



Numéro spécial

Impact des déformations du sol sur la vulnérabilité des réseaux de distribution d'eau et d'électricité à Bukavu (RD Congo)

Ground deformation impact on the vulnerability of water and electricity distribution networks in Bukavu (DR Congo)

Christian Buzera KALIKONE¹, Françoise TEGANYI², Olivier DEWITTE³, Caroline MICHELLIER³

Abstract: Ground deformations in urban areas can lead to environmental constraints that must be considered in risk management and urban planning. These deformations can damage the infrastructures exposed to them. Here, the objective is to assess impacts of ground deformations on water and electricity distribution networks in the city of Bukavu (DR Congo); this city being known to be affected by deformations linked in particular to the occurrence of landslides. First, an inventory of active deformation zones was carried out. Then, the water distribution (REGIDESO) and electricity (SNEL) infrastructures were identified in the field in order to establish updated network maps. Finally, on the basis of these maps, analyses using field knowledge were made to deduce relationships between ground deformation zones, distribution networks and their physical vulnerability. The study shows that the three communes of Bukavu are affected by damage caused by these deformations. The most important vulnerability problems are logically concentrated in the deformation zones which are more inhabited and are linked to the temporal evolution of the city.

Keywords: vulnerability, distribution network, ground deformation, urban environment, landslide

Résumé: Dans les zones urbaines, les déformations du sol représentent des contraintes environnementales qui doivent être prises en compte dans la gestion des risques et l'aménagement du territoire. Ces déformations du sol peuvent endommager les infrastructures qui y sont exposées. L'objectif de la présente étude est de faire un premier inventaire de l'impact des déformations du sol sur les réseaux de distribution d'eau et d'électricité dans la ville de Bukavu (RD Congo) qui est connue pour subir de nombreuses contraintes liées notamment à la présence de glissements de terrain. Dans un premier temps, un inventaire de zones de déformation actives a été réalisé. Ensuite, les infrastructures de distribution d'eau (REGIDESO) et d'électricité (SNEL) ont été identifiées sur le terrain dans le but d'en établir des cartes de réseau actualisées. Enfin, à partir de ces cartes, des analyses faisant appel aux connaissances de terrain ont été faites pour en déduire des relations entre les zones déformées du sol, les installations de distribution et leur vulnérabilité physique. L'étude montre que les trois communes de Bukavu sont concernées par des dégâts liés à ces déformations. Les problèmes de vulnérabilité les plus importantes se concentrent logiquement dans zones de déformations du sol qui sont plus habitées et sont liés à l'évolution temporelle de la ville.

Mots clés: vulnérabilité, réseaux de distribution, déformation du sol, zone urbaine, glissement de terrain

¹ Université Officielle de Bukavu, Faculté des Sciences et Sciences Appliquées, RD Congo. Email: kalikchrist@gmail.com

² Chercheuse indépendante. Email: kwinjaj50@gmail.com

³ Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique. Emails: caroline.michellier@africamuseum.be, olivier.dewitte@africamuseum.be

INTRODUCTION

Le sol, au sens très large du terme (« ground » en anglais), peut être soumis à des déformations de nature très variée (ampleur, étendue, vitesse, etc.). Ces déformations sont fonction des processus qui y sont associés tels que glissements de terrain, compaction des sols, érosion des sols, activité tectonique, subsidence, etc. (GILL et MALAMUD, 2014). Dans les zones urbaines, les déformations du sol représentent des contraintes environnementales qui doivent être prises en compte dans la gestion des risques et l'aménagement du territoire. Elles rendent en effet vulnérables les infrastructures (réseaux de distribution d'eau et d'électricité, routes, bâtiments, etc.) qui y sont exposées (VAN WESTEN et al., 2006; COROMINAS et al., 2014). Dans beaucoup de villes du sud, il y a souvent un manque de données, que ce soit au niveau des déformations, mais aussi des infrastructures et de leur vulnérabilité (MAES et al., 2017). C'est le cas notamment de la ville de Bukavu, connue pour être fortement affectée par des glissements de terrain (MOEYERSONS et al., 2004; TREFOIS et al., 2007, SADIKI et al., 2010).

L'objectif de la présente étude est de faire un premier inventaire de l'impact des déformations du sol sur les réseaux de distribution d'eau et d'électricité dans la ville de Bukavu. Dans un premier temps, un inventaire non exhaustif des zones de déformation actives sera réalisé. Ensuite, les infrastructures de distribution d'eau et d'électricité seront identifiées dans le but d'en établir des cartes de réseaux actualisées. Enfin, à partir de ces cartes, des analyses faisant appel aux connaissances de terrain seront faites pour en déduire les relations entre les zones déformées du sol, les infrastructures et leur vulnérabilité.

ZONE D'ETUDE

La ville de Bukavu, chef-lieu de la province du Sud-Kivu, est située à l'est de la République Démocratique du Congo (RD Congo). Séparée du Rwanda par le lac Kivu et la rivière Ruzizi, elle est administrativement subdivisée en trois communes (Bagira, Ibanda et Kadutu, Figure 1). Elle a une superficie de 44 km² et un relief assez marqué (plus de 600 m de dénivelé). La ville est localisée dans la branche ouest du Rift est-africain, une région sismiquement active, traversée par de nombreuses failles (d'OREYE et al., 2011; SMETS et al., 2016; DELVAUX et al., 2017) et reconnue pour être favorable aux glissements de terrain (par. ex. MAKI MATESSO et DEWITTE, 2014; JACOBS et al., 2016, 2017; MONSIEURS et al., 2017). Avec ses pentes fortes, son relief montagneux, ses régolithes et Nitisols profonds et argileux, ses alternances de couches basaltiques plus ou moins altérées, et son climat tropical humide, Bukavu n'échappe pas à la règle et de nombreux glissements de terrain d'origine naturelle façonnent son territoire (MOEYERSONS et al., 2004; TREFOIS et al., 2007; JONES et al., 2013).

Ces glissements de terrain, dont l'activité récente peut aussi être influencée par le développement de la ville et l'anthropisation du paysage, présentent des processus et des stades d'activité variés qui font que les déformations du sol qui y sont associées sont diverses. Dans certains cas, ils sont même d'origine purement anthropique, en relation avec, par exemple, des affouillements au pied de versant, des modifications du drainage de surface, des surcharges de pente et le déboisement (KULIMUSHI et al., 2017; MUGARUKA et al., 2017). En outre, l'alternance saisonnière du climat en une saison humide et sèche, associée à une couverture végétale parfois contrastée, et l'anthropisation du territoire favorisent l'érosion des sols, qui se traduit entre autre sous la forme de grandes ravines aux versants souvent instables (MOEYERSONS et al., 2004; TREFOIS et al., 2007; BALEGAMIRE et al., , 2017).

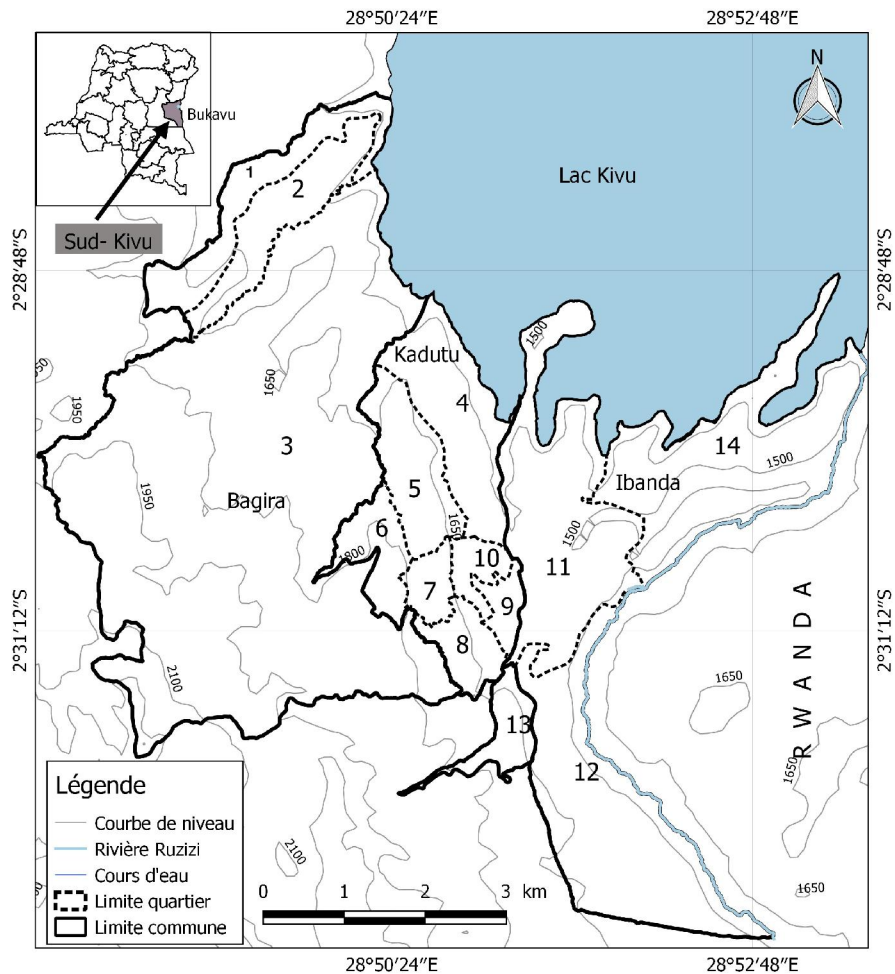


Figure 1: Localisation de la ville de Bukavu et délimitation des commune et quartiers qui la composent.

Noms des quartiers. 1: Nyakavogo, 2: Lumumba, 3: Kasha, 4: Nkafu, 5: Nyakaliba, 6: Kajangu, 7: Cimpunda, 8: Mosala, 9: Nyamugo, 10: Kasali, 11: Ndendere, 12: Panzi, 13: Cahi, 14: Nyalukemba.

Le début de l'installation des réseaux de distribution d'eau (REGIDESO) et d'électricité (SNEL) qui alimentent la ville de Bukavu datent de l'époque coloniale (CICR, 2012; ALIMWINJA CIRANO, 2013). Actuellement, il n'y a pas de carte mise à jour de ces deux réseaux. L'usine de traitement des eaux de Murhundu I, alimentée par la rivière du même nom, fut construite en 1954 avec une capacité de 450 m³/h. La distribution était organisée à partir d'une conduite d'adduction (DN300) alimentant un réseau de conduites en Eternit et en acier. En 1990, ce réseau de distribution d'eau a été renforcé du fait de l'augmentation de la population, par la construction de la nouvelle usine (Murhundu II) d'une capacité de 1200 m³/h, qui alimente actuellement la population grâce à une deuxième conduite (DN400). En parallèle, l'ancien réseau a été réhabilité à certains endroits. Tout le réseau en Eternit a été remplacé soit par de la fonte, soit par du PVC. La plupart des anciens réservoirs ont été maintenus, ainsi qu'une grande partie de l'ancien réseau en acier de 1954 (CICR, 2012).

Au Kivu, la SNEL compte quatre centres de production et de distribution: (1) le centre de production et transport Est qui, par la centrale Ruzizi I, d'une puissance de 28 MW, alimente Goma par la ligne haute tension 70KV (146 Km de longueur), Bujumbura au Burundi par une ligne haute tension de 70KV (112Km) et au Rwanda 6,6KV de 0,62Km; (2) le centre de distribution de Bukavu qui alimente la ville de Bukavu et ses environs; (3) le centre de distribution de Goma qui alimente la ville de Goma et ses environs; (4) la direction de distribution d'Uvira qui alimente Uvira et ses environs, ainsi que la sucrerie de Kiliba. La direction provinciale du Sud-Kivu compte cinq divisions parmi lesquelles deux directions nous intéressent: (1) la division « production et transport Est » à la moyenne tension (MT) qui gère la centrale hydro-électrique Ruzizi I et les lignes haute tension (HT), et (2) la direction « gestion des réseaux de distribution à attributions », qui se charge de la gestion et du maintien des lignes MT, gère les cabines et transformateurs et maintient les réseaux base tension

(BT). A l'époque belge, le réseau de distribution de Bukavu était entièrement souterrain. A partir de 1989, il a commencé à être transformé en réseau aérien pour faciliter le dépannage, réduire le coût des réparations et du transport des câbles (ALIMWINJA CIRANO, 2013).

METHODOLOGIE

L'étude de la vulnérabilité aux déformations du sol des réseaux de distribution d'eau et d'électricité de la ville de Bukavu a été effectuée en trois grandes étapes:

Inventaire de zones de déformation du sol

Le but ici est de faire un inventaire de zones problématiques dans des contextes environnementaux et urbanistiques différents et variés de la ville. Les zones sont repérées sur le terrain et cartographiées à l'aide 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.

L'inventaire que nous produisons a la prétention d'être représentatif de la situation de terrain, mais ne vise en aucun cas l'exhaustivité. La localisation de manière exhaustive de l'ensemble des déformations du sol qui apparaissent sur les 44 km² du territoire urbain ne pourrait se faire que dans une étude beaucoup plus longue et approfondie en faisant appel, en plus des levés de terrain, à des analyses poussées de télédétection adaptée à la région (par. ex. InSAR et LiDAR) éventuellement combinées à du monitoring (par ex., BENNETT *et al.*, 2016; SCHULZ *et al.*, 2017).

Mise à jour des cartes des réseaux

Les informations sont récoltées sur le terrain afin de localiser des infrastructures de la REGIDESO (conduites et réservoirs) et de la SNEL (poteaux moyenne tension, pylônes haute tension, cabines à transformateurs) et de décrire leur nature, type, âge, matériaux et état général (fracture, incliné, détruit).

Les itinéraires sur terrain ont été établis sur base des plans et schémas faits par la REGIDESO (en ciblant les vannes qui affleurent à la surface) et la SNEL (en regroupant les sites en *feeder* ou « zone de distribution ») dans le but de cibler des zones qui nous paraissent importantes. Tout comme pour l'inventaire des déformations, notre but est ici est de mieux comprendre la problématique étudiée, et non de fournir des documents cartographiques les plus exhaustifs possibles. Dans Bukavu, nous distinguons quatre sortes de cabines: cabines mixtes, cabines de l'Etat, cabines privées et cabines SNEL. Seules les cabines SNEL ont fait l'objet de cette étude. Les infrastructures ont été localisées sur le terrain à l'aide d'un GPS.

Analyse des zones de déformation et des sites vulnérables

La notion de vulnérabilité est étroitement liée à la notion de risque. Dans la présente étude, nous nous intéressons à la vulnérabilité physique des infrastructures des réseaux. Elle mesure les conséquences dommageables de l'aléa sur les enjeux en présence (VAN WESTEN *et al.*, 2006; COROMINAS *et al.*, 2014). La vulnérabilité est ici exprimée en termes d'étendue des dégâts.

RESULTATS

Déformations du sol

La carte de la figure 2 montre la vingtaine de zones de déformation du sol que nous avons inventoriées. Ces zones, inégalement réparties dans les trois communes de la ville, ont été délimitées sur base d'indices visibles sur le terrain tels que l'inclinaison des poteaux, des arbres et des murs de soutènement, et la présence de fissures dans les infrastructures. Des enquêtes auprès des personnes affectées ont aussi été réalisées afin de valider nos observations et de s'assurer de la pertinence de nos données. Il est clair que certaines de ces zones soumises à des déformations du sol ont un impact direct sur les réseaux de distribution (Figure 3).

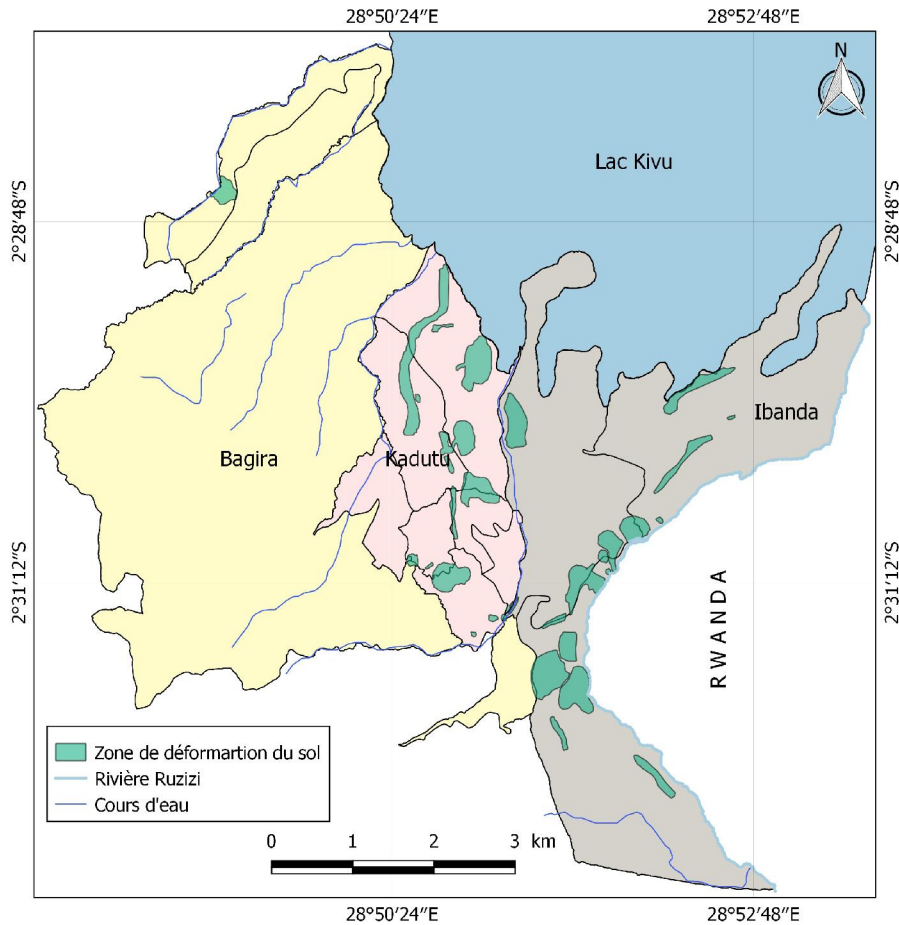


Figure 2: Zones de déformation du sol dans la ville de Bukavu.

Comme signalé dans la description de la zone d'étude, ces déformations peuvent être d'origine naturelle, anthropique, voire liées à une combinaison des deux. La figure 4 illustre un tel exemple: en décembre 2015, une zone de déformation du sol a été réactivée suite à la fuite d'une conduite dans le quartier Nkafu. En plus des dégâts illustrés à la figure 4, la réactivation a aussi provoqué le tassement de plusieurs parcelles et de la route qui traverse la zone. Cet exemple montre clairement la complexité des processus qui peuvent être à l'origine des dégâts et les relations de causalité qui les sous-tendent.



Figure 3: Exemples de dégâts sur les infrastructures.
 A: Rupture d'un tuyau de la RÉGIDESO au niveau du Lycée Wima (quartier Nkafu).
 B: Fissure d'une cabine de la SNEL à Nyawera (quartier Ndendere).

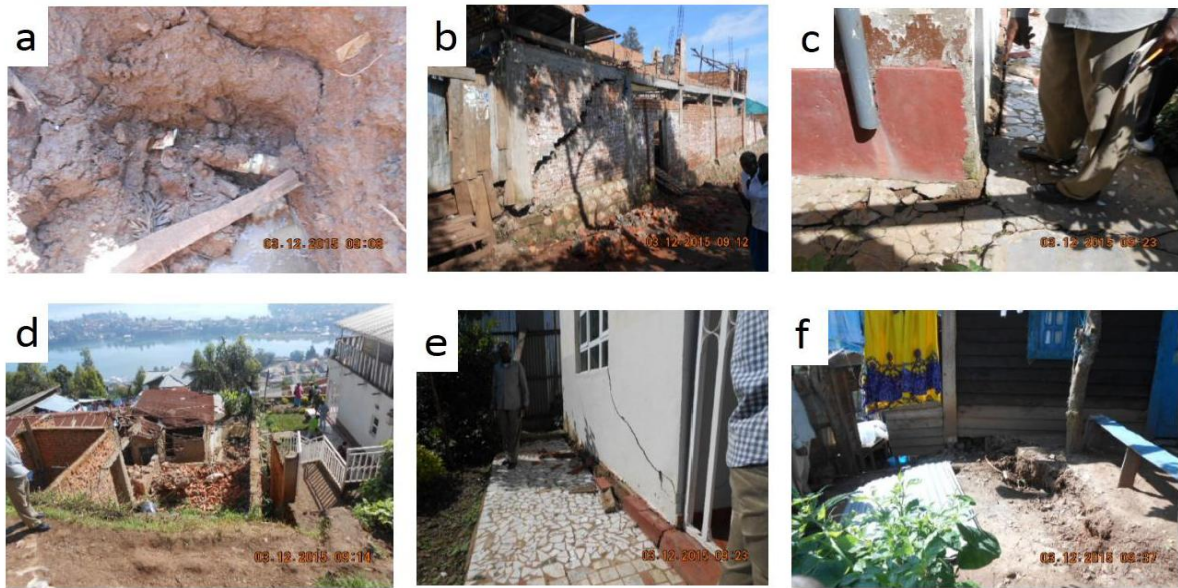


Figure 4: Réactivation d'une zone de déformation du sol suite à une fuite d'une conduite d'eau de la REGIDESO dans le quartier Nkafu. a: rupture de la conduite, b-c: maisons fissurée, d: maisons détruites.

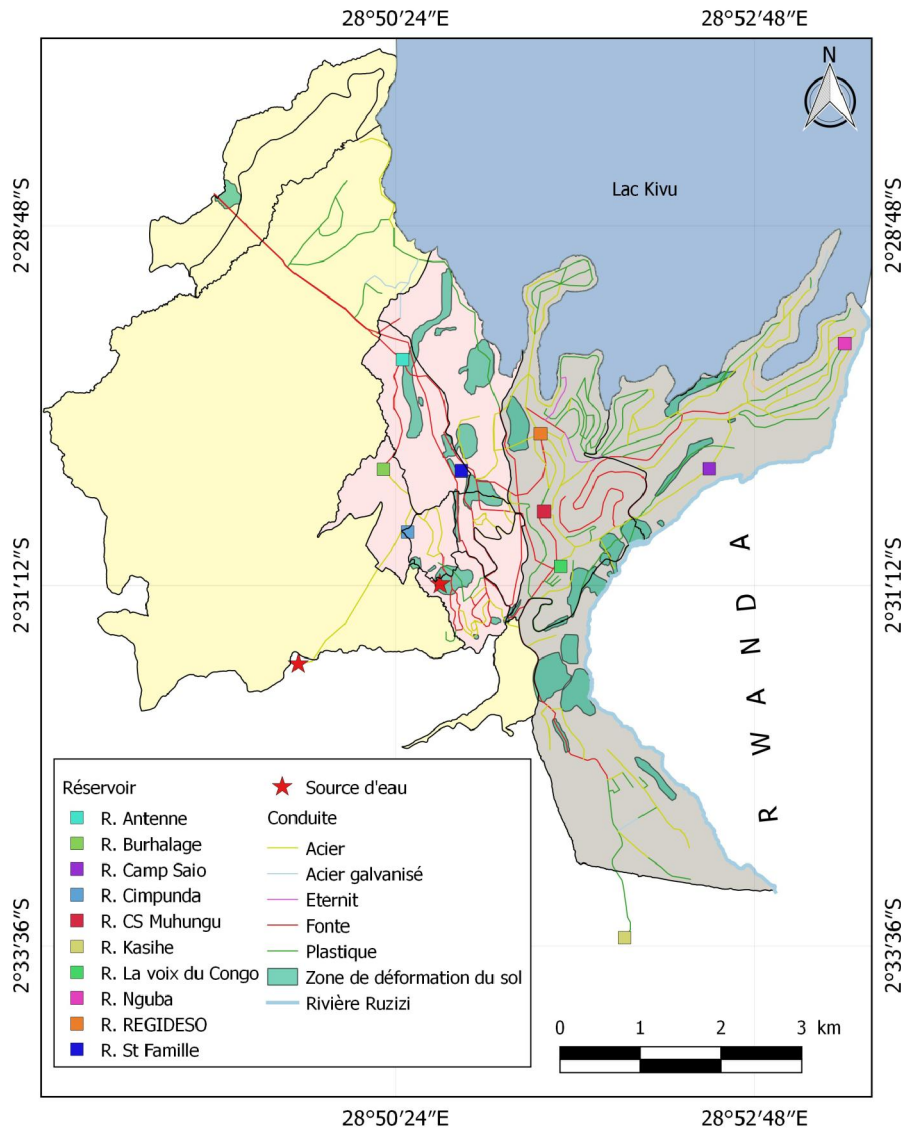


Figure 5: Réseau d'adduction d'eau de la REGIDESO.

Distribution de l'eau

La carte présentée à la figure 5 reprend les conduites de différentes natures, ainsi que les réservoirs et quelques sources. La partie du réseau d'adduction d'eau qui alimente la commune de Kadutu est la plus exposée aux zones de déformation, suivie de la commune d'Ibanda et de Bagira (Figure 6). Nkafu est le quartier de la commune de Kadutu qui rassemble le plus grand nombre des conduites. C'est également le quartier où se trouve le plus de conduites exposées, c'est-à-dire localisées dans des zones de déformation (Figure 6b). Pour la commune d'Ibanda, Nyalukemba est le quartier qui compte la plus grande longueur de conduites, suivi par les quartiers Ndendere et Panzi. En termes de conduites exposées, Ndendere est le quartier qui en compte le plus (Figure 6c). Nyakavogo est le quartier de la commune de Bagira ayant le plus de conduites exposées (Figure 6d).

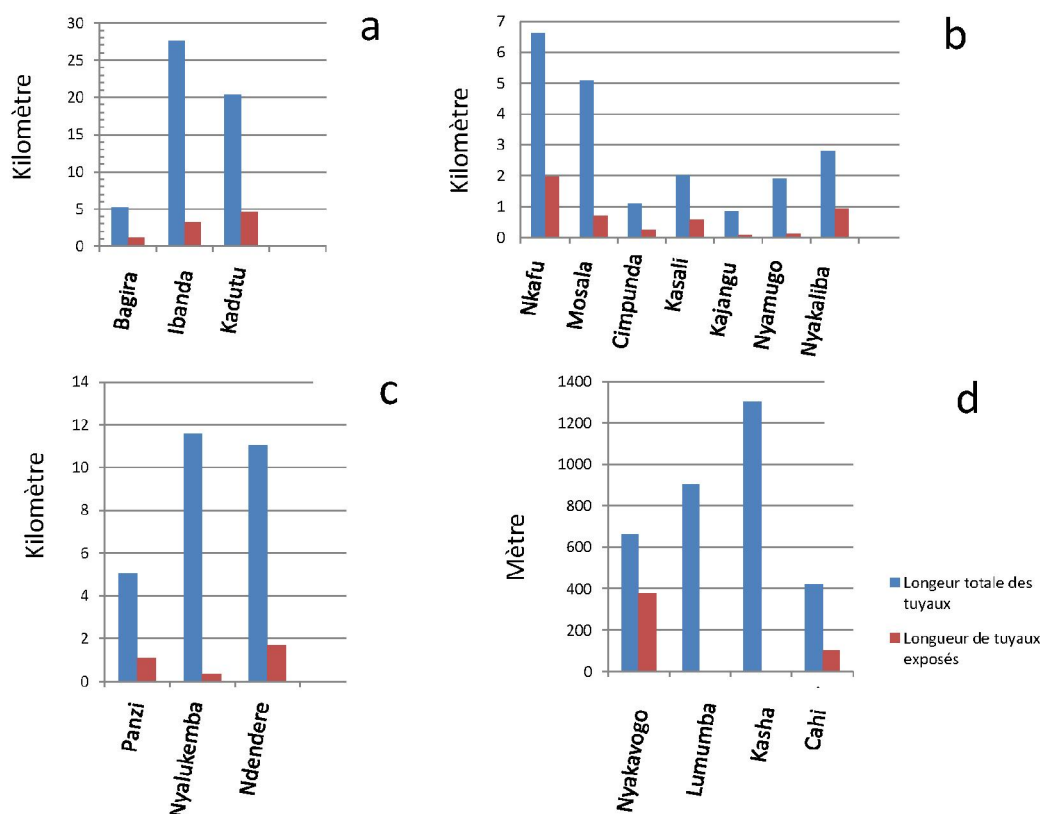


Figure 6: Longueurs conduites totales et exposées aux zones de déformation du sol (longueurs en kilomètre).
a: Ville de Bukavu, b: Commune de Kadutu, c: Commune d'Ibanda, d: Commune de Bagira.

Pour l'étude de la vulnérabilité des conduites, 82 sites ont été observés sur toute l'étendue de la ville. Parmi ces sites, 41 ont été pris dans les zones stables et le reste dans les zones de déformation (Figure 7). L'analyse du degré de vulnérabilité a été faite sur base du (1) nature du matériau, (2) de l'âge d'implantation et (3) de l'état de la conduite. Sur toutes ces observations, nous constatons que les conduites sont intactes dans toutes les zones stables, alors que plus de la moitié de celles exposées aux zones de déformation présentent des dégâts plus ou moins sévères. Cependant, le nombre de conduites fracturées et détruites est très limité, probablement en raison du fait que lorsque de tels dégâts apparaissent, ils font rapidement l'objet de réparations.

Le réseau d'adduction d'eau a été développé depuis l'époque coloniale (1954) et a été renforcé à partir des années 1990. Ce renforcement passe par l'ajout et/ou le remplacement de certaines conduites. D'après les observations faites sur le terrain, et comme nous tenterons de l'expliquer ci-dessous, les conduites implantées récemment semblent être plus vulnérables que celles de 1954 (Tables 1 et 2).

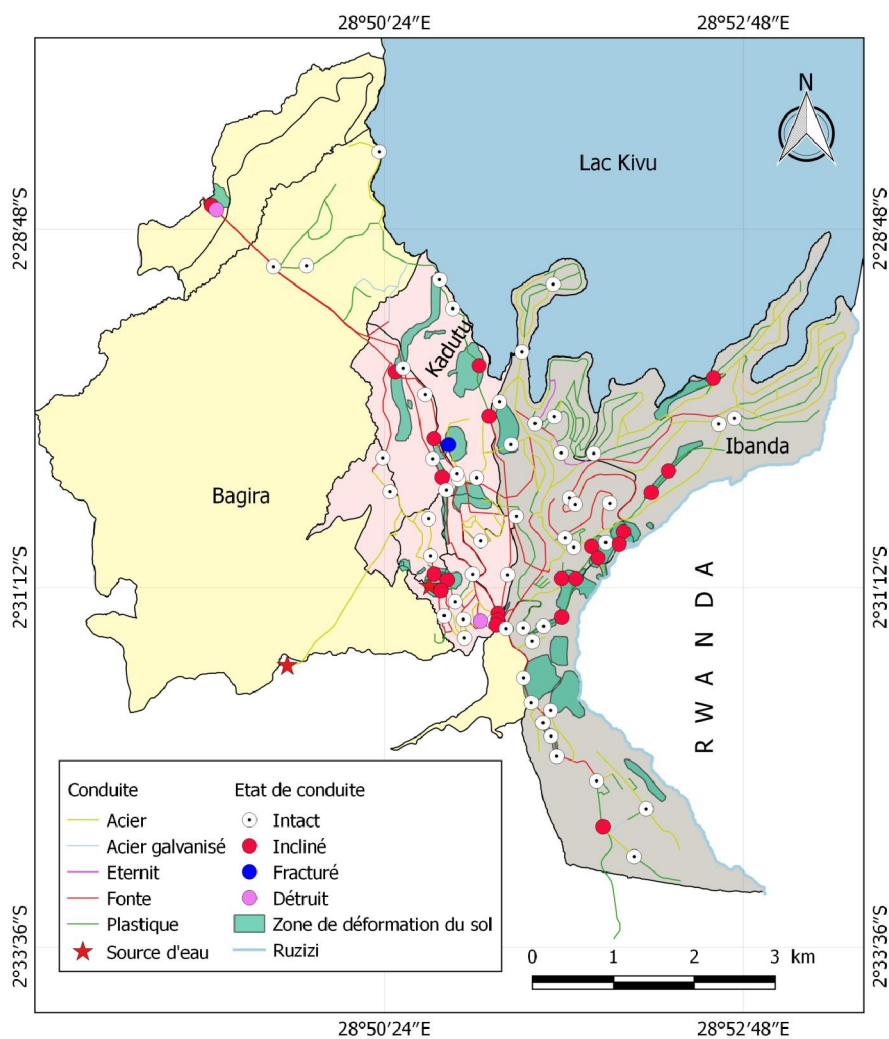


Figure 7: Vulnérabilité des conduites d'eau de la REGIDESO.

Table 1: Répartition des conduites par commune en fonction de leur état

Zones	Etat des conduites	Commune			Total
		Kadutu	Ibanda	Bagira	
Zones de déformation	Intact	2	12	0	14
	Incliné	12	10	2	24
	Fracturé	1	0	0	1
	Détruit	1	0	1	2
	<i>Total</i>	<i>16</i>	<i>22</i>	<i>3</i>	<i>41</i>
Zones stables	Intact	18	19	4	41
	Incliné	0	0	0	0
	Fracturé	0	0	0	0
	Détruit	0	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>4</i>	<i>41</i>
<i>Total général</i>		<i>34</i>	<i>41</i>	<i>7</i>	<i>82</i>

Table 2: Répartition des conduites en fonction de l'âge de l'installation, la nature du matériau et de leur état.

Années	Nature du matériau	Etat des conduites				Total
		Bon	Incliné	Fracturé	Détruit	
1954	Plastique	0	0	0	0	0
	Fonte	0	0	0	0	0
	Acier	15	6	1	0	22
	Eternit	1	0	0	0	1
	<i>Total</i>	<i>16</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>23</i>
1990	Plastique	15	8	0	0	23
	Fonte	24	10	0	2	36
	Acier	0	0	0	0	0
	Eternit	0	0	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>39</i>	<i>18</i>	<i>0</i>	<i>2</i>	<i>59</i>
<i>Total général</i>		<i>55</i>	<i>24</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>82</i>

Distribution de l'électricité

Les trois communes de la ville de Bukavu ont été parcourues pour localiser des enjeux de la SNEL. Les données que nous avons récoltées ne correspondent qu'à une partie du réseau. Au total 657 éléments ont été répertoriés, parmi lesquels 603 poteaux MT, 17 pylônes HT, et 37 cabines. Les poteaux MT constituent plus de 90% des éléments localisés (Figure 8, Table 3). Les éléments répertoriés sont répartis en sept *feeders* (Figure 9).

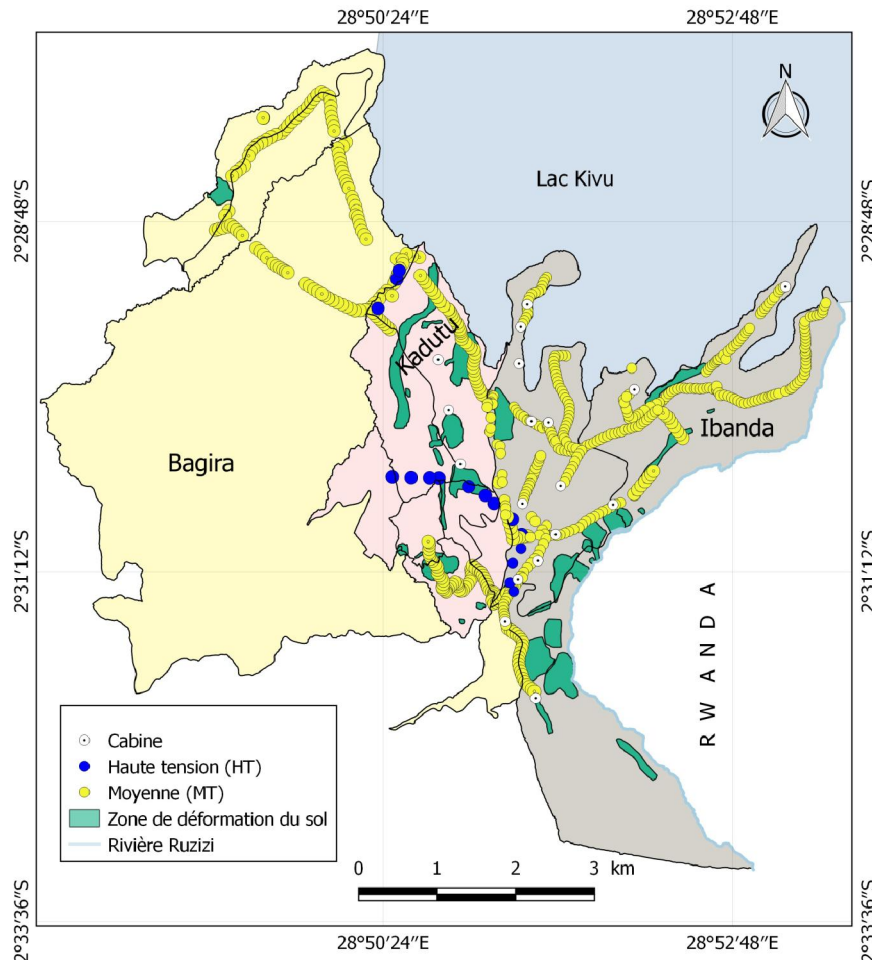


Figure 8: Réseau de distribution SNEL.

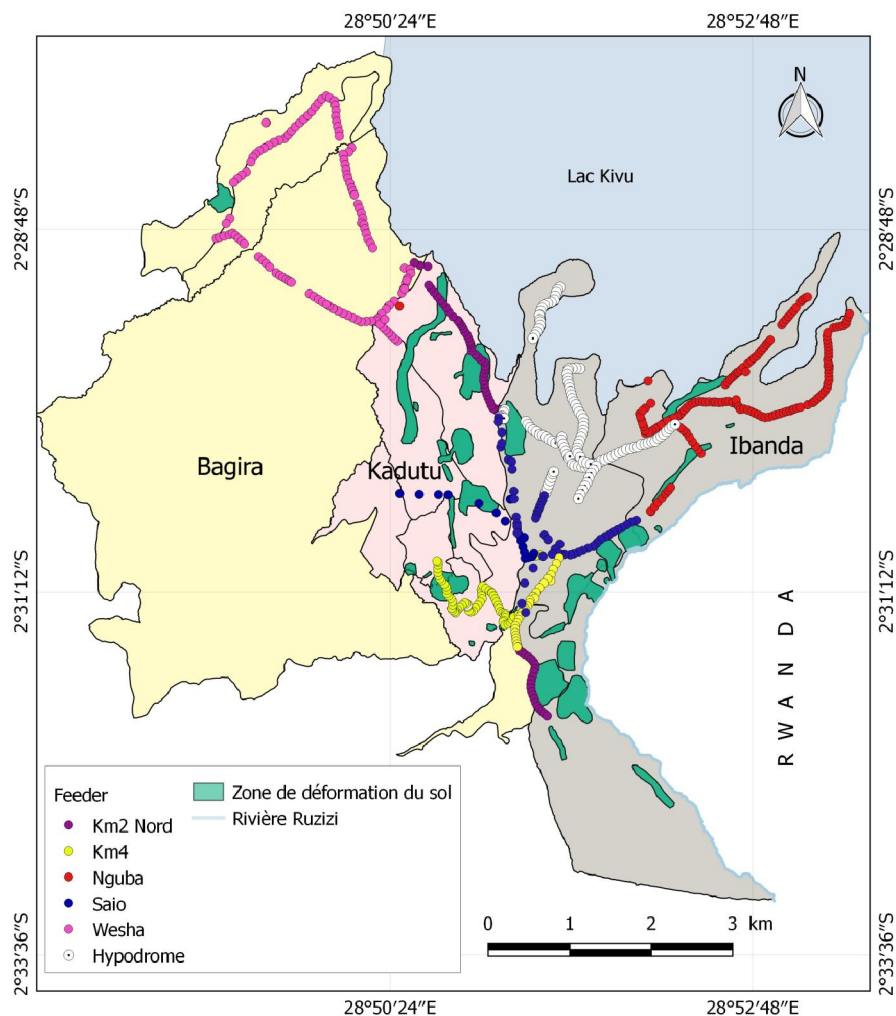


Figure 9: Vulnérabilité des installation de la SNEL suivant la distribution des feeders.

Table 3: Répartition des poteaux en fonction de la nature du matériau et du type de ligne

Commune	Nature du matériau	Type de ligne		Total
		MT	HT	
Ibanda	Acier	351	6	357
	Bois galvanisé	29	0	29
	<i>Total</i>	<i>380</i>	<i>6</i>	<i>386</i>
Kadutu	Acier	115	8	123
	Bois galvanisé	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>115</i>	<i>8</i>	<i>123</i>
Bagira	Acier	108	3	111
	Bois galvanisé	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>108</i>	<i>3</i>	<i>111</i>
<i>Total général</i>		<i>603</i>	<i>17</i>	<i>620</i>

La majorité des poteaux MT sont en acier (Figure 10; Table 3); une partie du *feeder* Nguba, vers la centrale Ruzizi II, est en bois, de même que le *feeder* Hippodrome vers Mukukwe. Les HT ont des pylônes en treillis d'acier, et les cabines sont en maçonnerie, compacte, ou sur poteau électrique.

Les cabines en maçonnerie ont été construites en 1958, les compactes datent de 1990 et/ou de 2010, et celles sur poteau datent de 1990. Nous avons estimé que les cabines sur poteau ont une vulnérabilité similaire à celle du support sur lequel elles sont installées.

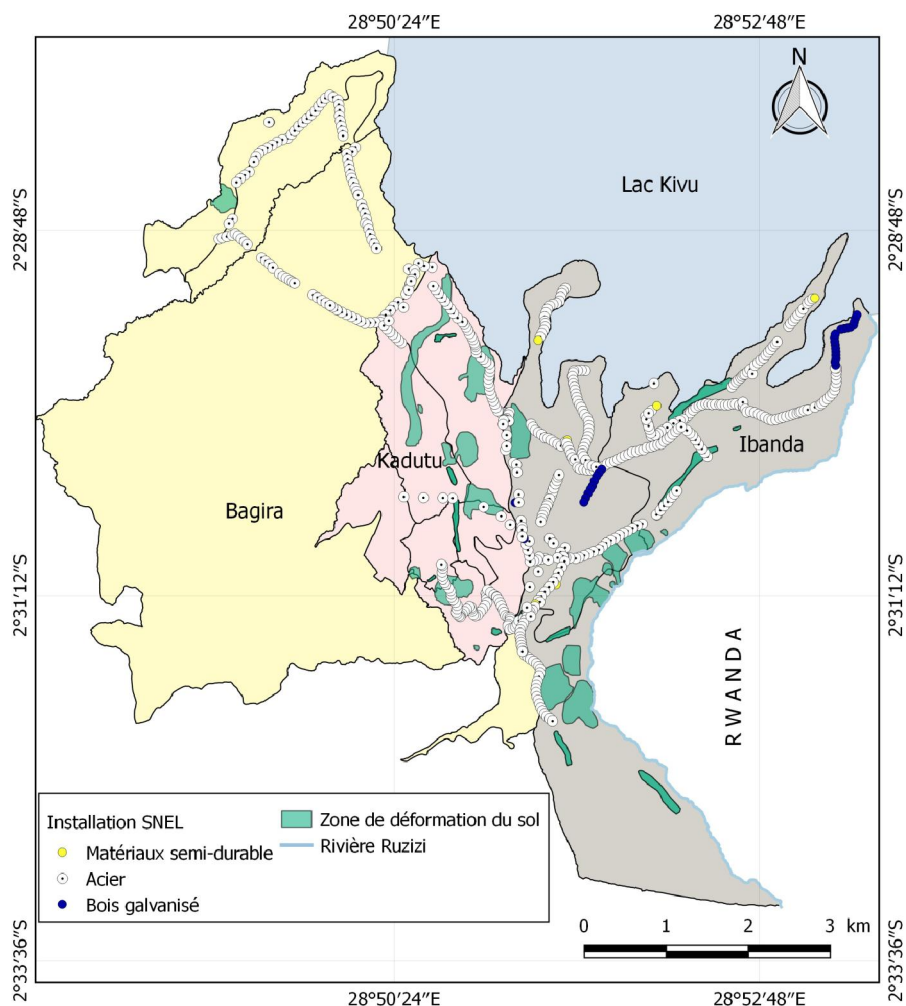


Figure 10: Vulnérabilité des installation de la SNEL suivant la nature des matériaux.

Table 4: Répartition des poteaux par commune en fonction de leur état et type

Commune	Etat du poteau	Type de poteau		Total
		MT	HT	
Ibanda	Intact	374	6	380
	Incliné	5	0	5
	Endommagé	1	0	1
	<i>Total</i>	<i>380</i>	<i>6</i>	<i>386</i>
Kadutu	Intact	112	8	120
	Incliné	3	0	3
	Endommagé	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>115</i>	<i>8</i>	<i>123</i>
Bagira	Intact	108	3	111
	Incliné	0	0	0
	Endommagé	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>108</i>	<i>3</i>	<i>111</i>
<i>Total général</i>		<i>603</i>	<i>17</i>	<i>620</i>

La quasi-totalité des poteaux sont en bon état à l'exception de quelques poteaux MT qui sont inclinés ou endommagés (Table 4). A noter que cela ne concerne que les poteaux en acier, vu qu'aucun poteau en bois n'est présent dans les zones de déformations que nous avons analysées. Quant aux cabines, une seule sur les 37 étudiées présente des dégâts (Figure 2b).

Pour les six *feeders* analysés, voici la synthèse de nos observations:

- Le *feeder* Hippodrome (commune d'Ibanda, Figure 9) est constitué de 127 poteaux MT et 10 cabines à transformateurs. Ce *feeder* est très peu affecté par des déformations du sol. La majorité des poteaux MT sont en acier galvanisé, bien encastrés dans le sol dans des structures en béton; d'autres poteaux sont en bois.
- Le *feeder* Nguba (commune d'Ibanda) comprend 144 poteaux MT et 8 cabines (Figure 9). Quelques poteaux MT sont en acier, les autres sont en bois profilés, notamment vers la centrale Ruzizi II. Le *feeder* est affecté par des zones de déformation du sol, mais la majeure partie du réseau est intacte. Une cabine, la cabine Nyawera, présente des fissures (Figure 2B) dues à la déformation du sol.
- Le *feeder* Saio (communes de Kadutu et Ibanda) est constitué de 56 poteaux MT, 13 pylônes HT et 7 cabines. Tous les poteaux MT sont en acier galvanisé, la totalité des cabines sont construites en maçonnerie, à l'exception de la cabine Kasoko, construite en planche de bois, et les pylônes HT sont en treillis métallique galvanisé. Ce *feeder* est affecté par plusieurs zones de déformation (Figure 9). Ce *feeder* se montre le plus vulnérable dans les quartiers industriel et Nyamugo. Dans le quartier Nyamugo, les pylônes HT sont les plus affectés tandis que dans le quartier industriel nous constatons que, ce sont plutôt les MT qui sont les plus endommagés.
- Le *feeder* Km4 (communes de Kadutu et d'Ibanda) comprend 90 poteaux MT et 3 cabines. Tous les poteaux MT sont en acier galvanisé. Deux cabines sont en maçonnerie et l'autre sur poteau. Le *feeder* est affecté par des déformations du sol. Une cabine présente des fissures (cabine Cimpunda). Ces fissures seraient apparues suite au séisme de 2008 (D'OREYE *et al.*, 2011).
- Le *feeder* Km2 nord (commune de Kadutu) comprend 69 poteaux MT et 6 cabines. Les poteaux MT sont en acier galvanisé et les cabines en maçonnerie. Le *feeder* traverse plusieurs zones de déformation. Plusieurs poteaux MT sont endommagés, alors que pour les 4 cabines situées dans les zones de déformation, il n'y a apparemment pas de dégâts.
- Le *feeder* Weshu (commune de Bagira) compte 119 poteaux MT, 3 pylônes HT et 4 cabines. Les poteaux MT sont en acier galvanisé, les HT en treillis d'acier galvanisé, et les cabines en maçonnerie. Le *feeder* ne traverse aucune des zones de déformation que nous avons inventoriées. Cependant, au nord de la commune, il passe près d'une déformation liée au glissement de terrain de Nyakavogo (MUGARUKA *et al.*, 2017). Avant la grande réactivation du glissement dans les années 1990, une ligne électrique MT traversait cette zone (MUGARUKA *et al.*, 2017).

DISCUSSION

De toutes les observations qui ont été faites, il est important de garder à l'esprit que les données récoltées ne sont pas exhaustives. Cette étude montre des tendances que nous pouvons estimer assez fiables en raison du protocole d'acquisition de données que nous avons suivi, mais il faut cependant rester critique par rapport à ces chiffres.

Indépendamment de l'exhaustivité des observations, un autre élément à garder à l'esprit est que cette analyse n'a pas pu prendre en compte les aspects temporels liés aux dégâts car les données de la SNEL et de la REGIDESO relatives aux réparations réalisées sur les réseaux n'étaient pas accessibles pour nous permettre de tenir compte de cet aspect. En principe, si les moyens techniques et financiers le permettent, lorsque des conduites d'eau ou des poteaux électriques sont fortement endommagés, ils sont réparés, voire remplacés. Dès lors, l'ampleur des dégâts que nous reportons dans cette étude est un constat minimum; dans la réalité, ils sont plus importants.

L'analyse des conduites en fonction de leur époque d'installation montre que les éléments les plus récents semblent être les plus vulnérables. Ici notons aussi qu'il faut rester prudent dans l'interprétation. Suivant l'époque d'installation, les infrastructures pourraient avoir été construites avec

des matériaux plus résistants. Nous pouvons supposer par exemple que les matériaux utilisés à l'époque belge pourraient être d'une qualité plus résistante que ceux utilisés par après. Cependant, il se peut que les installations les plus anciennes aient subi d'importants dégâts et aient été reconstruites et éventuellement déplacées dans des zones subissant moins de contraintes et que seuls subsistent aujourd'hui les éléments les mieux construits et/ou placés dès le départ dans des zones sans déformation. Dans cette analyse, nous devons aussi prendre en compte le fait que les installations les plus récentes sont construites là où la population s'est installée récemment. Sachant qu'il y a dans de nombreux cas des quartiers qui se sont développés de manière anarchique indépendamment des contraintes liées par exemple aux glissements de terrain (BALEGAMIRE et al., 2017; KULIMUSHI et al., 2017; MUGARUKA et al., 2017), nous pourrions être en mesure de dire que les installations de distribution récentes ont été mises en place dans ces quartiers en faisant abstraction des déformations du sol et en donnant la priorité à l'approvisionnement de ces populations.

Dans cette étude, nous avons abordé la vulnérabilité des distributions d'eau et d'électricité à travers l'analyse physique des dégâts. Il faut garder à l'esprit que la vulnérabilité peut inclure de nombreux autres aspects liés non seulement à la perspective économique mais aussi sociale, que ce soit au niveau directe ou indirecte. Nous pourrions par exemple nous étonner du fait que des installations récentes aient été mises en place dans des zones de déformation. Mais, en prenant en compte la densification extrême de la population dans des zones de déformation de certains quartiers, il existe une urgence à répondre à la fourniture d'eau et d'électricité.

CONCLUSION

Dans cette étude, l'inventaire de zones de déformation du sol dans la ville de Bukavu et la mise à jours de la cartographie de certaines parties des réseaux de distribution d'eau et d'électricité respectivement de la REGIDESO et de la SNEL a permis d'apporter certains éclaircissements sur la vulnérabilité de ces infrastructures par rapport à ces contraintes environnementales. L'étude montre que les trois communes de Bukavu sont concernées par des dégâts liés à ces déformations du sol. Même si l'étude n'est pas exhaustive, il est aisé de voir que les problèmes de vulnérabilité les plus importants se concentrent dans des zones de déformation du sol qui sont aussi les plus habitées. Cependant, il est impératif d'être prudent dans les résultats que nous montrons notamment lorsque l'évolution temporelle de la ville est prise en compte. Les cartes que nous produisons ici doivent être considérées comme un premier support pouvant servir de base à des études plus poussées s'intéressant à la gestion des réseaux de distribution d'eau et d'électricité et à la prise en compte des vulnérabilités associées.

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 GeoRisCA (Grant SD/RI/02A, Belgian Science Policy). Merci également à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail et plus particulièrement à Damien Delvaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALIMWINJA CIRANO, B., 2013. La centrale hydroélectrique Ruzizi I. Rapport de stage de graduat pour l'Institut Supérieur de Techniques Appliquées (ISTA/Bukavu).
- BALEGAMIRE, C., MICHELLIER, C., MUHIGWA, J. B., DELVAUX, D., IMANI, G. & DEWITTE, O., 2017. Vulnérabilité du bâti face aux glissements de terrain: analyse spatio-temporelle à Bukavu (RD Congo). *Geo-Eco-Trop*, 41, 2: 263-278.
- BENNETT, G.L., ROERING, J.J., MACKAY, B.H., HANDWERGER, A.L., SCHMIDT, D.A. & GUILLOD, B.P., 2016. Historic drought puts the brakes on earthflows in northern California. *Geophysical Research Letters*, 43: 5725–5731.
- CICR, 2012. Réseau de distribution d'eau potable de la ville de Bukavu. Etude de développement: Stratégie de distribution et dimensionnement préliminaire. Rapport du Comité international de la Croix-Rouge. 85 pp.

- 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.
- 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.
- D'OREYE, N., GONZALEZ, P.J., SHULER, A., OTH, A., BAGALWA, L., EKSTRÖM, G., KAVOTHA, D., KERVYN, F., LUCCAS, C., LUKAYA, F., OSONDUNDU, E., WAUTHIER, C. & FERNANDEZ, J., 2011. Source parameters of the 2008 Bukavu-Cyangugu earthquake estimated from InSAR and teleseismic data. *Geophys. J. Int.*, 184: 434-948.
- GILL, J.C., & MALAMUD, B.D., 2014. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 52: 680-722.
- JACOBS, L., DEWITTE, O., POESEN, J., DELVAUX, D., THIERY, W. & KERVYN, M., 2016. The Rwenzori Mountains, a landslide-prone region? *Landslides*, 13, 519-536.
- JACOBS, L., DEWITTE, O., POESEN, J., MAES, J., MERTENS, K., SEKAJUGO, J. & KERVYN, M., 2017. Landslide characteristics and spatial distribution in the Rwenzori Mountains, Uganda. *Journal of African Earth Sciences*, 134: 917-930.
- 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.
- KULIMUSHI, M.S., MUGARUKA, B.T., MUHINDO, S.W., MICHELLIER, C. & DEWITTE, O. 2017. Landslides and elements at risk in the Weshwa watershed (Bukavu, DR Congo). *Geo-Eco-Trop* , 41, 2: 233-248.
- MAES, J., KERVYN, M., DE HONTHEIM, A., DEWITTE, O., JACOBS, L., MERTENS, K., VANMAERCKE, M., VRANKEN, L. & POESEN, J., 2017. Landslide risk reduction strategies: A review of practices and challenges for the tropics. *Progress in Physical Geography*, 41: 191-221.
- MAKI MATESO, J.-C. & DEWITTE, O., 2014. Towards an inventory of landslide processes and the elements at risk on the Rift flanks West of Lake Kivu (DRC). *Geo-Eco-Trop*, 38: 137-154.
- MUGARUKA, B.T., KULIMUSHI, M.S., MUHINDO, S.W. & DEWITTE, O., 2017. Anatomy of Nyakavogo landslide (Bukavu, DR Congo): interplay between natural and anthropogenic factors. *Geo-Eco-Trop*, 41, 2: 249-262.
- 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.
- MONSIEURS, E., KIRSCHBAUM, D.B., THIERY, W., VAN LIPZIG, N., KERVYN, M., DEMOULIN, A., JACOBS, L., KERVYN, F. & DEWITTE, O., 2017. Constraints on Landslide-Climate Research Imposed by the Reality of Fieldwork in Central Africa. In: DE GRAFF, J. V., SHAKOOR, A. (eds.), 3rd North American Symposium on Landslides: Landslides: Putting Experience, Knowledge, and Emerging Technologies into Practice. Association of Environmental & Engineering Geologists (AEG), pp. 158-168.
- 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.
- SCHULZ, W.H., COE, J. A., RICCI, P.P., SMOCZYK, G.M., SHURTLEFF, B.L. & PANOSKY, J., 2017. Landslide kinematics and their potential controls from hourly to decadal timescales: Insights from integrating ground-based InSAR measurements with structural maps and long-term monitoring data. *Geomorphology*, 285: 121-136.
- SMETS, B., DELVAUX, D., ANN ROSS, K., POPPE, S., KERVYN, M., D'OREYE, N. & KERVYN, F., 2016. The role of inherited crustal structures and magmatism in the development of rift segments: Insights from the Kivu basin, Western branch of the East African Rift. *Tectonophysics*, 683: 62-76.
- 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 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.