



Numéro spécial

Vulnérabilité du bâti face aux glissements de terrain: analyse spatio-temporelle à Bukavu (RD Congo)

Vulnerability of buildings exposed to landslides: a spatio-temporal assessment in Bukavu (DR Congo)

Clarisse BALEGAMIRE¹, Caroline MICHELLIER², Jean Berckmans MUHIGWA³,
Damien DELVAUX², Gérard IMANI³ & Olivier DEWITTE²

Abstract: Many cities of the South have been facing population growth for several decades. In regions sensitive to landslides, this growth can be an issue when people, often the most vulnerable, are forced to live on unstable slopes. Bukavu (DR Congo) is particularly affected by this situation. However, despite numerous slope instability in areas with very high population density, there is no reliable estimate of the building vulnerability facing these processes. The purpose of this research is to better understand these issues by focusing on a particularly sensitive area of the city. The structured observation of over 450 houses selected in various geomorphological constraints areas was carried out by observing cracks, tilted structures and other deformations. Damage is observed on 55 % of the buildings. The presence of different types of geomorphological constraints does not alone justify the damage to the houses. A changed use of slopes, economic constraints and land use policies that do not integrate the management of natural hazards are also involved. This research is a first step towards the study of vulnerability and the risk associated with landslides. It also allows to make some clarifications in order to improve land management.

Keywords: landslide, damage to buildings, geomorphological constraints, physical vulnerability, field survey

Résumé: De nombreuses villes du Sud font face à une croissance démographique soutenue depuis plusieurs décennies. Dans les régions sensibles aux glissements de terrain, cette croissance peut s'avérer problématique lorsque les populations, souvent les plus vulnérables, sont forcées de s'installer sur des pentes instables. La ville de Bukavu (RD Congo) est particulièrement concernée par cette situation. Cependant, malgré de nombreuses instabilités de pente dans des zones à très forte densité de population, il n'existe pas d'estimation fiable de la vulnérabilité du bâti face à ces processus. Le but de cette recherche est de mieux comprendre ces enjeux en se focalisant sur une zone particulièrement sensible de la ville. L'observation structurée de plus de 450 maisons sélectionnées dans différentes zones de contraintes géomorphologiques a été réalisée en observant fissures, inclinaison et autres déformations. Des dégâts sont observés sur 55 % des ouvrages. La présence de différentes natures de contraintes géomorphologiques ne justifie pas à elle seule les dégâts aux maisons. La modification de l'utilisation des versants, les contraintes économiques et les politiques d'aménagement du territoire qui n'intègrent pas la gestion des risques naturels interviennent également. Cette recherche représente une première étape vers l'étude de la vulnérabilité et du risque associé aux glissements de terrain. Elle permet aussi d'apporter certains éclaircissements en vue d'une amélioration de la gestion de l'aménagement du territoire.

Mots clés: glissement de terrain, dégât au bâti, contrainte géomorphologique, vulnérabilité structurelle, enquête de terrain

¹ Centre de Recherche en Sciences Naturelles, Département de Géophysique, Lwiro, DR Congo. Email: clarabalegamire@gmail.com

² Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique. Emails: caroline.michellier@africamuseum.be, olivier.dewitte@africamuseum.be, damien.delvaux@africamuseum.be

³ Université Officielle de Bukavu, Faculté des Sciences et Sciences Appliquées, RD Congo. Email : jeanmuhigwa@yahoo.fr

INTRODUCTION

De nombreuses villes du Sud font face à une croissance démographique soutenue depuis plusieurs décennies (DI RUOCCO *et al.*, 2015). Cet accroissement est souvent non contrôlé et est à la base d'occupation des zones moins propices aux implantations urbaines (CASCINI *et al.*, 2005). Dans les régions sensibles aux glissements de terrain, cette croissance peut s'avérer problématique lorsque les populations, souvent les plus vulnérables, sont forcées de s'installer sur des pentes instables (THOURET & D'ERCOLE, 1996; TCHOTSOUA, 2007; MALDONADO & CHIO CHO, 2012).

Les infrastructures (bâtiments, routes, ponts,...) construites dans ces zones sont également vulnérables (vulnérabilité physique ou structurelle). Elles sont exposées aux contraintes des glissements qui peuvent être différentes en fonction des processus qui interviennent (VAN WESTEN *et al.*, 2006). La vulnérabilité varie aussi selon les caractéristiques de chaque infrastructure. Pour les maisons plusieurs facteurs sont pris en compte. C'est par exemple la géométrie, les propriétés des matériaux, l'état d'entretien, les fondations et la localisation dans le glissement (COROMINAS *et al.*, 2013). Les effets induits par les mouvements de masse peuvent être accentués par la morphologie urbaine (THOURET & D'ERCOLE, 1996; TCHOTSOUA, 2007; MALDONADO & CHIO CHO, 2012).

La ville de Bukavu (RD Congo) est particulièrement concernée par une urbanisation sur des pentes instables. Une proportion importante de son territoire urbain est affectée par des mouvements gravitaires variés (MOEYERSONS *et al.*, 2004). Cependant, malgré de nombreuses instabilités de pente dans des zones à très forte densité de population, il n'existe pas d'estimation fiable de la vulnérabilité du bâti face à ces processus.

Le but de cette recherche est de mieux comprendre ces enjeux de vulnérabilité en se focalisant sur une zone particulièrement sensible de la ville où différents processus gravitaires sont en interaction. Plus spécifiquement, cette recherche se focalise sur l'état du bâti et cherche à apporter des éclaircissements sur les facteurs qui favorisent (ou causent) sa dégradation. Cette étude s'inscrit dans une logique visant à améliorer la gestion de l'aménagement du territoire.

ZONE D'ETUDE

La ville de Bukavu se trouve dans la branche ouest du Rift est-africain sur les rives du lac Kivu en RD Congo (Figure 1).

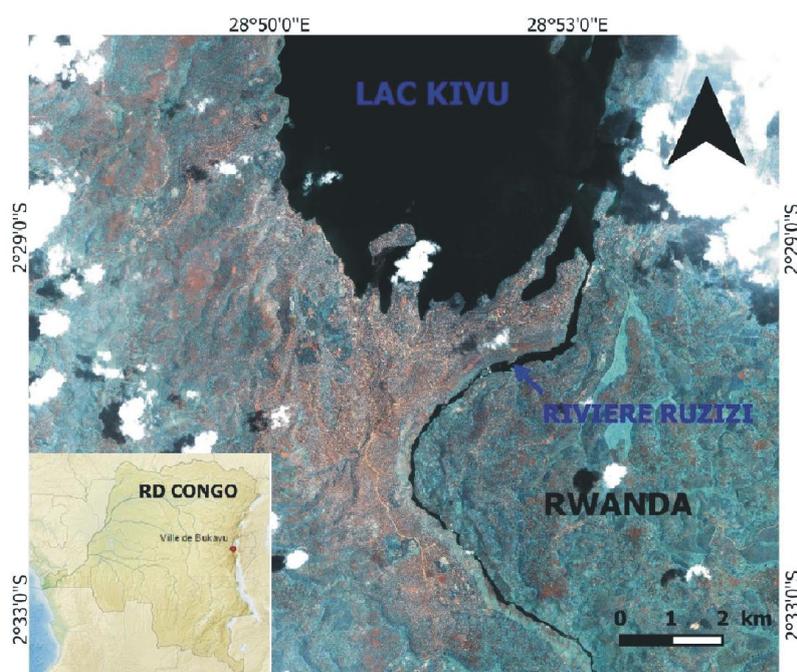


Figure 1: Localisation de la zone d'étude. Fond de la carte: image Pléiades juillet 2013.

Cette région est naturellement disposée aux glissements de terrain. Le relief accidenté, le sol volcanique facilement altérable en argile, le climat, la sismicité la rendent favorable aux mouvements de masse (MAKI MATEO & DEWITTE, 2014). Le peu d'études qui ont été récemment faites sur le sujet dans la région montrent que les conséquences de ces glissements s'expriment en pertes en vies humaines, dommages ou pertes de bâtiments et pertes de terres agricoles notamment (MAKI MATEO & DEWITTE, 2014; JACOBS *et al.*, 2016).

La ville de Bukavu est traversée par une vallée probablement d'origine tectonique (« micrograbén ») orientée N-S qui s'étire dans des lithologies de compositions chimiques différentes. Les roches du Précambrien sont couvertes d'épaisses coulées de laves du Tertiaire et du Quaternaire (TREFOIS *et al.*, 2007; MOEYERSONS *et al.*, 2004). Le climat est pluvieux (1500 mm) et tempéré par l'altitude avec une saison sèche de juin à août.

MOEYERSONS *et al.* (2004) montrent que plus de 15 % de la surface totale de la ville est couverte par des glissements de terrain (Figure 2). L'occurrence des plus grands glissements pourrait être liée à l'activité sismo-tectonique (MUNYOLOLO *et al.*, 1999) comme le suggère leur distribution par rapport à la structure des failles (MOEYERSONS *et al.*, 2004). La morphologie (relief accidenté), la géologie (failles, formations argileuses), le climat (humide) et la localisation (dans le rift) la rendent favorable aux glissements de terrain (MIGOMBANO, 2011). Aucune date n'existe quant à l'occurrence des glissements dans la ville, mais leur présence est antérieure au développement colonial comme le révèle l'analyse de photographies aériennes prises dans les années 50 (MOEYERSONS *et al.*, 2004). Cette étude et des travaux plus récents (TREFOIS *et al.*, 2007; BALEGAMIRE, 2015) mettent en avant le fait que la grande majorité des instabilités de pente actives aujourd'hui sont des remobilisations qui ont lieu au sein de ces glissements plus anciens. Ces études soulignent la complexité des interactions entre ces différents processus gravitaires et mettent en évidence des zones beaucoup plus dynamiques que d'autres. La présence de grandes ravines dans les glissements de terrain est aussi soulignée. Leur origine, bien que souvent anthropique, est favorisée par la présence de matériaux peu compacts dans les masses déplacées. Ces grandes ravines, en se développant, augmentent à leur tour l'instabilité des pentes.

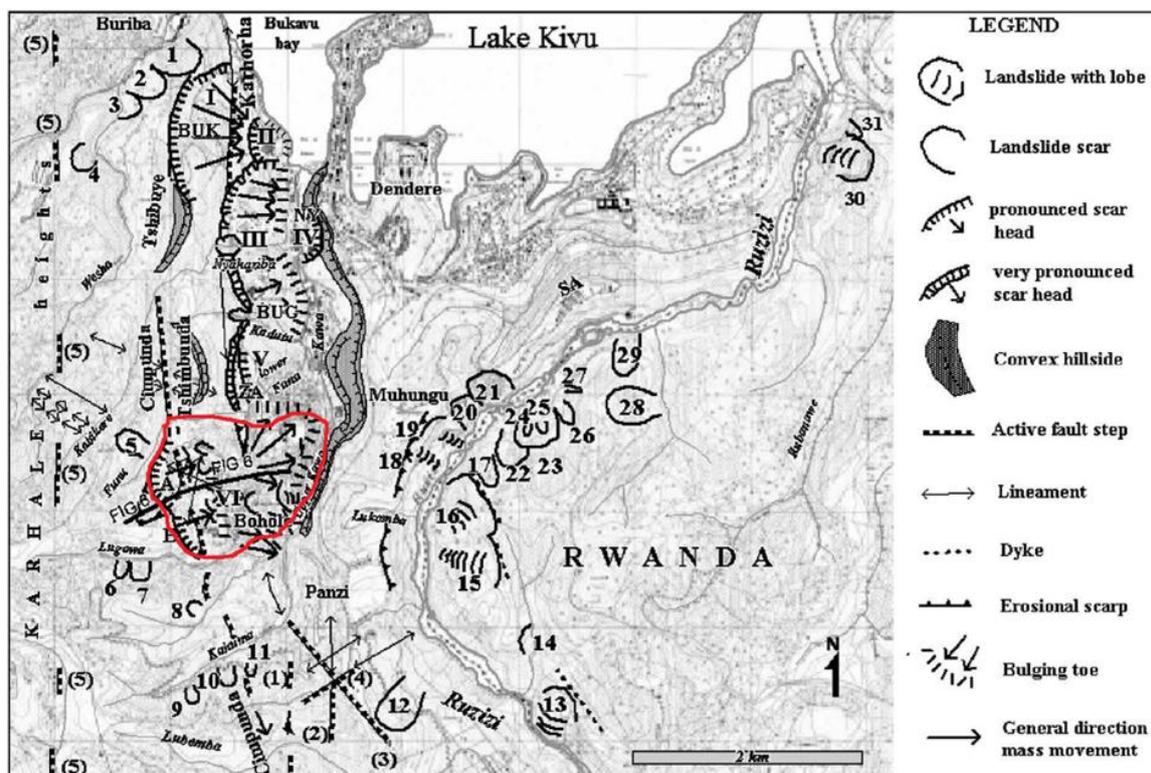


Figure 2: Carte morphologique de Bukavu montrant le contour du glissement de Funu en rouge (figure modifiée d'après MOEYERSONS *et al.*, 2004).

Depuis 1960 aucun programme de logements sociaux n'a été poursuivi ou entrepris que ce soit par les pouvoirs publics ou les entreprises privées, et ce malgré la forte croissance démographique enregistrée annuellement (d'après l'Institut National des Statistiques). Chaque citoyen construit selon ses moyens, parfois sans respect du plan d'urbanisation et d'aménagement. Et avec la situation de guerre qui a donné lieu à un intense exode rural, les nouveaux citadins construisent des cases en bois, parfois en une journée, ainsi que des maisonnettes en maçonnerie faite d'une compression d'argile, de paille et de pierres inadaptées aux conditions des terrains (MUHIGWA & BISHIKWABO, 2010) (Figure 3). Ces constructions anarchiques peuvent avoir une influence sur la dynamique des glissements présents dans la ville (TREFOIS *et al.*, 2007).

Parmi les grands glissements de terrain de la ville, nous observons celui de Funu (Figures 2 et 3) qui s'étend sur environ 200 ha (longueur 1600 m, largeur 1250 m, hauteur 300 m). Le glissement de Funu est un grand glissement profond complexe où différents types de processus gravitaires interagissent dans des contextes topographiques variés. Certaines parties sont clairement actives et des dégâts importants y sont constamment observés au niveau des bâtiments et autres infrastructures. A contrario, dans d'autres secteurs, la dynamique est beaucoup plus limitée, voire inexistante, du moins dans la période actuelle. Ce glissement qui a connu plusieurs vagues d'urbanisation depuis les années 50 avec des constructions aux architectures différentes est une des zones les plus densément peuplées de la ville. Sur la Figure 3, l'image Pléiades montre très clairement l'importante densité et la variété du bâti. Plusieurs milliers de bâtiments sont présents dans le glissement, la très grande majorité étant des maisons d'habitation. C'est sur et autour de ce glissement représentatif des conditions géomorphologiques et urbaines que cette recherche se focalise.

METHODOLOGIE

Sur base d'une image satellite Pléiades acquise en juillet 2013 et dont l'affinage panchromatique permet de travailler à une résolution spatiale de 50 cm, les levés et les enquêtes de terrain ont été réalisés en juin 2014 sur et autour du glissement de Funu (Figure 3).

VAN WESTEN *et al.* (2006) montrent clairement que selon le type de glissement de terrain les dégâts sur les éléments à risque peuvent être différents. Dans notre zone d'étude où différents processus gravitaires se côtoient, il importe de délimiter avec soin les différentes zones de contraintes géomorphologiques qui y sont présentes. Il s'agit de la première étape de notre recherche.

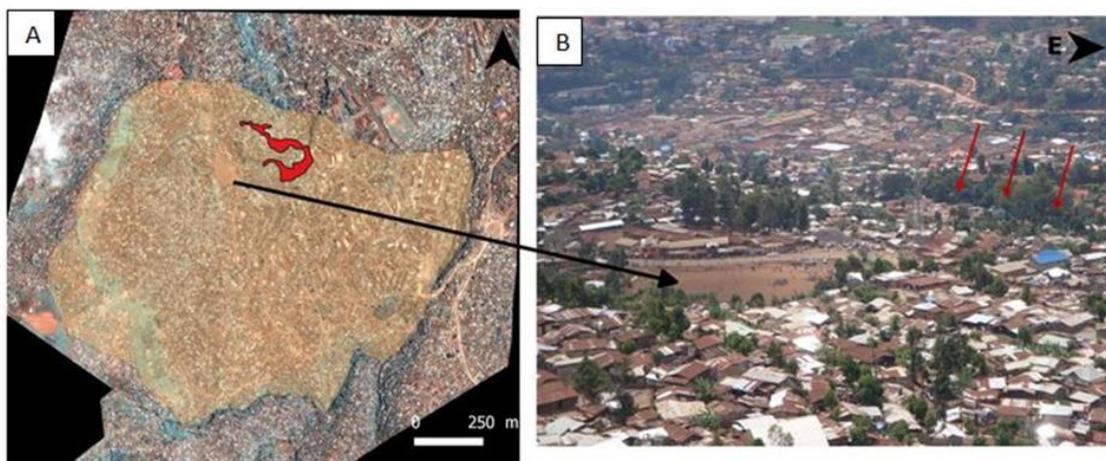


Figure 3: Densité et variété du bâti dans la zone d'étude.

A: Vue sur l'image Pléiades (juillet 2013) avec le glissement de Funu en jaune.

En rouge, une ravine en aval du terrain de football de Funu indiqué par la flèche noire.

B: Vue sur le terrain de football (12/05/2013). Les flèches rouges indiquent une partie de la ravine de l'image A.

Vu les milliers de maisons présentes dans la zone d'étude (Figure 3), nous nous sommes focalisé sur un échantillon de 479 points (Figure 4) afin de pouvoir mener des analyses statistiquement fiables sur les différentes zones de contraintes. La sélection de ces maisons s'est faite de manière aléatoire en excluant les zones non urbanisées (forêts, rivières, etc.) (BALEGAMIRE, 2015). Nous

avons estimé la représentativité de l'échantillon en se basant sur la distribution des points sur la zone d'étude.

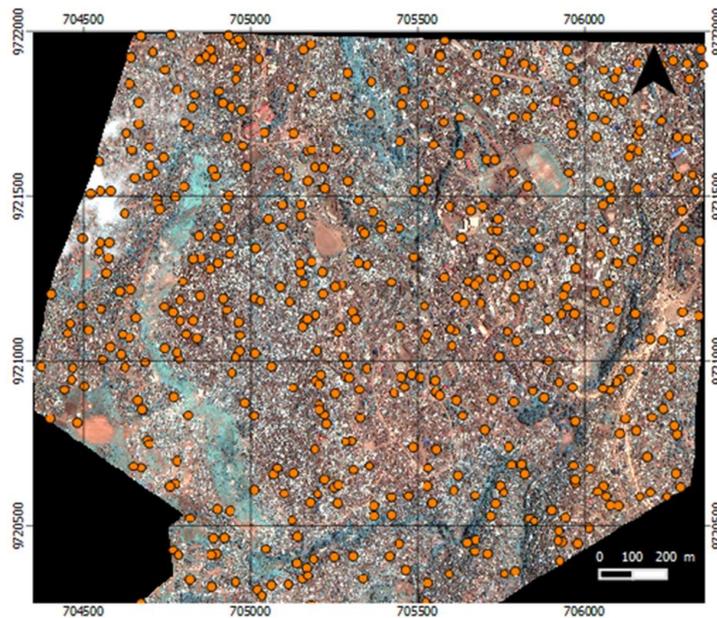


Figure 4: Localisation des points d'échantillonnage (en orange sur l'image Pléiades) représentant les maisons sur la zone d'étude.

A la suite d'observations de terrain renforcées par des enquêtes auprès des populations locales, nous avons relevé l'état des maisons (abîmé ou intact) qui peut être influencé par certains facteurs (âge, délai de reconstruction, fondations, implantation de végétation de soutien, canalisation d'eau, construction de murs de soutènement). Ces observations ont concerné les maisons construites à l'intérieur du glissement et en dehors afin de pouvoir discerner les problématiques propres aux contraintes liées aux instabilités. Les caractéristiques des maisons et leur emplacement ont été examinés afin de connaître leur degré d'exposition par rapport aux contraintes.

Les variables utilisées pour analyser l'impact de contraintes géomorphologiques peuvent être réparties en quatre groupes:

- Caractéristiques intrinsèques de la maison: âge de la maison, présence de fondations, matériaux de construction, délai de reconstruction.
- Caractéristiques extrinsèques de la maison: construction de murs de soutènement, présence de végétation de soutien, canalisation des eaux usagées et d'écoulement des toits.
- Localisation: correspond à l'emplacement de chaque maison par rapport aux zones de contraintes (voir résultats et Figure 5).
- Observation proxy: se rapporte à la variable « arbre ». Il ne renseigne pas directement sur l'état de la maison bâtie mais sur l'état du sol où elle est érigée. C'est un marqueur d'instabilité d'une zone lorsqu'il a été incliné suite aux mouvements du sol (Figure 5).

RESULTATS

Dynamique spatio-temporelle du glissement de Funu et délimitation des zones de contraintes géomorphologiques

Les analyses que nous avons menées montrent que l'ensemble de notre zone d'étude n'est pas affectée de manière identique par les instabilités sur toute son étendue (Figure 5). Certaines zones se montrent plus stables que d'autres. Il y a la zone des glissements, qui regroupe le glissement de Funu, ainsi que des glissements au nord-est et nord-ouest et la zone sans glissement. A l'intérieur du glissement de Funu, certains endroits sont également plus dynamiques que d'autres. Ces endroits constituent des zones de contraintes géomorphologiques plus élevées. C'est le cas de la zone à

l'intérieur et/ou en aval de l'escarpement principal, autour des ravines, des rivières et des fractures en proximité du terrain de football de Funu. La partie autour des ravines et du terrain de football montre une instabilité accrue; c'est la zone de contraintes la plus active.

Nous avons observé des arbres inclinés par endroit, précisément dans ces zones de contraintes. Le sens d'inclinaison de ces arbres est influencé par la rivière, l'escarpement ou la ravine selon qu'ils sont plantés à leur proximité (Figure 5).

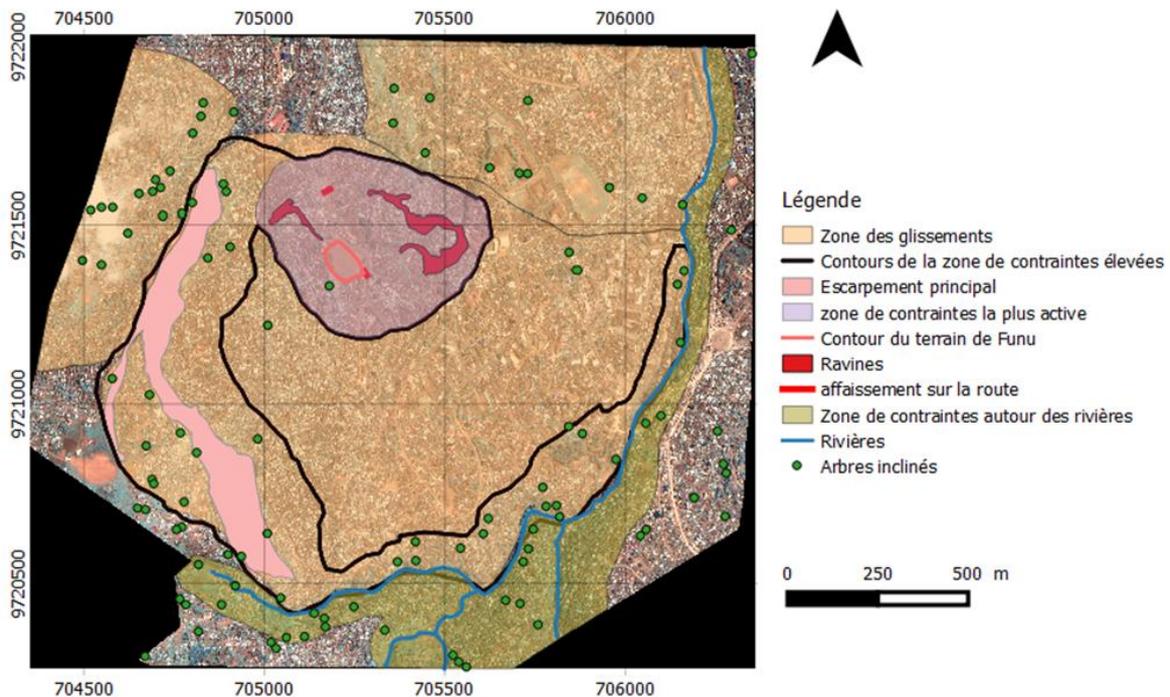


Figure 5: Délimitation des zones de contrainte.

En détail, voici ce que nous pouvons dire sur les zones de contraintes géomorphologiques présentes dans la zone d'étude. A l'intérieur du glissement de Funu nous observons trois catégories de contraintes:

- Les contraintes liées directement à la dynamique du glissement: c'est le cas des fractures actives en proximité du terrain de football (Figure 6). Ces fractures sont notamment marquées par la dégradation de la route principale traversant la zone. Elles se développent continuellement au moins depuis 2006, moment où la route a été asphaltée et où leur évolution a pu être identifiée aisément. Les déplacements sont de plusieurs dizaines de centimètres par an et au niveau de la route ils engendrent des structures typiques de zone de déformation extensive. La dynamique du glissement est également marquée par la présence d'arbres et de poteaux inclinés répartis dans plusieurs zones (Figure 5).

- Les contraintes de mouvement gravitaire liées à la topographie résultante de la mise en place du glissement, indépendantes de sa dynamique intrinsèque: ce sont les contraintes présentes sur l'escarpement principal (Figure 7). Des affaissements localisés, des mouvements lents le long de fractures, des éboulements, des chutes de bloc et des coulées de boue y sont observés au cours de chaque saison des pluies. Une partie de ces processus est favorisée par l'action anthropique. En amont de l'escarpement l'urbanisation concentre le ruissellement et l'extraction de matériaux de construction au niveau même de l'escarpement fragilise la cohésion des matériaux en place (basalte et matériaux d'altération) et accentue la topographie. A la base de l'escarpement, le sol développé sur les colluvions indique un âge relativement ancien de l'occurrence du glissement de Funu, bien plus ancien que le développement urbain.

- Les contraintes gravitaires liées à des processus d'érosion dû au ruissellement de l'eau sur le glissement: ces contraintes font référence aux instabilités de pente liées au développement rapide de grandes ravines qui ne sont pas liées à la dynamique initiale du grand glissement (Figure 8). Ces ravines évoluent en permanence et chaque saison des pluies apporte de nouvelles instabilités.

L'origine de ces ravines est liée à un mauvais aménagement du territoire qui favorise la concentration des eaux de ruissellement. Selon les témoignages, les principales ravines en proximité aval du terrain de football (Figure 6) ont comme origine la rupture de canalisations d'eau usée (il y a plus de 15 ans) mal adaptées à la topographie et non entretenues. La ravine à l'amont du terrain de football est liée à la présence d'une route construite selon la plus grande pente et favorisant la concentration de l'écoulement (par exemple, MAKANZU IMWANGANA *et al.*, 2014) (Figure 6). Le développement rapide de ces grandes ravines est certainement aussi lié à la présence de matériaux meubles déstructurés suite à la formation du glissement de terrain et à la présence de sources (Figure 8). Les ravines à l'aval du terrain de football de Funu sont responsables de l'érosion d'une grande quantité de matériaux. S'il s'avère que ces matériaux contribuent à la stabilité de la masse déplacée du grand glissement, leur érosion peut alors expliquer une partie de l'instabilité détectée autour du terrain de football de Funu situé en amont (Figure 6).

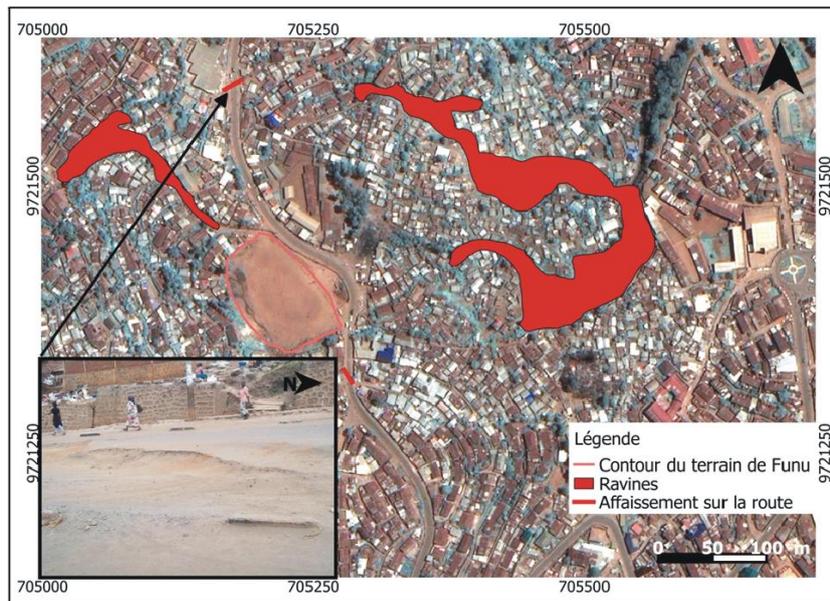


Figure 6: Dégradation de la route liée aux affaissements autour du terrain de foot. (03/07/ 2013)



Figure 7: Escarpement principal du glissement de Funu.

Les flèches noires indiquent les zones actives de l'escarpement principal (éboulements, coulées) avec des dépôts de colluvions au pied. Les flèches rouges et jaunes montrent les endroits où des matériaux de construction sont exploités. Les flèches jaunes indiquent le type de bloc qui peut dévaler l'escarpement. (Photo: 12/05/2013).



Figure 8: Zones de contraintes liées au développement du ravinement.

Les images **a** et **b** ont été prises au même endroit mais à des périodes différentes. L'image **a** en octobre 2012 et **b** en juin 2014. Elles montrent l'évolution de la morphologie. Les flèches rouges indiquent la présence d'une source. Les images **c**, **d** et **e** prises le 03/07/2013 montrent les conséquences des ravines: perte des parcelles, maisons abandonnées et détruites suite à l'évolution des têtes des ravines (délimitées approximativement par les courbes rouges sur les images **c** et **d**).

En dehors du glissement de Funu, il y a deux autres glissements de plus petite ampleur situés au nord-est et nord-ouest et les pentes fortes en proximités des rivières au sud et sud-est (Figure 5). La date exacte de leur apparition n'est pas connue, mais ils sont déjà présents sur des photographies aériennes de 1959 (MOEYERSONS *et al.*, 2004). Le degré d'évolution de ces glissements est différent. Celui du nord-ouest semble avoir une dynamique plus marquée. De jeunes arbres inclinés y sont observés (Figure 5). La présence des rivières au sud et sud-est représente aussi une zone de contraintes favorisant l'instabilité des pentes en raison de leur dynamique, de l'incision des versants et de la présence de nappes phréatiques fluctuantes. Les maisons proches du lit des rivières sont plus exposées.

De manière globale, les contraintes à l'intérieur des glissements font davantage de dégâts sur le bâti, en particulier celles liées aux processus d'érosion en ravine (Figure 8). Elles sont responsables de pertes de parcelles, d'abandon de maisons, ainsi que de leur destruction.

Etat d'endommagement des maisons selon la localisation

L'état d'endommagement des maisons est déterminé à partir des observations de terrain. Deux états d'endommagement sont utilisés dans cette étude. L'état abîmé et l'état intact. L'état abîmé fait référence à une maison fissurée, inclinée et/ou déformée. L'état intact concerne les maisons qui ne présentent ni fissure, ni inclinaison ni toute autre déformation. Les maisons abîmées sont plus nombreuses que les maisons intactes sur l'ensemble de la zone d'étude (58 %). La Table 1 montre que la proportion de maisons abîmées est différente pour chaque zone. Dans les zones de contrainte, plus de la moitié des maisons sont abîmées. Plus spécifiquement, dans la zone la plus active, 76 % des maisons sont abîmées.

Dans le glissement de Funu, la zone sans contraintes élevées montre une situation similaire à la zone de contraintes élevées. Plus de la moitié (53 %) des maisons abîmées de cette zone ont plus de

25 ans dont 40 % ont été construites entre 1950 et 1955. Nous remarquons aussi que la proportion de maisons abîmées dans la zone hors rivières et hors glissement n'est pas négligeable (48 %). 54 % de ces maisons ont moins de 26 ans et la majorité (62 %) n'a pas de canalisation d'eau. 54 % n'ont pas de fondations. Pour ces deux zones les causes d'endommagement ne sont pas dues aux contraintes géomorphologiques étudiées.

Table 1: Etat d'endommagement des maisons selon les zones de contraintes géomorphologiques

zone	Abîmé	Abîmé(%)	Intact	Intact (%)	Total
Dans glissements	211	61	133	39	344
Hors glissements	68	50	67	50	135
Funu - contraintes élevées	72	62	44	38	116
Funu - sans contraintes élevées	75	61	47	39	122
Funu - contraintes la plus active	29	76	9	24	38
Autour des rivières	29	54	25	46	54
Hors rivières et glissements	39	48	42	52	81

Influence du type de maison et de construction

Les maisons observées sont construites avec différents matériaux: briques, planches, « semi-durable » (maisons en bambous et/ou en terre sur lesquelles une couche de mélange sable-ciment est ajoutée), bambous, terre, bambous + terre, bambous + pierres, bambous + pierres + terre. Les maisons qui ne sont pas en briques représentent 70 % de notre échantillon et sont distribuées sur toute l'étendue de la zone étudiée (Figure 9).

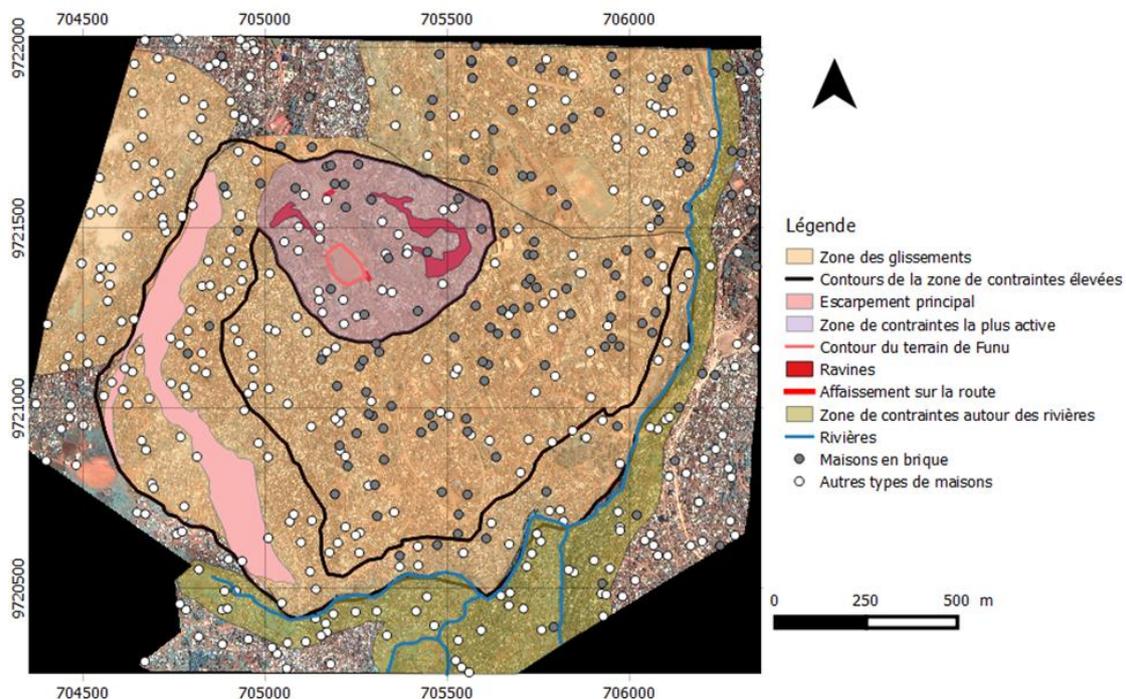


Figure 9: Distribution des maisons selon leurs matériaux de construction.

Toutes les maisons en briques ont des fondations, tandis que 57 % des maisons en planches en présentent. 81 % des maisons “semi-durables” et 78 % des maisons en autres types de matériaux de construction (bambous, terre, bambous + terre, bambous + pierres, bambous + pierres + terre) en ont

également. En considérant l'état abîmé des maisons qui ont des fondations pour chacune des zones, nous trouvons que les maisons localisées dans les zones de contraintes sont les plus abîmées (Table 2)

Table 2: Etat d'endommagement des maisons avec fondations (en %) selon les matériaux de construction
Avec ZG: zone des glissements; ZSG: zone sans glissements; ZCE: zone de contraintes élevées dans Funu; ZPA: zone de contraintes la plus active dans Funu; ZAR: zone autour des rivières; ZHRG: zone hors rivières et glissements.

Matériaux	ZG		ZSG		ZCE		ZPA		ZAR		ZHRG	
	Abîmé	Intact										
Briques	57	43	40	60	64	36	80	20	43	57	38	62
Planches	43	57	8	92	32	68	40	60	0	100	11	89
Semi-durables	78	22	67	33	92	8	100	0	100	0	55	45
Autres	86	14	75	25	82	18	50	50	0	100	100	0

D'après nos résultats, la localisation détermine l'état d'endommagement de la maison davantage que la présence de fondations selon les matériaux de construction (Table 2). Pour les maisons en briques, plus une zone est instable plus les maisons sont abîmées. C'est le cas également des maisons « semi-durables » qui sont abîmées même dans les zones sans contraintes. Alors que pour les maisons en planches, la proportion de maisons abîmées est faible lorsqu'elles ont des fondations. La figure 10 montre aussi que l'influence de la présence de fondations sur l'état d'une maison dépend des matériaux de construction.

Effets de l'ancienneté de la maison

L'âge a pu être précisé pour 337 des 479 (71 %) des maisons échantillonnées. Pour les autres (29 %), les occupants (locataires ou propriétaires) n'en ont jamais eu connaissance ou ils l'ont simplement oublié. L'âge des maisons varie entre un mois et 65 ans. Nous avons groupé ces maisons en deux catégories sur base des connaissances que nous avons du terrain en tenant compte des zones de contraintes. La catégorie des maisons « jeunes » est celle dont l'âge est compris entre zéro et 25 ans. Les maisons « vieilles » ont plus de 25 ans. 69 % des maisons dont l'âge est connu sont « jeunes » et sont localisées sur toute la zone d'étude. Les maisons « vieilles » dont la majorité date des années 1950-1955, occupent certains endroits de la zone d'étude, traduisant la progression de la ville vers l'ouest (Figure 11).

De manière générale, les maisons « vieilles » sont plus abîmées que les maisons « jeunes »: 79 % des maisons « vieilles » sont abîmées. Sur l'ensemble de la zone d'étude, 52 % des maisons abîmées sont « jeunes ». Leur distribution dépend du niveau de contrainte des différentes zones.

Dans les zones de contraintes, entre 46 % et 57 % des maisons abîmées sont « jeunes ». Dans la zone de contraintes la plus active, 75 % des maisons « jeunes » sont abîmées. Pour toutes les zones confondues, l'état abîmé des maisons « vieilles » varie entre 63 % et 90 % (90 % dans la zone de contraintes la plus active).

En considérant sur l'ensemble de la zone d'étude, en plus de l'âge, les matériaux de construction, il y a plus de maisons abîmées que de maisons intactes parmi les « vieilles » maisons. Pour les maisons « jeunes », l'état des maisons varie en fonction du type de matériaux de construction et de la zone de contraintes (Table 3).

Il ressort de la Table 3 qu'indépendamment des matériaux de construction, nous avons toujours davantage de maisons abîmées dans la zone de contraintes la plus active. Alors que dans les autres zones ce résultat n'est observé que pour les maisons « semi-durables » et les autres types de matériaux de construction (bambous, terre, bambous + pierres, bambous + pierres + terre). Nous remarquons aussi que les maisons en briques sont plus « vieilles ».

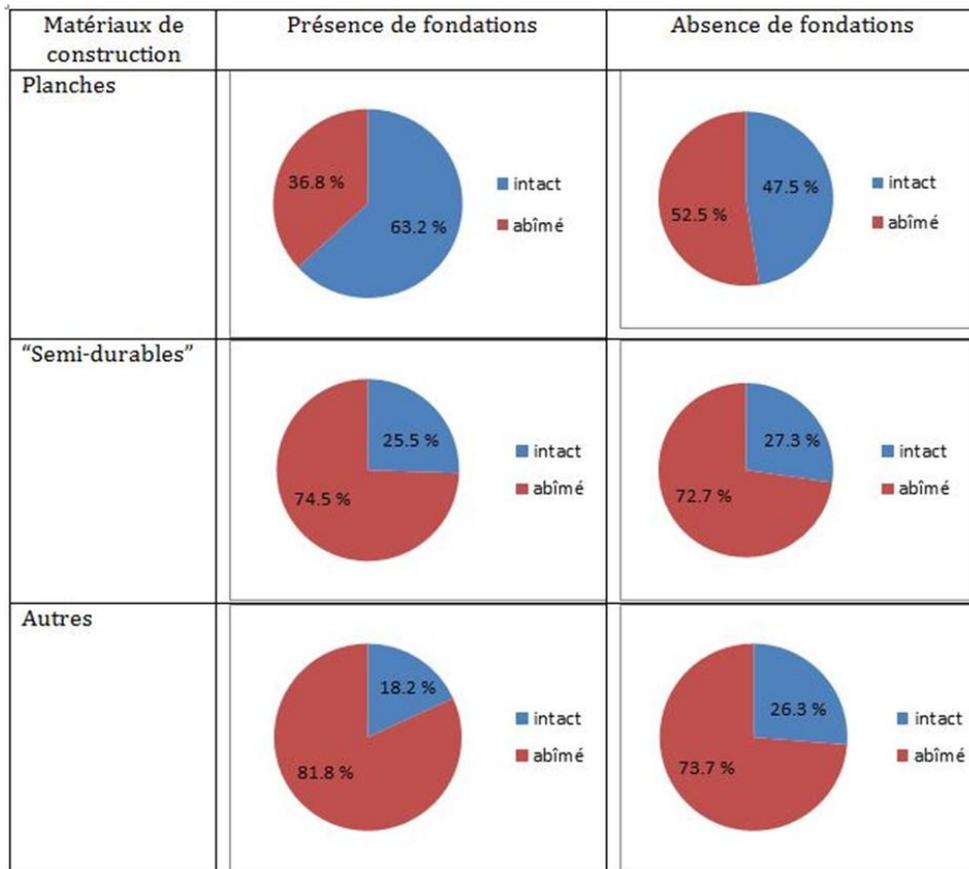


Figure 10: Etat d'endommagement des maisons selon la présence ou l'absence de fondations.
 N.B.: les maisons en briques ne sont pas dans cette figure parce qu'elles ont toutes des fondations.

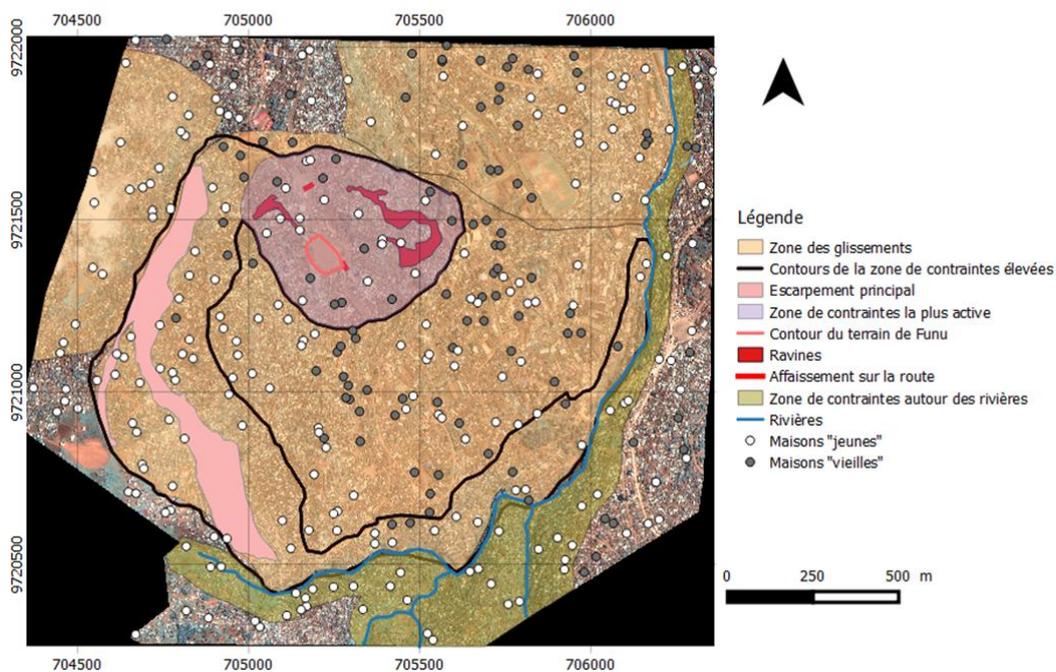


Figure 11: Distribution des maisons selon leur âge.

Certaines maisons abîmées (32 %) subissent des réparations ou des reconstructions. Cela concerne surtout celles qui ne sont ni en briques ni en planches. Le délai de reconstruction varie selon l'occupant de la maison.

Table 3: Etat des maisons « jeunes » (en %) selon les matériaux de construction

Avec ZG: zone des glissements; ZSG: zone sans glissements; ZCE: zone de contraintes élevées dans Funu; ZPA: zone de contraintes la plus active dans Funu; ZAR: zone autour des rivières; ZHRG: zone hors rivières et glissements.

Matériaux	ZG		ZSG		ZCE		ZPA		ZAR		ZHRG	
	Abîmé	Intact										
Briques	19	81	30	70	33	67	50	50	20	80	40	60
Planches	39	61	33	67	31	69	71	29	50	50	19	81
Semi-durables	81	19	75	25	83	17	100	0	80	20	71	29
Autres	87	13	68	32	90	10	100	0	50	50	85	15

Effort de remédiation

Certains efforts sont fournis pour remédier aux contraintes liées aux instabilités. Nous avons relevé la présence de végétation de soutien sur 248 maisons (52 %). D'autres maisons ont des murs de soutènement ou des matériaux imperméables (sachets, bâches) à leur pied. Ces murs sont de différentes natures selon les possibilités financières de chaque occupant. Ils sont en pierres, en sacs

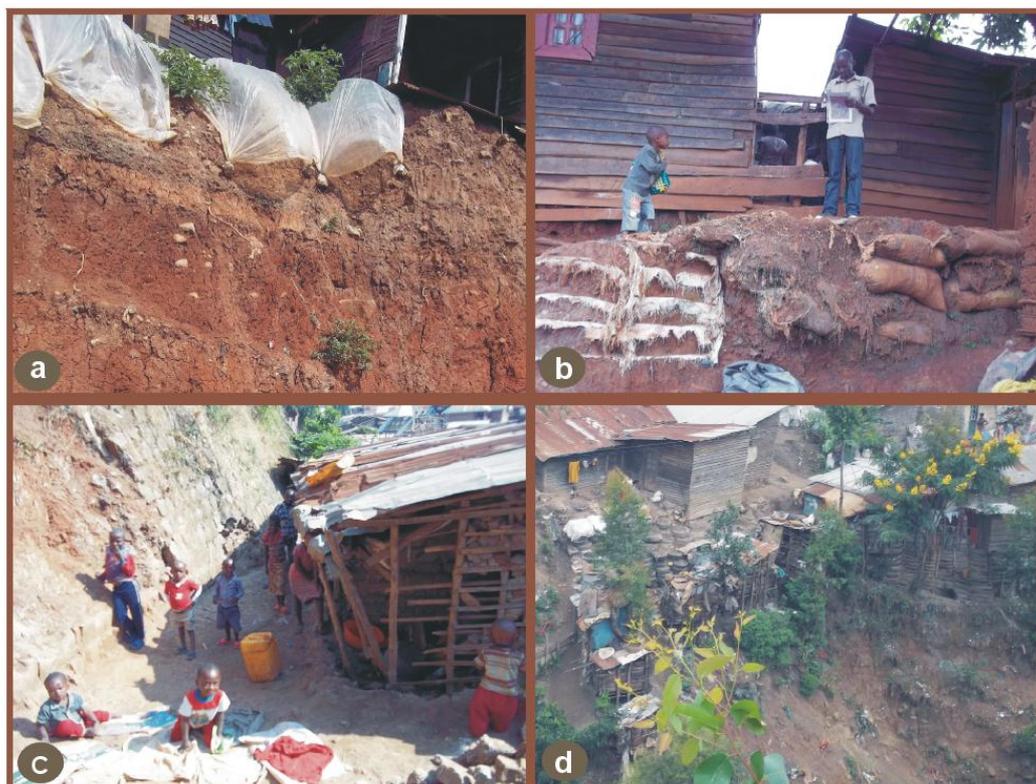


Figure 12: Efforts de remédiation.

a: imperméables (sachets en plastique); **b:** sacs de terre; **c:** mur de soutènement en pierres; **d:** pneus remplis de terre. Ces photos ont été prises en juin 2014.

remplis de terre ou en pneus (Figure 12). Les murs de soutènement sont présents pour 269 maisons (56 %). Malheureusement, ces mesures de protection ne sont pas toujours installées préventivement et s'avèrent alors de moindre utilité.

Le fait de canaliser l'eau est également une manière de prévenir les problèmes d'instabilité. La canalisation de l'eau (de pluie et/ou usée) concerne 297 maisons (62 %). A certains endroits, son absence cause des incisions pouvant être accentuées par des canaux d'eau en mauvais état. Les maisons autour de ces zones sont fissurées, inclinées et même abandonnées. Mais malgré la présence de canalisations, les maisons sont souvent abimées.

DISCUSSION

La morphologie du versant étudié favorise la présence de plusieurs aléas parmi lesquels les mouvements de masse et les érosions. Ces contraintes géomorphologiques auxquelles peuvent être soumises les maisons ne s'étendent pas sur toute la zone d'étude et sont de nature et/ou d'intensité différente. De plus, les actions anthropiques contribuent à l'accélération de ces aléas (MOEYERSONS *et al.*, 2004; TREFOIS *et al.*, 2007; NDYANABO *et al.*, 2009; MIGOMBANO, 2011).

De manière générale, le degré d'exposition d'une maison varie selon son emplacement ou sa localisation (MARTELLI, 2011). Comme plusieurs autres études le soulignent, nos résultats montrent que ce degré d'exposition varie selon le degré d'instabilité d'une zone de contraintes et selon les caractéristiques de la maison (EPFL, 2002; MALDONADO & CHIO CHO, 2012; COROMINAS *et al.*, 2013) ainsi que de ses conditions de maintenance (UZIELLI *et al.*, 2008).

En outre, la connaissance de l'histoire ou du passé du milieu permet de maximiser la justification de l'état des maisons. La distribution des maisons selon la catégorie d'âge et les types de matériaux de construction (Figures 9, 11) l'illustre bien. Dans la zone des glissements (glissement de Funu et celui du nord-est), la grande partie des maisons en briques datent des années 1950 et 1955. Suite aux instabilités du sol, elles ont été remplacées par des maisons construites en matériaux moins durables. Ce remplacement est plus marqué dans la zone de contraintes la plus active car, entre les années 1988-1994, la population a été déplacée vers un autre endroit de la ville, en dehors de toutes zones de glissements. Leurs maisons ont été démolies afin de planter des arbres. Quelques années après, suite à l'insécurité dans la province, les déplacés sont venus s'installer provisoirement sur ce site abandonné à cause des mouvements de masse liés aux ravines. Vers 2004, ces déplacés ont commencé à transformer leur habitation provisoire en construisant de manière spontanée une habitation permanente, en bambous et en terre principalement. La modification de l'utilisation d'un versant déjà affecté par un glissement de terrain favorise son évolution morphologique et peut provoquer des dommages (PIGEON, 1993; VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2007). Le déboisement pour la reconstruction de nouveaux bâtiments matérialise la lacune existant dans la politique de logement dont souffrent de nombreux milieux urbains en RD Congo et d'autres régions du monde (THOURET & D'ERCOLE, 1996; TCHOTSOUA, 2007; MUHINDO, 2011).

Aujourd'hui, les maisons en briques sont remplacées par des maisons construites avec d'autres types de matériaux pour des raisons économiques et d'adaptation au milieu. En effet, l'achat de matériaux de construction de type planches, bambous, terre et pierres est moins coûteux. En outre, la brique est plus difficilement réutilisable pour une reconstruction et demande une main d'œuvre plus chère. La pauvreté est un élément qui pousse les personnes à occuper les milieux instables que les mieux nantis ont délaissé (ONU-Habitat, 2010).

Dans le reste de la zone, la présence des maisons qui ne sont pas en briques est liée à la structure de la ville: les parties nord-ouest, ouest et sud-ouest sont des milieux plus ruraux que le reste de la zone, qui elle-même est déjà fort éloignée du centre-ville (Figure 9).

L'influence des fondations sur l'état des maisons dépend du type de matériaux de construction. Pour les maisons en planches l'influence est positive et peut s'expliquer par la réaction du bois face à l'eau contenue dans le sol. Ainsi, les maisons dont les planches sont directement enfoncées dans le sol vont se détériorer plus rapidement. Pour les autres types de matériaux de construction (« semi-durables », bambous, pierres et terre), les fondations n'ont pas d'effet sur leur état. Elles sont généralement construites après l'édification de la maison. Cependant, la présence de

fondations ne suffit pas toujours à réduire l'exposition d'une maison aux mouvements de terrain: elles sont généralement plus efficaces lorsqu'elles sont profondes (BIRD *et al.*, 2006).

Enfin, la canalisation et la bonne gestion des eaux usées diminuent le degré d'exposition des maisons contre les dommages. Lorsque les conduites d'eau sont cassées, cela va contribuer à l'amplification des mouvements de masse et avoir des répercussions sur les maisons présentes dans ce milieu vu que l'eau joue un rôle important dans le déclenchement des instabilités du sol. Dans ce travail c'est surtout les eaux de pluie qui accentuent cette instabilité pendant la saison humide mais également les eaux souterraines.

CONCLUSION

Dans ce travail sur la vulnérabilité du bâti face aux glissements de terrain sur un versant de la ville de Bukavu situé à l'est de la RD Congo, nous avons essayé de comprendre les éléments à l'origine de l'endommagement des maisons. L'analyse des facteurs que nous proposons montre l'importance de les examiner de manière collective et pas seulement individuellement. Le facteur de base est la localisation par rapport aux différentes zones d'instabilité. Les zones les plus instables sont celles localisées autour des ravines, de l'escarpement principal, des rivières ainsi que des fractures. Les autres facteurs qui justifient le plus l'état des maisons sont l'âge, l'absence de fondations et de canalisation. Pour remédier aux dommages, les populations construisent des murs de soutènement et utilisent également des matériaux imperméables aux pieds de leurs maisons.

Cette recherche représente une première étape vers l'étude de la vulnérabilité et du risque associé aux glissements de terrain. Elle permet aussi d'apporter certains éclaircissements en vue d'une amélioration de la gestion de l'aménagement du territoire.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent au Musée Royal de l'Afrique centrale grâce auquel ce travail a pu être réalisé. La collaboration a été 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 du projet GeoRisCA de la Politique scientifique belge, programme Science for a Sustainable Development (SSD, bourse SD/RI/02A). Merci également à J-R. Nshokano, O. Kashindi et I. Kabiona pour leur accompagnement dans la récolte des données pour ce travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALEGAMIRE, C., 2015. Etude de la vulnérabilité des maisons face au glissement de terrain: cas du glissement de Funu à Bukavu. Rapport de recherche dans le cadre du projet S1_RGL_GEORISK sur les risques géologiques, 35 p.
- BIRD, J.F., BOMMER, J.J., CROWLEY, H. & PINHO, R., 2006. Modelling liquefaction induced building damage in earthquake loss estimation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26: 15-30
- CASCINI, L., BONNARD, CH., COROMINAS, J., JIBSON, R. & MONTERO-OLARTE, J. 2005. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. In: Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (Eds.). *Landslide Risk Management. Proceeding of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver, Canada. A.A. Balkema Publishers, *Taylor & Francis Group*, London, p. 199-235.
- 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., PASTEUR, M., FERLISI, S., TOFANI, V., HERVÁS, J. & SMITH, J.T., 2013. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73: 209-263.
- DI RUOCO, A., GASPARINI, P., & WEETS, G., 2015. Urbanisation and climate change in Africa: setting the scene. In: Pauleit, S., Coly, A., Fohlmeister, S., Gasparini, P., Jorgensen, G., Kabisch, S., Kombe, W.J., Lindley, S., Simonis, I., Yeshitela, K. (Eds.) *Urban vulnerability and climate change in Africa*. Springer International Publishing Switzerland, *Springer International Publishing*, 4: 1-35.
- EPFL, 2002. Ecole Polytechnique de Lausanne: Relevant Criteria to assess vulnerability and risk. Unpublished Deliverable (D16) of project IMIRILAND: Impact of Large Landslides in the mountain environment.
- JACOBS, L., DEWITTE, O., POESEN, J., DELVAUX, D., THIERY, W. & KERVYN, M., 2016. The Rwenzori Mountains, a landslide-prone region? *Landslides*, 13: 519-536.

- MAKANZU IMWANGANA, F., DEWITTE, O., NTOMBI, M. & MOEYERSONS, J., 2014. Topographic and road control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Geomorphology*, 217: 131-139.
- 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.
- MALDONADO, E. & CHIO CHO, G., 2012. Structural vulnerability index to the effects of landslides in masonry buildings based on fuzzy sets. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27: 23-39.
- MARTELLI, K.M., 2011. Vulnérabilité des milieux urbanisés face aux impacts physiques des écoulements volcaniques, des lahars et des crues associées: le cas de la ville d'Arequipa (sud du Pérou). Fondation MAIF Rapport final 65 p.
- MIGOMBANO, U., 2011. Evaluation et cartographie par le Système d'Information Géographique du risque lié aux glissements de terrain à Bukavu (Sud-Kivu, RD Congo). Travail de fin d'études, Université de Liège 61 p.
- 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.
- MUHIGWA, J.-B. & BISHIKWABO, K., 2010. Gestion des terres urbaines et de l'environnement à Bukavu: opinion de la société civile. Inédit. Texte tiré des actes de la Table ronde organisée à Bukavu par l'IFDP du 10 au 11 mai 2010. 5 p.
- MUHINDO, S. 2011. Le contexte urbain et climatique des risques hydrologiques de la ville de Butembo (Nord-Kivu, République Démocratique du Congo). Thèse de doctorat en sciences, Université de Liège, 300p.
- 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 séismique du bassin du Lac Kivu région de Bukavu (République Démocratique du Congo). Musée Royal de l'Afrique centrale, Département des Mines. Rapport annuel 1997 et 1998, 285-298.
- NDYANABO, S., 2009. Gestion des risques naturels à Bukavu, Sud-Kivu/RD Congo. Travail de fin d'études, Université de Liège, 73 p.
- 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.
- ONU-Habitat, 2010. L'état des villes africaines 2010. Gouvernance, inégalité et marchés fonciers urbains. <http://www.cursus.edu/?module=directory&subMod=PROD&acion=get&pclass=2&uid=14455> consulté le 12 février 2014.
- PIGEON, P., 1993. Intérêt de l'approche géographique dans l'étude des risques liés aux glissements de terrain: le cas de la vallée des Dranses (Haute-Savoie, France). *Cahiers de géographie du Québec*, 37: 67-77.
- TCHOTSOUA, M., 2007. Les risques morfo-hydrologiques en milieu urbain tropical: cas de Yaoundé au Cameroun. *Acte des JSIRAUF, Hanoi*, 6: 1-9.
- THOURET, J.C & D'ERCOLE, R., 1996. Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain: effets, facteurs et réponses sociales. *Cahier des Sciences humaines*, 32: 407-422.
- 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.
- UZIELLI, M., LACASSE, S. & KAYNIA, A.M., 2008. A conceptual framework for quantitative estimation to landslide, *Engineering Geology*, 102: 251-256.
- 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.
- VAN WESTEN, C.J., VAN ASCH, T.W.J. & SOETERS, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation. Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65: 167-184.

