

## Travail de fin d'études: ""

**Auteur :** Birimwiragi Namogo, Didier

**Promoteur(s) :** 5866; Hubert, Aurelia

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes

**Année académique :** 2017-2018

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/5568>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**Faculté des Sciences**

**Département des Sciences et Gestion de l'Environnement**

**Estimation de la valeur économique du bâti de la ville de Goma face  
aux coulées de lave du Volcan Nyiragongo telles que survenues en  
2002 : les cas des quartiers Murara et Virunga**

**Mémoire présenté par BIRIMWIRAGI NAMOGO Didier**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master de Spécialisation en Gestion des  
Risques et des Catastrophes**

**Année académique 2017 - 2018**

**Promoteurs :**

- Dr Caroline Michellier
- Professeur Aurélia Ferrari Hubert.

*Copyright © 2018* : « Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce Soit, ne peut être réalisée qu’avec l’autorisation de l’auteur et de l’autorité académique de L’Université de Liège »

« Le présent document n’engage que son auteur »

Auteur du présent document : BIRIMWIRAGI NAMOGO Didier

Contact : *didiernamogo02@gmail.com*

**Faculté des Sciences**

**Département des Sciences et Gestion de l'Environnement**

**Estimation de la valeur économique du bâti de la ville de Goma face  
aux coulées de lave du Volcan Nyiragongo telles que survenues en  
2002 : les cas des quartiers Murara et Virunga**

**Mémoire présenté par BIRIMWIRAGI NAMOGO Didier**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master de Spécialisation en Gestion des  
Risques et des Catastrophes**

**Année académique 2017 - 2018**

**Promoteurs :**

- Dr Caroline Michellier
- Professeur Aurélia Ferrari Hubert.

## REMERCIEMENT

Je remercie le tout puissant « Jéhovah », le Dieu des armées de m'avoir accordé sa valeur imméritée d'accéder à cette formation de Master. Santé, force et persévérance (de mon côté et du côté de ma famille) durant mon séjour en Belgique sont les fruits de son amour à mon égard tout au long de cette formation.

Mes sincères remerciements à l'ARES-CCD (Académie de Recherche et de l'Enseignement Supérieur-Coopération au Développement) de m'avoir donné l'occasion de suivre une formation de Master de Spécialisation en Gestion des Risques et des Catastrophes.

Mes remerciements s'adressent également à l'Université de Liège et à l'encontre du professeur Pierre OZER, Coordonnateur du Master, pour le partage d'expérience, l'écoute et l'orientation le long de la formation.

Mes sincères remerciements au Dr MICHELLIER CAROLINE du Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC-Belgique) et au Professeur Aurelia HUBERT FERRARI pour s'être donné peine de diriger ce travail malgré leurs multiples occupations.

J'adresse mes sincères remerciements et profondes gratitude au :

- Dr Michellier Caroline d'avoir fait tout ce qui était son possible pour que les données pour la réalisation de ce travail soient disponibles,
- Doctorant Muhindo Syavulisembo Adalbert de m'avoir aidé pour superviser les enquêtes de terrain à Goma malgré mon absence,

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont soutenu notre candidature auprès de ARES-CCD à l'égard du professeur Matthieu Kervyn, du Dr Nicholas d'Oreye de Lantremange, du Dr Michellier Caroline, du Dr Katcho Karume et de l'attaché de recherche Mr Kasereka Mahinda Célestin.

Je remercie aussi mes parents et mes enfants pour leur soutien moral durant mon absence en famille.

A tout le monde qui a contribué pour la réussite de ce travail, je dis merci.

## RESUME

La ville de Goma est située dans le bassin du lac Kivu et fait face à des multiples aléas d'origine géologiques incluant les aléas volcaniques issus des volcans des Virunga et les séismes qui sont générés par l'activité du rift est africain. Spécifiquement par rapport aux aléas volcaniques, le principal risque provient des coulées des laves qui sont susceptibles d'affecter Goma en cas d'éruption du volcan Nyiragongo qui est situé à plus ou moins 15 Km seulement de la ville. Le bâti ainsi que la population sont donc à risque face à ces coulées de lave. Dans des telles conditions, il est important d'évaluer la vulnérabilité de la population et de ses biens pour savoir comment l'ensemble résisterait au choc d'une future coulée de lave. Cette composante de la vulnérabilité inclut l'aptitude d'une personne ou d'un bien à subir un dommage à la suite d'un événement naturel ou anthropique.

La présente étude vise à évaluer la valeur économique du bâti des quartiers Virunga et Murara de la ville de Goma. Elle cherche à savoir : quoi et combien seraient perdu en terme de valeur économique du bâti dans ces deux quartiers en cas d'une future éruption du volcan Nyiragongo qui atteindrait la ville. L'objectif est d'évaluer et de localiser la variation de la valeur économique du bâti.

Grâce à une image Orthophoto de très haute résolution (17 cm) réalisée par le Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC, Belgique), les surfaces bâties dans notre zone d'étude ont été déterminées et les travaux de terrain ont été planifiés. Ces travaux de terrain ont consisté à enquêter les bâtiments et à soumettre des questionnaires d'enquêtes aux ingénieurs architectes ainsi qu'aux commissionnaires des parcelles de la ville de Goma. Les données de terrain ont été traitées sous Excel et QGIS pour produire des graphiques et avoir une base de données qui a permis la représentation spatiale de nos résultats.

Les résultats obtenus montrent que la valeur économique du bâti dans les deux quartiers varie suivant trois zones d'espace distinctes : (1) les zones d'espace située le long des routes principales qui affichent les valeurs économiques les plus élevées, (2) les zones d'espace occupées par les grandes structures telles que les écoles, les hôpitaux, ...., que nous avons appelé dans ce travail, « structures isolées », qui affichent les valeurs économiques moyennes et (3) les zones à l'intérieur des avenues qui affichent les valeurs économiques les plus faibles.

L'évaluation par rapport à l'impact des coulées de lave a montré qu'en cas d'une éruption semblable à celle de 2002, les zones qui seraient les plus impactées sont les zones le long des routes principales et les structures isolées, c'est-à-dire les zones à grandes et à moyennes valeurs économiques. Des tels résultats peuvent être utilisés par les gestionnaires des catastrophes pour savoir comment répondre aux crises en cas d'une éventuelle éruption du Nyiragongo dont les coulées de lave affecteraient la ville de Goma.

**Mots clés :** Volcan Nyiragongo, Valeur économique, bâti, Coulées de lave, Ville de Goma.

## ABSTRACT

The city of Goma is located in the Lake Kivu basin and faces to multiple geological hazards including volcanic hazards from Virunga volcanoes and earthquakes hazards that are generated by the activity of the East African rift. Specifically, in relation to volcanic hazards, the main risk comes from the lava flows that are likely to affect Goma in case of eruption of Nyiragongo volcano which is located at about 15 km only from the city. The buildings and the population are therefore at risk from these lava flows. In such conditions, it is important to assess the vulnerability of the population and their property to know how the whole could withstand the shock of a future lava flow. This component of vulnerability includes the ability of a person or property to sustain harm from a natural or man-made event.

The present study aims to evaluate the economic value of the buildings of the Virunga and Murara districts of the city of Goma. It seeks to know: what and how much would be lost in terms of economic value of the buildings in these two districts in case of a future eruption of the Nyiragongo volcano that could reach the city. The objective is to evaluate and to locate the variation of the economic value of buildings.

Using an Orthophoto image of very high resolution (17 cm) made by the Royal Museum of Central Africa (RMCA, Belgium), the built areas in our study area were determined and the fieldwork was planned. This field work consisted of investigating the buildings and submitting survey questionnaires to the architectural engineers and to the commission agents of the parcels in the city of Goma. Field data were processed in Excel and QGIS software to produce graphs and to have a database that may help for the spatial representation of our results.

The obtained results show that the economic value of the buildings in the two districts varies according to three distinct zones of space: (1) the zones of space located along the main roads which display the highest economic values, (2) the areas of space occupied by large structures such as schools, hospitals, ..., which we called in this work, "isolated structures", which display the average economic values and (3) areas of space within avenues which display the lowest economic values.

The evaluation compared to the impact of lava flows showed that in case of an eruption similar to that of 2002 eruption, the areas that would be most impacted are the areas along the main roads and the isolated structures. This are the areas with large and medium economic values. Such results can be used by disaster managers to know how to respond to crises in case of a possible eruption of Nyiragongo whose lava flows would affect the city of Goma.

**Key words:** Nyiragongo volcano, Economic value, Buildings, Lava flows, City of Goma.

## **Acronymes**

MRAC : Musée Royal de l'Afrique Centrale

OFDA: Office of Foreign Disaster Assistance

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PAM : Programme Alimentaire Mondial

RCD : Rassemblement Congolais pour la Démocratie.

RDC : République Démocratique du Congo

RVB : Rouge-Vert-Bleu

UNDRO : United Nations of Disaster Relief Organisation.

ULB : Université Libre de Bruxelles

UK : United King dom

UNISDR: United National International Strategy of Disaster Reduction

USD : United States Dollars

## **Liste des tableaux**

**Tableau N° 1** : Division administrative simplifiée de la ville de Goma

**Tableau N° 2.** Nombre des bâtiments enquêtés sur terrain dans les 3 parties de notre zone d'étude.

## **Liste des figures**

**Figure 1.** Localisation du Volcan Nyiragongo Par rapport à la ville de Goma (RDC) et Gisenyi (Rwanda) et présentation des coulées de lave de l'éruption de 2002

**Figure 2.** Carte de localisation de la Zone d'étude

**Figure 3.** Esquisse du système de plomberie volcanique et la séquence des événements au cours de l'éruption du Nyiragongo de 2002,

**Figure 4.** A gauche : Image landsat ETM 7, obtenue en 2003 qui montre en couleurs sombres les coulées de lave de l'éruption du Nyiragongo de 2002. A droite : Cartographie des coulées de lave (couleur rouge) et des fissures éruptives (couleur jaune) de l'éruption du 17 Janvier 2002.

**Figure 5.** Les dégâts laissés par l'éruption de Janvier 2002.



**Figure 6.** Image Google earth montrant l'expansion de la ville.

**Figure 7.** La vie normale à Goma a repris quelques années après l'éruption.

**Figure 8.** La ville de Goma sur le flanc sud du Nyiragongo.

**Figure 9.** Première catégorie de bâtiments observés sur terrain suivant le coût de construction : bâtiments en Briques ou bloc-ciments avec ou sans colonne de béton armé

**Figure 10.** Deuxième catégorie des bâtiments observés sur terrain suivant le coût de construction : bâtiments en planches de bois (A) et (B), en tôles galvanisées (C) et en en Bâche (D).

**Figure 11.** Extrait de l'orthophoto de la ville de Goma prise par photographie aérienne à plus haute résolution en Juillet 2017.

**Figure 12.** Exemple d'un guide de terrain élaboré pour l'échantillonnage de l'ilot N°4

**Figure 13.** Exécution de l'outil de Géo-traitement de l'orthophoto pour le raffinement de la classification

**Figure 14.** Carte des bâtiments enquêtés dans la zone d'étude

**Figure 15.** Exemples des éléments utilisés pour déterminer la taille de l'échantillon sur l'Orthophoto.

**Figure 16.** Petite portion de l'image classifiée (en bleu) superposée à l'image non classifiée (autres couleurs) qui a permis l'obtention des surfaces bâties. Les lignes droites de couleur rouge représentent les différentes grilles.

**Figure 17.** Comptage des bâtiments suivant leurs matériaux de construction.

**Figure 18.** Comptage des bâtiments suivant leurs matériaux de construction, appréciation générale sur toute la zone d'étude.

**Figure 19.** Histogramme de Répartition des bâtiments dans le secteur d'étude suivant les trois zones d'investigations choisies.

**Figure 20.** Comptage des bâtiments suivant les types d'activités y exercée.

**Figure 21.** Comptage des bâtiments suivant les types d'activités qui y logent, appréciation générale sur toute la zone d'étude.

**Figure 22.** Comptage des bâtiments suivant les prix des bâtiments.

**Figure 23.** Comptage des bâtiments suivant les prix des bâtiments, appréciation générale sur toute la zone d'étude.

**Figure 24.** Représentation spatiale des valeurs économiques des bâtis observés dans les quartiers Virunga et Murara.

**Figure 25.** Histogrammes et rosaces d'appréciation globale des trois paramètres observés dans l'évaluation de la valeur du bâti dans les quartiers Virunga et Murara.

**Figure 26.** Carte des coulées de lave superposées aux valeurs économiques observées dans la zone d'étude.

**Figure 27.** Vue panoramique de la coulée Est de l'éruption de 2002, dans la ville de Goma. Source : Favalli et al., (2006)

**Figure 28.** Carte de susceptibilité d'ouverture de points d'éruption dans les champs de lave du Nyiragongo et du Nyamulagira (Barette, 2017)

**Figure 29.** Carte de probabilité d'invasion des coulées de lave dans les champs de lave des volcans Nyiragongo et Nyamulagira (Barette, 2017)

**Figure 30.** Comparaison entre la surface couverte par des coulées de lave du Nyiragongo lors de son éruption de Janvier 2002 (contours en bleu) et les coulées simulées pour les futures éruptions (couches des couleurs allant de jaune à rouge).

# Table des matières

|       |  |                                    |
|-------|--|------------------------------------|
| 1.    | Introduction .....   | 1                                  |
| 1.1   | Contexte et pertinence .....   | 1                                  |
| 1.2   | Objectifs de la recherche et question.....   | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| 2     | La zone d'étude .....  | 7                                  |
| 2.1   | Localisation de la zone d'étude. ....  | 7                                  |
| 2.2   | Le Volcan Nyiragongo : un aléa important .....   | 8                                  |
| 2.2.1 | L'éruption de Janvier 1977.....  | 9                                  |
| 2.2.2 | L'éruption de Janvier 2002.....  | 10                                 |
| 2.3   | La ville de Goma, une ville vulnérable et susceptible des pertes en cas d'une éruption ..... | 16                                 |
| 2.3.1 | Brève historique de la ville de Goma .....   | 16                                 |
| 2.3.2 | Goma : une ville exposée à des multiples aléas d'origine géologiques.....                    | 18                                 |
| 2.3.3 | Contexte social et économique .....  | 21                                 |
| 2.3.4 | Contexte politique et gestion des risques .....  | 23                                 |
| 3     | Méthodes et données .....  | 24                                 |
| 3.1   | Les Données .....  | 25                                 |
| 3.1.1 | Les données de la télédétection .....  | 25                                 |
| 3.1.2 | Les données de terrain .....   | 28                                 |
| 3.2   | La Méthodologie .....  | 33                                 |
| 3.2.1 | Utilisation de la télédétection. ....  | 33                                 |
| 3.2.2 | Utilisation des données de terrain.....  | 35                                 |
| 4     | LES RESULTAT .....   | 41                                 |
| 4.1   | Paramètres définissant la valeur économique du bâti dans les quartiers Virunga et Murara     | 41                                 |
| 4.1.1 | Les matériaux de construction des murs du bâtiment.....                                      | 41                                 |
| 4.1.2 | Activités à l'intérieur des bâtiments .....  | 44                                 |
| 4.1.3 | Prix des bâtiments.....  | 48                                 |
| 4.1.4 | L'emplacement du bâti .....  | 51                                 |
| 4.2   | Représentation spatiale de la valeur économique du bâti dans les deux quartiers .....        | 52                                 |
| 5     | Discussion des résultats .....   | 54                                 |
| 5.1   | Paramètres définissant la valeur économique du bâti dans les quartiers Virunga et Murara.    | 54                                 |
| 5.2   | La valeur économique du bâti et l'aléa des coulées de lave. ....                             | 56                                 |
| 5.2.1 | Illustration par rapport aux coulées de lave de 2002 .....                                   | 57                                 |
| 5.2.2 | Illustration par rapport aux probables futures éruptions.....                                | 60                                 |
|       | Conclusion.....  | 64                                 |
|       | Bibliographie .....  | 65                                 |
|       | Les annexes .....  | 69                                 |

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte et pertinence

Les Catastrophes naturelles constituent une menace majeure pour la sécurité des populations et le développement de nombre de pays du monde (Michellier, 2017). L'UNISDR définit le terme catastrophe comme étant « la rupture grave du fonctionnement d'une communauté ou d'une société impliquant d'important impacts et des pertes humains, matériels, économiques ou environnementales que la communauté ou la société affectée ne peut surmonter avec les seules ressources » (UNISDR, 2009). Ces catastrophes sont causées par des aléas de différente origine : séismiques, volcaniques, climatiques, ... Pour aider à diminuer les niveaux des catastrophes, il est important de prendre en considération la notion de « gestion des risques » qui permet d'anticiper la situation et pouvoir prendre des mesures pour résister au choc une fois qu'il se produira. Cette notion de risque qui est plus importante dans la réduction des catastrophes est défini comme étant la possibilité d'occurrence d'un phénomène et son effet sur la vie humaine (UNISDR, 2009). Le phénomène s'appelle « Aléa » et les effets sur la vie humaine constituent ce qu'on appelle « Impacts socio-économiques » (Havenith, 2017).

Ainsi la formule du risque est donnée par :

**Risque = Aléa \* Impact socio-économique**

L'impact socio-économique a deux composantes essentiels : La vulnérabilité et la valeur exposée (Havenith, 2017). Dès lors on obtient l'équation de Fournier qui a trois composantes (Fournier D'Albe, 1979):

**Risque = Aléa<sup>1</sup> \* Vulnérabilité<sup>2</sup> \* Quantité d'éléments à risque ou valeur exposée<sup>3</sup>.**

Dans cette équation de Fourier, notre étude s'inscrit dans le cadre d'évaluer la troisième composante, donc la « Quantité d'éléments à Risque ou Valeur exposée » dans la perspective de déterminer la valeur économique du bâti exposé à l'aléa des coulées de laves du volcan Nyiragongo en République Démocratique du Congo.

---

<sup>1</sup> **Aléa** : un dangereux phénomène, substance, activité humaine ou condition qui peut causer des pertes humaines, des blessures, dégâts corporels ou autres impacts sur la santé, des destructions, la perte de moyens d'existence ou de services, des perturbations économiques et sociales ou des dommages environnementaux. Cet événement a une probabilité d'occurrence dans une période spécifique de temps et dans une région donnée et a une intensité donnée.

<sup>2</sup> **Vulnérabilité** : Les conditions déterminées par les facteurs/processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui augmentent la susceptibilité d'une communauté aux impacts de l'aléa. Peut-être divisée en vulnérabilité physique, sociale, économique et environnementale.

<sup>3</sup> **Quantité d'éléments à risque ou valeur exposée** : nombre (bâtiments, personnes, ...), valeur monétaire (remplacement des pertes), zone ou perception (importance des éléments à risques).

Cependant, une certaine équivoque existe entre différents auteurs sur la différence entre la notion de vulnérabilité et celle de valeur exposée (Barrete, 2017). Par exemple, Robertson (1995) décrit une méthode pour effectuer une évaluation des risques volcaniques au Mont St. Vincent en utilisant l'équation de Fournier d'Albe (1979) comme guide. Dans ses études, la vulnérabilité est définie comme la proportion de la valeur susceptible d'être perdue (Robertson, 1995). Lirer et Vitelli (1998) évaluent le risque que représentent les coulées de lave autour du volcan Vésuve en Italie pour les personnes et les biens et utilisent la définition de vulnérabilité de l'UNDRO (1979) et l'équation de Fournier d'Albe (1979) comme cadre conceptuel. Les éléments à risque considérés sont les personnes, la propriété et l'activité économique de la zone. Pour Lirer et Vitelli (1998), la vulnérabilité est le pourcentage de la valeur des éléments à risque susceptibles d'être perdus en raison d'un aléa spécifique. Ces auteurs utilisent le SIG pour cartographier le type d'utilisation du sol exposé à des coulées de lave et calculent la valeur économique des bâtiments exposés (Catherine Jane Lowe, 2010). Leone (2002) utilise le SIG et l'analyse spatiale pour quantifier la vulnérabilité liée aux risques volcaniques et sismiques en Martinique. Ici, la vulnérabilité est définie comme le niveau de dommages d'un élément exposé sur lequel agit un danger donné. Les fonctions de dommages sont utilisées pour calculer les pertes de stock de logements par cellule de 500m à travers l'île (Catherine Jane Lowe, 2010).

On comprend donc qu'il est difficile de détecter une différence nette entre la vulnérabilité et la valeur exposée vu ces intercalations qui se croisent dans certains champs d'application.

En ce qui concerne spécifiquement les aléas d'origine volcanique, les catastrophes qui en découlent se caractérisent par la destruction des objets (bâtiments, installations urbaines, ...), des pertes en vies humaines et des impacts significatifs sur l'environnement (Catherine Jane Lowe, 2010). Pourtant dans de nombreux pays du monde, on observe des agglomérations et des populations qui choisissent d'habiter près d'un volcan. Cela est dû non seulement au fait de la fertilité des sols volcaniques et à plusieurs autres facteurs souvent économiques.

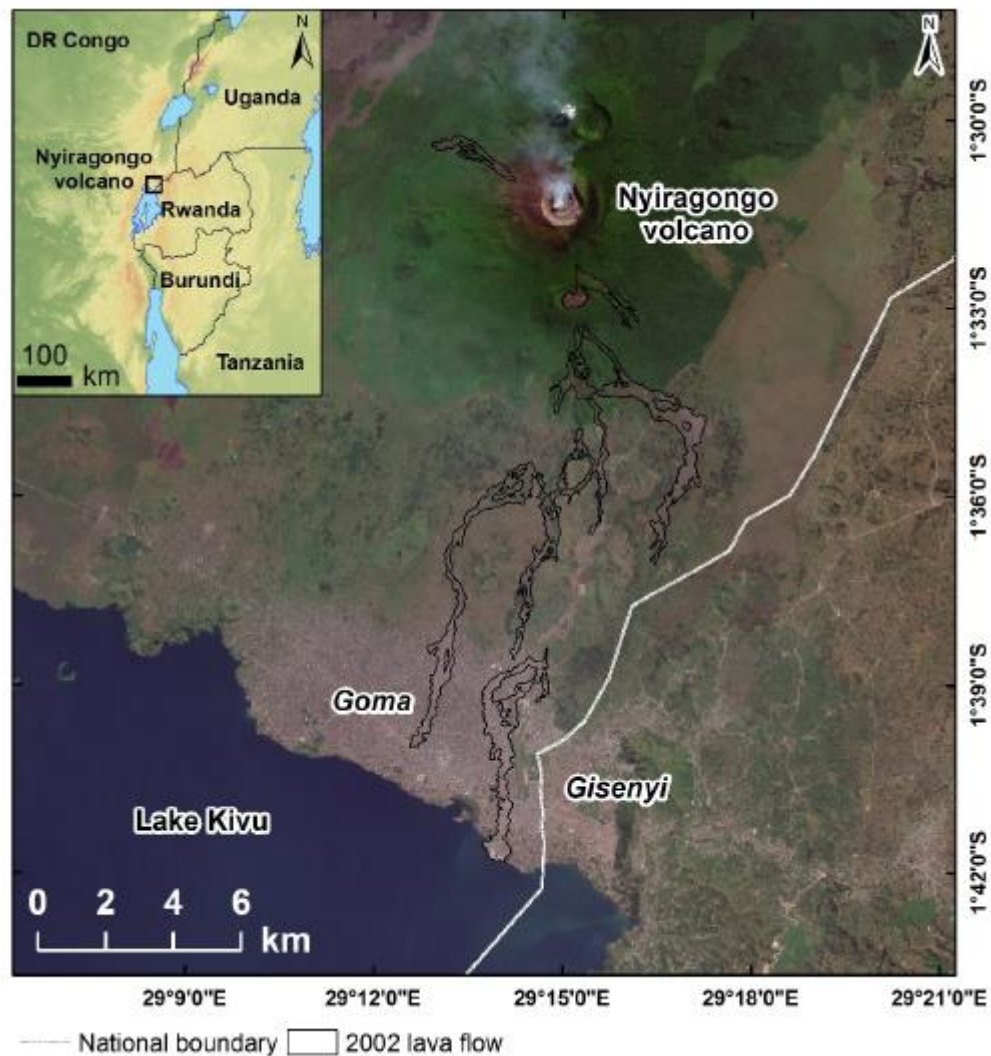
L'impact des catastrophes naturelles en terme des pertes économiques et vies humaines, ressort comme étant beaucoup plus lourd dans les pays du Sud que dans les pays du Nord (Michellier, 2017). Cette inégalité face aux risques naturels demeure avant tout conditionnée par un niveau de vie inférieur des pays du Sud par rapport aux pays du Nord, qui a pour conséquences une vulnérabilité plus importante dans ces pays du Sud (Cutter et al., 2003, Bétard et Fort, 2014 ; Wisner et al., 2004, Michellier, 2017). Ainsi l'évaluation des risques dans ces pays s'avère d'une importance capitale.

La République démocratique du Congo dans sa partie Est doit faire face à des aléas volcaniques et sismiques importants qui causent le plus souvent d'importants dégâts dans cette partie du pays. Parmi ces aléas, figurent les volcans de la chaîne des Virunga dans la branche Ouest du Rift Est Africain qui comprend huit principaux volcans, dont deux seulement sont actuellement actifs. Il s'agit du Nyiragongo et du Nyamulagira (Mavonga et al., 2010, Namogo et al., 2016a).

Le volcan Nyiragongo est un stratovolcan caractérisé par la présence d'un lac de lave semi-permanent (Smets et al., 2014), et de multiples coulées de lave anciennes (Demant et al., 1994). Dans son histoire documentée, le Nyiragongo est entré deux fois en éruption, en 1977 et en 2002, faisant des dégâts énormes aux villages environnants et à la ville de Goma qui est située à plus ou moins 15 km au sud. La plus récente éruption, celle de 2002 a recouvert 13 % de la zone géographique de la ville et a eu un coût représentant 80 % de son économie (Komorowski et al., 2004, Tedesco et al., 2007). Lors de cette éruption, aucun système de gestion des risques n'était en place dans la ville (Michellier et al., 2016) et donc aucune évaluation de la vulnérabilité ni de valeur exposée n'avait déjà fait objet d'une étude approfondie pour confirmer les chiffres attribués aux pertes économiques. Ces chiffres sont donc des estimations non vérifiées scientifiquement.

Le tout premier travail qui a vu le jour sur les aspects de la vulnérabilité dans cette région est celui de Michellier Caroline (2017) dans sa thèse de Doctorat. Elle se penche beaucoup plus sur la vulnérabilité sociale que sur celle des bâtiments. Barrette (2017) a également fait quelques observations sur la valeur économique du bâti dans la ville de Goma, avec des travaux basés sur la télédétection et sur des observations à plus petite échelle.

Le présent travail s'avère donc être le premier pas pour évaluer les pertes économiques en terme de bâti susceptibles d'être enregistrées en cas d'une éruption du volcan Nyiragongo, qui atteindrait la ville de Goma.



**Figure 1.** Localisation du Volcan Nyiragongo Par rapport à la ville de Goma (RDC) et Gisenyi (Rwanda) et présentation des coulées de lave de l'éruption de 2002. Le petit encart représente la localisation du Nyiragongo à plus grande échelle. Source : Barrette, 2017.

## 1.2 Objectifs de la recherche et question

Cette étude poursuit comme objectif principal d'évaluer la valeur économique du bâti qui est susceptible d'être perdu dans deux quartiers la ville de Goma (ceux Murara et Virunga) dans le cas d'une éruption du Volcan Nyiragongo qui atteindrait les deux quartiers. Nous projetons que ces investigations nous permettent d'avoir une répartition dans l'espace de la variation de la valeur économique du bâti de ces deux quartiers ainsi que d'avoir une valeur estimative chiffré de ce que peuvent coûter tous les bâtis.

Cette information sera donc très utile pour les décideurs qui, pour développer une réponse adaptée face à une crise due à une éruption volcanique, devraient au préalable savoir quoi et combien est (susceptible d'être) perdu, quelles sont les zones où on est susceptible de perdre plus de biens que d'autres.

Ainsi les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Obtenir une carte de micro zonation qui divise les deux quartiers en différentes zones en fonction de la valeur économique du bâti observée dans chaque zone,
- Obtenir une valeur estimative chiffrée de la valeur économique du bâti dans les deux quartiers,
- Mettre en évidence la relation entre l'aléa des coulées de lave (susceptible de détruire les bâtis) et la valeur économique du bâti (valeur exposée) observé.

La question principale associée à ces objectifs est « quelle est la valeur économique du bâti qui est susceptible d'être perdue dans les quartiers Murara et Virunga, en cas d'une éruption volcanique du Nyiragongo qui atteindrait les deux quartiers ? » et les questions spécifiques sont les suivantes :

- Quels sont les facteurs qui influencent la valeur économique du bâti dans les deux quartiers de la ville de Goma ?
- Quels sont les zones des deux quartiers qui représentent les plus grandes pertes dans le cas d'une éruption ? Lesquelles représentent des pertes plus faible ?
- Quel est le coût estimatif du bâti dans les deux quartiers en terme de valeur économique ?
- Comment la valeur économique du bâti peut être affectée par la destruction due aux coulées de lave du volcan Nyiragongo ?

Les réponses à ces questions nous permettrons d'exposer les informations nécessaires qui peuvent être mises, lors de l'expansion de ces études sur tous les quartiers de la ville, sur la table du décideur. Cela peut aider le décideur et les organismes humanitaires à répondre aux pertes économiques enregistrées dans le cas d'une éruption volcanique quand les coulées de lave atteindraient la ville de Goma.

Il est aussi à noter que nos investigations-ci sont prises comme un échantillon d'étude car nous ne considérons ici que deux quartiers seulement sur les 17 quartiers que compte la ville de Goma.

Des telles questions sont déjà prises en compte dans nombreux pays du monde. Elles ne font pas seulement partie intégrante des outils de gestion des risques, mais elles font aussi partie des projets d'aménagement du territoire. Cependant en RDC, elles restent sans réponse suite à la pauvreté, la faiblesse d'action et le manque d'initiative de l'Etat.

Le choix de ce sujet de Mémoire de Master porte sur la ville de Goma d'une part, car comme nous l'avons évoqué ci-haut, cette ville a déjà fait face à l'aléa des coulées de lave du Nyiragongo en 2002 et a subi des pertes économiques lourdes. D'autre part, nous avons choisi les quartiers Murara et Virunga car nous avons fait le choix de travailler sur un échantillon de la ville, et ces deux quartiers nous paraissaient les plus intéressants car ils sont plus actifs économiquement.

Afin d'approcher ces objectifs et questions de recherche aux méthodes et aux résultats que nous allons présenter par la suite, nous avons opté de présenter nos idées au fil du texte : Dans le premier chapitre,



nous introduisons notre travail en présentant son contexte et sa pertinence, nous y présentons aussi les objectifs et les questions de recherches liés au sujet. Dans le second chapitre, nous allons faire un zoom sur la zone d'étude en passant en revue la littérature sur l'aléa volcanique du Nyiragongo et sur la ville de Goma. Dans le troisième chapitre, nous présentons les données qui ont été utilisées pour réaliser ce travail et les méthodes utilisées pour leur traitement et l'interprétation des résultats. Dans le quatrième chapitre, nous présentons nos résultats sur la valeur économique du bâti qui aura une représentation spatiale et chiffrée. Dans le cinquième chapitre, nous discuterons nos résultats en montrant leur pertinence et en les confrontant à d'autres études qui ont été menées dans la même perspective. Et en fin nous finirons par une brève conclusion.

## 2 La zone d'étude

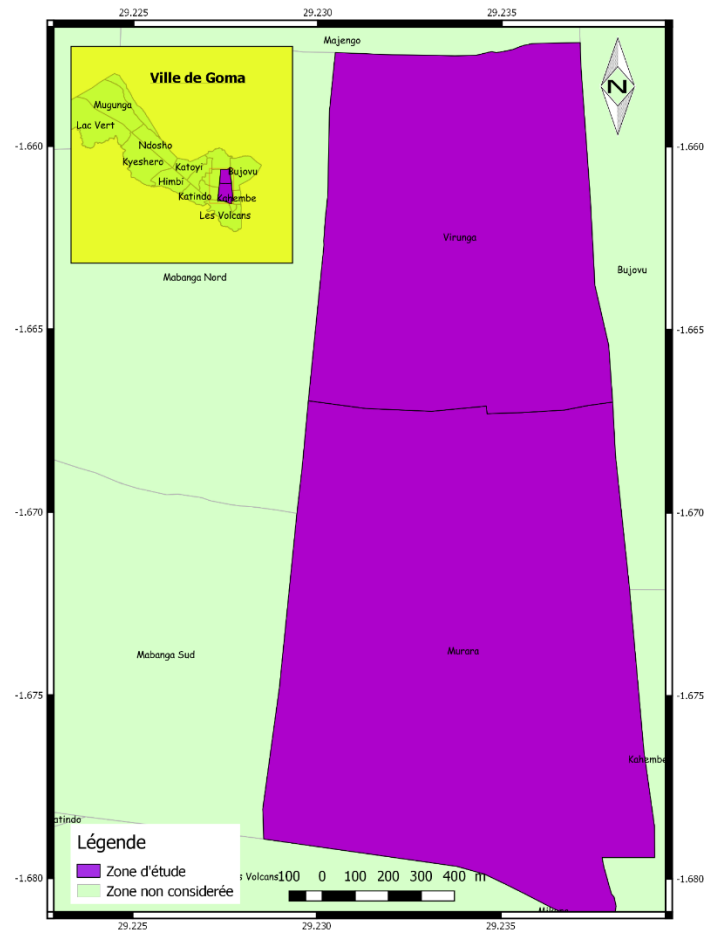
### 2.1 Localisation de la zone d'étude.

Les quartiers Murara et Virunga font partie des 17 quartiers que compte la ville de Goma. Elles sont localisées sur la Ouest de l'Aéroport de Goma, non loin de la frontière entre la RDC et le Rwanda. La ville de Goma est administrativement constituée de deux commune dont la commune de Karisimbi et la commune de Goma. Chaque commune est subdivisée en cellules, les cellules sont subdivisées en quartiers, les quartiers sont subdivisés en Avenues et les Avenues sont subdivisés en Nyumba<sup>10</sup>.

**Tableau N° 1** : Division administrative simplifiée de la ville de Goma

| Ville de Goma        |   |
|----------------------|---|
| Commune de Karisimbi | Quartier Mugunga                                    |
|                      | Quartier Ndosho                                     |
|                      | Quartier Katoyi                                     |
|                      | Quartier Kasika                                     |
|                      | Quartier Majengo                                    |
|                      | Quartier Mabanga Nord                               |
|                      | Quartier Mabanga Sud                                |
|                      | <b>Quartier Virunga</b>                             |
|                      | <b>Quartier Murara ( communément appelé Office)</b> |
|                      | Quartier Kahembe                                    |
|                      | Quartier Bujovu                                     |
| Commune de Goma      | Quartier Lac Vert                                   |
|                      | Quartier Keshero                                    |
|                      | Quartier Himbi                                      |
|                      | Quartier Katindo                                    |
|                      | Quartier Les Volcans                                |
|                      | Quartier Mikenno                                    |

<sup>4</sup> Le Nyumba 10 est une nomination créée dans la ville de Goma, représente une entité administrative d'un regroupement d'une dizaine des maisons qui sont contrôlées par un chef. Le chef du Nyumba 10 est aussi appelé Nyumba10. Dans la ville de Goma, les Nyumba 10 remettent le plus souvent leurs rapports chaque matin au chef d'avenue concernant la sécurité de leurs entités contrôlées.



**Figure 2.** Carte de localisation de la Zone d'étude.

## 2.2 Le Volcan Nyiragongo : un aléa important

Le volcan Nyiragongo (1,52 ° S, 29,25 ° E, altitude : 3469 m) est situé dans la branche occidentale du Rift est-africain, à environ 18 km au nord de la ville de Goma, en République démocratique du Congo (Sawyer et al., 2008). Il est considéré comme le volcan le plus actif d'Afrique (Tedesco et al., 2007 ; d'Oreye et al., 2008, Burgi et al., 2014)

Il fait partie de la chaîne volcanique alcaline des Virunga et produit des laves basaltiques à faible viscosité de leucite, ménilite et néphéline (Sahama, 1973, Sawyer et al., 2008). Le Nyiragongo et son voisin Nyamulagira sont les seuls volcans actifs de cette chaîne depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (Smets et al., 2015, Michellier, 2017). Le Nyiragongo est bien connu suite à son lac de lave permanent et à ses éruptions produisant des coulées de lave très fluides (Komorowski et al., 2004, Tedesco et al., 2007). Les deux éruptions historiques documentées, celle de 1977 et celle de 2002 ont été toute deux des éruptions fissurales (Michellier, 2017) et en connexion avec l'activité du Rift (Komorowski et al., 2004).

### 2.2.1 L'éruption de Janvier 1977

Le 10 Janvier 1977, le Nyiragongo entre en éruption pour la première fois de son histoire documentée. Cette éruption fut exceptionnellement courte (à peu près une demi-heure) mais très importante car plus de  $20 \times 10^3 \text{ m}^3$  de coulées de lave de néphéline liquide fondue ont été drainés sur plus de 20 km en moins d'une heure (Tazieff, 1977). Par suite cette éruption a lieu en même temps que celle du Nyamulagira qui avait commencé plus tôt le 20 Décembre 1966 (Tazieff, 1977).

Suivant la documentation disponible, avant cette éruption le Nyiragongo n'avait jamais historiquement montré une effusion de lave en dehors de son cratère alors que le Nyamulagira avait produit 13 éruptions de 1894 à 1977 dont certaines ont été étudiées et décrites (Verhoogen, 1939, Tazieff, 1950, Meyer, 1953, Egoroff, 1965). L'éruption du Nyamulagira avait commencé le 23 décembre 1976, elle était exactement semblable à beaucoup d'autres éruptions observées précédemment et son unique intérêt réside dans le fait que 19 jours plus tard, le Mont Nyiragongo situé à peine à une douzaine de kilomètres vers l'Est, est également entré en éruption (Tazieff., 1977). Selon Tazieff (1977), cette activité éruptive simultanée du Nyamulagira et du Nyiragongo est la seule observée jusqu'à présent dans la chaîne des Virunga depuis les observations effectuées en 1894 par l'Allemand GOTZEN.

De 1928 (probablement) à janvier 1977, l'activité du Nyiragongo a été caractérisée par la présence d'un lac de lave persistant dans son cratère principal (Tazieff, 1977, Michellier, 2017). L'éruption a mis fin à l'occurrence du lac de lave qui avait duré plus d'un demi-siècle et qui faisait la réputation du Nyiragongo dans le monde entier (Tazieff, 1977). La façon dont le lac de lave a disparu est assez simple: il a été drainé à travers un ensemble des fissures perpendiculaires (N-S et E-W) qui se sont ouvertes à des altitudes d'environ 2 200 m côté nord du complexe de Nyiragongo<sup>5</sup>, 2 400 m du côté ouest et 2 700 m du côté sud (Tazieff, 1977). Le retrait des millions de mètres cubes de lave contenue dans le cratère a été extrêmement rapide en moins d'une heure, et il est possible que cet écoulement se soit terminé à moins de la moitié de ce temps (Tazieff, 1977). Cette éruption a détruit des villages situés au Nord de la ville de Goma et plus de 10 km de route (Michellier, 2017). Au nord et à l'ouest, les laves étaient déversées dans la jungle de forêt, au sud et à l'est, ce sont sur des zones peuplées que la lave s'était déversée, anéantissant plusieurs villages. Quelque 60 à 300 personnes ont été brûlées vives (Tazieff, 1977). Heureusement, plus de 3 à 5 millions  $\text{m}^3$  de lave se sont déversés dans la forêt, si non, Goma et Gisenyi aurait probablement dû être détruit (Tazieff, 1977).

Plus de 800 à 1000 personnes ont perdu leurs maisons, les sources gouvernementales ont rapportées moins de 100 morts dus aux coulées de lave (Katamba Mukadi, 1978, Michellier, 2017), tandis que des

---

<sup>5</sup> Le complexe Nyiragongo signalé ici par Tazieff désigne un complexe de trois cônes volcaniques qui sont en chaînes. Il s'agit du Nyiragongo comme cône principale, de Baruta sur le flanc Nord du Nyiragongo et de Shaheru sur le flanc Sud du Nyiragongo.

articles plus récents suggèrent des valeurs beaucoup plus élevées atteignant jusqu'à plusieurs centaines des personnes tuées (Durieux, 2002, Tedesco, 2003, Michellier, 2017). Le nombre des victimes qui furent tués par la lave fut à la fois la conséquence de la vitesse très élevée des coulées atteignant jusqu'à plusieurs dizaines de km/h sur les flancs plus escarpés du volcan, et le résultat de la méconnaissance de la part de la population locale de la menace mortelle et dévastatrice des coulées de lave (Michellier, 2017). Se basant sur ces témoignages et ses propres observations de terrain, Tazieff estime une vitesse initiale de la lave de 100 km/h, qui ralentissait au fil du temps lors de son écoulement sur les pentes (Tazieff, 1977).

Vu les caractéristiques de cette éruption, elle a été un événement éruptif exceptionnel jamais enregistré dans le monde. C'est aussi l'éruption qui a tué plus des personnes de mémoire d'homme dans la Volcanique des Virunga. A la suite de cette éruption, l'activité éruptive de Nyiragongo s'est arrêtée pendant plus de 5 ans. Ensuite, un nouveau lac de lave persistant réapparaît dans le cratère principal du Nyiragongo, d'où s'échappe en continue un panache de gaz acides (Scarn, 2002). Les géantes fissures observées sur les pentes nord, ouest et sud du Nyiragongo par lesquelles était sortie la lave étaient d'environ 10 km de long, mais elles étaient certainement plus étendues, ce qui a fait que Tazieff donne une longueur totale de de 20 km pour les fractures de l'éruption du 10 janvier 1977, avec une largeur moyenne de 10 m (Tazieff, 1977).

### **2.2.2 L'éruption de Janvier 2002**

Après de nombreuses années de calme relatif du Nyiragongo, les volcanologues basés au département de Géophysique du CRSN Lwiro<sup>6</sup> au sud Kivu constatent l'existence des signes inquiétants (activité sismique anormale) au cours de quelques missions de terrain à Goma, six mois avant l'éruption du Nyiragongo de Janvier 2002. Le 17 janvier 2002 le volcan Nyiragongo entre en éruption (Komorowski, 2004, Tedesco, 2007).

Mavonga Tuluka Georges, actuellement Docteur en Séismologie et chef de département de séismologie à l'Observatoire Volcanologique de Goma, faisait partie de l'équipe de volcanologues qui avaient prévenu cette éruption. Il raconte : « *Nous étions basé à Lwiro au Département de Géophysique et nous devons faire des rotations à Goma pour analyser les données sismiques recueillies sur 2 stations sismographiques (Bulengo et Katala) installées aux environs des deux volcans Nyiragongo et Nyamulagira. Vers le mois de Juin 2001, on a commencé à observer à la station de Bulengo une sismicité anormale constitué des tremors ininterrompues, mélangés aux signaux longue période. On était en confusion et on se demandait quel volcan devrait entrer en éruption !!!, Comme on n'avait que*

---

<sup>6</sup> Le CRSN Lwiro : Centre de Recherche en Sciences naturelles de Lwiro est un Centre de Recherche créé en RDC depuis l'époque colonial Belge et qui avait pour mission promouvoir la recherche scientifique en Sciences naturelles en Afrique Centrale.

deux stations, il n'y avait pas moyen de localiser les signaux pour avoir la certitude du volcan qui allait entrer en éruption. A cause de cette confusion, nous nous sommes rendu au près du gouvernement du RCD qui dirigeait la ville pour solliciter les moyens financiers qui pouvaient permettre de bien mener les observations. Cependant le Gouvernement avait boycotté notre demande. Le vice-gouverneur qui avait accepté de nous recevoir dans son bureau avait promis de convoquer toutes les ONG qui œuvraient à Goma. Et après leur réunion, on nous avait dit que toutes les ONG ont donné 200 dollars américains pour soutenir les observations des Volcanologues. Avec cet argent on ne pouvait rien faire, on ne pouvait pas acheter de station sismique ou d'autre appareil d'observation. Cet argent nous a alors servi pour faire une montée au Volcan Nyiragogo. Mais quand nous sommes arrivés au sommet, le cratère était couverte d'une dalle, et cela était comme si rien ne se passait en profondeur. Dès notre retour de cette mission tout le monde a pris calme pourtant l'activité sismique observée aux stations restait anormale. Nous nous sommes de nouveau rendu au gouvernorat pour leur avertir que Nyiragongo allait entrer en éruption, cependant ils nous boycottèrent. Et le 17 Janvier 2002, le Nyiragongo entre en éruption, et c'est lorsque les membres du gouvernement avaient vu un grand panache de fumée sortir du Volcan et s'épanchait sur la ville, qu'ils sont venus nous chercher à notre bureau. Cependant, ils ne mettent toujours pas confiance en nous, car notre communiqué demandait aux gens de quitter la ville, mais certaines autres personnes avaient dû avoir parcouru avec l'hélicoptère le volcan et avaient fait un autre communiqué demandant à la population de rester calme car la lave n'atteindra pas la ville. Pourtant, vers 17h, un événement éruptif s'ouvre à Munigi (un village situé à plus ou moins un kilomètre et demi au nord de l'aéroport de Goma) duquel une coulée de lave sort passe par l'aéroport et dévaste le Centre-ville de Goma. La population ne savait à quel point il fallait se vouer. Elle ne savait pas rien faire, s'il fallait évacuer ou s'il fallait rester, et s'il fallait évacuer où faudrait-il aller ? Rien n'était planifié, rien n'était organisé. C'est ainsi qu'une grande foule de la population avait pris la direction vers le Rwanda, qui malheureusement avait refusé d'ouvrir la barrière immédiatement. La barrière fut ouverte après plusieurs heures. Les gens voyaient leurs maisons et leurs biens être brûlés pour les coulées de lave et s'étaient des pleures partout. »

- **Séismicité avant et après l'éruption de 2002.**

Six mois avant l'éruption une activité sismique anormale est observée. Elle est caractérisée par des tremors et des séismes longue période (Témoignage Dr Mavonga Georges). Cette activité fut observée sur deux stations sismologiques qui étaient installées dans la zone. Cependant vu l'insuffisance des stations, il n'y avait pas moyen de faire une localisation de ces événements et savoir d'où l'éruption devrait sortir.

Après l'éruption, on a observé une activité sismique intense et inhabituelle (Tedesco et al., 2007). Plus de 100 séismes tectoniques ( $M > 3,5$ ) localisés entre Goma (la rive du lac Kivu) et

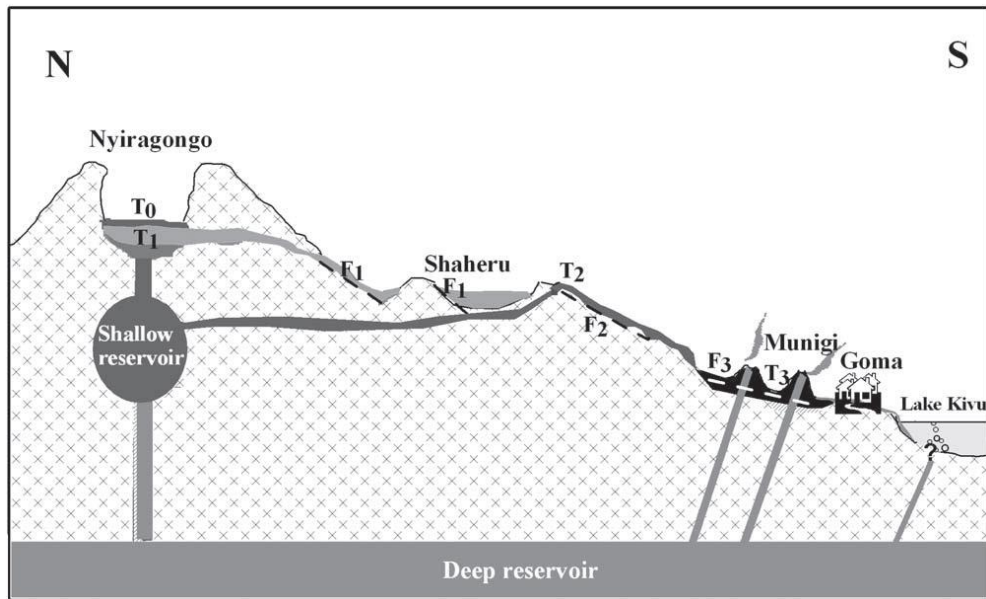
Nyiragongo ont été enregistrés pendant 5 jours après l'éruption. Le plus fort séisme (magnitude 5) a lieu à 00h14 (TU) le 20 janvier 2002 (Tedesco et al., 2003). Cette sismicité a été enregistrée localement par deux stations sismiques GVO (Bulengo et Katale), complétée après le 24 janvier 2002 par un sismomètre apporté de France (Komorowski et al., 2003). Cette activité sismique a eu un impact sur Goma et Gisenyi mais était également ressenti aussi loin que Bukavu (60 km au sud de Goma), Kigali (Rwanda, 120 km à l'est de Goma) et Kampala (Ouganda, 150 km NE de Goma), (Tedesco, 2007). Le nombre de tremblements de terre a progressivement diminué avec le temps, mais est resté anormalement à un niveau élevé (Tedesco et al., 2003).

La description ci-dessus des événements sismiques qui ont précédé, accompagné et suivi l'éruption de janvier 2002 du Nyiragongo suggère que le cadre tectonique régional a joué un rôle majeur dans la détermination des phénomènes observés et déclencheurs de l'éruption (Tedesco, 2007).

- **Brève historique de l'éruption de 2002**

L'éruption avait commencé à 08h25min. (heure locale), donc 06h25min. (Temps Universel) le 17 janvier 2002 avec la réouverture du système de fractures éruptives de 1977 (Tedesco et al., 2007). La fracture éruptive a commencé à une altitude de 2800 m, entre le cône central du Nyiragongo et le cratère de Shaheru (Komorowski et al., 2004, Tedesco et al., 2007). Des coulées de lave très fluides ont traversées les flancs forestiers SE du Nyiragongo et ont rapidement coupé la route au nord de Goma qui relie Goma à Rutshuru (Tedesco et al., 2007). Cette émission de lave très violente est interprétée en relation avec le drainage à grande vitesse du lac de lave remplissant le cratère du volcan. De cette façon, cet événement éruptif est apparu comme assez semblable à l'éruption précédente de 1977 (Baxter et al., 2002).

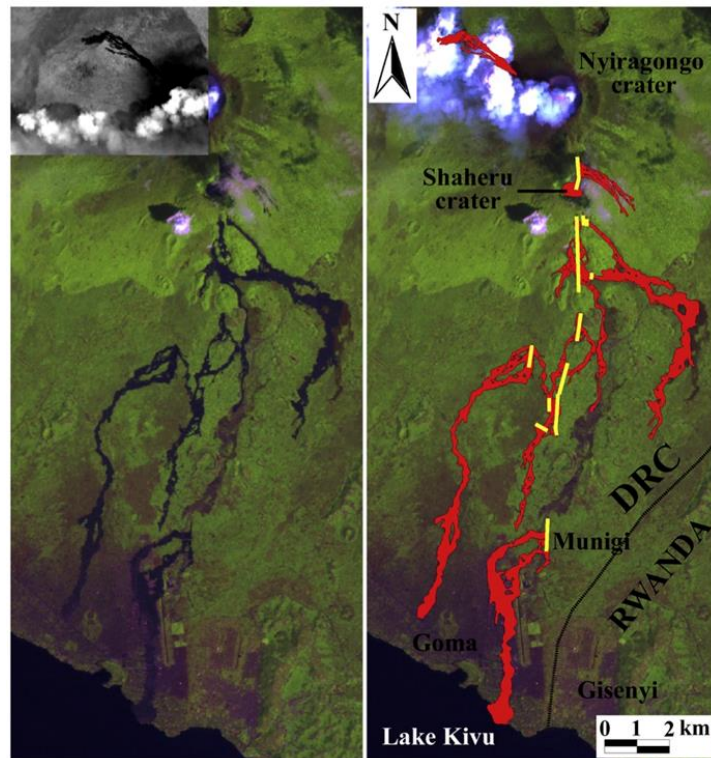
Dans les heures suivantes, un système de fracture sera actif et fut associé à l'activité éruptive qui se propagea à la base du volcan. Il s'est formé deux séries de fractures éruptives parallèles séparées d'environ 300 m à travers le flanc sud du cône de Shaheru puis elle se sont prolongées vers le bas, formant une série de grabens (5-10 m de large) à travers les champs de bananiers, des villages, et des structures volcaniques périphériques plus anciennes. Des coulées de lave sont sorti à partir de cette série d'événements à une altitude entre 2300 et 1800 m, dévastant plusieurs villages (Tedesco et al., 2007). Sur la même ligne de fissures, dans le village de Munigi et à seulement 1,5 km au NE de l'aéroport de Goma, un nouvel événement se forme et produit des coulées qui vont dévaster l'aéroport de Goma et le centre-ville pour finalement atteindre le lac Kivu plus tard dans la soirée (Komorowski et al., 2004).



**Figure 3.** Esquisse du système de plomberie volcanique et la séquence des événements au cours de l'éruption du Nyiragongo de 2002, tel que décrit par Tedesco et al., (2007). (1) T0, ancien événement de lac de lave Nyiragongo solidifié en 1994-1995 présent au fond du cratère de Nyiragongo; (2) T1 : la fracture F1 s'ouvre entre le cratère Nyiragongo et le cratère de Shaheru lorsque la lave fondue (1994-1995) du lac de lave de Nyiragongo inondait le cratère de Shaheru; (3) T2 : F1 continue à s'étendre vers le sud lorsque le premier lot de la lave fraîche peut-être du réservoir superficiel s'est rependu depuis des fractures situées plus bas que Shaheru sur le flanc sud du Nyiragongo; (4) T3 : F2 s'ouvre et s'étend ensuite au sud du village de Munigi, la lave fraîche du réservoir profond ressort immédiatement près du village Munigi, puis d'une chaîne de cônes de projections. Cette lave pénètre ensuite dans Goma et dans le lac Kivu (Tedesco et al., 2007).

Cette éruption qui avait débuté très tôt le matin a suscité la curiosité des habitants de Kayanza témoins d'une activité anormale ; ils envoyèrent ainsi un notable au bureau de la chefferie de Bukumu pour donner l'alerte (Michellier, 2017). Le temps que l'envoyé ne revienne, vers 10h30', les coulées de lave avaient déjà envahi cette zone et amorçaient leur descente vers le Sud (Michellier, 2017). C'est en début d'après-midi que le système de fractures s'ouvre au sud du village de Munigi (voir figure 4). C'est la lave issue de cette fracture qui avait envahi la centre-ville de Goma ainsi que le lac Kivu ( Favalli et al., 2006)





**Figure 4.** A gauche : Image landsat ETM 7, obtenue en 2003 e qui montre en couleurs sombres les coulées de lave de l'éruption du Nyiragongo de 2002. A droite : Cartographie des coulées de lave (couleur rouge) et des fissures éruptives (couleur jaune) de l'éruption du 17 Janvier 2002. Source : Favalli et al., (2006).

La zone est envahie par des coulées de lave très fluide qui prennent la direction de Goma et de son aéroport (Komorowski et al., 2004, Michellier, 2017). Au total ce sont des millions de m<sup>3</sup> de lave qui s'écoulent, relativement lentement, dans la ville en deux directions principales (Allard et al., 2002, Baxter et Ancia, 2002, Komorowski et al., 2004, Michellier et al., 2017).

Les émissions de lave stoppèrent au niveau de la plupart des événements dès le matin du 18 janvier, excepté au niveau de la fracture du Munigi où une activité fut observée dans la matinée du 19 janvier, l'éruption a donc duré environs 48heures (Komorowski, et al., 2004).

Après l'éruption, l'activité volcanique a repris quelques mois plus tard dans le cratère principal, formant depuis mai 2002 un nouveau lac de lave stable et un panache volcanique riche en gaz qui est détecté jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres à l'ouest du volcan (Vaselli et al., 2012)

Depuis 2002, le flux de SO<sub>2</sub> du cratère principal du Nyiragongo a été estimé par TOMS (spectromètre de cartographie de l'ozone total) à 60 000 tonnes / jour (Carn et al., 2002).

- **Quelques dégâts causés par l'éruption de Janvier 2002**

Le nombre de morts au cours de l'éruption aurait été 170, et jusqu'à 350 000 personnes ont fui l'avancée de la lave, principalement vers l'est jusqu'au Rwanda voisin (Tedesco, 2007).

Malgré que l'éruption semblait s'arrêter, la lave fondue a continué à couler vers le lac Kivu pour quelques jours de plus. Cette lave a créé un delta d'environ 800 m de largeur et 120 m de longueur qui, selon des enquêtes submersibles (Baxter et al., 2002), se sont étendus dans le lac jusqu'à une profondeur de 60 m (Tedesco et al., 2007). Les coulées de lave ont détruit un tiers de la piste de l'aéroport, le principal centre d'affaires et commercial de Goma, et les maisons de plus 120 000 personnes (Tedesco et al., 2007). Entre 60 et 100 personnes sont mortes le 21 janvier à la suite d'une explosion d'une station de carburant entourée de lave chaude et environ 470 ont été signalés blessés avec des brûlures, des fractures et / ou une intoxication au gaz (Tedesco et al., 2007). Entre 300 000 et 400 000 personnes ont évacué la ville et l'éruption a laissé des dizaines et des centaines de victimes (Allard et al., 2002 ; Komorowski et al., 2004 ; Tedesco et al., 2007).



**Figure 5.** Les dégâts laissés par l'éruption de Janvier 2002. (A) et (B) source : IRIS, (2002) les coulées de lave détruisent tous les bâtiments et les routes les coupant généralement en deux et stoppent le transport. (C) source : Merry Rocks, (2015). Les coulées de lave attaquent les lignes électriques. Ce qui peut provoquer des catastrophes multiples. (D) source : Licentie Trefwoorden, Janvier ( 2002): même les voitures sont ensevelies par les coulées de lave

## **2.3 La ville de Goma, une ville vulnérable et susceptible des pertes en cas d'une éruption**

### **2.3.1 Brève historique de la ville de Goma**

La ville de Goma, située à 15 km au sud de Nyiragongo, n'était qu'une petite ville de 50 000 habitants quand l'éruption de 1977 s'est produite (Tedesco et al., 2007). Après plusieurs catastrophes humanitaires, le génocide rwandais en 1994 et la guerre civile qui sévit encore dans le pays (de 1996 à aujourd'hui), Goma s'est étendue vers le nord en direction du volcan, avec un important afflux de personnes de la campagne environnante (Tedesco et al., 2007). Actuellement, la population de Goma est presque de 800 000 habitants (Michellier, 2017), avec le volcan Nyiragongo situé à seulement 15 km de la ville, il est impossible d'ignorer les multiples dangers volcaniques auxquels les habitants de Goma sont confrontés.

L'historique du développement urbain de Goma est bien repris dans la thèse de Caroline Michellier, 2017, qui malgré la rareté des données dans la région avait essayé de reconstituer l'histoire de Goma. Ici, nous donnons seulement quelques lignes tirées de son impressionnant manuel.

Historiquement, le site de Goma est un terrain Rocaillieux, choisi en premier lieu en fonction de considérations militaires (Michellier, 2017). Toute la ville de Goma est construite sur des roches volcaniques qui sont les résultats des éruptions successives du volcan Nyiragongo.

A la fin du XIXème siècle, Goma est un simple point de transit entre le lac Kivu et le lac Edouard d'une part et le Masisi et le Rwanda d'autre part. Il devient en 1906 un poste militaire à la frontière entre le Congo et le Rwanda (Michellier, 2007). Au cours des années, Goma se développe peu à peu, elle a une vocation d'un petit centre touristique pour les populations expatriées vivant dans la région, suite à ses paysages séduisant et la création du Parc National Albert (actuellement appelé parc National des Virunga) en 1925. Malgré un démarrage plus lent que planifié par les Colons Belges qui occupaient la région, Goma devient peu à peu un centre touristique de renommé (Michellier, 2017).

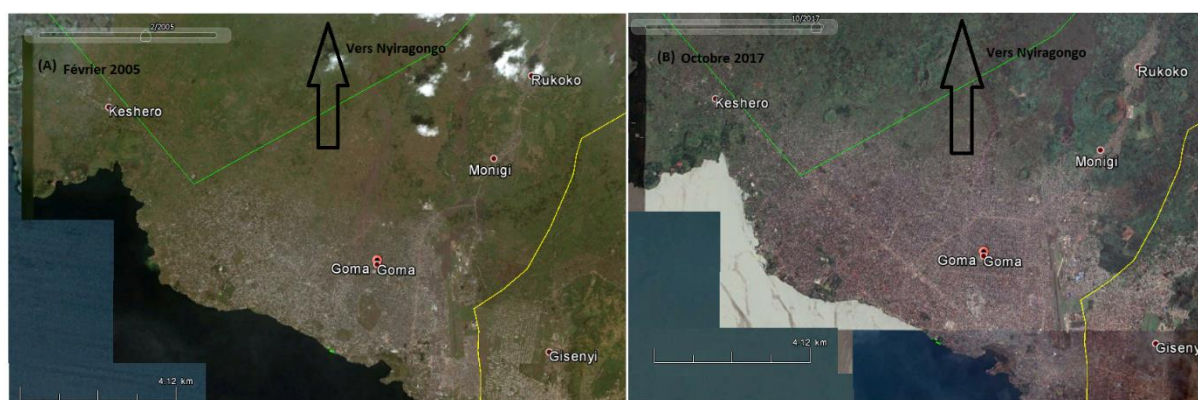
Dans les années 1950 la croissance démographique de Goma est extrêmes rapide et dès les années 1951, le chef-lieu du district du Nord Kivu passe de Rutshuru à Goma. La ville devient alors un centre administratif et économique qui s'accroît rapidement (Michellier, 2017).

Au cours des années 1970 et 1980, les opportunités économiques sont nombreuses, la vie est meilleure à Goma qu'à Bukavu (la ville voisine au Sud Kivu), et l'afflux de population se poursuit (Buscher, 2011). Un léger ralentissement de la croissance est observé à la fin des années 1970, en raison de l'éruption volcanique du Nyiragongo dont les coulées de lave s'épanchent au Nord de la ville de Goma (Michellier, 2017).

Il faudra attendre 1988, pour que Goma connaisse un nouvel élan : les divisions administratives sont révisées, le Nord Kivu devient une province et Goma en est la capitale. L'année suivante elle accède au statut de ville et est divisée en deux communes urbaines : la commune de Goma et la commune de Karisimbi. Jusqu'au début des années 1990, Goma est en pleine croissance, plusieurs projets de développement y sont exécutés et la ville double de superficie entre 1988 et 1994, elle est subdivisée en 13 quartiers (Nzangura Kapita, 1994, Michellier, 2017).

Au cours des années 1990 le Nord Kivu va connaître une situation de conflit quasi permanent dans lesquels figurent les conflits politiques, les conflits ethniques et les conflits des groupes armés qui s'affrontent pour posséder plus de territoires et de richesses (Michellier, 2017). En 1994, la province accueille environ 1 millions de réfugiés Hutu qui fuient le génocide au Rwanda et leur installation est considéré par nombreux habitants comme ayant été à l'origine de tous les conflits qui ont suivi (Trefon et Kabuyaya, 2016, Michellier, 2017) et qui continuent jusqu'à nos jours.

Suite à ces différents conflits, l'exode rural a sensiblement augmenté. La population quitte les territoires de Masisi, Rutshuru et Walikale, pas à cause de la famine mais pour fuir les hostilités des groupes armés. Une autre cause de l'augmentation sensible de la population à Goma est la stérilité du sol dans la province du Sud Kivu et principalement dans le territoire de Kabare qui oblige nombreuses personnes à quitter le Sud Kivu pour s'installer à Goma où ils peuvent facilement trouver à manger.



**Figure 6.** Image Google earth montrant l'expansion de la ville. (A) ville de Goma en 2005 : le nombre de bâtiments est encore faible. (B) Ville de Goma en 2017 : le nombre des bâtiments a sensiblement augmenté et la direction des nouveaux quartiers est vers le Nord, donc vers le volcan Nyiragongo.

Les conséquences de cette exode plus accélérée sont totalement remarquables sur terrain : hausse des prix des denrées alimentaires, augmentation des risques faces aux coulées de lave du volcan Nyiragongo. En effet, la population qui quitte les villages pour venir s'installer en ville est généralement pauvre, ce qui fait que chacun érige sa construction par rapport aux moyens financiers qu'il dispose. Plus de 95 pourcent de bâtiments qui sont construits dans les nouveaux quartiers sont des bâtiments en planches qui sont particulièrement vulnérables aux coulées de lave. De plus, l'absence d'un plan d'aménagement



du territoire, le manque de fixation des limites à ne pas dépasser par les autorités de la ville sont également des éléments qui font que les gens ont plus tendance à ériger les constructions vers les endroits les plus dangereux.

Les mesures effectuées sur les images Google earth montrent que les limites nord de la ville étaient situées à une moyenne de 14 Km du cône principale du Nyiragongo en 2005, tandis qu'en 2017, soit 12 ans plus tard, elles sont situées à 11Km seulement, soit une expansion de 3 Km et cela d'une manière anarchique.

### **2.3.2 Goma : une ville exposée à des multiples aléas d'origine géologiques.**

La ville de Goma est en proie aux différents aléas géologiques qui l'entourent de tous les côtés. Il s'agit des aléas volcaniques, sismiques et ceux reliés aux gaz naturels du lac Kivu.

#### **a. Les aléas volcaniques**

La ville de Goma et ses alentours ont comme principal aléa d'origine géologique la présence des volcans actifs de la chaîne des Virunga qui sont situés au Nord de la ville à une dizaine de Km seulement.

Le volcan Nyamulagira est situé à plus ou moins 25 Km au Nord-Ouest de Goma, est un volcan très actif avec une occurrence éruptive d'une éruption toutes les 2 à 4 ans ( Smets et al., 2011). Cependant la topographie barrée par son voisin Nyiragongo, ne permet pas aux laves issues de Nyamulagira de se diriger vers Goma. Leur direction principale d'écoulement est donc vers le Parc National des Virunga. Parmi ces volcans de la chaîne de Virunga, celui qui affecte le plus la ville de Goma est donc le Nyiragongo et plus particulièrement ses coulées de lave très fluides dont la descente rapide est généralement favorisée par la topographie en pente qui existe entre le volcan et la ville. En raison de l'activité actuelle du rift et des contraintes du champ géologique, Goma et les nombreux villages situés au pied du volcan sont tous menacés par les futures coulées de lave du Nyiragongo (Tedesco et al., 2007). Le volcan Nyiragongo affecte la ville par plusieurs de ses produits, notamment les coulées de lave, les gaz volcaniques mélangés à l'eau du lac Kivu et le CO<sub>2</sub>, communément appelé Masuku qui loge en bordure du lac Kivu.

Par exemple, lors de l'éruption de Janvier 2002 du Volcan Nyiragongo, les coulées de lave avaient détruit les routes, les villages et une grande partie des quartiers les plus riches de la ville (Quartier les Volcans et Quartier Murara) mais aussi les plus denses de la ville (quartier Virunga et quartier Majengo. Plus de 120000 personnes sont restées sans abris ; les marchés, les écoles et les églises qui étaient sur le passage de la coulée ont tous été brûlés (Komorowski et al., 2004). Après l'éruption, une cartographie plus rapide a estimé que 15% de la surface géographique de la ville avait été envahi par les coulées de lave (Komorowski et al., 2004). Des nombreuses habitations avaient été ensevelies par la lave, beaucoup de sans abri avaient donc trouvé refuge dans des familles d'accueil des proches, d'autres ont logé dans

des églises et des écoles (Michellier, 2017). Mais tous n'avaient pas eu la chance de trouver où passer la nuit, nombreux dormaient en plein air en espérant qu'une assistance humanitaire pouvait leur venir en aide dans un délai raisonnable (Mulengetsi Bulondo, 2002, Michellier, 2017).

Suite à cette éruption, les habitants de Goma avaient donc tout perdu, ils ont vu la lave détruire leurs maisons, leurs économies et toutes leurs possessions en quelques minutes seulement (Michellier, 2017). Pourtant, seulement quelques années après l'éruption, l'ensemble des coulées de lave situées dans la ville ont été reconstruites (Buscher, 2011 ; Michellier, 2017), d'ailleurs actuellement on ne reconnaît plus la trace des coulées de lave de 2002, car tout est déjà couvert par la construction de bâtiments dont certains luxueux.



**Figure 7.** La vie normale à Goma a repris quelques années après l'éruption. (A) les structures de base comme les routes, les lignes électriques et les stations d'essences ont été réhabilitées, (B) Des jolis bâtiments furent érigés dans le Centre-ville et dans les quartiers les plus riches de la ville (C) et (D) Bâtiments en planches ont été érigés sur les anciennes coulées. Ils seront susceptibles de bruler encore à la prochaine éruption, mais les propriétaires ne peuvent rien y faire suite à leur manque des ressources.

## **b. Les séismes du Rift Est Africain**

La ville de Goma fait aussi face à l'activité sismique. Il s'agit de l'activité sismique lié au rift du Kivu qui est la branche occidentale du rift Est africain. Goma est cependant bâti sur les roches volcaniques

consolidées, et les failles passant par la ville ne seraient pas très actives contrairement à celles que l'on observe au sud du Lac Kivu vers le Sud Kivu (Delvaux et al., 2016). Cependant les séismes qui ont eu lieu sur ces failles actives du côté de Kalehe, Katana (Sud-Kivu) et Bukavu (Sud Kivu) secouent également la ville de Goma, mais les dégâts ont toujours été insignifiants jusqu'à présent. Les seuls événements sismiques significatifs qui ont eu lieu dans la région sont ceux qui ont eu lieu lors et après l'éruption de Janvier 2002. En effet plus de 100 séismes ont été enregistrés et localisés en bordure du lac Kivu et même dans la ville (Tedesco et al., 2007). Ces séismes ont été les résultats de la réactivation des failles du rift par le flux magmatique lors de l'éruption (Komorowski et al., 2004, Wauthier et al., 2012).

### **c. Le gaz naturel dans le lac Kivu**

Le lac Kivu est situé entre la province du Nord Kivu, la province du Sud Kivu et la Rwanda. Tous les bassins de ce lac à l'exception du bassin de Bukavu contiennent différentes quantités de gaz, dont l'origine est associée à des conditions anaérobies entre différentes profondeurs du lac (Baxter et al., 2002).

Selon un document compilé par une équipe des scientifiques multidisciplinaires composée par le Professeur Jean-Pierre Descy de l'Université de Namur, Martin Schmid de l'Institut Fédéral Suisse de Science et Technologie Aquatique, et François Darchambeau de l'Université de Liège, le lac contient approximativement 60 kilomètres cubes de méthane (CH<sub>4</sub>) et 300 kilomètres cubes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Les deux gaz sont emprisonnés dans les couches profondes du lac (Descy et al., 2012). L'extraction de ce gaz pourrait être la première étape d'une production massive d'électricité, équivalente à plus de 100 milliards de kilowatt-heure (Descy et al., 2012). Au-delà de l'aspect économique, un autre enjeu pousse les scientifiques à prôner une exploitation du méthane : une trop grande concentration de ce gaz pourrait en effet provoquer une éruption catastrophique (Descy et al., 2012). « *Deux lacs camerounais contiennent également de grandes quantités de CO<sub>2</sub> dissous, en bien moindre quantité toutefois que le lac Kivu. Le lac Monoun a connu une éruption gazeuse en 1984, et le lac Nyos, dont l'éruption date de 1986, a tué près de 2000 personnes.* » (Tedesco et al., 2013)

Dans le cas du lac Kivu, la libération à la surface de l'entièreté du méthane et du CO<sub>2</sub> actuellement dissous dans ces eaux créerait un nuage de gaz s'élevant jusqu'à plus de 100 mètres au-dessus du niveau actuel du lac et ce nuage recouvrirait entièrement la région, et donc entre autres les importantes villes congolaises de Goma et de Bukavu (Descy et al., 2012). Le nuage toucherait ainsi au minimum deux millions de personnes qui décèderaient soit par l'éruption elle-même, soit à cause du nuage de gaz (Descy et al., 2012). Outre sa toxicité directe, le CO<sub>2</sub> étant plus lourd que l'air, celui-ci stagnerait au niveau du sol et chasserait l'oxygène vers le haut, asphyxiant toutes formes de vie aérobie, incluant donc les êtres

humains (Descy et al., 2012). Le danger des coulées de lave entrant et perturbant les eaux lacustres stratifiées n'a jamais été étudié auparavant. Une énorme masse de lave chaude pourrait engendrer une perturbation de la stratification du lac et déclencher une remontée des gaz, entraînant une mort nuage de dioxyde de carbone et de méthane sur une zone inconnue autour du lac Kivu (Baxter et al. 2002).

### **2.3.3 Contexte social et économique**

De nombreuses villes du Sud font face à une croissance démographique soutenue depuis plusieurs décennies (DI RUOCCO *et al.*, 2015). Cet accroissement est souvent non contrôlé et est à la base de l'occupation des zones peu propices aux implantations urbaines (CASCINI *et al.*, 2005, Balegamire 2017).

En RDC, depuis 1960 aucun programme d'aménagement du territoire n'a été poursuivi ou entrepris que ce soit par les pouvoirs publics ou par les entreprises privées, et ce malgré la forte croissance démographique enregistrée annuellement par l'Institut National des Statistiques (Balegamire, 2017).

La pauvreté et la faible éducation, le manque de programme de sensibilisation sont autant des problèmes sociaux qui rendent Goma plus vulnérable.

Le contexte de rareté des données rend les études plus difficiles. Exemple, la dernière évaluation de la vie socio-économique à Goma date de 2002. Elle a été faite à la suite de l'éruption de 2002 qui avait amené l'ONG Save the Children (UK) avec la participation du PAM sur financement d'OFDA, à s'intéresser à l'impact économique de cette éruption sur les ménages. L'étude avait pour but d'analyser les effets de l'éruption volcanique sur l'économie des ménages et le mode de vie des populations affectées afin d'informer la prise de décision sur les réponses à mettre en œuvre pour assurer la couverture des besoins minimum et contribuer au rétablissement de la population (Save the Children, 2002).

Selon ces études, l'habitant de Goma le plus pauvre vit moyennant plus ou moins 1 dollars américain par jour tandis que les aisés vivent moyennant des sommes allant même à plus de 10 dollars par jour (Save the Children, 2002). Ces conditions de vie ont changé, le coût de la vie a augmenté significativement voire même avoir doublé. La vie à Goma est devenue très difficile. Ceci est dû à un grand exode rural, qui a pu diminuer les productions agricoles qui venaient des zones rurales environnantes comme Masisi, et Rutshuru, et au problème de chômage car la population augmente du jour au jour, mais les emplois ne sont pas créés.





**Figure 8.** La ville de Goma sur le flanc sud du Nyiragongo. Une croissance démographique sensible avec des bâtiments serrés et visiblement moins résistant à des coulées de lave. Source Monusco, 2015

Vu ces conditions très difficiles, plus de  $\frac{3}{4}$  de la population est largement pauvre et ne peut disposer des moyens de construire que des petits logis en planche (bâtiments particulièrement vulnérables aux intempéries, aux températures des coulées de lave et aux feux). C'est pourquoi à Goma, il y a des incendies réguliers des bâtiments qui sont favorisés par deux principales conditions : (1) la majorité des bâtiments sont en planches des bois, (2) les bâtiments sont entassés les uns à côtés des autres car aucun plan d'aménagement n'existe ; donc quand un bâtiment brule, il transmet le feu à son bâtiment voisin, ainsi de suite, cette réaction en chaîne provoque une crise incontrôlable. (3) l'usage de charbons de bois comme principale source d'énergie pour la cuisine à la suite du manque d'électricité.

Dans les sections précédentes, nous avons signalé que l'impact de l'éruption de 2002 avait été très significatif : plus de 120 000 personnes avaient perdu leurs logements suite aux coulées de lave qui avaient envahi la ville. Les maisons en bois très près des coulées de lave ont subi les effets de la chaleur radiante qui enflamma tous les bâtiments adjacents (Baxter et Ancia, 2002).

### **2.3.4 Contexte politique et gestion des risques**

Le contexte politique s'inscrit dans le cadre d'une part de conflits armés dans la province du Nord Kivu et qui fait que l'exode rural vers Goma s'accroît et d'autre part par la faiblesse de l'Etat dans l'exercice de ses fonctions pour gérer les risques. Plus haut, nous avons vu comment l'éruption de 1977 avait tué beaucoup des gens et comment il n'y avait aucune intervention de l'Etat pour aider la population. Après cet épisode de 1977, aucune prise de conscience de gestion des risques n'a eu lieu, et il a fallu attendre la nouvelle éruption de 2002 pour se souvenir que le volcan existe ! L'absence d'institutions civiles et gouvernementales démocratiquement élues signifie qu'il n'y a pas de structures par lesquelles les organes directeurs peuvent prendre des décisions sur le risque sociétal et la planification à long terme au nom de la population de Goma. Ce dysfonctionnement social s'ajoute considérablement au danger que représentent les futures éruptions pour la population (Baxter et Ancia, 2002). Jusqu'en 2002, aucun plan de gestion des risques n'existait, d'ailleurs nous avons vu plus haut comment le gouvernement du RCD qui dirigeait de Goma à cette époque avait boycotté les scientifiques qui étaient venus lancer l'alerte sur une éventuelle éruption. L'éruption de 2002 avait commencé sans aucun système d'alerte ou un avertissement très tôt le matin du 17 janvier (Baxter et Ancia, 2002)., la population ne savait rien et par conséquent elle ne savait comment s'orienter ni comment se comporter.

Ce n'est qu'après cette éruption que l'OVG a été équipé par des appareils pour surveiller les deux volcans actifs et cela grâce au financement des organismes internationaux. La Protection Civile a également été mise en place pour s'occuper de gérer les choses en cas de crise. Cependant il s'est écoulé quelques années depuis la dernière éruption, la population a tendance à oublier ce qui s'était passé en 2002, et les mesures préventives ne sont plus prises en main avec sérieux par les décideurs, ce qui anéantit les institutions de surveillance et de gestion des risques. Suite au manque de financement et de bonne gestion, elles ne peuvent pas bien fonctionner.

### 3 Méthodes et données

Pour évaluer la valeur économique de quelque chose, l'élément le plus capital est de savoir d'avance quels sont les facteurs qui peuvent aider à le faire.

Plusieurs facteurs peuvent permettre d'évaluer la valeur économique du bâti dans la ville de Goma. Parmi ces facteurs nous pouvons citer :

- Le type des matériaux desquels les bâtiments sont construits,
- Le type d'activité qui est exercée dans le bâtiment,
- Le prix en terme monétaire du bâtiment
- L'emplacement du bâtiment.

Cependant, comme le temps d'investigation était court et aussi suite à la discrétion<sup>7</sup> des personnes qu'il fallait enquêter, nous n'avons pas pu avoir d'informations détaillées sur les types d'activité dans le bâtiment. C'est ainsi que seul trois types d'activité ont été considérés : activité commerciale, activité résidentielle (habitation) et activité non commerciale comme les écoles, les églises, ...

Par suite, les matériaux de construction des murs ont été les plus intéressants et non les toits car généralement il n'y a pas de grande différence dans les coûts des toitures qui sont toutes (ou presque) en tôles. En effet, tous les bâtiments en planche de bois ont presque le même coût de toiture et tous les bâtiments en briques ou blocs ciment ont également leur propre rang de coût de toiture. De plus, les blocs et les briques ont été considérés dans le même rang pour réduire le nombre des classes, car selon les investigations, un bâtiment construit en brique et celui construit en blocs-ciment ont presque le même coût.

Connaissant bien d'avance ces facteurs, et considérant les objectifs que nous nous étions fixés dès le début de ce travail, nous avons choisi les types de données qu'il fallait récolter et les méthodes qu'il fallait appliquer pour réaliser ce travail.

Les données regroupent des données de la télédétection et celles des investigations de terrain tandis que la méthodologie décrite ci-dessous reprend les méthodes utilisées pour l'échantillonnage sur terrain, pour le traitement des données, pour l'obtention des résultats, pour leur interprétation et pour leur discussion.

---

<sup>7</sup> Nombreuses personnes à Goma ont l'habitude d'être discret pour ne pas diffuser leurs fortunes, car ils ont généralement peur des voleurs qui peuvent les envahir une fois leur situation financière est connue.

### 3.1 Les Données

#### 3.1.1 Identification des types des bâtiments retrouvés dans les quartiers Murara et Virunga

Du point de vue matériaux de construction, 5 types des bâtiments ont été observés dans les quartiers Murara et Virunga de la ville de Goma :

- **Les bâtiments en briques cuites ou en bloc-ciment avec des colonnes des bétons armés** : ce sont des bâtiments avec des murs et des fondations bien renforcés. Construit dans un bon confort, il s'agit des bâtiments les plus coûteux sur tous les plans dans notre secteur d'étude. La plupart de ces bâtiments sont situés le long des routes principales et abritent des commerces, tandis que des bâtiments de cette catégorie à l'intérieur des avenues sont les bâtiments des « Bourgeois » de ces quartiers, donc des hommes riches. Plus de 90 pourcent des structures isolées sont également de cette catégorie. Ce sont les bâtiments qui ont plus de confort et qui sont de plus longue durée de vie par rapport à tous les autres bâtiments de deux quartiers. Leur construction demande énormément d'argent par rapport à la vie socio-économique des habitants de deux quartiers. Les bâtiments de ce type à l'intérieur des avenues et ceux des structures isolées sont généralement de grande dimension. Tandis que les bâtiments de ce type le long des routes sont généralement de petite dimension. Certains de ces bâtiments ont des étages, et d'autres n'en sont pas.
- **Les bâtiments en briques cuites ou en bloc-ciment sans des colonnes des bétons armés** : ce sont aussi des bâtiments en matériaux durables comme la première catégorie, cependant leur durabilité est très faible car ils n'ont pas du confort nécessaire pour résister à certains chocs. Ce sont généralement des anciens bâtiments. Il y en a aussi des nouveaux mais pas nombreux. Ces bâtiments sont occupés généralement les activités d'habitation familiale et se trouvent dans la plupart des cas à l'intérieur des avenues. Aucun bâtiment de cette catégorie n'a été répertorié le long des routes.
- **Les bâtiments en planches de bois** : ces sont des bâtiments faits de bois pour toute leur construction. Ils constituent la majorité des bâtiments abritant notre zone d'investigation et appartiennent à la classe de la population pauvre des quartiers. Leur dimension est généralement moyenne, avec en moyenne 10m de longueur sur 7m de largeur. Ils sont de très faibles confort et sont vulnérables aux intempéries.
- **Les bâtiments en tôles galvanisées** : Ils ont presque le même coût que les bâtiments en planches de bois, cependant ils sont généralement de petite dimension (5 m de longueur et 3m de largeur en moyenne). Ils appartiennent à la classe la plus pauvre de la population de deux quartiers. Cependant ils ne sont pas aussi nombreux dans notre secteur d'étude que les bâtiments en planches de bois.

- **Les bâtiments en Bâches** : Ces bâtiments sont les bâtiments les plus vulnérables, les moins chers de tous les bâtiments des deux quartiers étudiés et même de toute la ville de Goma. Ils sont généralement conçus comme des abris provisoires quand certaines populations quittent les milieux ruraux à cause de la guerre pour venir s'installer en ville, cependant pour des populations très pauvres, ces abris restent leurs demeures.

Du point de vue « coûts de construction », ces cinq classes de bâtiments peuvent être subdivisés en 2 sous classes : (1) celle des bâtiments en briques et blocs ciments (Voir figure 15), dont les coûts sont énormément élevés et (2) celle des bâtiments en planches de bois, en tôles galvanisés et en bâche (Voir figure 16), dont le coût de bâtir sont faibles.



**Figure 9.** Première catégorie de bâtiments observés sur terrain suivant le coût de construction : bâtiments en Briques ou bloc-ciments avec ou sans colonne de béton armé. (A) Bâtiment en briques avec colonnes de béton armé, confort et ornement, avec ou sans en étage. Il constitue la catégorie dont le coût de construction est assez élevé, (B) Bâtiment en bloc ciment avec colonne de béton armé, enduits des fines couches d'ordre centimétrique de sable fin pour l'isolation et d'une autre fine couche d'ordre millimétrique de peinture pour l'ornement, avec ou sans en étages. Son coût de construction est presque le même que celui de (A) si on se base sur leurs tailles et leurs dimensions. (C) Bâtiment en Bloc-ciment sans colonne de béton. Ils peuvent ou ne pas être enduits des couches de sable ou de peinture, leur confort est faible. Généralement ces genres de bâtiment n'ont pas d'étage, peut-être que les propriétaires ont peur que suite au manque de soutien par des colonnes de béton armés, ces bâtiments puissent s'effondrer sur eux-mêmes en cas d'un séisme de faible magnitude par exemple. (D) Les anciens bâtiments en briques. Ils sont des colonnes de béton armé et le confort est devenu faible suite à leur âge. Ils sont plus observés que dans le Quartier Murara qui était occupé par les colons belges.





**Figure 10.** Deuxième catégorie des bâtiments observés sur terrain suivant le coût de construction : bâtiments en planches de bois (A) et (B), en tôles galvanisées (C) et en en Bâche (D).

### 3.1.2 Les données de la télédétection

Une image de très haute résolution “ Orthophoto” a été utilisée pour réaliser cette étude. L’image a été prise en Juin 2017 par l’équipe des chercheurs du service des Risques Naturels du Musée Royal de l’Afrique Centrale (MRAC). En effet, pour constituer cette image, 6500 photos aériennes ont été prises lors d’un survol de la ville de Goma à basse altitude par hélicoptère, puis assemblées en une seule image. L’image résultante a été soumise aux travaux de prétraitement notamment l’amélioration de sa qualité et les différentes corrections qu’il était nécessaires de lui soumettre. Il est à noter que les processus relatifs à ces travaux de prétraitement de cette image relèvent du travail de Benoit Smets du MRAC.

Cette image a une résolution de 17 cm, et reprend toute la ville de Goma. Elle permet de repérer de nombreux détails. Cependant nous n’avons pas utilisé toute l’image de la ville ; nous n’avons utilisé que la partie reprenant les quartiers Virunga et Murara qui correspondent à notre zone d’intérêt.



**Figure 11.** Extrait de l’orthophoto de la ville de Goma prise par photographie aérienne à plus haute résolution en Juillet 2017. Source : MRAC, 2017.

L’orthophoto nous a permis :

- (1) D’identifier notre zone d’investigation,
- (2) De sélectionner les ilots d’échantillonnage et de tracer les guides de terrain
- (3) D’obtenir la portion de la surface bâtie et celle de la surface non bâtie dans notre zone d’étude, ce qui a permis de généraliser les résultats obtenus par échantillonnage.

### **3.1.3 Les données de terrain**

Les données de terrain ont été récoltées en trois parties :

- Les enquêtes réalisées bâtiment par bâtiment dans les ilots d’échantillonnage choisi au préalable sur l’orthophoto pour investiguer certains paramètres qui influencent la valeur du bâti,
- Le questionnaire adressé aux ingénieurs Architectes de construction des bâtiments en matériaux durables (en Briques et en bloc-ciments) comme en planches de bois dans la ville de Goma pour investiguer les prix que l’on peut associer à chaque type de bâtiment,
- Le questionnaire adressé aux commissionnaires des parcelles dans les deux quartiers étudiés dans le but d’investiguer comment la valeur du bâti est influencé par son emplacement géographique.

#### **a. Les enquêtes réalisées bâtiment par bâtiment**

Il est important de signaler ici que nous ne nous sommes pas rendu personnellement sur terrain. Nous avons développé des techniques de collecte de données avec l'aide de **Michellier Caroline** du MRAC qui est même notre encadreur pour ce travail et qui travaille dans la région sur la vulnérabilité depuis plus de 5 ans et grâce à un collègue de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG), doctorant à l'Université Libre de Bruxelles (ULB), **Muhindo Syavulisembo Adalbert** alors en séjour à Goma durant la période des investigations.

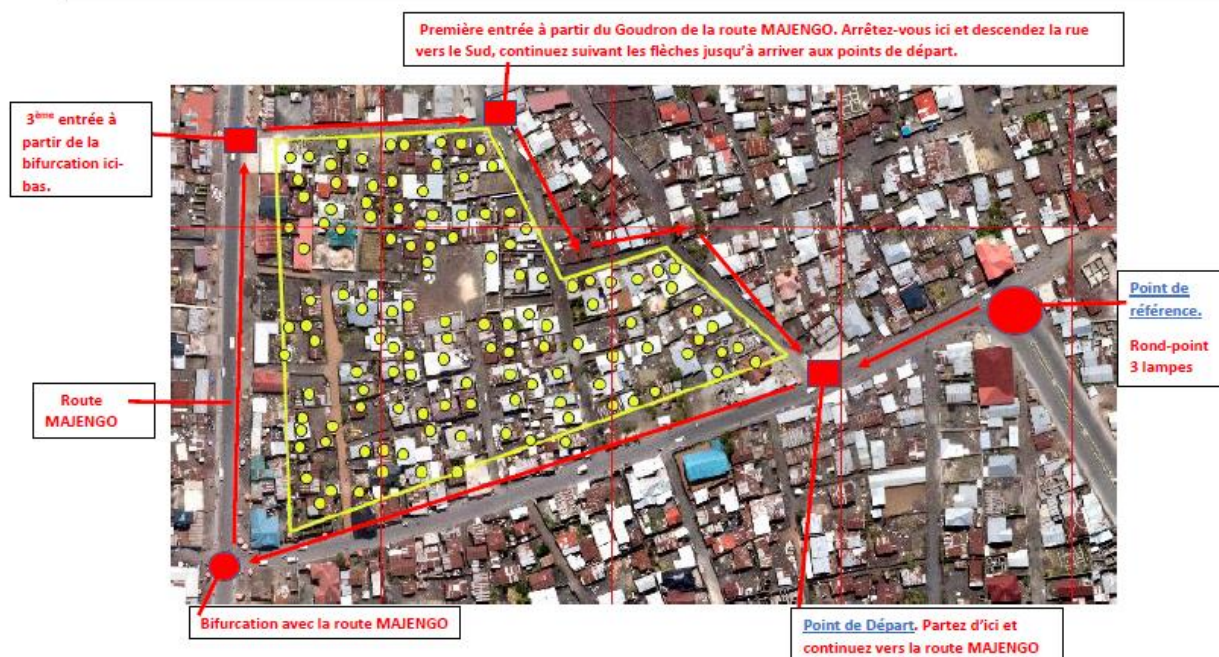
La collecte de données s'est donc organisée comme suit :

- A partir de l'orthophoto, élaborer des guides de terrain qui pouvaient aider à réaliser les enquêtes de terrain,
- Chercher des enquêteurs expérimentés dans ce travail et familiers avec ce terrain,
- Trouver un coordinateur et superviseur des travaux de terrain, en la personne de notre collègue, **Muhindo Syavulisembo Adalbert**,
- S'assurer de la transmission des données d'enquêtes en lignes, chose rendu possible grâce à la plateforme Kobotoolbox fonctionnant avec l'application Kobocollect sur des tablettes prêtées par l'Institut Géographique du Congo (IGC), partenaire du MRAC.
- .

Nous avons élaboré un plan de terrain et des guides de terrain que nous avons transmis aux enquêteurs par le canal du superviseur. Le superviseur a procédé à la formation des enquêteurs qui étaient déjà familiers avec le terrain et avec le logiciel de collecte des données. Le plan de terrain reprend le nombre des jours qu'il faut pour réaliser le travail et le nombre de bâtiment à enquêter par jour. Les guides de terrain ont été tracé sur les images, avec des repères de telle façon que l'enquêteur soit capable de voir qu'il doit échantillonner tel et tel bâtiment en se repérant à des endroits communément connus dans la zone. Ces guides ont été imprimés et plastifiés puis envoyés aux enquêteurs.



Ilot Echantillon N° 4 : Au total : 125 bâtiments. N'investiguez pas les bâtiments le long de la route Goudronnée. Chaque point Jaune représente un bâtiment et le polygone Jaune représente les limites de la zone à investiguer. Sur chaque image, commencez toujours par chercher le point de référence, puis le point de départ. Commencez votre repérage à partir du point de départ. Suivez bien les flèches pour une bonne orientation.



**Figure 12.** Exemple d'un guide de terrain élaboré pour l'échantillonnage de l'ilot N°4. Les points de référence, les points de départ et les flèches sont les éléments nécessaires qui ont aidé nos enquêteurs à bien enquêter la réalité sur terrain, malgré notre absence.

En ce qui concerne les outils Kobocollect et Kobotoolbox qui avaient été installés sur deux tablettes pour la réalisation des investigations, nous pouvons noter que KoboToolbox est une plateforme qui fonctionne avec l'application Kobocollect qui peut être installée sur un appareil Android. KoboToolbox est une suite d'outils pour la collecte de données sur le terrain à utiliser dans des environnements difficiles (Harvard Humanitarian Initiative, 2018). Ce logiciel est gratuit et open source. La plupart des utilisateurs sont des personnes travaillant dans des crises humanitaires, ainsi que des professionnels de l'aide et des chercheurs travaillant dans des pays en développement (Harvard Humanitarian Initiative, 2018). L'équipe de développeurs et de chercheurs est basée à Cambridge, mais passe aussi beaucoup de temps à collecter des données dans des enquêtes de population à grande échelle en utilisant leurs propres outils dans des endroits tels que RD Congo, Ouganda, Burundi, République Centrafricaine, etc. (Harvard Humanitarian Initiative, 2018). L'adaptation de KoBo Toolbox à des fins humanitaires était une initiative conjointe de l'OCHA, de l'Initiative Humanitaire de Harvard (HHI) et du Comité International de Secours (IRC), (Humanitarian Response, 2018)

Voilà en quelques lignes comment fonctionne le logiciel Kobocollect sous la plateforme Kobotoolbox :

- On commence par définir les objectifs de l'enquête et identifier précisément les informations que l'on cherche à collecter,
- On élabore un questionnaire d'enquête grâce à la plateforme Kobotoolbox (site internet) ; le questionnaire peut être élaboré facilement grâce aux différents formats de réponses possibles (réponses sous forme numérique, alphabétique, de tableau, de liste, avec ou sans classement, etc.),
- Sur le terrain, on utilise une tablette pour la collecte des données ; au préalable, le questionnaire a été chargé sur la tablette via l'application Kobocollect. Une fois le questionnaire téléchargé, il faut le remplir autant de fois qu'il y a d'objets à enquêter. Dans le cas de notre enquête, un questionnaire correspond aux informations portant sur un bâtiment ; à chaque bâtiment enquêté correspond un questionnaire rempli (voir annexe 1),
- Une fois que les données sont encodées dans un questionnaire (pour un bâtiment), on enregistre ces données ; elles sont dans un premier temps stockées sur la tablette ; dès qu'une connexion internet (wifi) est disponible, les données sont envoyées de Kobocollect vers Kobotoolbox.,
- Les données sont disponibles sur la plateforme Kobotoolbox et elles peuvent être téléchargées sous la forme de tableau Excel pour être analysées.

Ce qui est pratique avec cet outil c'est que quand l'enquêteur enquête un bâtiment, le logiciel associe automatiquement à ce point des informations importantes comme : les coordonnées géographiques du point, l'heure du début de l'enregistrement et l'heure de fin.

Il est à noter qu'à partir des caractéristiques morphologiques observées sur l'orthophoto, nous avons subdivisé nos observations de terrain en 3 parties notamment :

- Les bâtiments « à l'intérieur des avenues » qui affichaient leurs propres caractéristiques : ils sont de faibles dimensions, et nombreux d'entre eux sont groupés. Au total, 20 ilots d'échantillonnages sont prévus d'être enquêtés dans cette partie avec un effectif de 2280 bâtiments et donc une moyenne de 114 bâtiments (voir tableau N°2)
- Les bâtiments « le long des routes principales », (route Instigo-Majengo, route Instigo- Stade les Volcans et route Signers- 3 Lampes – Majengo et route 3 lampes – station Mutinga) : ils sont de moyennes dimensions et ne sont généralement pas groupés. Au total 384 bâtiments ont été identifiés le long des routes principales sur l'orthophoto (voir tableau N°2) . Ils seront tous enquêtés
- Les bâtiments les plus grands : ils se démarquent de tous les autres par leurs dimensions gigantesques par rapport à tous les autres bâtiments observés dans la zone sur l'orthophoto. Ils sont aussi « à l'intérieur des avenues », mais ont leurs propres caractéristiques. Dans ce travail, ces bâtiments ont été nommés « Structures isolées ». Au total 45 structures isolées ont été identifiées sur l'orthophoto (voir tableau N°2). Ils seront tous enquêtés

**Tableau N° 2.** Nombre des bâtiments enquêtés sur terrain dans les 3 parties de notre zone d'étude.

| <b>Nombre des bâtiments prévu d'être enquêtés à l'intérieur des avenues : échantillonnage par ilots</b> |                      |                                  |                      |
|---|----------------------|----------------------------------|----------------------|
| N° Ilot   | Nombre de bâtiments  | N° Ilot                          | Nombre de bâtiments  |
| Ilot Echantillon N° 1   | 91                   | Ilot Echantillon N° 11           | 90                   |
| Ilot Echantillon N° 2   | 116                  | Ilot Echantillon N° 12           | 120                  |
| Ilot Echantillon N° 3   | 121                  | Ilot Echantillon N° 13           | 110                  |
| Ilot Echantillon N° 4   | 125                  | Ilot Echantillon N° 14           | 110                  |
| Ilot Echantillon N° 5   | 111                  | Ilot Echantillon N° 15           | 120                  |
| Ilot Echantillon N° 6   | 107                  | Ilot Echantillon N° 16           | 100                  |
| Ilot Echantillon N° 7   | 113                  | Ilot Echantillon N° 17           | 120                  |
| Ilot Echantillon N° 8   | 116                  | Ilot Echantillon N° 18           | 150                  |
| Ilot Echantillon N° 9   | 210                  | Ilot Echantillon N° 19           | 50                   |
| Ilot Echantillon N° 10  | 100                  | Ilot Echantillon N° 20           | 100                  |
| Total des bâtiments prévus d'être enquêtés sur terrain : <b>2280</b>                                    |                      |                                  |                      |
| Total des bâtiments réellement enquêtés sur terrain : <b>1712</b>                                       |                      |                                  |                      |
| Moyenne des bâtiments prévus d'être enquêtés sur terrain : <b>114</b>                                   |                      |                                  |                      |
| Moyenne des bâtiments réellement enquêtés sur terrain : <b>90</b>                                       |                      |                                  |                      |
| <b>Nombre des structures isolées enquêtés : 45</b>  |                      |                                  |                      |
| <b>Nombre des bâtiments enquêtés le long des routes principales</b>                                     |                      |                                  |                      |
| Type de route   | Nombre des bâtiments | Type des routes                  | Nombre des bâtiments |
| Route Instigo - Majengo   | 117                  | Route Instigo - Stade le volcan  | 17                   |
| Route Signers- 3 lampes- Majengo  | 320                  | Route 3 lampes – station Mutinga | 30                   |
| Total des bâtiments enquêtés le long des routes principales : <b>484</b>                                |                      |                                  |                      |

Cette répartition a été nécessaire pour éviter les valeurs biaisées lors de la généralisation des résultats comme les investigations se sont effectuées par échantillonnage.

Au total l'enquête a duré 13 jours au cours desquels :

- 19 ilots d'échantillons incluant 1712 bâtiments qui ont été réellement investigués sur terrain « à l'intérieur des avenues ». Un ilot n'a pas été enquêté car il était inaccessible et tous les bâtiments planifiés pour l'enquête à partir de l'orthophoto, n'ont pas été tous vu par les enquêteurs.
- Tous les bâtiments le long des routes principales ont été investigués. Il n'a pas été question d'échantillonnage ici. Au total 484 bâtiments ont été identifiés le long de ces routes principales de notre secteur d'étude.
- Toutes les structures isolées ont été également investiguées. Au total, 45 Structures isolées ont été répertoriées dans le deux quartiers.

Lors de ces enquêtes réalisées bâtiment par bâtiment, les paramètres notés sont : Identité, Coordonnées géographiques, type de mur, type d'activité dans le bâtiment, dimension du bâtiment, et nombre d'étages du bâtiment. Un exemplaire de fiche correspondant à ces informations présentées sur Kobotoolbox est donné dans les annexes de ce travail.

#### **b. Questionnaire adressé aux ingénieurs architectes**

Ce questionnaire n'a pas utilisé de logiciel. Il a été élaboré au format PDF, envoyé au superviseur qui l'a ensuite imprimé et soumis aux ingénieurs Architectes. Le questionnaire portait sur le coût que peut représenter la construction de chaque type de bâti. Il a été soumis à 3 ingénieurs différents (chacun travaillant de son côté) qui ont pris le temps de combiner leurs propres expériences aux calculs pour trouver les couts qui pouvaient correspondre à chaque type de bâtiment dont nous avons demandé. Les fiches remplies nous ont été transmises par email par le superviseur.

Les informations reprises sur cette fiche sont : dimension du bâtiment, type de mur, nombre d'étage, prix du bâtiment en USD. Un exemplaire de fiche correspondant à ces informations est également repris en annexe de ce travail

#### **c. Questionnaires adressés aux commissionnaires des parcelles**

Comme le précédent, ce questionnaire n'a pas aussi utilisé de logiciel. Il a été élaboré au format PDF, envoyé au superviseur qui l'a ensuite imprimé et soumis aux commissionnaires des parcelles. Ce questionnaire a été adressé également à 3 commissionnaires des parcelles différents (chacun travaillant de son côté) dans les quartiers Murara et Virunga. Le questionnaire portait sur les facteurs qui influencent les prix d'une parcelle dans ces deux quartiers, la façon dont varient ces prix en fonction de ces facteurs et la valeur monétaire que l'on peut attribuer aux parcelles en fonctions des facteurs considérés. Un exemplaire de fiche correspondant à ces informations est repris en annexe de ce travail

### **3.2 La Méthodologie**

Différentes méthodes et techniques passant par les travaux de terrain, l'analyse des données, le traitement, l'interprétation et la discussion des résultats, ont été appliqués pour parvenir à produire le maximum d'informations possibles par rapport aux données disponibles.

#### **3.2.1 Utilisation de la télédétection.**

L'objectif d'utiliser la télédétection dans notre travail était :

- (1) Identifier sur l'orthophoto les bâtiments à échantillonner sur terrain,

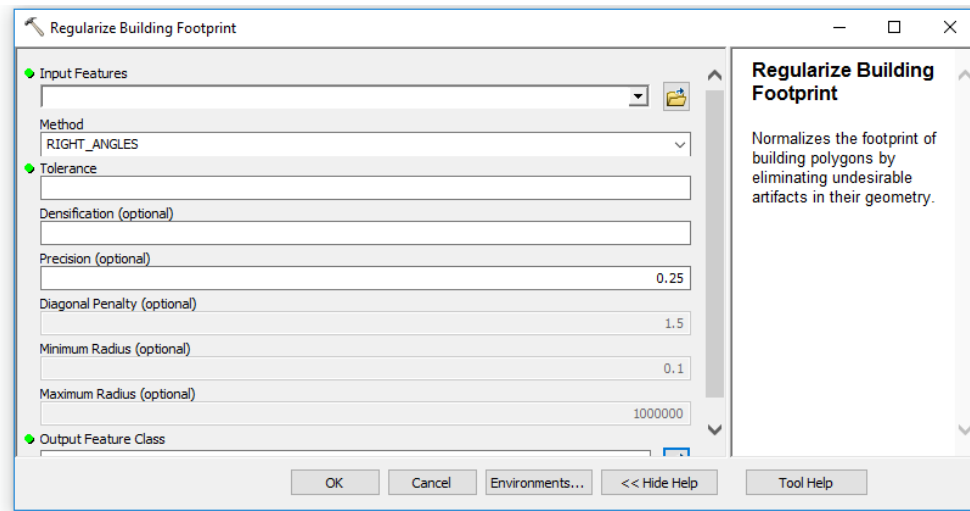
- (2) Avoir la carte d'occupation du sol reprenant deux classes (sols bâtis et sols non-bâties) qui permettra de déterminer les surfaces bâties et celles non bâties. Cette carte nous a permis d'étendre nos résultats d'enquête d'échantillonnage sur toute la zone étudiée.

Ainsi l'identification des bâtiments à échantillonner s'est faite durant la phase préparatoire du terrain. L'image a été introduite dans le logiciel de cartographie QGIS et les bâtiments à échantillonner ont été pris en ilots. Le choix des ilots pour échantillon n'a pas été fait par hasard, mais a été fait de façon à reprendre toutes les variations possibles (catégories des bâtiments) que l'on puisse observer « à l'intérieur des avenues » sur l'orthophoto.

Concernant la classification de l'image pour obtenir la carte d'occupation de sol de deux classes (surface bâti et surface non bâti), la collaboration avec Mr Nicholas Mboga doctorant de l'ULB a permis de bien réaliser ce travail. Pour ce travail notre contribution a consisté à tracer les zones d'entraînement pour tester l'efficacité de la classification. Ces zones d'entraînement ont ainsi permis de valider la classification.

L'orthophoto de 17 cm de résolution a été classifiée et utilisée pour créer une carte vectorielle des bâtiments de la ville de Goma. Les détails techniques utilisés dans la préparation des cartes classifiées sont décrits dans (Mboga, et al., 2018). En résumé, plusieurs classificateurs d'apprentissage automatique ont été évalués dans cette classification d'images aériennes RVB à très haute résolution, par exemple, les machines vectorielles de support, les réseaux de neurones convolutionnels, les forêts aléatoires et l'amplification des gradients extrêmes (Mboga, et al., 2018). Parmi ceux-ci, la meilleure approche consiste à utiliser des segments issus de l'analyse d'image basée sur les objets pour affiner le résultat de la classification du meilleur classificateur. Cette carte a ensuite subi tout une série d'étapes de post-traitement décrites comme suit :

1. Sélectionner et supprimer tous les polygones inférieurs à l'unité de cartographie minimale, dans ce cas, les polygones dont la surface est inférieure à 20m<sup>2</sup>. Il est possible d'utiliser d'autres mesures pour permettre l'enlèvement de polygones qui ne sont pas des bâtiments,
2. À l'aide de l'option « Régulariser l'empreinte du bâtiment » dans Arcmap, les empreintes des bâtiments sont normalisées et les artefacts inutiles sont supprimés. La méthode "Angles droits" est utilisée parce que la construction des astuces pour bâtis dans la ville de Goma est principalement définie par des angles droits.



**Figure 13.** Exécution de l’outil de Géo-traitement de l’orthophoto pour le raffinement de la classification.

Cependant la méthode présente un petit défi, car les bâtiments de Goma apparaissent en grappes (ils sont souvent soudés les uns sur les autres). Cela rend difficile la délimitation de chaque polygone de construction, même avec une interprétation visuelle (Mboga, et al., 2018).

### 3.2.2 Utilisation des données de terrain

#### a. La méthode d’échantillonnage

Comme nous l’avons signalé en introduction, nous avons fait le choix de travailler par échantillonnage. Nous avons effectué un échantillonnage par ilots des bâtiments. Au départ, nous avons planifié d’effectuer 20 ilots d’échantillonnage sur terrain ; malheureusement un ilot était situé dans le camp militaire de la prison centrale Munzenze de Goma, n’a pas été enquêté du fait du refus d’accès par les autorités. Nous avons donc travaillé avec 19 ilots, avec une moyenne de 114 bâtiments par ilot (voir tableau N° 2 dans la section données). Cependant, les enquêteurs n’ont pas pu échantillonner tous les bâtiments pointés sur l’orthophoto, car sur terrain, certains bâtiments peuvent être cachés derrière les murs d’autres bâtiments ou dans des enclos où l’accès est difficile. C’est ainsi qu’au lieu de 2280 bâtiments qui étaient planifiés pour être échantillonnés, 1712 bâtiments ont été réellement échantillonnés sur terrain (voir tableau N° 2 dans la section données).

La carte de tous les bâtiments enquêtés sur terrain est reprise à la figure 11 et donne les meilleurs éclaircissements à ce sujet.





**Figure 14.** Carte des bâtiments enquetés dans la zone d'étude



Comme les ilots d'échantillonnage ont été choisis uniquement à l'intérieur des avenues, au total 1712 bâtiments ont été échantillonnés (voir partie données). Il nous a fallu savoir alors : (1) Si cet échantillonnage est représentatif, (2) le nombre total des bâtiments abritant toute notre zone d'étude.

Pour y arriver, nous avons :

- (1) Isolé « les structures isolées » pour les traiter à part,
- (2) Isolé « les bâtiments le long des routes principales » pour les traiter aussi à part,
- (3) Choisi les ilots à échantillonner « à l'intérieur des avenues » pour les bâtiments qui restaient, car ils ont des tailles et des dimensions presque similaires.
- (4) Tiré aléatoirement ces ilots d'échantillon en évitant des endroits où une seule catégorie des bâtiments est rassemblée.

#### **Estimation du nombre total du bâti se trouvant dans notre zone d'étude.**

Pour obtenir le nombre total estimé des bâtiments se trouvant dans les deux quartiers de notre étude, afin que nous puissions trouver la possibilité de généraliser nos résultats, nous avons utilisé des calculs empiriques, en subdivisant notre zone d'étude en une maille rectangulaire des différentes grilles égales (Kakai et al., 2016). Nous avons calculé les surfaces bâties sur l'image classifiée en QGIS. Partant des résultats des surfaces obtenues et de la moyenne du nombre de bâtiments échantillonnés par ilot, nous avons calculé le nombre total de nos bâtiments se trouvant à l'intérieur des avenues, puis le nombre total de tous les bâtiments se trouvant dans notre secteur d'étude.



**Figure 15.** Exemples des éléments utilisés pour déterminer la taille de l'échantillon sur l'Orthophoto.



L'image classifiée devrait immédiatement nous donner le nombre total des bâtis se trouvant dans notre zone d'étude, malheureusement comme nous l'avons signalé plus haut dans la section « Utilisation de la télédétection » de cette méthodologie, bon nombre des bâtiments dans la ville de Goma se présentent en grappes, c'est-à-dire sont soudés les uns sur les autres, il a donc été difficile de faire une différence bâtiment par bâtiment. Aussi, la classification étant automatique, elle n'a pas tenu compte de certains bâtiments dont la réflectance est la même que le sol, comme les bâtiments en briques ou bloc ciments avec étages dont la construction est inachevée. Il s'agit des bâtiments pour lesquels on a coulé la dalle du premier ou deuxième étage il y a longtemps, puis au fil du temps ils ont pris la même réflectance que le sol.

C'est ainsi que pour associer la surface totale bâtie obtenue sur l'image classifiée, et au nombre moyen des bâtiments dans nos ilots d'échantillonnage, nous avons procédé comme suit :

- Superposer une grille d'une maille rectangulaire de 200 m sur 100 m, sur l'image classifiée,
- Superposer l'image classifiée au-dessus de l'image non-classifiée, ce qui nous a permis de :
  - Identifier les bâtiments non pris en considération par la classification automatique et pouvoir les intégrer dans nos calculs,
  - Identifier les bâtiments des structures isolées et ceux le long des routes principales pour les traiter à part.



**Figure 16.** Petite portion de l'image classifiée (en bleu) superposée à l'image non classifiée (autres couleurs) qui a permis l'obtention des surfaces bâties. Les lignes droites de couleur rouge représentent les différentes grilles.

Pour faire ces estimations, les informations disponibles sont :

- Surface totale bâtie calculée sur l'image classifiée :  $741261 \text{ m}^2$
- Surface d'une grille de la maille superposée sur l'image :  $20036 \text{ m}^2$
- Nombre total des grilles (zone bâtie seulement) :  $741261 \text{ m}^2 / 20036 \text{ m}^2 = 37$  grilles.

En exploitant les deux images superposées (l'image classifiée superposée au-dessus de l'image non classifiée, nous avons trouvé que :

- La surface bâties dans les structures isolées :  $122657 \text{ m}^2 = 6,12$  grilles
- La surface bâties le long des routes :  $62093 \text{ m}^2 = 3$  grilles
- La surface des bâties non pris en considération par la classification automatique :  $10293 \text{ m}^2 = 0,5$  grilles.

Ainsi nous pouvons dire que le nombre total des grilles bâties à l'intérieur de la zone échantillonnée c'est-à-dire « à l'intérieur des avenues » est  $37 \text{ grilles} + 0,5 \text{ grilles} - 6,12 \text{ grilles} - 3 \text{ grilles} = 28,38$  grilles.

Ainsi nous pouvons dire que le nombre total des bâtiments « à l'intérieur des avenues » est :

$28,38 \text{ grilles} * 114 \text{ bâtiments} = \mathbf{3235 \text{ bâtiments}}$

Les mesures effectuées sur les deux images superposées (celle non-classifiée et celle classifiée) montrent que la moyenne des surfaces des ilots d'échantillonnage est égale à la surface d'une grille. Nous pouvons alors dire qu'un ilot égal une grille et la moyenne des bâtiments se trouvant dans les ilots échantillonnés « à l'intérieur des avenues » est 114 bâtiments. Partant de ces observations, nous pouvons dire que le nombre total des bâtiments dans la zone d'étude (exclus les longs des routes principales et les structures isolées) est : **3235 bâtiments**.

Nous ajoutons en suite les bâtiments le long des routes et ceux des structures isolées (mais ici on considère qu'une structure isolée est égal à un seul bâtiment, bien que ça peut être une agglomération des bâtiments), on obtient :

$3235 \text{ bâtiments (à l'intérieur des avenues)} + 485 \text{ bâtiments (le long des routes principales)} + 45 \text{ Structures isolées} = 3765 \text{ bâtiments}$ . *Soit autours de 3700 à 3800 bâtiments se trouvent dans notre zone d'études*. Il ne faut pas oublier que les structures isolées ne sont pas des bâtiments uniques, ces sont des agglomérations de bâtiments, mais les bâtiments de chacune d'elles sont regroupés en un tout.

## **b. Traitement et analyse des données et discussion des résultats.**

Comme nous l'avons signalé dans la section « Données », les données de terrain nous ont été transmises en ligne sous forme de tableau Excel via la plateforme Kobotoolbox. Nous avons procédé d'abord au nettoyage du fichier des données Excel puis nous avons ajouté le fichier en QGIS pour en faire une base des données regroupant toutes les informations récoltées sur terrain y compris celle recueillies auprès des ingénieurs architectes de construction des bâtiments et auprès des commissionnaires des parcelles. Cette base des données a servi pour les calculs des statistiques, la production des graphiques et l'élaboration des cartes pour voir la variation spatiale de la valeur économique du bâti.

Des histogrammes et des diagrammes ont été élaborés dans Excel pour observer les variations en terme des nombres ainsi que les tendances.

Suivant les différentes valeurs estimées, une représentation spatiale sur une carte synthétique a été adoptée en QGIS, montrant les zones à grandes valeurs économiques, celles à valeurs moyennes et celles à faibles valeurs. Le prix total du bâti en terme d'unité monétaire a également été estimé par des simples calculs de sommes empiriques.

## 4 LES RESULTAT

### 4.1 Paramètres définissant la valeur économique du bâti dans les quartiers Virunga et Murara

Du point de vue bâtiments, trois zones morphologiques distinctes qui se démarquant l'une de l'autre ont été observées sur l'orthophoto. Il s'agit de :

- La zone à l'intérieur des avenues où nous avons fait des ilots d'échantillonnage,
- La zone le long des routes principales,
- La zone des structures isolées.

Ces trois zones sont bien visibles à tel point que si nous pensons à combiner leurs observations, nous risquons de fausser les résultats car il y aura certaines valeurs qui seront très élevées par rapport d'autres, ce qui fait que si on travaille ainsi, les résultats généralisés issus des échantillons risquent d'être biaisés. Nous avons ainsi choisi de présenter les observations de chacune de ces zones à part. L'idée est de comparer les observations dans chacune des zones et pouvoir faire une classification de leur valeur économique observée.

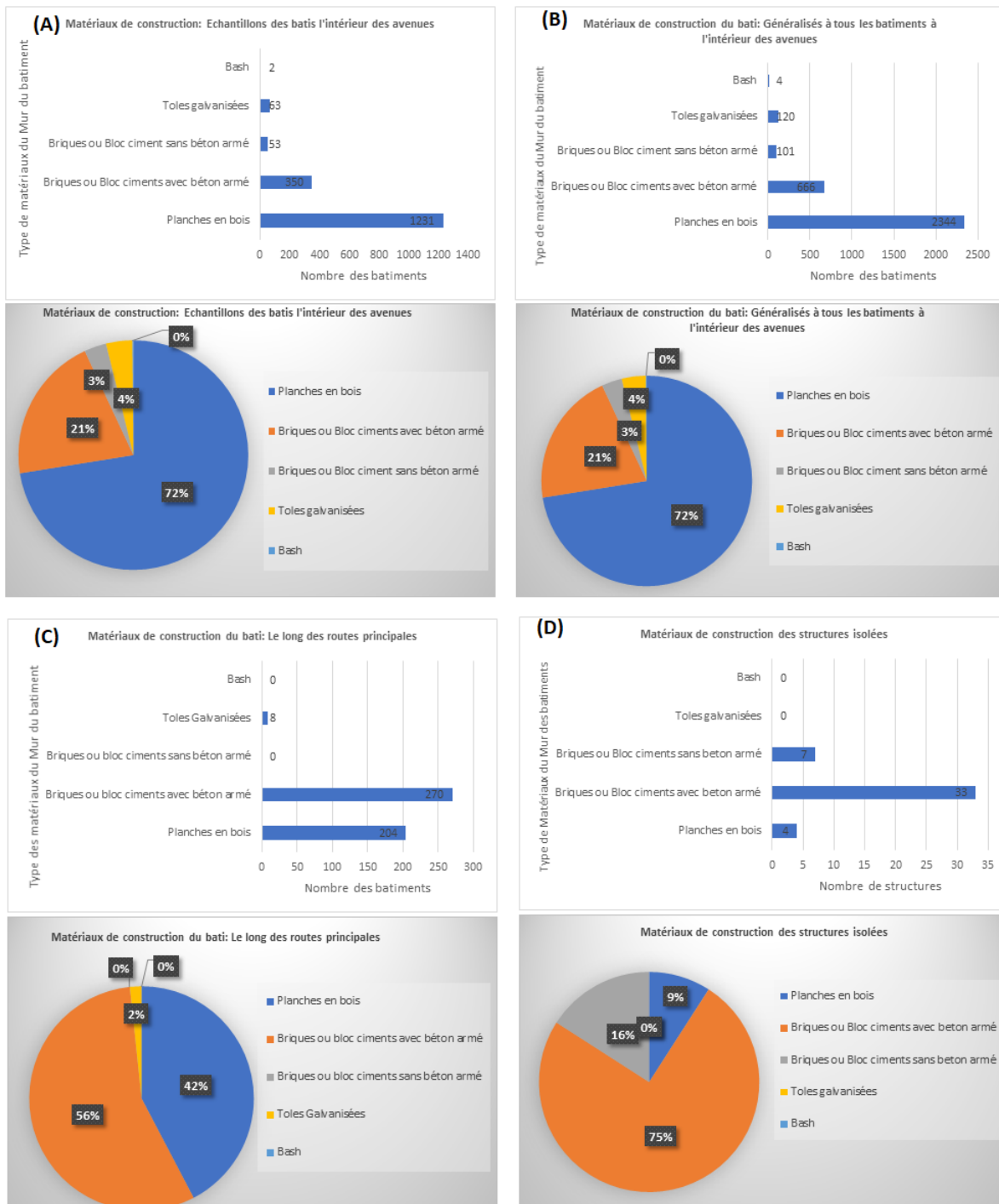
Etant donné que le secteur d'étude a été subdivisé en ces 3 zones, les observations des bâtiments ont été réalisées dans la zone d'échantillonnage, que nous avons nommé dans ce travail « *à l'intérieur des avenues* », tandis que les *bâtiments le long des routes principales* et ceux des *structures isolées* ont été tous enquêtés et traités à part. Dans cette section, les paramètres qui définissent la valeur économique du bâti sont donc présentés en suivant cette logique.

Parmi les paramètres qui influencent la valeur économique du bâti, nous pouvons citer :

#### 4.1.1 Les matériaux de construction des murs du bâtiment

Des observations montrent que :

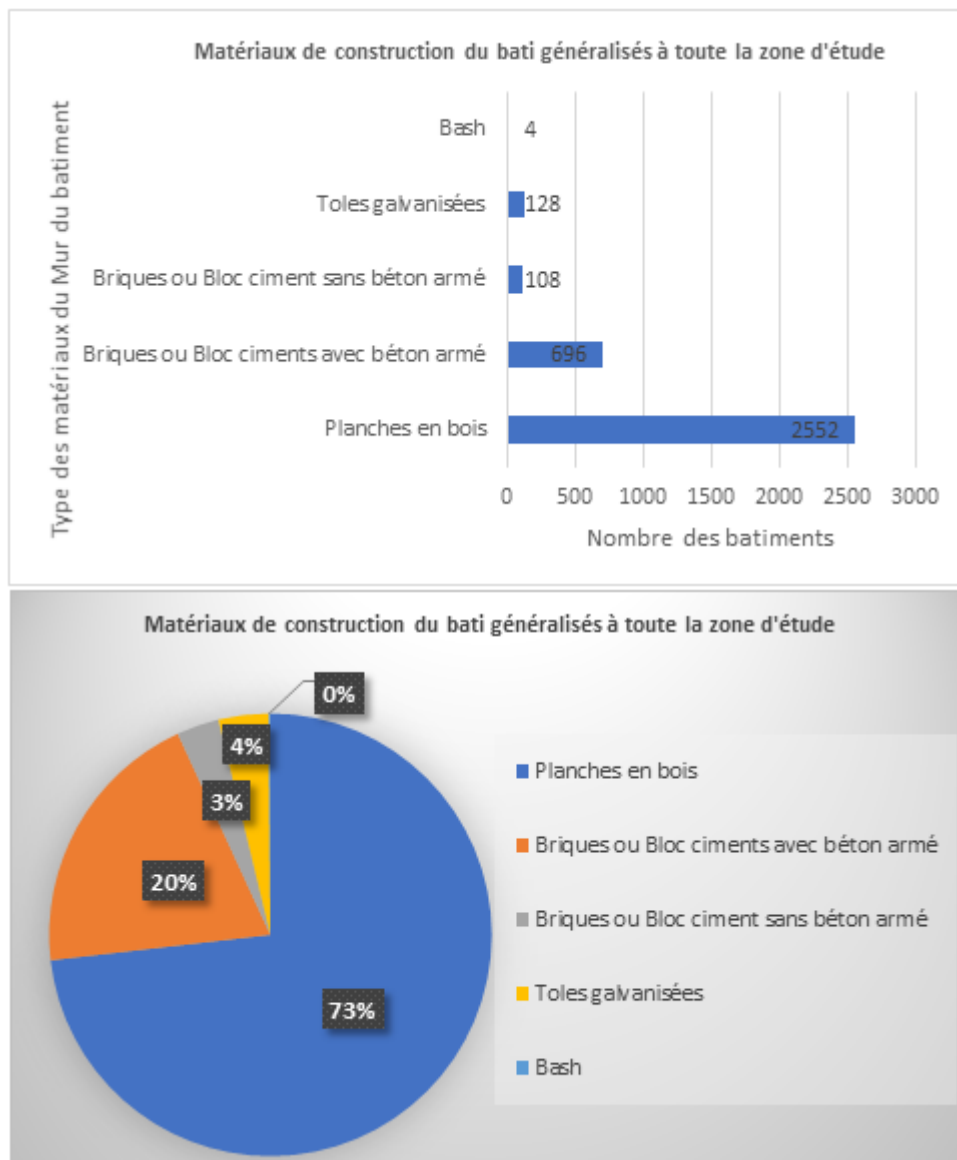
Sur les presque 1700 bâtiments échantillonnés sur terrain à l'intérieur des avenues, 1230 sont des bâtiments en planches de bois. Les résultats généralisés à l'intérieur des avenues font état de 2344 bâtis en planches de bois soient 71 % des bâtiments, sur un total estimé de 3235 bâtiments. Le nombre de bâtiments en briques ou bloc-ciment avec colonnes de béton armé est de 666, celui de ceux en tôles galvanisées est de 120 soit le 4 % du total, puis celui de bâtiments en briques ou bloc-ciment sans colonnes de béton armé qui est de 101, soit 3 % du total et en fin celui des bâtiments en Bâche qui est de 4 (Voir figure 16 (A) et (B))



**Figure 17.** Comptage des bâtiments suivant leurs matériaux de construction.

Le long des routes principales, où tous les bâtiments ont été investigués, sur un total de 482 bâtiments observés 204 soit 42% sont des bâtiments en planches de bois, 270, soit 56% sont des bâtiments en briques ou bloc-ciment avec colonnes de béton armé et 8 soit 2% sont des bâtiments en tôles galvanisées. Aucun bâtiment en Bâche ni en Brique ou bloc-ciment sans colonnes de béton armé n'a été observé le long des routes principales (Figure 17 (C)).

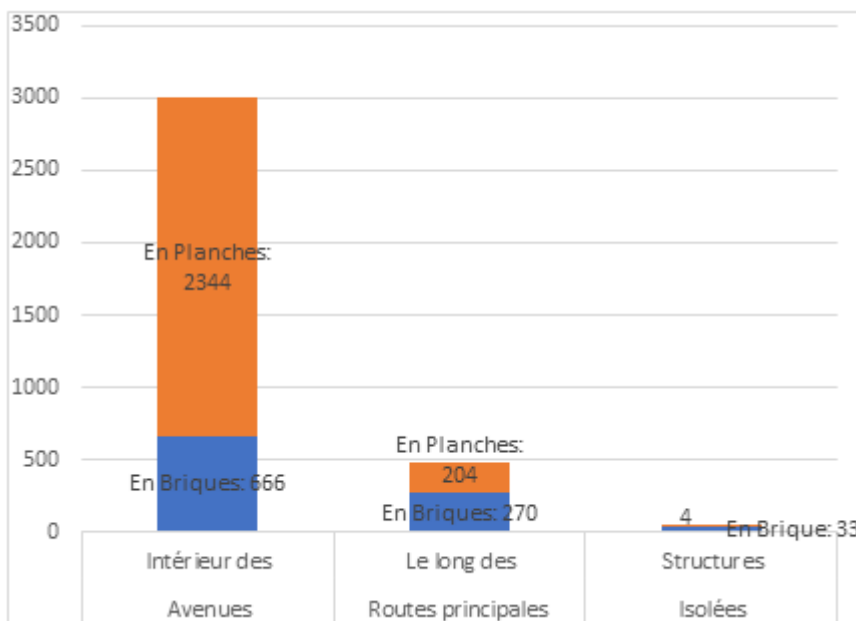
Au niveau des structures isolées, le total fait état de 44 structures isolées dont 4 seulement, soit 9 % sont en planches de bois, 33 soit 75 %, sont en bloc-ciments avec béton armé, 7, soit 16 % sont en bloc-ciments sans béton armé (Figure 17 (D)). Aucun bâtiment en bache ni en tôles galvanisées n'a été observé dans les structures isolées.



**Figure 18.** Comptage des bâtiments suivant leurs matériaux de construction, appréciation générale sur toute la zone d'étude.

En mettant en commun ces observations (voir figure 18), donc en considérant aussi chacune des structures isolées comme un bâtiment à part entière, nous réalisons un total de 3488 bâtiment dans toute la zone d'étude, dont 2552 soit 73 % sont des bâtiments en planches de bois, 696, soit 20 % sont des bâtiments en Briques ou bloc-ciments avec des colonnes de béton armé, 103, soit 3 % sont des bâtiments en Briques ou bloc-ciments sans des colonnes de béton armé, 128, soit 4 % sont en tôles galvanisées et 4 seulement sont en bâches.

Ces observations montrent que les bâtiments les plus majoritaires qui constituent plus de 70 % dans notre zone d'étude sont des bâtiments en planches de bois.



**Figure 19.** Histogramme de Répartition des bâtiments dans le secteur d'étude suivant les trois zones d'investigation choisies.

Etant donné que d'une part, du point de vue « coût de construction », les bâtiments en planches ont un très faible coût par rapport à ceux en briques ou bloc-ciments avec béton armé, et que d'autre part, le nombre de bâtiments en briques ou bloc-ciments avec béton armé est très élevé au niveau du graphique des bâtiments le long des routes principales par rapport à d'autres (il y en a autant à l'intérieur des avenues mais sont minimisés par le nombre élevé des bâtiments en planches), nous considérons que du point de vue « matériaux de construction », la plus grande valeur économique se situe le long des routes principales.

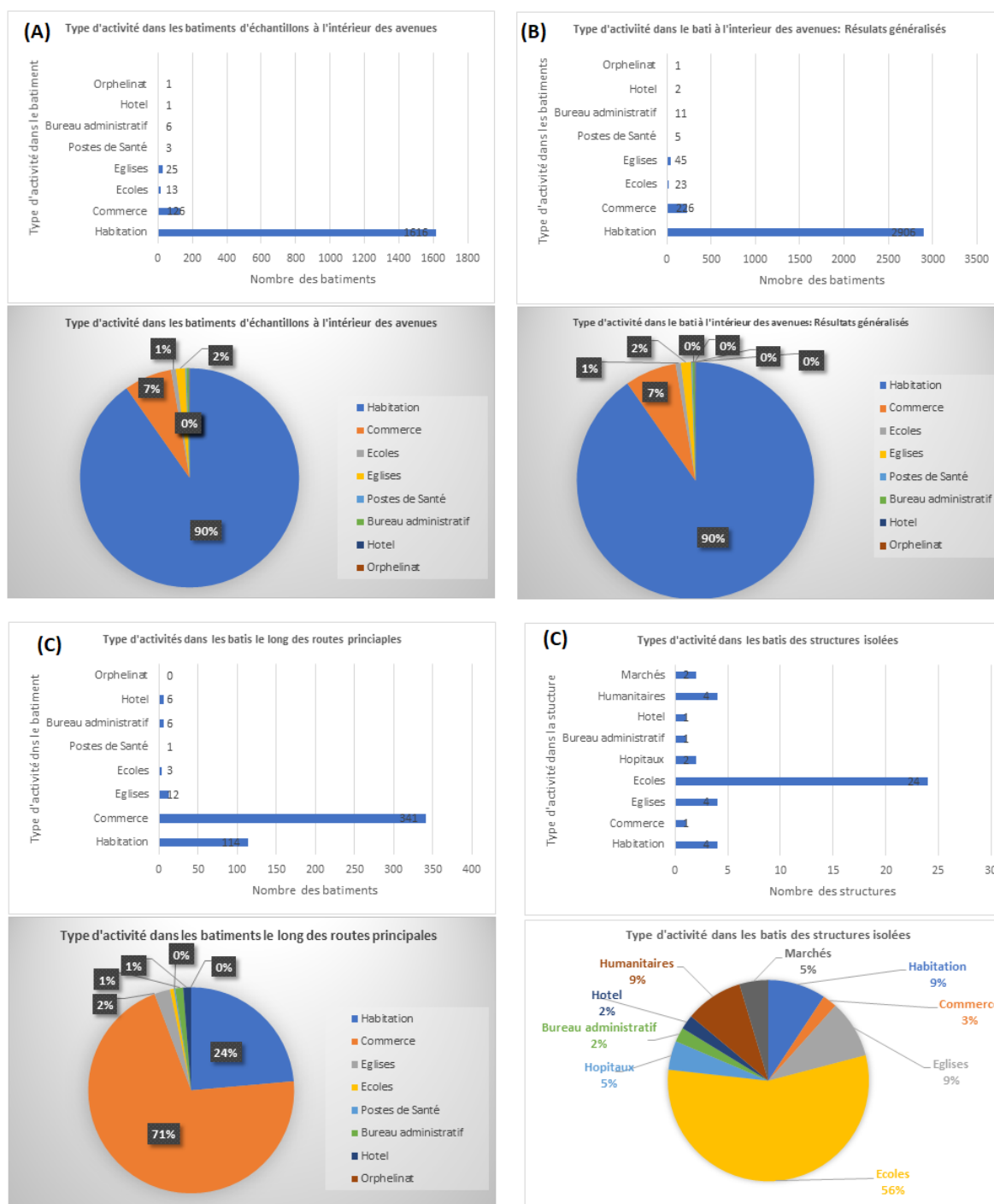
#### 4.1.2 Activités à l'intérieur des bâtiments

Huit classes d'activités ont été inventoriées, sans pour autant évaluer le niveau de rentabilité de chacune par rapport à l'autre. Il s'agit des activités suivantes : habitation (logement), commerce, écoles, postes de santé ou hôpitaux, bureaux administratifs, bureaux humanitaires, Hôtels et orphelinat.

A l'intérieur des avenues, sur presque les 1700 bâtiments investigués, les résultats généralisés dans toutes les avenues montrent que sur un total de 3235 bâtiments, 2905, soit 90 %, sont des habitations, et donc ne font pas des véritables revenus en terme d'argent si ce n'est que quelques-uns d'entre eux qui servent de location. Cependant leurs revenus restent faibles car dans les deux quartiers étudiés, la location des bâtiments varie entre 20 et 100 USD dépendant de la dimension et du confort du bâtiment.

A l'intérieur des avenues, 226 bâtiments soit 7 % seulement abritent une activité commerciale. Les activités commerciales à l'intérieur des avenues restent rudimentaires à Goma, ce sont des petites boutiques de secours familial dont le chiffre d'affaire peut rarement atteindre 1000 USD. Les églises constituent une activité importante aussi dans la ville de Goma. Au total, 45 églises, soit 2 % du total des bâtiments ont été répertorié dans les deux quartiers seulement, et puis ce sont des églises qui abritent des bâtiments dont la dimension est confondue avec celle des bâtiments d'habitation. Ce sont généralement des églises protestantes communément appelées « Eglises de Réveil ». Ce sont des petites églises abritant souvent des bâtiments en planches de bois de faibles dimensions et qui ne se démarquent pas des autres sur l'orthophoto.



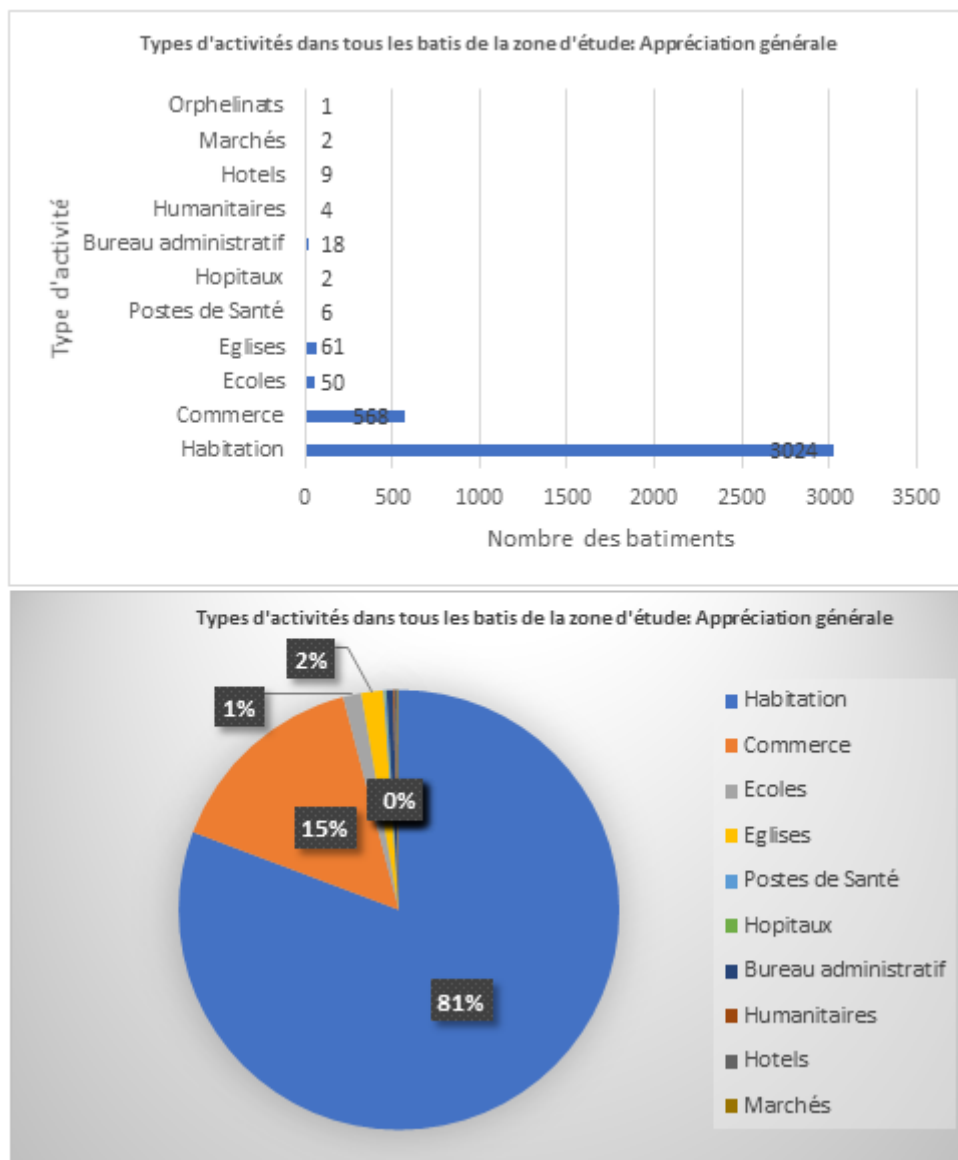


**Figure 20.** Comptage des bâtiments suivant les types d'activités y exercée.

A l'intérieur des avenues, 23 écoles ont été répertoriées, soit le 1% de tous les bâtiments. Ce sont des écoles de petites dimensions. Il faut aussi noter qu'à cause de la pauvreté de la population, nombreux créent des petites églises et des petites écoles pour voir s'ils peuvent s'y procurer des revenus pour satisfaire les besoins de leurs familles. Deux hôtels et 1 orphelinat ont été également répertoriés dans les deux quartiers à l'intérieur des avenues.

Le long des routes principales, parmi les 480 bâtiments répertoriés, 114 soit 24 % sont des habitations, 341 soit 71 % abritent l'activité commerciale, 12 sont des Eglises et les restes sont des bureaux administratifs et Hôtels (Voir figure 20 (C)). Le nombre de 71 % qui loge les activités commerciales le long des routes principales n'est pas étonnant. En effet, à Goma, l'activité principale de survie est le commerce et pour la plupart des cas, le petit commerce.

Au niveau des structures isolées, les écoles atteignent aussi un record avec le 76 % du total de ces structures, puis en suite, les églises avec 9 %.



**Figure 21.** Comptage des bâtiments suivant les types d'activités qui y logent, appréciation générale sur toute la zone d'étude.

En incluant toutes les observations de l'activité dans le bâti dans un seul diagramme (voir figure 21), on s'aperçoit que 81 % des bâtiments sont des habitations, 15 % abritent l'activité commerciale. On voit

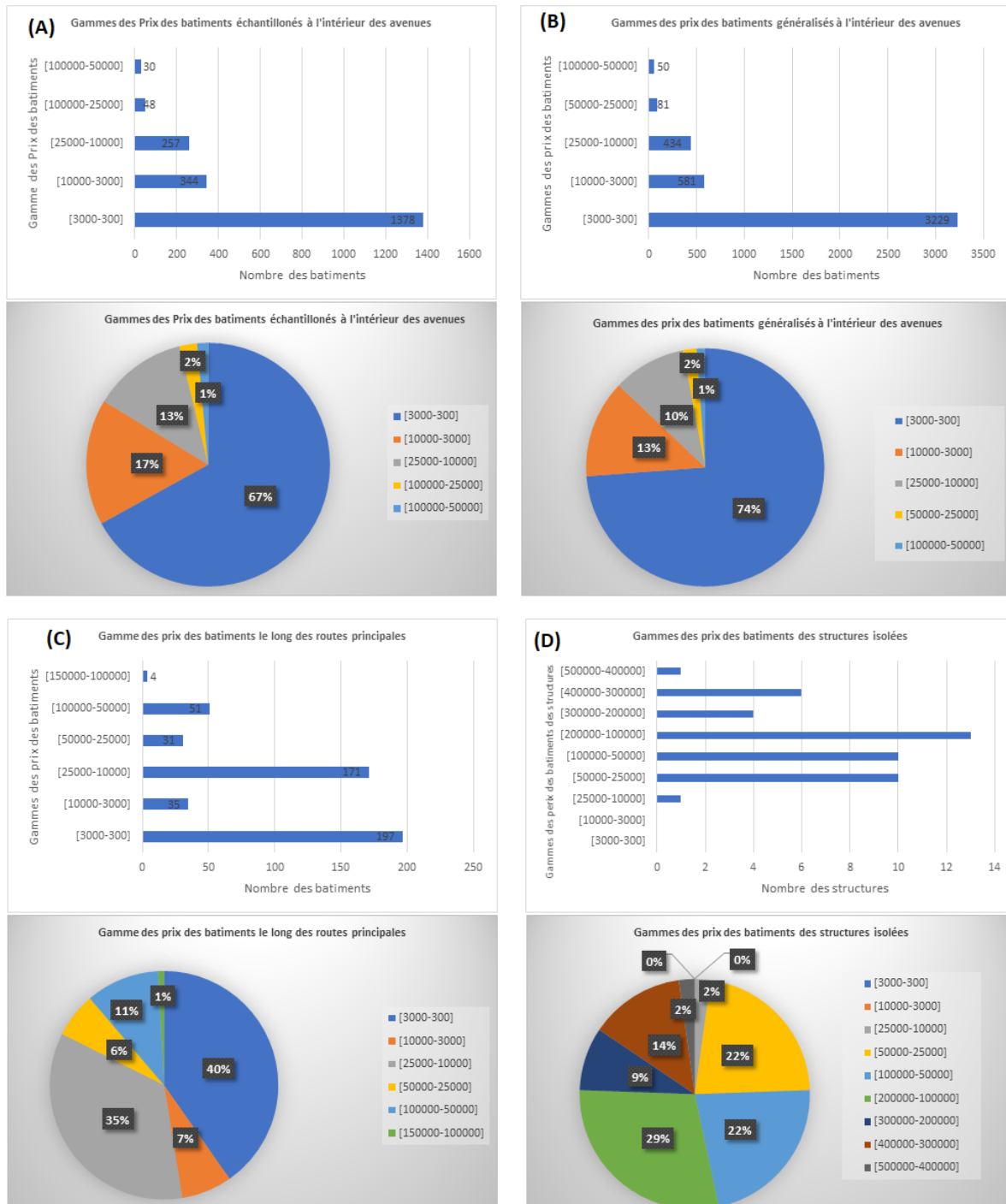
également que les églises occupent la 3<sup>ème</sup> place avec 2 % du total, tandis que les écoles occupent le 1 % du total.

Vu ces observations, nous estimons donc que du point de vue « activité dans le bâti », les valeurs économiques les plus élevées sont situées le long des routes principales, ensuite c'est au sein des structures isolées et en fin c'est « à l'intérieur des avenues ».

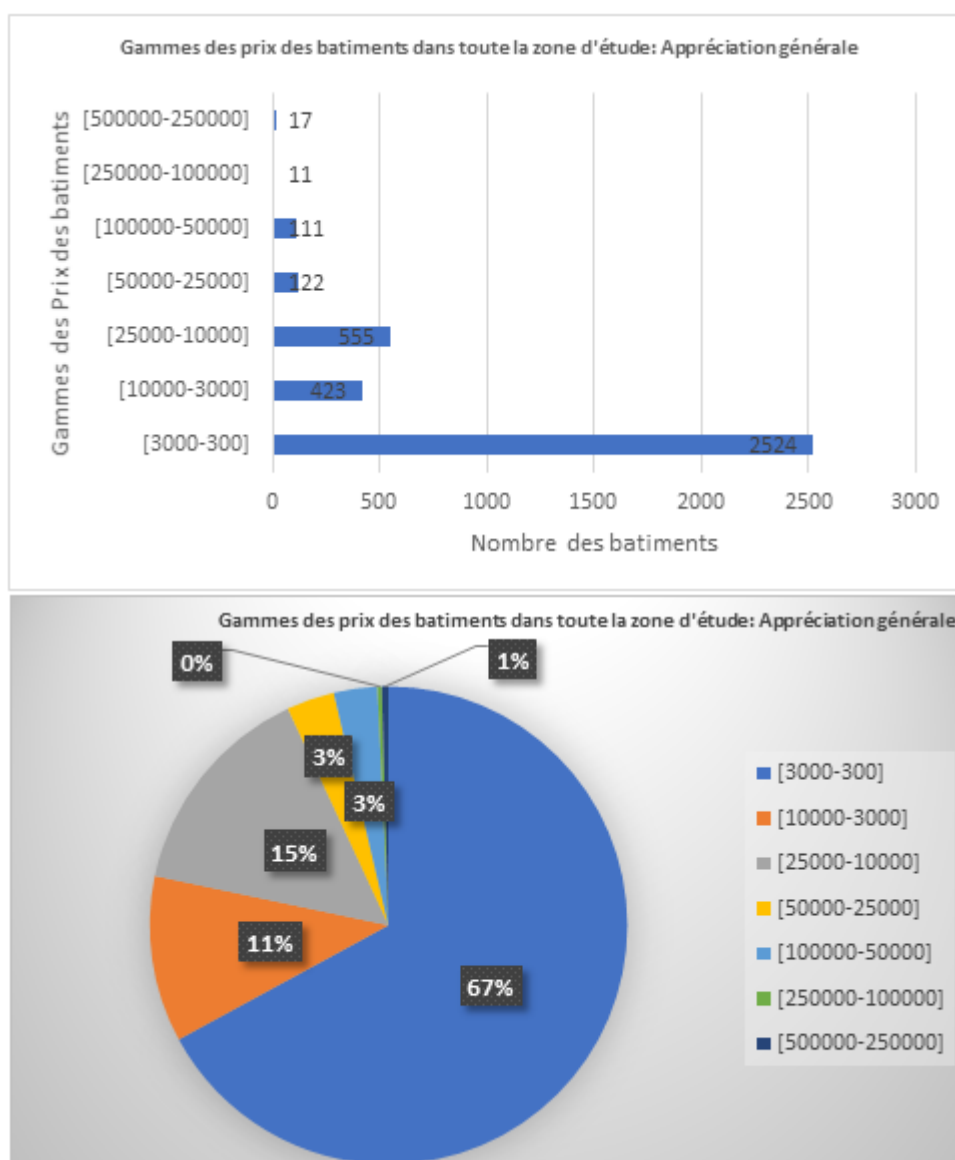
#### **4.1.3 Prix des bâtiments**

Les prix des bâtiments, c'est-à-dire les coûts estimés pour leur construction occupent une place prépondérante dans l'évaluation de la valeur économique du bâti. Dans ce travail, les réponses fournies par les Ingénieurs architectes ont été appliquées sur tous les bâtiments et les observations montrent que :

- A l'intérieur des avenues, sur le total de tous les bâtiments investigués, 74 % des bâtiments sont des bâtiments dont le prix varie entre 300 et 3 000 USD, 13 % seulement ont un prix variant entre 3 000 et 10 000 USD, 10 % ont un prix qui varie entre 10 000 et 25 000 USD, 2 % ont un prix variant entre 25 000 et 50 000 USD et en fin, 1 % seulement ont un prix variant entre 50 000 et 100 000 USD. De ces observations, on voit qu'à l'intérieur des avenues, la plupart des bâtiments ne sont pas généralement de coûts très élevés.
- Au niveau des routes principales, deux gammes des valeurs des prix s'observent. Celle de 3 00 à 3 000 USD et celle de 25 000 à 50 000 USD (Voir figure 13 (C)). Cette dernière est faite des boutiques et magasins installés le long des routes principales.
- Au niveau des structures isolées, tout d'abord, aucune structure ne coûte moins de 10 000 USD, et la gamme la plus majoritaire occupant 29 % de l'ensemble est celle entre 200 000 et 100 000 USD (Voir figure 13 (D)).



**Figure 22.** Comptage des bâtiments suivant les prix des bâtiments.



**Figure 23.** Comptage des bâtiments suivant les prix des bâtiments, appréciation générale sur toute la zone d'étude.

Partant de notre base des données, nous avons essayé par une méthode de calcul empirique sur QGIS, d'estimer les prix de tous les bâtiments se trouvant dans notre zone d'étude. Ensuite, la comparaison de ces prix par rapport aux surfaces de chacune des zones de notre secteur, nous a permis de dégager quelle est la zone qui a plus de valeur économique.

Les données d'entrées obtenues depuis la base des données sont :

#### **A. Les sommes des prix**

- Somme des prix des bâtiments échantillonnés à l'intérieur des avenues : 10.636.330,00 USD pour 1769 bâtiments utilisés comme échantillons dans ces calculs.

- Somme des prix de tous les bâtiments à l'intérieur des avenues : 19.158.422,00 USD pour tous les 3235 bâtiments que nous avons estimé qu'ils constituent la zone de l'intérieur des avenues
- Somme des prix des bâtiments érigés le long des routes principales : 7.693.780,00 USD pour les 485 bâtiments répertoriés le long des routes
- Somme des prix des bâtiments des structures isolées : 6.359.300,00 USD pour les 46 structures isolées répertoriées

#### **B. Les surfaces calculées par simple mesures sur l'orthophoto**

- Surface considérée à l'intérieur des avenues : 1554056 m<sup>2</sup>
- Surface considérée le long des routes (20 m de part et d'autre de la route) : 366564 m<sup>2</sup>
- Surface considérée pour les structures isolées : 495874 m<sup>2</sup>

En comparant les sommes des prix des bâtis par rapport aux surfaces, on conclut que du point de vue prix du bâti, les plus grandes valeurs économiques sont concentrées le long des routes principales.

**Prix de tous les bâtiments** = *Somme des prix des bâtis dans les avenues + somme des prix des bâtis le long des routes principales + sommes des prix des bâtis des structures isolées*

= 19.158.422,00 USD + 7.693.780,00 USD + 6.359.300,00 USD = 33.211.502 USD.

Nous pouvons estimer qu'en considérant seulement les prix des bâtiments sans tenir compte d'autres paramètres, *les deux quartiers ont une somme de bâtiments pouvant coûter 30 à 35 millions des Dollars Américains.*

Cependant le prix du bâtiment n'est pas la seule composante suffisante pour évaluer la valeur économique du bâti comme nous l'avons montré précédemment.

#### **4.1.4 L'emplacement du bâti**

Les réponses retournées par les commissionnaires des parcelles à notre questionnaire montrent que la valeur du bâti dépend également de son emplacement, c'est dire de l'endroit où se localise la parcelle qui loge le bâtiment. Le facteur le plus important est la localisation d'une parcelle par rapport à la route principale. Les bâtiments situés directement à la route principale coûtent plus cher que tous les autres bâtiments et le prix diminue chaque fois que l'on s'éloigne de 20m seulement. D'autres facteurs comme la proximité au centre-ville, au marché de Virunga, à l'hôpital etc, jouent aussi mais faiblement.

Cette plus grande valeur accordée aux bâtiments qui se situent le long des routes principales ne tient pas compte du coût de construction mais plutôt de la rentabilité par rapport aux activités commerciales (formelles et informelles) et plusieurs autres opportunités comme les arrêts-bus, la sécurité, ....

Un autre fait que nous avons remarqué lors des explications fournies par les commissionnaires des parcelles est que la valeur d'une parcelle est aussi influencée par d'autres facteurs comme :

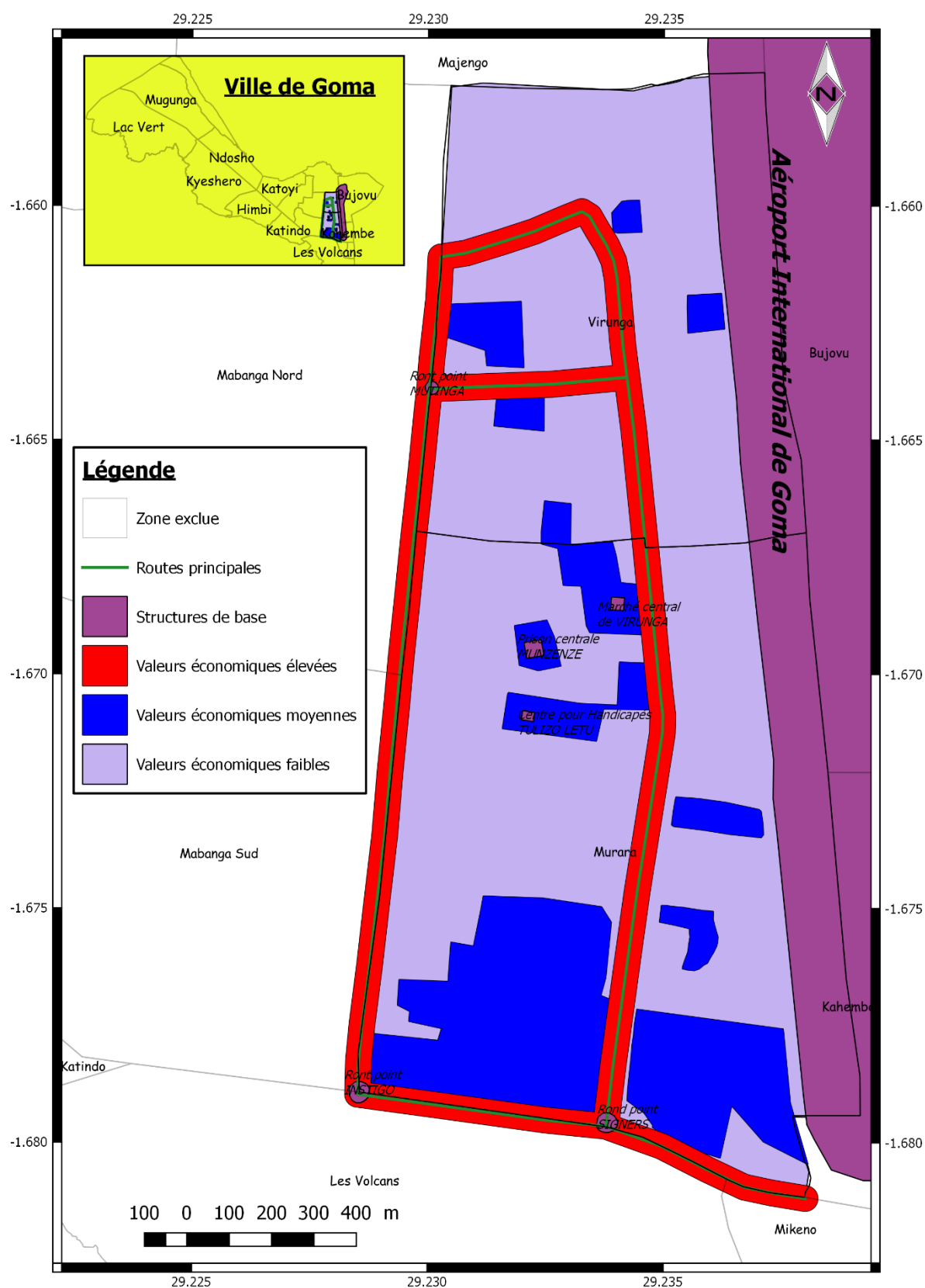
- Le type de bâti érigé à son sein. En effet, au niveau de la route Signers-Virunga, il y a presque une différence de 10 000 USD dans les prix de vente des parcelles qui abritent des bâtiments en briques ou blocs ciment par rapport à celles abritant des bâtiments en planches de bois. Exemple : sur cette route, une parcelle abritant un bâtiment de 208m<sup>2</sup> en bloc-ciment a coûté 60 000 USD. Une autre parcelle de même dimension mais abritant un bâtiment en planche a coûté 45 000 USD. Dans ces prix, lorsque nous avons soustrait les prix des bâtiments correspondant aux réponses des ingénieurs, nous avons trouvé une différence de 10 000 USD. Il est donc clair que dans les deux quartiers le type de bâtiment joue énormément sur le prix de la parcelle.
- Le risque d'escroquerie et des conflits après achat : certaines parcelles sont localisées dans des zones qui sont reconnues comme des zones à conflit foncier. Des telles parcelles coûtent généralement moins cher.

#### **4.2 Représentation spatiale de la valeur économique du bâti dans les deux quartiers**

Comme nous venons de l'annoncer dans le point précédent, un seul paramètre ne permet pas d'évaluer la valeur économique du bâti. Pourtant de tous les trois paramètres testés ici, nous avons remarqué ce qui suit :

- Les plus grandes valeurs économiques du bâti se situent le long des routes principales. Il s'agit des espaces les plus mouvementés commercialement, où les valeurs des parcelles sont les plus élevées et où il y a le plus des bâtiments en briques ou bloc ciments avec béton armés qui ont constitué la classe la plus chère de toutes les classes vue du point de vue construction du bâti.
- Les valeurs moyennes du bâti se situent au sein des structures isolées qui constituent les grandes écoles de deux quartiers, les hôpitaux, les grandes églises, ..... Ces structures isolées affichent des valeurs économiques significatives non seulement à cause des prix de leurs bâtiments mais aussi parce qu'elles vont faire entrer des revenus significatives.
- Les faibles valeurs économiques se situent à l'intérieur des avenues. Il s'agit d'une plus vaste étendue mais abritant la majorité des bâtiments d'habitation (90 %). Sans oublier également que plus de 70 % des bâtiments à l'intérieur des avenues sont des bâtiments en planches de bois, en tôles galvanisées et en Bâches qui constituent même la classe la plus pauvre de nos investigations.

Ces observations sont représentées spatialement sur la carte de la Figure 24.



**Figure 24.** Représentation spatiale des valeurs économiques des bâts observés dans les quartiers Virunga et Murara. Le petit encart dans le coin Nord-Ouest représente la ville de Goma où se situent les deux quartiers étudiés.



## **5 Discussion des résultats**

### **5.1 Paramètres définissant la valeur économique du bâti dans les quartiers Virunga et Murara.**

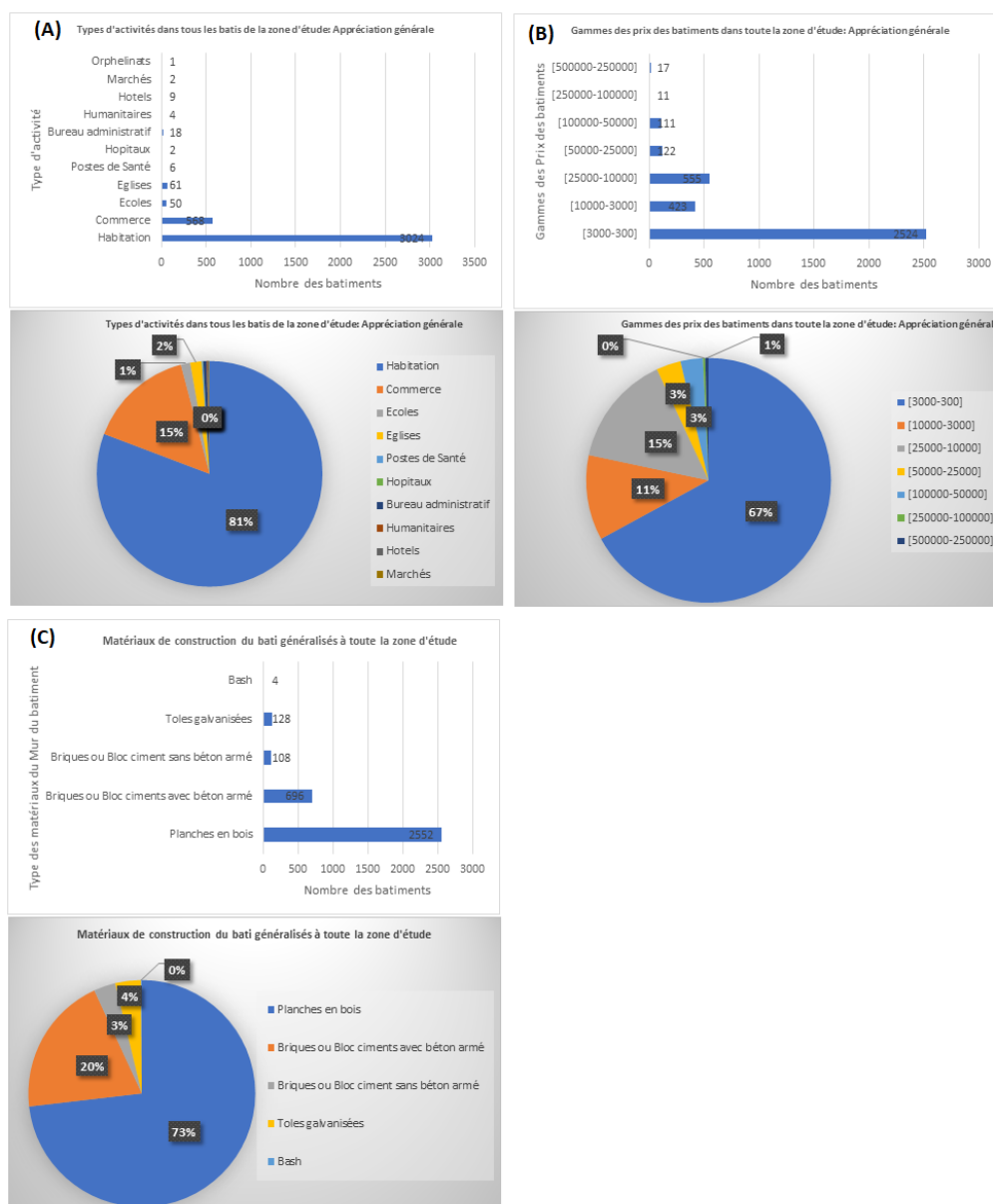
Nous avons vu dans la partie Résultats, 4 paramètres qui influencent le prix du bâti dans les quartiers Virunga et Murara. Cependant, en réalité seuls 3 paramètres nous permettent de bien évaluer cette valeur, car les matériaux de construction du mur dépendent aussi du prix du bâti. Nous avons fait l'investigation de ce paramètre juste pour arriver aux résultats et voir comment il influence le paramètre prix.

Les deux quartiers et plus particulièrement le Quartier Virunga sont parmi les quartiers aux niveaux socio-économiques moyens (Michellier, 2017) dans la ville de Goma. 15 % de l'activité observé est commerciale et est concentré le long des routes principales. Il comprend un commerce formel (celui qui loge les bâtiments) et un commerce informel (celui que l'on pratique devant les portes des bâtiments). De nombreuses personnes faisant un commerce avec un faible chiffre d'affaire, sont incapables de louer un bâtiment pour y pratiquer leur activité commerciale. Ils pratiquent ainsi un commerce informel en étalant leurs marchandises le long des routes, devant les portes des boutiques de leurs frères, ....

Le nombre de 71 % qui loge les activités commerciales trouvé le long des routes principales (voir figure 20 dans la partie Résultats) n'est pas étonnant. En effet, à Goma, l'activité principale de survie est le commerce et pour la plupart des cas, le petit commerce. Comme dans cette ville volcanique il y a peu d'entreprises et d'industries et que la faiblesse de l'Etat à créer de l'emploi est grande, le chômage bat des records, et c'est la débrouillardise qui se développe dans la population. Plus de 80 % de la population au chômage, se plonge dans des petits commerces formels et informels pour essayer de combler les besoins de leurs familles. La plupart des activités commerciales à Goma sont informelles, mais dans ce travail, nous n'avons pas évalué ces genres de commerces, les 71 % des bâtiments commerciaux répertoriés le long des routes sont des activités commerciales formelles.

Nous n'avons pas eu des détails sur cette composante (activité dans le bâti) en définissant que tel ou tel magasin fonctionne avec tel ou tel chiffre d'affaire, mais on ne doute pas que se sont dans les magasins le long des routes principales que l'on retrouve des véritables chiffres d'affaires de l'activité commerciale de Goma. Etant donné que seulement pour louer dans ces magasins situé le long des routes principales, une seule pièce coûte de 100 à 1000 USD suivant le milieu, il n'est pas douteux que les entrepreneurs qui œuvrent dans ces magasins ont des véritables chiffres d'affaire.

En ce qui concerne l'emplacement des bâtiments comme paramètre définissant leurs valeurs économiques, il est vrai que tous les bâtis à valeur économique élevée sont érigés le long des routes principales, et les bâtis à valeur économique très faibles sont érigés à l'intérieur des avenues. Cette situation illustre également un certain manque du plan d'aménagement du territoire, car cette organisation découle des activités commerciales. La population est consciente du fait que l'occupation commerciale le long des routes principales est rentable et ce système se poursuit : l'accessibilité et la visibilité ont toujours été deux parties essentielle d'un commerce rentable. Cependant de telles constructions ne tiennent pas compte de certains problèmes ou aléas surtout ceux qui sont récurrent dans cette ville telle que la guerre (risque des pillages rapides le long des bâtiments facilement localisables par les pilleurs), et d'autres facteurs comme les accidents le long des routes.



**Figure 25.** Histogrammes et rosaces d'appréciation globale des trois paramètres observés dans l'évaluation de la valeur du bâti dans les quartiers Virunga et Murara.

Etant donné que nous n'avons pas eu des détails approfondis sur le paramètre « activité dans les bâtis », cette façon de considérer les choses limite nos résultats car les niveaux des commerces se diffèrent (grands grossistes, petits grossistes, détaillants, ...) ainsi que les activités non commerciales lucratives (une entreprise peut avoir un revenu largement supérieur à celui d'une autre). Ces genres de détails n'ont pas été abordés dans ce travail faute de temps de moyens financiers limités. Malgré cela, nous doutons que les revenus en terme monétaires des structures isolées (bien que non évaluées dans ce travail) soient du même ordre de grandeur que ceux du commerce exercé dans les bâtiments le long des routes principales. Par exemple, dans une meilleure école privée du Quartier Murara dont l'effectif élèves est reconnu comme étant dans la moyenne par rapport aux effectifs des Ecoles de Goma, et dont les frais de minerval payés par les parents sont dans la catégorie supérieur<sup>8</sup> des frais de minerval généralement payés dans les Ecoles les plus chères de Goma, l'évaluation a montré un revenu mensuel de 4000 USD inclus le paiement des enseignants et les frais de fonctionnement de l'école. Pourtant, une telle somme ne suffit même pas pour dédouaner<sup>9</sup> un seul conteneur des marchandises de grande valeur appartenant à un seul commerçant en provenance de l'Ouganda et qui entrent dans la ville de Goma. On comprend donc à quel point l'activité commerciale est supérieur économiquement à toutes les autres activités dans la ville de Goma.

Le paramètre « prix du bâtiment » nous a permis d'avoir un nombre estimatif de *33.211.502 USD*. Cependant cette valeur n'est pas absolue, c'est juste une estimation car elle peut être liée à nombreuses erreurs dues à l'échantillonnage, aux nombres réels des bâtiments se trouvant sur terrain et aux réponses fournies de calculs effectué par les Ingénieurs concernant les prix qui ne peuvent pas être des valeurs absolues. C'est pourquoi par mesure de prudence, nous avons estimé ce prix à l'intervalle de *30 à 35 millions de USD*, le prix approximatif de tous les bâtiments actuellement érigés dans les deux quartiers.

## **5.2 La valeur économique du bâti et l'aléa des coulées de lave.**

Il est question ici de voir comment la valeur économique du bâti qui est observée dans les trois emplacements définis dans notre partie résultats peut être impactée par les coulées de lave en cas d'une éruption.

Pour y arriver, nous allons prendre deux scénarios possibles. Le premier est illustré par les coulées de lave de l'éruption du Nyiragongo de 2002 qui avaient envahi la ville de Goma et le deuxième se base

---

<sup>8</sup> Dans la ville de Goma, les frais de minerval scolaire dans des écoles primaires et secondaires varient selon l'emplacement des écoles et la valeur dont le propriétaire de l'école désire accorder à son entreprise. On distingue ainsi les écoles de catégorie supérieur, dont les frais de minerval varient entre 80 et 120 USD par trimestre, les écoles de catégorie moyenne, dont les frais de minerval varient entre 50 et 80 USD par trimestre et les écoles de catégorie inférieur, dont les frais de minerval varient entre 15 et 50 USD par trimestre.

<sup>9</sup> La plupart des marchandises commercialisés à Goma sont exportés depuis l'Ouganda. Avant d'entrer sur le sol congolais, ces marchandises sont soumises à des taxations appelée frais de dédouanement.

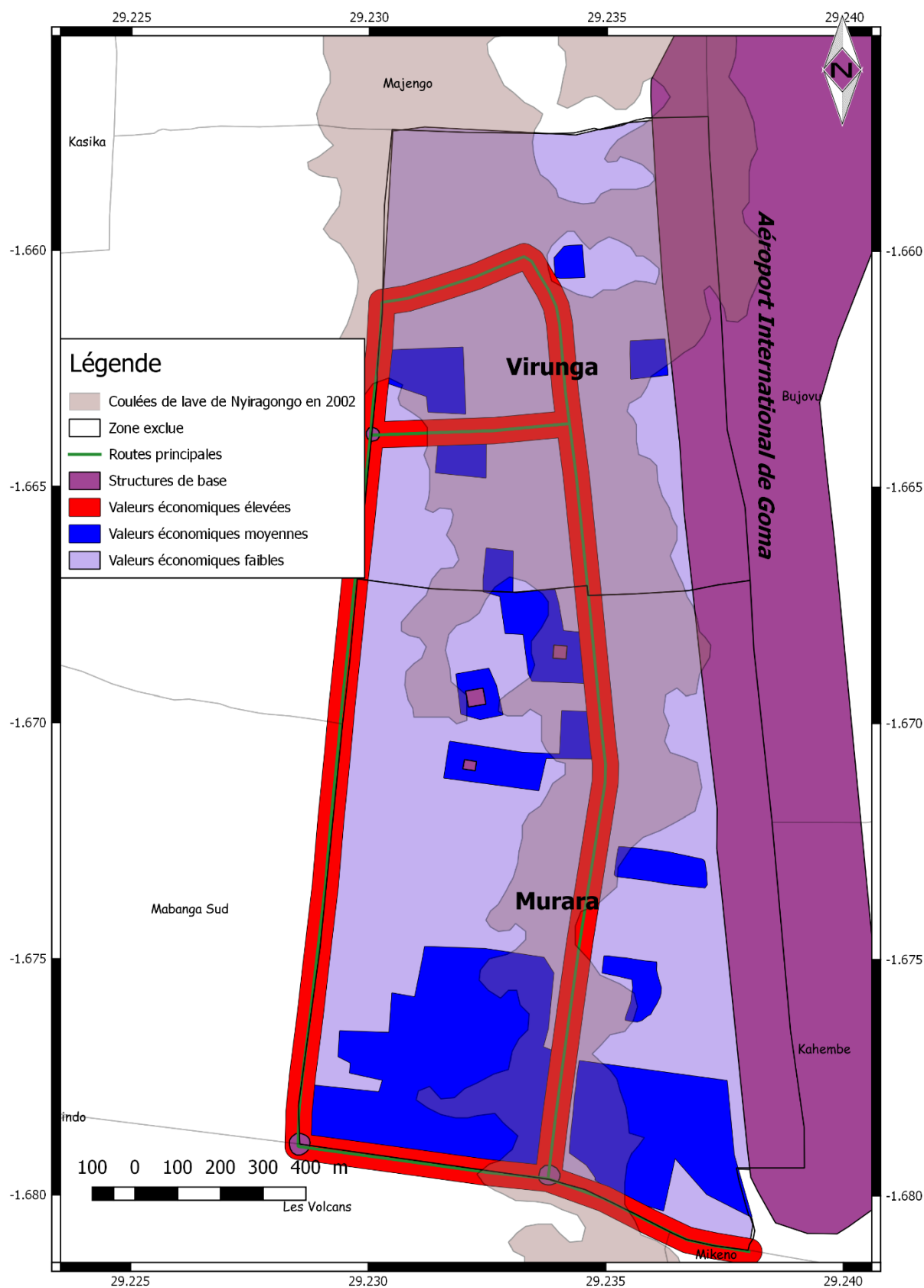
sur les probabilités d'invasion des coulées de lave en cas des futures éruptions déterminées dans le cadre du projet GeoRisCA<sup>10</sup>.

### **5.2.1 Illustration par rapport aux coulées de lave de 2002**

Dr. Benoit Smets nous a fourni une cartographie des coulées de lave sous forme de shape file telles qu'elles sont publiées dans Smets et al. (2010). En effet, le 17 Janvier 2002, le volcan Nyiragongo est entré en éruption et plusieurs coulées de lave ont dévasté la région. (Voir chapitre 2 : Zone d'étude). En ce qui concerne particulièrement les coulées de lave qui ont atteint la ville de Goma, une coulée a dévasté le quartier Katindo (coulée Ouest) et l'autre a dévasté les quartiers Majengo, Virunga, Murara et les Volcans (coulée Est). La figure 26, illustre l'extension de ces coulées de laves superposée à notre carte des valeurs économiques pour voir comment cela pouvait impacter la valeur économique du bâti dans les deux quartiers.

---

<sup>10</sup> GeoRisCA (2012-2016) est un projet scientifique financé par la Politique Scientifique belge (Belspo). L'objectif principal de ce projet est l'évaluation des géorisques dans la région du Kivu (Burundi, RDC, Rwanda), en étudiant et combinant les aléas de type glissements de terrain, séismes et volcans ainsi que la vulnérabilité de la population, des infrastructures et des écosystèmes, afin d'aider à la gestion des risques naturels. Le projet est coordonné par le Musée royal de l'Afrique centrale (MRAC), en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles (ULB), l'Université de Liège (ULg), la Vrije Universiteit Brussel (VUB) et le Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie (ECGS). Ce projet est mené en collaboration étroite avec les partenaires locaux des trois pays ciblés (Burundi, RDC, Rwanda).



**Figure 26.** Carte des coulées de lave superposées aux valeurs économiques observées dans la zone d'étude.

En examinant la figure 26, on remarque que si les coulées de lave de 2002 de l'éruption du Nyiragongo se reproduisaient en juin 2017 (date de la prise de l'orthophoto ayant aidé à évaluer cette valeur économique), toutes les valeurs économiques importantes situées le long de l'axe routier Signers-3 lampes seraient totalement décimées. De plus, les structures isolées du quartier Virunga ont forte probabilité de subir des dommages plus importants dans l'autre quartier étudié puisque la largeur des coulées diminue vers le Sud. Cela est dû à la topographie du milieu. Par contre, les bâtiments à l'intérieur des avenues qui affichent les valeurs économiques les plus faibles, sont moins affectés par les coulées de lave. On voit alors que si une telle coulée de lave se produisait encore actuellement, les pertes économiques bâtiments seraient plus importantes.

Dans la section « l'éruption de janvier 2002 » nous avons signalé que lors de cette éruption, deux coulées de lave avaient abouti dans la ville de Goma. L'une ayant dévasté les villages de Kibwe et le quartier Katindo ; coulée Ouest et l'autre ayant dévasté le centre-ville ; coulée Est (voir figure 27)

La coulée de lave qui avait détruit le centre-ville était sortie par la fissure éruptive de Munigi (Favalli et al., 2006). Une vue panoramique de l'invasion de cette coulée dans les quartiers étudiés montre que la lave aurait probablement passé sur des bâtiments de valeur importante en 2002, et surtout dans la zone où les bâtiments étaient en agglomération. Komorowski et al., (2004) parle d'ailleurs de plus ou moins 13 % de la zone géographique de la ville détruite et plus ou moins 85 % de son économie. Il est donc sans doute que l'activité commerciale concentrée le long des routes principales dans cette partie de Goma ait été aussi importante dans la même partie avant l'éruption de Janvier 2002.

On voit également sur les images google earth de la figure 6 décrite dans la section « brève historique de la ville de Goma », que l'accroissement démographique a été significatif après l'éruption de 2002. Non seulement le nombre des bâtiments dans la ville a sensiblement augmenté en avançant vers Nord de la ville c'est-à-dire vers le Volcan, mais aussi plusieurs d'entre eux ont été renforcés des valeurs économiques importantes. Pourtant dans notre secteur d'étude (qui était décimé par les coulées de 2002), nulle espace géographique n'a été protégé par le gouvernement, interdisant la construction des bâtiments ou des structures de valeurs. L'accroissement est donc rapide, de grande ampleur et non contrôlé à tel point que s'il y aurait une éruption en 2018, les pertes économiques seraient extrêmement lourdes par rapport à celles qui étaient enregistrées en 2002, bien que ces dernières restent inconnues jusqu'à ce jour.

L'événement éruptif de Munigi avait donc attiré l'attention de nombreux scientifiques (Komorowski et al., 2004, Tedesco et al., 2007, Wauthier et al., 2012) et avait suscité d'évaluer les modèles d'extension des fractures depuis le volcan jusqu'à la ville. Cependant la situation actuelle montre que la population n'avait rien compris de cette situation, car actuellement cet événement est déjà entouré des bâtiments et même

des certaines structures importantes dont des usines et des bureaux administratifs de l'Etat.

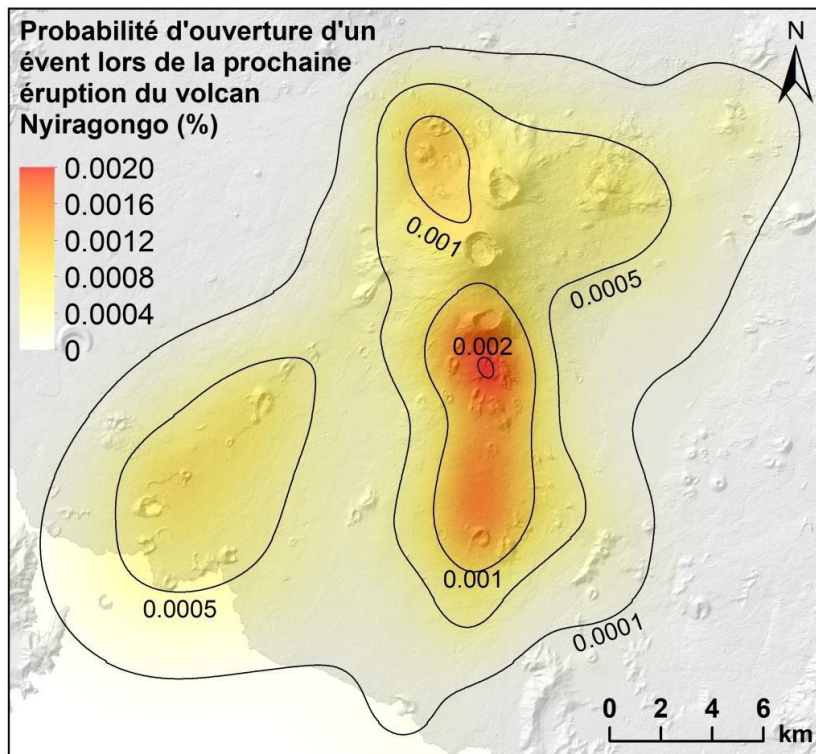


**Figure 27.** Vue panoramique de la coulée Est de l'éruption de 2002, dans la ville de Goma. Source : Favalli et al., (2006)

### 5.2.2 Illustration par rapport aux probables futures éruptions

Les futures éruptions du Nyiragongo sont une menace très grave pour la ville de Goma. La population de Goma sait bien que l'éruption du Nyiragongo de 2002 n'est pas la dernière, il y aura d'autres futures éruptions. Les entrepreneurs de Goma investissent donc dans cette ville tout ayant en tête un possible futur drame qui pourrait les mener à perdre tous leurs biens en quelques heures seulement. C'est ce qu'a déclaré l'homme d'affaire BWINIKA MUHANYA interviewé par une presse Radio local lors d'un anniversaire à Goma de l'éruption du 17 Janvier 2002 en 2016 (le 17 Janvier 2016).

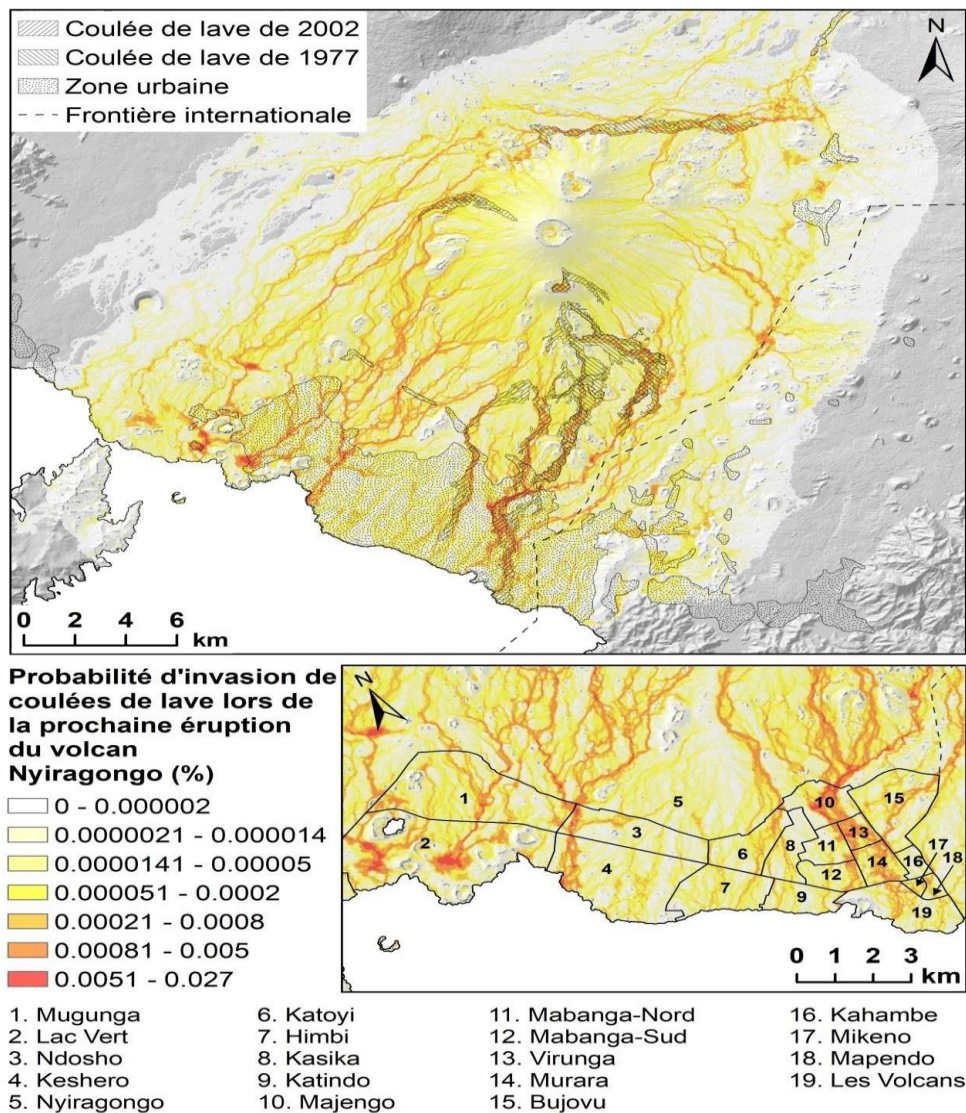
Dans le cadre du projet GeoRisCA ( Geo-Risk in Central Africa) , une équipe de géographes et géologues de la Vrije Universiteit Brussel et du Musée Royal de l'Afrique centrale a travaillé à l'évaluation de l'aléa de coulées de lave par rapport au volcan Nyiragongo (Barette, 2017; Barette et al., 2015; Poppe et al., 2016 ; Smets et al., 2010a ; Smets et al., 2015; Smets et al., 2016a). Ainsi un nouvel outil de modélisation probabiliste de coulées de lave a été développé à partir de modèles probabilistes et déterministes existants (Mossoux et al., 2016b). Cet outil, dénommé Q-LavHA (QGIS Lava flow Hazard Assessment), permet de définir des contraintes à appliquer à la simulation de coulées de lave, telles que sa longueur maximum ou les caractéristiques de la lave. La carte de susceptibilité d'ouverture de points d'éruption indique une forte probabilité d'ouverture d'un événement sur le flanc sud du volcan de Nyiragongo, le long du système de fissure orienté Nord Sud.



**Figure 28.** Carte de susceptibilité d'ouverture de points d'éruption dans les champs de lave du Nyiragongo et du Nyamulagira (Barette, 2017)

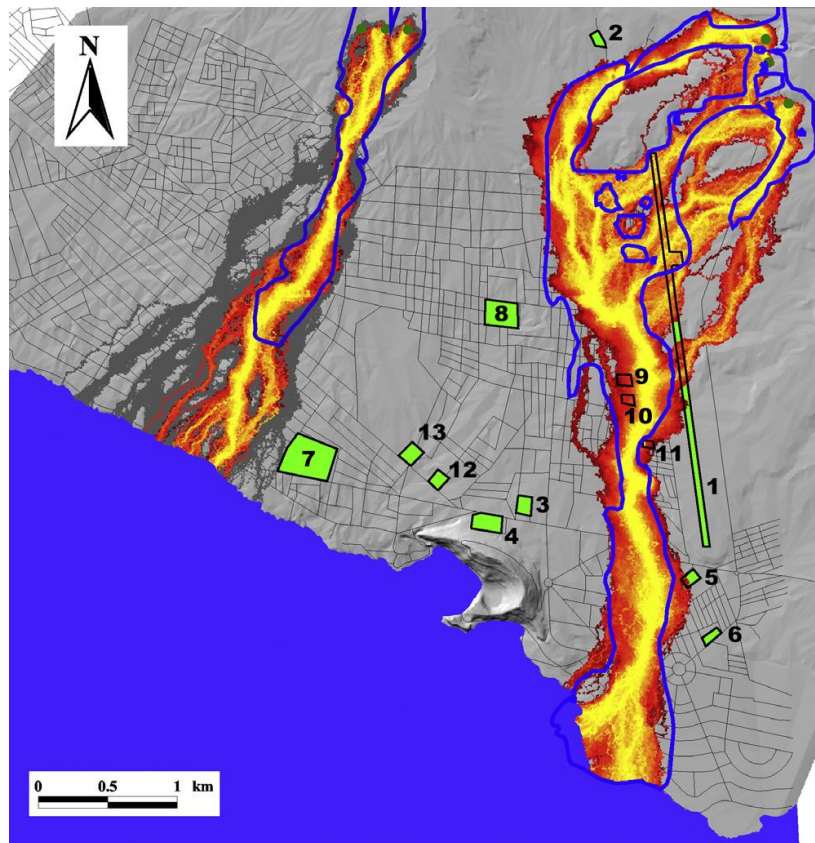
Des probabilités élevées d'invasion de coulées de lave se retrouvent dans les environs du volcan Nyiragongo, et en particulier sur les flancs nord, sud et ouest du cône (Barrete, 2017). Les zones envahies par la lave lors de l'éruption de Nyiragongo en 1977 et en 2002 sont également caractérisées par une forte probabilité d'invasion de coulées de lave. Ce sont les villages localisés au nord de Goma, et la partie orientale de la ville (quartiers Majengo, Mabanga-Nord, Mabanga-Sud, Virunga, Murara et, dans une moindre mesure, les quartiers Bujovu et Les Volcans). La probabilité d'invasion de coulées de lave est également élevée dans d'autres zones de la ville : les quartiers Ndosho, Kyeshero, Mugunga et Lac Vert pourraient être fortement touchés par une prochaine éruption du Nyiragongo (Figure 29).





**Figure 29.** Carte de probabilité d'invasion des coulées de lave dans les champs de lave des volcans Nyiragongo et Nyamulagira (Barette, 2017)

Favalli et al. (2009 et 2006), ont également produit des cartes d'aléa des coulées de lave du Nyiragongo (Figure 20 (b)). Les auteurs montrent des risques très élevés pour notre secteur d'étude avec les plus grandes probabilités de destruction se situant dans le quartier Virunga, mais devenant modérées dans le quartier Murara. Le quartier Virunga comporte des valeurs économiques moins élevées que dans le quartier Murara et c'est dans ce quartier que se situent aussi la plupart des bâtiments en planches de bois que nous avons identifié précédemment. Ces genres de bâtiments sont les plus vulnérables aux coulées de lave, car avant même que les coulées ne les atteignent, les plus hautes températures font qu'à ce qu'ils commencent à brûler bien qu'à une certaine distance de la coulée de lave (Témoignage d'un habitant de Goma qui avait vécu l'éruption de 2002). L'autre facteur qui élève les risques dans ce quartier est l'aménagement du territoire qui n'est pas prise en compte. Ainsi il n'y a pas d'espacement entre les bâtis, ce qui peut causer qu'ils brûlent en chaîne en cas d'une certaine éruption ou incendie.



**Figure 30.** Comparaison entre la surface couverte par des coulées de lave du Nyiragongo lors de son éruption de Janvier 2002 (contours en bleu) et les coulées simulées pour les futures éruptions (couches des couleurs allant de jaune à rouge). Les petits rectangles en vert sont certaines structures de base de la ville. Parmi ces structures, les structures 1 (Aéroport international de Goma), 9 (Marché de Virunga), 10 (Cathédrale Sanctuaire), et 11 (Foyer social) sont localisées dans notre zone d'étude.  
Source : Favalli et al., 2006).

## 6 Conclusion

Le présent travail a porté sur l'évaluation de la valeur économique du bâti dans les quartiers Virunga et Murara, ville de Goma. Les paramètres qui étaient pris en compte pour faire cette évaluation ont permis de distinguer 3 zones ayant des valeurs économiques distinctes : (1) la zone le long des routes principales qui affichent les valeurs économiques les plus élevées avec un bâti confortable (briques ou blocs ciment avec colonnes des béton armées) et activité commerciale intense, (2) la zone dans les structures isolées ( zone où sont localisées les hôpitaux, les grandes écoles, les grandes églises,...) qui affichent les valeurs économiques moyennes suite principalement à leur paramètre bâtiment confortable aussi puis suite aux revenus que ces structures génèrent, (3) la zone à l'intérieur des avenues, dont la plupart des bâtiments sont des habitations, qui affiche les plus faibles valeurs économiques suite à leur paramètre bâtiment de faible coût ( plus de 70 % des bâtiments sont en planches de bois) et au fait que ces bâtiments ne génèrent pas des revenus en terme monétaire sauf en cas de location (cas peu fréquent). La superposition de notre carte des valeurs économiques aux coulées de lave de Nyiragongo 2002 montrent que ce sont les plus grandes valeurs observées dans notre secteur d'étude qui seraient le plus affectées si une telle éruption se produisait encore. Et l'évaluation par rapport aux futures éruptions montrent des risques très élevés dans notre zone d'études d'être envahi par des laves. Ces risques sont plus élevés dans le quartier Virunga que dans le quartier Murara.

Il est très important que les probabilités d'invasion de coulées de lave doivent être prises en compte dans l'aménagement du territoire de la ville de Goma. Des tels résultats une fois élargies sur toute la ville de Goma, peuvent servir les décideurs et les chargés de répondre aux crises d'avoir une idée sur la valeur économique du bâti qui peut être perdu en cas d'une future éruption du volcan Nyiragongo.

## Bibliographie

Allard, Patrick., P. Baxter, M. Halbwachs, and J. C. Komorowski (2002), Nyiragongo, Bull. Global Volcan Network, 27, 4.

Allard Patrick, Baxter Peter, Halbwachs Michel Kasereka Mahinda, J.C. Komorowski and J.L. Joron (2002). The most destructive effusive eruption in modern history: Nyiragongo (RD. Congo), January 2002.: EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 - 11 April 2003, abstract id. 11970.

Barette, F., Poppe, S., Smets, B., Benbakkar, M., Kervyn, M., 2016. Spatial variation of volcanic rock geochemistry in the Virunga Volcanic Province: Statistical analysis of an integrated database. Journal of African Earth Sciences. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.018>.

Barette Florian (2017). Lava flow hazard and risk assessment at Nyiragongo volcano, DR Congo, Master Thesis, faculty of science and bio-engineering sciences, Vrij Universiteit Brussels,

Bétard, F., Fort, M. (2014). Les risques liés à la nature et leur gestion dans les Suds. Bull. l'Association des Géographes Français 91, 231-240.

[Burgi Y. P.](#) , [T. H. Darrah](#) , [D. Tedesco](#) , [W. K. Eymold](#). (2014), Dynamics of the Mount Nyiragongo lava lake, Journal of Geophysical Research, 119, [Issue 5](#)

Büscher, K. (2011). Conflict, state failure and urban transformation in the Eastern Congolese periphery. The case of Goma. Phd Thesis, Universiteit Gent.

Catherine Jane Lowe (2010). Analysing Vulnerability to Volcanic Hazards: Application to St. Vincent. PhD Thesis, Department of Geography University College London Gower Street London WC1E 6BT

Carn S. A. (2002). Eruptive and passive degassing of sulphur dioxide at Nyiragongo volcano (D. R. Congo): The 17 January 2002 eruption and its aftermath, Acta Vulcanologica, 14 (1-2). 00-00.

Clarisse BALEGAMIRE, Caroline MICHELLIER, Jean Berckmans MUHIGWA, Damien DELVAUX, Gérard IMANI et Olivier DEWITTE. (2017). Vulnérabilité du bâti face aux glissements de terrain : analyse spatio-temporelle à Bukavu (RD Congo) : Geo-Eco-Trop., 41, 263-278

Chirico, G.D., Favalli, M., Papale, P., Boschi, E., Pareschi, M.T., Mamou-mani, A. (2009). Lava flow hazard at Nyiragongo Volcano, DRC. 2. Hazard reduction in urban areas. Bulletin of Volcanology 71, 375–387.

Damien Delvaux, Jean-Luc Mulumba, Mwene Ntabwoba, Stanislas Sebagenzi, Silvanos Fiama Bondo, François Kervyn and Hans-Balder Havenith (2006). Seismic hazard assessment of the Kivu rift segment based on a new seismotectonic zonation model (western branch, East African Rift system). Journal of African Earth Sciences, 1-25

David Throp. (2002). Evaluation of the Save the Children UK Response to the Eruption of the Nyiragongo Volcano, in the Democratic Republic of Congo in January 2002. London

Demant, A., Lestrade, P., Lubala, R.T., Kampunzu, A.B., Durieux, J. (1994). Volcanological and petrological evolution of Nyiragongo volcano, Virunga volcanic field, Zaire. Bulletin of Volcanology 56, 47–61.

Di Ruocco, A., Gasparini, P., & Weets, G. (2015). Urbanisation and climate change in Africa: setting the scene. In: Pauleit, S., Coly, A., Fohlmeister, S., Gasparini, P., Jorgensen, G., Kabisch, S., Kombe,



- W.J., Lindley, S., Simonis, I., Yeshitela, K. (Eds.) Urban vulnerability and climate change in Africa. Springer International Publishing Switzerland, *Springer International Publishing*, 4, 1-35.
- Durieux, J. (2002). Nyiragongo : The January 10th, 1977 eruption. *Acta Vulcanologica*, 14, 145-148.
- EGOROFF, B. (1965). Eruption du Volcan Milhaga en 1954. Inst. Parcs Nat. Congo Belge, Bruxelles, fasc. 4.
- Favalli, M., G. D. Chirico, P. Papale, M. T. Pareschi, M. Coltelli, N. Lucaya, and E. Boschi (2006), Computer simulations of lava flow paths in the town of Goma, Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo, *J. Geophys. Res.*, 111, B06202, doi:10.1029/2004JB003527.
- Favalli, M., Chirico, G.D., Papale, P., Pareschi, M.T., Boschi (2009). Lava flow hazard at Nyiragongo volcano, D.R.C. 1. Model calibration and hazard mapping. *Bulletin of Volcanology* 71, 363–374.
- Fournier d’Albe, E.M. (1979). Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of the Geological Society of London* 136, 321–326.
- Glèlè Kakai, V. K. Salako, E. A. Padonou et A. M. Lykke. (2016). Méthodes statistiques multivariées utilisées en écologie. *Annales des sciences agronomiques* 20, 139-157
- Havenith H. B. (2017). Cours de Risques Naturels : Aspects généraux, Master de Spécialisation en Gestion des Risques et des Catastrophes, Université de Liège.
- Humanitarian Response (2018). « KoBoToolbox », <https://www.humanitarianresponse.info/en/applications/kobotoolbox>
- Harvard Humanitarian Initiative (2018). « KoBoToolbox », 2018. <https://hhi.harvard.edu/research/kobotoolbox>
- Jean-Pierre Descy, François Darchambeau and Martin Schmid. (2012). Lake Kivu, Limnology and biochemistry of a tropical great lake, *Springer*.
- Katamba Mukandi, T. (1978). Les conséquences des éruptions volcaniques dans la région de Goma 1976-1977. Institut Supérieur Pédagogique de Bukabu.
- 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., Kavotha, 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* 14, 27–61.
- Leone F. (2002). Implications territoriales et socio-économiques des menaces naturelles en Martinique (Antilles françaises) : une approche spatiale assistée par S.I.G. *Annales de Géographie*, 627/628, 549-573
- Lucio Lirer Livia Vitelli (1998). Volcanic Risk Assessment and Mapping in the Vesuvian Area Using GIS. *Natural Hazards*, 17, 1–15
- Mavonga, T., N. Zana, and R. J. Durrheim (2010). Studies of crustal structure, seismic precursors to volcanic eruptions and earthquake hazard in the eastern provinces of the Democratic Republic of Congo, *J. Afr. Earth Sci.* 58, 623–633

MEYER A. (1953). Le volcan Nyamuragira et son éruption de 1951-1952. Bull. Inst. Royal Congo Beige, XXIV, fasc. 1, 233-287.

Mboga, N., Georganos, S., Grippa, T., Lennert, M., Vanhuysse, S. and Wolff, E. (2018). Fully convolution networks for the classification of aerial VHR imagery. GEOBIA. Montpellier.

Michellier, M., Pigeon, P., Kervyn, F., Wolff, E. (2016). Contextualizing vulnerability assessment: a support to geo-risk management in Central Africa. Natural Hazards 82, 27–42.

Michellier, C. (2017). Contribuer à la prévention des risques d'origine géologique : l'évaluation de la Vulnérabilité des populations dans un contexte de rareté de données. Les cas de Goma et Bukavu (RDCongo). PhD thesis, Université Libre de Bruxelles and Vrije Universiteit Brussel.

Mulegetsi Bulondo, P. (2002). L'impact des catastrophes naturelles sur les attitudes et les comportements des gouvernés et gouvernants dans la ville de Goma : Cas de l'éruption du Volcan Nyiragongo du 17/01/2002. Université de Kisangani.

Mossoux, S., Saey, M., Bartolini, S., Poppe, S., Canters, F., Kervyn, M., 2016. Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. Computers & Geosciences 97, 98–109.

NAMOGO B. D., Georges MAVONGA, Josué SUBIRA, Albert KYAMBIKWA, Modeste ETOY, Delphin ASSANI, Rigobert RUSANGIZA, Antoine FIKIRI, Jampy WILONJA, Francois LUKAYA, Moise CINYABUGUM, Pascal MATAMBA, and Désiré KASONGO (2016b). Seismic activity related to the June 2014 New lava Lake apparition at Nyamulagira volcano in the Western Branch of the East African Rift. International Journal of Innovation and Scientific Research, 24. 124-131

Nicholas d'Oreye, Pablo J. González, Ashley Shuler, Adrien Oth, Louis Bagalwa, Göran Ekström, Dégratias Kavotha, François Kervyn, Etoy Osodundu, Christelle Wauthier, José Fernández. (2010). Source parameters of the 2008 Bukavu-Cyangugu earthquake estimated from InSAR and teleseismic data. Geophysical Journal International 184 (2)

Nzangura Kapita, B. (1994). Croissance urbaine à Goma. Une ville des hautes terres du Zaïre Oriental. Institut Supérieur Pédagogique de Bukavu.

Orlando Vaselli, Franco Tassi, Dario Tedesco, Emilio Cuoco, Barbara Nisi, Matthieu M. Yalire. (2007). Environmental impact of the Nyiragongo volcanic plume after the January 2002 eruption: Conference Paper, 26th ECGS Workshop on Active Volcanism & Continental Rifting .

Peter Baxter and Ancia, A. (2002). Human Health and Vulnerability in the Nyiragongo Volcano Crisis, Democratic Republic of Congo 2002. Final Report to the World Health Organisation.

Peter Baxter, Patrick Allard, Michel Halbwachs, Jean-Christophe Komorowski, Andrew Woods, and Anne Ancia. (2002). Human health and vulnerability in the nyiragongo volcano eruption and humanitarian crisis at Goma, democratic republic of Congo, Report to the World Health Organisation.

Poppe, S., Smets, B., Fontijn, K., Rukeza, M.B., De Marie Fikiri Migabo, A., Milungu, A.K., Namogo, D.B., Kervyn, F., Kervyn, M., 2016b. Holocene phreatomagmatic eruptions alongside the densely populated northern shoreline of Lake Kivu, East African Rift: timing and hazard implications. Bulletin of Volcanology 78, 82.

Robertson, Richard (1995) An Assessment of the Risk from Future Eruptions of the Soufriere Volcano of St. Vincent, West Indies. Natural Hazards 11, 163-191.

Sahama, Th.G. (1973). Evolution of the Nyiragongo magma. Journal of Petrology 14, 33–48.

- Sawyer G. M. , S. A. Carn , V. I. Tsanev , C. Oppenheimer , M. Burton. (2008). Investigation into magma degassing at Nyiragongo volcano, Democratic Republic of the Congo, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, Issue 2
- Smets, B., Wauthier, C., D'Orey, N. (2010). A new map of the lava flow field of Nyamulagira (D.R. Congo) from satellite imagery. *Journal of African Earth Sciences* 58, 778–786.
- Smets, B., Kervyn, M., Kervyn, F., D'Orey, N. (2015). Spatio-temporal dynamics of eruptions in a youthful extensional setting: Insights from Nyamulagira volcano (D.R. Congo), in the western branch of the East African Rift. *Earth-Science Review* 150, 305–328.
- Smets, B., D'Orey, N., Kervyn, M., Kervyn, F., 2016a. Gas piston activity of the Nyiragongo lava lake: First insights from a Stereographic Time-Lapse Camera system. *Journal of African Earth Sciences* 1–14.
- Smets, B., Tedesco, D., Kervyn, F., Kies, A., Vaselli, O., Yalire, M., 2010a. Dry gas vents (“mazuku”) in Goma region (North-Kivu, Democratic Republic of Congo): Formation and risk assessment. *Journal of African Earth Sciences* 58, 787–798.
- Susan L. Cutter, Bryan J. Boruff and W. Lynn Shirley (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *SOCIAL SCIENCE QUARTERLY*, Volume 84, Number 2.
- TAZIEFF, H. (1950), L'éruption du volcan Gituro de mars - Juillet 1948, *Serv. Géol. Congo Beige*. M6m. n. 1, p. 1-157.
- Tazieff, H. (1977). An exceptional eruption: Mt. Niragongo, Jan. 10th, 1977. *Bulletin of Volcanology* 40, 189–200.
- Tedesco, D., Vaselli, O., Papale, P., Carn, S.A., Voltaggio, M., Sawyer, G.M., Durieux, J., Kasereka, Tassi, F. (2007). January 2002 volcano-tectonic eruption of Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo. *Journal of Geophysical Research* 112, B09202.
- Trefon, T. et Kabuyaya, N. (2016). Précarité et bien être à Goma (RDC)- Recit de la vie dans une ville de tous les dangers. L'Harmattan, Paris/Tervuren
- UNDRO (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting (9 – 12 July 1979). United Nations Disaster Relief Coordinator. Geneva.
- UNISDR (2009). UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction. Geneva.
- VERHOOGEN, J. (1939). New Data on Volcanic Gases: the 1938 Eruption of Nyamlagira. *Am Journ. Sci.* 237, 656-672
- Wauthier, C., Cayol, V., Kervyn, F., D'Orey, N. (2012). Magma sources involved in the 2002 Nyiragongo eruption, as inferred from an InSAR analysis. *Journal of Geophysical Research* 117, B05411.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. (2004). At Risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters. Routledge, London.



## **Les annexes**

**Annexe 1.** Questionnaire d'enquete sur Kobotoolbox pour l'investigation des batiments

**Annexe 2a.** Questionnaire d'enquête adressé aux commissionnaires des parcelles de Virunga et Murara

**Annexe 2b.** Tableau des réponses fournies par les commissionnaires des parcelles concernant les prix des parcelles à Virunga et Murara.

**Annexe 3a.** Questionnaire d'enquête adressé aux ingénieurs architectes des bâtiments à Goma

**Annexe 3b.** Fiche des réponses fournies par ingénieurs architectes sur les prix des bâtiments à Goma

**Annexe 4.** Extrait de l'Orthophoto prise dans les quartiers Virunga et Murara, Goma.

**Annexe 1.** Questionnaire d'enquête sur Kobotoolbox pour l'investigation des bâtiments.

Goma\_Valeur éco bâti

<https://ee.kobotoolbox.org/preview?form=https://kf.kobotoolbox.org/as...>

Page 1/2

**Goma\_Valeur éco bâti**

**Group**

**quartier**

☐ Murara

☐ Virunga

**ilot**

**Préciser le nom de l'avenue**

**Préciser le numéro du bâtiment**

**Type d'activité dans le bâtiment**

☐ Habitation

☐ Commerce

☐ Autre

Si autre activité, préciser

**Nombre d'étage du bâtiment**

**Taille du bâtiment**

☐ < ou = à 2m / 5m

☐ entre 2m / 5m et 4m / 6m

☐ entre 4m / 6m et 6m / 10m

☐ entre 6m / 10m et 10m / 15m

☐ entre 10m / 15m et 15m / 20m

☐ entre 15m / 20m et 20m / 30m

☐ > 20m / 30m

☐ Autre

Si autre taille, préciser

**Types de matériaux pour les murs**

- ☐ Non durables
- ☐ Durables

**Type de murs non durables**

- ☐ Bâche
- ☐ Planche en bois
- ☐ Tôles galvanisées
- ☐ Autre

Si autre matériaux non durable pour les murs, préciser

---

**Type de murs durables**

- ☐ Briques sans béton armé
- ☐ Briques avec béton armé
- ☐ Ciment sans béton armé
- ☐ Ciment avec béton armé
- ☐ Béton armé seulement
- ☐ Autre

Si autre matériaux durable pour les murs, préciser

---

**Localisation bâtiment**

*GPS coordinates can only be collected when outside.*

latitude (x,y °)

---

longitude (x,y °)

---

altitude (m)

---

accuracy (m)

---



**Annexe 2a.** Questionnaire d'enquête adressé aux commissionnaires des parcelles de Virunga et Murara

Commissionnaire enquêté N°.....

***Investigation de la valeur économique estimée des bâtiments dans la ville de Goma***

***Questionnaire adressé aux commissionnaires des parcelles***

Nom du quartier : .....

A. Quels sont les paramètres qui déterminent le prix d'une parcelle dans ce quartier ?

**Exemple des réponses :** Proximité à la route, Proximité du marché, .....

Vos réponses : .....  
.....  
.....  
.....

B. Quels sont les seuils de distances par rapport à ces paramètres ?

**Exemple de réponse :** Généralement après chaque 50m au-delà du marché, le prix de la parcelle change, au-delà de 100m du marché, ça change encore .....

Vos Réponses : .....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

C. Quel est le prix d'une parcelle en fonction de ces seuils ? Veuillez spécifier les tailles.

**Exemple de réponse :** Pour une parcelle de 20m/15m à plus ou moins 50m de la route, le prix varie entre 6000\$ et 7000\$.

Vos réponses : .....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Merci pour vos réponses

**Annexe 2b.** Tableau des réponses fournies par les commissionnaires des parcelles concernant les prix des parcelles à Virunga et Murara.

| N° | Position de la parcelle par rapport à la route principale | Descriptions du bâti érigé dans la parcelle | Prix en USD ( parcelle et bâtiment) |
|----|---|---|-------------------------------------|
| 1  | 1   | planches                                    | 45000                               |
| 2  | 1   | Blocs ciment et avec greniers               | 60000                               |
| 3  | 2   | Blocs ciment et avec greniers               | 50000                               |
| 4  | 2   | planches                                    | 30000                               |
| 5  | 3   | Blocs ciment et avec greniers               | 40000                               |
| 6  | 3   | planches                                    | 15000                               |
| 7  | 4, 5, etc.  | Blocs ciment et avec greniers               | 40000                               |
| 8  | 4, 5, etc.  | planches                                    | 15000                               |

## Annexe 3a. Questionnaire d'enquête adressé aux ingénieurs architectes des bâtiments à Goma

Ingénieur enquêté N° .....

Questionnaire adressée aux ingénieurs des maisons en planche et des maisons en bloc Ciments (Au moins 4 ingénieurs de maisons en planches et 4 des maisons en bloc-ciment).

Pouvez-vous nous aider à remplir les cases vides par des coûts de construction estimatifs (en dollars américains) selon votre expérience et vos devis habituels dans cette ville de Goma pour chaque type et taille de bâtiments repris dans les tableaux ci-dessous ?

### Bâtiments en planches de bois.

| <div>Taille</div> <div>Dimension</div> | Type de murs    |    |                  |    |                   |    |
|--|-----------------|----|------------------|----|-------------------|----|
|  | Bash            |    | Planches en bois |    | Tôles galvanisées |    |
|  | Nombre d'étages |    | Nombre d'étages  |    | Nombre d'étages   |    |
|  | 0               | ≥1 | 0                | ≥1 | 0                 | ≥1 |
| ≤ 2m/5m                                |                 |    |                  |    |                   |    |
| Entre 2m/5m et 4m/6m                   |                 |    |                  |    |                   |    |
| Entre 4m/6m et 6m/10m                  |                 |    |                  |    |                   |    |
| ≥ 6m/10m                               |                 |    |                  |    |                   |    |

### Bâtiments en briques ou blocs-ciment

| Batiments en briques ou blocs-ciment |  |                 |   |   |   |   |                 |   |   |   |  |                 |   |   |   |                      |                 |   |   |   |    |
|--------------------------------------|--|-----------------|---|---|---|---|-----------------|---|---|---|--|-----------------|---|---|---|----------------------|-----------------|---|---|---|----|
|                                      | Type de murs                                       |                 |   |   |   |   |                 |   |   |   |  |                 |   |   |   |                      |                 |   |   |   |    |
|                                      | Briques ou blocs ciment sans colonne de béton armé |                 |   |   |   | Briques ou blocs ciment avec colonnes de béton armé |                 |   |   |   |  |                 |   |   |   | Béton armé seulement |                 |   |   |   |    |
|                                      |  |                 |   |   |   | Murs moins épais et fondation mal renforcée         |                 |   |   |   | Murs épais et fondation bien renforcée |                 |   |   |   |                      |                 |   |   |   |    |
| Taille                               |  | Nombre d'étages |   |   |   |   | Nombre d'étages |   |   |   |  | Nombre d'étages |   |   |   |                      | Nombre d'étages |   |   |   |    |
| Dimension                            |  | 0               | 1 | 2 | 3 | ≥4  | 0               | 1 | 2 | 3 | ≥4                                     | 0               | 1 | 2 | 3 | ≥4                   | 0               | 1 | 2 | 3 | ≥4 |
| ≥ 5m/10m                             |  |                 |   |   |   |   |                 |   |   |   |  |                 |   |   |   |                      |                 |   |   |   |    |
| Entre 5m/10m et 10m/20m              |  |                 |   |   |   |   |                 |   |   |   |  |                 |   |   |   |                      |                 |   |   |   |    |
| Entre 10m/20m et 20m/40m             |  |                 |   |   |   |   |                 |   |   |   |  |                 |   |   |   |                      |                 |   |   |   |    |
| ≥ 20m/40m                            |  |                 |   |   |   |   |                 |   |   |   |  |                 |   |   |   |                      |                 |   |   |   |    |

# **Annexe 3b. Fiche des réponses fournies par ingénieurs architectes sur les prix des bâtiments à Goma**

Ingénieur enquêté N° **01**

Questionnaire adressée aux ingénieurs des maisons en planche et des maisons en bloc Ciments (Au moins 4 ingénieurs de maisons en planches et 4 des maisons en bloc-ciment):

Pourriez-vous nous aider à remplir les cases vides par des coûts de construction estimatifs (en dollars américains) selon votre expérience et vos devis habituels dans cette ville de Goma pour chaque type et taille de bâtiments repris dans les tableaux ci-dessous ?

**Bâtiments en planches de bois.**

| Taille<br>Dimension   | Type de murs    |    |                  |      |                   |    |
|-----------------------|-----------------|----|------------------|------|-------------------|----|
|                       | Bash            |    | Planches en bois |      | Tôles galvanisées |    |
|                       | Nombre d'étages |    | Nombre d'étages  |      | Nombre d'étages   |    |
|                       | 0               | ≥1 | 0                | ≥1   | 0                 | ≥1 |
| ≤ 2m/5m               | 200             |    | 500              | 1200 | 400               |    |
| Entre 2m/5m et 4m/6m  | 400             |    | 700              | 1500 | 550               |    |
| Entre 4m/6m et 6m/10m | 600             |    | 950              | 2300 | 800               |    |
| ≥ 6m/10m              | 800             |    | 1000             | 3500 | 1000              |    |

**Bâtiments en briques ou blocs-ciment**

| Taille<br>Dimension      | Type de murs                                       |   |   |   |    |   |       |       |       |       |  |       |       |       |       |                      |   |   |   |    |  |
|--------------------------|--|---|---|---|----|---|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|----------------------|---|---|---|----|--|
|                          | Briques ou blocs ciment sans colonne de béton armé |   |   |   |    | Briques ou blocs ciment avec colonnes de béton armé |       |       |       |       |  |       |       |       |       | Béton armé seulement |   |   |   |    |  |
|                          | Nombre d'étages                                    |   |   |   |    | Murs moins épais et fondation mal renforcée         |       |       |       |       | Murs épais et fondation bien renforcée |       |       |       |       | Nombre d'étages      |   |   |   |    |  |
|                          | 0  | 1 | 2 | 3 | ≥4 | 0   | 1     | 2     | 3     | ≥4    | 0                                      | 1     | 2     | 3     | ≥4    | 0                    | 1 | 2 | 3 | ≥4 |  |
| ≤ 5m/10m                 | 2500   |   |   |   |    | 3000  | 6000  | 10000 | 15000 | 20000 | 40000                                  | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | 30000                |   |   |   |    |  |
| Entre 5m/10m et 10m/20m  | 4000   |   |   |   |    | 5000  | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | 40000                                  | 15000 | 20000 | 25000 | 30000 | 35000                |   |   |   |    |  |
| Entre 10m/20m et 20m/40m | 7000   |   |   |   |    | 9000  | 17000 | 25000 | 32000 | 40000 | 65000                                  | 28000 | 35000 | 42000 | 50000 | 58000                |   |   |   |    |  |
| ≥ 20m/40m                | 14000  |   |   |   |    | 17000   | 30000 | 40000 | 50000 | 65000 | 120000                                 | 38000 | 50000 | 65000 | 80000 | 95000                |   |   |   |    |  |

Merci pour vos réponses.



Ingénieur enquêté N° 02.

Questionnaire adressée aux ingénieurs des maisons en planche et des maisons en bloc ciments (Au moins 4 ingénieurs de maisons en planches et 4 des maisons en bloc-ciment)

Pouvez-vous nous aider à remplir les cases vides par des coûts de construction estimatifs (en dollars américains) selon votre expérience et vos devis habituels dans cette ville de Goma pour chaque type et taille de bâtiments repris dans les tableaux ci-dessous ?

Bâtiments en planches de bois.

| Taille<br>Dimension   | Type de murs    |    |                  |      |                   |    |
|-----------------------|-----------------|----|------------------|------|-------------------|----|
|                       | Bash            |    | Planches en bois |      | Tôles galvanisées |    |
|                       | Nombre d'étages |    | Nombre d'étages  |      | Nombre d'étages   |    |
|                       | 0               | ≥1 | 0                | ≥1   | 0                 | ≥1 |
| ≤ 2m/5m               | 300             |    | 700              | 2400 | 450               |    |
| Entre 2m/5m et 4m/6m  | 550             |    | 800              | 1600 | 600               |    |
| Entre 4m/6m et 6m/10m | 850             |    | 1050             | 2100 | 750               |    |
| ≥ 6m/10m              | 1000            |    | 2300             | 4600 | 900               |    |

Bâtiments en briques ou blocs-ciment

| Taille<br>Dimension      | Type de murs                                       |   |   |   |    |   |       |       |       |       |  |       |       |       |       |                      |   |   |   |    |
|--------------------------|--|---|---|---|----|---|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|----------------------|---|---|---|----|
|                          | Briques ou blocs ciment sans colonne de béton armé |   |   |   |    | Briques ou blocs ciment avec colonnes de béton armé |       |       |       |       |  |       |       |       |       | Béton armé seulement |   |   |   |    |
|                          |  |   |   |   |    | Murs moins épais et fondation mal renforcée         |       |       |       |       | Murs épais et fondation bien renforcée |       |       |       |       |                      |   |   |   |    |
|                          | Nombre d'étages                                    |   |   |   |    | Nombre d'étages                                     |       |       |       |       | Nombre d'étages                        |       |       |       |       | Nombre d'étages      |   |   |   |    |
|                          | 0  | 1 | 2 | 3 | ≥4 | 0   | 1     | 2     | 3     | ≥4    | 0                                      | 1     | 2     | 3     | ≥4    | 0                    | 1 | 2 | 3 | ≥4 |
| ≤ 5m/10m                 | 3000   |   |   |   |    | 3500  | 7000  | 14000 | 20000 | 25000 | 4500                                   | 9000  | 18000 | 27000 | 35000 |                      |   |   |   |    |
| Entre 5m/10m et 10m/20m  | 6500   |   |   |   |    | 8000  | 12000 | 17000 | 23000 | 30000 | 9000                                   | 15000 | 24000 | 30000 | 38000 |                      |   |   |   |    |
| Entre 10m/20m et 20m/40m | 10000  |   |   |   |    | 12000   | 18000 | 25000 | 34000 | 45000 | 15000                                  | 26000 | 37000 | 48000 | 60000 |                      |   |   |   |    |
| ≥ 20m/40m                | 14500  |   |   |   |    | 16500   | 24000 | 33500 | 48000 | 62000 | 22000                                  | 37000 | 52000 | 67000 | 85000 |                      |   |   |   |    |

Merci pour vos réponses.



**Annexe 4.** Extrait de l'Orthophoto prise dans les quartiers Virunga et Murara, Goma.

