

## Holocene phreatomagmatic eruptions alongside the densely populated northern shoreline of Lake Kivu, East-African Rift: timing and hazard implications

### *Éruptions phréato-magmatiques holocènes le long du rivage septentrional et densément peuplé du Lac Kivu, Rift Est-Africain : chronologie et conséquences sur l'aléa*

Sam Poppe<sup>1\*</sup>, Benoît Smets<sup>1,2,3</sup>, Karen Fontijn<sup>4</sup>, Montfort Bagalwa Rukeza<sup>5</sup>, Antoine De Marie Fikiri Migabo<sup>5</sup>, Albert Kyambikwa Milungu<sup>5</sup>, Didier Birimwiragi Namogo<sup>5</sup>, François Kervyn<sup>3</sup>, Matthieu Kervyn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geography, Earth System Science, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, B-1050 Brussels, Belgium; <sup>2</sup> European Center for Geodynamics & Seismology, 19 Rue Josy Welter, 7256 Walferdange, Grand Duchy of Luxembourg; <sup>3</sup> Department of Earth Sciences, Royal Museum for Central Africa, 13 Leuvensesteenweg, 3080 Tervuren, Belgium; <sup>4</sup> Department of Earth Sciences, University of Oxford, South Parks Road, Oxford OX1 3AN, United Kingdom; <sup>5</sup> Goma Volcano Observatory, 142 Avenue Rond-Point, Goma, Democratic Republic of the Congo

\*Corresponding Author: sam.poppe@vub.ac.be

### English Abstract

The Virunga Volcanic Province (VVP) represents the most active zone of volcanism in the western branch of the East African Rift System. While the VVP's two historically active volcanoes, Nyamulagira and Nyiragongo, have built scoria cones and lava flows in the adjacent lava fields, several small phreatomagmatic eruptive centers lie along Lake Kivu's northern shoreline, highlighting the potential for explosive magma-water interaction. Their presence in the densely urbanized Sake-Goma-Gisenyi area necessitates an assessment of their eruptive mechanisms and chronology. Some of these eruptive centers possess multiple vents, and depositional contacts suggest distinct eruptive phases within a single structure. Depositional facies range from polymict tuff breccia to tuff and loose lapilli, often impacted by blocks and volcanic bombs. Along with the presence of dilute pyroclastic density current (PDC) deposits, indicators of magma-water interaction include the presence of fine palagonitized ash, ash aggregates, cross-bedding, and ballistic impact sags. We estimate that at least 15 phreatomagmatic eruptions occurred in the Holocene, during which Lake Kivu rose to its current water level. Radiocarbon dates of five paleosols in the top of volcanic tuff deposits range between ~2500 and ~150 cal. year BP and suggest centennial- to millennial-scale recurrence of phreatomagmatic activity. A vast part of the currently urbanized zone on the northern shoreline of Lake Kivu was most likely impacted by products from phreatomagmatic activity, including PDC events, during the Late Holocene, highlighting the need to consider explosive magma-water interaction as a potential scenario in future risk assessments.

### Abstract Français

La Province Volcanique des Virunga (PVV) représente la zone volcanique la plus active dans la branche occidentale du grand rift est-africain. Les deux volcans historiquement les plus actifs de la PVV, le Nyamulagira et le Nyiragongo, ont construit des cônes de scories et des coulées de lave dans les champs de lave adjacents. Cependant, plusieurs petits centres éruptifs phréato-magmatiques se trouvent tout au long de la rive septentrionale du lac Kivu, soulignant la possibilité d'une interaction explosive magma-eau. Leur présence dans la superficie densément urbanisée de Sake-Goma-Gisenyi justifie une évaluation de leurs mécanismes éruptifs et de leur chronologie. Certains de ces centres éruptifs ont plusieurs événements, et les contacts des dépôts suggèrent différentes phases éruptives au sein d'un seul événement. Les facies de dépôt varient de brèche de tuf polymict à tuf et lapilli non consolidés, les couches étant souvent marquées par des figures d'impacts suite à la chute de blocs et de bombes volcaniques. La présence des dépôts d'écoulements pyroclastiques dilués, de cendres fines palagonitisées, d'agrégats de cendre, de stratifications entrecroisées, et de déformations par impact balistique indiquent une interaction magma-eau. Nous estimons qu'au moins 15 éruptions phréato-magmatiques ont eu lieu durant l'Holocène, période pendant laquelle le lac Kivu est monté à son niveau d'eau actuel. Les datations par le radiocarbonate de cinq paléosols dans la partie supérieure des dépôts de tuf volcanique varient entre ~2500 and ~150 cal. an BP. et suggèrent une récurrence d'activité phréato-magmatique centennale à millénaire. Une partie considérable de la zone actuellement urbanisée de la rive nord du lac Kivu a probablement été touchée par des produits d'activité phréato-magmatique, y compris les écoulements pyroclastiques, pendant l'Holocène récent. Il est donc essentiel de considérer l'interaction explosive magma-eau comme scénario potentiel pour l'évaluation des risques dans le futur.