



Numéro spécial

Glissement de terrain de Nyakavogo (Bukavu, RD Congo): interaction entre facteurs naturels et anthropiques

Anatomy of Nyakavogo landslide (Bukavu, DR Congo): interplay between natural and anthropogenic factors

Bibentyo Toussaint MUGARUKA¹, Matabaro Sylvain KULIMUSHI²,
Sahani Walère MUHINDO³ & Olivier DEWITTE⁴

Abstract: Currently, there are few data on the interactions between human factors and landslide processes in tropical environments such as those found in the mountains around Lake Kivu in DR Congo. This study focusses on the analysis of the spatial and temporal variability of natural and anthropogenic factors in and around Nyakavogo landslide (city of Bukavu). It combines data from field survey, aerial photographs, satellite imagery and archive analysis. This landslide, in contact with a river, occurred far before 1959. It affected the whole hillside. The significant reduction of the forested parts in favour of cultivated areas and grassy vegetation, increasing number of houses and earthworks, concentration of surface runoff at the main escarpment and seismic activity is the combination of factors that has probably contributed to its instability from 1959 to 1997. In 1997, the deep rotational movement which affected the entire landslide is the most important reactivation known. The river reorganization after the dam created by this reactivation and the erosion accentuated by exploitation of building materials in the riverbed have played an important role in the reactivation of 2000 that affected the foot of the landslide. Currently, movements still occur, mainly in the reactivated area of 2000, but a stabilization trend is observed. Reforestation of recent years probably plays a role. Nevertheless, overloading of part of the main escarpment could reverse this dynamic. This study provides useful information for the management of areas affected by landslides in the city of Bukavu.

Keywords: landslide, natural and anthropogenic factors, reactivation, land use, tropical environment

Résumé: A l'heure actuelle il existe peu d'information sur les interactions entre activité anthropique et glissement de terrain dans les environnements tropicaux tels que ceux rencontrés dans les montagnes autour du Lac Kivu en RD Congo. Cette étude consacrée à l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des facteurs naturels et anthropiques dans et autour du glissement de Nyakavogo (ville de Bukavu) a été réalisée en combinant analyse et enquête de terrain, photographies aériennes, imagerie satellitaire et analyse d'archive. Ce glissement, en contact avec une rivière, date d'avant 1959 et affecte déjà à l'époque le versant sur toute sa hauteur. La réduction sensible du boisement à la faveur des aires cultivées et à végétation herbeuse, l'accroissement du nombre de maisons et de terrassements, une concentration des écoulements de surface au niveau de l'escarpement principal et l'activité sismique est la combinaison des facteurs qui a probablement contribué aux instabilités de 1959 à 1997. En 1997, le mouvement rotationnel profond qui a affecté l'ensemble du glissement correspond à la réactivation la plus importante connue. La réorganisation de la rivière après le barrage créé par ce mouvement et l'érosion accentuée par l'exploitation de matériaux de construction dans son lit ont joué un rôle important dans la réactivation de 2000 qui a affecté le pied du glissement. Actuellement, des mouvements sont toujours observés, principalement au niveau de la réactivation de 2000, mais une tendance à la stabilisation est observée. Le reboisement de ces dernières années y joue probablement un rôle. Néanmoins, la mise en décharge d'une partie de l'escarpement principal pourrait inverser cette dynamique. Cette étude apporte des informations utiles pour la gestion des territoires affectés par des glissements de terrain dans la cité de Bukavu.

Mots clés: glissement de terrain, facteurs anthropiques, réactivation, affectation du sol, environnement tropical

¹ Université Officielle de Bukavu, RD Congo. Email: toussaintbib@gmail.com

² Institut Supérieur Pédagogique de Bukavu, RD Congo. Email : sylvainkulim@gmail.com

³ Université Catholique du Graben, Butembo, RD Congo. Email : sahaniwalerem@gmail.com

⁴ Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique. Email: olivier.dewitte@africamuseum.be

INTRODUCTION

Les glissements de terrain sont fréquents dans les régions de montagnes tropicales (p. ex., VANACKER *et al.*, 2003; KNAPEN *et al.*, 2006; JACOBS *et al.*, 2016) et leurs impacts entravent très fréquemment les activités humaines (p. ex., VLAEMINCK *et al.*, 2016). A cet égard, les versants de la branche occidentale du Rift est-africain situés en bordure du Lac Kivu en RD Congo ne font pas exception (MOEYERSONS *et al.*, 2004; MAKI MATEO & DEWITTE, 2014). Avec un relief jeune et accentué, une pluviosité intense et une sismicité régionale, les conditions naturelles pour l'occurrence des glissements y sont réunies. En outre cette région, qui connaît une croissance démographique importante, notamment avec le développement de la ville de Bukavu, ressort comme un des endroits les plus touchés par les glissements de terrain en RD Congo (Plan ORSEC RDC, 2012) et chaque année des catastrophes meurtrières y sont relatées (p. ex., MAKI MATEO & DEWITTE, 2014).

De nombreux versants de la ville de Bukavu sont affectés par des glissements de terrain (MUNYOLOLO *et al.*, 1999; TREFOIS *et al.*, 2007; MOEYERSONS *et al.*, 2004; SADIKI *et al.*, 2010; MIGOMBANO, 2011, BALEGAMIRE *et al.*, ce volume; KULIMUSHI *et al.*, ce volume). Face à une forte croissance démographique et en l'absence de planification urbaine adéquate, les populations sont souvent forcées de s'installer sur des pentes instables (MIGABO, 2009), avec à la clé un risque d'accentuation du problème. De plus, les habitants ne sont pas toujours au courant de la présence de glissements de terrain dans la région et ne réalisent pas toujours que leur intervention peut affecter la stabilité d'un site. A l'heure actuelle il existe peu de données sur les interactions entre activité anthropique et glissement de terrain dans la région et les quelques études qui ont été réalisées dans d'autres régions du monde (p. ex., VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2007) ne se focalisent pas sur des environnements tropicaux tels que ceux rencontrés dans les montagnes autour du Lac Kivu.

L'objectif de ce travail est de mieux comprendre les interactions entre processus naturels et facteurs anthropiques. Pour cela nous nous focalisons sur l'historique du versant sur lequel se développe le glissement de Nyakavogo dans la commune de Bagira dans la cité de Bukavu (Figure. 1). Ce glissement, connu pour être actif depuis plusieurs décennies, est de taille assez représentative d'autres glissements dans la région (MUNYOLOLO *et al.*, 1999; TREFOIS *et al.*, 2007; MOEYERSONS *et al.*, 2004; SADIKI *et al.*, 2010; MIGOMBANO, 2011).

ZONE D'ETUDE

Le glissement de Nyakavogo a sa source sur la rive droite de la rivière Nyamuhinga qui constitue la limite entre la ville de Bukavu et le territoire de Kabare (Figure 1). Il s'agit d'un glissement rotationnel profond, selon la classification mise à jour de VARNES (HUNGR *et al.*, 2014), qui s'étend sur 6.6 hectares et avec un escarpement principal de 15 m de haut qui s'étire sur une distance de 325 m (Figure 2).

Le glissement affecte le versant sur l'ensemble de sa hauteur (Figure 2) et est développé dans des matériaux homogènes constitués de régolithes et Nitisols de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur qui résultent de l'altération de basaltes d'âge Miocène à Pléistocène (KANIKA *et al.*, 1981; KAMPUNZU *et al.*, 1983; LONDA *et al.*, 1989; PASTEELS *et al.*, 1989; JONES *et al.*, 2013).

La région de Bukavu jouit d'un climat tropical de savane (PEEL *et al.*, 2007) modéré par l'altitude (moyennes annuelles 1500 mm; 20°C), avec une saison sèche de juin à août. Cette alternance saisonnière, associée à la dégradation de la couverture végétale, favorise grandement l'érosion et les mouvements de terrain (TREFOIS *et al.*, 2007).

Les cours d'eau présents dans la ville de Bukavu s'écoulent SO-NE vers le lac Kivu et connaissent des débits forts variables qui charrient d'importantes quantités de sédiments provenant des érosions et d'immondices (ILUNGA, 1991). Plusieurs sources, parfois accompagnées de phénomènes de suffosion, témoignent de la circulation souterraine de l'eau (ILUNGA, 1989).

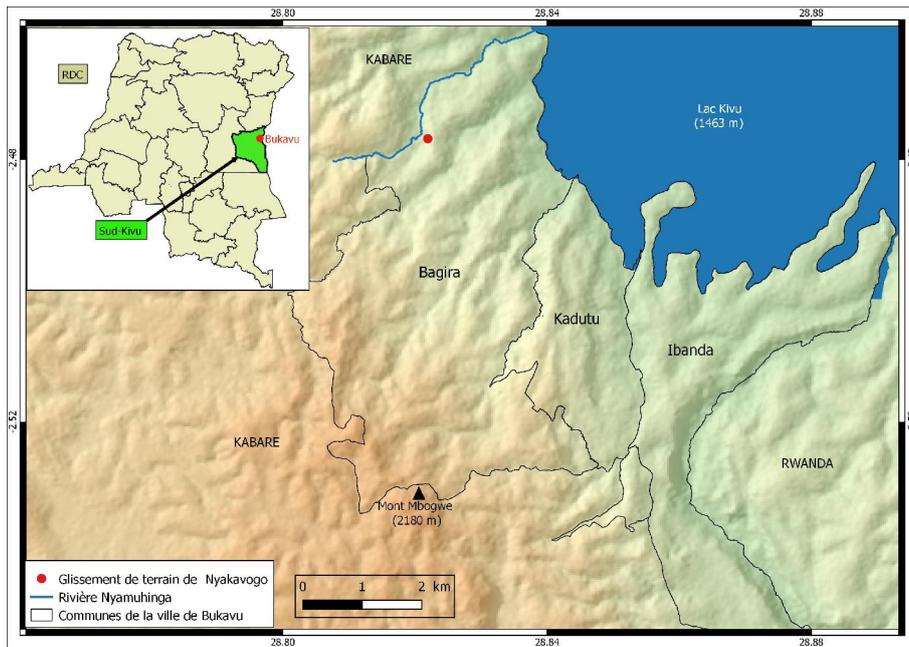


Figure 1: Localisation du glissement de Nyakavogo en bordure de la ville de Bukavu avec le territoire de Kabare et la rivière Nyamuhinga.

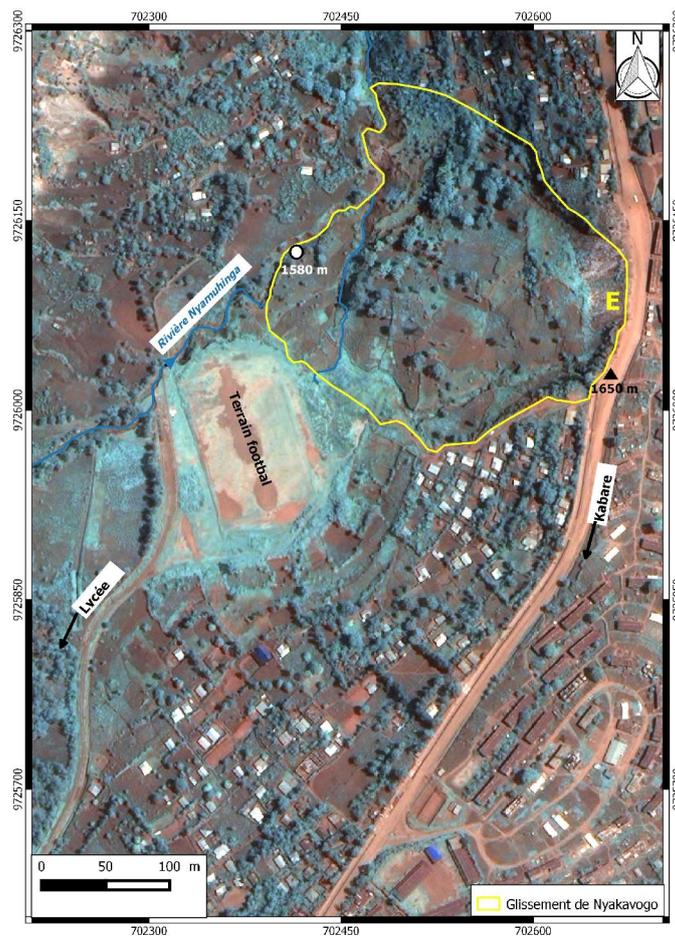


Figure 2: Le glissement de Nyakavogo dans son milieu environnant.

Le triangle noir et le cercle blanc à contour noir représentent respectivement les valeurs d'altitude au sommet et au pied du versant. L'escarpement principal est représenté par « E ». Fond de la carte: image Pléiades de juillet 2013. Projection: WGS 84/ UTM zone 35S.

MATERIEL ET METHODES

De nombreuses méthodes et outils existent pour étudier l'historique des glissements de terrain (GUZZETTI *et al.*, 2012). Les méthodes utilisées dans ce travail, en fonctions des données disponibles sont résumées dans la Figure 3. Cette méthodologie combine enquête de terrain, analyse d'archives et analyse d'images satellitaires et de photographies aériennes.

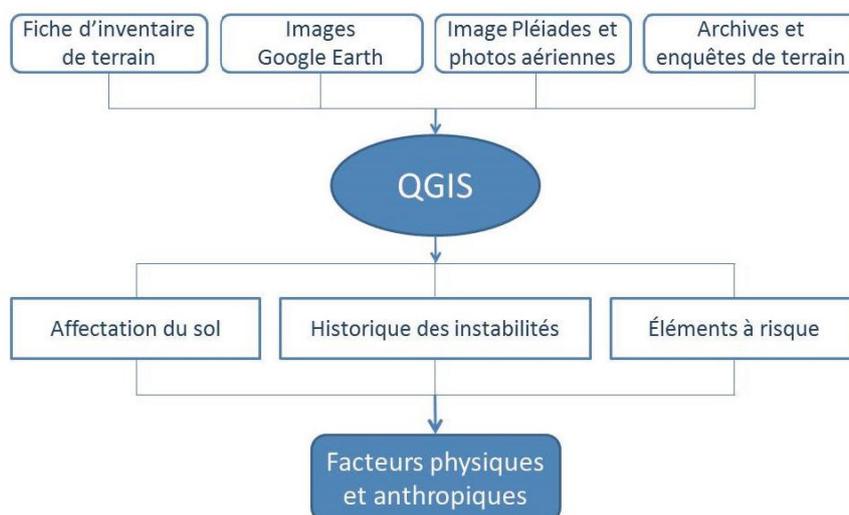


Figure 3: Etapes essentielles de l'acquisition des données.

Les photos aériennes sont de 1959 et 1973 et ont été prises à une échelle approximative de 1/40000. L'analyse de ces photos est le cœur de cette recherche et, comme montré dans d'autres études (p. ex., VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2007; DEWITTE *et al.*, 2008, 2009), elles sont le seul support qui permette d'analyser de manière fiable le comportement d'un glissement de terrain sur plusieurs décennies. Des images Google Earth à haute résolution sont disponibles pour la période 2003-2014. Nous disposons aussi d'une image Pléiades de juillet 2013 dont l'affinage panchromatique nous permet de travailler à une résolution spatiale de 0.5 m. Cette image sert de référence pour la digitalisation de toute l'information récoltée via les autres supports. Des informations sur l'état du glissement et l'affectation du sol dans et autour du glissement en 1991 et en 1997 sont tirées de LIMESELI (1991) et de LUKIGE (1997).

Sur le terrain, les informations ont été collectées en se basant sur des fiches de description élaborées pour l'étude de glissements de terrain au Burundi qui se développent dans un environnement similaire (DEWITTE *et al.*, 2015). Les informations récoltées portent principalement sur l'identification et la localisation des processus d'instabilités; la forme, la hauteur, le type d'activité et le type de matériaux des escarpements principal et secondaires, le type de végétation, le drainage et les autres mouvements sur l'escarpement principal et dans la masse déplacée, les éléments à risque en amont, en aval, sur l'escarpement principal, sur la tête, le corps et le pied du glissement de terrain.

RESULTATS

Le recouplement des différentes informations présentées dans la méthodologie a permis de reproduire l'historique des 60 dernières années du versant sur lequel se développe le glissement de terrain de Nyakavogo.

Cartographie de l'affectation du sol

Cette étude s'appuie sur quatre cartes; il s'agit des cartes du glissement de terrain et de l'affectation du sol de 1959 à 1973, de 1991, de 1997 et de 2015 (Figures 4, 5, 6 et 7). L'analyse des

photos aériennes montre qu'il n'y a presque pas de changement d'affectation du sol de 1959 à 1973. Une seule carte est dès lors produite pour cette période. Les cartes tirées de LIMESSELI (1991) et LUKIGE (1997) ont été mises en forme et adaptées à cette étude pour la réalisation des cartes du glissement de terrain et de l'affectation du sol de 1991 et 1997. Les informations de terrain couplées à l'analyse de l'image Pléiades de 2013 et des images Google Earth de 2003 à 2014 ont servi à l'élaboration de la carte de 2015. Les informations tirées de ces différentes sources ont montré un changement insignifiant de l'affectation du sol au cours de la dernière décennie. Toutefois, les informations complémentaires sur l'évolution et l'état du glissement de terrain pendant cette période sont données dans ce travail. Des détails supplémentaires quant à l'élaboration de ces cartes et les caractéristiques, pertinences, et limites des données utilisées sont donnés par MUGARUKA (2015).

Affectation du sol et éléments à risque depuis 1959

En 1959 la zone d'étude est essentiellement occupée par un boisement, des aires cultivées et à végétation herbeuse et un marécage (Figure 4). Une zone de 6000 m² sans végétation apparaît au milieu du boisement. Le terrain marécageux observé met en évidence la présence d'une nappe aquifère peu profonde.

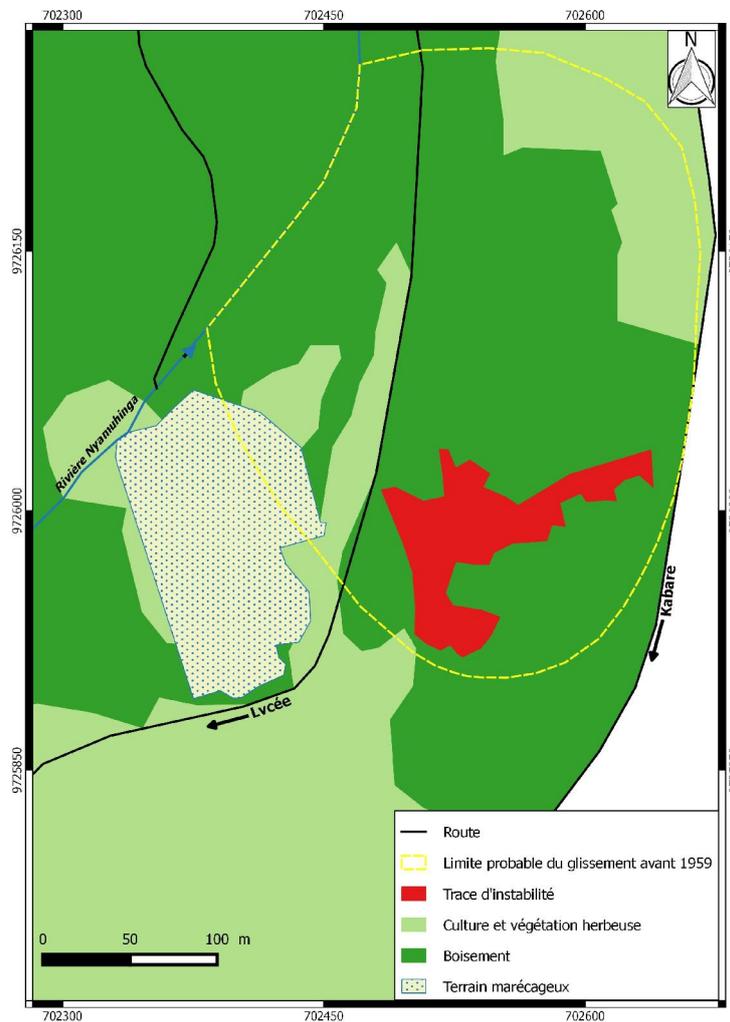


Figure 4: Glissement de Nyakavovo et affectation du sol en 1959. Projection: WGS 84/ UTM zone 35S.

En 1991, le secteur d'étude est essentiellement occupé par des aires cultivées (Figure 5). On remarque une diminution sensible du boisement et l'apparition de foyers résidentiels. Le marécage a complètement disparu et la zone qu'il occupait en 1959 est occupée par un terrain de football; seule

une fontaine témoigne d'une nappe peu profonde. Un ruissellement sur la pente cultivée développe une ravine.

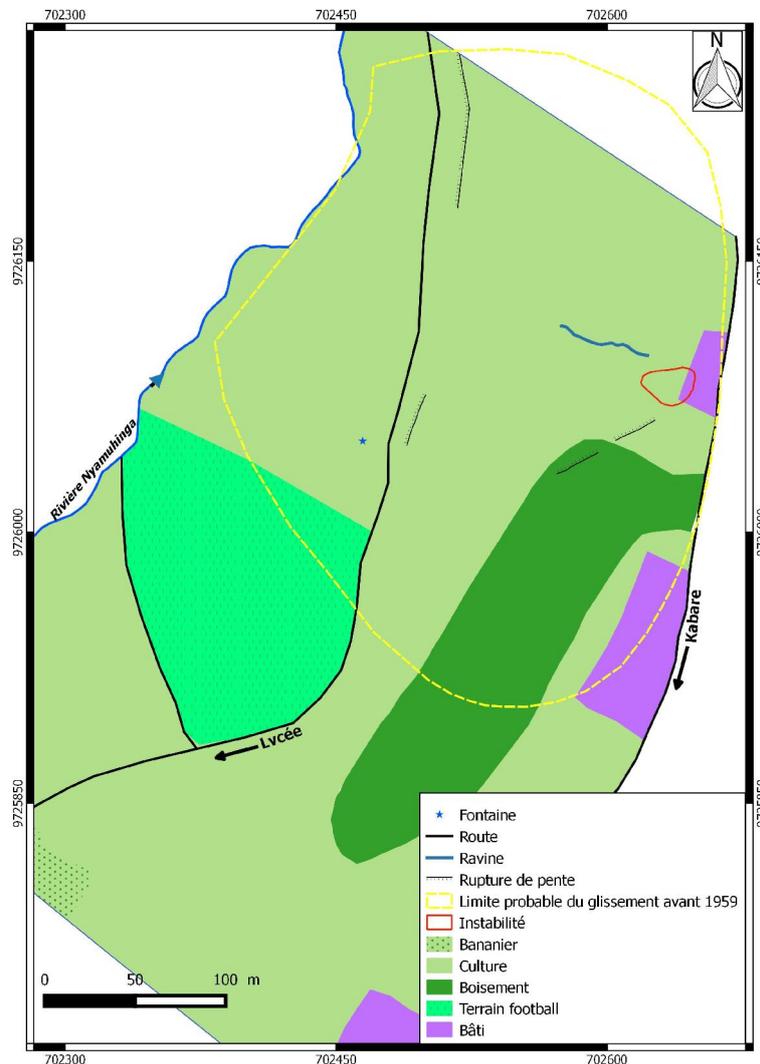


Figure 5: Glissement de Nyakavovo et affectation du sol en 1991. Projection: WGS 84/ UTM zone 35S.

En 1997, les aires cultivées et à végétation herbeuse gagnent beaucoup plus d'espace à la défaveur du boisement qui diminue sensiblement. Les habitations et les parcelles aplanies par des travaux de terrassements s'étendent sur une grande surface du versant. En plus de la fontaine, deux sources d'eau sont observables à côté du terrain de football. Une grande portion de la route qui mène vers le territoire de Kabare est déplacée et la route menant vers le lycée Nyakavogo est fortement abimée (Figure 6). L'occupation du versant de Nyakavogo par les réfugiés rwandais en 1994 a beaucoup influencé le changement de l'affectation du sol.

En 2015, un effort de reboisement s'observe, réduisant ainsi les aires cultivées, en jachère et à végétation herbeuse. On observe des suintements sur les berges de la rivière et la réapparition d'un marécage à l'endroit qu'occupaient en 1997 les sources et la fontaine à côté du terrain de football. Ce marécage est la source d'un affluent de la rivière (Figure 7). On remarque un accroissement de nombre des maisons aux environs du glissement et l'apparition dans le paysage d'une tuyauterie de distribution urbaine de l'eau. Le drainage est effectué par une ravine recevant les eaux venant de la route qui va à Kabare. L'exploitation de matériaux de construction dans la rivière laisse à nu son lit et favorise l'incision verticale.

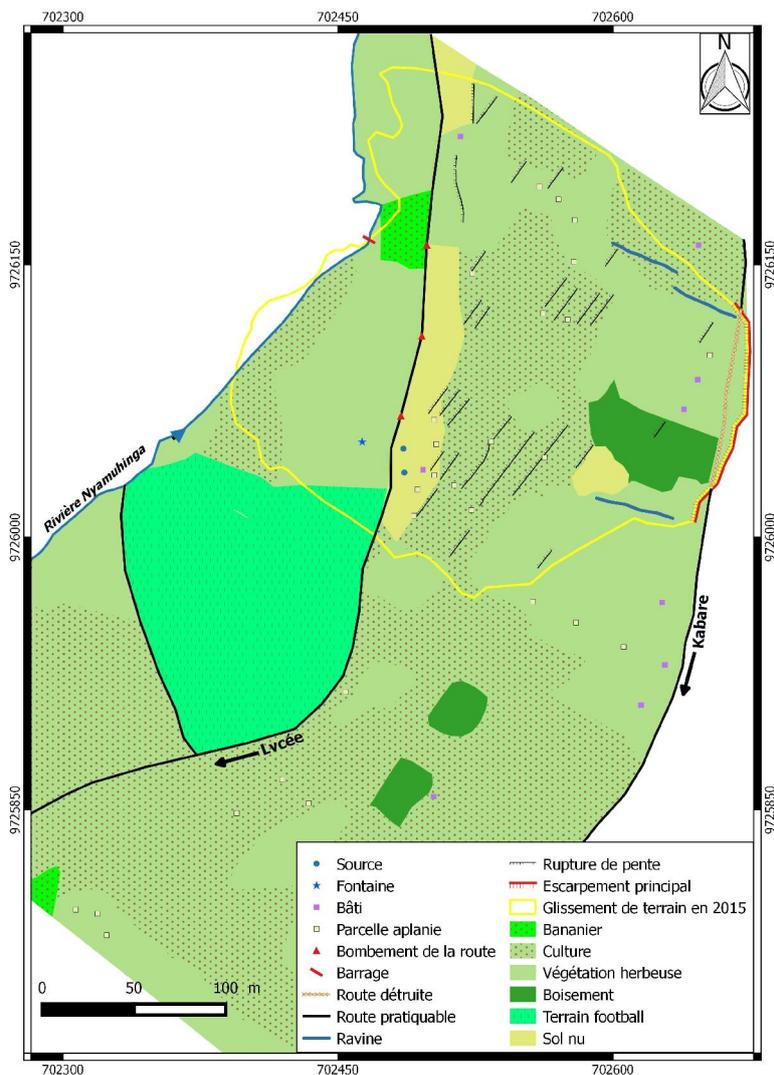


Figure 6: Glissement de Nyakavovo et affectation du sol en mai 1997.

Cette figure représente la situation du glissement deux semaines après le début de la réactivation de mai 1997. La partie de la route présentant de bombements est complètement détruite à la fin de 1997. Projection: WGS 84/ UTM zone 35S.

Historique du glissement depuis 1959

L'analyse des photographies aériennes de 1959 montre que le glissement de terrain est déjà présent à cette époque, qu'il est en contact avec la rivière, et affecte le versant sur la totalité de sa hauteur (Figure 4). La morphologie du glissement et la forme altérée de ses limites, indique qu'il s'agit d'un processus d'un certain âge. Aucune donnée sur l'historique du glissement avant 1959 n'est disponible mais la présence d'une route construite à l'époque coloniale à travers le pied du glissement atteste que les ingénieurs de cette époque ne se sont probablement pas rendu compte de la présence de l'instabilité. Ou du moins, que ce glissement ne présentait pas de trace d'activité qui auraient pu attirer la méfiance des ingénieurs. En 1959, une grande partie du glissement est recouverte d'un boisement bien développé. En dehors du glissement, ce boisement disparaît au profit de champ de cultures, alors que la morphologie topographique générale du versant reste la même. La présence du boisement laisse supposer que les conditions topographiques et hydrologiques locales n'étaient pas favorables aux pratiques agraires. Ceci est vraisemblablement lié à la présence d'instabilités du sol dans le glissement. La zone sans végétation au milieu du boisement sur le glissement est aussi due à une instabilité de la pente (Figure 4).

En 1991, ILUNGA (1991) observe un petit mouvement translationnel superficiel assez rapide dans la partie supérieure du glissement. Cette instabilité est observée dans des matériaux hétérogènes

sur une pente de 27°. Elle est orientée est-ouest et s'étend sur 450 m² dans une zone cultivée (Figure 5). Une ravine et des ruptures de pentes sont observées en aval de la zone active.

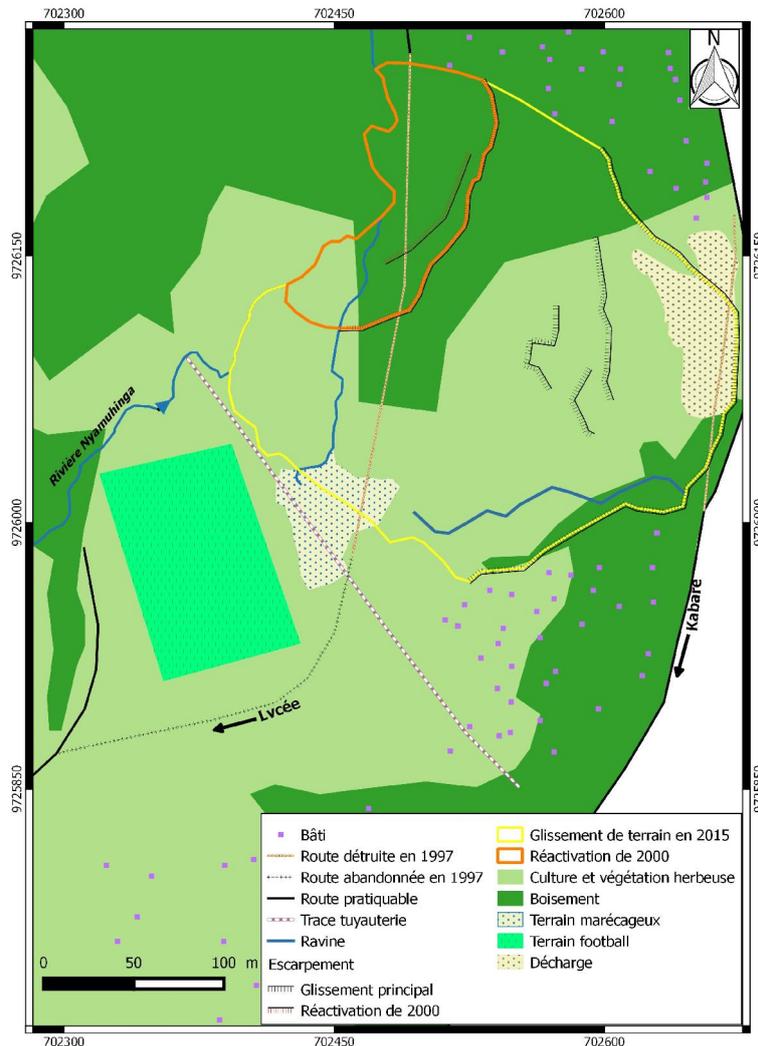


Figure 7: Glissement de Nyakavovo et affectation du sol en 2015. Projection: WGS 84/ UTM zone 35S.

En 1997, dans la deuxième quinzaine du mois de mai, une réactivation sur cinq hectares se déclenche, elle affecte une très grande partie du glissement et atteint la rivière (LUKIGE, 1997). Le déplacement au niveau de l'escarpement principal détruit la route qui mène vers Kabare et une conduite d'eau le long de celle-ci. Cette dernière déverse 9600 m³ d'eau dans le corps de la masse déplacée. Le drainage de la route est aussi perturbé et des ravines se mettent en place et se déverse dans le glissement (Figure 6). Des mesures de la hauteur de l'escarpement principal sur une période de 16 mai 1997 au 28 décembre 1997 montrent que les déplacements sont en moyenne de 7 cm par jours jusqu'au 09 août puis ils diminuent à 4 cm par jour jusqu'au 14 décembre, ensuite le mouvement s'accélère jusqu'à 38 cm par jour au 28 décembre; au total on observe un déplacement cumulé de 15 m (LUKIGE, 1997). Des secousses sismiques ont été ressenties dans la région avant et pendant la période de ce mouvement (MUNYOLOLO *et al.*, 1999).

Dans le corps du glissement il y a une succession des ruptures de pente assimilées aux escarpements secondaires qui témoignent du comportement rotationnel successif du mouvement. Dans le pied du glissement, on observe des bombements sur la route (Figure 6) qui évoluent jusqu'à sa destruction complète quatre mois plus tard; le mouvement est tel qu'il crée un barrage au niveau de la rivière avec la formation d'un petit lac quelques mois après le début de la réactivation. La rivière érode le barrage et retrouve son lit quelques semaines plus tard. Cette réactivation a entraîné la destruction de plus de quarante maisons et la défection des poteaux électriques (MUNYOLOLO *et al.*, 1999).

En 2000, il y a réactivation sur 8500 m² au pied du glissement dans sa partie nord. Cette dernière développe deux escarpements secondaires. Les deux escarpements de huit et six mètres de hauteur en 2015, respectivement pour l'escarpement amont et aval, ne montrent aucune trace de végétation à l'heure actuelle; ce qui traduit un mouvement qui est toujours actif (Figure 8). Le mouvement s'étire sur une largeur de 75 m et sur une longueur de 160 m parallèlement à la rivière. Au contact avec la rivière, des mouvements translationnels et de petites coulées boueuses sont observés sur le front de la masse principale déplacée.

En 2015, la réactivation de 1997 est toujours bien visible mais l'escarpement principal présente une végétation herbeuse, preuve de sa stabilisation progressive. Dans sa partie nord on observe une mise en décharge de déchets d'usine (Figures 7 et 8). Les deux ravines localisées au nord ont disparu à la suite de la réorganisation du drainage au niveau de la route alors que celle du sud est toujours présente mais n'est presque plus active. Des arbres inclinés sont toujours présents dans le glissement et les personnes qui y cultivent sont toujours témoins de mouvements du sol. Ceux-ci néanmoins ne perturbent pas trop leur activité. La partie réactivée en 2000 est toujours bien active et des mouvements de plusieurs dizaines de centimètres par an y sont constamment observés.



Figure 8: Vue panoramique du glissement de Nyakavogo en février 2015.

Le dépotoir (D) et la ravine (R) située au niveau de l'escarpement principal sont bien identifiables ainsi que la réactivation au niveau du pied du glissement. Les traits discontinus rouges représentent les escarpements de la réactivation de 2000 qui est toujours active. Le trait discontinu jaune représente le front de la réactivation sur lequel des coulées de bouée et des mouvements translationnels ont lieu.

DISCUSSION

La figure 9 présente sous la forme d'une ligne du temps une synthèse de la dynamique du glissement par rapport aux éléments naturels et anthropiques qui y sont associés. Le glissement de terrain, présent dans la zone d'étude depuis bien avant 1959, doit sa localisation à une combinaison probable des facteurs naturels suivant: pente forte, érosion de la rivière et sapement du versant, régolithe avec niveau d'argile développé sur une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres et nappe aquifère peu profonde.

Le remplacement progressif des zones de boisement par des aires cultivées et à végétation herbeuse de 1959 à 1997 (Figure 9), expose le versant à une action croissante de l'eau concentrée dans

le glissement par infiltration. Aussi, la construction de nouvelles maisons dans le glissement jusqu'en 1997 multiplie des aplanissements localisés qui sont favorables à l'infiltration à la défaveur du ruissellement.

Les informations données par MUNYOLOLO *et al.* (1999) quant aux secousses sismiques dans la période de la réactivation de 1997 ne sont pas très étoffées. Les recherches sur le lien entre la magnitude d'un tremblement de terre et la distance maximale de déclenchement de glissement de terrain à partir de l'épicentre montrent qu'il faut des tremblements de terre de magnitude supérieure à 4 pour voir apparaître des premières instabilités (KEEFER, 2002). Dans la période de la réactivation de 1997, les tremblements de terre de magnitude supérieure à 4 qui ont été localisés les plus proches du glissement de terrain de Nyakavogo ont eu lieu le 28/08/1996, le 11/02/1997 et le 11/11/1997 avec des magnitudes respectivement de 4.77, 4.86 et 4.52 et à des distances situées entre 30 et 60 km (DELVAUX *et al.*, 2017). KEEFER (2002) montre que pour de telles magnitudes, les zones d'influence des tremblements de terre sont de 10 à 15 km au maximum. Dans le cas qui nous intéresse, un tremblement de terre ne peut donc pas être à l'origine du déclenchement de la réactivation. Cela dit, des études récentes montrent que la distribution spatiale des glissements de terrain peut être aussi liée à la distribution de la sismicité faible (tremblement de terre de magnitude inférieur à 3), mais fréquente (VANMAERCKE *et al.*, 2017). Dès lors, il n'est pas à exclure que la sismicité régionale, voire les secousses ressenties dans la période de la réactivation, aient joué un petit rôle dans le conditionnement de l'instabilité.



Figure 9: Historique et facteurs naturels et anthropiques du glissement de Nyakavogo depuis 1959.

La quantité d'eau déversée dans le glissement par la coupure de la conduite d'eau doit avoir accéléré le mouvement dans la masse déplacée. La réorganisation de la rivière après le barrage créé par le mouvement de 1997 et l'érosion accentuée par les exploitations dans son lit peuvent avoir été des éléments préparatoires de la réactivation de 2000 (figure 9).

L'effort du reboisement observé en 2015 dans les aires résidentielles en évolution et la réduction sensible de pratiques culturelles favorisant l'infiltration, ont probablement aidé à la stabilisation du glissement. Cependant, la mise en décharge d'une partie de l'escarpement principal est un ajout de poids qui pourrait être à l'origine d'une future remise en mouvement. Le drainage de la route, bien que non modifié, ne semble plus être suffisamment actif pour maintenir le développement de la ravine qui est actuellement stabilisée. La partie réactivée en 2000 est toujours active en 2015 (Figure 9). Le sapement induit par la rivière y est important.

CONCLUSION

Cette étude consacrée à l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des facteurs naturels et anthropiques dans et autour du glissement de terrain de Nyakavogo a été réalisée en combinant analyse et enquête de terrain, photographies aériennes, image satellitaire et analyse d'archive.

Nous décrivons l'environnement naturel du glissement et retraçons sur une période de presque 60 ans son historique et celui de l'affectation du sol. Le reboisement observé au cours des dernières années a probablement aidé à la stabilisation du terrain après la réactivation de 1997. Néanmoins, la mise en décharge d'une partie de l'escarpement principal risque de le déstabiliser.

La connaissance des facteurs naturels et anthropiques des glissements de terrain est un élément indispensable pour une meilleure gestion des territoires affectés par ce phénomène. Cette étude menée sur un seul glissement de terrain nécessite d'être étendue sur l'ensemble de Bukavu pour être prise en compte dans l'élaboration d'un plan d'aménagement et de gestion de la ville.

La méthode utilisée dans ce travail est transférable du fait qu'elle se base sur des données accessibles dans beaucoup de cas et permet d'avoir de bons résultats sans investissement matériel lourd.

REMERCIEMENTS

Cette recherche est le fruit d'une collaboration réalisée dans le cadre des projets RA_S1_RGL_Georisk de l'Accord-Cadre Coopération belge au développement - Musée royal de l'Afrique centrale et GeoRisCA (Grant SD/RI/02A, Belgian Science Policy) coordonnés par le Musée royal de l'Afrique centrale. Le catalogue de la sismicité provient de Damien Delvaux, nous le remercions pour ses commentaires et suggestions ainsi que pour une relecture de la version finale de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- 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, 2: 263-278.
- DELVAUX, D., MULUMBA, J.-L., FIAMA, S.B., SEBAGENZI, M.N.S., KERVYN, F. & HAVENITH, H.-B., 2017. Seismic hazard assessment of the Kivu rift segment based on a new sismo-tectonic zonation model (Western Branch, East African Rift system). *Journal of African Earth Sciences*, 134: 831-855. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.10.004.
- DEWITTE, O., JASSELETTE, J.C., CORNET, Y., VAN DEN ECKHAUT, M., COLLIGNON, A., POESEN, J. & DEMOULIN, A., 2008. Tracking landslide displacements by multi-temporal DTMs: a combined aerial stereophotogrammetric and LIDAR approach in western Belgium. *Engineering Geology*, 99: 11-22.
- DEWITTE, O., VAN DEN ECKHAUT, M., POESEN, J. & DEMOULIN, A., 2009. Decadal-scale analysis of ground movements in old landslides in western Belgium. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 53: 23-45.
- DEWITTE, O., MONSIEURS, E., JACOBS, L., BASIMIKE, J., DELVAUX, D., DRAIDIA, S., HAMENYIMANA, J.B., HAVENITH, H.B., KUBWIMANA, D., MAKI MATEO, J.C., MICHELLIER, C., NAHIMANA, L., NDAYISENGA, A., NGENZEBUHHORO, P.C., NKURUNZIZA, P., NSHOKANO, J.R., SINDAYIHEBURA, B., TREFOIS, P., TURIMUMAHORO, D. & KERVYN, F., 2015. Mapping landslide processes in the North Tanganyika – Lake Kivu rift zones: towards a regional hazard assessment. *Geophysical Research Abstracts* 17: EGU2015-6726.
- GUZZETTI, F., CESARE, A., CARDINALI, M., FIORUCCI, F., SANTANGELO, M. & CHANG, K., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66. doi:10.1016/j.earscirev.2012.02.001.
- HUNGR, O., LEROUEIL, S. & PICARELLI, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11: 167-194.
- ILUNGA, L., 1989. Problèmes géologiques d'aménagement dans la zone de Kadutu (Ville de Bukavu, Zaïre). *Cahiers du Centre de Recherches Universitaires du Kivu (CERUKI)*, Nouvelle Série, 24: 77-101.
- ILUNGA, L., 1991. Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du Sud-Kivu. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 27: 209-228.
- JACOBS, L., DEWITTE, O., POESEN, J., DELVAUX, D., THIERY, W. & KERVYN, M., 2016. The Rwenzori Mountains, a landslide-prone region? *Landslides*, 13, 519-536.

- JONES, A., BREUNING-MADSEN, H., BROSSARD, M., DAMPHA, A., DECKERS, J., DEWITTE, O., GALLALI, T., HALLETT, S., JONES, R., KILASARA, M., LE ROUX, P., MICHELI, 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.
- KAMPUNZU, A.B., VELLUTINI, P.J., CARON, J.P.H., LUBULA, R.T., KANINIKA, M. & RUMVEGERI, B.T., 1983. Le volcanisme et l'évolution structurale du Sud-Kivu, Zaïre; un modèle d'interprétation géodynamique du volcanisme distensif intracontinental. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine* 7: 257-271.
- KANIKA, M., KAMPUNZU, A.B., CARON, J.P.-H. & VELLUTINI, P.J., 1981. Données nouvelles sur le volcanisme de la Haute-Ruzizi (Kivu, RDC). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 292: 1277-1282.
- KEEFER, D.K., 2002. Investigating landslides caused by earthquakes—a historical review. *Surveys in Geophysics*, 23: 473-510
- KNAPEN, A., KITUTU, M.G., POESEN, J., BREUGELMANS, W., DECKERS, J. & MUWANGA, A. 2006. Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon (Uganda): characteristics and causal factors. *Geomorphology*, 73: 149-165
- KULIMUSHI, M.S., MUGARUKA, B.T., MUHINDO, S.W., MICHELLIER, C. & DEWITTE, O. 2017 Glissements de terrain et éléments à risque dans le bassin versant de la Wesha, Bukavu, RD Congo. *Geo-Eco-Trop*. 41, 2: 233-248.
- LIMESELI, K., 1991. Cartographie géomorphologique du bassin versant de la Nyamuhinga (secteur amont de 3000 à 3500 m du Lac Kivu). Mémoire de licence, inédit, ISP-Bukavu.
- LONDA, L., BIREMBANO, B. & ILUNGA, L., 1989. Profils d'altération et lits argileux rouges des basaltes de Bukavu, *Cahiers du Ceruki, Nouv. Sér., Bukavu, Zaïre*, 24 : 77-100
- LUKIGE, L.C., 1997. Etude de l'évolution du versant oriental de la Nyamuhinga à Bukavu (secteur amont de 3000 à 3500 m du Lac Kivu). Mémoire de licence, inédit, ISP-Bukavu.
- MAKI MATEO, 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: 137-154.
- MIGABO, F., 2009. Cartographie géomorphologique du versant Ouest de la Ruzizi à Bukavu secteur de 500 m à partir de la rivière Giamba vers l'abattoir. Mémoire de licence, inédit, ISP-Bukavu.
- MIGOMBANO, U., 2011. Evaluation et cartographie par SIG du risque lié aux glissements de terrain à Bukavu (Sud Kivu, RD Congo). Mémoire de master, Faculté des Sciences, Université de Liège.
- MOEYERSONS, J., TREFOIS, 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.
- MUGARUKA, B.T., 2015. Facteurs physiques et anthropiques des glissements de terrain au nord-ouest de la commune de Bagira à Bukavu, Sud-Kivu. Mémoire en Etude et Gestion des risques géologiques, UOB-ISP, 48p.
- 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). *Mus. Roy. Afr. Centr., Dépt. Min. Rapp. Ann. 1997-1998*, 285-298.
- PASTEELS, P., VILLENEUVE, P., DE PAEPE, P. & KLERKX, J., 1989. Timing of the volcanism of the southern Kivu province: implications for the evolution of the western branch of the East African Rift system. *Earth and Planetary Science Letters*, 94: 353-363.
- PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L. & MCMAHON, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 1633-1644.
- PLAN ORSEC RDC, 2012. http://www.preventionweb.net/files/36425_36425planorsecversionfinale1.pdf
- SADIKI, N., 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.
- TREFOIS, PH., MOEYERSONS, J., LAVREAU, J., ALIMASI, D., BADRIYO, I., MITIMA, B., MUNDALA, M., MUGANDA, D.O. & NAHIMANA, L., 2007. Geomorphology and urban geology of Bukavu (R.D. Congo): interaction between slope instability and human settlement. In TEEUW, R.M. (Ed.) Mapping hazardous terrain using remote sensing. *Geological Society, London*, 283: 65-75.
- VAN DEN ECKHAUT, 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: 200-211.
- VANACKER, V., VANDERSCHRAEGHE, M., GOVERS, G., WILLEMS, E., POESEN, J., DECKERS, J. & DE BIEVRE, B., 2003. Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models

through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andes watersheds. *Geomorphology*, 52: 299–315.

VANMAERCKE, M., ARDIZZONE, F., ROSSI, M. & GUZZETTI, F., 2016. Exploring the effects of seismicity on landslides and catchment sediment yield: An Italian case study. *Geomorphology*. doi:10.1016/j.geomorph.2016.11.010.

VLAEMINCK, P., MAERTENS, M., ISABIRYE, M., VANDERHOYDONKS, F., POESEN, J., DECKERS, S. & VRANKEN, L., 2015. Coping with landslide risk through preventive resettlement. Designing optimal strategies through choice experiments for the Mount Elgon region. *Land Use Policy*, 51: 28.

