

QUELQUES ASCPECTS SÉISMIQUES PRECEDANT L'ÉRUPTION DU NYAMULAGIRA 6 NOVEMBRE 2011, REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO

[SOME SISMIC ASPECTS PRIOR THE NOVEMBER 06, 2011 NYAMULAGIRA ERUPTION, DEMOCRATIC REPUBLIC OF CONGO]

Silvanos Fiam Bondo¹, Clarisse Balegamire Njovu¹, Jean Robert Nshokano², and Justin Lonji Lubula¹

¹Département de Géophysique,
Centre de Recherche en Sciences Naturelles (CRSN/Lwiro),
Sud Kivu/DS Bukavu, RD Congo

²Centre de Recherche Géologique et Minière,
Station du Sud – Kivu/Lwiro, RD Congo

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The Nyamulagira volcano enters in eruption approximately each 2 years and the last eruption of November 06, 2011 was started 22 months after that of January 02, 2010. The aim of this work is the characterization of some aspects of seismicity prior the Nyamulagira eruption on 2011 by temporal analysis of the hypocenters (epicenters and depths), earthquake number and spectral frequency. A temporal evolution showed that the seismicity rate, the hypocenters, the corner frequency and energies release vary and give a comprehension of the behavior of the volcanic activity. 10 months before the eruption, earthquakes were deep (10 - 30 km) and scattered with weak corner frequencies (< 2.6 Hz) in the field of Nyamulagira. That confirms a partial melt or deep magmatic intrusion with weak displacement. The magmatic migration starts between April and October 2011 with shallow earthquakes (0 - 5 km) and high corner frequency and high energy. This period prepares a pathway of magma to the surface. The frequency and energy were then higher in the last swarms of 04 and 05 November 2011, 2 days prior the eruption. This last seismicity denote at the same time a magmatic intrusion, a fracturing of the weakness zones and an extrusion of the lava at the surface. A deep investigation of these parameters on several eruptive cycles would facilitate the knowledge of the magmatic dynamics of Nyamulagira volcano and also the predictive approach of its eruptions.

KEYWORDS: Hypocenters, corner frequency, swarms, energy release, earthquake number.

RESUME: Le volcan Nyamulagira entre en éruption environ chaque 2 ans et la dernière éruption du 06 Novembre 2011 s'est produit 22 mois après celle du 02 janvier 2010. L'objet de ce travail est la caractérisation de certains aspects sismiques précédant l'éruption du Nyamulagira en 2011 par analyse temporelle des hypocentres (épacentres et profondeur), nombre des séismes et la fréquence spectrale. Une évolution temporelle a démontré que le nombre de sismicité, les hypocentres, la fréquence coin et les énergies varient et donnent une compréhension du comportement de l'activité volcanique. 10 mois avant l'éruption, les séismes ont été profonds (10 – 30 Km) et dispersés avec des fréquences coin faibles (< 2.6 Hz) dans le champ du Nyamulagira. Cela confirme une fusion partielle ou une intrusion magmatique en profondeur avec faible déplacement. La migration magmatique commence entre Avril et Octobre 2011 avec des séismes superficiels (0 – 5 Km) et à haute fréquence coin et énergie élevée. Cette période prépare une voie de passage au magma pour la surface. La fréquence et l'énergie étaient alors plus élevées dans les derniers essaims du 04 et 05 Novembre 2011, soit deux jours avant l'éruption. Cette dernière sismicité dénote à la fois une intrusion magmatique, une fracturation des zones de faiblesse et une extrusion

de la lave à la surface. Un approfondissement de ces paramètres sur plusieurs cycles éruptifs faciliterait la connaissance de la dynamique magmatique du volcan Nyamulagira et aussi l'approche prédictives de ses éruptions.

MOTS-CLEFS: Hypocentres, fréquence coin, essaims, énergie libérées, nombre des séismes.

1 INTRODUCTION

L'éruption du volcan Nyamulagira du 06 novembre 2011 avait commencé à 17h55 minutes TU dans son cratère et ensuite sur le flanc Sud Est, zone dans laquelle toute la grande activité s'y était concentrée pendant environs trois mois. Cette éruption a eu lieu seulement 22 mois après celle du 02 Janvier 2010. Le lieu de cette éruption était localisé non loin de l'ancien cône nommé Kimanura lors de l'éruption de 1989, soit à quelques 10 km dans la partie est du cratère central. Cependant, le cône de l'éruption 2011 est à 11 Km du cratère ayant pour coordonnées géographiques latitude 01°23'04"S et longitude 029°18'22.2"E et altitude 1738 m (Figure 1). La fontaine de lave associée à cette éruption a atteint 100 m de haut (Figure 1).



Fig.1: Le cône et la fontaine de lave associés à l'éruption du Nyamulagira 06 Novembre 2011 (gauche). La coulée de lave (droite), (© OVG).

Selon les informations fournies par le Service de Protection Civile de Goma, les produits volatils du volcan (les cheveux de Pellés, des cendrées volcaniques,...) ont causé beaucoup de dommages dans les villages localisés à l'ouest de Virunga, principalement les villages de Kabati, Kilorihwe, Kimoka, Kingi, Rusayo. Il s'est avéré que les champs et les pâturages ont été pollués et quelques brebis ont trouvé la mort. Beaucoup d'autres dommages ont été enregistrés les champs et pâturages dans les contrées de Kelengera, Katala and Rumangabo dans la partie est.

Dix mois avant l'éruption, trois essaims de séismes volcaniques à longues et courtes périodes ont été enregistrés aux stations de l'OVG respectivement le 09 Janvier, 30 Septembre, 04 et 05 Novembre 2011. Les essaims séismiques sont fréquemment observés avant les éruptions du Nyamulagira. L'activité séismique associée aux éruptions du volcan Nyamulagira a fait objet de plusieurs études ([1], [2], [3], [9], [34], [4]). [3] examinant les essaims des séismes volcaniques dans la région des Virunga a observé que le m- value de Ishimoto – Ida correspondaient à 0,9 et 1,6 pendant la période calme et à 1,7 et 3,23 avant les éruptions du Nyamulagira durant la période de 2000 et 2006.

D'autre part, les caractéristiques séismiques associées à l'activité du volcan Nyamulagira ont été étudiées par plusieurs auteurs ([1], [2], [3], [5], [6], [9], [34]). Ils trouvèrent donc que les essaims séismiques composés essentiellement des séismes longue période (LP) précèdent environ 2 ou 3 à 5 mois les éruptions du Nyamulagira ([1], [7]). [8] démontrent que l'essaim observé du 06 au 15 Juillet 1996 fut un grand précurseur de l'éruption du volcan Nyamulagira le 1^{er} Décembre 1996. [34]

examinant les séismes volcaniques associés à l'éruption du volcan Nyamulagira le 27 Novembre 2006 et localisèrent ces événements 11 mois avant cette éruption. Ils observèrent une croissance du nombre de séismes. Cette croissance réside dans l'apparition des essais composés principalement de séismes LP (Type B ou C et hybrides) durant cette période.

Cependant, les différentes séquences séismiques sont apparues sur les séismogrammes des stations de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) entre Janvier et Novembre 2011 ; le suivi temporel de leurs caractéristiques révélerait une particularité sur la surveillance des volcans actifs des Virunga et contribuerait à la prédiction des éruptions de ces volcans.

Cette étude s'est limitée donc au seul suivi de la variation temporelle des séquences séismiques de l'activité éruptive du 06 Novembre 2011 entre Janvier et Novembre 2011. Une analyse fréquentielle a intervenu pour la catégorisation de ces séquences. L'étude a donc pour objet de mettre en évidence quelques traits séismiques qui ont précédé l'éruption du Nyamulagira (06 Novembre 2011). Une analyse fréquentielle a permis de faire une caractérisation temporelle de la fréquence coin caractérisant les séismes volcaniques et leur variation hypocentrale. L'évolution temporelle de l'activité séismique : le nombre des événements, les hypocentres (épicerentre et profondeur des séismes) a touché également le cœur de ce travail.

La distribution des épicerentres de séismes volcaniques longues périodes à partir du mois de Juillet à Décembre 2011 a montré plus de concentration au nord-est du Nyamulagira et a coïncidée avec le lieu de l'éruption (Figures 8 et 9). Les épicerentres de séismes hautes fréquences (type A) ou séismes résultant de cassure sèche ont été peu profonds, plus au moins 5 Km et ont été alignés sur un jeu de fracture presque perpendiculaire à la grande fracture qui relie Nyamulagira et Nyiragongo (Figure 9). Un coup d'œil sur la période des tremors volcaniques faite sur base des données obtenues du réseau séismique de l'OVG avant, pendant et après la dite éruption a montré deux bandes de tremors volcaniques. Celle comprise entre 10,5 et 6,5 secondes observée au Mont Goma et l'autre de courtes périodes située entre 6,0 et 1,0 secondes. L'analyse de la variation du paramètre spectral (la fréquence coin) montre une évolution croissante du début du cycle éruptif jusqu'à l'éruption qui avait eu lieu au Nyamulagira le 06 Novembre 2011 dans certains essais qui caractérisent cette activité.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 LE NYAMULAGIRA DANS LA REGION DES VIRUNGA

Le volcan Nyamulagira ou Nyamuragira est localisé dans la Région des Virunga, au nord du lac Kivu dans la branche Occidentale du Système des Rifts Est Africains (SREA). Le Volcan Nyamuragira (1.42°S; 29.2°E, 3056 m) est un volcan basaltique localisé à 25 km au nord du lac Kivu dans la province du Nord Kivu, République Démocratique du Congo. Ce volcan est à 13 Km au nord – ouest de son voisin le Nyiragongo ([9], [11], [14], [34]) (Figure 1). La région des Virunga est subdivisée en trois groupes d'édifices volcaniques avec 8 massifs volcaniques [12]: la partie Est, Centrale et Ouest. La Figure 2 illustre bien cette distribution. Les 8 volcans sont alignés suivant l'orientation Est – Ouest perpendiculairement à la direction du Rift [13].

Parmi ces 8 volcans, seuls les Nyiragongo and Nyamuragira qui sont les plus actifs, alors que les autres sont considérés comme endormis. Ces deux volcans sont également considérés comme étant parmi les plus actifs du monde [14], [10], [34]. Depuis 1980, le volcan Nyamulagira entre en éruption au moins chaque 2 ans [14]. Ses éruptions sont souvent du type hawaïen avec une fontaine de lave effusive [15]. Un lac de lave a persisté dans son cratère depuis 1921 jusqu'à 1938 [16]. Ce lac a complètement disparu pendant l'éruption de 1938 qui a perduré pendant 2 ans [8].

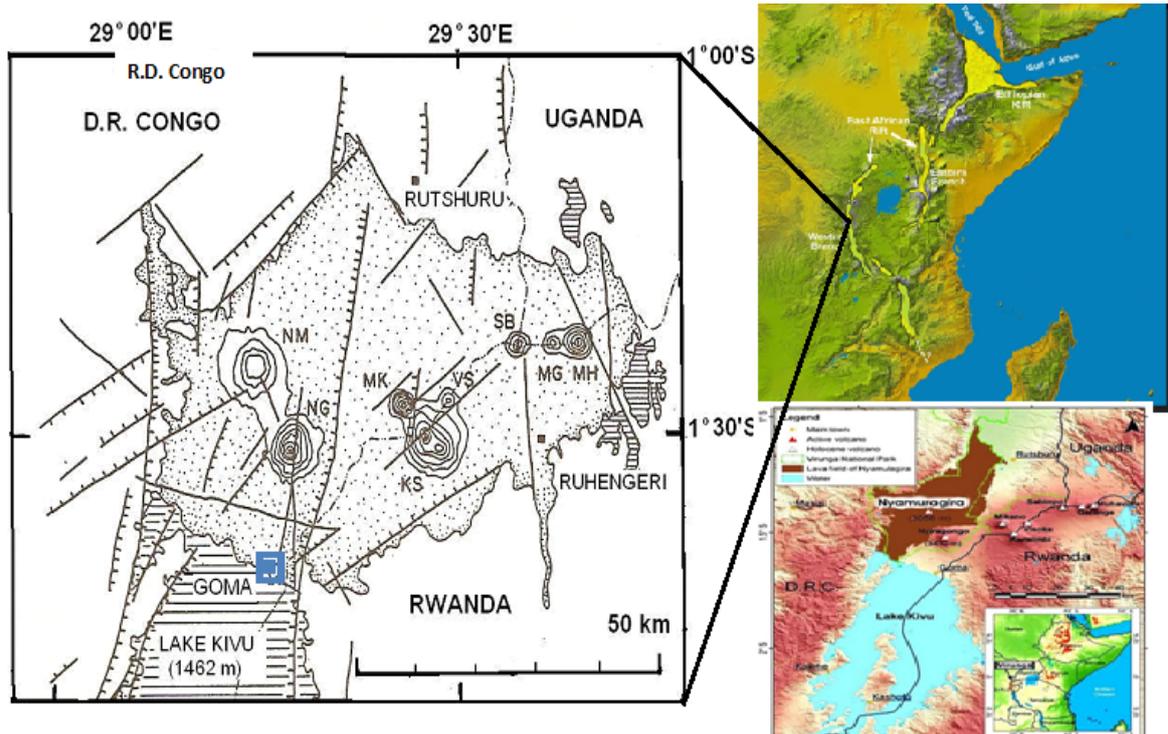


Fig. 2: Un extrait de la géologie et distribution des principaux systèmes volcaniques dans la région des Virunga. Les lignes circulaires représentent le système volcanique dans cette branche occidentale du SREA.

— : Principales Failles (Villeneuve, 1980). NM : Nyamulagira; NG : Nyiragongo; MK : Mikenno; KS : Karisimbi; VS : Visoke ; SB : Sabinyo ; MG : Gahinga ; MH : Muhavura. ([19], modifié).

Toutes les éruptions du Nyamulagira se produisent sur les flancs sauf celle de 1938 qui fut sommitale. Les récentes éruptions de ce volcan sont celles du 27 Janvier 2000, 05 Février 2001, 25 Juillet 2002, 08 Mai 2004, 27 Novembre 2006, 02 Janvier 2010 et celle du 06 Novembre 2011. Ces éruptions sont associées à une grande activité sismique qui serait le principal élément précurseur.

2.2 DONNÉES ET MÉTHODES

L'activité sismique dans le Virunga a été suivie grâce au réseau de l'OVG pour observer l'activité des volcans Nyiragongo et Nyamulagira. Les stations sismiques suivantes ont été à la base des enregistrements sismiques : Stations de Kibumba (KBB), Luboga (LBG), Kunene (KNN), Rusayo (RSY), Bulengo (BLG) et Goma (GOM) (Figure 3) équipées de sismomètres Kinematics SS-1 ranger à courte période ($T_0=1\text{sec}$) de composantes verticales et des enregistreurs portables PS-2. Les senseurs digitaux sont de types Lennartz.

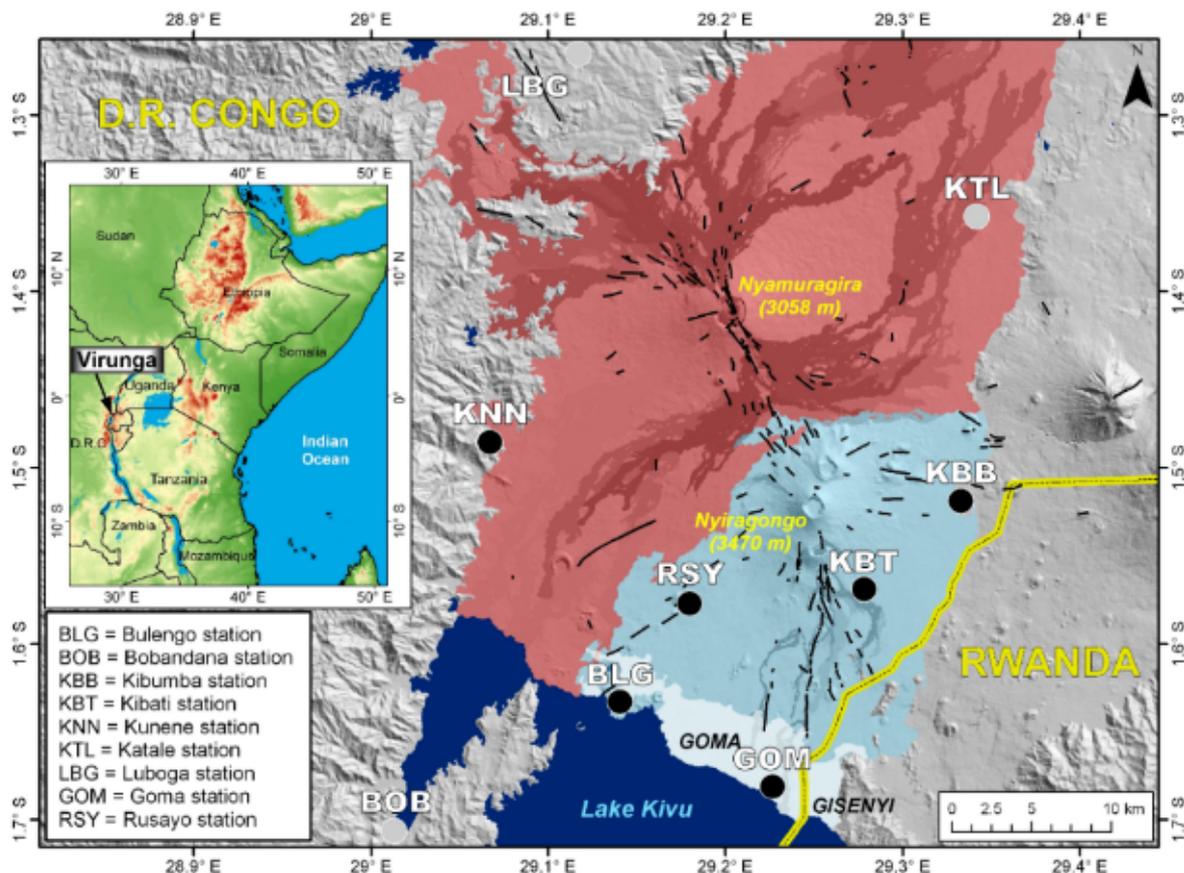


Fig. 3: La carte de la partie ouest de la région des Virunga représentant les volcans Nyiragongo et Nyamuragira (ou Nyamulagira). Les cercles représentent les stations sismiques du réseau sismique de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG/ D.R. Congo).

Les séismes enregistrés aux stations sismiques digitales de l'OVG ont été analysés pendant la période précédant l'éruption du Nyamulagira 2011, soit de Janvier à Novembre 2011. Les trois composantes (EHZ, EHE et EHN: vertical et les deux horizontales respectivement) (Figure 4).

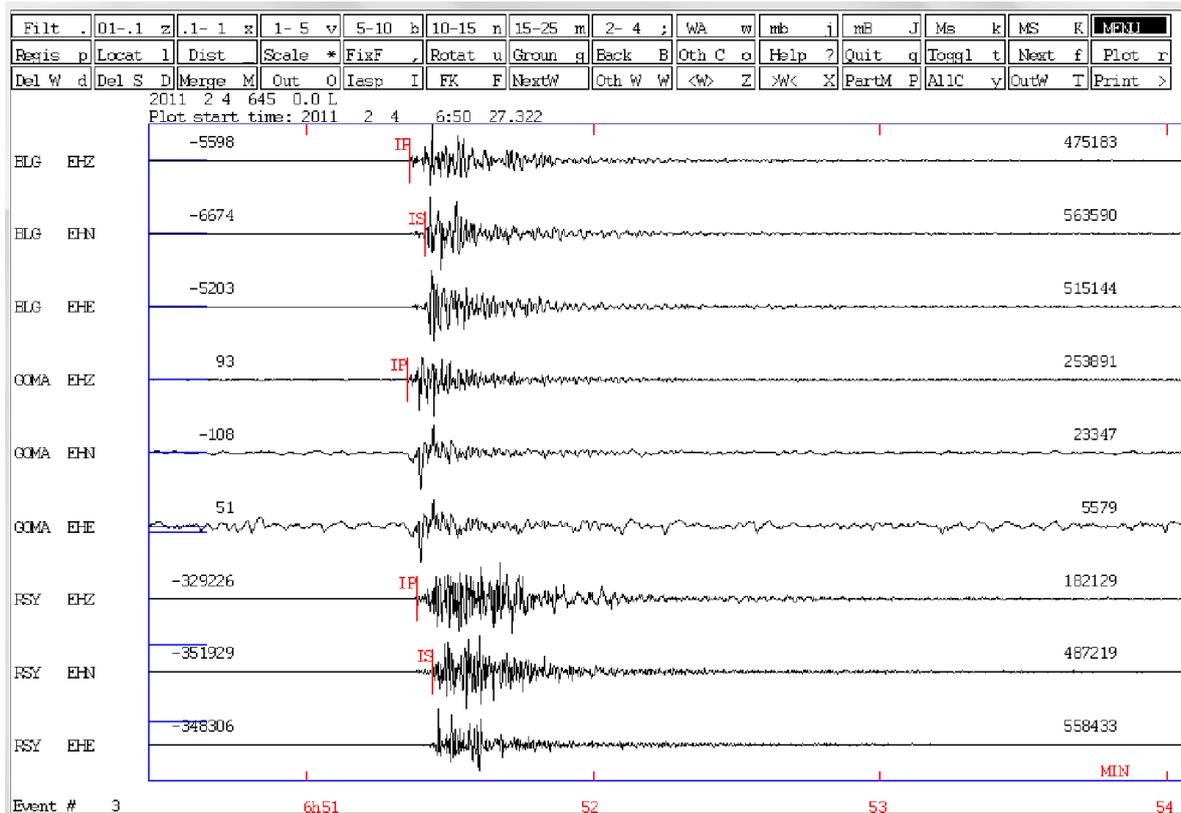


Fig. 4: Exemple d'un séisme enregistré par les stations sismiques de l'OVG sous le logiciel de post-traitement SEISAN 9.1.

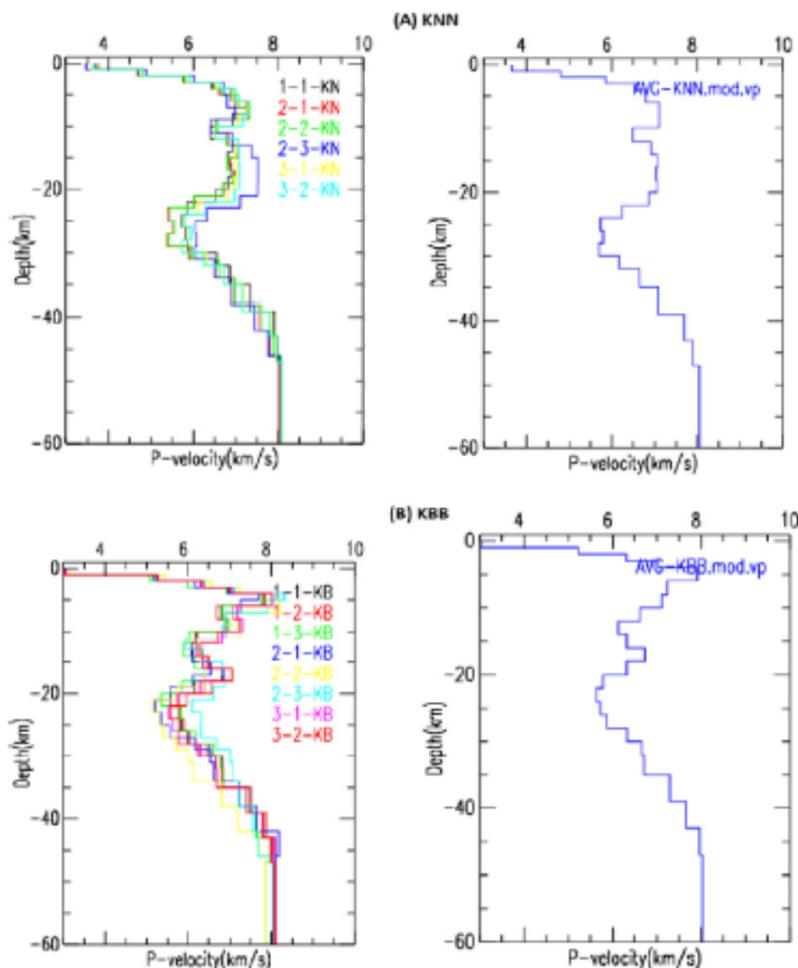
Les séismes isolés et se produisant sous forme d'essaims enregistrés avant cette éruption ont été analysés. Les exemples des essaims sismiques sont donnés dans les figures 10 a et b. [1], [2], [6], [17] avaient déjà analysé ces événements sismiques de la région des Virunga en utilisant les données digitales et ils conclurent ce qui suit:

1. Les séismes de type A: séismes avec les phases P et S très clairs et impulsives et de fréquences dominantes supérieures à 5 Hz. Ils sont dus à la cassure sèche sous l'effet de la pression et la température magmatique ;
2. Les séismes de type B sont regroupés en deux :
 - a. Le premier groupe a les phases P impulsives et S émergentes et non claires. Ils sont de fréquences dominantes faibles entre 1 et 3 Hz ;
 - b. Le deuxième groupe est celui des séismes hybrides, ayant une combinaison des hautes et basses fréquences dont les hautes sont au début du signal [18]. Leurs phases P sont remarquablement similaire aux séismes de type A ([19], [20]), ils reflètent à la fois la cassure sèche et le mouvement du magma ;
3. Les séismes de types C: ils ont des phases P et S obscures avec une bande fréquentielle de 1 – 3 Hz. Ceux – ci sont dus à l'agitation magmatique ou à la résonance dans la chambre ou conduit magmatique et
4. Les tremors volcaniques: qui sont des séismes de longue période apparaissant sur le sismogramme sous forme de sinusoïde de longue durée. Ils caractérisent le mouvement magmatique dans le conduit volcanique.

La sismicité associée à l'activité volcanique de Nyamulagira a été étudiée par plusieurs auteurs ([1], [2], [6], [8], [9], [17], [21], [22] [34]). Ils ont trouvé que les éruptions liées au Nyamulagira sont souvent précédées des essaims sismiques des séismes de types B et C et quelques fois en association avec les types A et son taux de sismicité (nombre de séismes pour chaque intervalle de temps) augmente 2 – 3 mois ou quelques jours à quelques heures avant ces éruptions ([20], [23]).

La localisation des événements sismiques a été faite par la méthode des pics des ondes P et S en utilisant le logiciel SEISAN [24] (Figure (4)). Cette méthode est basée sur l'estimation des temps d'arrivée des ondes de volumes P et S dans le

séisme (Figure 4). L'exemple de pic des ondes P et S est fourni dans la figure 4. Le modèle de vitesse (Table 1) accepté pour ce travail est celui de [9] établi par l'analyse de fonctions réceptrices dans le champ volcanique des Virunga (Figure 5).



he (A) KNN and (B) KBB stations. The same three initial models were used for both KNN and KBB. The models derived from the the

Fig. 5 : Exemples de Modèle de vitesse aux stations de Kunene (KNN) (droite et au-dessus), de Kibumba (KBB) (gauche et au – dessous) et moyenne de la vitesse partant de ces modèles (droite) respectivement pour les stations KNN et KBB ([9]).

Les zones de faible vitesse sont rencontrées à la profondeur comprise entre 20 et 30 Km à la station KNN et entre 18 et 28 Km pour la station de KIBUMBA (KBB). Les vitesses moyennes retenues pour ces stations sont respectivement 5,9 km/s et 6,0 km/s. La zone à faible vitesse pourrait être causée par la présence d'une chambre magmatique ou encore par la fusion partielle des roches. Ce modèle montre une grande vitesse (6,8–7,4 km/s) sous les stations de KNN et KBB aux profondeurs de 3 - 20 Km et 3 – 10 Km, respectivement, et indiquant une accumulation de magmas sous le volcan. Le modèle de vitesse moyenne aux stations de KNN et KBB a fait alors objet d'une simplification de modèle structurale (Table 1) que nous avons utilisé pour la détermination des hypocentres des séismes volcaniques dans la région des Virunga.

Table 1 : modèle de structure de vitesse dans le champ volcanique des Virunga [9].

Vp (km/s)	5,40	6,40	6,85	7,69	7,96	8,00
Top of the layer (km)	0,0	4,0	32,0	39,0	43,0	47,0

Les épicentres des séismes ainsi déterminés, leur mise sur carte se faite en GMT.

La fréquence coin a été déterminée sous le logiciel SEISAN dans la composante de l’analyse spectrale des séismes [24]. La caractérisation de cette fréquence a été catégorisée suivant les séquences séismiques importantes produites lors de cette activité volcanique, comme les essaims séismiques. Cependant, tous les formats INGV (twf ou wf) de données séismiques ont été transformés en format « seisan » pour uniformisation de la base de données afin de travailler. Ceci a facilité aussi l’analyse des tremors volcaniques sélectionnés sur différentes stations. La variation des énergies dégagées estimées sous RSAM a été manipulée sous Matlab partant des scripts de [25].

3 RÉSULTATS

Avant l’éruption du Nyamulagira 6 Novembre 2011, 219 et 196 séismes (Figure 6) ont été enregistrés le 4 et 5 Novembre 2011 respectivement, soit deux jours avant la dite éruption.

Peu de séismes à courte période (type A) ont été observés, excepté dans l’essai du 4 Novembre 2011.

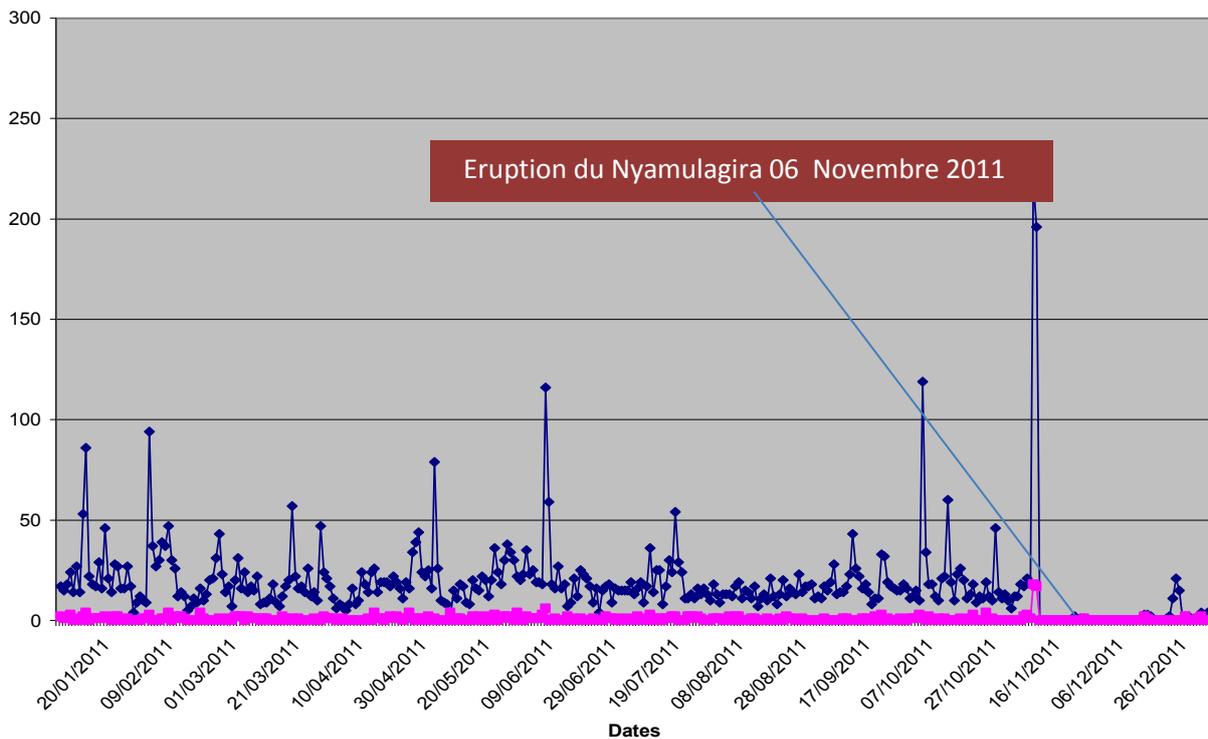


Fig. 6: Nombre de séismes volcaniques (longue et courte périodes) par jour entre Janvier et Décembre 2011. La couleur bleu représente les séismes Longue période (type B, C et Hybrides) et la couleur rose les séismes courtes périodes ou de type A.

La variation des séismes courtes périodes (type A) n’est pas percevable dans la figure 6. Les séismes longues périodes (Types B et Hybrides, surtout ces derniers) ont caractérisés cette activité volcanique jusqu’à l’éruption. Les séismes hybrides présents dans les essaims par exemple du 04 et 05 novembre 2011, caractérisent à la fois une fracture sous l’édifice volcanique et une dynamique des fluides magmatiques [35]. Entre Juin et Octobre 2011 il y a observation d’une grande

diminution de la sismicité longue période (Figure 6) et une petite croissance en mi – Octobre 2011. Ces différentes séquences montrant une chute et une augmentation de la sismicité, montrent bien une variation de la dynamique magmatique du Nyamulagira en 2011.

La figure suivante montre une variation des énergies libérées sous RSAM entre Juillet et Novembre 2011. Un fort changement commence en Octobre lorsque la courbe cumulée de ces énergies commence à croître et pour une forte détection des événements (Figure 7). Un grand taux de croissance énergétique s'est manifesté deux mois avant l'éruption (Figure 7).

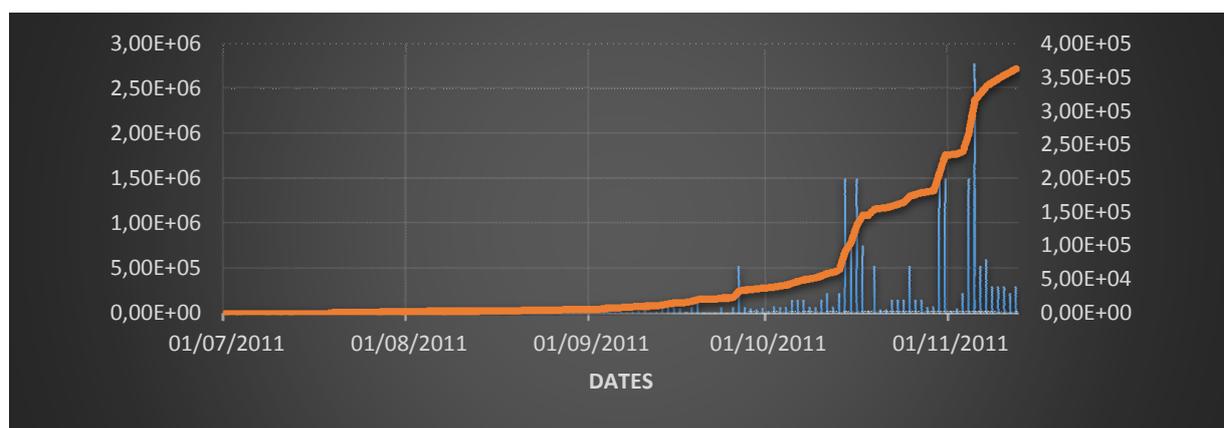


Fig. 7 : Énergies libérées par les séismes volcaniques par RSAM entre Juillet et Novembre 2011. La couleur orange représente l'énergie cumulée et les barres en bleu les détections énergétiques des événements sismiques.

Une constance en énergie est observée dans la courbe cumulée (Figure 7) entre Juillet et Septembre 2011 et une croissance lente commence en Septembre et Octobre 2011. Une ascension magmatique est alors observée entre Septembre et Novembre 2011 par corrélation de la migration des séismes vers des profondeurs comprises entre 0 et 5 Km (Figures 8 et 9).

Cependant, les profondeurs des séismes longues périodes ont été déterminées entre 10 et 30 Km entre Janvier et Mars 2011, environ 10 mois avant l'éruption du Nyamulagira 2011 (Figure 8). Ces séismes profonds sont éparpillés, alors qu'entre Avril et Juin une migration systématique a été observée vers les faibles profondeurs et vers le lieu de l'éruption (Figure 8). Ce phénomène continue jusqu'en Septembre 2011 et début Novembre 2011 (Figure 9). Cependant, une reconfiguration des épicentres se concentre plus vers le lieu éruptif. Ces épicentres ont été à des profondeurs mixtes (faibles et profondes) juste deux jours avant l'éruption au mois de Novembre 2011 (Figure 9).

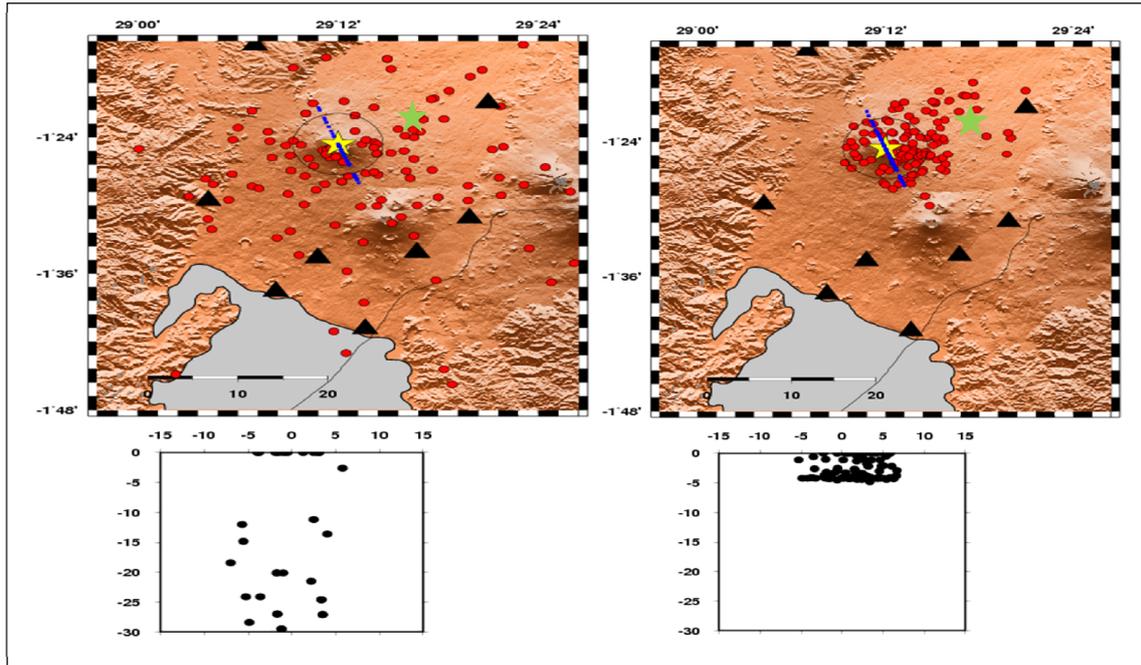


Figure 8 : Distribution des Hypocentres (épicesentres et foyers ou profondeurs des séismes volcaniques) des séismes de longues périodes (Types B, C et Hybrides) entre Janvier et Mars 2011 (gauche) et ceux d'Avril à Juin 2011 (droite), avant l'éruption du 06 Novembre 2011. Etoiles vertes représentent le lieu éruptif du Nyamulagira 06 Novembre 2011.

Depuis Avril jusqu'à Octobre 2011, les événements ont été localisés à faible profondeurs plus au moins concentrés autour du cratère du Nyamulagira. De même aux mois de Septembre et Novembre 2011 la majorité des séismes ont été localisés entre 0 et 5 Km (Figures 9). Certains essais sismiques localisés à très forte profondeurs autour de 10 – 30 km (Figures 8 et 9) seront dus probablement à une intrusion magmatique en profondeur. Et ceux localisés à des faibles profondeurs confirmeraient une intrusion magmatique avec un déplacement notable.

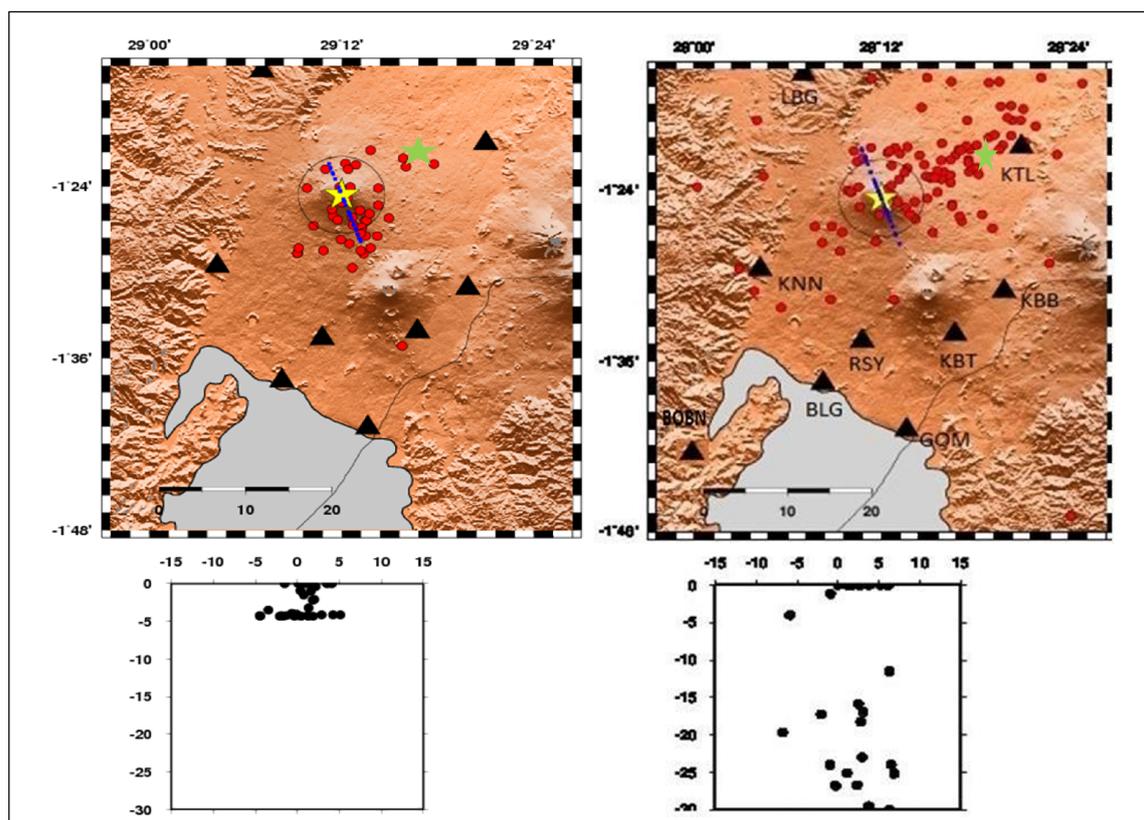


Fig. 9 : Distribution des Hypocentres des séismes de longues périodes observés entre Septembre et Novembre 2011 (gauche) et au mois de Novembre 2011 (droite). Les séismes au mois de Novembre sont plus du type Hybride et volcano – tectonique (type A). Les séismes sont superficiels. Etoiles vertes représentent le lieu éruptif du Nyamulagira 06 Novembre 2011.

Les épïcètres de séismes hautes fréquences ou séismes résultant de cassure au courant du mois de Novembre 2011 ont été superficiels et ont confirmés la direction de la fissure ébranlée. Il ressort certes, que 10 mois avant cette éruption la sismicité a été profonde avec quelques cas isolés des séismes superficiels. Cette sismicité a été essentiellement caractérisée par les séismes de longues périodes ou faible fréquences (type B et C).

L'activité de tremors volcaniques associée à cette éruption dénote une particularité pour la station GOMA. Les observations des tremors volcaniques ont montré deux types de période prédominante; soient $6,6 \leq T_o \leq 10,8$ secondes ayant une grande amplitude au Mont Goma plusieurs mois avant et pendant l'éruption du Nyamulagira du 06 novembre 2011. Elle a été par contre de courte période $1 \leq T_o \leq 6,3$ secondes à la station de KBB, RSY et BLG. Aucune évolution temporelle de ces périodes n'a été observée avant, pendant et après l'éruption. Les grandes amplitudes des tremors volcaniques ont été enregistrées plusieurs mois avant l'éruption alors que leur diminution s'observa juste après le début de l'éruption, soit le 07 Novembre 2011.

Pendant la période allant de Janvier 2011 jusqu'à Novembre 2011 une variation de la fréquence coin a été observée dans certains essais sismiques. Pour ce faire les séquences du 09 et 29 Janvier 2011 ont les fréquences coin comprises entre 1 à 2,8 Hz; et 1 à 1,3 Hz, respectivement.

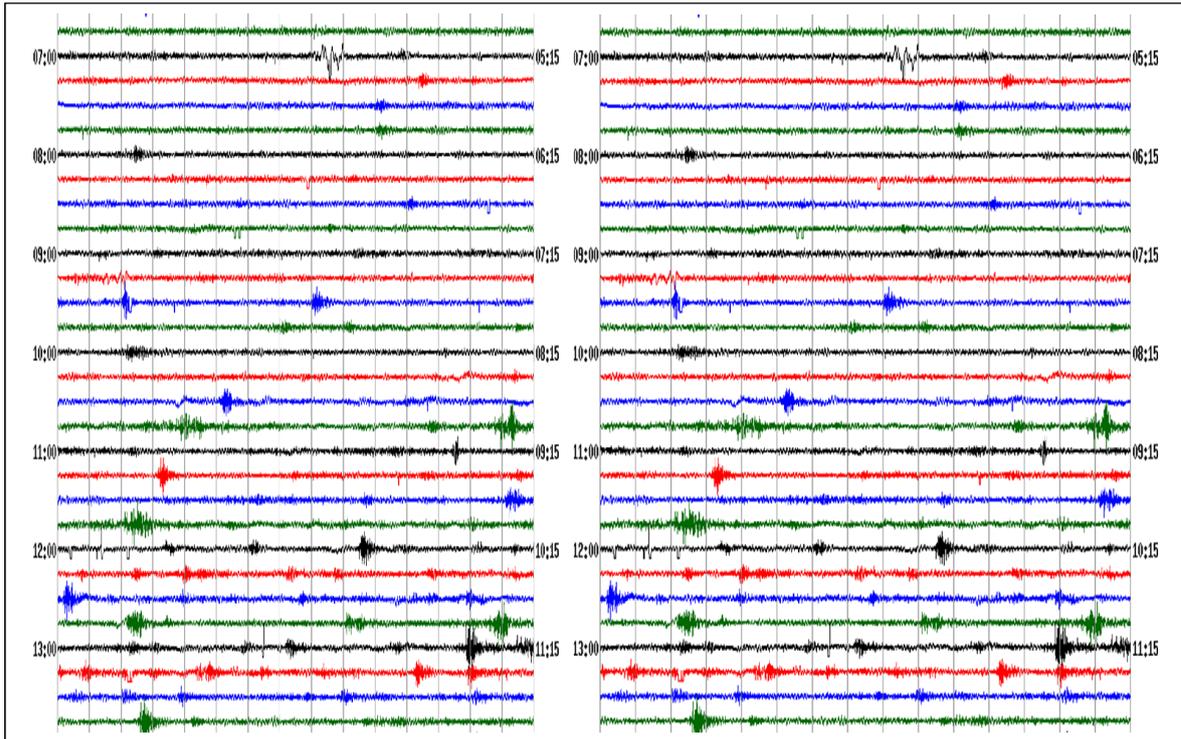


Fig.10 a : Exemples des sismogrammes (séismes longues périodes) : essai du 29 Janvier 2011 (gauche) avec une fréquence coin entre 1 et 1,3 Hz ; et celui du 30 Septembre 2011 (droite) avec des fréquences coin comprise entre 1,5 et 7,3 Hz.

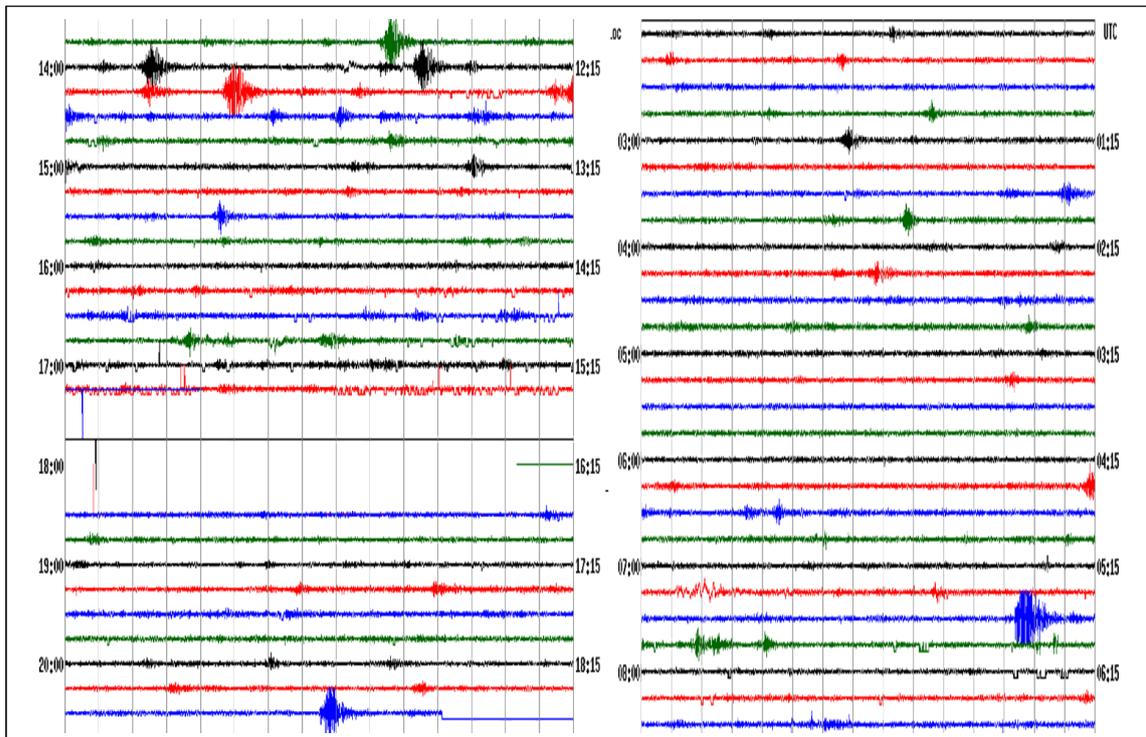


Fig.10b : Exemples des sismogrammes (séismes hybrides et types A) pour les essais du 04 (gauche) et 05 (droite) Novembre 2011 avec des fréquences coin comprise entre 1 et 7.4 Hz et de Septembre 2011 (droite) avec des fréquences coin comprise entre 3,8 et 9,2 Hz, respectivement.

Une bande fréquentielle de 1 à 1,5 Hz a été observée dans l'essai du 30 juillet 2011. Cependant, l'essai du 30 Septembre 2011 se caractérise par une fréquence coin de 1,5 à 7,3 Hz (Figure 10a). Le mois d'Octobre se détermine aussi par l'estimation des grandes fréquences coins (1,7 à 8,2 Hz) dans ses essais. Une fréquence coin de 1,7 à 8,3 Hz se manifeste le 01 Novembre 2011. Les essais du 04 et 05 Novembre sont caractérisés respectivement par des fréquences de 1 à 7,3 Hz et 3,7 à 9,5 Hz (Figure 10b). Cette variation de la fréquence coin dans les essais a été suivie de l'éruption du 06 Novembre 2011 qui a commencée à 17h55' TU.

4 DISCUSSION

Les essais séismiques ont été observés et tous n'ont pas accompagnés l'éruption du Nyamulagira 2011. Les essais séismiques représentent probablement une intrusion magmatique à faible profondeur (Figures 8 et 9), mais certains séismes dans l'essai et ceux accompagnant l'éruption en Novembre 2011 ont été profonds (10 et 30 Km). Ce qui confirme une intrusion magmatique en profondeur. La variation du nombre de séismes également observée dans la figure 6 illustre aussi bien un changement dans l'activité du volcan. Certes, [26] pense que la croissance du nombre de séismes serait une possible conséquence du mouvement magmatique vers le haut ou vers la surface.

La migration des hypocentres des essais séismiques associés à l'activité volcanique est considérée comme étant un des grands indicateurs de la propagation des magmas ([27], [28]). Cependant comme nous le constatons dans les figures 8 et 9, la migration des hypocentres donne certains détails sur cette activité éruptive. D'une manière générale la sismicité associée à l'activité volcanique du Nyamulagira 2011 fut essentiellement superficielle, soit entre 0 et 5 Km de profondeur. Les séismes LP profonds sous les édifices volcaniques sont souvent associés à la présence du magma et corrélient avec l'activité éruptive [29]. Alors la localisation de ces séismes entre 10 et 30 Km sous le volcan Nyamulagira en Janvier – Mars 2011 fut le signe de la mise en place du magma qui doit ainsi remonter quelques mois après, soit d'Avril jusqu'en Novembre 2011. C'est alors une zone de faible vitesse [9] et de fusion partielle (Figure 7). Les séismes profonds au mois de Novembre 2011 coïncident également avec le lieu de cette éruption et proche de l'ancienne zone de fracture due à l'éruption de 1989. Ces observations sont supportées par celles faites par [29] pour certains volcans et [30] dans le champ volcanique de Taipei en Taïwan. Les essais séismiques enregistrés entre Avril et Octobre 2011 s'avèrent être superficiels (0 - 5 Km), soit 7 mois avant l'éruption de 2011 ; ces familles de séismes superficiels pourraient être générées par le passage du magma dans le conduit volcanique. C'est ce qu'observa également [31] au volcan Popocatepetl au Mexique.

Partant des figures 10a et b; l'analyse de la variation de la fréquence coin, montre une spécification dans les séquences séismiques dues à l'activité volcanique depuis le début du cycle éruptif jusqu'à l'éruption qui a eu lieu le 06 Novembre 2011. Ainsi du point de vue géodynamique, les valeurs de fréquence coin allant de 1 à 2,6 Hz observées depuis le début du cycle éruptif (mois de Janvier 2010) jusqu'au mois de Mars 2011, correspondraient à un glissement le long des fractures existantes sous l'édifice volcanique pendant le mouvement magmatique. C'est donc un mouvement magmatique en profondeur (Figure 7) et correspondant à une zone de faible vitesse due à la fusion partielle (Figure 5) [9]. Par conséquent cette période correspondrait donc à une intrusion en magma en profondeur et remplissage des fractures. C'est donc la confirmation de la présence du magma à grandes profondeurs [32].

Par contre depuis Avril jusqu'à Novembre 2011, les événements ont migré pour atteindre une profondeur comprise entre 0 et 5 Km sous l'édifice volcanique du Nyamulagira. Ces événements séismiques présentent cependant une forte fréquence coin (1,5 – 8 Hz). L'énergie cumulée estimée sous RSAM présente une allure croissante à partir du mois de Septembre 2011, avec des événements localisés entre 0 et 5 Km de profondeur. Au mois de Novembre 2011, les événements profonds et superficiels sont localisés mais avec une fréquence coin comprise entre 1,7 et 9,3 Hz. Ces hautes fréquences coin sont caractérisées par les séismes de type A et longues périodes mais avec prédominance des séismes de type Hybride. Cependant, cette période d'Avril à Novembre 2011 correspondrait à la fois au mouvement magmatique vers la surface et une fracturation des zones de faiblesse. D'autre part, d'après [33] les séismes hydrides pouvaient être caractérisés par les hautes fréquences coin qui témoigneraient la cassure sèche tandis que les basses fréquences sont celles due à une rupture faible de la fracture (Figure 10a). Ceci confirme l'intrusion de la chambre magmatique (~ 5 Km, [9]) à partir de la profondeur et une fracturation qui se révèle par une énergie élevée (Figure 7) et une haute fréquence coin (Figure 10b) et un taux de sismicité (Figure 6) également élevé.

5 CONCLUSION

Une observation sur la sismicité précédant l'éruption du volcan Nyamulagira en Novembre 2011 a été faite et quelques aspects caractéristiques ont été décelés. Il ressort que les séismes de longue période (types B, C et Hybrides et tremors volcaniques) ont été plus observés que les séismes de type A. Cette sismicité a été cependant plus caractérisée par les séismes hybrides surtout à l'approche de l'éruption et les événements ont été superficiels. Environ 10 mois avant, la sismicité était très profonde (10 – 30 Km) avec des événements des faibles fréquences coin témoignant la présence magmatique, la fusion partielle ou encore l'intrusion magmatique sans déplacement notable.

Un mouvement magmatique se dénonce entre Avril et Novembre 2011 vers les profondeurs comprises entre 0 et 5 Km avec des événements sismiques de hautes fréquences coin. Cette période correspond à une intrusion magmatique vers la surface, une fracturation de la zone de faiblesse. Les derniers essais du 04 et 05 Novembre 2011 ont été à hautes fréquences coin et plus énergétiques avec présence des séismes profonds et superficiels. Les séismes hybrides caractérisant cette période constituent à la fois le témoin du mouvement magmatique suivant le chemin déjà préparé aux mois d'Avril – Octobre 2011 et aussi une cassure sèche dans la zone de fracture existante comme les séismes de type A.

Il est cependant clair que les éléments comme le nombre de séismes ou taux de sismicité, la variation des hypocentres, de la fréquence coin et de l'énergie, pourraient être des bons indicateurs de l'évolution de l'activité magmatique du volcan Nyamulagira. Un approfondissement de ces paramètres sur plusieurs cycles éruptifs faciliterait la connaissance de la dynamique magmatique du volcan Nyamulagira et aussi l'approche prédictives de ses éruptions.

REFERENCES

- [1] N. Lukaya, M. Ciraba, T. Mavonga, and M. Wafula, Main Pattern of Waveforms observed in the Virunga Volcanic Zone, Western Rift Valley of Africa. *Tectonophysics*, 209, 261-265, 1992.
- [2] T. Mavonga, S. Kavotha, N. Lukaya, O. Etoy, J. Durieux, Seismic activity prior to the May 8, 2004 eruption volcano Nyamuragira, Western Rift Valley of Africa. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355 – 360, 2006.
- [3] B.K. Rusangiza., Mavonga T., Lesage P., Kavotha K.S., Wafula M., Lukaya N, Ciza A.,. About Swarms of Long – Period Earthquakes at Volcano Nyamuragira of the Virunga Region, Western Rift Valley of Africa (D.R. Cong. *Geographica Pannonica*. Volume 16, Issue 1, 10-17 (March 2012). ISSN 0354-8724 (hard copy) ISSN 1820-7138 (online), 2012.
- [4] K. Tanaka and H. Hamaguchi, Spatial distribution of volcanic tremors in and around Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira *Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira: Geophysical Aspects, Tohoku University, Sendai, Japan, 1983.*
- [5] Berg Ed., et Janssen, Th., Microséismes et Séismes précédant l'éruption du Nyamulagira - Kitzimbanyi (Afrique Centrale) 1958. (O. d. internationale, Éd.) *Bulletin Volcanologique (IUGG) , série II, Tome XXIII, pp. 63 – 78, 1960.*
- [6] M. Wafula et M. Bagalwa., Classification des Séismes dans la Région des Virunga suivant leurs Fréquences observées. *Mus. roy. centr., Tervuren (belg), Dépt. Géol., Min. Rapp. Ann. 1997 & 1998, 299 – 308, 1999.*
- [7] N.Zana, M.Kamba, S.Katsonga, T. Janssen, Recent seismic activity of the Kivu Province, Westesrn Rift Valley of Africa. *Phys. Earth Planet, Inter., 58, 52 – 60, 1989.*
- [8] Wafula M., D. Atiamutu et M. Ciraba., Activité Séismique dans les Virunga (Rép. Dém. Congo), liée aux éruptions du Nyiragongo et du Nyamuragira, de Novembre 1994 à Décembre 1996, *Mus. roy. centr., Tervuren (Belg), Dépt. Géol., Min. Rapp. Ann. 1997 & 1998, 309-299 – 308, 1999.*
- [9] T. Mavonga, N. Zana, R.J. Durrheim, Studies of crustal structure, seismic precursors to volcanic eruptions and earthquake hazard in the eastern provinces of the Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences* 58, 623–633, 2010b. doi:10.1016/j.jafrearsci.2010.08.008.
- [10] J-C Komorowski et al., The January 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 Vulcanologica*, Vol. 14 (1 -2), 27 – 62, 2003.
- [11] C. Wauthier, V. Cayol., F. Kervyn., and N. d'Oreye, Magma sources involved in the 2002 Nyiragongo from an InSAR analysis. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, B05411, doi:10.1029/2011JB008257, 2012.
- [12] M. Kasahara and N. Zana, L'activité Eruptive Récente des volcans Nyiragongo et Nyamuragira. dans *Les Recherches Géophysiques des Volcans Nyiragongo et Nyamuragira. CRSN, pp. 7- 17, Mai1989.*
- [13] H. Hamaguchi, N. Zana, K. Tanaka, M. Kasahara, M. Mishina, S. Ueki, S. S. Katsongo and K.Tachibana, Observations of Volcanic earthquakes and Tremors at Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira in the Western Rift Valley of Africa. (In H. Hamaguchi, Éd.) *Tôhoku Geophys. Journ. Sci. Rep. Tôhoku Univ., ser. 5, 29(1), 41 – 56, 1982.*

- [14] B. S. Fiama, M. Wafula, M. Kasereka and D. Damien, Seismic activity prior the Nyamuragira eruption of November 06, 2011 observed at Lwiro station, *Cahiers du CERUKI, Numéro Spécial Alphonse Byamungu Nakahazi (2014)*, pp. 1-13, en presse.
- [15] S. Hayashi, M. Kasahara, K. Tanaka, H. Hamaguchi, Major elements chemistry of recent eruptive products from Nyamuragira volcano, Africa (1976 1989), In: Hamaguchi, H. (Ed.), *Geophysical Study on the Hotspot Volcanoes in the African Continent*. Publ. Faculty of Science, Tohoku University, Sendai, Japan, pp. 83–87, 1992.
- [16] H. Hamaguchi and N. Zana, Introduction to volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira. In H. Hamaguchi, (Éditeur), *Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira, Geophysical Aspects*, Tohoku University, Sendai, Japan. pp. 309 – 3019, 1983.
- [17] K. Tanaka, Seismicity and Focal mechanism of the Volcanic Earthquakes in the Virunga Volcanic Region. (In H. Hamaguchi, Éd.), *Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira: geophysical Aspects*, Tohoku University, Sendai, Japan. pp.19 – 28, 1983.
- [18] A. Miller, R. Stewart, R. White, R. Lockett, B. Baptie, W. Aspinall, J. Latchman, L. Lynch, and B. Voight, Seismicity associated with dome growth and collapse at the Soufriere hills volcano, montserrat. *Geophysical Research Letters*, 25:3401–3404, 1998.
- [19] M.D. Wafula, N. Zana, M. Kasereka and H. Hamaguchi, The Nyiragongo Volcano: A Case Study for the Mitigation of Hazards on an African Rift Volcano, Virunga Region, Western Rift Valley, [Online] Available: http://iugggeorisk.org/presentations/pdf/Wafula_volcano_Africa.pdf. (2011).
- [20] M.D. Wafula, H. Hamaguchi and B.S. Fiama., Temporal Variation of Seismicity Pattern Related to Nyamulagira Eruptions 1991 and 2006. *Cahiers du CERUKI, Nouvelle série 41*, pp. 256 – 266, 2012.
- [21] S.K. Kavotha, T. Mavonga, J.Durieux, K. Mukambilwa, Towards a more detailed seismic picture of the January 17th, 2002 Nyiragongo eruption. *Acta Vulcanologica* 15, 87–100, 2003.
- [22] S. Ueki, Recent Volcanism of Nyamuragira and Nyiragongo. In H. Hamaguchi (Editor), *Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira: Geophysical Aspects*. Tohoku University, Sendai, Japan, 7 – 18, 1983.
- [23] M. Kasahara, H. Shintaro, M. Seto, K. Tanaka, Hamaguchi H., Zana N., Kamba M., and Katsongo S., L'Eruption Fissurale du Nyamuragira - Kitatsungulwa de 1986. In H. Hamaguchi, (Éditeur), *Volcanoes Nyiragongo and Nyamuragira, Geophysical Aspects*, Tohoku University, Sendai, Japan. pp. 18 – 26, 1989.
- [24] Havskov, J. and L. Ottemöller, editors. SEISAN: The earthquake analysis software for Windows, SOLARIS, LINUX and MACKINTOSH Version 8.2. Manual, Department of Earth Science, University of Bergen, Norway, 2008.
- [25] Lesage Philippe, Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals, *Computers & Geosciences* **35**, 2137–2144, 2009.
- [26] A. Fadeli, Volcanic Earthquakes at Merapi (Central Java) During the java Dome Building beginning in October 1986, in *Volcanic Seismology* (P. Gaspérni, R. Scarpa and K. Aki, Eds), IAVCEI Proceedings in Volcanology 3, pp. 62 -73, 1992.
- [27] Y. Morita, S. Nakao and Y. Hayashi, A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismology data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula, Central Japan, *J. Geophys. Res. – Solid Earth*, 111 (B6), 2006.
- [28] T.L. Karpin and C.H. Thurber, The relationship between earthquake swarms and magma transport: Kilauea volcano, Hawaii, *Pure App. Geophys.*, **125**, 971 – 991, 1987.
- [29] M.L. Nichols, S.D. Malone, S.C. Moran, W.A. Thelen, J.E. Vidale, Deep long-period earthquakes beneath Washington and Oregon volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **200**, 116–128, 2011.
- [30] Kim Kwang-Hee, C. H Chang, K-F Ma1, J-M Chiu and K-C Chen, Modern Seismic Observations in the Tatun Volcano Region of Northern Taiwan: Seismic/Volcanic Hazard Adjacent to the Taipei Metropolitan Area; *TAO*, Vol. 16, No. 3, 579-594, August 2005.
- [31] J.M. Espindola, A. Zomora – Camacho and Z. Jiménez, Earthquakes families in the seismicity of Popocatépetl volcano, *Geofisica International*, Vol. 44, Num. 2, pp. 169 – 176, 2005.
- [32] W. Matsubara et al., Distribution and characteristics in waveform and spectrum of seismic events associated with the 2000 eruption of Mt. Usu, *Journal of Volcanology and Geothermal research*, **136**, 141 – 158, 2004.
- [33] R.M. Harrington and E.E. Brodsky, Volcanic hybrid earthquakes that are brittle – failure events. *Geophysical Res. Lett.*, Vol. 34, L06308, doi: 10.1029/2006GL028714, 2007.
- [34] T. Mavonga, S. K. Kavotha, N. Lukaya, O. Etoy, W. Mifundu, K. B. Rusangiza, J. Durieux, Some aspect of seismicity prior the 27 November 2006 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**, 829-832, 2010a.
- [35] J. Lahr, B. Chouet, C. Stephens, J.Power, and R. Page, Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment : implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at redoubt volcano, alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62 (1-4) :137–151, 1994.