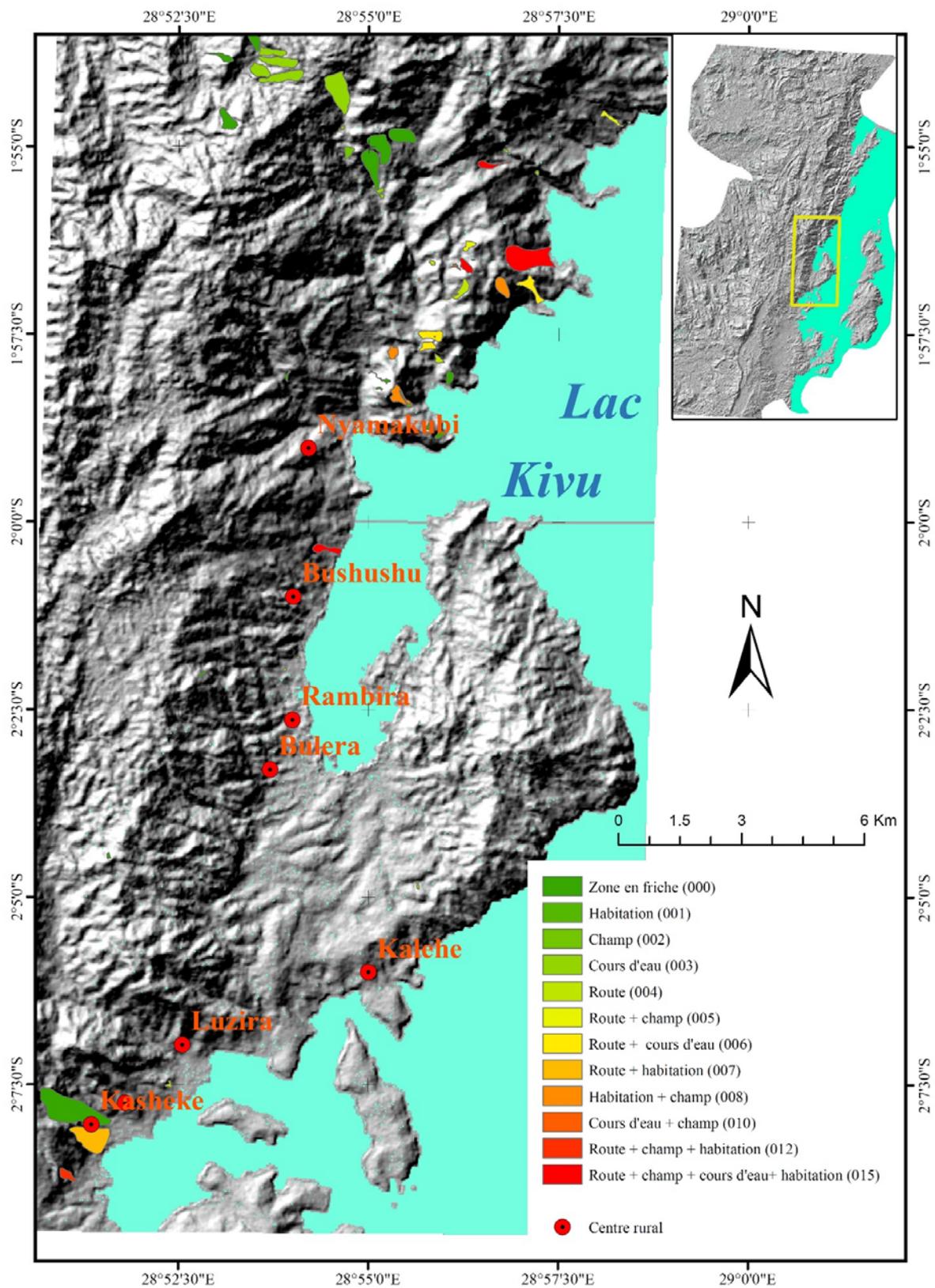


Figure 6 : Distribution des glissements de terrain en fonction des éléments à risques.

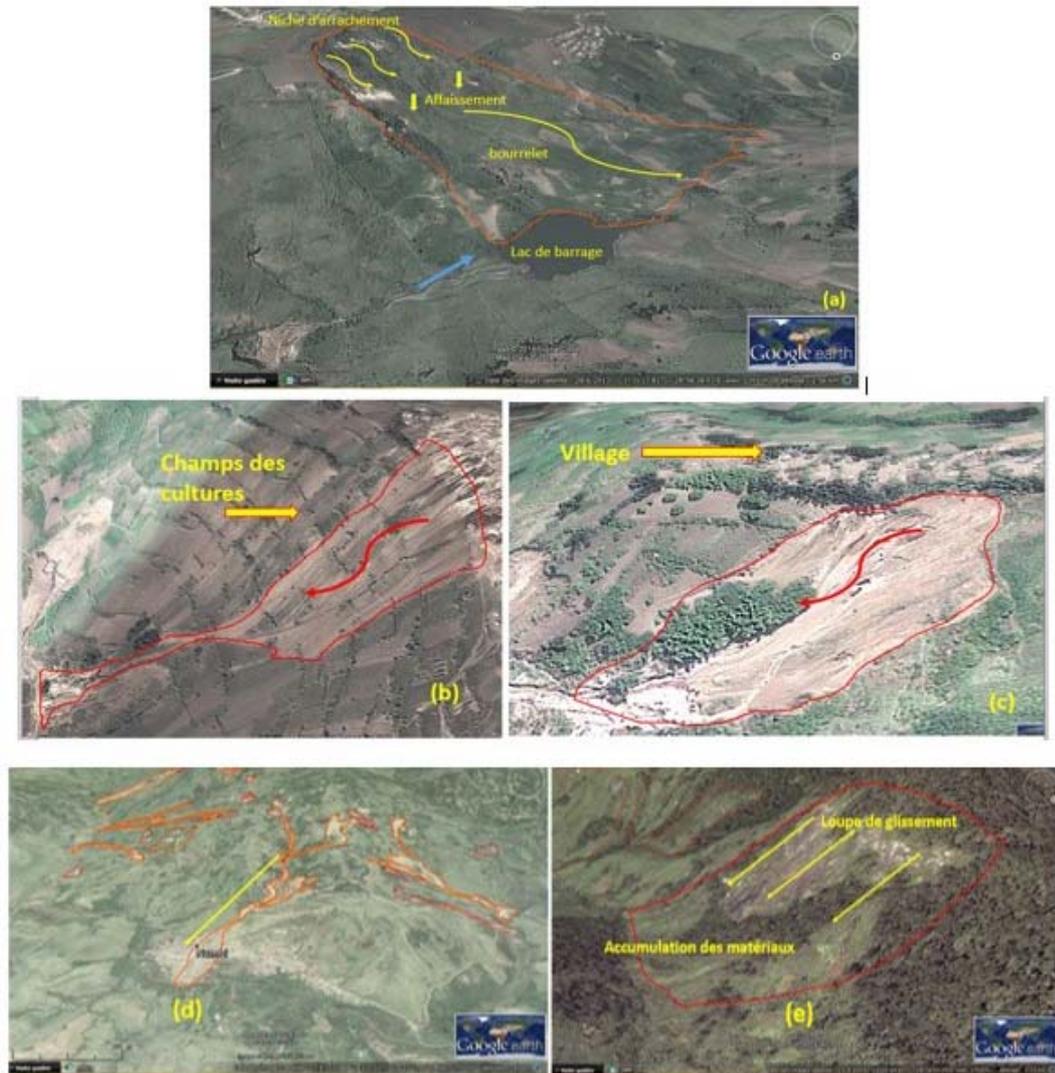


Figure 7. Exemples de glissements de terrain inventoriés sur Google Earth. Les caractéristiques de ces glissements sont présentées dans la Table 3. (a) glissement rotationnel (identifié dans la figure 4.B) ; (b) glissement coulée ; (c) glissement translationnel ; (d) glissement coulée ; (e) glissement rotationnel.



Figure 8.(G). Vue vers l'ouest de la coulée de débris de Kasheke du 25 octobre 2014. Cette coulée de débris est localisée sur la Figure 4c par rapport à l'inventaire (N°1). Photo prise deux jours après son occurrence le 27 octobre 2014 (02°08'03''S, 28°51'36''E).

Figure 9.(D). Vue vers l'est de la coulée de débris de Rambira du 25 octobre 2014. Cette coulée de débris est localisée sur la Figure 4c par rapport à l'inventaire (N°2). Photo prise deux jours après son occurrence le 27 octobre (02°02'38''S, 28°53'59''E).

FIABILITE DE L'INVENTAIRE ET ANTICIPATION D'UNE CATASTROPHE

Dans toute étude utilisant des images satellitaires, la fiabilité de l'information détectée peut toujours être remise en question. Dans le cas précis de notre inventaire, il est clair que certaines des formes observées sont plus fiables que d'autres. A titre d'exemple, le grand glissement présenté à la Figure 7a est clairement identifiable et son impact sur la formation d'une retenue d'eau en amont ne fait aucun doute.

Une des questions qu'il est à même de se poser est de savoir dans quelle mesure l'information de notre inventaire est conforme à la réalité du terrain et si notre méthodologie permet de cerner correctement un problème dans une perspective d'aménagement du territoire et d'anticipation de catastrophe.

Dans la région, plusieurs catastrophes meurtrières ont eu lieu au cours des dernières décennies. Le 11 mars 1968, suite à un tremblement de terre, un glissement de terrain a enseveli un village près de Bukavu faisant 260 victimes (NEUCHATEL, 1968). Plusieurs victimes ont été déplorées le 11 mai 2010 suite à une coulée boueuse à Katale Minova (WAFULA *et al.*, 2010). Le 9 novembre 2012, sept personnes sont mortes suite à un glissement de terrain provoqué par les pluies diluviennes survenues dans la nuit du 8 au 9 novembre dans le village de Rambira, situé à 17 km au nord-ouest de Kalehe (CONGOFORUM, 2012). En mai 2013, 47 personnes sont mortes à Rubaya dans le territoire de Masisi (CATNAT, 2013). Plus récemment, le 25 octobre 2014 en fin d'après-midi, suite à des pluies diluviennes, des coulées de boue et de débris ont frappé la région de Kalehe. Les médias y ont reportés plus d'une centaine de victimes (CATNAT, 2014 ; ALLAFRICA, 2014). La figure 6 montre que l'inventaire réalisé sur Google Earth identifie déjà plusieurs glissements dans la zone concernée avant ces événements.

Conséquemment à ces dernières catastrophes survenues dans le territoire de Kalehe, nous nous sommes rendu sur le terrain 48 heures après les événements. Nous y avons constaté des dégâts matériels importants dans les villages de Kasheke, Nyambasha, Luzira, Rambira, Bulera et Bushushu.

L'inventaire montre deux phénomènes gravitaires à Kasheke (Figure 8) dans l'environnement immédiat d'une coulée de débris du 25 octobre. Ces phénomènes ont été identifiés comme anciens glissements de terrain avec les enjeux codifiés « route et habitation » et « zone en friche ». Sur le terrain, on observe que c'est de l'ancien glissement de terrain « zone en friche » que la coulée de débris s'est initiée et les matériaux ont parcouru près de 800 m pour atteindre le lac Kivu. Le matériau déplacé constitué d'un mélange de boue et de blocs a détruit plusieurs habitations, la route Bukavu - Goma et des cultures. Deux personnes sont mortes à ce site. A Nyambasha, une coulée boueuse identifiée sur l'inventaire avec « route » comme élément à risque n'a pas été active durant la dernière catastrophe. Dans le secteur de Bulera, une coulée inventoriée (n° 3 sur la Figure 4c) comme active et menaçant la route Bukavu – Goma a été remise en mouvement le 25 octobre, apportant matériaux sableux et argileux sur la voirie et détruisant des cultures. En outre, de nombreux glissements de terrain superficiels ont été déclenchés sur le talus longeant. Dans le secteur de Rambira (Figure 9), la coulée de débris à l'origine de nombreux dégâts matériels n'a pas été identifiée sur Google Earth. Les personnes interviewées sur place confirment que son déclenchement a eu lieu le 25 octobre peu après la fin de la pluie. L'image Google Earth qui couvre la région date de juillet 2013 est bien antérieure au processus actuel. Nos observations de terrain montrent que la coulée a pris son départ dans une zone de champs avant de parcourir une zone relativement plane pour traverser des habitations, la route Goma-Bukavu et des cultures avant d'atteindre le lac. Dans le secteur de Bushushu, Google Earth a permis d'identifier cinq glissements de type coulée sur les versants montagneux et le long de la route principale alors que sur le terrain de nombreuses coulées de débris et de boue sont visibles.

Cette reconnaissance de terrain montre que Google Earth est dans une certaine mesure assez efficace pour localiser des zones problématiques et se faire une première idée sur la distribution spatiale des mouvements. Par contre, peu d'informations ont pu être recueillies par rapport à l'utilisation des terres et l'identification des matériaux, des mécanismes de déclenchement et de la composante temporelle est impossible sans une validation terrain, la collecte d'observations *in situ* et des interviews auprès de la population.

CONCLUSION

Dans cette recherche sur l'identification de glissements de terrain et d'éléments à risque dans la région du Rift située à l'ouest du lac Kivu entre Bukavu et Goma, l'approche que nous proposons s'avère pertinente pour se faire une première idée de la problématique au niveau régional. L'inventaire que nous avons compilé constitue un début dans la compréhension des risques liés aux mouvements de masse dans cette région du Rift est-africain. En se basant sur des données en libre accès uniquement et l'utilisation de Google Earth, notre étude utilise une méthode facilement transposable.

Cette étude bien qu'exploratoire ouvre des nombreuses pistes pour des recherches futures. Dans un premier temps il s'agira de valider l'information sur le terrain. L'utilisation d'images satellitaires et de données topographiques à plus haute résolution permettra aussi une meilleure identification des mouvements. Il ne faut pas oublier que la compréhension des processus de déclenchement est primordiale dans toute évaluation de risque. Cet aspect ne pourra être résolu qu'avec une avancée dans la collecte d'informations temporelles. Ces données peuvent être obtenues par analyse multi-temporelle d'images satellitaires et de photographies aériennes ainsi que par l'analyse d'archives, notamment dans la presse écrite, les rapports de terrain et les informations collectées par des organismes tels que la protection civile et d'autres administrations en contact avec des problématiques de gestion du territoire. Les interviews auprès des populations locales sont aussi des sources primordiales pour la compréhension des processus.

Il ne faut pas oublier que l'étude des facteurs de prédisposition que nous proposons est assez simplifiée à ce stade. Des paramètres comme l'utilisation du sol, la lithologie et les propriétés des sols sont indispensables dans de nombreux cas. En outre, un traitement plus rigoureux nécessite la prise en compte des types de processus séparément, ce qui ne peut se faire que lorsqu'un inventaire complet et validé est disponible. C'est à ce moment qu'il sera possible de réaliser des prédictions fiables de susceptibilité et de risque aux glissements de terrain afin de dresser des cartes permettant de servir à l'application de mesures adaptées à une gestion de cette problématique.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié des remarques des Professeurs Hans-Balder Havenith et Pierre Ozer de l'Université de Liège. Nos remerciements s'adressent aussi au Professeur André Ozer de la même institution pour nous avoir facilité la publication de cet article à travers l'Association Francophone de Géographie Physique.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBINO, F., KERVYN, F., D'OREYE, N. & SMETS, B., in press. Multi-temporal TanDEM-X derived DEM: An innovative tool to estimate eruptive volumes at Nyamulagira volcano (D.R. Congo). *Journal of Geophysical Research*.
- ALLAFRICA, 2014. <http://fr.allafrica.com/view/group/main/main/id/00033444.html> (consulté le 31 janvier 2015)
- BISHAKABALYA, R. & ALINGILYA, M., 2014. Explosion démographique dans la région du Sud-Kivu montagneux et son impact sur l'environnement. *Revue «Université Sans Frontières Pour Une Société Ouverte»*. Université Distant Production House Parution bimensuelle: N0 002, 19-30.
- BROWN, O. & KASISI, R. B., 2009. Renforcement de la capacité de l'ICCN à la gestion et la résolution des conflits liés aux ressources naturelles dans le Parc National de Kahuzi-Biega, République Démocratique du Congo. Rapport de l'atelier du 07 au 08 août 2007. *Institut international du développement durable*.
- CATNAT, 2013. <http://www.catnat.net/veille-catastrophes/veille-des-catastrophes-naturelles/veille-catastrophes-monde/219-mvts-de-terrains-monde/15858-glissement-de-terrain-en-r%C3%A9publique-d%C3%A9mocratique-du-congo-47-morts> (consulté le 04 août 2014)
- CATNAT, 2014. <http://www.catnat.net/veille-catastrophes/veille-des-catastrophes-naturelles/veille-catastrophes-monde/218-inondations-monde/18497-des-pluies-diluviennes-causent-des-inondations-dans-l-est-de-la-rdc-au-moins-150-morts> (consulté le 31.12.2015)
- CHOROWICZ, J., 2005. The East African rift system. *Journal of African Earth Sciences*, 43: 379-410.

- CIVAVA, M. R., MALICE, M., & BAUDOIN, J. P., 2013. Amélioration des agrosystèmes intégrant le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) au Sud-Kivu montagneux. *Gestion durable des agro-systèmes en milieu tropical humide* : 69-92.
- CONGOFORUM, 2012. <http://www.congoforum.be/fr/nieuwsdetail.asp?subitem=3&newsid=190189&Actualiteit=selected> (consulté le 04 août 2014)
- COROMINAS, J., VAN WESTEN, C., FRATTINI, P., CASCINI, L., MALET, J. P., FOTOPULOLOU, S., CATANI, F., VAN DEN EECKHAUT, M., MAVROULI, O., AGLIARDI, F., PITILAKIS, K., WINTER, M. G., PASTEUR, 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* : 79 : 209-263.
- CRUDEN, D.M. & VARNES D.J., 1996. Landslide types and processes. Turner AK and Schuster RL (Eds.) *Landslides: investigation and mitigation*. Washington, D.C., *National Academy Press*. 247: 36-75
- d'OREYE, N., GONZÁLEZ, P. J., SHULER, A., OTH, A., BAGALWA, L., EKSTRÖM, G., KAVOTHA, D., KERVYN, F., LUCAS, C., LUKAYA, F., OSODUNDU, E., WAUTHIER, C. & FERNÁNDEZ, J., 2011. Source parameters of the 2008 Bukavu-Cyangugu earthquake estimated from InSAR and teleseismic data. *Geophysical Journal International*, 184: 934-948.
- DELVAUX, D. & BARTH, A., 2010. African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data. *Tectonophysics*, 482 : 105-128.
- 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: 153-166.
- DEWITTE, O., JONES, A., SPAARGAREN, O., BREUNING-MADSEN, H., BROSSARD, M., DAMPHA, A., DECKERS, J., GALLALI, T., HALLETT, S., JONES, R., KILASARA, M., LE ROUX, P., MICHÉLI, E., MONTANARELLA, L., THIOMBIANO, L., VAN RANST, E., YEMEFACK, M. & ZOUGMORE, R., 2013. Harmonisation of the soil map of Africa at the continental scale. *Geoderma*, 211-212 : 138-153.
- DIGITALCONGO, 2010. <http://www.digitalcongo.net/article/64592>, Bukavu et Goma coupés des échanges commerciaux (consulté le 15 mai 2014)
- DONATI, L. & TURRINI, M. C., 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). *Engineering Geology*, 63: 277-289.
- FISHER, G. B., AMOS, C. B., BOOKHAGEN, B., BURBANK, D. W. & GODARD, V., 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*, 492:1-22
- GLADE, T. & CROZIER, M.J., 2005. The nature of hazard and impact. In: T. Glade, M.G. Anderson & M.J. Crozier (Editors), *Landslide hazard and risk*. Wiley, *Chichester*, 43-74.
- 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: 42-66.
- HUNGR, O., LEROUEIL, S. & PICARELLI, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11: 167-194.
- JABOBS, L., DEWITTE, O., POESEN, J., DELVAUX, D., THIERY, W. & KERVYN, M., sous presse. The Rwenzori Mountains, a landslide-prone region?. *Landslides*. (sous presse)
- JONES, A., BREUNING-MADSEN, H., BROSSARD, M., DAMPHA, A., DECKERS, J., DEWITTE, O., GALLALI, T., HALLETT, S., JONES, R., KILASARA, M., LE ROUX, P., MICHÉLI, E., MONTANARELLA, L., SPAARGAREN, O., THIOMBIANO, L., VAN RANST, E., YEMEFACK, M. & ZOUGMORE, R., (eds.), 2013. *Soil Atlas of Africa*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp. ISBN 978-92-79-26715-4, doi 10.2788/52319
- KANNAN, M., SARANATHAN, E. & ANABALAGAN, R., 2012. Landslide vulnerability mapping using frequency ratio model: a geospatial approach in Bodi-Bodimettu Ghat section, Theni district Tamil Nadu, India, *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 2901-2913
- KEEFER, D. K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 406-421.
- KIRSCHBAUM, D. B., ADLER, R., HONG, Y., KUMAR, S., PETERS-LIDARD, C. & LERNER-LAM, A., 2012. Advances in landslide nowcasting: evaluation of a global and regional modeling approach. *Environmental Earth Sciences*, 66: 1683-1696.
- LEE, S. & PRADHAN, B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4 :33-41.

- LUTUMBA, I., 1991. Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le Rift du Sud-Kivu. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 27 : 209-228.
- MAKI MATEO, J.-C., 2014a. Inventaire de glissements de terrain et étude des éléments à risque dans le rift ouest du bassin du lac Kivu. *Travail de fin d'études de Master complémentaire en gestion des risques naturels, Faculté des Sciences, Université de Liège*. 73p.
- MAKI MATEO, J.-C., MAOMBI, K., TAMBALA, T., BURUME, B.M. & WAFULA, M.D., 2014b. Glissements de terrain à l'Hôpital de la Fomulac-Katana et ses conséquences sur les infrastructures hospitalières (Rép. Dém. Congo), *Cahier du CERUKI, Numéro Spécial Alphonse Byamungu Nakahazi* : 269-281.
- MARC, O. & HOVIUS, N., 2014. Amalgamation in landslide maps: effects and automatic detection. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2: 7651-7678.
- MAVONGA, T., 2007. Some characteristics of aftershock sequences of major earthquakes from 1994 to 2002 in the Kivu province, Western Rift Valley of Africa. *Tectonophysics*, 439 : 1-12.
- MOEYERSONS, J., TRÉFOIS, P., LAVREAU, J., ALIMASI, D., BADRIYO, I., MITIMA, B., MUNDALA, M., MUNGANGA, D.O. & NAHIMANA, L., 2004. A geomorphological assessment of landslide origin at Bukavu, Democratic Republic of the Congo. *Engineering geology*, 72: 73-87.
- MOKOSO, J. D. D. M., VAN DIGGELEN, R. & MWANGA, J. C., 2012. Etude ethnoptéridologique, évaluation des risques d'extinction et stratégies de conservation aux alentours du Parc National de Kahuzi Biega (RD Congo). *Geo-Eco-Trop*, 36: 137-158.
- MUDINGA, E. M., NGENDAKUMANA, S. & ANSOMS, A., 2013. Analyse critique du processus de cogestion du parc national de Kahuzi-Biega en République Démocratique du Congo. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 17).
- MUNYOLOLO, Y., WAFULA, M.D, KASEREKA, M., CIRABA, M., MUKAMBILWA, K., MAVONGA, T., CIRIMWAMI, M., MUHIGIRWA, B., BAGALWA, R. & MUNDALA, M., 1999. Recrudescence des glissements de terrain suite à la réactivation sismique du bassin du Lac Kivu région de Bukavu (Rép. Dém. Congo) - *Musée Royal de l'Afrique Centrale, Département des Mines. Rapport Annuel 1997 & 1998* : 285-298
- NDYANABO, S., VANDECASTEELE, I., MOEYERSONS, J., OZER, A., OZER, P., DUNIA, K. & CISHUGI, B., 2010. Développement de la ville de Bukavu et cartographie des vulnérabilités, RD Congo. *Annales des Sciences et Sciences Appliquées de l'Université Officielle de Bukavu*, 2 : 120-127.
- NEUCHATEL, 1968. <http://doc.rero.ch/record/64090/files/1968-03-13.pdf> (consulté le 20 mai 2014).
- PETLEY, D., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40, 927-930.
- Plan ORSEC RDC, 2012. http://www.preventionweb.net/files/36425_36425planorsecversionfinale1.pdf (consulté le 20.05.2014)
- RADIOOKAPI, 2009. http://radiookapi.net/sans-categorie/2009/11/19/nyamasasa-pluies-diluviennes-au-moins-8-personnes-tuees-dans-un-eboulement-2/#.U4B02v1_uuo, (consulté le 20 mai 2014)
- RDCHumanitaire,2012.<http://www.rdc-humanitaire.net/index.php/centre-de-presse/nouvelles-humanitaires/3691-aider-les-autorites-a-mieux-repondre-aux-catastrophes> (consulté le 04 août 2014)
- SIDLE, R. C., ZIEGLER, A. D., NEGISHI, J. N., NIK, A. R., SIEW, R. & TURKELBOOM, F., 2006. Erosion processes in steep terrain—truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224:199-225.
- VAN DEN EECKHAUT, M., VANWALLEGHEM, T., POESEN, J., GOVERS, G., VERSTRAETEN, G. & VANDEKERCKHOVE, L., 2006. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76: 392-410.
- WAFULA, M. D., YALIRE, M., KASEREKA, M., CIRABA, M., KWETUENDA, M. & HAMAGUCHI, H., 2007. Natural disasters and hazards in the Lake Kivu basin, Western Rift Valley of Africa. In: *Report on the International Workshop on Natural and Human Induced Hazards and Disasters in Africa*.
- WAFULA, M.D., BYAMUNGU MATABARO, D., FIAMA BONDO, S., TAMBALA, T., BURUME, B.M., MUNYOLOLO, Y., CIRABA M. & MUKAMBILWA, P., 2010. Rapport de mission d'expertise sur les mouvements de terrain observés à Katala (Minova) du 15 au 19 Décembre 2010. *Département de Géophysique, Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro, RDC*.