



Analyse des essaims de séismes et trémors volcaniques associés à l'activité sismo-volcanique du volcan Nyamulagira, région des Virunga

Analysis of earthquakes swarm and volcanic tremor associated with sismo-volcanic activity at volcano Nyamulagira, Virunga region

Rigobert Bizimana RUSANGIZA¹, Georges Tuluka MAVONGA¹ & Josué Muhindo SUBIRA¹

Abstract: The Nyamulagira volcano is one of the most active volcanoes in the world and the most active in Africa with an average of one eruption every two years. All these eruptions are preceded by an intense seismic activity which consists mainly of swarms of long period earthquakes. The analysis of associated earthquake swarms and volcanic tremors was made by respectively calculating the values of the constant "m" taken from the Ishimoto-Iida (1939) relationship and by determining the level seismic activity associated to the volcanic tremors recorded at the seismic stations through the calculation of the RSAM. This show that the « m-value » of precursors swarms of Nyamulagira eruptions vary between 1.82 and 3.41 two to four months before an eruption, while in normal times it ranges between 1.2 and 1.6. From these values, we could classify the seismic swarms observed in the Nyamulagira volcano field in three groups according to the variation of the constant « m » over time. Only the third group consists of swarms that lead directly to an eruption. The average level of the RASM was 5.25×10^6 counts and when this value increased, an eruption was imminent.

Key words: Virunga area, Nyamulagira, Earthquake swarms, Volcanic Tremors, RSAM

Résumé: Le volcan Nyamulagira est l'un des volcans les plus actifs du monde et le plus actif d'Afrique avec en moyenne une éruption toutes les deux années. Toutes ces éruptions sont précédées par une intense activité sismique composée essentiellement d'essaims de séismes à longue période. L'analyse des essaims de séismes et des trémors volcaniques associés a été faite en calculant respectivement les valeurs de la constante « m » tirée de la relation d'Ishimoto-Iida (1939) et en déterminant le niveau d'activité sismique associé aux trémors volcaniques enregistrés aux stations sismiques par le calcul du RSAM. De cette analyse, il ressort que la constante « m » des essaims précurseurs des éruptions varient entre 1,82 et 3,41 deux à quatre mois avant une éruption alors qu'en temps normal elle est comprise entre 1,2 et 1,6. A partir de ces valeurs, on a pu classer les essaims de séismes observés dans le champ du volcan Nyamulagira en trois groupes conformément à la variation de la constante « m » en fonction du temps. Seul le troisième groupe est constitué d'essaims qui conduisent directement à une éruption. Le niveau moyen du RSAM est de $5,25 \times 10^6$ dès que cette valeur augmente, une éruption était imminente.

Mots clés: Région des Virunga, Nyamulagira, Essaims de séismes, Trémors volcaniques, RSAM

INTRODUCTION

L'activité sismique des volcans est le précurseur le plus fréquemment observé avant une éruption volcanique (p.ex. MINAKAMI, 1960; MINAKAMI, T. & HIRAGA, 1969; MC NUTT, 1996). Pratiquement toutes les éruptions, quel qu'en soit le type, sont précédées par une augmentation de l'activité sismique et/ou par des modifications de ses caractéristiques. Cette sismicité prend la plupart du temps la forme d'essaims de séismes de faible magnitude associés à l'augmentation de la pression magmatique.

¹ Observatoire Volcanologique de Goma, RD Congo. Emails: rusangizakoko@yahoo.fr, mavotulu@gmail.com, jos_sm@outlook.com

Des tels essais peuvent se produire parfois en dehors de la structure volcanique proprement dite (ASPINALL *et al.*, 1998; LEGRAND *et al.*, 2002). Le volcan Nyamulagira présente ces mêmes caractéristiques (essais de séismes à longue période ou hybrides et trémors volcaniques) à l'approche de toutes ses éruptions.

Le volcan Nyamulagira est l'un des volcans de la chaîne volcanique de Virunga. Celle-ci est composée de 8 volcans répartis en trois groupes: le groupe de l'est qui comprend les volcans de Muhavura, Gahinga et Sabinyo, celui du centre qui est composé des volcans Visoke, Karisimbi et Mikenno et enfin le groupe de l'ouest constitué des volcans Nyiragongo et Nyamulagira (Figure 1). Ces deux derniers volcans (Nyiragongo et Nyamulagira) sont les seuls volcans actifs de cette zone (HAMAGUCHI & ZANA, 1990). Le Nyamulagira présente un intérêt particulier, non seulement par la fréquence de ces éruptions de type Hawaïen, soit en moyenne une éruption tous les 2 à 4 ans (VAN COOLS 1949; RICHARD *et al.* 1957; POUCKET, 1975, 1976; HAYASHI *et al.*, 1992; DEMANT *et al.*, 1994; CLAY & CASSANDRA, 1995; MAVONGA *et al.*, 2006; MAVONGA, 2010; SMETS *et al.*, 2010; RUSANGIZA *et al.*, 2012), mais aussi par la haute fluidité de sa lave (TEDESCO *et al.*, 2007).

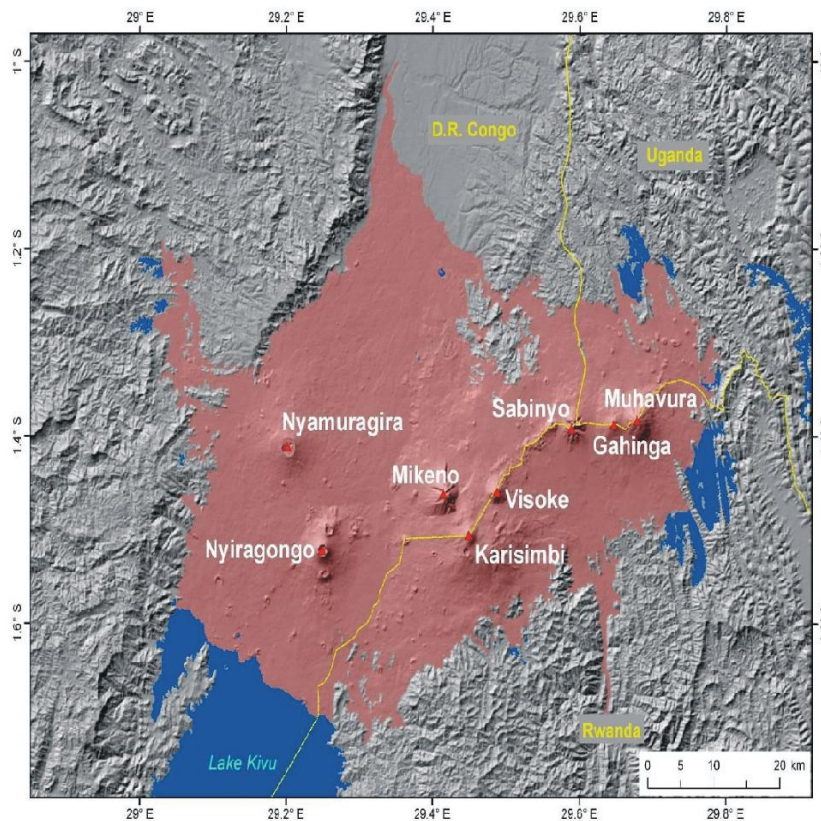


Figure 1: Localisation de la chaîne volcanique des Virunga.

Cette chaîne se situe dans la branche Ouest du Rift Est-Africain.

La ligne Jaune indique la frontière entre la RDC, l'Ouganda et le Rwanda (SMETS, 2013, inédit).

A cause de leur faible viscosité, les laves du volcan Nyamulagira sont en mesure de couler sur des longues distances (jusque plusieurs dizaines de kilomètres). Ce volcan est parmi les plus actifs du monde (SMITHSONIAN INSTITUTION). Deux types d'activité éruptive sont observés au volcan Nyamulagira: une activité du lac de lave dans le cratère sommital de 1921 à 1938 et des éruptions de flanc qui émettent des laves par l'ouverture des nouvelles fissures (HAMAGUCHI & ZANA, 1983). Un lac de lave est de nouveau réapparu dans le cratère sommital du Nyamulagira vers la fin de l'année 2014 et est toujours actif à ce jour. Le champ de lave du Nyamulagira couvre plus de 1100 km² et contient plus de 100 cônes de flanc (POUCKET & VILLENEUVE, 1971).

Les éruptions les plus récentes datent de janvier 2000, février 2001, juillet 2002, mai 2004, novembre 2006 et de novembre 2011. Le volume des laves émises par le volcan Nyamulagira lors de

ses éruptions est estimé entre 45 et $70 \times 10^6 \text{ m}^3$ (SMETS *et al.*, 2010). Des essais de séismes à longue période ont été observés dans le champ du volcan Nyamulagira, certains menant à une éruption. Cela mène à poser les questions suivantes. Comment différencier les essais qui conduisent réellement à des éruptions de ceux qui sont dus au simple mouvement du magma dans le cratère du Nyamulagira? Quelles sont les caractéristiques que présentent ces deux catégories d'essais? La réponse à ces questions constitue l'objectif poursuivi par ce travail qui combine l'étude des essais de séismes et des trémors volcaniques, avec d'autres paramètres tel que le nombre journalier des séismes enregistrés. Une telle étude présente aussi un intérêt particulier pour la surveillance et la prévision des éruptions du volcan Nyamulagira.

Trois paramètres sont analysés pour la période de novembre 2003 à décembre 2006: la constante « m » tirée de la relation d'ISHIMOTO-IIDA (1939) pour les essais de séismes à longue période, le niveau moyen de l'énergie sismique dégagée par les trémors volcaniques (RSAM) ainsi que le nombre journalier des séismes enregistrés par le réseau des stations sismographiques de l'OVG.

DONNEES ET METHODES D'ANALYSE

Les données analysées dans cette étude sont celles enregistrées par la station sismographique de Kibumba (KBB). Cette station est l'une des stations qui constituent le réseau des stations sismographiques de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG). Les essais de séismes longue période (LP) enregistrés par cette station ont été analysés pour la période allant de novembre 2003 à décembre 2006. La station de Kibumba a été choisie par sa proximité avec le volcan Nyamulagira et par la continuité des enregistrements pendant toute la période considérée par cette étude.

L'année 2003 a été choisie comme année de référence pour cette étude car c'est à partir de celle-ci que les stations digitales ont été installées et les données numériques ont commencé à être transmises à l'OVG. Ce premier réseau de stations sismiques téléométrées de l'OVG a été conçu par l'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) en Italie et était composé de sept stations à trois composantes: quatre stations sont équipées des sismomètres de type Lennartz 3D/ 5 s (LE3D / 5s), tandis que les trois autres stations ont été équipées de capteur de Nanometrics Trillium 40 à large bande (Tableau 1).

Tableau 1: Le réseau sismologique de l'OVG après les installations de mai 2004 (PAGLIUCA *et al.*, 2009).

STATION	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (m)	EQUIPEMENT
Bulengo (BLG)	-1.628	29.138	1480	Lennartz LE3D/5S
Katale (KTL)	-1.325	29.384	1600	Nanometrics Trillium 40S
Kibati (KBT)	-1.569	29.277	2000	Nanometrics Trillium 40S
Kibumba (KBB)	-1.519	29.333	2029	Lennartz LE3D/5S
Kunene (KNN)	-1.480	29.227	1800	Nanometrics Trillium 40S
Goma (GOM)	-1.681	29.227	1470	Lennartz LE3D/5S
Rusayo (RSY)	-1.578	29.181	1694	Lennartz LE3D/5S

En mai 2004, les sismomètres Lennartz à courte période placés dans les stations de KNN et KBB ont été remplacés avec les sismomètres à large bande (Trillium 40S). Ces stations digitales sont venues compléter le réseau des stations analogiques existant depuis 1983 et elles ont toutes été dotées d'un équipement Kinematics avec un sismomètre à courte période ($T_0 = 1\text{s}$) à composante verticale SS-1 connecté à un enregistreur portable PS-2. Les signaux provenant de ces sismomètres sont amplifiés et filtrés dans un module d'amplification.

En 2013-2014, ce réseau a été à nouveau été renforcé par les stations de Rumangabo (RGL), Kitchanga (KCA), Tongo (TGO) et Bobandana (BOB), des stations prêtées à l'OVG par le Musée National d'Histoire Naturelle (MNHN/ECGS) du Luxembourg et le Musée royal d'Afrique centrale (MRAC) de Tervuren (Belgique) (Figure 2).

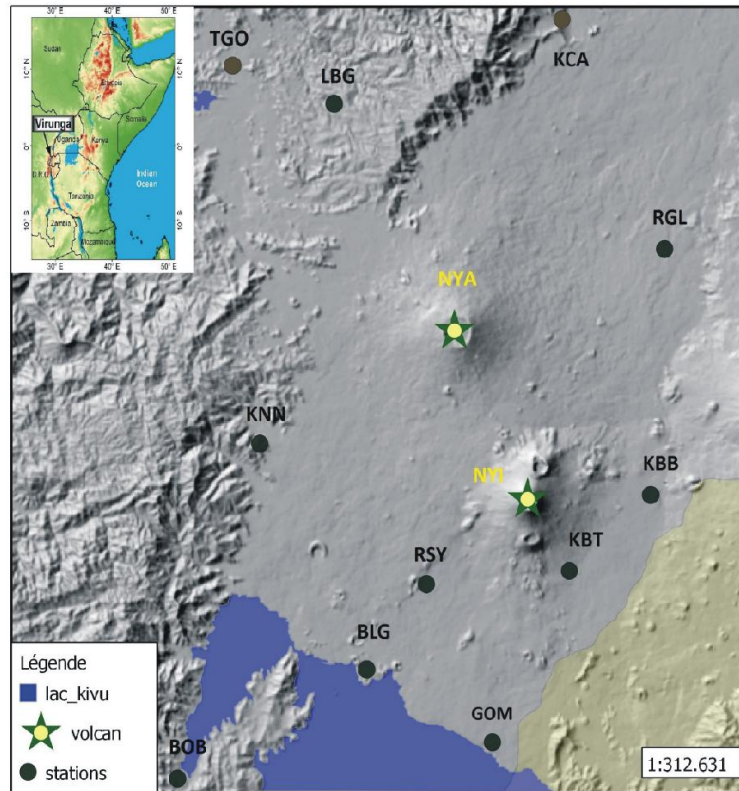


Figure 2: Réseau des Stations Sismologiques de l’Observatoire Volcanologique de Goma. Stations de Goma (GOM), Bobandana (BOB), Bulengo (BLG), Rusayo (RSY), Kibati (KBT), Kibumba (KBB), Kunene (KNN), Rumangabo (RGL), Kitchanga (KCA), Luboga (LBG) et Tongo (TGO). Sur cette carte en relief ombragé, on peut facilement voir les deux volcan actifs de la région volcanique des Virunga qui sont Nyiragongo (NYI) et Nyamulagira (NYA). Les coulées de laves de ces deux volcan ne sont pas présentées ici.

Pour analyser les données enregistrées par la station de Kibumba, les étapes suivantes ont été suivies:

- Sélection des dates pour lesquelles des essaims ont été enregistrés sur base des enregistrements analogiques;
- Conversion des données du format « .twf » en format « SAC » (Seismic Analysis Code);
- Mesure de l’amplitude maximale de chaque séisme longue période (LP) contenu dans l’essai à l’aide du logiciel SEISAN (HAVSKOV & OTTEMÖLLER; 2008);
- Détection et analyse des trémors volcaniques à l’aide du logiciel « Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signal » (LESAGE, 2009);
- Détermination de la constante « m » à partir de la relation D’ISHIMOTO & IIDA (1939).

Selon la relation D’ISHIMOTO & IIDA (1939), le nombre N de séismes dont l’amplitude est comprise entre A et A+dA varie de sorte que:

$$N(A)dA = KA^{-m} dA \quad (1)$$

où A et N représentent respectivement l’amplitude maximale et la fréquence, K et m étant des constantes numériques. K dépend du nombre d’événements, de la station considérée et de la composante utilisée.

Afin de faciliter le calcul dans la détermination de « m », la relation (1) est transformée en une forme plus simple, en prenant le logarithme des deux membres de l’égalité:

$$\log N(A) = \log (KA^{-m})$$

$$\text{Soit } \log N(A) = \log K - m \log A \quad (2)$$

Les erreurs dans la détermination des valeurs de « m » sont déterminées à partir de la relation:

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{\sum (\log A_i)^2 - \frac{1}{n} \{(\log A_i)\}^2}} \quad (3)$$

$$\text{avec } \delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum (\log N_i - \log K + m \log A_i)^2 \quad (4)$$

Enfin, la constante « k » est calculé à l'aide de la relation:

$$\log k = \frac{(\sum \log N_i + m \sum \log A_i)^2}{n} \quad (5)$$

Ces formules sont utilisées pour la détermination des différentes valeurs du paramètres « m » des séismes contenus dans les essais.

La détermination de l'amplitude des tremors volcaniques enregistrés dans le champ du Nyamulagira a été faite à l'aide de l'outil « RSAM ». Le RSAM (Real-time Seismic Amplitude Measurement ou Mesure de l'Amplitude Sismique en temps Réel, en français) est un outil robuste pour la surveillance de l'activité volcanique, car il fournit un indicateur simple du niveau d'énergie sismique libérée (ENDO & MURRAY, 1991). Il a été utilisé entre autres par SASA (1936) pour l'analyse de la moyenne journalière des amplitudes pour décrire l'état du volcan Aso au Japon et par BUDI-SANTOSO, *et al.* (2013) pour analyser l'activité sismique associée à l'éruption du volcan Merapi, à Java. Cette technique est utilisée ici pour examiner s'il existe une variation du niveau des tremors volcaniques avant, pendant ou après une éruption du volcan Nyamulagira.

RESULTATS

L'analyse a porté sur les données numériques enregistrées par le réseau des stations sismographiques de l'OVG des essais de séismes enregistrés dans le champ du volcan Nyamulagira pour la période de novembre 2003 à décembre 2006 et constitués essentiellement des séismes à longue période. Les résultats ci-dessous se dégagent:

Variation de la constante « m » dans le champ du volcan Nyamulagira

On observe que les valeurs de la constante « m » augmentent lorsqu'on s'approche d'une éruption (Tableau 2). Ainsi, elles varient de 1,2 à 1,6 neuf à dix mois avant une éruption et augmente de 1,82 à 3,41, deux à quatre mois avant l'éruption. Ces valeurs concordent avec celles trouvées en utilisant des données analogiques.

Tenant compte des valeurs de la constante « m » calculées en fonction du temps, on remarque que les essais précurseurs des éruptions du Nyamulagira diffèrent de celles qui ne conduisent à aucune éruption. Portées sur des graphiques (Figures 3 et 4), les valeurs de « m » montrent que les essais observés dans le champ du volcan Nyamulagira peuvent être classés en trois groupes différents d'après la variation de « m » en fonction du temps :

1. Les essais dont le « m » est croissant;
2. Les essais dont le « m » est décroissant;
3. Les essais dont le « m » est croissant suivie d'une décroissance et vice-versa.

De ces trois groupes, seul le troisième est constitué d'essaims qui conduisent directement à une éruption et sont donc considérés comme précurseurs des éruptions du volcan Nyamulagira. Ils sont observés deux à quatre mois avant l'éruption (Figures 3). Les deux premiers groupes constituent des essaims normaux qui ne conduisent pas à une éruption (Figures 4).

Tableau 2: Evolution des valeurs de la constante « m » observées pendant les essaims ayant précédé les éruptions du volcan Nyamulagira le 27 novembre 2006 et le 08 mai 2004.

DATE DES ESSAIMS	M-VALUE
15/01/2004	1,800 ± 0, 128
17/01/2004	1,835 ± 0, 120
09/03/2004	1,819 ± 0,113
10/03/2004	2,085 ± 0,132
21/04/2004	2,430 ± 0, 179
04/05/2004	2,513 ± 0,116
08/05/2004	Eruption volcanique
07/01/2006	1,338 ± 0,016
15/02/2006	1,394 ± 0,073
20/03/2006	1,422 ± 0,013
31/03/2006	1,386 ± 0,207
01/04/2006	1,280 ± 0,042
05/05/2006	0,945 ± 0,171
16/06/2006	1,296 ± 0,089
02/08/2006	2,577 ± 0,173
23/08/2006	2,793 ± 0,223
19/09/2006	3,410 ± 0,089
27/11/2006	Eruption volcanique

Analyse des trémors volcaniques par la technique “RSAM”

La technique “RSAM” fournit en continu la moyenne des amplitudes sismiques enregistrés aux stations pour n'importe quel nombre de station sismique (ENDO & MURRAY, 1991; LESAGE, 2009). Elle donne une idée du niveau d'activité sismique. Les résultats sont présentés en unités de comptage (counts), non corrigés de la réponse instrumentale. Nous utilisons ici cette technique pour l'analyse des signaux de l'activité volcanique observée au volcan Nyamulagira de 2003 à 2006. Nous comparons les valeurs du RSAM moyen et du RSAM cumulé obtenus pendant ces quatre années pour lesquelles les données existent. On observe que plusieurs mois avant une éruption, le niveau d'activité sismique indiqué par le RSAM augmente sensiblement. A l'approche de l'éruption, soit deux ou trois mois avant celle-ci, cette augmentation s'accroît encore beaucoup plus. Pour les trémors volcaniques qui ne conduiront à aucune éruption, le niveau du RSAM ne varie pas, il est constant du début à la fin de l'année.

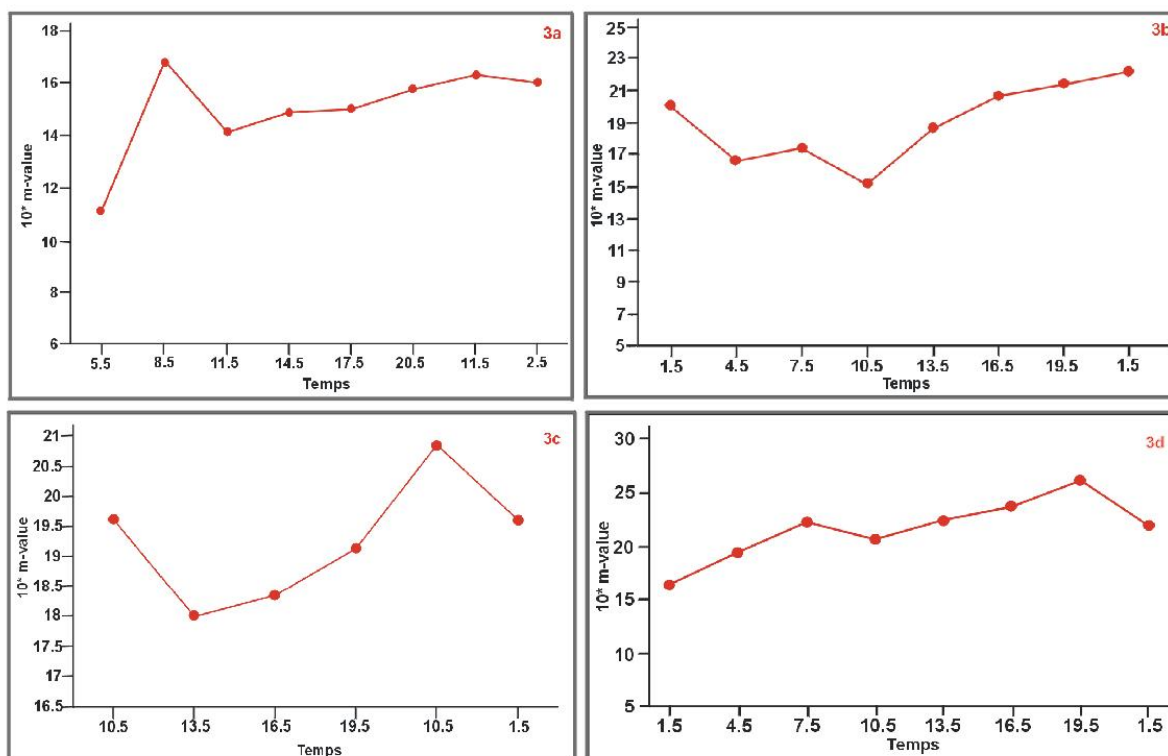


Figure 3: Structure de la courbe de variation de la constante « m » en fonction du temps exprimé en secondes.
a. Le 19 septembre 2006, soit deux mois avant l'éruption de novembre 2006. Une croissance suivie d'une décroissance et l'éruption est observée dans les deux à quatre mois qui suivent.
b: Pendant l'essai des séismes enregistrés le 02 août 2006, trois mois avant l'éruption de novembre 2006. Une décroissance suivie d'une croissance et l'éruption démarre après une seconde décroissance.
c: Pendant l'essai des séismes enregistrés du 15 au 16 janvier 2004, soit quatre mois avant l'éruption de mai 2004.
d: Pendant l'essai des séismes enregistrés du 27 novembre 2003, soit cinq mois avant l'éruption du 08 mai 2004.

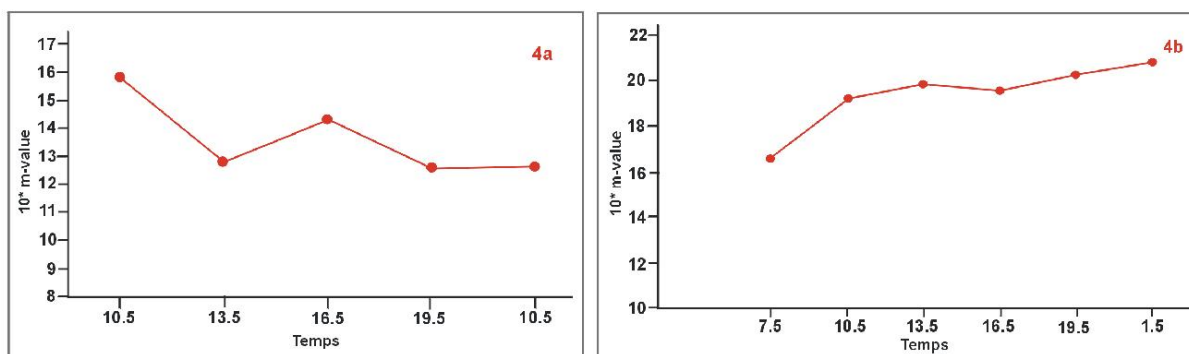


Figure 4.a: Structure de la courbe de variation de la constante « m » en fonction du temps.
a: Pendant l'essai des séismes enregistrés le 12 Avril 2005 pour lequel aucune éruption n'est survenue.
b: Pendant l'essai des séismes enregistrés le 31 juillet 2005, période pendant laquelle aucune éruption n'a été observée.

Pour les deux éruptions intervenues pendant la période d'étude (2004 et 2006), les graphiques respectifs laissent voir une nette variation du niveau du RSAM lorsqu'on tend vers une éruption. Pour l'éruption du 08 mai 2004, l'augmentation du niveau du RSAM commence à être observée à partir du 15 janvier 2004, soit quatre mois avant l'éruption (Figure 5). Un mois avant le début de l'éruption, soit le 01 mars 2004, le RSAM cumulé augmente sensiblement, passant de 9×10^5 le 01 mars 2004 à $1,6 \times 10^6$ le 27 février 2004 et n'a plus baissé jusqu'à l'éruption (figure 5).

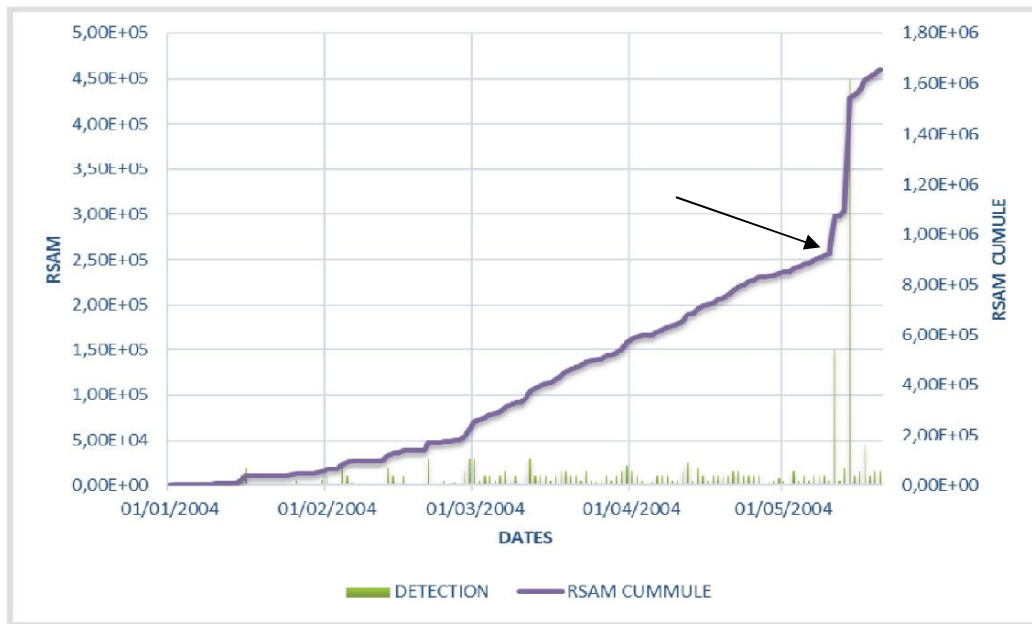


Figure 5: Evolution du niveau d'activité des trémors volcaniques (RSAM)

observés dans le champ du volcan Nyamulagira avant l'éruption du 08 mai 2004.

Les barres verticales en couleurs vertes représentent le RSAM moyen alors que le graphe en couleur mauve représente le RSAM cumulé. Le point d'inflexion observé deux mois avant l'éruption (flèche noire) représente une augmentation marquée du RSAM cumulé, passant de 9×10^5 (le 01 mars 2004) à $1,6 \times 10^6$ comptes. (le 27 avril 2004). L'éruption est survenue le 08 mai 2004.

Une observation similaire a été faite lors de l'éruption du 27 novembre 2006 (Figure 6) pour laquelle l'augmentation du niveau du RSAM s'observe déjà à partir du mois de février (soit neuf mois avant l'éruption). A cette période, le RSAM cumulé était de $7,73 \times 10^4$. Vers le 04 septembre (soit deux mois avant l'éruption), il est de $7,46 \times 10^6$ et le 18 novembre, de $1,8 \times 10^7$. L'éruption n'est intervenue qu'une semaine plus tard, soit le 27 novembre 2006.

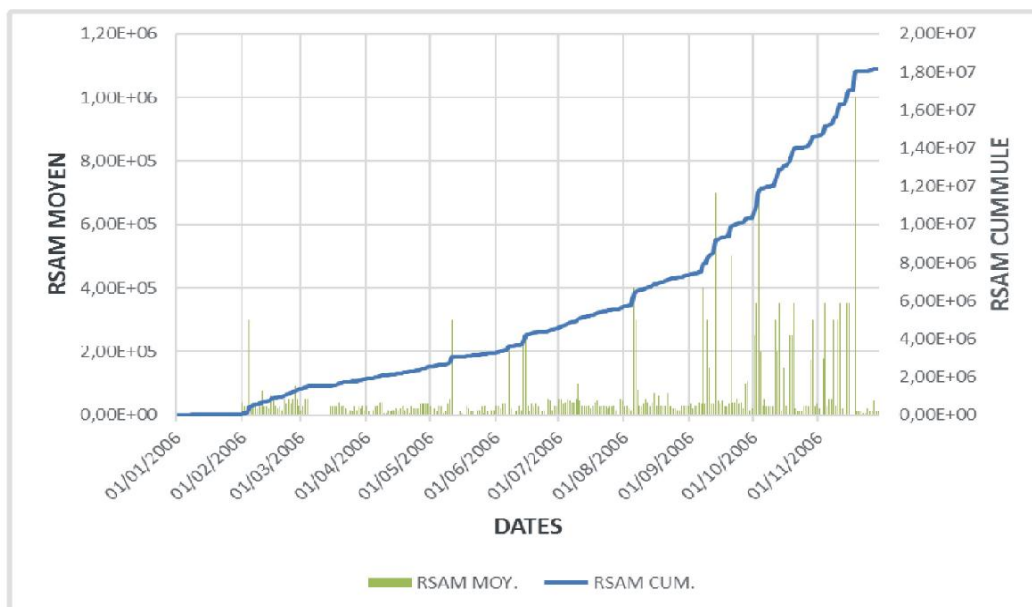


Figure 6. Evolution du niveau d'activité des trémors volcaniques (RSAM) observés dans le champ du volcan Nyamulagira avant l'éruption du 27 novembre 2006.

Les barres en couleurs vertes représentent le RSAM moyen alors que la courbe en couleur bleue représente le RSAM cumulé.

Certains essais qui ont été enregistrés dans le champ du volcan Nyamulagira pour les quatre années considérées dans cette étude n'ont conduit à aucune éruption. Il semble que cela puisse être mis en relation avec un trop faible niveau d'activité sismique des tremors volcaniques de ces essais indiqué par le RSAM. Le RSAM cumulé n'a pas dépassé 1×10^5 pour les essais analysés en 2003 et 2005, années pour lesquelles aucune éruption n'a été observée. Le RSAM moyen est resté constant, ce qui s'exprime par une ligne cumulée presque linéaire sur le graphique (Figure 7), contrairement à ce qu'on observe pour les essais qui précèdent une éruption.

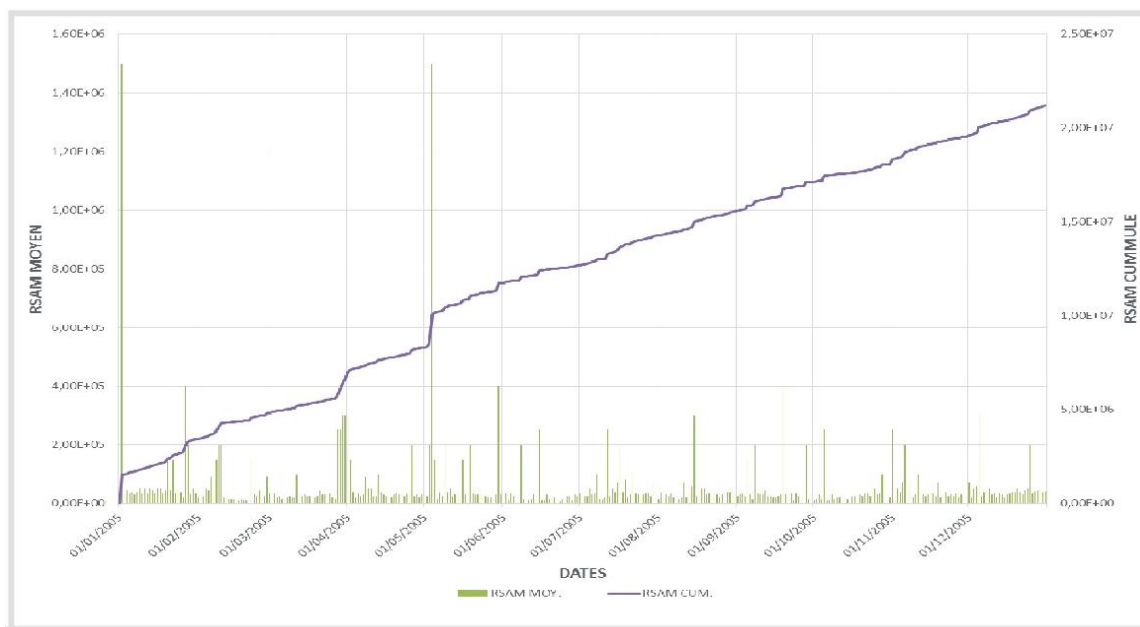


Figure 7: Evolution du niveau d'activité des tremors volcaniques (RSAM) observés dans le champ du volcan Nyamulagira de janvier à décembre 2005.

Le RSAM moyen ne dépasse pas 1×10^5 . Les barres en couleurs vertes représentent le RSAM moyen alors que la ligne en couleur bleue représente le RSAM cumulé. Aucune éruption n'a été observée pendant cette année, ce qui la différencie de deux années précédentes.

Le RSAM moyen des essais enregistrés durant toute l'année reste faible et constant, contrairement à ce qu'on observe en 2004 et 2006 où il augmente sensiblement et une éruption s'en suit. On remarque que plus l'activité sismique est forte (plusieurs semaines / mois) avant une éruption, plus cette dernière durera longtemps et le RSAM cumulé correspondant sera plus élevé que celui d'une éruption qui ne durera que quelques jours.

Nombre journalier des Séismes LP enregistrés dans le champs du volcan Nyamulagira

Nous référant au nombre journalier de séismes à longue période (LP), on observe un changement remarquable lorsqu'on s'approche d'une éruption. En effet, la tendance que présente le RSAM cumulée (figures ci-dessus) est la même pour le nombre de séismes enregistrés journalièrement avant une éruption (Figure 8). On observe des paliers qui sont chaque fois suivis d'une éruption.

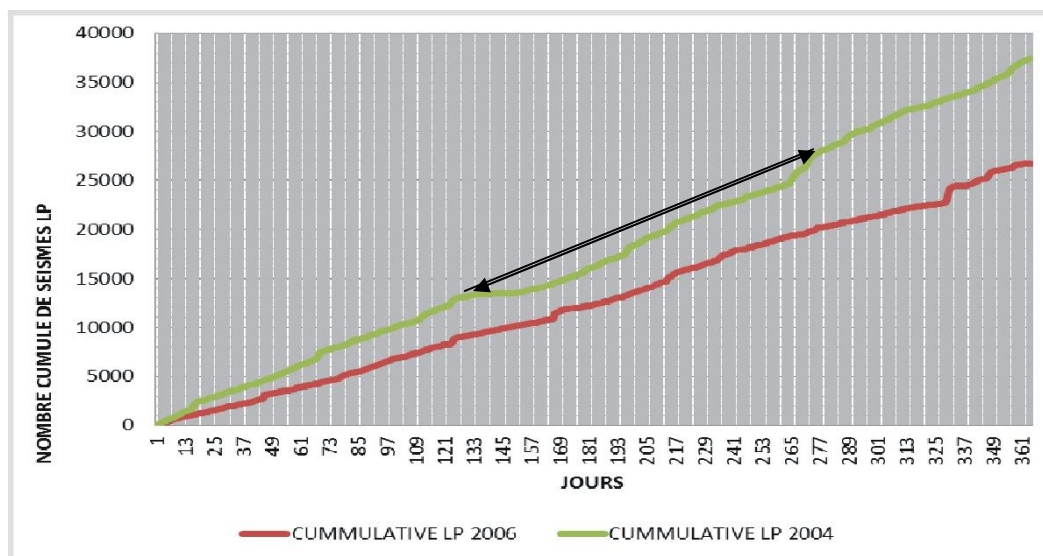


Figure 8: Nombre cumulé de séismes LP enregistrés à la station sismographique de Kibumba de janvier 2004 à décembre 2004 et de janvier 2006 à décembre 2006.

Les deux graphes représentent respectivement le nombre cumulé de séismes LP observés en 2006 (ligne rouge) et en 2004 (ligne verte). La ligne noire indiquée sur le graphe de 2004 montre comment l'activité a subitement baissée dès le déclenchement de l'éruption et indique le début d'enregistrement des tremors volcaniques. La sismicité n'a repris qu'à partir du 15.09.2004 (258^e Jour Julien sur le graphique), soit quatre mois après le début de l'éruption proprement dite.

En ce qui concerne les années où aucune éruption n'a été observée (2003 et 2005), le nombre journalier de séismes LP est presque constant du début à la fin de chaque année, comme montré à figure 9 par le graphique cumulé qui est proche d'une droite. Les paliers observés pour des années où il y a eu éruption ne sont pas remarquables ici. Cette remarque concorde avec le résultat obtenu pour le RSAM pour ces mêmes années (2003 et 2005).

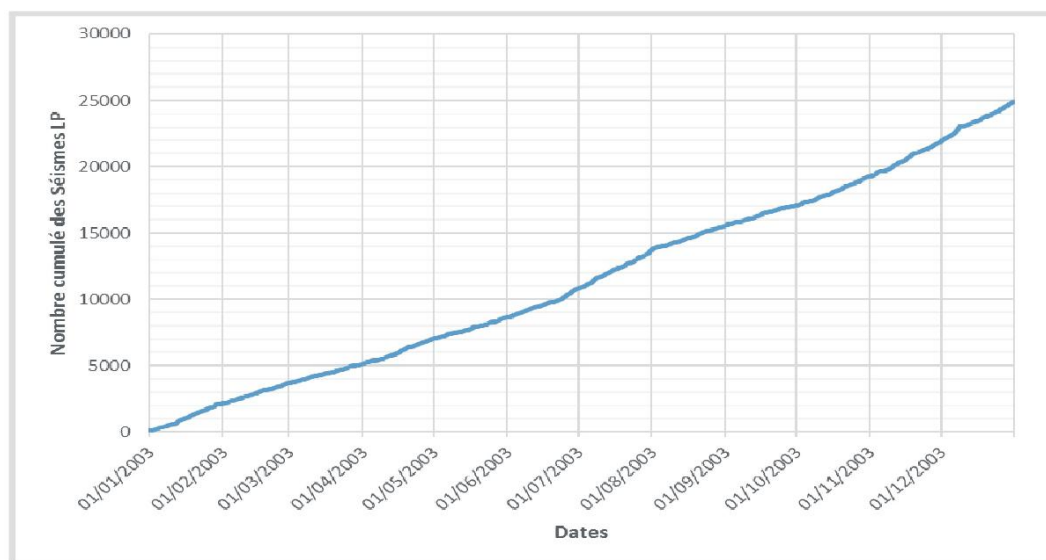


Figure 9: Nombre cumulé de séismes LP enregistrés à la station sismographique de Kibumba de janvier 2003 à décembre 2003.

Aucune variation n'est observée du début à la fin de l'année. Il en est de même de l'année 2005. Pour ces deux années, aucune éruption du Nyamulagira n'a été enregistrée.

INTERPRETATION ET DISCUSSION

Plusieurs facteurs peuvent causer la variation temporelle de la valeur m , du RSAM, et de la localisation des séismes dans une région volcanique donnée. Différentes caractéristiques de la sismicité peuvent être utilisées pour la prédiction des éruptions, parmi lesquelles le nombre des séismes par unité de temps et par type (MINAKANI, 1974), l'énergie sismique relâchée (YOKOYAMA, 1988), la migration des hypocentres (MC NUTT, 1996), des critères de rupture des matériaux (VOIGHT, 1988), le niveau moyen du signal sismique (Real-time Seismic Amplitude Measurement-RSAM, ENDO & MURRAY, 1991), ou son contenu spectral (Real-time Seismic Spectral Amplitude Measurement-SSAM).

Les résultats obtenus ici pour le volcan Nyamulagira sur les essais de séismes et les tremors volcaniques sont similaires à ceux obtenus sur d'autres volcans actifs.

Les résultats obtenus en utilisant les données numériques confirment ceux obtenus par RUSANGIZA *et al.* (2012) sur les données analogiques de la même période (Tableau 3). Pour cette dernière, les essais précurseurs d'une éruption présentent des valeurs de « m » comprises entre 1,7 et 3,23, deux à quatre mois avant une éruption. Ces valeurs diminuent et sont rangées entre 0,9 et 1,6 pour des essais qui ne conduisent pas à une éruption. Par ailleurs, utilisant les données digitales donne des valeurs « m » entre 1,82 et 3,41 pour les essais précurseurs d'éruption du Nyamulagira et entre 1,2 et 1,6 pour des essais dits normaux (à peu près 11 mois avant une éruption). On trouve d'autres essais enregistrés sporadiquement et dont le m est compris entre 0,9 et 1,2. Les différences observées entre ces valeurs entre les deux études n'est généralement pas très significative et pourrait être due soit aux petites erreurs commises lors de la mesure de l'amplitude maximale (manuellement à l'aide d'une latte) ou soit par le fait que la station de Katale utilisée pour la première étude a été remplacée par Kibumba pour cette nouvelle étude. Katale n'étant pas téléométrée, nous avons préféré utiliser Kibumba qui est la station la plus proche de Katale et du site éruptif. On peut également voir, à partir de ces valeurs, comment les valeurs « m » augmentait graduellement jusqu'à l'éruption alors qu'elles ne variaient presque pas pour les années pour lesquelles il n'y a pas eu d'éruption.

Tableau 3: Comparaison entre les valeurs de la constante « m » calculées à partir des données analogiques et numériques pour les données enregistrées pendant la période allant de novembre 2003 à décembre 2006.

DATE DES ESSAIMS	DONNEES ANALOGIQUES (Rusangiza et al., 2012)	DONNEES NUMERIQUES (Cette étude)
15/01/2004	1,705 ± 0,150	1,800 ± 0,128
17/01/2004	1,845 ± 0,105	1,835 ± 0,120
09/03/2004	1,948 ± 0,109	1,819 ± 0,113
10/03/2004	2,465 ± 0,141	2,085 ± 0,132
21/04/2004	2,854 ± 0,256	2,430 ± 0,179
04/05/2004	2,793 ± 0,223	2,513 ± 0,116
08/05/2004	Eruption volcanique	
07/01/2006	1,344 ± 0,075	1,338 ± 0,016
15/02/2006	1,348 ± 0,076	1,394 ± 0,073
20/03/2006	1,610 ± 0,214	1,422 ± 0,013
31/03/2006	1,505 ± 0,131	1,386 ± 0,207
01/04/2006	0,902 ± 0,051	1,280 ± 0,042
05/05/2006	1,177 ± 0,058	0,945 ± 0,171
16/06/2006	1,280 ± 0,020	1,296 ± 0,089
02/08/2006	2,855 ± 0,139	2,577 ± 0,173
19/09/2006	3,236 ± 0,940	3,410 ± 0,089
27/11/2006	Eruption volcanique	

Ces résultats concordent globalement avec ceux trouvés par l'utilisation des données analogiques. Comparativement aux travaux réalisés par d'autres auteurs (par ex. ISHIMOTO & IIDA, 1939; KUBOTERA, 1965; ZANA, 1976; LUKAYA *et al.*, 1992) qui ont montré que les valeurs « m » varient généralement entre 1,7 et 4 deux à quatre mois avant une éruption, nos résultats pour le volcan Nyamulagira concordent bien avec ceux trouvés ailleurs pour des volcans actifs.

Lorsqu'on s'approche d'une éruption, l'activité sismique des trémors volcaniques mesuré par le RSAM augmente sensiblement. Lorsque le RSAM cumulé dépasse $5,54 \times 10^6$ (en moyenne), une éruption du Nyamulagira pourrait se produire dans les mois ou semaines qui suivent. Par contre, à partir des données de la station de Lwiro, ZANA *et al.* (1989) montrent que lorsque le RSAM cumulé dépasse $5,25 \times 10^6$, une éruption des volcans de la région des Virunga pourrait se produire dans 3-4 mois qui suivent. Ce seuil est de loin supérieur à celui trouvé ici. Cette différence pourrait être due à la distance de la station de Lwiro aux volcans étudiés (100 Km), à la qualité des données, à une mauvaise discrimination entre les séismes tectoniques ou volcaniques ou encore le type d'enregistreur utilisé.

CONCLUSION

Dans cette étude, certaines des caractéristiques de la sismicité du volcan Nyamulagira ont été analysées dans le but de mettre en place un outil permettant le suivi de l'activité sismo-volcanique du Volcan Nyamulagira. Il s'agit de la variation du nombre des séismes enregistrés par unité de temps et par type avant une éruption, du niveau moyen des trémors volcaniques (RSAM), ainsi que d'autres paramètres. Les résultats obtenus après analyse de tous ces paramètres montrent que:

- la fréquence de séismes volcaniques à longue période (LP) augmente sensiblement à l'approche d'une éruption du volcan Nyamulagira;
- la constante « m » des essaims précurseurs varient entre 1,82 et 3,41 deux à quatre mois avant une éruption;
- pour les essaims qui ne conduisent à une aucune éruption on trouve des valeurs de « m » faibles, comprises entre 1,2 et 1,6 ;
- lorsque la valeur moyenne du RSAM cumulé devient supérieure ou égale à $5,25 \times 10^6$, une éruption du volcan Nyamulagira serait imminente.

Bien que les éruptions du volcan Nyamulagira puissent être précédées par des séquences sismiques similaires à celles analysées ici, toutes les séquences sismiques ne sont pas nécessairement suivies d'une éruption. Elles peuvent au contraire être suivies par une décroissance de l'activité permanente ou par une accalmie temporaire dans la sismicité telle que remarquée dans cette étude. Par conséquent, ces paramètres seuls sont insuffisants pour garantir une prévision des éruptions du Nyamulagira, et devront être combinés à ceux d'autres types de mesures dont les gaz, le tilt-mètre, les infrasons, les images satellitaires ou d'autres.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Gouvernement belge qui, à travers le projet RA_S1_RGL_GEORISK piloté par le Docteur Delvaux et toute son équipe, a songé à la formation des jeunes chercheurs de la Région des Grands Lacs sur la gestion des risques géologiques. Nos remerciements s'adressent à tous les Enseignants qui se sont donnés corps et âmes afin de nous fournir une formation de qualité malgré leurs multiples occupations. Que nos promoteurs, les Docteurs François Kervyn du Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC) de Tervuren en Belgique et Georges Mavonga Tuluka de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) trouvent ici nos sincères remerciements. Vos conseils, suggestions et corrections apportés à ce travail ont permis son aboutissement. Un très grand merci à Josué Subira pour son soutien pendant l'élaboration de ce travail. Les encouragements et soutien moral reçus de mon épouse Nicole et de mes enfants Audry, Beny, Christiano et Glody m'ont été d'une importance capitale. Qu'ils trouvent ici notre immense remerciement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASPINALL, W.P., MILLER, A.D., LYNCH, L.L., LATCHMAN, J.L., STEWART, R.C., WHITE, R.A. & POWER, J.A., 1998. Soufriere Hills eruption, Montserrat, 1995–1997: volcanic earthquake locations and fault plane solutions. *Geophysical Research Letters*, 25 (18): 3397-3400.
- BUDI-SANTOSO, A., LESAGE, P., DWIYONO, S., SUMARTI, S., SURONO, S., JOUSSET, P. & METAXIAN, J.-P., 2013. Analysis of the seismic activity associated with the 2010 eruption of Merapi Volcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261(1): 153-170.
- CLAY, C. & CASSANDRA, R.C., 1995. Volcanism in Eastern Africa, Final Report. NASA/ASEE Summer Faculty Fellowship Program, Johnson Space Center, Contract No. NGT- 44,001-800.
- DEMANT, A., LESTRADE, P., LUBALA, R.T., KAMPUNZU, A.B. & DURIEUX, J., 1994. Volcanological and petrological evolution of Nyiragongo volcano. Virunga volcanic field, Zaire. *Bull. Volcanol.*, 56: 47-61.
- ENDO, E.T. & MURRAY, T.L., 1991. Real-time Seismic Amplitude Measurement (RSAM): a volcano monitoring and prediction tool. *Bulletin of Volcanology*, 53: 533-545.
- HAMAGUCHI, H. & ZANA, N., 1983. Introduction to Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira. In: Hamaguchi, H. (Ed.), Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira: Geophysical Aspects. Faculty of Science, Tohoku University, Sendai, Japan, pp. 1-6.
- HAMAGUCHI H. & ZANA, N 1990. A Great Circle Distribution of Four Active Hotspots: Evidence for Deep Mantle Plumes; *Tohoku Geophys. Journ.* (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5), 33 (3-4): 251-262.
- HAYASHI, S., KASAHARA, M., TANAKA, K., HAMAGUCHI, H. N & ZANA, N., 1992. Major element chemistry of recent eruptive products from Nyamuragira volcano, Africa (1976 - 1989). *Tectonophysics*, 209: 273-276.
- HAVSKOV, J. & OTTEMÖLLER, L. 2008. SEISAN: The Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and Mac, Version 8.2.1.
- ISHIMOTO, M. & IIDA, K. 1939. Observation sur les séismes enregistrés par le micro Sismographe construit dernièrement. *Bull. of Earth. Res. Inst.*, vol.17
- KUBOTERA, A., 1965. Volcanic Earthquake. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, 2 (10): 91-99 (In Japanese with English summary).
- LEGRAND, D., CALAHORRANO, A., GUILLIER, B., RIVERA, L., RUIZ, M., VILLAGOMEZ, D & YEPES, H., 2002. Stress tensor analysis of the 1998–1999 tectonic swarm of northern Quito related to the volcanic swarm of Guagua Pichincha Volcano, Ecuador. *Tectonophysics*, 344:15-36.
- LESAGE, P. 2009. Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals. *Computers & Geosciences*, 35: 2137-2144.
- LUKAYA, N., CIRABA, M., MAVONGA, T. & WAFULA, M., 1992. main pattern of waveforms observed in the Virunga volcanic zone, Western Rift Valley of Africa. *Tectonophysics*, 209: 261-265.
- MAVONGA, T., KAVOTHA, K.S., LUKAYA, N., ETOY, O. & DURIEUX, J., 2006: Seismic activity prior to the May 8, 2004 eruption of volcano Nyamulagira, Western Rift Valley of Africa. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158: 355-360.
- MAVONGA, T., KAVOTHA, K.S., LUKAYA, N., ETOY, O., WAFULA, M., RUSANGIZA K.B. & JACQUES, D., 2010. Some aspect of seismicity prior to the 27 November 2006 eruption of Nyamuragira Volcano and its implication for Volcano monitoring and risk mitigation in the Virunga area, Western Rift Valley of Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 58 (5): 829-832.
- MC NUTT, S.R., 1996. Seismic monitoring of volcanoes: a review of the state of the art and recent trends. In: SCARPA, R. & TILLING, R. (Eds.), Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards, Chapter3. Springer-Verlag, Berlin, pp. 99-146.
- MINAKAMI, T., 1960. Fundamental research for predicting volcanic eruptions, Part I. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 38: 497-544.
- MINAKAMI, T., 1974. Seismology of volcanoes in Japan. *Physical Volcanology*, 1-27.
- MINAKAMI, T. & HIRAGA, S., 1969. Fundamental Research for predicting volcanic Eruptions. *Bull. of Earthq. Res. Inst.*, 47: 893- 949.
- PAGLIUCA, N., BADIALI, L., CADANEO, M., CIRABA, H., DELLADIO, A., DEMARTIN, M., GARCIA, A., LISI, A., LUKAYA, F., MARCHEDI, A., MONACHESI, G., MAVONGA, G., SGROI, T. & TEDESCO, D., 2009. Preliminary results from seismic monitoring at Nyiragongo Volcano (Democratic Republic of Congo) through telemetered seismic network, Goma Volcanological Observatory, *Boll. Geof. Tear. Appl.*, 50: 117-127.
- POUCLET, A., 1975. Contribution à la connaissance du Volcan Nyamuragira (Rift Ouest de l’Afrique Centrale). *Bull. Volcanol.*, 39: 466-478.
- POUCLET, A., 1976. Volcanologie du rift de l’Afrique Centrale, le Nyamuragira dans les Virunga, essai de magmatologie du rift. Ph.D. Thesis, University of Paris-Sud Orsay, France.

- POUCLET, A. & VILLENEUVE, M., 1971. The eruption of Rugarama (March-May,1971) at Nyamuragira volcano, Rep. Zaïre. *Bull. Volcanol.*, 36: 200-221.
- RICHARD, J. & NEUMAN van PADANG, M., 1957. Catalogue of the active volcanoes of the including solfatara field, Int volc. Assoc., Pt. IV, Napoli, 118 pp.
- RUSANGIZA, B.K., MAVONGA, T., LESAGE, P., KAVOTHA, K.S., WAFULA, M., LUKAYA, N. & CIZA, A., 2012: About swarms of long-period earthquakes of volcano Nyamuragira of the Virunga Region, Western Rift Valley of Africa (D R of Congo): *Geographica Pannonica*, 16 (1): 10- 17.
- SASA, K., 1936, Micro-seismometric study on eruption of the volcano Aso. *Mem. Coll. Sc. Kyoto Imp;Univ;* Series A19: 11-56.
- SMETS, B., WAUTHIER, C. & d'OREYE, N., 2010: A new map of the lava flow field of Nyamulagira (D.R. Congo) from satellite imagery. *Journal of African Earth Sciences.*, 58 (5): 778-796.
- SMITHSONIAN INSTITUTION, 1971-2011. Nyamuragira, Scientific Event Alert Network (SEAN). Bulletin 7 (1), Bulletin of the Global Volcanism Network, 37 (3).
- TEDESCO, D., VASELLI, O., PAPAIE, P., CARN, S.A., VOLTAGGIO, M., SAWYER, G.M., DURIEUX, J, KASEREKA, M., TASSI, F., 2007. January 2002 volcanotectonic eruption of Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo. *Journal of Geophysical Research*, 112, B09202.
- VAN COOLS, G., 1949. Historique succinct des manifestations volcaniques au Kivu depuis 1882. *Lovania*, 15:182-183;
- VOIGHT, B., 1988. A method for prediction of volcanic eruptions. *Nature*, 332: 125-130.
- YOKOYAMA, I., 1988. Seismic energy release from volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 50: 1- 13.
- ZANA, N., 1976. Seismicity of the Western African rift valley from 1956 to 1970, *Bull. Intern. Inst. Seis. Earthq. Eng., Individual Studies*, Tokyo, 12: 121-140.
- ZANA, N., KAMBA, M., KATSONGO, S. & JANSSEN, TH., 1989. Recent seismic activity of the Kivu Province, Western Rift Valley of Africa. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 58: 52-60.