



Numéro spécial

Analyse sismotectonique de quelques failles potentiellement actives de la partie occidentale du rift du Kivu en République démocratique du Congo (RDC)

Sismotectonic analysis of some potentially active faults on the western side of the Kivu rift in Democratic Republic of the Congo (DRC)

Gloire Bamulezi GANZA¹, Georges Tuluka MAVONGA² & Damien DELVAUX³

Abstract: The sismotectonic investigation of the western side of the Kivu rift allowed to identify and characterise some sismogenic faults on the basis of tectonic parameters such as the tensor of the orthogonal principal stress (σ_1 , σ_2 and σ_3), the tectonic regime index (R and R') and the azimuths of the maximal (S_{Hmax}) and minimal (S_{Hmin}) horizontal principal stresses. Those parameters were obtained with the help of the Win-Tensor software using orientation data of striated fault planes and various fractures measured during field work and also of earthquake focal mechanisms. Using this approach, the morphotectonic markers observed in the field have been associated with two distinct large sismotectonic zones of the western branch of the East-African rift system. The first one comprises the northern part of the basin of Lake Kivu in which we have observed faults with general NNE-SSW orientation. The second zone comprises the southern part of Lake Kivu, including the depression of the Rusizi River until the northern tip of the Lake Tanganyika basin. The faults in this zone are preferably N-S oriented.

Keywords: Kivu, Rift, Sismotectonics, Morphotectonics, Sismogenic fault, Earthquake focal mechanisms

Résumé: L'étude sismotectonique de la partie occidentale du rift du Kivu a permis d'identifier et de caractériser quelques failles sismogènes en se basant sur les paramètres tectoniques tels que le tenseur des contraintes principales orthogonales (σ_1 , σ_2 et σ_3), les index de régime tectonique (R et R') ainsi que les azimuths des axes des contraintes horizontales maximales (S_{Hmax}) et minimales (S_{Hmin}). Ces paramètres ont été obtenus à l'aide du logiciel Win-tensor à partir des données d'orientation des plans de faille striés et des fractures diverses mesurées lors d'une campagne de levé de terrain ainsi que celles de mécanisme au foyer de séismes instrumentaux. Sur base de cette approche, les marqueurs morphotectoniques observés sur le terrain ont été associés à deux grandes zones sismotectoniques distinctes de la branche occidentale du Système du Rift Est-Africain. La première zone comprend la partie nord du bassin du lac Kivu dans laquelle nous avons observé des failles de direction générale NNE-SSW. Quant à la seconde zone, elle comprend les parties sud du bassin du lac Kivu, ainsi que la vallée de la rivière Rusizi jusqu'à l'extrême nord du bassin du lac Tanganyika. Les failles décrites dans cette zone sont orientées préférentiellement N-S.

Mots clés: Kivu, Rift, Sismotectonique, Morphotectonique, Faille sismogène, Mécanismes au foyer des séismes

INTRODUCTION

La partie occidentale du rift du Kivu constitue un des segments de la branche occidentale du Système du Rift Est-Africain (SREA) (Figure 1). Elle est une des régions les plus densément peuplées de la RDC et l'aléa sismique y est le plus élevé comme le montre la récurrence des séismes de magnitude supérieure ou égale à 4 qui y ont été enregistrés (MAVONGA, 2010; DELVAUX *et al.*, 2016).

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

² Observatoire volcanologique de Goma, DR Congo. Email: mavotulu@gmail.com

³ Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique. Email: damien.delvaux@africamuseum.be

Les dommages directs, indirects et collatéraux causés par ces séismes sur les populations, les infrastructures publiques ou privées et l'environnement en général, sont nombreux: pertes en vies humaines, effondrement des bâtiments, déclenchement de glissements de terrain, dégradation des routes, drains, caniveaux et du réseau d'adduction d'eau, etc. Dans cet article, nous cherchons à étudier le lien existant entre les séismes enregistrés et les failles actives observées dans la partie occidentale du rift du Kivu.

De nombreux travaux sur la région du rift du Kivu se sont plus focalisés sur le volcanisme (KAMPUNZU *et al.*, 1983, 1998; ILUNGA, 1991; TEDESCO *et al.*, 2002; KOMOROWSKI *et al.*, 2003; WAUTHIER *et al.*, 2012, etc.), l'évaluation du risque sismique (MAVONGA, 2007 ; 2010; MAVONGA & DURRHEIM, 2009; d'OREYE *et al.*, 2011; BANTIDI *et al.*, 2014, DELVAUX *et al.*, 2016), l'étude des glissements de terrain (MUNYOLOLO *et al.*, 1999; MOEYERSONS *et al.*, 2004; MAKI MATESO, 2014; MAKI MATESO & DEWITTE, 2014; BUTARA *et al.*, 2015) ainsi que sur l'identification et la caractérisation des failles bordières du rift (BOUTAKOFF, 1934, VILLENEUVE, 1977; CHOROWICZ & MUKONKI, 1979; EBINGER, 1989a; 1989b).

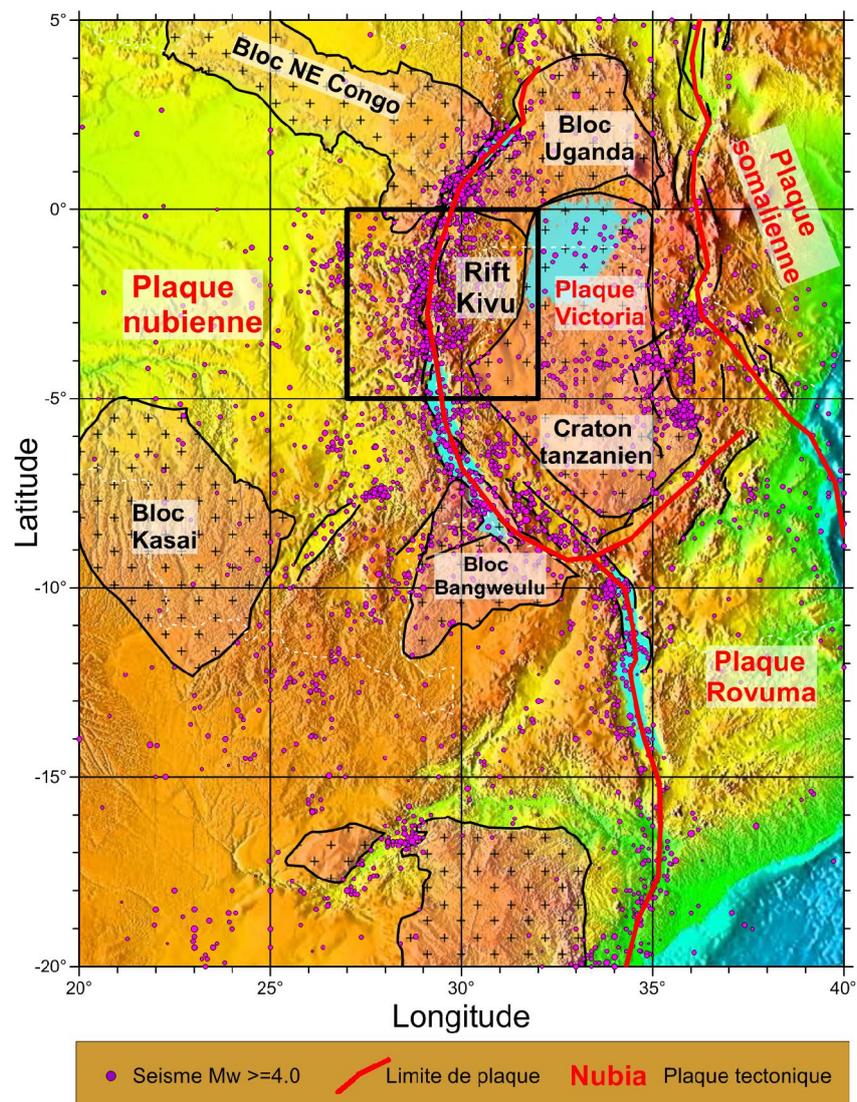


Figure 1: Système du Rift East Africain (SREA) dans son contexte géodynamique régional montrant les blocs archéens (croix), les failles principales (lignes noires), les épicesentres des séismes de magnitude ≥ 4.0 et les limites des plaques tectoniques (lignes rouges grasses).

Ce travail s'inscrit dans une vision globale de l'étude de l'aléa sismique dans la région des grands lacs en utilisant une approche sismotectonique. Nous examinons les relations qui existent entre la sismicité instrumentale et les différents marqueurs de la tectonique active, visibles sur le terrain. Ainsi, l'objectif principal de cette étude est d'identifier et de caractériser les failles potentiellement actives (sismogènes) dans la partie occidentale du rift du Kivu, en confrontant les données de la sismicité (localisation des séismes, mécanismes au foyer) à celles des marqueurs structuraux et morphotectoniques de terrain (plans de failles striés, joints de tension, fractures diverses, contact anormal entre les formations géologiques, etc.).

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le rift du Kivu (Figures 1 et 2) s'est développé dans une région intracontinentale encadrée par quatre blocs cratoniques d'âge archéen (craton tanzanien, block NE Congo, block Bangweulu et block Kasai). Plusieurs ensembles géologiques d'âge protérozoïque à actuel y ont été décrits par de nombreux auteurs (FOURMARIER, 1949; VERHAEGHE, 1963; VILLENEUVE, 1977, 1980, 1983, KAMPUNZU, 1981; LUBALA, 1981; KAMPUNZU *et al.*, 1985; 1998; RUMVEGERI, 1987; PASTEELS *et al.*, 1989; IDIANSO, 1990; TACK *et al.*, 1996; FERNANDEZ-ALONSO, 2007; FERNANDEZ-ALONSO *et al.*, 2012; etc.) en se basant sur des données géologiques, tectoniques et géochronologiques.

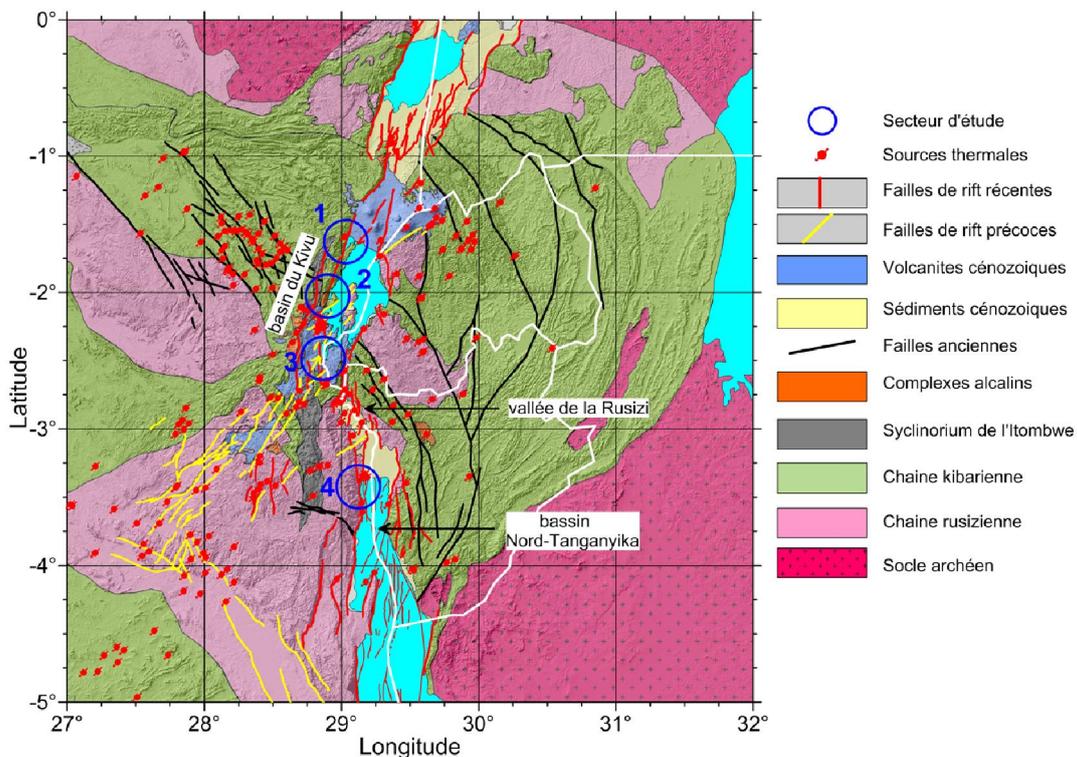


Figure 2: Localisation des secteurs d'étude dans le rift du Kivu

(1): Sake-Minova, (2): Ihusi-Kabamba-Katana, (3): Bukavu-Nyangezi, (4): Kiliba-Uvira.

Base topographique dérivée des données SRTM (30 m de résolution – limites nationales en traits blancs).

Les principaux ensembles géotectoniques sont, par âge décroissant:

- la chaîne rusizienne (2000-1800Ma), orientée NW-SE et constituée de formations métamorphiques dont des anatexites, gneiss, amphibolites, micaschistes, phyllites, et quartzites;
- la chaîne kibarienne (1400-950 Ma), orientée NW-SE à l'ouest du lac Kivu et NE-SW à l'est, et constituée de quartzites, gneiss, micaschistes, quartzo-phyllades et amphibolites avec parfois des lentilles conglomératiques. Celle-ci contient aussi des intrusions granitiques, dykes de dolérite et pegmatites, tous d'âge mésoprotérozoïque;

- les massifs syénitiques-rhyolitiques de Kahuzi et de Biega (750Ma) qui appartiennent à un alignement de complexes alcalins anorogéniques considérés comme des marqueurs géodynamiques d'un régime distensif (KAMPUNZU *et al.*, 1985; TACK *et al.*, 1996);
- le synclinorium de l'Itombwe d'âge néoprotérozoïque supérieur (Cryogénien), globalement allongé N-S le long du flanc ouest du lac Kivu, au Nord du lac Tanganyika, et constitué de schistes graphiteux, quartzites, schistes et conglomérats noirs;
- les épanchements volcaniques du Cénozoïque. Le volcanisme du Sud-Kivu dans la branche occidentale du SREA comprend trois cycles de significations structurales différentes (PASTEELS *et al.*, 1989; KAMPUNZU *et al.*, 1998; POUCKET *et al.*, 2016). Des basaltes tholéitiques continentaux, produits par des éruptions fissurales marquent le stade pré-rift continental entre 10 et 7.5 Ma (premier cycle). Les laves alcalines sodiques d'âge pléistocène (deuxième cycle) traduisent l'individualisation et l'évolution du rift (stade syn-rift) entre 7.5 et 5 Ma. Au cours du temps, l'activité volcanique migre de l'extérieur vers le centre du fossé. Parallèlement, le taux de sous-saturation des produits basiques décroît. La mise en place, dans la partie axiale du rift, des magmas transitionnels quaternaires (troisième cycle) durant les 2 derniers millions d'années va de pair avec l'amincissement crustal mis en évidence par les données géophysiques (KAMPUNZU *et al.*, 1983);
- les dépôts quaternaires récents de travertins issus des sources hydrothermales (BOUTAKOFF, 1933; PASSAU, 1933; VERHAEGHE, 1963; DEELSTRA *et al.*, 1972). Ces dernières sont en relation avec l'activité des failles du rift.

Le rift du Kivu, qui occupe la partie centrale de la branche ouest du SREA (Figure 2), marque une zone de transition entre le rift du Tanganyika-Rukwa de direction générale NW-SE et le rift Albertin (lac Edouard, mont Ruwenzori, lac Albert) de direction NE-SW (EBINGER, 1989b).

Le SREA se développe en deux branches (Ouest et Est) qui fragmentent le continent Africain du nord au sud et isolent trois microplaques tectoniques (Victoria, Rovuma et Wandle) de la plaque nubienne à l'ouest et somalienne à l'est. Les modèles cinématiques du SREA, contraints par les données GPS géodésiques et les mécanismes au foyer de tremblement de terre (STAMPS *et al.*, 2008; DELVAUX & BARTH; 2010, FERNANDES *et al.*, 2013; SARIA *et al.*, 2014) montrent que l'extension du SREA se fait globalement selon une direction E-W. La vitesse d'ouverture diminue globalement du nord (5.1 mm.an⁻¹ dans le rift Ethiopien) vers le sud (1.1 mm.an⁻¹ dans l'Océan Indien au sud du Mozambique) mais elle augmente progressivement le long de la branche ouest, de 1.3 mm.an⁻¹ au niveau du lac Albert à 1.7 mm.an⁻¹ au nord du lac Kivu et 2.3 mm.an⁻¹ au sud du lac Kivu, selon les dernières estimations (SARIA *et al.*, 2014).

Le rift du Kivu a une orientation générale NNE-SSW. Il comprend, du nord vers le sud, le bassin de Rutshuru, le massif volcanique des Virunga, le lac Kivu, la vallée de rift avortée de Kamituga qui prolonge le lac Kivu vers le SSW et la dépression de la Rusizi qui connecte l'extrémité sud du lac Kivu à l'extrémité nord du lac Tanganyika (EBINGER, 1989b; DELVAUX *et al.*, 2016). Dans la partie sud du rift, on observe des failles de direction NE-SW qui sont recoupées par des failles plus récentes de direction N-S (VILLENEUVE, 1977). Il s'agit pour ces dernières, d'un système de failles normales en échelon liées au rifting et bordant plusieurs bassins volcano-sédimentaires asymétriques (EBINGER, 1989b).

Entre 1888 et 2015, plusieurs séismes de magnitude supérieure ou égale à 4 ont été enregistrés dans le rift du Kivu (Figure 1). La partie centrale du bassin du lac Kivu a connu un important séisme (Mw 6,2) le 24 octobre 2002 dans le territoire de Kalehe, qui a été fortement ressenti à Goma, Bukavu et Kigali. Ce séisme est le plus fort observé dans ce bassin depuis 1900 (MAVONGA, 2007; WAUTHIER *et al.*, 2015). Le 03 Février 2008, un autre séisme important (Mw = 6.0) s'est produit à 20 km au nord de la ville de Bukavu. Lors de ce séisme 9 personnes ont perdu la vie, 400 personnes ont été grièvement blessées et 1500 maisons se sont effondrées (MAVONGA, 2010). Récemment, deux séismes (Mw 5.8 et 5.7) ont frappé la région de Katana-Kalehe le 7 août 2015, causant 3 morts, une soixantaine de blessés et quelques destructions. Enfin un couple de séismes (Mb 4.5 et 4.8) ont effrayé la population de Bukavu le 24 septembre dernier, causant 2 morts malgré leur magnitude modérée (USGS Earthquake Hazards Program).

METHODES D'ANALYSE SISMOTECTONIQUE

L'analyse sismotectonique effectuée vise à reconnaître des structures faillées susceptibles de rejouer et d'engendrer des séismes. A cette fin, les liens entre l'activité sismique, les mécanismes de la déformation actuelle et leur expression au niveau des structures tectoniques potentiellement actives sont recherchés. Pour cela, nous nous appuyons sur des données sismologiques (sismicité historique et instrumentale), structurales (superficielles et profondes) ainsi que sur les observations des mouvements tectoniques récents (néotectoniques) via les approches microtectoniques, morphotectoniques, géodésiques, etc. (e.g. KELLER & PINTER, 2002; CAMELBEECK *et al.*, 2007).

Analyse morphotectonique

Les indices morphotectoniques de la déformation active observés sont les escarpements de faille, glissements de terrain, sources hydrothermales, fissures dans le sol, affaissements des routes, dégradations des drains et caniveaux, etc. Pour mesurer, positionner et illustrer ces marqueurs sur terrain, nous avons utilisé une boussole de géologie structurale, un récepteur GPS de randonnée, un thermomètre digital et un appareil photo numérique.

Analyse cinématique des failles et reconstruction des paléocontraintes

Les mesures structurales d'orientations des marqueurs tectoniques (failles avec stries associées, joints de tension, fractures diverses etc.) ont été traitées à l'aide du logiciel Win-Tensor.5.8, conçu pour l'analyse des structures cassantes (failles et fractures) et la reconstruction des contraintes tectoniques (DELVAUX & SPERNER, 2003; DELVAUX, 2012). La détermination des contraintes tectoniques par inversion des structures cassantes se base sur le principe selon lequel la direction et le sens de glissement lors de l'activation d'un plan de faille sont strictement contrôlés par l'orientation du plan de discontinuité et la contrainte appliquée sur ce plan, caractérisée par un ellipsoïde des contraintes défini par 3 axes principaux (σ_1 , σ_2 , σ_3) et son rapport de forme $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. Inversement, ayant une population de failles avec stries observées et orientées à l'affleurement, il est donc possible de reconstituer l'état de contrainte qui les a produites (ANGELIER, 1989). Dans le cas présent, nous avons utilisé la méthode de l'optimisation rotationnelle avec la fonction de minimisation F5 du programme Win-Tensor. Les principaux paramètres des contraintes tectoniques ainsi déterminés sont:

- l'orientation de trois axes principaux des contraintes orthogonaux entre eux avec $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$;
- le rapport de forme de l'ellipsoïde basé sur les magnitudes des contraintes principales:
 $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$;
- le régime de contrainte (extensif, décrochant ou compressif), en fonction de l'axe le plus vertical (respectivement σ_3 , σ_2 , σ_1);
- l'index des régimes tectoniques (R'), basé sur le rapport de forme R et le type de régime de contrainte et donné par la relation suivante (DELVAUX *et al.*, 1997):
 - $R' = R$ pour le régime extensif (de failles normales: NF)
 - $R' = (2-R)$ pour le régime décrochant (de failles décrochantes: SS)
 - $R' = (2+R)$ pour le régime compressif (de failles inverses: TF)
- L'échelle des grandeurs de R' va de 0 à 3: de 0 à 1 pour un régime extensif; de 1 à 2 pour un régime décrochant et de 2 à 3 pour une régime compressif ;
- l'azimuth des axes des contraintes horizontales maximales (S_{Hmax}) et/ou minimales (S_{Hmin}) calculé selon LUND & TOWNEND (2007).

Catalogue de sismicité

Les données relatives à la sismicité sont issues du catalogue de sismicité compilé pour la région du lac Kivu par DELVAUX *et al.* (2016) sur base du catalogue révisé de l'International Seismological Center (ISC) et complété par les données de l'IRSAC (Lwiro) et de données macrosismiques. Il contient 1054 séismes entre 1931 et 2015 et de magnitude équivalente M_w allant

jusque 6.3. Il comprend aussi toutes les répliques disponibles et les mécanismes au foyer calculés de certains séismes.

Supports cartographiques

La représentation graphique des épicentres de séismes enregistrés, des linéaments, de quelques failles connues dans le rift du Kivu en RDC et au Rwanda, des sources hydrothermales ainsi que des marais alignés le long de certaines failles, a été faite à l'aide des logiciels Surfer 10. Pour cette cartographie, un relief ombragé dérivé du modèle numérique de surface SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) à 30 mètres de résolution spatiale, englobant toute l'étendue du rift du Kivu, a été utilisé.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Néotectonique

Plusieurs marqueurs néotectoniques ont été observés dans différentes zones que nous avons regroupées en 4 secteurs (Figure 2).

Secteur 1

A Sake, au coin nord-ouest du lac Kivu, affleurent des formations constituées de schistes noirs orientés ENE-WSW contenant des sulfures disséminés et des grès quartzitiques orientés E-W près d'un marais. Ce marais situé au NW de la cité de Sake est recouvert des cendres volcaniques et scories. On y observe des sources d'eau chaude d'une profondeur dépassant 3 m et alignées sur une direction N-S au pied d'un escarpement de colline (de plus de 50 m de hauteur) où affleurent des grès quartzitiques. Celles-ci ont déjà été mentionnées par PASSAU (1933). Les valeurs de température mesurées dans ces sources d'eau (moyenne de 26.9°C) sont légèrement supérieures à celle des eaux d'un ruisseau (moyenne 19,7°C) situé à proximité.

A Muranga et à Ngumba, plus au sud sur la route Sake-Minova, on observe des quartzites et des schistes gréseux rouges orientés E-W à NE-SW. Les formations observées à Muranga sont affectées par endroits par des plans de faille normale à composante senestre de direction NNE-SSW visibles sur un escarpement de plus de 5 m de hauteur. Celle-ci est accompagnée d'une brèche de faille mélangée à de l'argile dans la zone de cisaillement. La présence d'argile dans la brèche de faille est une indication que les mouvements observés ont eu lieu en connexion avec la surface et donc que la faille est récente et peut être considérée comme néotectonique. Plus au sud, à Burotshe (Shasha), un joint argileux entre deux gros bancs de quartzite orientés NNW-SSE a été réactivé en faille normale, associé par endroits avec une brèche de faille argileuse (Figure 3a).

Sur l'axe Bweremana-Minova situé plus au sud, les formations géologiques sont constituées d'une alternance des quartzites et schistes. A Bweremana (Figure 3b), un joint de stratification argileux entre deux gros bancs de quartzite orienté NNE-SSW et à pendage ESE (vers le lac) montre des stries de glissement bien marquées avec un sens de glissement normal à légère composante senestre (Figure 3c). Une brèche de faille mélangée à des argiles est visible dans la zone de cisaillement. Plus au sud de Minova, à Makelele, des plans de faille normale de direction NNE-SSW et ayant réactivé les joints de stratification, ont été observés (Figure 3d).

Secteur 2

Dans le secteur Ihusi-Kabamba-Katana, au milieu du rift du lac Kivu du côté congolais, des sources hydrothermales ayant entraîné des dépôts de travertin s'observent à plusieurs endroits tels que Kankule et Mahyuza (Figure 3e). La température et la localisation de ces sources hydrothermales apparaissent influencées par l'activité sismotectonique de la région. Lors de la crise sismique du 07 août 2015 (séismes de Mw 5.8 et 5.7), certaines sources se sont tariées et d'autres sont apparues à Mahyuza et des variations de température ont été enregistrées. Durant la même période, plusieurs

fissures ouvertes dans le sol et orientées N-S à NNE-SSW ont été observées à Ihusi, Kabamba et Kasheke (Figure 4f).



Figure 3: Marqueurs morphotectoniques observés sur le terrain.

a: brèche de faille mélangée à des argiles à Burotshe, **b:** miroir de faille strié à Bweremana, **c:** escarpement de faille à Bweremana, **d:** plans de faille ayant réactivé la stratification à Makalele, **e:** sources hydrothermales à Kankule (Katana), **f:** ouvertures dans le sol dues aux séismes du 7 août 2015 à Kalehe.

Secteur 3

Le secteur Bukavu-Nyangezi au sud du lac Kivu, comporte une diversité de marqueurs néotectoniques, dont des failles avec stries, des fractures diverses, des sources hydrothermales qui peuvent être un signe de l'activité tectonique.

Dans la dépression centrale de Bukavu, orientée N-S et appelée « microrift » par MOEYERSONS *et al.* (2004), plusieurs grands glissements de terrain profonds affectant les basaltes qui alternent avec les paléosols argileux sont observés. Ces grands glissements ont leur surface d'arrachement qui se développe au niveau de deux structures linéaires orientées N-S. Le plus grand est celui de Funu, avec un escarpement de plus de 100 m de haut et de type rotationnel présentant de multiples surfaces de rupture (Figure 4a, c, e). L'escarpement principal expose une alternance de couches de basalte, chacune surmontée d'une couche d'argile rouge d'altération. A la base de cet escarpement, on observe par endroits des plans de faille normale striés et quelques brèches tectoniques dans les basaltes. (Figure 4b). Ces structures pourraient en partie être liées à la formation du

glissement de Funu, mais semblent superposées à des déformations plus profondes, probablement d'origine tectonique.

A Karhale, à la sortie occidentale de Bukavu, une grande ravine se développe dans des basaltes altérés et traverse une zone de contact anormal entre les basaltes et des sédiments déposés en terrasse. Ces terrasses pourraient être mises en relation avec un ancien niveau du lac, dont on sait qu'il a atteint jusque 160 à 200 m au-dessus du niveau actuel à la fin du Pléistocène – début de l'Holocène (ROSS *et al.*, 2014; POUCKET *et al.*, 2016). Dans le fond de cette ravine, à proximité du contact avec les sédiments, on observe des fractures diffuses qui affectent des basaltes ayant subi une altération en pelures d'oignon. Dans les sédiments à proximité de ce contact, on observe une zone argileuse déformée avec des plans de glissement striés. Cette zone se trouve alignée avec la base d'un escarpement qui contrôle la morphologie du secteur et dans lequel se sont développés des instabilités gravitaires. Au passage de cette zone, la route de Karhale (RN 2) se déforme par l'action d'un plan de glissement normal que l'on peut suivre en contrebas de la route jusqu'à la base du ravin et qui provoque des déformations superficielles dont des fissures dans le sol, des basculements d'arbre et la rupture d'une conduite d'eau (Figure 4d). Le récent effondrement du versant sous l'Institut Technique Fundi Mandela (ITFM) suite à la rupture d'un fossé de drainage semble aussi être lié à cette instabilité. Cette ligne de déformation observée en surface marque la limite supérieure d'une large zone d'instabilité affectant le Lycée Wima situé en contrebas. Nous interprétons cette ligne de fracture et ces instabilités comme des déformations gravitaires superficielles qui sont favorisées par la présence d'une faille qui passerait par la base de cet escarpement et qui est recoupé par cette ravine profonde. Cette faille est largement masquée en surface par les instabilités gravitaire qui se développent dans l'escarpement.

A Nyangezi, au sud de Bukavu, plusieurs sources hydrothermales alimentant des bassins d'eau chaude sont connues dans le marais de la Mughera (PASSAU, 1933). Mesurée en juin 2014, la température moyenne des eaux thermales (46.4°C) était largement supérieure à celle de la rivière Mughera (21.4°C). Dans une vue régionale, les sources hydrothermales observées à Nyangezi pourraient être associées à une grande zone de faille bordant le nord du bassin de la Rusizi (VILLENEUVE, 1977).

Secteur 4

Sur l'axe Kiliba-Uvira, en bordure occidentale de l'extrémité nord du lac Tanganyika, affleurent des roches d'âge paléoproterozoïque constituées en grande partie de gneiss, quartzites et micaschistes appartenant au socle Rusizien. Des plans de faille orientés NNE-SSW avec stries de glissement affectent les quartzites massifs et les micaschistes à Kiliba, Kavimvira et Kalundu (Figure 4f). Plusieurs autres fractures orientées NNE-SSW affectant des gneiss relativement altérés ont été observés sur les collines surplombant la cité d'Uvira. Les sources hydrothermales de Kavimvira sont alignées suivant cette même direction NNE-SSW.

Cinématique des failles néotectoniques et contraintes tectoniques associées

Les données cinématiques des failles mesurées le long des failles néotectoniques décrites ci-dessus ont été inversées pour en reconstruire les contraintes tectoniques associées. Les résultats obtenus (Tableau 1; Figure 5) montrent que tous les affleurements étudiés présentent un régime de contrainte extensif (contrainte principale σ_1 verticale), avec une contrainte horizontale principale (S_{hmin}) orientée généralement E-W. Seul le site de Kavimvira (situé à l'entrée de la cité d'Uvira sur la route venant de Bukavu) présente une extension orientée NW-SE (Figure 5e).

Il ressort de l'analyse de ces paramètres tectoniques que les contraintes de compression (σ_1) sont subverticales tandis que les contraintes intermédiaires (σ_2) et celles d'extension (σ_3) sont subhorizontales. Cela traduit un contexte d'extension pure soutenu par l'index de régime tectonique R' dont les valeurs sont toutes proches de 0.5 (avec $R=R'$).

Les failles de Muranga et de Bweremana de direction NNE-SSW sont alignées sur un même linéament de faille bordière qui passe par les sources hydrothermales de Sake. Leur analyse cinématique (Figure 5a, b) indique une extension WNW-ESE (S_{hmin} dans les deux cas de N94°E) sous un régime d'extension pure (R' respectivement de 0.47 et 0.42) qui s'intègre dans la zone qui couvre

la partie nord du lac Kivu (zone sismotectonique I). Toutefois, les résultats obtenus pour la faille de Bweremana (Figure 5b) montrent une composante latérale senestre appréciable qui résulterait de la réorientation de principaux axes des contraintes. En effet, l'apparition d'une faille principale dans un milieu rocheux introduit une réorientation des contraintes à son voisinage causée par une déflexion des lignes des contraintes dans un milieu présentant préalablement des plans de faiblesse (S_0 , par exemple) et/ou préalablement fracturé (BLES & FEUGA, 1981). Quant à la faille de Burotshe, elle est orientée WNW-ESE, et serait une faille transverse à la faille principale de Sake-Bweremana. Cette faille pourrait alors correspondre à une zone de transfert de mouvement d'extension entre les segments de la faille principale.



Figure 4: Marqueurs morphotectoniques observés sur terrain.

a: vue de la morphologie de relais des failles dans la dépression de Bukavu ; **b:** plan de faille strié affectant le basalte peu altéré à Funu ; **c:** route déformée suivant l'orientation de deux fractures conjuguées près du terrain de Funu ; **d:** coupure du tuyau de la conduite d'eau à Karhale ; **e:** bâtis fendillé suivi d'un basculement à Funu ; **f:** miroir de faille strié affectant les micaschistes à Kalundu.

Dans la zone sud (zone sismotectonique II) les paramètres tectoniques changent sensiblement par rapport à ceux de la zone précédente. Les failles décrites à Funu ($R' = 0.55$; S_{hmin} : N89°E, Figure 5c) et à Karhale ($R' = 0.44$; S_{hmin} : N97°E, Figure 5d) dans le « microrift » de Bukavu sont orientées N-S et leur tenseur des contraintes présente une extension principale horizontale de direction E-W.

Tableau 1 : Paramètres des champs de contraintes obtenus à partir des données des failles.

N : nombre de données utilisées; Nt : nombre total de données mesurées sur terrain; az : azimut; 1σ : déviation standard; Aver. : average (moyenne); Max. : maximum; Ori. : orientation; QR : facteur de qualité de traitement des données (A : excellent; B : bon; C : moyen; D : mauvais).

| N° | Site | | Données | | | | | | R | | | Misfit angle | | | SHmax | | | Shmin | | | Regime | | | QR |
|----|--------|--------|---------|----|----|-----|------------|------------|------------|-----|------|--------------|-------|------|-----------|------|-----------|-------|-----------|------|--------|-----------|-----|----|
| | Long. | Lat. | N | Nt | pl | az | σ_1 | σ_2 | σ_3 | pl | az | az | Aver. | Max. | 1σ | Ori. | 1σ | Ori. | 1σ | Ori. | R' | 1σ | Reg | |
| 1 | 29.044 | -1.578 | 15 | 21 | 76 | 356 | 14 | 184 | 02 | 097 | 0.47 | 6.4 | 14.2 | 004 | 23.8 | 095 | 0.42 | 0.26 | NF | B | | | | |
| 2 | 29.013 | -1.697 | 23 | 48 | 63 | 359 | 26 | 190 | 04 | 097 | 0.42 | 6.6 | 28 | 005 | 20.2 | 094 | 0.48 | 0.28 | NF | B | | | | |
| 3 | 28.841 | -2.521 | 29 | 32 | 72 | 067 | 06 | 175 | 17 | 267 | 0.55 | 14.2 | 33.3 | 179 | 25.4 | 089 | 0.55 | 0.27 | NF | C | | | | |
| 4 | 28.846 | -2.504 | 20 | 35 | 83 | 054 | 05 | 186 | 05 | 276 | 0.44 | 3.4 | 35.3 | 007 | 24 | 097 | 0.44 | 0.09 | NF | D | | | | |
| 5 | 29.156 | -3.338 | 12 | 12 | 81 | 225 | 09 | 037 | 01 | 127 | 0.44 | 12.8 | 23.5 | 037 | 22.2 | 127 | 0.44 | 0.22 | NF | D | | | | |
| 6 | 29.129 | -3.442 | 10 | 10 | 84 | 057 | 04 | 185 | 05 | 275 | 0.53 | 7.7 | 22.6 | 005 | 12.1 | 095 | 0.53 | 0.24 | NF | D | | | | |

Tableau 2 : Paramètres des champs de contraintes issus des mécanismes au foyer de séismes.

N : nombre de données utilisées; Nt : nombre total de données encodées; az : azimut; 1σ déviation standard; Aver. : average (moyenne); Max. : maximum; Ori. : orientation; QR : facteur de qualité de traitement des données (A : excellent; B : bon; C : moyen; D : mauvais).

| N° | Zones | | Données | | | | | | R | | | Misfit angle | | | SHmax | | | Shmin | | | Regime | | | QR |
|----|--------|----|---------|----|-----|----|-----|------------|------------|------------|----|--------------|-----|-------|-------|-----------|------|-----------|------|----|-----------|-----|--|----|
| | Nom | N | Nt | Pl | az | pl | az | σ_1 | σ_2 | σ_3 | pl | az | az | Aver. | Max. | 1σ | Ori. | 1σ | Ori. | R' | 1σ | Reg | | |
| I | N-Kivu | 14 | 6 | 77 | 190 | 13 | 019 | 02 | 289 | 0.63 | 12 | 32.7 | 019 | 17.3 | 109 | 0.63 | 0.31 | NF | B | | | | | |

Il y a cependant un doute sur l'origine purement tectonique ou d'une influence éventuelle d'un mouvement de masse superficiel lié au développement du glissement de Funu.

Plus au sud, dans le territoire d'Uvira, les failles normales décrites à Kavimvira ($R' = 0.44$; S_{hmin} : N127°E, Figure 5e) et à Kalundu ($R' = 0.53$; S_{hmin} : N95°E, Figure 5f) sont associées à la zone II malgré ce décalage de direction que présentent les failles de Kavimvira (Figure 5e). Ce décalage s'explique par le fait qu'il s'agit des failles de réactivation qui aurait conservé la direction des fractures préexistantes appartenant à une phase tectonique antérieure.

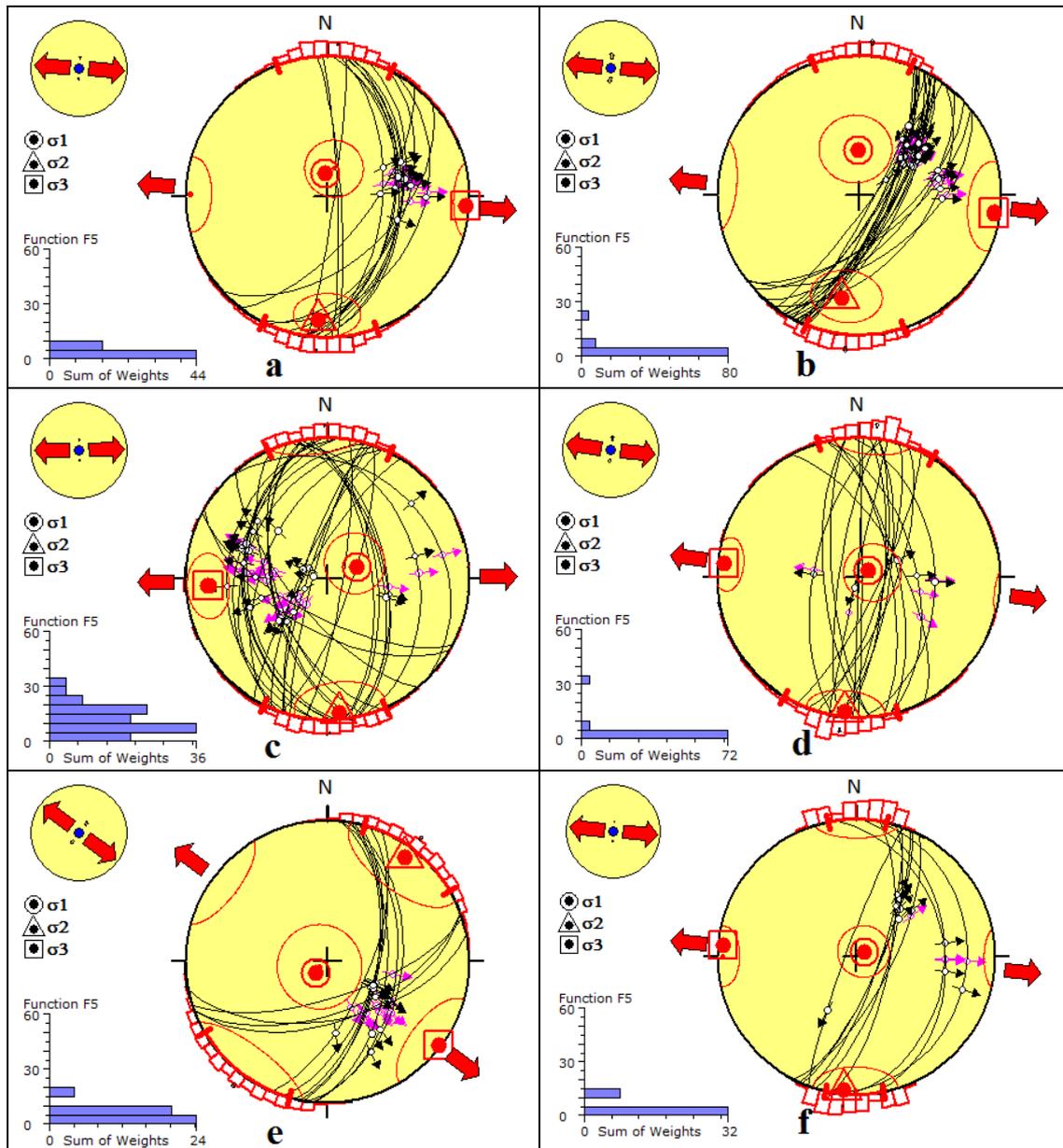


Figure 5: Stéréogrammes illustrant les résultats de l'inversion des contraintes tectoniques obtenues à l'aide du programme Win-Tensor à partir des données structurales mesurées à Muranga (a), Bweremana (b), Funu (c), Karhale (d), Kavimvira (e) et Kalundu (f).

Les grands cercles et flèches noires représentent respectivement les plans de faille avec leurs stries de glissement observées. Les flèches violettes représentent les stries modélisées. Les histogrammes illustrent les écarts de la fonction d'ajustement entre les données observées et modélisées. Les trois axes de contrainte (σ_1 , σ_2 et σ_3) sont positionnés dans les stéréogrammes et les flèches rouges à l'extérieur représentent les directions de contrainte horizontales les plus extensives (S_{hmin}). La dispersion des contraintes horizontales les plus compressives (S_{Hmax} , orthogonales à S_{hmin}) est indiquée par les diagrammes en barre rouge à l'extérieur des stéréogrammes.

Caractéristiques sismotectoniques

De la même manière que pour l'inversion des contraintes tectoniques à partir des données de fracturation mesurées sur le terrain, les mécanismes au foyer des tremblements de terre peuvent aussi être inversés pour en déduire les contraintes tectoniques actuelles.

Sur base de l'ensemble des mécanismes au foyer disponibles pour le rift du Kivu (Fig. 6), nous avons sélectionné ceux correspondant à deux zones sismotectoniques présentant des mécanismes similaires entre eux, et correspondant à la région étudiée.

La zone nord (zone I dans le tableau 2) comprend le bassin nord du lac Kivu et la partie occidentale de la province volcanique de Virunga (Figure 6). Le tenseur des contraintes obtenues présentent une extension horizontale orientée WNW-ESE (S_{hmin} : N109E).

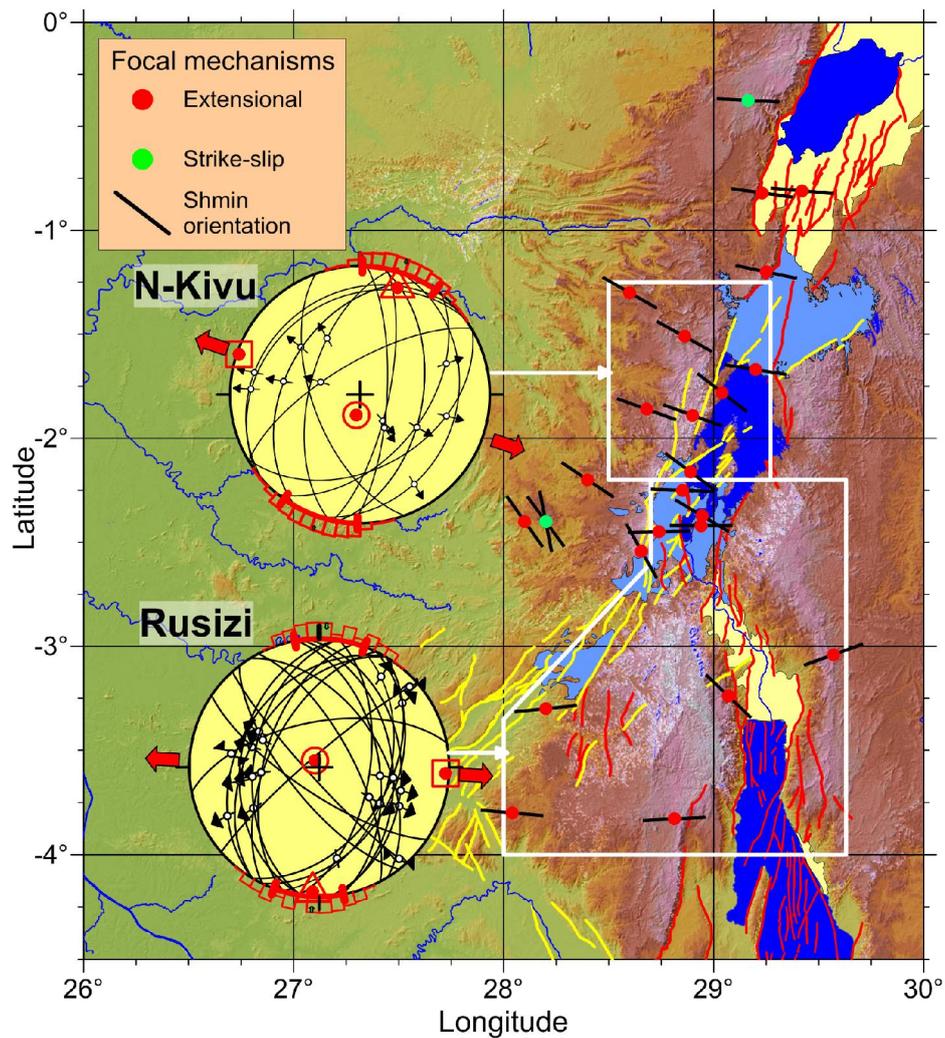


Figure 6: Contraintes tectoniques dans le rift du Kivu

d'après les données de mécanisme au foyer de tremblements de terre.

Les stéréogrammes représentent les résultats de l'inversion des contraintes avec le programme Win-Tensor à partir des mécanismes correspondant aux deux zones sismotectoniques équivalentes aux secteurs d'étude. Les deux plans focaux de chaque mécanisme ont été utilisés dans l'inversion et sont représentés sur les stéréogrammes. Voir la légende de la Figure 5 pour le détail des stéréogrammes.

La zone sud (zone II dans le tableau 2) comprend la partie sud du bassin du lac Kivu, le bassin de la haute Rusizi ainsi que l'extrême nord du lac Tanganyika (Figure 6). Le tenseur des contraintes présente une extension horizontale orientée presque E-W (S_{hmin} : N087E).

Cinématique de l'ouverture du rift du Kivu dans le SREA

Le tenseur des contraintes issu des mécanismes au foyer de séismes montre que la partie orientale de la grande plaque africaine, qui est dominée par le SREA, est affectée par des contraintes tectoniques dont l'orientation générale de l'extension principale horizontale est E-W, avec deux tendances bien distinctes (DELVAUX & BARTH, 2010). Une extension WNW-ESE qui est présente dans les segments NW du SREA (rift éthiopien, rift albertin et rift du Kivu) et dans la région SW du haut plateau (basins de Luangwa, Mweru et de l'Upemba). Une autre extension ENE-WSW qui caractérise la partie centrale de la branche occidentale du rift (sud de la Tanzanie et Rukwa), l'extrémité sud de la branche orientale du rift, tout le segment sud du rift ainsi que la marge continentale (côte indienne, canal de Mozambique et Madagascar). Par ailleurs, une étude menée par STAMPS *et al.* (2008) sur base des données GPS, indique que la direction de l'extension du rift du Kivu est de N110°E. Cette étude a été ensuite soutenue par celles de FERNANDES *et al.* (2013) et de SARIA *et al.* (2014) qui ont travaillé avec les données géodésiques et sismiques dans le rift du Kivu. Les deux approches suggèrent une direction d'extension (N100°E et N128°E) relativement similaire.

Pour la partie nord du bassin du lac Kivu (zone I), nos résultats indiquant une extension principale horizontale orientée WNW-ESE, conforme avec ceux de DELVAUX & BARTH (2010), FERNANDES *et al.* (2013) et de SARIA *et al.* (2014) mais avec plus de détails. Cependant, pour la zone allant de la partie sud du lac Kivu jusqu'au nord du bassin du lac Tanganyika (zone II), l'extension principale horizontale est plutôt orientée E-W. Ce constat corrobore la thèse énoncée pour la première fois par BOUTAKOFF (1934) et soutenue par EBINGER (1989b), selon laquelle le rift du lac Kivu représente la zone de transition entre deux directions principales des fractures associées à la branche occidentale du SREA. D'après nos résultats, ce point de jonction se trouverait dans la zone sud du bassin du lac Kivu où nous avons décrit des failles orientées N-S (failles du « microrift » de Bukavu). Ces types de failles avaient déjà été décrites par d'autres auteurs (CHOROWICZ, *et al.* 1979; EBINGER, 1989a; VILLENEUVE, 1983; MUNYOLOLO *et al.*, 1999). En effet, les modèles de faille dans la partie sud du bassin occidentale du lac Kivu sont caractérisés par des failles normales orientées N10°E à N20°E et celles orientées N-S à N170°E avec un sens de pendage vers l'ENE (EBINGER, 1989a).

Failles normales au nord du lac Kivu

Les failles décrites à Muranga et Bweremana sur la route Sake-Minova donnent des résultats compatibles avec la tectonique en extension qui caractérise le rift du Kivu. Il s'agirait de segments de faille secondaires associés à une grande zone de faille bordière mal définie de direction NNE-SSW (PASTEELS, 1961; WOOD *et al.*, 2015) qui passerait dans le grand escarpement, mais dont le tracé le long des rivages de la baie de Kabuno est peu clair car mal exprimé dans le paysage (BUSCHTEIN *et al.*, 1967, SMETS *et al.*, 2016). Comme ces failles semblent réactiver la stratification d'une alternance de quartzites, carbonates et schistes, il est possible que le mouvement total soit distribué en un nombre de failles de moindre importance, distribuées selon une large zone de faille qui définirait l'escarpement morphologique. La présence des sources hydrothermales à Sake pourraient résulter de l'activité d'un segment de cette zone de faille bordière.

Cette zone de faille qui limite par l'ouest le graben du lac Kivu à proximité du massif volcanique des Virunga pourrait avoir joué un rôle dans la répartition des séismes volcano-tectoniques associés à l'éruption du volcan Nyiragongo en Janvier 2002 (TEDESCO *et al.*, 2002; KOMOROWSKI *et al.*, 2003). Cette éruption semble avoir été causée par le transfert de magma d'un dyke profond vers un dyke éruptif superficiel (WAUTHIER *et al.*, 2012). Une série de séismes volcano-tectoniques ont été enregistrés pendant les deux mois qui suivent le début de l'éruption volcanique du Nyiragongo au 17 janvier 2002 (WAUTHIER *et al.*, 2012), dont une série de séismes liés à l'effondrement du cratère, le 22 janvier 2002 (SHULER & EKSTRÖM, 2009). Ces séismes sont localisés entre la zone éruptive et la faille bordière du côté ouest du graben. Le tremblement de terre de Mw 6.2 du 24 octobre 2002 à Kalehe, en bordure ouest du milieu du lac, termine la séquence initiée par l'éruption du Nyiragongo, probablement induit par l'intrusion du dyke qui a provoqué l'éruption (WAUTHIER *et al.*, 2015).

Par ailleurs, il y a lieu de signaler la présence dans cette zone de failles transverses (cas de la faille de Burotshe) orientées E-W par rapport à la faille principale, et qui se prolongent dans la baie de Kabuno.

Failles normales au sud du lac Kivu

Les failles normales décrites dans l'escarpement de Funu et à Karhale (en contrebas du Lycée Wima) seraient, sur base de leur géométrie et leur emplacement, respectivement les marqueurs sur terrain des failles de Cimpunda et Buholo-Karhorha. Ces failles avaient été mises en évidence grâce à des observations géomorphologiques de terrain associées à la photo-interprétation (MUNYOLOLO *et al.*, 1999; MOEYERSONS *et al.*, 2004). La configuration de ces failles du « microrift » de Bukavu définit une sorte de rampe de relais où ces failles normales se recouvrent tout en contrôlant la morphologie du milieu (Figure 4a). Cette disposition en relais des failles normales est courante dans de nombreux segments du SREA, les failles normales en échelon étant reliées par des rampes de relais et des zones complexes de transfert de déplacement en extension (BURBANK & ANDERSON, 2001). Les rampes de relais et les zones de recouvrement sont en constante évolution durant le développement d'un système de faille en relais. La géométrie finale peut être considérée comme le résultat de l'interaction entre les segments de faille individuels, suite à la formation et à la destruction des rampes (FOSSEN, 2010).

Par ailleurs, les mouvements superficiels observés dans ce secteur de Funu sont à mettre en relation avec des instabilités gravitaires causés par les fortes pentes topographiques associées au glissement de terrain. Ils pourraient être en partie à l'origine de la déformation qu'on observe sur les infrastructures (routes de Funu et de Karhale, fondations des maisons, conduites d'eaux, etc.).

CONCLUSION

L'étude sismotectonique menée dans la partie occidentale du rift du Kivu a permis de distinguer deux zones sismotectoniques distinctes sur base des paramètres sismotectoniques issus des données de terrain et des mécanismes au foyer des séismes instrumentaux.

La partie nord du bassin du lac Kivu présente un régime tectonique distensif caractérisé par une extension principale horizontale orientée WNW-ESE. Cette orientation est similaire à celle donnée par STAMPS *et al.* (2008), DELVAUX & BARTH (2010) ainsi que FERNANDEZ *et al.* (2013) pour l'ensemble du rift du Kivu. Une zone de faille principale bordière (NNE-SSW) dont les marqueurs tectoniques (plans de faille striés, joints de tension, fractures diverses, brèches de faille mélangées à des argiles) ont été décrits à Muranga et à Bweremana au nord du lac Kivu, a été identifiée et caractérisée. Une série de séismes légers à modérés enregistrés en janvier 2002 seraient associés à la réactivation de cette faille bordière. Ce sont des séismes volcano-tectoniques qui auraient été engendrés suite à la relaxation des contraintes tectoniques d'extension après l'activité volcanique intense du volcan Nyiragongo du 17 janvier 2002. Quant aux séismes enregistrés le 24 octobre 2002, leurs paramètres sismotectoniques s'intègrent dans la partie nord du bassin du lac Kivu.

Pour la zone sud, le régime tectonique est celui des failles normales d'extension générale E-W. Il s'agit des failles décrites à Funu et Karhale (« microrift » de Bukavu) ainsi que de Kavimvira et Kalundu (rift du nord Tanganyika). Les failles du « microrift » de Bukavu se recouvrent en créant une sorte de rampe de relais au sein de laquelle des déformations de surface et glissements de terrain affectant les infrastructures sont observées (dégradations des routes, drains et caniveaux, fissurations des maisons, etc.). Le tenseur des contraintes obtenu à l'aide des données de ces failles orientées préférentielles N-S indique une extension E-W qui est identique à celle obtenue sur base des mécanismes au foyer de certains séismes de la zone. Toutefois, des nombreux auteurs y ont décrit également des failles orientées NNW-SSE, N-S, et NNE-SSW (CHOROWICZ, *et al.* 1979; EBINGER, 1989a; VILLENEUVE, 1983; MUNYOLOLO *et al.*, 1999). Cette diversité d'orientations des failles appuie la thèse de BOUTAKOFF (1934) selon laquelle ce secteur est le point de jonction de deux grandes directions des fractures de la branche occidentale du SREA.

REMERCIEMENTS

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du Projet Accord-Cadre MRAC-DGD SI_RGL_GEORISK: « Développement des capacités en observation et étude des géorisques dans la Région des Grands Lacs » ainsi que le projet GeoRisCA (Geo-Risks in Central Africa), du programme Science for Sustainable Development de la Politique Scientifique belge (Belspo). Nous remercions toutes les institutions partenaires de ces projets (MRAC, UOB, ISP-Bukavu, CRSN-Lwiro, UB). Notre reconnaissance s'adresse également à la Coopération au Développement Belge (DGD) pour avoir financé les travaux de terrain et le stage de G. Ganza au MRAC pendant lequel cet article a été écrit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANGELIER, J., 1989. Tectonique cassante et néotectonique. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 112 (2): 283-307.
- BANTIDI, M., MUKANGE, B. & ZANA, N., 2014. Structure de la sismicité de la branche occidentale des Rifts Valleys du Système des Rifts Est-africains: de 1954 à 2010. *Inter. J. Innov. Appl. Stud.*, 9 (4): 1562-1581.
- BLES, J.L. & FEUGA, B., 1981. La fracturation des roches: Manuels et Méthodes. N° 1 Ed. BRGM, Orléans, France.
- BOUTAKOFF, N., 1933. Les sources thermo-minérales du Kivu, leurs relations avec les grandes fractures radiales et leur utilisation au point de vue tectonique. *Bulletin de la Société géologique de Belgique*, 43: 75-80.
- BOUTAKOFF, N., 1934. Le coude du système des fractures du graben central africain au lac Kivu et sa ramification dans la cuvette congolaise. *Bull. Soc. Belg. Géol.*, XLIII, 85p.
- BUCHSTEIN, M., PELLETIER, J.L. & TROTTEREAU, G., 1967. Reconnaissance géologique et minière à l'ouest de Bobandana (Nord-Kivu). *Rapp. Miss. Min. Franc.* 43p.
- BURBANK, D.W. & ANDERSON, R.S., 2001. Tectonic geomorphology. *Blackwell Science*. Massachusetts 02148, 274p.
- BUTARA, S., FIAMA, S., MUGISHO, B.E. & MONGANE, A., 2015. Susceptibilité aux glissements de terrain: cas de la commune d'Ibanda, Bukavu, *RDC. IJIAS*, 2028-9324, 11 (1): 129-147.
- CAMELBEECK, T., VANNESTE, K., ALEXANDRE, P., VERBEECK, K., PETERMANS, T., ROSSET, P., EVERAERTS, M., WARNANT, R. & VAN CAMP, M., 2007. Relevance of active faulting and seismicity studies to assessment of long-term earthquake activity and maximum magnitude in intraplate northwest Europe, between the Lower Rhine Embayment and the North Sea. *Geological Society of America Special Paper*, 425: 193-224.
- CHOROWICZ, J., MUKONKI, N.B. & POTTIER, Y., 1979. Mise en évidence d'une compression horizontale liée à l'ouverture des fossés est-africains (branche occidentale), dans le seuil entre les lac Kivu et Tanganyika. *C.R. Somm. Soc. Géol. Fr.*, 1979 (5-6): 231-234.
- D'OREYE, N., GONZALEZ, P.J., SHULER, A., OTHA, 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.
- DEELSTRA, H., KATI HABWA, J. & WALEFFE, A., 1972. Les sources thermo-minérales au Burundi. *Bulletin de la Société Belge d'Etudes Géographiques*, 61 (2): 233-254.
- DELVAUX, D., 2012. Release of program Win-Tensor 4.0 for tectonic stress inversion: statistical expression of stress parameters. *EGU General Assembly, Vienna, 2012. Geophysical Research Abstracts*, 14: EGU2012-5899.
- DELVAUX, D. & BARTH, A., 2010. African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data. *Tectonophysics*, 483: 105-128.
- DELVAUX, D., MULUMBA, J.-L., FIAMA, S.B., SEBAGENZI, M.N.S., KERVYN, F. & HAVENITH, H.-B., 2016. 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*. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.10.004.
- DELVAUX, D., MOEYS, R., STAPEL, G., PETIT, C., LEVI, K., MIROSHNICHENKO, A., RUZHICH, V. & SANKOV, V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282: 1-38.
- DELVAUX, D. & SPERNER, B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: D. NIEUWLAND (Ed.) *New Insights into Structural Interpretation and Modelling. Geological Society, London, Special Publications*, 212: 75-100.

- EBINGER, C.J., 1989A. Geometric and kinematic development of border faults and accommodation zones, Kivu-Rusizi rift, Africa. *Tectonics*, 8 (1): 117-133.
- EBINGER, C.J., 1989B. Tectonic development of the western branch of the East African Rift System. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 101: 885-903.
- FERNANDES, R.M.S., MIRANDA, J.M., DELVAUX, D., STAMPS, D.S. & SARIA, E., 2013. Re-evaluation of the kinematics of Victoria Block using continuous GNSS data. *Geophys. J. Int.*, 193: 1-10, doi: 10.1093.
- FERNANDEZ-ALONSO, M., 2007. Geological Map of the Mesoproterozoic Northeastern Kibara Belt. Royal Museum for Central Africa, Tervuren (Belgium): ISBN: 978-90-74752-12-1; catalogue of maps and digital data, at "http://www.africamuseum.be".
- FERNANDEZ-ALONSO, M., CUTTEN, H., DE WAELE, B., TACK, L., TAHON, A., BAUDET, D. & BARRITT, S.D., 2012. The Mesoproterozoic Karagwe-Ankole Belt (formerly the NE Kibara Belt): The result of prolonged extensional intracratonic basin development punctuated by two short-lived far-field compressional events. *Precambrian Research*, 216-219: 63-86.
- FOSSEN, H., 2010. Structural geology. Cambridge University Press, New York, 352 p.
- FOUMARIER, P., 1949. Vue d'ensemble sur la géologie du Congo Belge. I^{er} rapp. Ann. I.R.S.A.C., Lwiro, Congo Belge, 97-152.
- IDIANSO, F., 1990. Paléoenvironnement des formations carbonatées superficielles de Katana. Thèse Doct. es. Sc., Unilu.
- ILUNGA, L., 1991. Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du Sud-Kivu. *Bull. Serv. Géol. Liège*, 27: 209-228.
- KAMPUNZU, A. B., 1981. Le magmatisme du massif de Kahuzi (Kivu, Zaïre). Structure, pétrologie, signification et implication géodynamique. Thèse Doct. es Sc., Univ. Nat. Zaïre, Lubumbashi, 387 p.
- KAMPUNZU, A.B., BONHOMME M.G. & KANIKA, M., 1998. Geochronology of volcanic rocks and evolution of the Cenozoic Western Branch of the East African Rift System. *Journal of African Earth Sciences*, 26 (3): 441-461.
- KAMPUNZU, A.B., LUBALA, R.T., MAKUTU, M.N., CARON, J.-P.H. & ROCCI, G., 1985. Les complexes alcalins de la région interlacustre de l'est du Zaïre et au Burundi: un exemple de massifs anorogéniques de relaxation. *Journal of African Earth Sciences*, 3 (1-2): 151-167.
- KAMPUNZU, A.B., VELLUTINI, P.-J., CARON, J.-P. H., LUBALA, R.T. KANIKA, M. & RUMVEGERI, B.T., 1983. Le volcanisme et l'évolution structurale du Sud-Kivu (Zaïre): un modèle d'interprétation géodynamique du volcanisme distensif intracontinental. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 7 (1): 257-271.
- KELLER, E.A. & PINTER, N. 2002. Active Tectonics. Earthquakes, Uplift and Landscape (2nd Edition). Person Education, Prentice hall, Upper Saddle River, NJ 007458, 362p.
- KOMOROWSKI, J.C., TEDESCO, D., KASEREKA, M., ALLARD, P., PAPALE, P., VASELLI, O., DURIEUX, J., BAXTER, P., HALBWACHS, M., AKUMBE, M., BALUKU, B., BRIOLE, P., CIRIBA, M., DUPIN, J.-C., ETOY, O., GARCIN, D., HAMAGUCHI, H., HOULIE, N., KAVOTHA, K.S., LEMARCHAND, A., LOCKWOOD, J., LUKAYA, N., MAVONGA, G., DE MICHELE, M., MPORE, S., MUKAMBILWA, K., MUNYOLOLO, F., NEWHALL, C., RUCH, J., YALIRE, M. & WAFULA, M., 2003. The January 2002 flank eruption of Nyiragongo volcano (Democratic Republic of Congo): chronology, evidence for a tectonic rift trigger, and impact of lava flows on the city of Goma. *Acta. Vulc.*, 15 (1-2): 27-61.
- LUBALA, R.T., 1981. Etude géologique du massif du Biega (Kivu, Zaïre). Structure, géochronologie, géochimie et signification géotectonique. Thèse Doct. es. Sc., Univ. Nat. Zaïre; Lubumbashi, 308 p.
- LUND, B. & TOWNEND, J., 2007. Calculating horizontal stress orientations with full or partial knowledge of the tectonic stress tensor, *Geophys. J. Int.*, 270: 1328-1335.
- MAKI MATEO, J.-C., 2014. Inventaire des glissements de terrain et étude des éléments à risque dans le rift ouest du bassin du lac Kivu. Thèse de Master complémentaire en Géorisques, Univ. Liège; Belgique, 54 p.
- 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 (1): 137-154.
- MAVONGA, T., 2007. Some characteristics of aftershock sequences of major earthquakes from 1994 to 2002 in the Kivu Province, Western Rift Valley of Africa. *Tectonophysics*, 439: 1-12.
- MAVONGA, T., 2010. Seismic hazard assessment and volcanogenic seismicity for the DRC and surrounding areas, Western Rift Valley of Africa. PhD thesis, Univ. of Witwatersrand, 142 p.
- MAVONGA, T. & DURRHEIM, R.J., 2009. Probabilistic seismic hazard assessment for the Democratic Republic of Congo and surrounding areas. *South African Journal of Geology*, 209: 329-342.

- MOEYERSONS, J., TRÉFOIS, PH., LAVREAU, J., ALIMASI, D., BADRIYO, I., MITIMA, B., MUNDALA, M., MUNGANGA, D.O. & NAHIMANA, L., 2004. A geomorphological assessment of landslide origin at Bukavu. *Engineering Geol.*, 72: 73-87.
- MUNYOLOLO, Y., WAFULA, M., KASEREKA, M., CIRABA, M., MUKAMBILWA, MAVONGA, T., CIRIMWAMI, M., MUHIGIRWA, B., BAGALWA, R. & MUNDALA, M., 1999. Récurrences des glissements de terrain suite à la réactivation sismique du bassin du lac Kivu, Région de Bukavu (RDC). *Mus. Roy. Afr. Centr., Dépt. Géol. Min., Rapp. Ann.* 1999: 285-298.
- PASSAU, G., 1933. Les sources thermales de la Province Orientale (Congo Belge). *Institut Royal colonial belge, Bull.*, 4(3): 778-814.
- PASTEELS, P., 1961. Géologie et pétrographie de la région de Kirotshe (Kivu). *Acad. Roy. Sc. Outre-Mer., Mém. In-8°, Nouv. Sér.* 15 (2), 72p.
- PASTEELS, P., VILLENEUVE, M., 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.
- POUCLET, A., BELLON, H. & BRAM, K., 2016. The Cenozoic volcanism in the Kivu rift: Assessment of the tectonic setting, geochemistry, and geochronology of the volcanic activity in the South-Kivu and Virunga regions. *Journal of African Earth Sciences*, 121: 219-246.
- ROSS, K.A., SMETS, B., DE BATIST, M., HILBE, M., SCHMID, M. & ANSELMETTI, F.S., 2014. Lake-level rise in the late Pleistocene and active subaquatic volcanism since the Holocene in Lake Kivu, East African Rift. *Geomorphology*, 221: 274-285.
- RUMVEGERI, B.T., 1987. Le Précambrien de l'ouest du lac Kivu (Zaïre) et sa place dans l'évolution géodynamique de l'Afrique centrale et orientale: Pétrologie et Tectonique. Thèse Doct., Univ. Lub., Dépt. Géol., 252 p.
- SARIA, E., CALAIS, E., STAMPS, D.S., DELVAUX, D. & HARTNADY, C., 2014. Present-day kinematics of the East African Rift. *J. Geophys. Res.*, 119(4): 3584-3600.
- SHULER, A. & EKSTRÖM, G., 2009. Anomalous earthquakes associated with Nyiragongo volcano: Observations and potential mechanisms. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 181: 219-230, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.011.
- 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.
- STAMPS, D.S., CALAIS, E., SARIA, E., HARTNADY, C., NOCQUET, J.M., EBINGER, C.J. & FERNANDES, R.M., 2008. A kinematic model for the East African rift. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L05304.
- STAMPS, D.S., L. M. FLESCHE, L.M. & CALAIS, E., 2010. Lithospheric buoyancy forces in Africa from a thin sheet approach. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 99: 1525-1533.
- TACK, L., DEBLOND, A., DE PAEPE, P., DUSCHENE J.C. & LIÉGEOIS, J.P., 1996. Proterozoic alignments of alkaline plutons revealing lithospheric discontinuities: evidence from eastern Africa. D. DemaiFFE (Ed.) *Petrology and geochemistry of magmatic suites of rocks in the continental and oceanic*. Volume dedicated to Professor Jean Michot. ULB and Roy. Mus. for Cent. Afr., Tervuren, 219-226.
- TEDESCO, D., VASELLI, O., PAPAIE, P., CARN, S.A., VOLTAGGIO, M., SAWYER, G.M., DURIEUX, J., KASEREKA, M. & TASSI, F., 2002. January 2002 volcano-tectonic eruption of Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo. *J. Geophys. Res.*, 112: B09202.
- VERHAEGHE, M., 1963. Inventaire des gisements de calcaires, dolomies et travertins du Kivu, du Rwanda et du Burundi. Service géologique, Mémoire n°3, 95 p.
- VILLENEUVE, M., 1977. Précambrien du Sud du lac Kivu. Etude stratigraphique, pétrographique et tectonique. Thèse Doct. Spec. Fac. Sci. Techn. St Jérôme, Marseille, France, 195 p.
- VILLENEUVE, M., 1980. Les formations précambriennes antérieures ou rattachées au Supergroupe de l'Itombwe au Kivu Oriental et méridional (Zaïre). *Bull. Soc. Belg. Geol.*, 89 (4): 301-308.
- VILLENEUVE, M., 1983. Les formations précambriennes de Katana, au Kivu oriental (Zaïre). *Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann.* 1981-1982: 153-159.
- WAUTHIER, C., CAYOL, V., KERVYN, F. & D'OREYE, N., 2012. Magma sources involved in the 2002 Nyiragongo eruption, as inferred from an InSAR analysis. *J. Geophys. Res.*, 117: B05411.
- WAUTHIER, C., SMETS, B. & KEIR, D., 2015. Diking-induced moderate-magnitude earthquakes on a youthful rift border fault: the 2002 Nyiragongo-Kalehe sequence, D.R. Congo. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 16 (12): 4280.
- WOOD, D.A., ZAL, H.J., SCHOLZ, C.A., EBINGER, C.J. & NIZERE, I., 2015. Evolution of the Kivu Rift, East Africa: Interplay among tectonics, sedimentation and magmatism. *Basin Research*, doi: 10.1111/bre.12143.

