

Université
de Liège



gembloux
agro bio tech



Evaluation des risques liés aux coulées des laves du Nyiragongo. " Cas de la fracture principale de Munigi" (République Démocratique du Congo).

Promoteur : Professeur Hans-Balder Havenith.

Co- Promoteur : Docteur Nicolas d'Oreye.

Co- Promoteur : Monsieur Benoit Smets.

Travail de fin d'études présenté par

MUHINDO SYAVULISEMBO Adalbert.

Pour l'obtention du diplôme

**Master complémentaire en Gestion des
risques naturels**

Année académique 2012 - 2013

REMERCIEMENTS.

Il m'aurait été impossible d'en venir à bout tout seul, au terme de ce travail, nous tenons à formuler nos remerciements:

Professeur Hans-Balder Havenith, malgré ses multiples occupations n'a pas cessé de nous encadrer et nous encourager pour l'aboutissement meilleur de nos recherches ;

Docteur Nicolas d'Oreye, pour son souci de vouloir promouvoir la main d'œuvre locale, en nous tenant la main depuis 2005 jusqu'à ce jour et d'avoir suivi la réalisation de ce travail ;

Monsieur Benoit Smets, pour les échanges extrêmement enrichissants, mais aussi pour les conseils, les encouragements et sa disponibilité à tous les niveaux de la réalisation de ce travail ;

Aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail ;

Professeur Pierre Ozer à travers lui nous adressons nos remerciements à tous les enseignants (ULg, Gembloux et Arlon) pour tout leur investissement dans notre formation ;

Monsieur Paluku Katso, Chef de division de la mairie de Goma, sans ses maîtrises des limites administratives des quartiers de la ville de Goma, la production de la couche des quartiers ne pouvait être possible ;

La famille (Kyalumba Marungu Bahikya) pour avoir supporté notre absence pendant cette période d'études, particulièrement à notre épouse Rachel Kahindo S. qui a consenti d'énormes sacrifices et nous a soutenu;

Mes collègues de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG), qui m'ont apporté quotidiennement une franche collaboration, en particulier le Directeur Général de l'OVG, Dr. Katcho Karume, dont les encouragements nous ont marqués positivement ;

Mes collègues de promotion GRN 2012-2013 qui ont su rendre l'année plus agréables,

A tous ceux qui de près ou de loin nous ont soutenus pendant cette période nous disons : merci à tous !

TABLE DES MATIERES.

LISTES DES FIGURES.....	3
LISTE DES GRAPHIQUES	4
LISTES DES TABLEAUX.....	4
ABREVIATIONS.	5
Abstract.	7
1 INTRODUCTION.....	8
1.1 Contexte de l'étude.....	8
1.2 Hypothèses de l'étude.	8
1.3 Délimitation du sujet.	9
1.4 Utilisation des résultats de recherches.....	9
1.5 Etudes des risques associés aux coulées de lave du Nyiragongo.	10
2 LE VOLCAN NYIRAGONGO.	11
2.1 Le rift est-africain.....	11
2.2 Localisation du volcan Nyiragongo.....	12
2.3 La coulée de lave du Nyiragongo du 10 janvier 1977.....	13
2.4 La coulée de lave du Nyiragongo du 17 janvier 2002.....	14
3 ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES D'ENTRÉE DE VORIS 2.0.1.....	16
3.1 Présentation du modèle VORIS 2.0.1.....	16
3.2 Paramètres d'entrée et nomination des sorties.	16
3.3 Paramètre "sortie de coulée de lave".	18
3.4 Paramètre "longueur de coulée de lave".....	19
3.5 Paramètre "nombre d'itérations".	21
3.6 Paramètre "épaisseur de la coulée de lave".	23
3.7 Paramètre "Modèle Numérique de Terrain".....	25
4 VALIDATION DU MODELE VORIS SUR LES COULEES DE LAVE DU NYIRAGONGO. 28	
4.1 Paramètres de configuration du modèle.	28

4.2	Validation de la coulée de 2002 du volcan Nyiragongo avec SRTM1.....	29
4.3	Aléa coulée de lave sur le flanc sud du volcan Nyiragongo.....	31
5	EVOLUTION DE LA VULNERABILITE LIEE AUX COULEES DE LAVE DANS LA VILLE DE GOMA.	33
5.1	Les facteurs d'évaluation de vulnérabilité dans la ville de Goma.	33
5.2	Les quartiers de la ville de Goma face au scénario 1.	33
5.3	Les quartiers de la ville de Goma face au scénario 2.	36
5.4	Facteurs influents sur la vulnérabilité en la ville de Goma.	38
5.4.1	Aspect démographique.	38
5.4.2	Dynamique du développement urbain à Goma.	41
5.4.3	Les explosifs face aux coulées de lave dans la ville de Goma.	42
6	DISCUSSIONS	44
7	CONCLUSIONS.....	45
	BIBLIOGRAPHIE	47

LISTES DES FIGURES

Figure 1:	Carte structurale simplifié du rift est-africain.....	11
Figure 2 :	La chaîne des Virunga et le flanc sud du volcan Nyiragongo.....	12
Figure 3:	Alignement des cônes du Nyiragongo.	13
Figure 4:	Lac de lave dans le cratère du Nyiragongo.....	13
Figure 5:	panache de gaz acide du volcan Nyiragongo.....	13
Figure 6:	Les coulées de lave du volcan Nyiragongo 1977 et 2002.....	15
Figure 7:	Paramètres de VORIS 2.0.1. pour une simulation numérique de coulées de lave.....	17
Figure 8:	Probabilités d'invasion de coulées issues du point d'émission A pour différents paramètres de longueur (L1 à L12).....	19
Figure 9:	Simulations I à X de coulée issues du point A avec respectivement 10, 50, 100, 500, 1.000, 5.000, 10.000, 50.000, 100.000 et 500.000 itérations.....	21
Figure 10:	Probabilités d'invasion de coulées issues du point d'émission A pour différents paramètres d'épaisseur de coulée (h1 à h8 : de 1 a 8m).....	23

Figure 11: Probabilités d'invasion de coulées issues du point d'émission A pour différents Modèles Numériques de Terrain (S1, S2 et S3).....	25
Figure 12: A: srtm1- astr GDM et B: srtm1-srtm3.....	26
Figure 13: Scenario 1:	29
Figure 14: Scenario 2.	31
Figure 15: Classification de la vulnérabilité dans les quartiers de la ville de Goma (scénario 1).....	33
Figure 16: Classification de la vulnérabilité dans les quartiers de la ville de Goma (scenario 2).....	36
Figure 17: Expansion de la ville de Goma de 2008 à 2013 face aux scenarios 1 et 2.....	41
Figure 18: A: distribution des stations à Goma et le scenario 1 et B : distribution des stations à Goma et le scenario 2.....	43

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1: Sensibilités du paramètre longueur.	20
Graphique 2: Sensibilités du paramètre "nombre d'itérations".	22
Graphique 3: Sensibilités du paramètre "épaisseur de la coulée de lave".	24
Graphique 4: Sensibilités du paramètre "MNT".....	26
Graphique 5: Classification des pixels de la région de Goma suivant le scenario 1.	30
Graphique 6: Classification des pixels des quartiers de la ville de Goma en zones affectes et non affectées par la coulée de lava de 2002.	34
Graphique 7: Classification des pixels des quartiers de Goma suivant du scenario 1 en zones d'aléa faible, moyen, élève, très élèves et non affectées.....	36
Graphique 8: Classification des pixels des quartiers de Goma suivant le scenario 2.....	38
Graphique 9: Modélisation de la croissance de la population de la ville de Goma de 1997 à 2012 basée sur l'estimation de la population en 2006 et 2012.....	40

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I: Sensibilités du paramètre de longueur.	20
Tableau II: Sensibilité du paramètre "nombre d'itérations".	22

Tableau III: Sensibilités du paramètre "épaisseur de la coulée de lave"	24
Tableau IV: Sensibilités du paramètre "MNT"	26
Tableau V: Six points de sortie de lave sur la fracture de Munigi	28
Tableau VI: Comparaison du scénario 1 et la coulée de 2002.	30
Tableau VII: Classification des pixels du scénario 2.	31
Tableau VIII: les endroits (représentés par des pixels) de la ville de Goma dévastés par la coulée de lave de 2002.....	34
Tableau IX: Les pixels de la ville de Goma dévastés par le scénario 1.....	35
Tableau X: Les pixels de la ville de Goma dévastés par le scénario 2.....	37
Tableau XI: Répartition des populations de Goma en 2006, 2009 et 2012.....	39
Tableau XII: Les pixels de la surface bâti dévastés par le scénario 1 ou 2.	41
Tableau XIII: LIE et LES de quelques produits.....	43

ABREVIATIONS.

Aster GDEM: Aster Global Digital Elevation Model.

CNRS : Centre National des Recherches Scientifiques.

GPS: Global Positioning System.

IGN: Spanish National Geographical Institute.

LES : limite supérieure d'explosion.

LIE : limite inférieure d'explosivité.

OVG: Observatoire Volcanologique de Goma.

SIG : Systèmes d'Information Géographiques.

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission.

RAM: Random Access Memory.

R.D.C : République Démocratique du Congo.

VORIS : Système d'Information des Risques Volcaniques.

Résumé.

L'évaluation et la gestion des risques volcaniques sont des problèmes scientifiques, économiques et politiques importants, particulièrement dans des zones très peuplées menacées par les volcans (Felpeto et al., 2007). La ville de Goma (R.D.C.), avec plus de 700 000 habitants, fait face de façon permanente à la menace du volcan Nyiragongo, un volcan très actif situé à seulement 15 km au nord de la ville. Cette ville située à la frontière avec le Rwanda, ne cesse de croître, tant spatialement que démographiquement, ce qui ne fait qu'accroître les risques liés à l'activité volcanique.

En 1977 et 2002, le Nyiragongo est entré en éruption. Les coulées de lave de ces deux éruptions ont sérieusement affecté Goma et les villages environnants. La sécurité des populations et de leurs biens face à ces coulées de lave est essentielle pour l'existence pacifique de l'homme dans les Virunga.

Le but de ce travail est de contribuer à l'évaluation des risques liés aux coulées de lave en cas d'une éruption du volcan Nyiragongo par la fracture principale de Munigi.

Des méthodes d'évaluation et de gestion des risques volcaniques existent pour renforcer la sécurité des populations menacées par des coulées de lave volcaniques.

Parmi ces méthodes, nous avons utilisé le Système d'Information des Risques Volcaniques (VORIS) réalisée dans l'Observatoire Géophysique Central de l'IGN (Spanish National Geographical Institute).

Le travail exploite des Modèles Numériques de Terrain : SRTM1, SRTM3 et Aster GDEM dans le modèle VORIS 2.0.1.

Nous voulons que ce travail soit apprécié pour avoir choisi efficacement dans les trois modèles numériques de terrain (SRTM1, SRTM3, Aster GDEM); celui qui est acceptable pour les travaux des simulations des coulées de lave dans VORIS 2.0.1; d'avoir analysé la sensibilité des paramètres d'entrées de VORIS 2.0.1 et reporté par SIG les différentes simulations des coulées de lave pour évaluer les risques liés aux coulées de lave du volcan Nyiragongo qui éventuellement sortirait par la fracture principale de Munigi. Ces scénarios associés à d'autres facteurs pourront faciliter de dégager un ensemble cohérent d'un protocole de gestion des risques liés aux coulées de lave du volcan Nyiragongo pour la prédiction et la gestion efficace des crises et la promotion de développement durable dans la ville de Goma.

Pour mieux faire à l'intention des gestionnaires des risques et des générations à venir et pour faciliter des réponses appropriées compatibles avec les différents scénarios, nous avons donc constitué les prémices de calibrage et des probabilités de dévastation de la ville de Goma par les laves du volcan Nyiragongo.

Abstract.

The evaluation and the management of volcanic risk are important scientific, economic and political questions, particularly in very populated zones threatened by volcanoes (Felpeto et al., 2007). Goma city (DRC), with more than 700 000 inhabitants, faces in a permanent way the natural risks bound to the impressive presence of the volcano Nyiragongo located only 15 km to the North of the city. This city situated close to the border with Rwanda, does not stop increasing, spatially and demographically, what enhances also the risks related to the volcanic activity.

In 1977 and 2002, Nyiragongo erupted. The lava flows of these two eruptions have seriously affected the Goma and its periphery. The safety of the populations and their goods are essential for the peaceful existence of the man in Virunga.

The purpose of this work is to contribute to the risk assessment to the lavas in case of an eruption of the volcano Nyiragongo by the main fracture of Munigi.

Methods of evaluation and management of volcanic risks exist to strengthen the security of the populations threatened by lava flows. Among these methods, we used the Information system of the Volcanic Risks (VORIS) created by the Monitoring Observatory Geophysics Exchange of the IGN (Spanish National Geographical Institute). The work was done with the digital elevation models: SRTM1, SRTM3 and Aster GDEM in VORIS.

We want that this work is appreciated for having chosen effectively among the three elevation models (SRTM1, SRTM3, Aster GDEM) the one which is acceptable for the works of lava flow simulations in VORIS 2.0.1; to have analyzed the sensitivity of entries parameters of VORIS 2.0.1 and translated in a GIS the various simulations of lava flows to estimate the risks of lava flows from the Nyiragongo volcano which possibly would erupt from the main fracture of Munigi. The scenarios associated with other factors can facilitate to release a coherent set of a protocol of management of risks bound to the invasion of lava of the volcano Nyiragongo for the prediction and the crisis management and the promotion of sustainable development in Goma city.

To help the work of the risks managers and the future generations and to facilitate compatible appropriate answers with the various scenarios, we thus established the beginnings of calibration and probabilities of devastation of Goma city by the lavas of Nyiragongo volcano.

1 INTRODUCTION.

1.1 Contexte de l'étude.

Le cratère principal du volcan Nyiragongo (3470 m), qui contient un lac de lave permanent, est situé à environ 15km des villes de Goma (République Démocratique du Congo) et Gisenyi (République du Rwanda). La ville de Goma (700 000 habitants), chef lieu de la province du Nord Kivu en République Démocratique du Congo est bâtie sur un champ des laves de ce volcan. En 1977 comme en 2002, le Nyiragongo a déversé ses laves sur son flanc Sud par un réseau de fractures qui s'est ouvert principalement sur son flanc sud. Les coulées de lave de ces deux éruptions ont causé la mort des plusieurs centaines des personnes (Komorowski et al., 2004 ; Durieux, 2004).

De par sa proximité avec une zone densément peuplées, les éruptions fissurales fréquentes et la présence d'un lac de lave pouvant se déverser sur ses pentes en des longues coulées de lave, la ville de Goma fait face de façon permanente aux risques liés aux coulées de lave du volcan Nyiragongo.

L'éruption de 2002 a réactivé les fissures de 1977 (Komorowski et al., 2004 ; Favalli et al., 2008), elle a en plus prolongé ces fissures près et même dans la ville de Goma (Komorowski et al., 2004). L'extension vers le sud du système de fractures est un des scénarios les plus probables pour une éruption future du Nyiragongo (Tedesco et al., 2002; Allard et al., 2002).

La ville de Goma connaît actuellement une expansion, tant démographique que dimensionnelle, qui accroît la vulnérabilité de la population et de l'économie locale face à ce genre d'éruptions. Barrena, (2009) note une croissance continue des menaces sociales, économiques et environnementales à Goma.

1.2 Hypothèses de l'étude.

Les catastrophes naturelles enfreignent à la réussite du développement. Lors d'une éruption volcanique, les investissements sont anéantis et les souffrances humaines accablent la communauté. Il est essentiel de savoir que la façon d'atténuer les effets liés aux coulées de lave passe par la compréhension du volcan et par la prise de conscience de la population menacée.

Grâce aux activités de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) appuyés par ses partenaires scientifiques (Musée national d'histoire Naturelle du Luxembourg, Musée

Royale d'Afrique Centrale, Université de Naples, etc.), il est possible d'anticiper les effets néfastes de la prochaine éruption en déterminant les zones susceptibles de servir de bouches éruptives.

Notre hypothèse est qu'il existe dans la région de Goma des zones à risques face aux coulées de lave du volcan Nyiragongo qui sortiraient éventuellement des zones bien définies, en l'occurrence de la fracture qui a servi de bouche éruptive en 1977 et 2002.

1.3 Délimitation du sujet.

Plusieurs scénarios sont possibles en cas d'éruption du volcan Nyiragongo et généralement la gestion des risques volcaniques couvre la période avant la catastrophe, pendant la crise et après la catastrophe.

Notre travail se limite à :

- analyser la sensibilité des paramètres de VORIS 2.0.1 pour son utilisation dans les Virunga ;
- classer en cinq zones (zone d'aléa très élevé, zone d'aléa élevé, zone d'aléa moyen, zone d'aléa faible et zone en dehors de l'aléa) la région de Goma face aux laves qui partiraient des points identiques à ceux des éruptions de 1977 et 2002 ; et
- évaluer l'évolution de la vulnérabilité due à l'expansion de la ville de Goma.

1.4 Utilisation des résultats de recherches.

Notre travail a pour but premier d'apporter des éléments de réponse à ce que représenterait, comme risque de coulées de lave, une nouvelle éruption du Nyiragongo similaire à celles de 1977 et 2002.

De manière pratique, l'apprentissage du modèle de simulation VORIS 2.0.1, ainsi que l'étude des qualités et des limites de celui-ci servira à l'Observatoire Volcanologique de Goma pour 1) estimer rapidement l'impact potentiel de nouvelles coulées de lave en cas de nouvelle éruption et 2) réaliser des études d'aléas qui, dans une perspective à plus long terme pourront aider à mieux planifier l'urbanisation de Goma et à organiser des plans d'évacuation adéquats de la ville.

En outre, ces évaluations ne sont valables que pour le cas de coulées de lave issues de la fracture de Munigi. Si lave venait à sortir de points différents, les cartes d'aléa seraient sans doute différentes de façon significative.

1.5 Etudes des risques associés aux coulées de lave du Nyiragongo.

Le volcan Nyiragongo préoccupe la Communauté Scientifique tant nationale qu'internationale en raison des menaces qu'il fait peser sur plus d'un million d'habitants principalement logés dans les villes de Goma et de Gisenyi.

Pour réduire les risques liés au volcan Nyiragongo, des équipements constitués essentiellement des sismographes, des GPS, des inclinomètres, des capteurs de températures, des spectrophotomètres et des stations météorologiques sont installés dans la région des Virunga pour permettre aux scientifiques de comprendre l'activité du volcan Nyiragongo et d'informer la population sur son état sous réserve que la décision finale en cas de crise reste à l'Autorité Politico-Administrative en relation avec un plan de contingence.

Chirico et al., (2009) a proposé la construction des barrières pouvant permettre de réduire significativement les risques des coulées de lave dans la ville de Goma. Par ailleurs, la canalisation des laves peut faire l'objet de plusieurs revendications, surtout dans une région où les relations frontalières sont difficiles et la solution proposée ne tient pas compte du fait que les fractures éruptives pourraient se prolonger plus loin dans la ville.

Avant l'éruption du 17 janvier 2002 du volcan Nyiragongo, la population de Goma a ressenti des tremblements de terre. Les épencentres de ces séismes précurseurs, qui ont commencés 312 jours avant l'éruption étaient principalement groupés entre le Nyiragongo et le nord du Lac Kivu. Cette zone épacentrale coïncide avec la zone la plus fracturée pendant l'éruption de 2002. (Kavotha et al., 2004).

Komorowski et al., (2004) décrit une série des fractures qui s'étaient ouvertes en 2002 sur le flanc sud du volcan Nyiragongo et ont déclenché un drainage d'un stock d'environ $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ de magma jusque dans le Lac Kivu. Cet auteur note en plus que l'éruption de 2002 aurait réactivé les fissures de 1977 et les auraient prolongé jusque dans la ville même. Du coup, les barrières proposées par Chirico et al., (2009) restent discutables par le fait que les laves peuvent sortir en aval des murs de protection.

2.2 Localisation du volcan Nyiragongo.

La province des Virunga est située entre le bassin du Lac Edouard au nord et le bassin du Lac Kivu au Sud (Smets, 2007). Elle comporte huit grands édifices volcaniques à savoir Muhabura (4127m), Gahunga (2474m), Sabinyo (3647m), Visoke (3711m), Karisimbi (4507m), Mikenko (4437m), Nyamulagira (3058m) et le Nyiragongo (3470m) (Komorowski et al., 2003). Le début de l'activité des Virunga remonte au Miocène supérieur (Poucllet, 1977), actuellement le Nyiragongo et Nyamulagira restent actifs (Durieux. 2004b ; d'Oreye et al., 2012).

Le volcan Nyiragongo est situé dans le Parc National des Virunga qui fait partie du patrimoine mondial depuis 1979 (<http://whc.unesco.org/fr/list/63>, visité 27/06/2013).

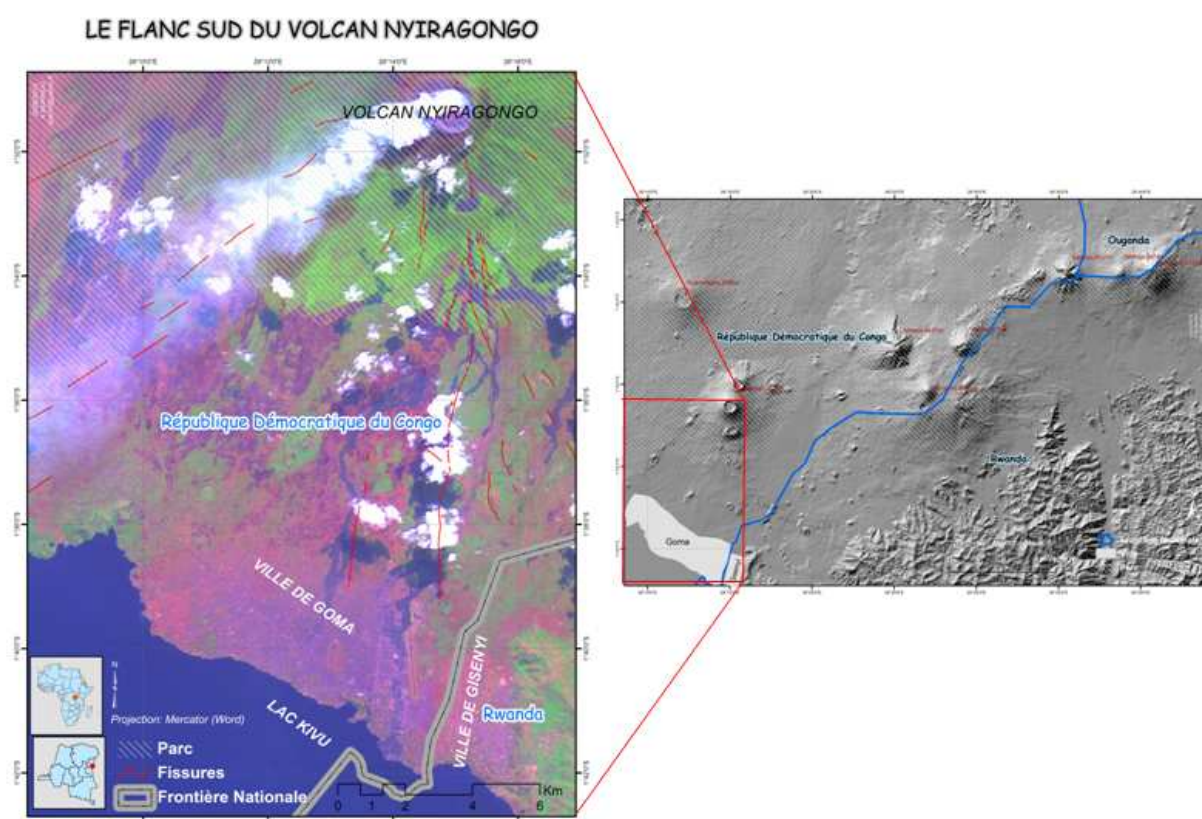


Figure 2 : La chaîne des Virunga et le flanc sud du volcan Nyiragongo.

Le volcan Nyiragongo dispose d'un cratère central d'environ 1200 mètres de diamètre et de deux secondaires latéraux, le Baruta au nord et le Shaheru au sud. De par sa proximité avec une zone densément peuplée, ses éruptions fréquentes, son flanc sud fortement fissuré et la présence d'un lac dans son cratère, le Nyiragongo est classé parmi les volcans les plus actifs et dangereux d'Afrique (Tazieff et al. 1977).

de Goma à la partie nord de la province du Nord Kivu fut coupée. Le nombre très élevé des victimes est la conséquence de la grande vitesse de lave, de sa fluidité et de l'émission des coulées près des zones habitées. A ce moment, la population locale ignorait tout d'une coulée de lave et de ses capacités dévastatrices (Tazieff, et al., 1977; Durieux, 2004b).

L'éruption de 1977 a drainé complètement le lac de lave, toutes les plates-formes avaient disparu et la profondeur était de près de 800m (Poucllet, 1973).

2.4 La coulée de lave du Nyiragongo du 17 janvier 2002.

La structure du lac de lave dans le cratère est réapparue 5 ans après l'éruption de 1977 et fut qualifiée de commencement d'une nouvelle phase d'activité (Tazieff, 1984).

Le 17 Janvier 2002, l'éruption commence vers 8h25, heure locale à travers une série de fissures sur le flanc Sud du volcan Nyiragongo (Komorowski et al., 2004; Kavotha et al., 2004). On le considère d'être une des plus grandes éruptions des siècles récents affectant une ville habitée par plus de 500 000 personnes (Chirico et al., 2009).

Après l'éruption, la ville de Goma a été divisée en trois parties par deux coulées de lave, qui selon (Komorowski et al., 2004) ont dévasté presque 15 % du centre-ville et ont laissé plus de 100 000 sans abri. Un petit volume de lave est entré dans le Lac Kivu, mais n'avait eu aucune conséquence significative sur les gaz enfuit profondément dans le Lac Kivu (Komorowski et al., 2004). Cette éruption était vraisemblablement due à un mouvement tectonique qui a fracturé le flanc sud du volcan, soutirant environ $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ de magma en forme d'une coulée de lave complexe (Komorowski et al., 2004 ; Kavotha et al., 2004). On estime de 70 à 100 le nombre de personnes tuées et les fractures de 1977 se sont prolongées près et même dans la ville de Goma (Komorowski et al., 2004).

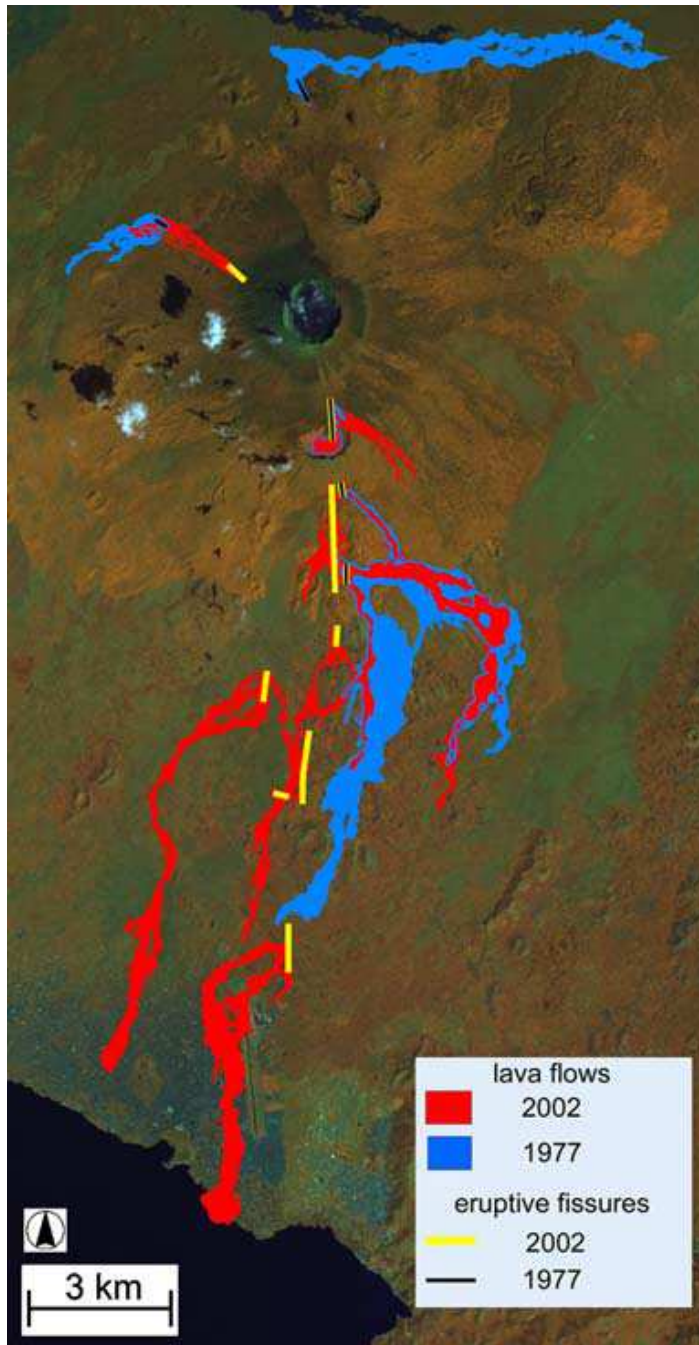


Figure 6: Les coulées de lave du volcan Nyiragongo 1977 et 2002 (Favalli et al., 2009)

Plus de 400 000 habitants de Goma ont dû évacuer la ville (Komorowski et al., 2004) et se sont réfugiés les uns vers Bukavu, les autres qui constituaient la majorité, au Rwanda voisin où des camps de déplacés ont été installés à la hâte.

Malgré les risques, deux jours après, la majorité d'entre eux fut rapidement retournée à Goma pour essayer de retrouver les débris de leurs maisons détruites par le volcan (Komorowski et al., 2003).

Les investigations de Favalli et al., (2009) ont montré que des éruptions volcaniques possibles qui pourront avoir lieu au cours des prochaines décennies auront probablement des caractéristiques semblables à celles de 1977 et de 2002, qui étaient très semblables l'un de l'autre.

3 ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES D'ENTRÉE DE VORIS 2.0.1.

3.1 Présentation du modèle VORIS 2.0.1.

L'évaluation des risques volcaniques est extrêmement complexe parce qu'il peut impliquer des phénomènes différents dont la coulée de lave, les pyroclastiques, les retombées des cendres, les tremblements de terre, les glissements des terrains, les inondations etc.

D'un point de vue scientifique, un progrès considérable a été fait pendant les dernières années par le développement des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et les réalisations des modèles informatiques de plus en plus puissants permettant le développement des bases de données de vulnérabilité et le protocole d'évaluation des risques (Felpeto et al., 2007).

Par ailleurs, un modèle est une réduction ou une simplification de son sujet puisque certains aspects du système sont omis. Il est ainsi construit pour comprendre le système qu'il représente et doit pouvoir être utilisé pour répondre à des questions sur le système modélisé. (Kühne, 2006)

Sous l'environnement de SIG, VORIS (Système d'Information des Risques Volcaniques) nous fournit des cartes de probabilité d'invasion de lave. Le modèle VORIS a été principalement utilisé pour élaborer des cartes des risques volcaniques pour l'île de Tenerife (Espagne). Sa version actuelle, VORIS 2.0.1, développée à l'Observatoire Géophysique Central de l'IGN (Spanish National Geographical Institute), permet d'une façon rapide de fournir une évaluation des dangers pour des programmes de réduction des risques et une planification territoriale. VORIS peut simuler des retombées des cendres, des coulées de lave et des courants de densité pyroclastique (Felpeto, 2009).

3.2 Paramètres d'entrée et nomination des sorties.

Pour une estimation des probabilités d'invasion de coulées de lave, VORIS exige le choix des cinq paramètres. Ces paramètres sont essentiellement des constantes durant une simulation et la caractérisent.

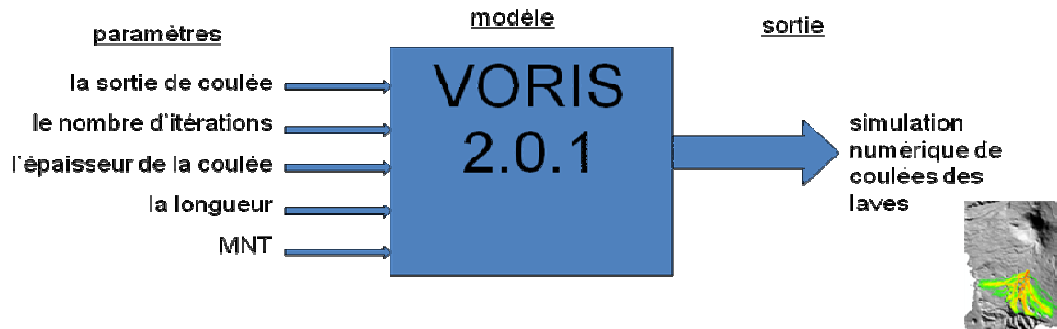


Figure 7: Paramètres de VORIS 2.0.1. pour une simulation numérique de coulées de lave.

- La sortie de coulée est la zone volcanique active d'où pourra sortir la lave d'éruptions futures. Elle peut être limitée à un conduit simple ou constitué de plusieurs bouches éruptives.
- Le paramètre de longueur et l'épaisseur de la coulée sont des entiers définis en mètres.
- Le nombre d'itérations est proportionnel aux calculs à effectuer. Pour gagner en temps de calculs et réduire le risque de saturer le microprocesseur, il est important de bien choisir le nombre d'itérations.
- Le MNT (modèle numérique de terrain) est un paramètre fondamental pour les processus de modélisation volcaniques de risques associés aux pyroclastiques, aux laves et aux flux bouées (Kervyn, 2006). Il joue un rôle majeur pour la détermination du chemin des coulées de lave (Felpeto et al., 2009). La probabilité qu'un flux de lave se propage d'une cellule à un de ses huit voisines est proportionnelle à la différence d'altitudes entre le voisin et la cellule. VORIS 2.0.1 utilise la méthode numérique de Monte Carlo qui selon Pardoux, (2006) utilise des tirages aléatoires pour réaliser le calcul d'une quantité déterministe.

Dans nos analyses, trois MNT sont utilisées: un SRTM1, un SRTM3 et un Aster GDEM. Ils diffèrent soit par leurs résolutions, soit par leurs techniques de prélèvements de données.

Le SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) a été la principale source de données d'altitude pour plusieurs applications durant ces dernières années, il est obtenu par utilisation de technique interférométrique.

Le SRTM1 a une résolution spatiale de 31m et le SRTM3 de 93m (taille de pixels). Cependant les bruits dans les SRTM varient très fortement en fonction du type de sol.

L'Aster GDEM (Aster Global Digital Elevation Model) n'est pas obtenu par interférométrie radar, mais par analyse stéréographique des paires d'images. Il est toutefois soumis à l'obstruction par la couverture nuageuse et est mieux pour une région plate où il n'y a pas des variations significatives d'altitude. L'ensemble des données Aster GDEM est publié avec une résolution de 30 m (Hormann, 2012).

Dans la suite de l'étude, nous appellerons :

- "pixels de la coulée" : le nombre des pixels effectivement couvert par la coulée vraie dont nous cherchons à reproduire les probabilités d'invasion;
- "pixels simulés" : le nombre des pixels du modèle numérique de terrain SRTM1 correspondant à la surface couverte par l'estimation d'invasion de lave;
- "pixels bien estimés" : le nombre de pixels du modèle numérique de terrain correspondant à la partie de la coulée vraie qui a été pointée par la simulation ;
- "pixels sous estimés" : le nombre de pixels du modèle numérique de terrain correspondant à la coulée vraie et qui n'ont pas été pointés par la simulation ;
- "pixels extérieur coulée" : le nombre de pixel du modèle numérique de terrain correspondant aux pixels identifiés par le modèle mais qui n'ont pas été couverts par la coulée vraie;
- "paramètre de longueur" : paramètre d'entrée "longueur" introduit dans le modèle pour une simulation ;
- "longueur probable modélisée" : la longueur de la simulation mesurée sur l'estimation du modèle;
- "temps de calculs en minutes" : le temps en minutes que prend le modèle pour donner les résultats.

3.3 Paramètre "sortie de coulée de lave".

Compte tenu de la disponibilité des données, notre analyse n'intègre pas la définition probabiliste des sorties de lave. Sur base de la coulée de 2010 du Nyamulagira, volcan voisin immédiat du Nyiragongo et dont le paramètre point de sortie est bien connu (35S 746161/9840963), nous avons analysé la sensibilité des paramètres de VORIS 2.0.1.

Par ailleurs, dans les huit volcans qui composent la chaîne des Virunga, le Nyamulagira et le Nyiragongo sont encore actifs et l'éruption du volcan Nyamulagira du 3 janvier 2010 était sortie d'une fissure du flanc comme celles qui s'étaient passées au Nyiragongo le 10 janvier 1977 et le 17 janvier 2002.

3.4 Paramètre "longueur de coulée de lave".

En utilisant le SRTM1, le point de sortie A (35S 746161/9840963), l'épaisseur 3 m, le nombre d'itérations 5 000, les cartes suivantes relatent les variations (pixel, longueur probable modélisée) en fonction du paramètre de longueur (L1 : 1km, L2 : 5km, L3 :10km, L4 :15km, L5 :20km, L6 :25km, L7 :30km, L8 :35km, L9 :40km, L10 :45km, L11 :50km et L12 :55km).

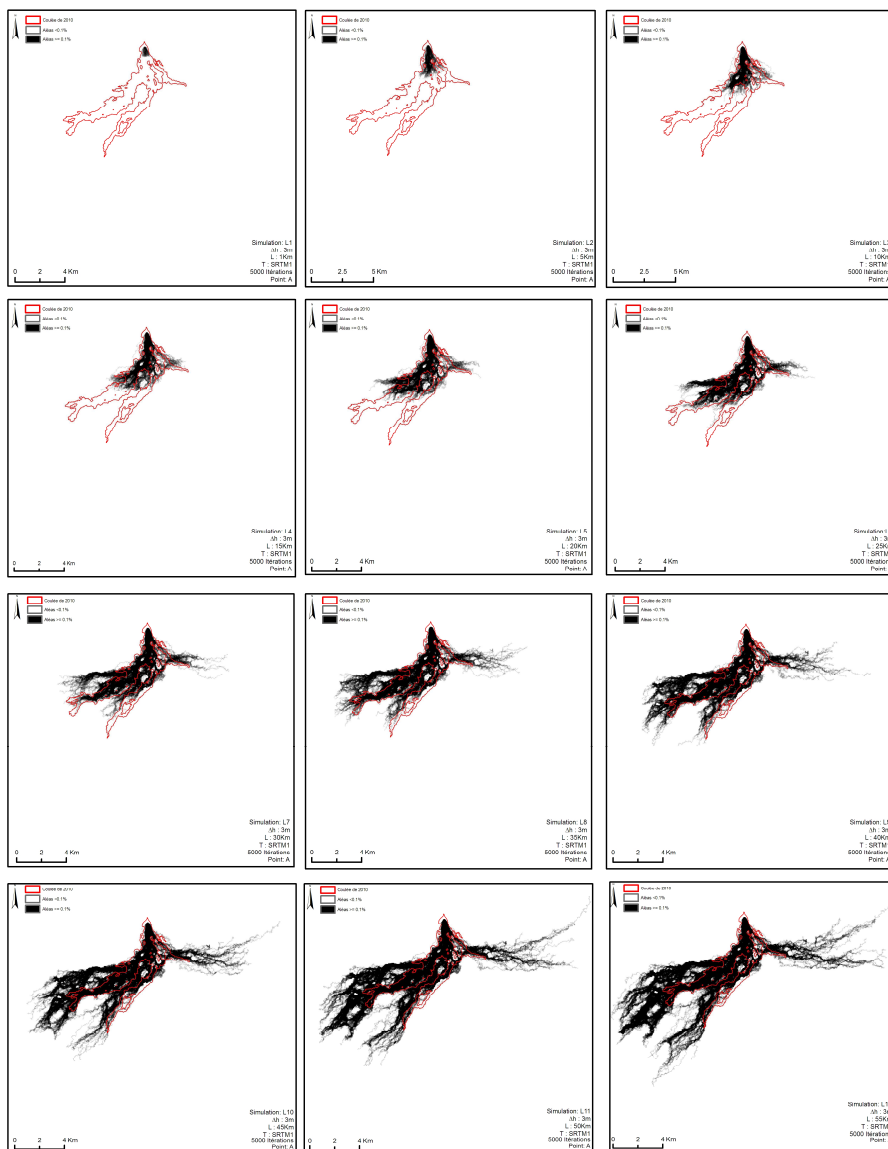
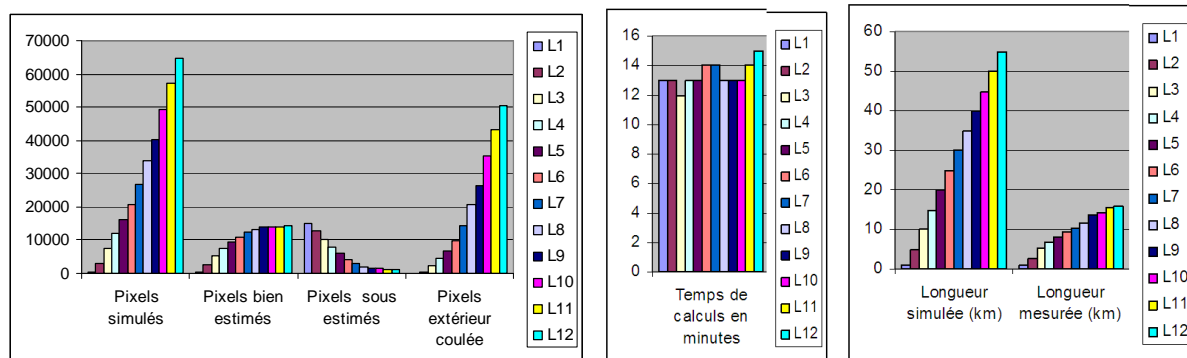


Figure 8: Probabilités d'invasion de coulées issues du point d'émission A pour différents paramètres de longueur (L1 à L12).

Tableau I: Sensibilités du paramètre de longueur.

Simulation	Pixels de la coulée	Pixels simulés	Pixels bien estimés	Pixels sous estimés	Pixels extérieur coulée	Temps de calculs en minutes	paramètre de longueur (km)	longueur probable modélisée (km)
L1	15368	477	468	14900	9	13	1	0.9
L2	15368	3186	2740	12628	446	13	5	2.7
L3	15368	7625	5260	10108	2365	12	10	5.3
L4	15368	12150	7622	7746	4528	13	15	6.9
L5	15368	16278	9340	6028	6938	13	20	8.1
L6	15368	20875	11081	4287	9794	14	25	9.4
L7	15368	26592	12478	2890	14114	14	30	10.3
L8	15368	34017	13349	2019	20668	13	35	11.6
L9	15368	40336	13806	1562	26530	13	40	13.4
L10	15368	49365	13959	1409	35406	13	45	14.3
L11	15368	57267	14078	1290	43189	14	50	15.4
L12	15368	64708	14119	1249	50589	15	55	15.9

**Graphique 1: Sensibilités du paramètre longueur.**

(de L1 à L12 simulations de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 et 55km de paramètre longueur).

De ce graphique 1 ressort que :

- un paramètre de longueur trop petit sous estime les probabilités de passage de coulées (simulation L1) et un paramètre trop long (simulation L12) estime bien le passage de la coulée mais pointe aussi là où la coulée ne passera pas car l'éruption s'arrête avant même d'atteindre cette longueur ;
- L7 (30km) et L8 (35km) ses rapprochent de la coulée du 3 Janvier 2010 ;

- aucun paramètre de longueur n'équivaut à sa longueur probable modélisée mais tous deux manifestent une croissance dès L1 à L12 ;

3.5 Paramètre "nombre d'itérations".

Les simulations de 10, 50, 100, 500, 1.000, 5.000, 10.000, 50.000, 100.000 et 500.000 itérations présentées ci-dessous ont comme paramètres communs : le modèle numérique de terrain (SRTM1), le point de sortie de coulée A (35S, 746161/9840963), l'épaisseur de lave (3 m) et le paramètre de longueur (33 km).

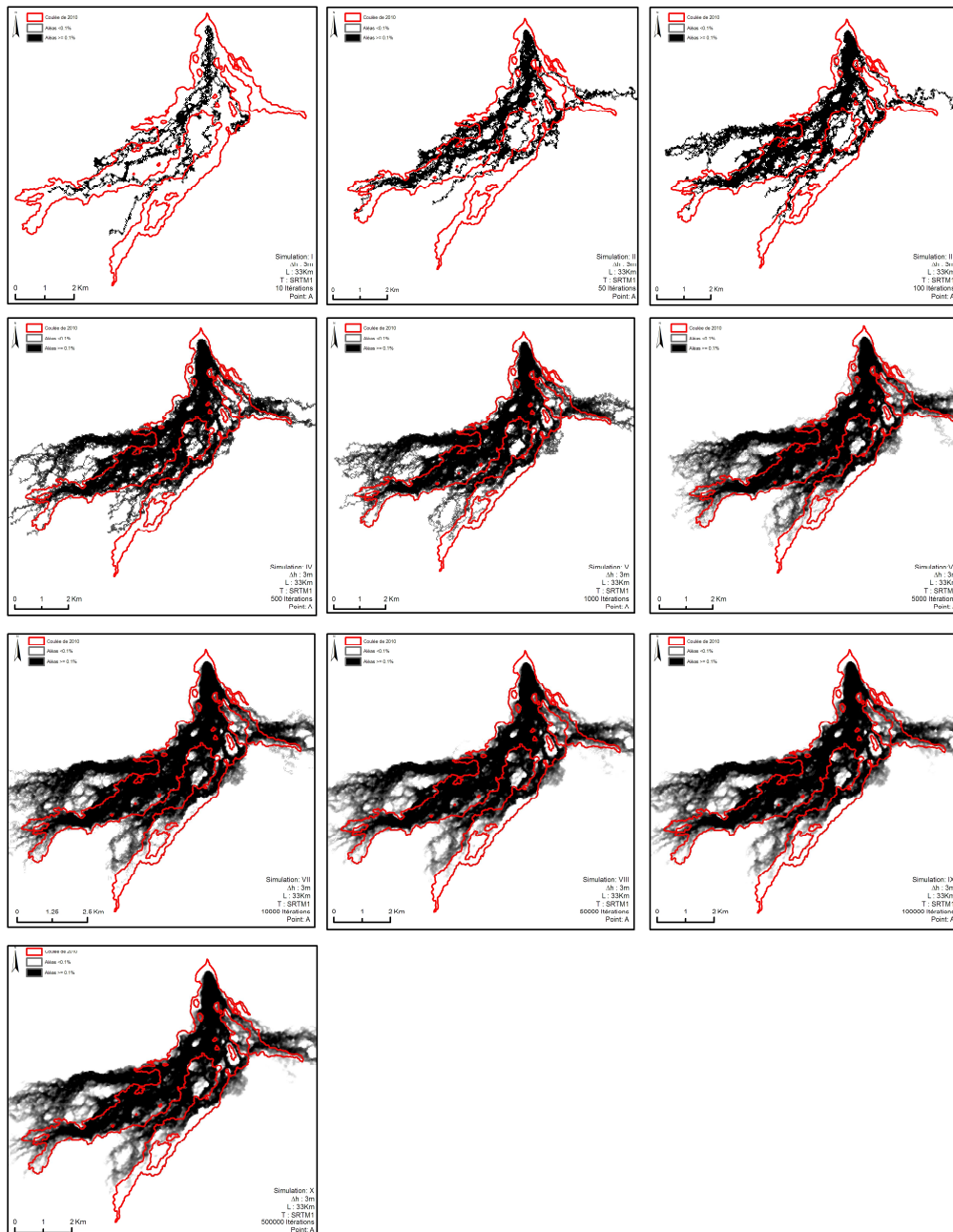
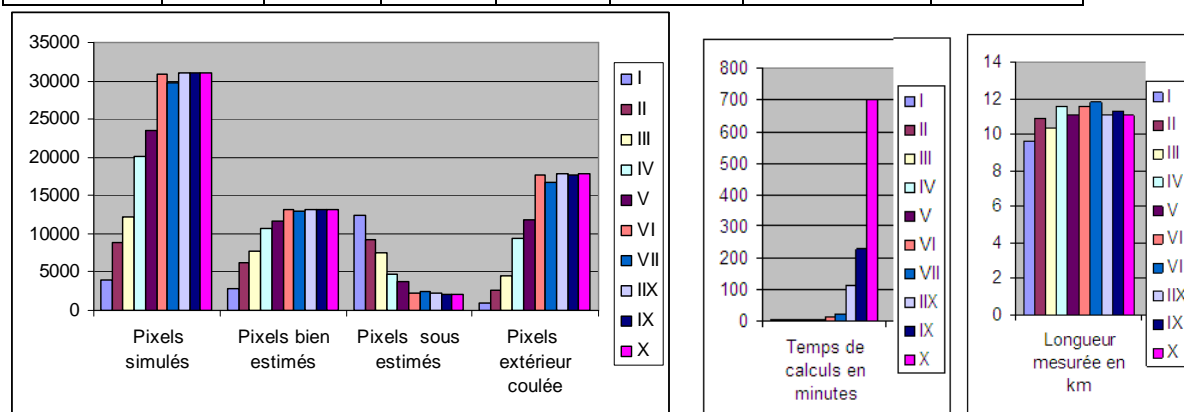


Figure 9: Simulations I à X de coulée issues du point A avec respectivement 10, 50, 100, 500, 1.000, 5.000, 10.000, 50.000, 100.000 et 500.000 itérations.

Tableau II: Sensibilité du paramètre "nombre d'itérations".

Simulation	Pixels de la coulée	Pixels simulés	Pixels bien estimés	Pixels sous estimés	Pixels extérieur coulée	longueur probable modélisée en km	Temps de calculs en minutes
I	15368	3918	2897	12471	1021	9.6	3
II	15368	8753	6203	9165	2550	10.9	3
III	15368	12227	7777	7591	4450	10.4	3
IV	15368	20054	10725	4643	9329	11.6	4
V	15368	23455	11610	3758	11845	11.1	4
VI	15368	30808	13136	2232	17672	11.6	14
VII	15368	29671	12904	2464	16767	11.8	23
IIIX	15368	31125	13202	2166	17923	11.1	110
IX	15368	30981	13215	2153	17766	11.3	228
X	15368	31125	13227	2141	17898	11.1	700

**Graphique 2: Sensibilités du paramètre "nombre d'itérations".**

(de I à X des simulations de 10, 50, 100, 500, 1.000, 5.000, 10.000, 50.000, 100.000 et 500.000 itérations).

A la vue des simulations I à X, il ressort :

- les pixels simulés, les pixels bien estimés et les pixels extérieurs à la coulée croissent en nombre de la simulation I à VI et restent plus ou moins constants de VI à X.
- la simulation VI présente le plus grand nombre des pixels bien estimés, la plus faible des pixels sous estimés et son temps de calculs est relativement faible. Mais il fait aussi partie des simulations qui ont pointées plus de 15 000 pixels à l'extérieur de la vraie coulée de lave. Le nombre d'itérations influence moins sur la longueur probable modélisée, pour les 10 simulations (dès 10 itérations à 500 000 itérations), elle reste entre 9.6 km et 11.8 km.

3.6 Paramètre "épaisseur de la coulée de lave".

Les simulations (h1 : hauteur 1m, h2 : hauteur 2m, h3 : hauteur 3m, h4 : hauteur 4m, h5 : hauteur 5m, h6 : hauteur 6m, h7 : hauteur 7m et h8 : hauteur 8m) présentées ci-dessous ont comme paramètres communs : le MNT SRTM1, le point de sortie de coulée A (35S 746161/9840963), le nombre d'itérations (5 000) et le paramètre de longueur (33km).

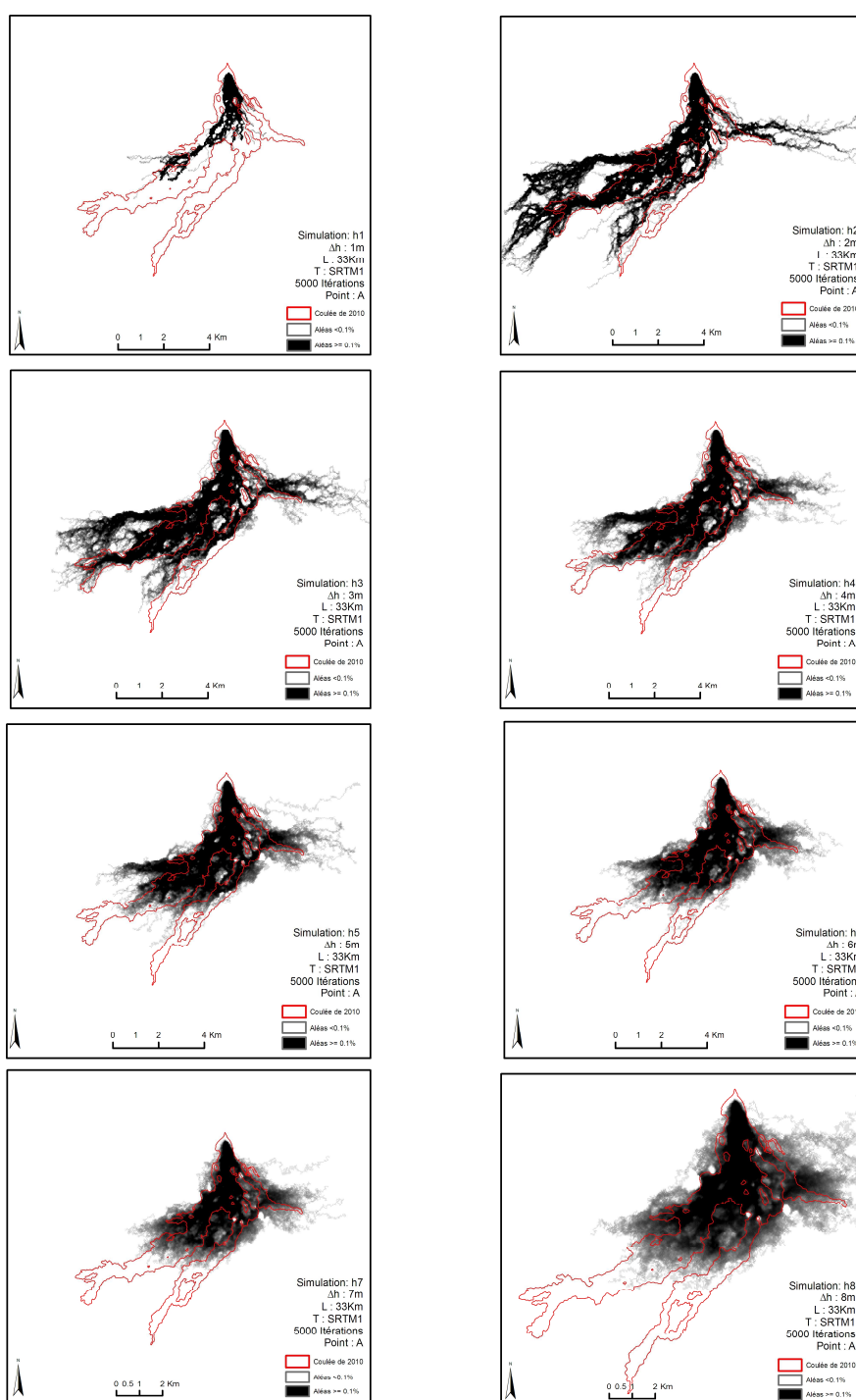
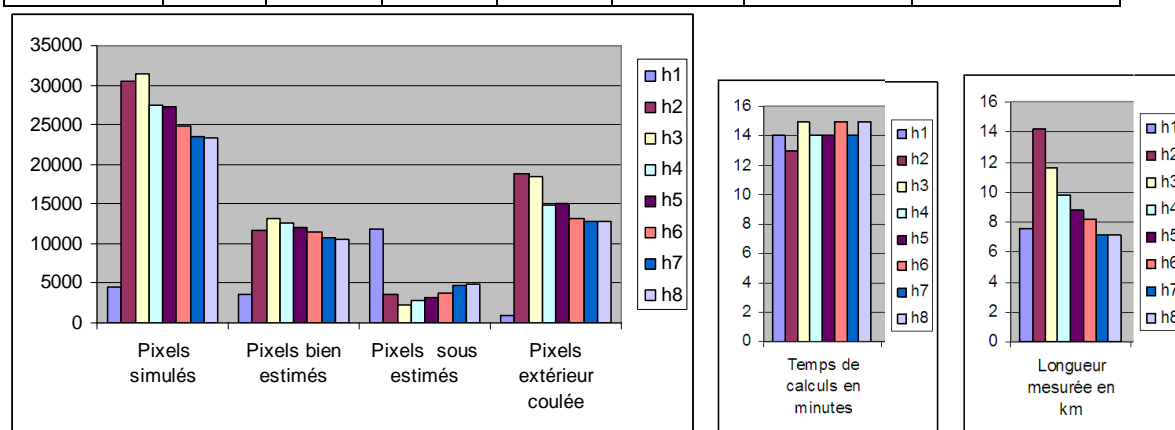


Figure 10: Probabilités d'invasion de coulées issues du point d'émission A pour différents paramètres d'épaisseur de coulée (h1 à h8 : de 1 à 8m).

Tableau III: Sensibilités du paramètre "épaisseur de la coulée de lave".

Simulation	Pixels de la coulée	Pixels simulés	Pixels bien estimés	Pixels sous estimés	Pixels extérieur coulée	Temps de calculs en minutes	longueur probable modélisée (en km)
h1	15368	4465	3511	11857	954	14	7.6
h2	15368	30449	11719	3649	18730	13	14.2
h3	15368	31503	13130	2238	18373	15	11.6
h4	15368	27442	12601	2767	14841	14	9.8
h5	15368	27199	12095	3273	15104	14	8.8
h6	15368	24782	11536	3832	13246	15	8.2
h7	15368	23470	10685	4683	12785	14	7.1
h8	15368	23337	10470	4898	12867	15	7.1

**Graphique 3: Sensibilités du paramètre "épaisseur de la coulée de lave".**

(de h1 à h8, des simulations de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 m d'épaisseur de coulée de lave).

Dans les simulations h1 à h8, on constate que :

- lorsque la valeur de "h" augmente, les effets de relief diminuent. Dans les simulations h1 à h8, les petites zones enclavées par la coulée diminuent progressivement de dimension jusqu'à être éliminées. La simulation h1 est mince, elle se trouve dans la zone de dépression (point d'altitude plus bas) et ne couvre pas toute la vraie coulée, par contre, la simulation h8 montre des débordements à l'extérieur même de la vraie coulée.
- le paramètre de longueur est fixé à 33km mais dans les huit simulations (h1 à h8) on constate que la longueur probable modélisée croît pour les simulations de h1 à h2 et décroît de h2 à h8.

- la simulation h3 présente le nombre le plus élevé des pixels simulés et des pixels bien estimés,
- la simulation h3 présente le nombre le plus faible des pixels sous estimés.

3.7 Paramètre "Modèle Numérique de Terrain".

Les simulations (S1 : SRTM1, S2 : SRTM3 et S3 : Aster GDEM) présentées ci-dessous ont comme paramètres communs le point de sortie A (35S 746161/9840963), l'épaisseur 3m, le nombre d'itérations 5000 et le paramètre de longueur 33km.

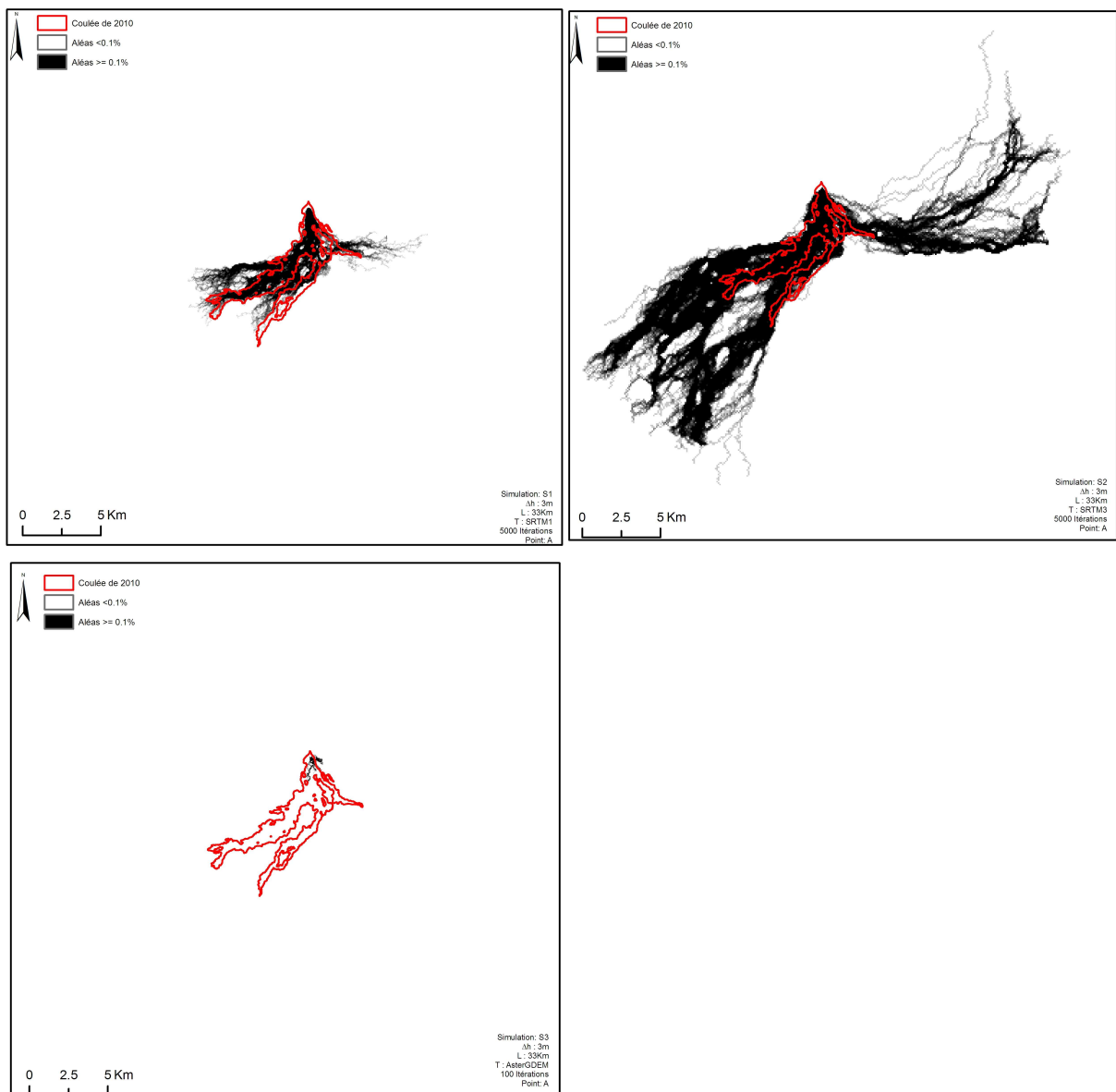
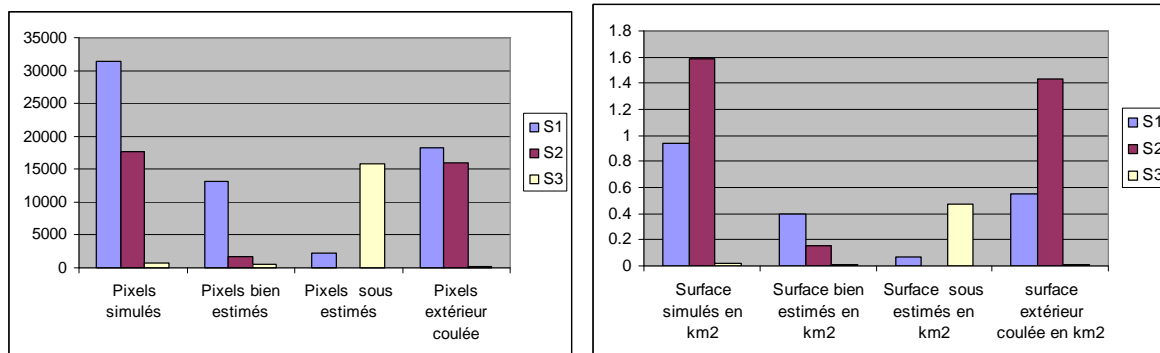


Figure 11: Probabilités d'invasion de coulées issues du point d'émission A pour différents Modèles Numériques de Terrain (S1, S2 et S3).

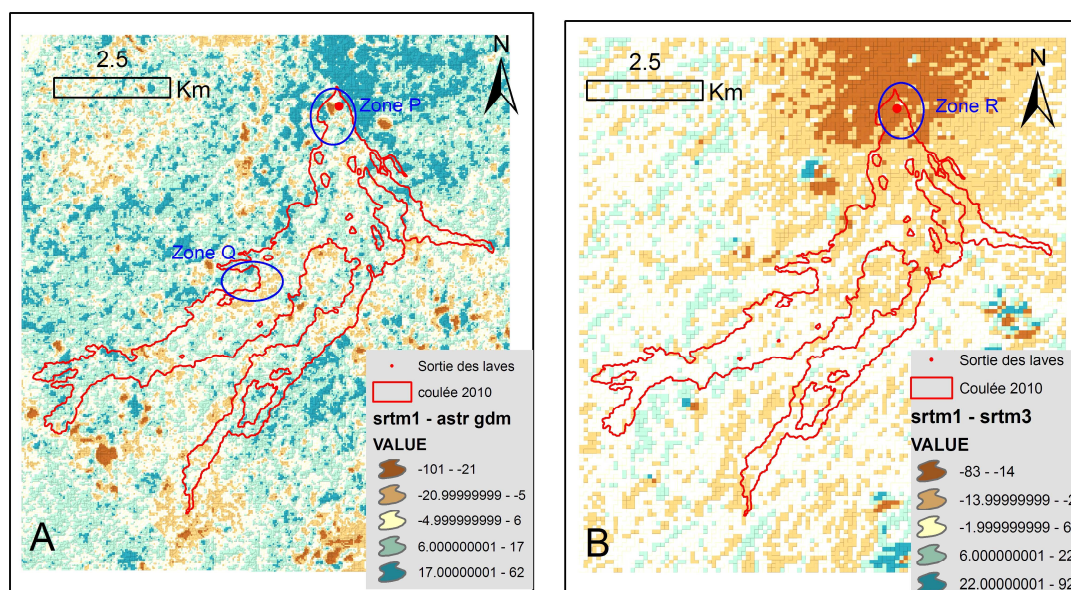
Tableau IV: Sensibilités du paramètre "MNT".

Simulation	Pixels simulés	Pixels bien estimés	Pixels sous estimés	Pixels extérieur coulée	Temps de calculs en minutes	Surface simulée en km ²	Surface bien estimée en km ²	Surface sous estimée en km ²	surface extérieur coulée en km ²
S1	31402	13094	2274	18308	14	0.9421	0.39282	0.06822	0.54924
S2	17652	1690	45	15962	9	1.5887	0.1521	0.00405	1.43658
S3	704	476	15821	228	16	0.0211	0.01428	0.47463	0.00684

**Graphique 4: Sensibilités du paramètre "MNT".**

(s1, s2 et s3 simulations correspondant respectivement au MNT : srtm1, srtm3 et aster GDM).

- L'analyse de la (Figure:11) montre que la simulation S3 est inutilisable pour notre étude. Ces désagréments peuvent être dus aux couverts nuageux,
- Bien que la simulation S2 présente le plus grand nombre des pixels simulés, plus de 80% de ses pixels sont à l'extérieur de la vraie coulée.

**Figure 12: A: srtm1- astr GDM et B: srtm1-srtm3.**

- la simulation S3 a été bloquée dans la "zone P " (Figure: 12). Il ressort de la différence entre le SRTM1 et Aster GDEM (Figure: 12.A) que devant le point de sortie, dans l'image Aster GDM, il y a une barrière à la coulée qui part du point A. Cette barrière est visible dans la (Figure: 12. A) sous forme d'une zone où la différence d'altitude entre les deux MNT est supérieur à -5m. Cette différence n'est pas visible entre le SRTM1 et le SRTM3 (Figure: 12B).
- dans la simulation S2, le MNT SRTM3 attribué au point de sortie A un niveau d' hauteur plus favorable aux écoulements "Zone R" que celui attribué par SRTM1 (simulation S1). Cette zone plus favorable aux écoulements est représentée par SRTM1-SRTM3 inférieur à -14m dans la zone R (Figure: 12B).
- dans la simulation S1 et S2, le programme a calculé des probabilités importantes de passage de lave par la "Zone Q" alors qu'en pratique aucune lave n'est passée par là. On a déduit donc qu'il doit y avoir un relief qui a bloqué les coulées dans cette direction mais que ce relief n'est pas visible sur les MNT sans doute inférieur à la résolution verticale des MNT.

4 VALIDATION DU MODELE VORIS SUR LES COULEES DE LAVE DU NYIRAGONGO.

4.1 Paramètres de configuration du modèle.

Nous avons eu l'occasion d'analyser l'influence des différentes paramètres d'entrées du modèle VORIS 2.0.1 ; Certains sont plus ou moins maitrisables (épaisseur, topographie), et d'autres sont difficilement maitrisables (paramètre de longueur, point de sortie).

Du fait qu'aucune datation et cartographie des coulées anciennes du volcan Nyiragongo ne soit disponible, seulement les coulées du 1977 et 2002 sont délimitées et peuvent être comparées à des simulations. Elles sont toutes deux sorties des fissures de l'édifice. Seul celle du 17 janvier 2002 a atteint le Lac Kivu.

Komowski et al., (2003) indiquent les différents temps d'ouverture des fissures pour l'éruption volcanique de 2002. Compte tenu de la disponibilité des données, ces temps de sorties n'ont pas été mis à profit par nos simulations. Nous avons utilisé un seul MNT alors qu'en réalité, après une séquence de coulée, la topographie change et donc la nécessité d'un nouveau MNT qui tiendrait compte de la topographie nouvelle.

Nous retenons six points de sortie localisés dans les sites éruptifs et sur la fracture de Munigi dont les paramètres de simulations sont repris dans le tableau ci après.

Tableau V: Six points de sortie de lave sur la fracture de Munigi

	Coordonnées des points de sortie	Paramètre Longueur en (km)	Epaisseur de la coulée (en m)	Nombre d'itérations
S1	35S, 748952/9832294	5	3	5000
S2	35S, 750766/9829796	3	3	5000
S3	35S, 749379/9823994	35	3	5000
S4	35S, 749804/9817895	45	3	5000
S5	35S, 750862/9824957	10	3	5000
S6	35S, 750733/9827992	30	3	5000

4.2 Validation de la coulée de 2002 du volcan Nyiragongo avec SRTM1.

Le besoin de données topographiques de haute résolution est une question générale dans toutes les recherches géohazard sur les glissements de terrain, les avalanches, les inondations et les éruptions volcaniques (Kervyn, 2006). La validation de la coulée du 10 janvier 1977 et même du 17 janvier 2002 exigerait des MNT reprenant les topographies qui ont subis ces éruptions.

Dans ce paragraphe, il est question de mettre en exergue l'idée sur les comportements des coulées de lave lorsqu'on aurait une éruption semblable à celle du 17 janvier 2002 (scenario 1). Nous avons ainsi utilisé un srtm1 de 30m de résolution correspondant à l'année 2000.

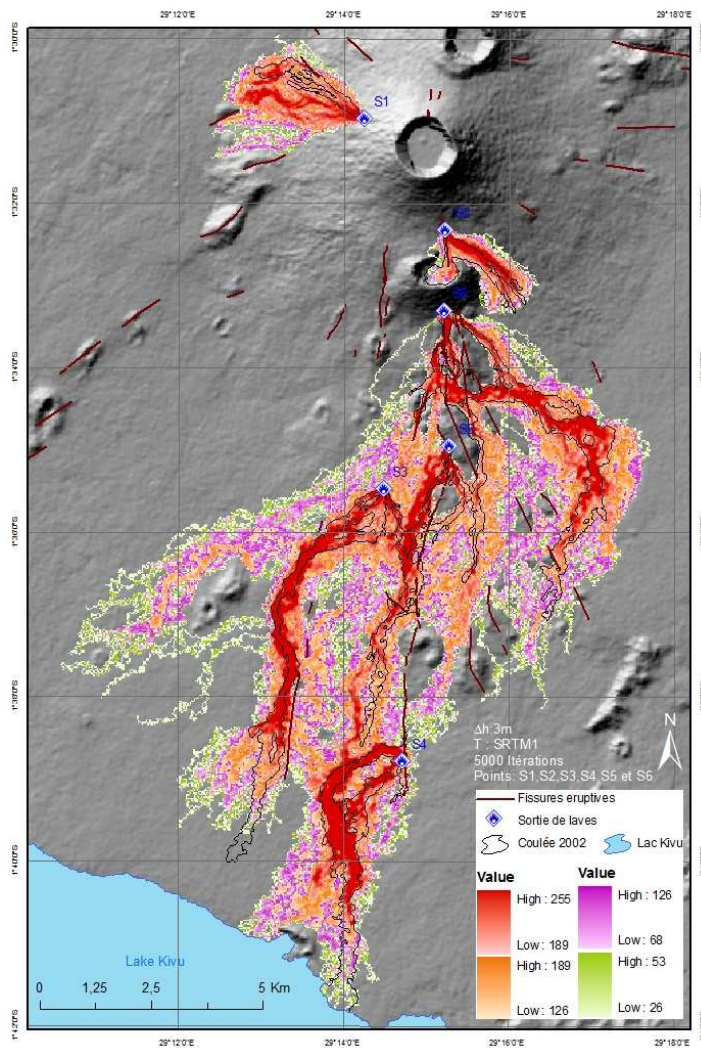
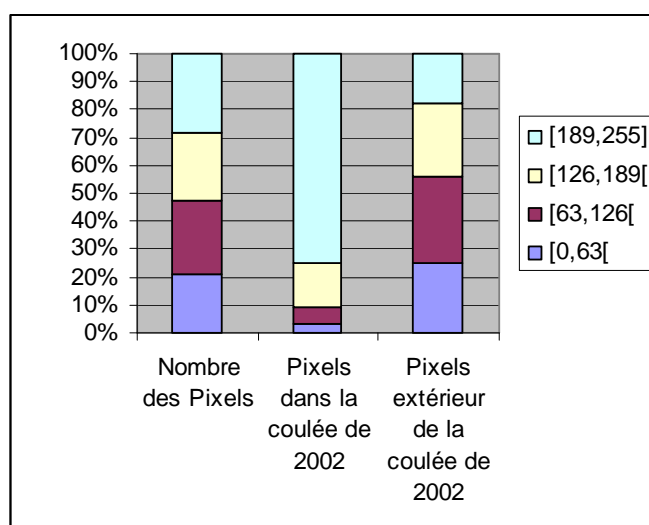


Figure 13: Scenario 1:

(zones d'aléa faible [26,53[, moyen [68,126[, élève [126,189[et très élèves [189,255]).

Tableau VI: Comparaison du scenario 1 et la coulée de 2002.

Interval	Qualification d'aléa	Nombre de Pixels Scenario1	Pixels dans la coulée de 2002	Pixels extérieur de la coulée de 2002
] 0,255]		81067	14629	66438
[0,63[	Faible	21.1%	3.2%	25.0%
[63,126[	Moyen	26.2%	5.9%	30.7%
[126,189[	Elevé	24.6%	16.1%	26.5%
[189,255]	Très élevé	28.1%	74.8%	17.9%



Graphique 5: Classification des pixels de la région de Goma suivant le scenario 1.
(zones d'aléa faible [0,63[, moyen [63,126[, élève [126,189[et très élevés [189,255])

De cette analyse ressort :

- 661pixels, soit 0.8% de la coulée de 2002, n'ont pas été pointés par la simulation comme zone probable de passage de coulée;
- près de 75% des pixels sont localisées dans la coulée de 2002 et se situent dans l'intervalle [189,255], soit dans la zone où l'aléa coulée de lave est très élevé ;
- 55.7% des pixels qui pointent à l'extérieur de la coulée de 2002 appartiennent à l'intervalle où l'aléa coulée de lave est soit faible ou moyen ;
- seulement 3.2% des pixels de la coulée de 2002 ont été qualifiés d'aléa faible dans le Scenario S1.

4.3 Aléa coulée de lave sur le flanc sud du volcan Nyiragongo.

Afin d'estimer l'aléa pour cette région, nous réalisons des simulations avec un "paramètre de longueur" plus élevé (100 km) et ainsi permettre de constater une éventuelle dévastation de la région de Goma. Dans ce deuxième scénario, nous conservons les six points (s1, s2, s3, s4, s5 et s6) (scenario 2).

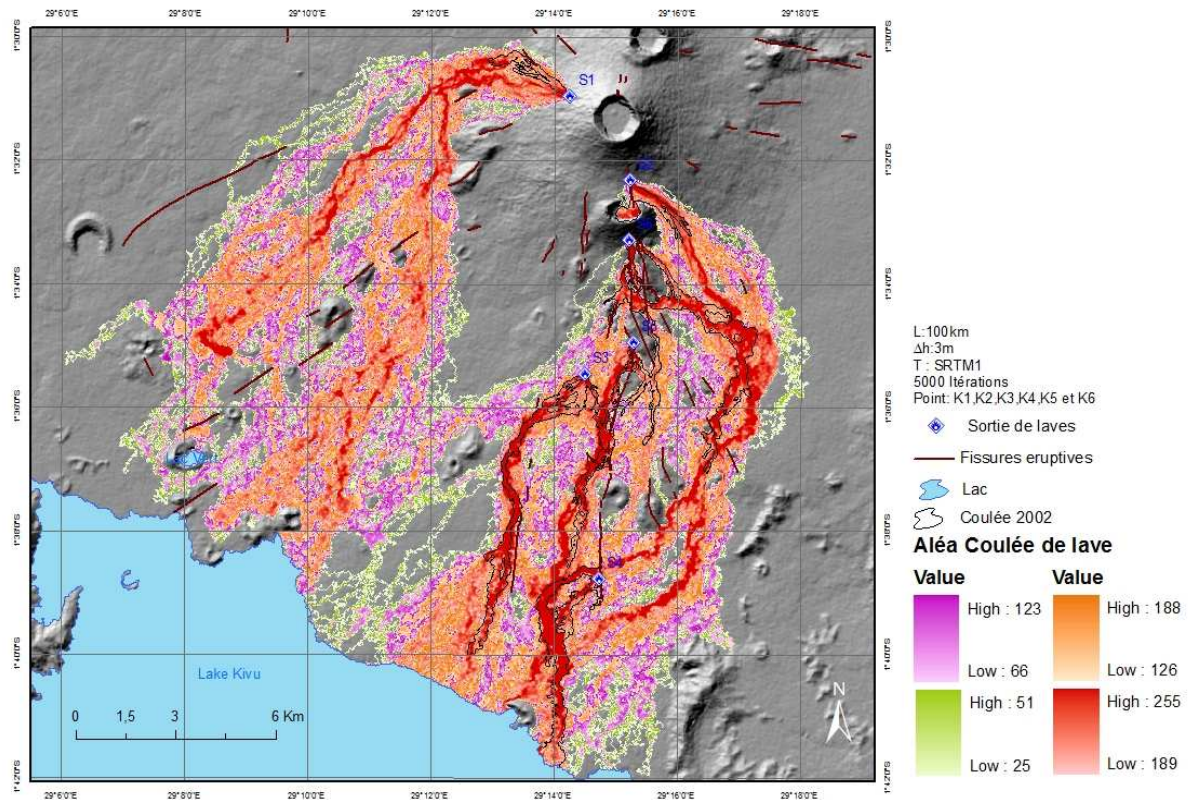


Figure 14: Scenario 2.

(zones d'aléa faible [25,51[, moyen [66,123[, élevé [126,188[et très élevés [189,255])

Tableau VII: Classification des pixels du scenario 2.

Intervalle	Qualification d'aléa	Nombre des Pixels	Pixels en %
[0,63[	Faible	35954	16.9
[63,126[	Moyen	57149	26.9
[126,189[	Elevé	60110	28.3
[189,255]	Très élevé	59538	28.0
] 0,255]	-	212751	100

A la vue cette simulation, il ressort :

- les coulées de 2002 et 1977 sont qualifiées d'aléa très élevé (value 189 à 255) et d'aléa élevé (value 126 à 188), donc il est possible qu'un scenario pareille ou semblable à celles de 1977 ou de 2002 se reproduise;
- la coulée de lave de 1977 n'a pas profondément modifié l'orientation des écoulements ;
- si la coulée du point s1 reste soutenue, elle ne continuera pas sa course dans la direction Nord-Ouest mais elle sera déviée vers le Sud par la topographie.
- la coulée du point s2 qui avait pris la direction Sud-est, c'est à dire vers la ville de Gisenyi, si elle reste soutenue, elle sera déviée par la topographie pour aller au Sud soit vers la ville de Goma.

5 EVOLUTION DE LA VULNERABILITE LIEE AUX COULEES DE LAVE DANS LA VILLE DE GOMA.

5.1 Les facteurs d'évaluation de vulnérabilité dans la ville de Goma.

La vulnérabilité urbaine implique la prise en compte de plusieurs facteurs. Pour estimer la vulnérabilité liée aux coulées de lave dans la ville de Goma, nous utilisons les cartes de probabilité d'invasion "scenario 1" et "scenario 2". Il s'agit de comparer l'effet de ces probabilités d'invasion en fonction de l'étendue de la ville, et d'évaluer seulement trois causes aggravantes notamment : la dynamique du développement géométrique de la ville; la croissance démographique et l'augmentation du nombre de stations d'essence.

5.2 Les quartiers de la ville de Goma face au scénario 1.

Dans ce paragraphe, nous comparerons l'invasion réelle de la coulée de lave de 2002 avec l'estimation des probabilités du scenario 1.

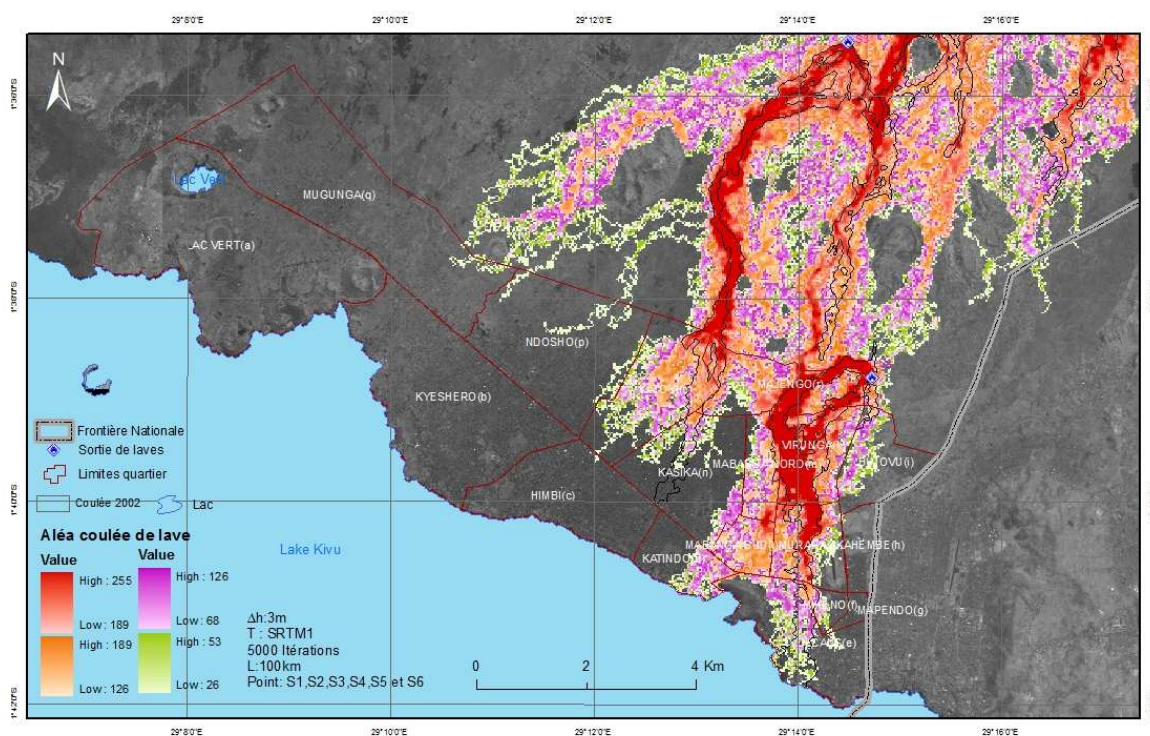
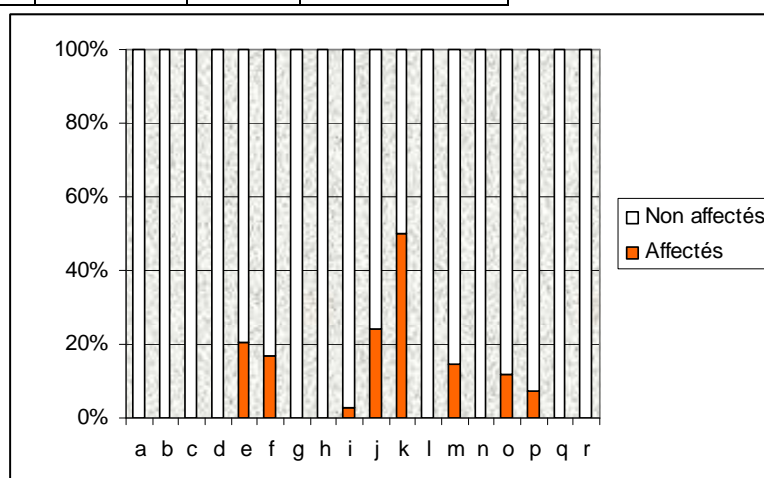


Figure 15: Classification de la vulnérabilité dans les quartiers de la ville de Goma (scénario 1).

(limites administratives de 2009 ; zones d'aléa faible [26,53[, moyen [68,126[, élève [126,189[et très élevées [189,255])

Tableau VIII: les endroits (représentés par des pixels) de la ville de Goma dévastés par la coulée de lave de 2002.

Quartier	Total pixels	Affectés	Non affectés
LAC VERT (a)	11742	0	11742
KYESHERO (b)	8711	0	8711
HIMBI (c)	4257	0	4257
KATINDO (d)	1621	0	1621
VOLCANS (e)	3664	744	2920
MIKENO (f)	453	76	377
MAPENDO (g)	279	0	279
KAHEMBE (h)	954	0	954
BUJOVU (i)	2013	52	1961
MURARA (j)	1985	476	1509
Virunga (k)	2193	1093	1100
MABANGA-SUD (l)	975	0	975
MABANGA-NORD (m)	1321	193	1128
KASIKA (n)	3964	0	3964
KATOYI (o)	3711	436	3275
NDOSHO (p)	6178	451	5727
MUGUNGA (q)	10118	0	10118
MAJENGO (r)	2806	0	2806

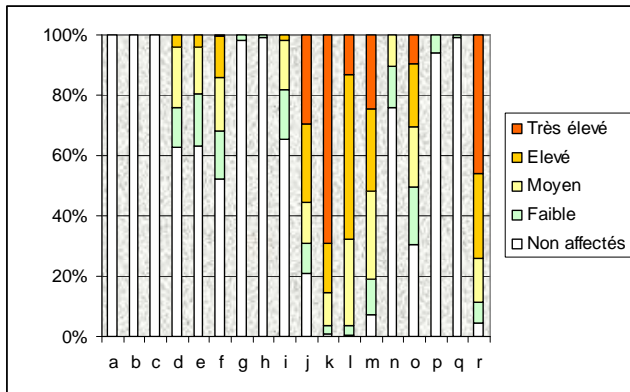


Graphique 6: Classification des pixels des quartiers de la ville de Goma en zones affectées et non affectées par la coulée de lava de 2002.

Huit (e, f, i, j, k, m, o et p) sur les dix huit quartiers de la ville de Goma ont été touchés par la coulée de lave de 2002. Ils sont tous localisés à l'Ouest et sont les plus peuplés de la ville. Le quartier Virunga a été le plus dévasté, avec près de 50% de sa surface englouti par la lave. Il est important de signaler qu'à cette époque presque la totalité de la vie était concentrée dans les quartiers de l'Est.

Tableau IX: Les pixels de la ville de Goma dévastés par le scénario 1.

Quartier	Total pixels	Non affectés	[0,63[(aléa faible)	[63,126[(aléa moyen)	[126,189[(aléa élevé)	[189,255] (aléa très élevé)
LAC VERT (a)	11742	11742	0	0	0	0
KYESHERO (b)	8711	8711	0	0	0	0
HIMBI (c)	4257	4249	8	0	0	0
KATINDO (d)	1621	1019	210	326	66	0
VOLCANS (e)	3664	2320	625	574	145	0
MIKENO (f)	453	236	72	82	61	2
MAPENDO (g)	279	274	5	0	0	0
KAHEMBE (h)	954	944	10	0	0	0
BUJOVU (i)	2013	1321	325	331	36	0
MURARA (j)	1985	413	205	268	516	583
Virunga (k)	2193	19	62	235	365	1512
MABANGA-SUD (l)	975	6	31	276	535	127
MABANGA-NORD (m)	1321	94	157	388	356	326
KASIKA (n)	3964	3017	532	415	0	0
KATOYI (o)	3711	1128	710	737	784	352
NDOSHO (p)	6178	5801	369	8	0	0
MUGUNGA (q)	10118	10010	108	0	0	0
MAJENGO (r)	2806	124	196	410	782	1294



Graphique 7: Classification des pixels des quartiers de Goma suivant du scenario 1 en zones d'aléa faible, moyen, élève, très élevés et non affectés.

Seize sur dix huit quartiers sont touchés et sont localisés à l'Est comme en 2002. Quatre sont touchés à plus de 80%, six à plus de 60%, onze à plus de 40% et seize à plus de 0.2%. Les quartiers qui ont été touchés en 2002 (e, f, j, k, m, o et p) le sont encore pour le scenario 1 et avec des expositions les plus élevées.

5.3 Les quartiers de la ville de Goma face au scenario 2.

Dans ce paragraphe, nous évaluons de l'estimation des probabilités du scenario 2 dans la ville de Goma.

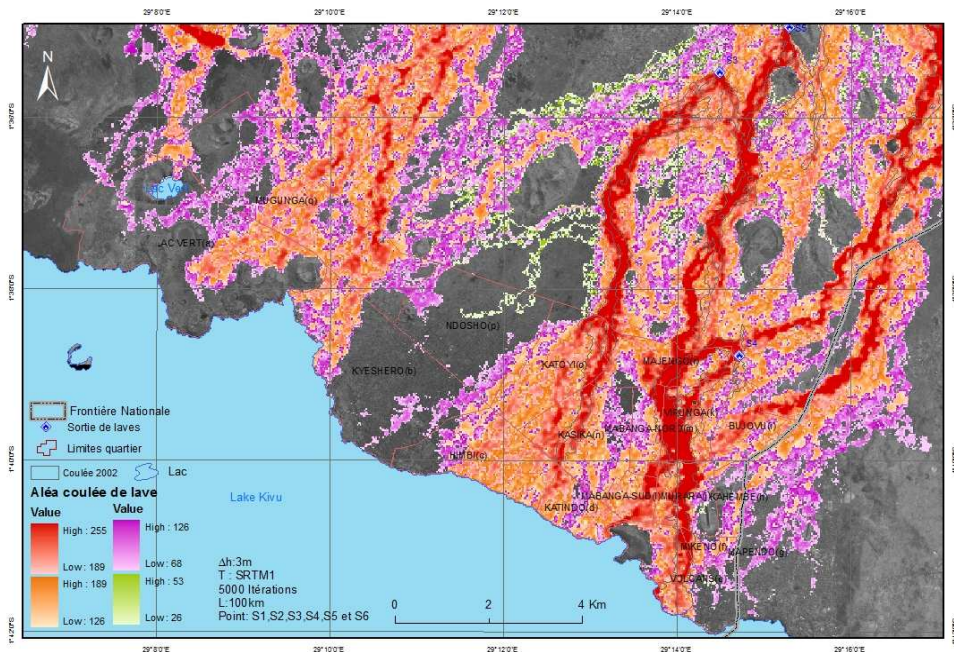
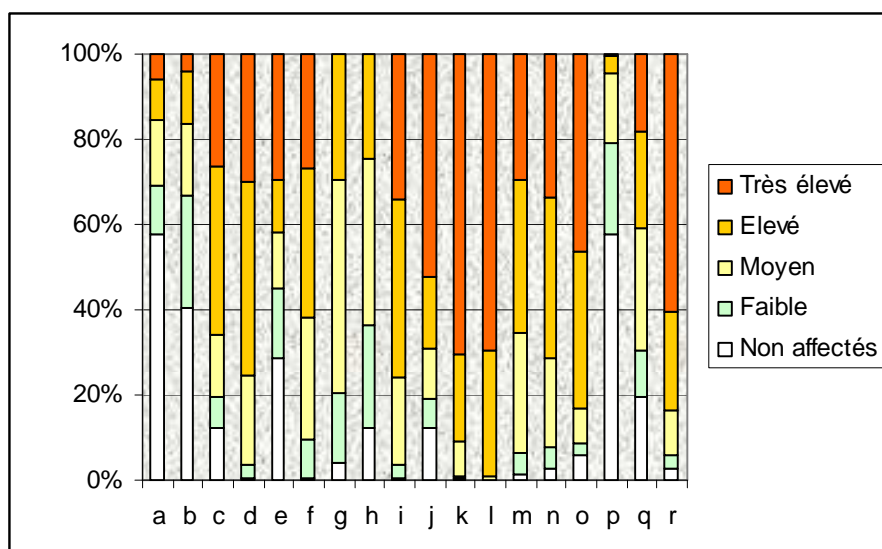


Figure 16: Classification de la vulnérabilité dans les quartiers de la ville de Goma (scenario 2).

(limites administratives de 2009 ; zones d'aléa faible [26,53], moyen [68,126], élève [126,188] et très élevés [189,255])

Tableau X: Les pixels de la ville de Goma dévastés par le scénario 2.

Quartier	Total pixels	Non affectés	[0,63[(aléa faible)	[63,126[(aléa moyen)	[126,189[(aléa élevé)	[189,255] (aléa très élevé)
LAC VERT (a)	11742	6784	1311	1832	1109	706
KYESHERO (b)	8711	3517	2290	1495	1050	359
HIMBI (c)	4257	530	303	609	1702	1113
KATINDO (d)	1621	11	45	342	740	483
VOLCANS (e)	3664	1041	608	478	457	1080
MIKENO (f)	453	3	40	130	158	122
MAPENDO (g)	279	12	45	139	83	0
KAHEMBE (h)	954	119	226	377	232	0
BUJOVU (i)	2013	8	68	405	847	685
MURARA (j)	1985	240	140	235	332	1038
Virunga (k)	2193	8	14	173	454	1544
MABANGA-SUD (l)	975	1	0	10	288	676
MABANGA-NORD (m)	1321	16	70	370	474	391
KASIKA (n)	3964	110	194	835	1493	1332
KATOYI (o)	3711	222	94	313	1367	1715
NDOSHO (p)	6178	3557	1328	1000	278	15
MUGUNGA (q)	10118	1961	1130	2909	2286	1832
MAJENGO (r)	2806	71	89	304	645	1697



Graphique 8: Classification des pixels des quartiers de Goma suivant le scénario 2.
(en zones d'aléa faible, moyen, élève, très élevés et non affectées).

Aucun quartier n'est totalement à l'abri du scénario 2, certains sont engloutis totalement et d'autres partiellement. Les quartiers " a " et " p " sont les moins vulnérables mais avec près de 43% des menaces et quatorze quartiers sont touchés à plus de 80% de leurs surfaces.

5.4 Facteurs influents sur la vulnérabilité en la ville de Goma.

5.4.1 Aspect démographique.

L'analyse des facteurs de vulnérabilité donne le moyen de prévoir l'amplitude des préjudices potentiels, car elle fournit une mesure quantitative de la vulnérabilité des éléments et une mesure qualitative de la capacité de réponse d'un individu ou d'un groupe exposé à un sinistre (Thouret et D'ercole, 1996).

La ville de Goma est bâtie entièrement sur le champ des laves du volcan Nyiragongo. Elle compte deux communes subdivisées en dix-huit quartiers dont sept pour la commune de Goma et onze pour la commune de Karisimbi.

Tableau XI: Répartition des populations de Goma en 2006, 2009 et 2012.

Quarter	Population en 2006 (529193) en %	Densité en 2006 (en habitants par km ²)	Population en 2009 (639873) en %	Densité en 2009 (en habitants par km ²)	Population en 2012 (865482) en %	Densité en 2012 (en habitants par km ²)
LAC VERT (a)	7.2	3266	1.1	596	8.9	6823
KYESHERO (b)	6.1	2800	7.7	4286	9.6	7385
HIMBI (c)	5.4	2475	6.4	3529	5.9	4537
KATINDO (d)	5.5	2509	4.6	2528	4.5	3422
VOLCANS (e)	1.6	716	1.6	879	1.7	1317
MIKENO (f)	6.8	3123	5.9	3277	4.9	3784
MAPENDO (g)	6.1	2803	5.9	3272	5.0	3868
KAHEMBE (h)	3.9	1767	4.1	2260	3.2	2460
BUJOVU (i)	3.4	1530	3.0	1669	3.8	2905
MURARA (j)	6.5	2965	5.6	3087	4.1	3157
Virunga (k)	2.1	964	2.3	1264	1.9	1474
MABANGA-SUD (l)	11.8	5365	12.3	6857	9.3	7107
MABANGA-NORD (m)	7.4	3358	6.3	3524	5.2	4030
KASIKA (n)	5.9	2706	7.2	3976	5.8	4423
KATOYI (o)	8.8	4022	9.5	5265	9.4	7245
NDOSHO (p)	5.3	2423	8.2	4564	7.8	5971
MUGUNGA (q)	1.5	697	2.2	1241	2.0	1549
MAJENGO (r)	4.7	2129	6.2	3461	7.0	5357

Source : recensements de la Mairie de Goma.

Goma est caractérisée par une forte concentration de la population inégalement répartie. La mairie de Goma indique que la population d'environ 500 000 en 2006 est passée à plus de 850 000 en 2012. Le quartier le moins dense de la ville de Goma (Volcans) a environ 1300 habitants par km² pendant que le plus dense (Kyeshero) a plus de 7000 habitants par km².

Le quartier Lac vert a connu une chute de population dès 2006 à 2009 et a remonté à plus du double en 2012. Cela peut probablement être dû aux mouvements des rescapés des guerres dans la région et la construction des camps dans ce quartier.

Cinq quartiers ont doublé leurs densités après 6 ans, trois sont localisés à l'ouest (Lac vert, Mugunga, et Kyeshero) et deux au nord (Ndosho, Majengo).

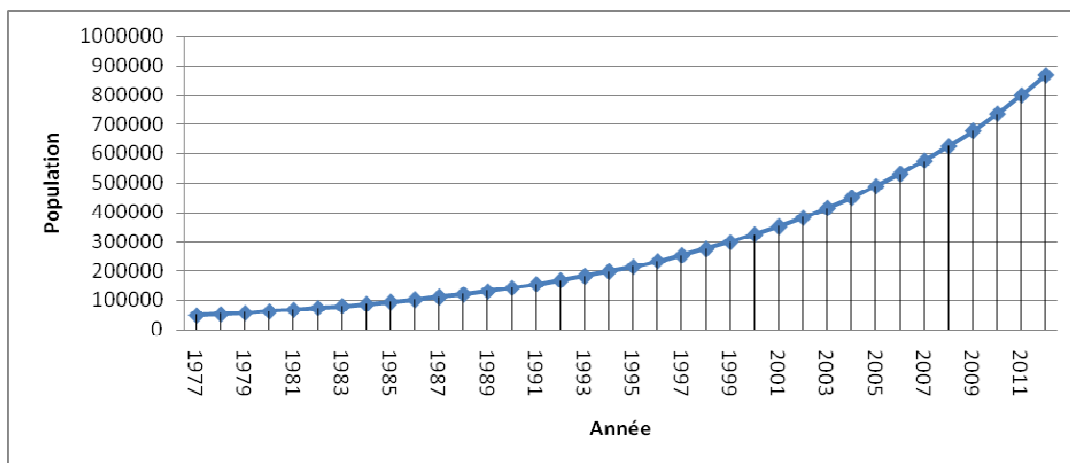
Six quartiers ont chacun plus de 7% de la population totale de la ville, trois sont localisés au nord (Katoyi, Ndosho et Majengo), deux à l'ouest (Lac vert et Kyeshero) et un au centre (Mabanga Nord).

Par la relation de (Braue et al., 2001) : $r = \sqrt[t]{\frac{P_t}{P_0}} - 1$ où P_t est la population à un instant t (865482 habitants en 2012), P_0 la population pour l'année de base (529193 habitants en 2006), r le taux moyen de croissance démographique dans la région et t le temps en années pour la période de projection (2012-2006).

$$r = \sqrt[6]{\frac{865482}{529193}} - 1$$

$$r = 0.08544376 \text{ soit } 8.5\%$$

$$P_t = P_0(1 + r)^t$$



Graphique 9: Modélisation de la croissance de la population de la ville de Goma de 1997 à 2012 basée sur l'estimation de la population en 2006 et 2012.

Du graphique 9, on constate que la population qui n'était que de l'ordre de 49 000 lors de l'éruption du volcan Nyiragongo le 10 janvier 1977, pendant l'éruption du 17 janvier 2002 était déjà environ 381000 et actuellement elle est estimée à 856000 habitants.

5.4.2 Dynamique du développement urbain à Goma.

Nous allons plus nous appesantir sur la croissance de la surface urbaine sur le flanc sud du volcan Nyiragongo. Ce flanc a été sinistré pendant les deux dernières éruptions et il est le plus habilité.

Dans l'analyse de la dynamique du développement de la ville de Goma, deux images ont constitué la base de nos digitalisations : une image ikonos de 2008 et une image de Google earth de 2013. Il aurait été plus intéressant d'évaluer la dynamique de la ville depuis l'année de la dernière éruption (2002) mais pour cette période nous n'avons pas eu une image pouvant couvrir la totalité de la partie affectés par nos deux scenarios (1 et 2).

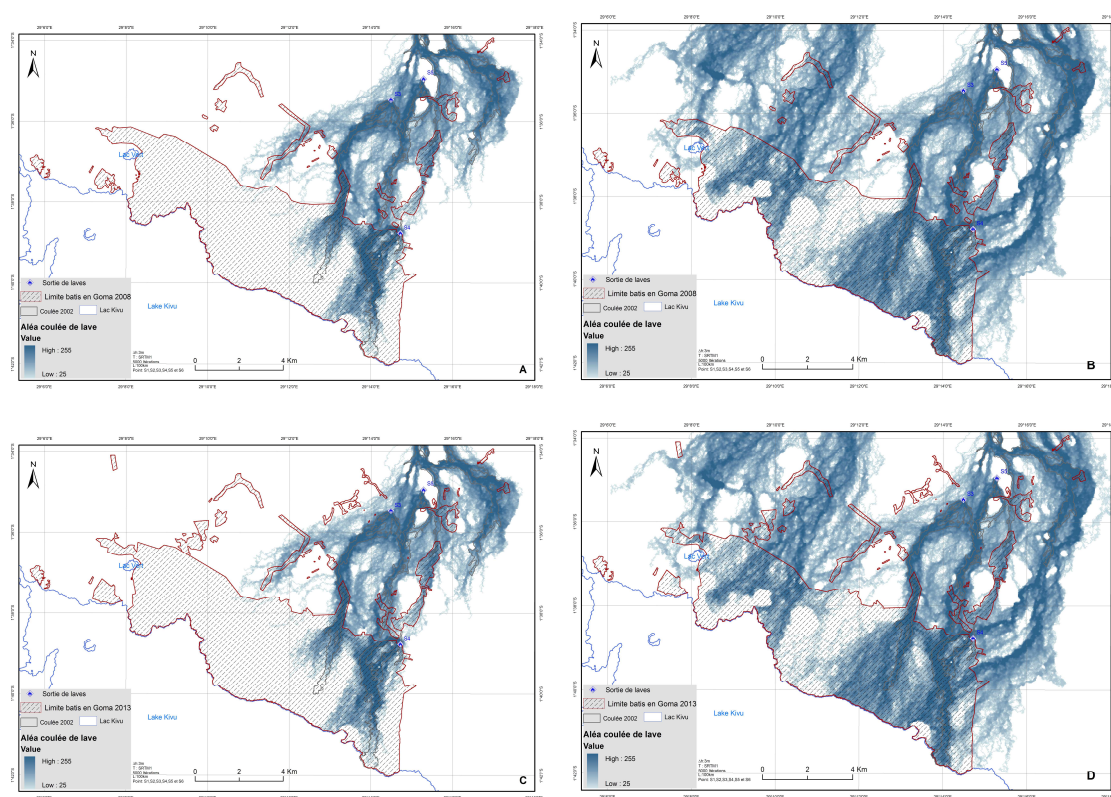


Figure 17: Expansion de la ville de Goma de 2008 à 2013 face aux scénarios 1 et 2.

(A: 2008 et scénario 1 ; B : 2008 et scénario 2 ; C: 2013 et scénario 1 et D: 20013 et scénario 2)

Tableau XII: Les pixels de la surface bâti dévastés par le scénario 1 ou 2.

Année	Pixels couvert par le bâti	Affecte par le scénario 1	Non affectes par le scénario 1	Affecte par le scénario 2	Non affectes par le scénario 2
2008	68853	20998	47855	53092	15761
2013	71763	21696	50067	54542	17221

De ces analyses, on constate que :

- de 2008 à 2013 une augmentation de 4.2 % de la surface du bâti se fait observer dont 24% de cette augmentation est affectée par le scenario 1 et 50% par le scenario 2.
- dans la ville de Goma, la partie qui était couverte par la lave de 2002 a très rapidement été couverte du bâti.
- Au nord nous avons des villages de la chefferie qui sont progressivement absorbés par l'accroissement de la ville et à l'Ouest la ville se rapproche de plus à plus du Parc National des Virunga.
- La ville aura dans les jours très proches une seule direction pour son extension, à l'est elle est limitée par la frontière nationale, au sud par le Lac Kivu et à l'ouest par le Parc National des Virunga.

5.4.3 Les explosifs face aux coulées de lave dans la ville de Goma.

Compte tenu de la disponibilité des données, dans ce paragraphe, nous avons considéré comme explosifs seulement les stations-service destinées à fournir du carburant (essence, kérosène et gasoil) dans la ville de Goma.

La lave liquide atteint des températures d'environ 800⁰ C pendant que la température d'auto inflammation est de l'ordre de 300⁰ C pour l'essence ; 400⁰ C pour le kérosène et 250⁰ C pour le gasoil (<http://autocarbur.free.fr/>, dernière visite 12/07/2013). A cette température le carburant peut prendre feu, en l'absence d'une quelconque source d'étincelle.

La proximité à la température très élevée abouti à la combustion complète des constructions en bois et du mobilier. En 2002, les feux ne se sont pas étendus au-delà des deux coulées de lave principales parce qu'il y avait peu de voitures ou des dépôts des produits inflammables et il n'y avait pas de vent fort pour éventer les feux (Favali et al., 2009).

En 2002, environ vingt personnes sont mortes dans une explosion d'une station-service qui répandait accidentellement l'essence sur la lave chaude (Favali et al., 2009).

Par contre, la température élevée en fin de compression dans la chambre de combustion d'un moteur à essence ne déclenche jamais l'allumage d'elle même, elle nécessite toujours l'étincelle de la bougie pour faire brûler le mélange air essence. Les combustibles ont chacun des limites d'explosivité où la LIE (limite inférieure d'explosivité) exprime le seuil de

dosage du combustible en dessous de laquelle la combustion ne peut ni s'entretenir ni se propager (mélange "pauvre") et LES (limite supérieure d'explosion), où le mélange est trop "riche".

Tableau XIII: LIE et LES de quelques produits.

PRODUITS	LIE	LSE
Essence	1.4	7.6
Gazole	6	13.5
Kérosène	0.7	5

Source : <http://petrofreelance.voila.net/explosivite.htm>, le 12/07/2013

LIE et LES sont en % de vapeur du combustible dans le volume de comburant (oxygène de l'air).

Dans la pratique, il n'est pas toujours facile de garder les combustibles à l'abri de l'air dans un environnement à températures très élevées comme celui des laves.

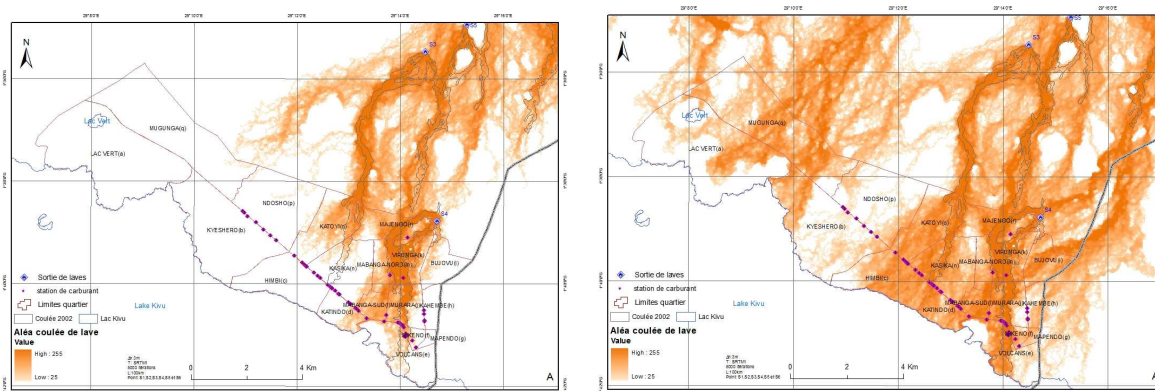


Figure 18: A: distribution des stations à Goma et le scenario 1 et B : distribution des stations à Goma et le scenario 2.

Dans le scenario 2, toutes les cinquante quatre stations de carburant présentes en ville à Goma sont dans des zones où l'aléa est supérieur à 1% mais pour le scenario 1, 32 stations (soit 60%) sont en dehors de l'aléa coulée de lave. La station de carburant la plus proche du site éruptive (S4) se trouve à seulement 1km.

Mais il faut savoir que la majorité du bâti dans la ville de Goma est en planches peintes à l'huile de "vidange" (huiles de moteur) ; il suffit que le feu soit éventé pour se répandre à des grandes étendues et ainsi amplifier les dégâts.

6 DISCUSSIONS

Les coulées de lave du volcan Nyiragongo étaient sorties par des fractures mais pas par des points. Les écoulements en tunnels ne sont pas considérés par VORIS 2.0.1. De plus, il n'est pas dit que les futures éruptions du volcan Nyiragongo sortiront toujours par les mêmes endroits qu'en 1977 ou 2002. Néanmoins cette fracture est restée active et donc elle a plus de probabilité de canaliser une nouvelle éruption.

Il n'est pas évident que les laves des points de sorties situés vers le sommet du volcan Nyiragongo (s1 et s2) soient soutenues jusqu'à atteindre le lac. Les écoulements issus de ces points furent des courtes longueurs (coulées de lave de 1977 et 2002). D'une part, les laves qui pourraient en sortir sont piégées par des écoulements en tunnel sur ce versant fragilisé par des fissures, et d'autre part, elles doivent avoir une pression suffisante pour atteindre ces points situés en altitudes.

Par ailleurs, l'épaisseur est maintenue constante durant chacune des simulations. Dans la pratique, il est difficile qu'une coulée conserve la même épaisseur sur la totalité de son parcours. L'épaisseur moyenne de l'éruption du Nyiragongo de 1977 était (0 - 1m) (Tazieff, et al., 1977) or VORIS 2.0.1 n'utilise que des entiers différents de zéro et arrondis à l'unité (m).

Les estimations de la population de la ville de Goma peuvent être influencées par les mouvements des rescapés comme ce qui a été constaté dans le quartier Lac vert. Dans ce quartier la population qui était d'environ 38 000 en 2006 a été estimée à 7000 habitants en 2009.

En outre, les analyses sur la dynamique du développement urbain à Goma sont limitées, elles ne donnent pas les détails sur l'augmentation du nombre des bâtis à l'intérieur d'une zone. Les surfaces inhabitées dans des agglomérations affectent les estimations, néanmoins elles nous donnent l'idée sur la direction préférentielle de l'expansion de la ville de Goma et la vulnérabilité dans la zone déjà occupée par la population.

7 CONCLUSIONS.

La ville de Goma (plus de 700 000 habitants), fait face de façon permanente à la menace du volcan Nyiragongo. En 1977 et 2002, le Nyiragongo est entré en éruption. Les coulées de lave de ces deux éruptions qui sortaient des fissures semblables ont sérieusement affecté Goma et les villages environnant. En plus l'éruption de 2002 a prolongé les fissures près et même dans la ville de Goma. La ville connaît actuellement une expansion, tant démographique que dimensionnelle qui accroît la vulnérabilité de la population et de l'économie locale face à ce genre d'éruptions. L'objectif premier de notre travail était d'apporter des éléments de réponse à l'évaluation d'une éruption du volcan Nyiragongo qui sortirait par des points identiques à ceux des éruptions de 1977 et 2002. Pour ce faire, le modèle VORIS 2.0.1 (Système d'Information des Risques Volcaniques) a été utilisé pour obtenir des probabilités d'invasion de lave sur la région de Goma.

Pendant la phase d'analyse de sensibilité des paramètres de VORIS 2.0.1, nous avons retenu la simulation S1 (MNT : SRTM1, point A :(35S 746161/9840963), épaisseur : 3m, nombre d'itérations : 5000 et paramètre de longueur : 33km). Pour une coulée de 15 km², VORIS 2.0.1 a bien pointée une surface de 12 km² et 16 km² a été pointée à l'extérieur de la vraie coulée. Pendant la phase de validation sur la coulée de 2002 du volcan Nyiragongo qui a affecté 14 km², VORIS 2.0.1 a bien pointée 13 km² et 60 km² a été pointée à l'extérieur de la vraie coulée. Ce rendement pourrait être amélioré en utilisant un MNT de meilleure résolution.

Le Nyiragongo est capable de freiner le développement de la ville de Goma. Les deux scénarios analysés dans ce travail, témoignent des surfaces affectées plus élevées que celle de 2002. En plus la ville étant limitée à l'Est par la frontière nationale, au Sud par le Lac Kivu et à l'Ouest par le parc national des Virunga, elle fait son expansion vers le Nord où l'aléa est potentiellement important.

Aucun quartier n'est totalement à l'abri du scénario 2, les moins vulnérables sont touchés à près de 43%. Mais avec le scénario 1, seize sur dix huit quartiers sont touchés et sont localisées à l'Est comme en 2002. Quatre sont touchés à plus de 80%, six à plus de 60%, onze à plus de 40% et seize à plus de 0.2%. Les quartiers qui ont été touchés en 2002 les sont encore pour les scénarios 1 et 2 et avec des vulnérabilités relativement plus élevées.

Toutes les cinquante quatre stations de carburant se trouvant à l'intérieur de la ville de Goma sont vulnérables à l'aléa coulée de lave pour le scénario 2 et 40% pour le scénario 1. La majorité du bâti, en ville de Goma étant en planche peint au "vidange" (huiles usées qui sortent du moteur lors du vidange), une fois que ces stations-services sont atteintes par le feu, elles seront capables de le répandre à des grandes étendues et ainsi amplifier les dégâts. L'implantation d'une station-service devrait faire l'objet d'un choix minutieux et son voisinage direct devait être aménagé pour être moins vulnérable à la propagation du feu.

La surveillance de l'activité volcanique est indispensable à l'étude des processus du volcanisme et à la prévision de la propagation de coulées de lave dans la région de Goma. La qualité d'une prévision dépend directement des points de sorties de lave qui doivent anticipativement être définis par les volcanologues avant l'éruption. C'est moyennant cette condition qu'il est possible de définir les différentes probabilités de coulées et entrevoir une stratégie de protection des populations menacées.

Créer des activités sans tenir compte des scénarios des risques augmente la vulnérabilité des populations. Les scénarios présentés ici pourraient contribuer à la détermination des zones à risques pour faciliter l'implantation humaine et des infrastructures (routes, écoles, hôpitaux, etc..) dans la région de Goma.

Cette étude ne se base que sur des points de sortie de lave estimés de l'éruption du 10 janvier 1977 et du 17 janvier 2002. Si la lave venait à sortir par d'autres points, les conclusions peuvent changer significativement.

BIBLIOGRAPHIE

- Allard P., Baxter P, Halbwegs M, Komorowski J-C (2002) *The January 2002 eruption of Nyiragongo volcano (Dem. Repub. Congo) and related hazards: observations and recommendations*. Final Report of the French–British Team, Paris, 2002
- Barrena I., (2009) – *Gestion de risques, Novembre* ,26p
- Baxter P., Allard P., Halbwegs M., Komorowski J., Woods A., & Ancia A.– *Human health and vulnerability in the Nyiragongo Volcano eruption at Goma*, Acta Vulcanologica, vol. 14-15, The January 2002 eruption of Nyiragongo Volcano and the socio-economical impact, pp.109-114
- Braue et Castillo C. 2001
- Cayol V., and Cornet F.H. (1998) – *Effects of topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes: Application to Etna*, Geophys, vol. 25, Res.Lett, pp.1979-1982.
- Cornet F., (1998) – *New IT skills help predict natural hazards:* <http://istresults.cordis.lu/index.cfm/section/news/Tpl/article/BrowsingType/Features/ID/78873> (derrière visite: 27/06/2013)
- Denaeyer M., (1965 b) – Exemple de concordance entre tectonique profonde et volcanisme, au Nord du Lac Kivu. Bull. Acad. roy. Sci. Outre-Mer, Bruxelles, fasc. 6, pp. 1574-1578.
- DURIEUX J., (2004a) – *Volcano Nyiragongo (D. R. Congo) : evolution of the crater and lava lakes from the discovery to the present*. Acta Vulcanologica, vol. 14-15, The January 2002 eruption of Nyiragongo Volcano and the socio-economical impact, pp.137-144.
- DURIEUX J., (2004b) – *Nyiragongo: The January 10th, 1977, eruption*. Acta Vulcanologica, vol. 14-15, The January 2002 eruption of Nyiragongo Volcano and the socio-economical impact, pp.145-148.
- d'Oreye N., F. Albino, V. Cayol, P. Ggonzalez, F. Kervyn, S. Samsonov, B. Smets, C. Wauthier, L.M. Bagalwa, N.Mashagiro, A.Muhindo, M. Syaushwa (2012) – *Volcano monitoring in the Virunga Volcanic Province, DR Congo*, Congrès GeoPrisms New Jersey, 1p
- Ebinger C.& Furman T., (2004), – *Geodynamical setting of the Virunga volcanic province, East Africa*, Acta Vulcanologica , vol.14-15, The January 2002 eruption of Nyiragongo Volcano and the socio-economical impact, pp9-16
- Favalli M, Chirico GD, Papale P, Pareschi MT, Boschi E (2008) – *Lava flow hazard at Nyiragongo volcano, D.R.C. 1.Model calibration and hazard mapping*. Bull Volcanol, vol.71:363–374
- Felpeto A., (2009) – *VORIS: A GIS-based tool for volcanic hazard assessment, USER'S GUIDE, VORIS 2.0.1*, 38p, <http://www.gvb-csic.es>
- Felpeto A., Joan Martí, Ramon Ortiz, (2007) –*Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment*, vol. 166, Journal of Volcanology and Geothermal Research, pp. 106–116.

- Giuseppe D. Chirico , Massimiliano Favalli , Paolo Papale , Enzo Boschi, Maria Teresa Pareschi & Arthur Mamou-Man. (2009) – *Lava flow hazard at Nyiragongo Volcano, DRC*. Bull Volcanol, vol. 71, pp. 375–387
- Hormann C. (2012) – *Evaluation de la GDEM ensemble de données v2 ASTER*: http://www.imagico.de/map/aster_gdem.php, (derrière visite: 28/06/2013)
- Jean-Claude THOURET & Robert D'ERCOLE, (1996) – *Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales*, Cah. Sci. hum. Vol. 32 (2), pp407-422
- Kavotha S., Tuluka Mavonga, Jacques Durieux & Kibuye Mukambilwa (2004) – *Towards a More Detailed Seismic Picture of the January 17th, 2002 Nyiragongo Eruption*, Acta volcanologica 14-15, The January 2002 eruption of Nyiragongo Volcano and the socio economical impact, pp87-100.
- KERVYN, M., R. Goossens, P. Jacobs & G.G.J. Ernst, (2006) – *ASTER DEMs for volcano topographic mapping: accuracy and Limitations*, vol. 04-06, Int. Assoc. for Mathematical Geology XIth International Congress Université de Liège – Belgium, 8p
- KERVYN M., R. GOOSSENS, P. JACOBS & G.G.J. ERNST, (2006) – *Mapping volcano topography with remote sensing: ASTER vs SRTM*, vol. X, No. X, International Journal of Remote Sensing, 30p
- KOMOROWSKI J.C., TEDESCO D., KASEREKA M., ALLARD P., PAPALE P., VASELLI O., DURIEUX J., BAXTER P., HALBWACHS M., AKUMBE M., BALUKU B., BRIOLE P., CIRABA M., DUPIN J.C., ETOY O., GARCIN D., HAMAGUCHI H., HOULIÉ N., KAVOYHA K.S., LEMARCHAND A., LOCKWOOD J., LUKAYA N., MAVONGA G., DE MICHELE M., MPORE S., MUKAMBILWA K., MUNYOLOLO F., NEWHALL C., RUCH J., YALIRE M. & WAFULA M., (2004) – *The January 2002 flank eruption of Nyiragongo volcano (Democratic Republic of Congo): chronology, evidence for a tectonic rift trigger, and impact of lava flows on the city of Goma*. Acta Vulcanologica, vol. 14-15, The January 2002 eruption of Nyiragongo Volcano and the socio economical impact, pp. 27-62.
- Liste du patrimoine mondial (1994) – *Parc national des Virunga*, <http://whc.unesco.org/fr/list/63>, (dernière visite : 27/06/2013)
- *L'explosivité*, <http://petrofreelance.voila.net/explosivite.htm>, (dernière visite : 12/07/2013)
- MITIMA R., (2004) – *La ville de Goma (R.D.C.) face à l'activité volcanique et autres risques géologiques*. ULg, D.E.S. Interuniversitaire en Gestion des Risques Naturels, Année académique 2003- 2004.
- Pardoux E., (2006) – *La méthode de Monte Carlo, URM 6632 Laboratoire d'analyse, Probabilités et EA 3781 Evolution Biologique Université de Provence*, 33p : <http://www.latp.univ-mrs.fr/~pardoux/enseignement/MC>. Derrière visite: 24/08/2013
- POUCKET A., (1973) – *Contribution à la connaissance du Volcan Nyiragongo (rift ouest-africain) Les éruptions intra-cratérales de juillet 1971 à avril 1972*. Institut pour la Recherche Scientifique en Afrique centrale, Bukavu, Zaire, 36p.
- POUCKET A., (1977) – *Contribution à l'étude structurale de l'aire volcanique des Virunga, rift de l'Afrique Centrale*. Revue de géographie physique et de géologie dynamique, vol. XIX, 2, pp. 115-124.

- Ramsey D.W., Robinson J.E., Schilling S.P., Schaefer J.R., Kimberly P., Trusdell F.A., Guffanti M. C., Mayberry G. C., Cameron C.E., Smith J.G., McIntire J.A.; Snedigar S. & Ewert J.W. (2004) – *Preparing for the Next Volcanic Crisis in the United States, AGU Fall Meeting Abstracts*, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004AGUFM.V43E1455R> (dernière visite : 12/07/2013)
- Rift est-africain, <http://learnlearn.net/Asia.Afrika/Afrib.htm>, (dernière visite : 29/06/2013)
- SANTO A.P., CAPACCIONI B., TEDESCO D. & VASELLI O., (2004) – *Petrographic and geochemical features of the 2002 Nyiragongo lava flows*. Acta Vulcanologica, vol. 14-15, The January 2002 eruption of Nyiragongo Volcano and the socio-economical impact, pp.63-66.
- Smets B., (2007) – *Etude des mazukus dans la région de Goma (République Démocratique du Congo) et gestion des risques*. ULG, D.E.S. Interuniversitaire en Gestion des Risques Naturels, Année académique 2006-2007.
- Tableau récapitulatif des caractéristiques des carburants, <http://autocarbur.free.fr/>, (dernière visite : 12/07/2013)
- Tazieff H (1977) – *An exceptional eruption: Mt. Nyiragongo, January 10th, 1977*. Bull Volcanol vol. 40-3, pp.1–12
- TAZIEFF H., (1984) – *Mt. Nyiragongo: renewed activity of the lava lake*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 20, pp. 267-280.
- TAZIEFF H. (1949) – *Première exploration du cratère du volcan Nyiragongo*. Bulletin de la Société Belge de Géologie., 58, pp. 165-172.
- Tedesco D, Papale P, Vaselli O, Durieux J (2002) – *The January 17th, 2002 eruption of Nyiragongo, Democratic Republic of Congo, final report*. UN Office for the Coord. Of Humanitarian Affairs, Geneva.
- T. Kühne. (2006) – *Matters of (Meta-) Modeling. Software and Systems Modeling*, vol. 5(4) p369–385