

Abstract

Nyiragongo and Nyamulagira, in the Virunga Volcanic Province, in the western branch of the East African Rift, are the most active volcanoes of Africa, providing numerous recent historical records to study volcanism in an extensional setting. Located in a densely populated area of Central Africa, these volcanoes also represent a threat for human activities and their environment. However, despite the major interest they would represent for scientific investigations, volcano monitoring and hazard assessment, Nyiragongo and Nyamulagira remain little known for several reasons associated with the local context (socio-political instability, field accessibility, local climate conditions, local infrastructures, etc.).

In the present work, we focus on understanding the main mechanisms that control the eruptive activity of these two volcanoes. In a first part, the structural setting of the Kivu rift segment, where the volcanoes developed, is investigated in order to describe the interaction between tectonic rifting and magmatism and characterize the influence of existing fault networks on the distribution of volcanism. This study suggests that magma underplating might have influenced the development of the Kivu rift segment and that deep inherited Precambrian structures influenced the development of transfer zones, where volcanism next concentrated. These reactivated structures still influence the location of volcanic eruptions in the Virunga Volcanic Province.

In a second part, the historical eruptive activity of Nyiragongo and Nyamulagira is reconstructed from the late 19th century up to now. It allows highlighting the mechanisms that influence the location, duration and emitted lava volume of eruptions. The historical activity of Nyamulagira indicates that edifice loading strongly influences the characteristics of eruptions, while rift structures also influence the location of eruptions. The detailed study of the 2010 eruption of Nyamulagira allowed the detection of eruption precursors in geodetic, seismic and SO₂ monitoring data up to 3 weeks prior to the eruption onset. The reconstruction of the eruptive history of Nyiragongo revealed that the existing literature might be misleading, highlighting the need to critically consider previously published information and develop new methods for systematically documenting key volcanic events. The evolution of the Nyiragongo lava lake since the 1950s and the characteristics of the 1977 and 2002 eruptions suggest that flank eruptions and the associated drainage of the lava lake result from a combination of events that promoted a deep dyke intrusion and the destabilization of the upper magmatic system. Two types of intracrater eruption were historically observed: a persistent lava lake activity and an ephemeral lava lake activity. The variations of the lava lake level should be seen as a natural manometer indicating the pressure state of the upper magmatic system.

Finally, in the third part, close-range photogrammetric techniques are setup, tested and exploited to provide first quantitative insights into the lava lake dynamics in the main crater of Nyiragongo. An innovative Stereographic Time-Lapse Camera (STLC) system is developed to acquire stereo-pairs of images of the lava lake, allowing measuring and monitoring its level variations. The acquired data revealed metre-scale variations of the lava lake level associated with a mechanism of gas piston, as already suggested for other persistent lava lakes. STLC data complemented with images acquired during helicopter flights also revealed a long-term decrease of the Nyiragongo lava lake level of almost 70 m between 2012 and 2014. This lava lake level decrease occurred through sporadic lava lake level fall events, which were for the first time measured and correlated with increasing long-period seismicity, suggesting that crustal magma intrusions may regularly occur at Nyiragongo. The ~70 m drop of the lava lake level also coincides with a metric subsidence of the central part of the main crater. This subsidence was accompanied with the formation of ring fissures around the lava lake pit.

In conclusion, the present thesis provides new results allowing improving the interpretation of variations in the eruptive activity of Nyiragongo and Nyamulagira and the associated signals measured with ground-based and remote sensed geophysical techniques. These results will contribute to improve further volcano monitoring and scientific investigations in the Virunga and elsewhere in youthful rift settings.

Samenvatting

Nyiragongo en Nyamulagira, in de Vulkanische Provincie Virunga in het westelijke deel van de Oost-Afrikaanse Rift, zijn de actiefste vulkanen in Afrika. Deze vulkanen leveren dan ook veel historische gebeurtenissen om het vulkanisme in tektonische extensionele systemen te bestuderen. Ze liggen in een dichtbevolkt gebied van Centraal-Afrika en vormen daar een bedreiging voor de menselijke activiteiten en hun leefomgeving. Ondanks het aanzienlijke belang voor wetenschappelijke studies, vulkaanbewaking en de inschatting van de risico's, blijven Nyamulagira en Nyiragongo weinig bekend wegens redenen die voornamelijk verband houden met de lokale context (sociaal-politieke instabiliteit, toegankelijkheid van het terrein, lokale weersomstandigheden, plaatselijke infrastructuur, enz.).

In dit proefschrift, concentreren we ons op het begrijpen van de belangrijke mechanismen die de eruptieve activiteit van deze twee vulkanen controleren. In het eerste onderdeel wordt de structurele context van het Kivu riftsegment onderzocht, waar de twee vulkanen zich hebben ontwikkeld, om de wisselwerking tussen de tektonische activiteit van de Rift en het magmatisme te beschrijven, naast de invloed van het bestaande netwerk van breuken op de verspreiding van het vulkanisme. Deze studie stelt voor dat magma sub-plating de ontwikkeling van het Kivu riftsegment beïnvloed zou kunnen hebben en dat de diepe structuren overgeërfd uit het Precambrium de ontwikkeling van transferzones beïnvloed hebben, waar het vulkanisme zich vervolgens kon concentreren. Deze gereactiveerde structuren hebben nog steeds invloed op de lokalisatie van de vulkaanuitbarstingen in de Vulkanische Provincie van de Virunga.

In het tweede onderdeel, wordt de uitbarstingsgeschiedenis van Nyiragongo en Nyamulagira samengesteld voor de periode vanaf het einde van de 19^{de} eeuw tot vandaag. Dit werk toont de mechanismen aan die de lokalisatie, de duur en het lava-volume van de uitbarstingen beïnvloeden. De historische activiteit van Nyamulagira wijst erop dat de lading van de hoofdkegel op de ondergrond een sterke invloed heeft op de kenmerken van de uitbarstingen, terwijl de riftstructuren eveneens hun lokalisatie beïnvloeden. De gedetailleerde studie van de 2010 uitbarsting van Nyamulagira stond toe om de eruptieve voortekenen in de geodetische, seismische en SO₂-uitstoot monitoringgegevens tot drie weken voor het begin van de uitbarsting op te sporen. De reconstructie van de eruptieve geschiedenis van Nyiragongo toonde aan dat de bestaande literatuur misleidend kan zijn. Het blijkt dan ook noodzakelijk om kritisch te zijn over de gepubliceerde informatie en nieuwe methoden te ontwikkelen om op systematische wijze vulkanische sleutelgebeurtenissen te documenteren. De evolutie van het lavameer van Nyiragongo sinds de jaren 1950 en de kenmerken van de 1977 en 2002 uitbarstingen suggereren dat de flankuitbarstingen en de gekoppelde drainage van het lavameer voortvloeien uit een combinatie van gebeurtenissen die een intrusie van een diepe dyke en de destabilisatie van het hogere magmatische systeem bewerkstelligden. Twee soorten intra-kraterale uitbarstingen werden historisch waargenomen: een voortdurende activiteit van het lavameer en een kortstondige activiteit van het lavameer. De variaties van het lavameerniveau moeten als een natuurlijke manometer gezien worden die de drukstaat in het hogere magmatische systeem aangeven.

In het derde onderdeel tenslotte, worden kort-bereik fotogrammetrie-technieken opgesteld, getest en gebruikt om het eerste kwantitatieve overzicht van de dynamica van het lavameer in de krater van Nyiragongo te leveren. Een innovatief "Stereografische Time-Lapse Camera" (STLC) -systeem is ontwikkeld om stereo-paar beelden van het lavameer te verkrijgen om zijn veranderingen van niveau te meten en te monitoren. De verkregen gegevens brachten metrische veranderingen in het niveau van het lavameer aan het licht, geassocieerd met een "gas piston" mechanisme dat identiek is aan wat reeds voorgesteld werd voor andere langdurige lavameren. De gegevens van STLC, aangevuld met beelden genomen tijdens helikoptervluchten, vertonen eveneens een vermindering van bijna 70 meter van het Nyiragongo lavameerniveau op de lange termijn tussen 2012 en 2014. Deze vermindering van het lavameerniveau vond plaats via sporadische gebeurtenissen van niveau-val, die voor het eerst werden gemeten en werden gecorreleerd met een toename van seismische lange-termijn activiteit. Deze waarneming suggereert dat magmatische intrusies in de aardkorst zich regelmatig zouden kunnen voordoen bij

Nyiragongo. De daling van bijna 70 meter van het lavameerniveau valt samen met een metrische verzakking van het centrale gedeelte van de hoofdkrater. Deze subsidentie ging gepaard met de vorming van cirkelvormige scheuren rond de put die het lavameer bevat.

Om te besluiten, levert dit proefschrift nieuwe resultaten die de interpretatie van de veranderingen in de eruptieve activiteit bij Nyiragongo en Nyamulagira verbeteren, naast de bijbehorende signalen die gemeten worden met behulp van geofysische grond- en afstandsdetectietechnieken. Deze resultaten zullen bijdragen aan de verbetering van het vulkanische toezicht en de wetenschappelijke onderzoeken in de Virunga en in vergelijkbare riftcontexten.

Résumé

Le Nyiragongo et le Nyamulagira, dans la Province Volcanique des Virunga de la branche ouest du rift est-africain, sont les volcans les plus actifs d'Afrique. Ces volcans fournissent de nombreux événements historiques pour étudier le volcanisme en régime tectonique d'extension. Localisés dans une région densément peuplée d'Afrique centrale, ces volcans représentent également une menace pour les activités humaines et leur environnement. Cependant, et malgré l'intérêt majeur qu'ils représentent au niveau des études scientifiques, de la surveillance volcanique et de l'évaluation des aléas, le Nyiragongo et le Nyamulagira restent peu connus pour des raisons principalement liées au contexte local (instabilité socio-politique, accessibilité du terrain, conditions climatiques locales, infrastructures locales, etc.).

Dans le présent travail, nous nous focalisons sur la compréhension des mécanismes principaux contrôlant l'activité éruptive de ces deux volcans. Dans la première partie, le contexte structural de segment de rift du Kivu, là où les deux volcans se sont développés, est investigué dans le but de décrire l'interaction entre l'activité tectonique de rift et le magmatisme, et de caractériser l'influence des réseaux de failles existants sur la distribution du volcanisme. Cette étude suggère qu'un sous-plaquage magmatique pourrait avoir influencé le développement du segment de rift du Kivu. Les structures profondes héritées du Précambrien ont, quant à elles, influencé le développement de zones de transfert, là où le volcanisme a pu ensuite se concentrer. Ces structures réactivées influencent toujours la localisation des éruptions volcaniques dans la Province Volcanique des Virunga.

Dans la seconde partie, l'histoire éruptive du Nyiragongo et du Nyamulagira est reconstituée pour la période allant de la fin du 19^{ème} siècle à nos jours. Ce travail permet de mettre en évidence les mécanismes qui influencent la localisation, la durée et le volume de lave émis des éruptions. L'activité historique du Nyamulagira indique que la charge de l'édifice principal influence fortement les caractéristiques des éruptions. Les structures du rift influencent également leur localisation. L'étude détaillée de l'éruption de 2010 du Nyamulagira a permis la détection de précurseurs éruptifs dans les données de surveillance géodésique, sismique et d'émission de SO₂ jusqu'à 3 semaines avant le début de l'éruption. La reconstruction de l'histoire éruptive du Nyiragongo révèle que la littérature existante peut être trompeuse, mettant en évidence la nécessité de considérer de manière critique les informations précédemment publiées et de développer de nouvelles méthodes pour documenter de manière systématique les événements volcaniques clés. L'évolution du lac de lave du Nyiragongo depuis les années 1950 et les caractéristiques des éruptions de 1977 et 2002 suggèrent que les éruptions de flanc et drainage du lac de lave qui y est associé résultent d'une combinaison d'événements promouvant une intrusion de dyke profonde et la déstabilisation du système magmatique supérieur. Deux types d'éruptions intracratérales sont historiquement observées : une activité de lac de lave persistante et une activité de lac de lave éphémère. Les variations du niveau du lac de lave doivent être vu comme un manomètre naturel indiquant l'état de pression dans le système magmatique supérieur.

Finalement, dans la troisième partie, des techniques de photogrammétrie rapprochée sont mises en place, testées et exploitées pour fournir le premier aperçu quantitatif de la dynamique du lac de lave situé dans le cratère du Nyiragongo. Un système innovant de « Stereographic Time-Lapse Camera » (STLC) est développé pour acquérir des stéréo-paires d'images du lac de lave permettant de mesurer et surveiller ses variations de niveau. Les données acquises ont révélé des variations métriques du niveau du lac de lave, associées à un mécanisme de « gas piston » identique à ce qui a déjà été suggéré pour d'autres lacs de lave persistants. Les données des STLC, complétées par des images acquises durant des vols en hélicoptère, ont aussi révélé une diminution à long-terme du niveau du lac de lave du Nyiragongo de presque 70 m entre 2012 et 2014. Cette diminution du niveau du lac de lave s'est produite via des événements sporadiques qui ont été pour la première fois mesurés et corrélés avec une augmentation de la sismicité longue-période. Cette observation suggère que des intrusions magmatiques dans la croûte pourraient se produire régulièrement au niveau du Nyiragongo. La chute de presque 70 m du niveau du lac de lave coïncide également avec une subsidence métrique de la partie centrale du cratère principal. Cette subsidence fut accompagnée par la création de fissures circulaires autour de la fosse contenant le lac de lave.

En conclusion, la présente thèse fournit de nouveaux résultats permettant d'améliorer l'interprétation des variations de l'activité éruptive au Nyiragongo et au Nyamulagira, et des signaux associés mesurés à l'aide de techniques géophysiques au sol et par télédétection. Ces résultats contribueront à améliorer la surveillance volcanique et les investigations scientifiques dans les Virunga, mais également ailleurs, dans des contextes de rifts similaires.