UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Techniques d’analyse des gaz et leur apport dans l’ étude et la surveillance du volcan Nyiragongo et le lac Kivu

MUSOSEKANIA KASEREKA, Marcellin; Sous la direction de : Prof. Samuel Bunani

2025
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1888

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

TECHNIQUES D'ANALYSE DES GAZ ET LEUR APPORT DANS L'ETUDE ET LA SURVEILLANCE DU VOLCAN NYIRAGONGO ET LE LAC KIVU

Par

Marcellin KASEREKA MUSOSEKANIA

Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCES CHIMIQUES

SPECIALITE : CONTROLE ET ANALYSES CHIMIQUES

Sous la direction de :

Directeur : **Prof. Samuel BUNANI**

Co-directeur: **Prof. Charles BALAGIZI MUHIGIRWA**

Bujumbura, Mars 2025

MEMBRES DU JURY

Président : Prof. Steve DE CLIFF

Secrétaire : Prof. Aloys KATIHABWA

Directeur : Prof. Samuel BUNANI

Co-directeur : Prof. Charles BALAGIZI MUHIGIRWA

DEDICACES

A ma famille : Mon épouse KATUNGU TASIVIRIYO Betty

Nos enfants : KASOKI MUSOSEKANIA Natacha, KAVIRA MUSOSEKANIA Nathalie et MUHINDO MUSOSEKANIA Nathanaël

REMERCIEMENTS

Notre premier remerciement s'adresse à l'éternel tout puissant, le Dieu du temps et des circonstances qui continue à nous accorder la grâce de vie et de bonne santé sans lesquelles ce travail ne pourrait pas être réalisé.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux directeurs de ce travail les Professeurs BUNANI Samuel et BALAGIZI MUHIGIRWA Charles qui malgré leurs multiples occupations ont accepté de consacrer leur temps pour nous, votre concours nous a été de très grande nécessité.

Nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nos vifs remerciements à tous les enseignants de l'Université du Burundi en général qui ont contribué à notre formation et en particulier ceux du département de Chimie.

Nous remercions vivement notre famille, mon épouse Betty TASIVIRIYO et nos enfants NATACHA, NATHALIE et NATHANAEL qui nous ont toujours soutenu et partagé leur affection durant tout ce parcours.

Nous remercions les grandes familles MUPIKA et MAHANGO pours leurs encouragements.

Nos remerciements particuliers au professeur Vestine NTAKARUTIMANA, responsable du programme de Master en sciences chimiques pour sa bonne collaboration durant tout notre parcours.

Notre reconnaissance aux camarades de lutte AOKOWA Nathan, BALOLAGE Paulin, HAVUGIYAREMYE Esaïe, IRAKOZE Janvier, KAMARA Fred, MUCOWINTORE Ariella, NDAYEGAMIYE Axel, NDUWAYO Jean Marie, NIYOYANKUNZE Théogène, NIYOYITUNGIRA Jean Marie, NSENGIYUMVA Remy et NSENGIYUMVA Emile.

Nous remercions également toute l'équipe de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) avec qui nous avons effectué le terrain durant la récolte des données de ce travail.

Que tous les locataires du CELAB avec qui nous avons passé un moment de maquis ensemble trouvent notre reconnaissance ici !

A tous ceux-là qui ne sont pas cités et qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire, qu'ils trouvent notre gratitude.

KASEREKA MUSOSEKANIA Marcellin

RESUME

La ville de Goma en (RDC) et celle de Gisenyi au Rwanda sont battues sur les bordures nord du Lac Kivu et sur les anciennes coulées de lave du volcan Nyiragongo dont le cratère central se trouve à seulement 15 km au nord de ces deux villes. Le dégazage diffus à travers le sol est couramment observé dans cette zone volcanique ce qui constitue un facteur de risque pour les populations environnantes. En plus d'être exposées aux risques volcaniques, les populations de ces villes, cités et villages sont également exposées à une possible éruption limnique du lac Kivu qui pourrait libérer d'énormes quantités de CO_2 et de CH_4 dissous dans les eaux profondes de ce lac. Ces deux systèmes, à savoir les volcans actifs des Virunga et le lac Kivu, doivent donc être minutieusement étudiés et surveillés afin de prévenir la population de l'approche de l'éruption d'un des volcans ou du lac Kivu. Il faut donc disposer des méthodes modernes pour cette fin. Ce travail vise l'objectif de prédire une éruption volcanique ou limnique en discutant des techniques d'analyse des gaz et leur apport dans l'étude et la surveillance du volcan Nyiragongo et le lac Kivu. Ces techniques qui permettent de mesurer in situ et à temps réel la concentration et les flux de gaz en un temps record ont été appliquées sur le terrain. Ainsi, les mesures de flux de CO_2 et de H_2S ont été effectuées sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo, dans les Mazuku et à la surface des eaux du lac Kivu par la méthode de la chambre d'accumulation en utilisant un fluxmètre portable de la marque West Systems. De l'autre côté, les concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S ont été mesurée dans l'air au-dessus du lac Kivu par un MultiGAS. Les données obtenues révèlent d'une part que le flux de CO_2 était faible sur les eaux de la surface du lac Kivu et varient entre 0,21et 61,68 g/m^2/jour, étaient moyen sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo (variant entre 9,34 et 98.591,95 g/m^2/jour) mais très élevé dans les Mazuku avec des valeurs ± 100 fois supérieures à celles mesurées sur la fracture. Les valeurs des flux de H_2S ont varié quant à elles de 0,01 à 0,14 g/m^2/jour sur les eaux de la surface du lac Kivu, de 0 à 0,62 g/m^2/jour sur la fracture et de 0 à 0,24 g/m^2/jour dans les Mazuku. En général, les mesures des concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air situé au-dessus des eaux du lac Kivu ont montré l'absence de pollution à part quelques valeurs isolées obtenues dans la baie de Kabuno. Des mesures supplémentaires des paramètres physicochimiques des eaux du lac Kivu ont été mesurées à l'aide d'un CTD afin de donner une idée sur l'état de ce lac avant tout dégazage à grande échelle. La fiabilité des données obtenues par les mesures effectuées par les techniques d'analyse discutées dans ce travail ainsi que la possibilité de les télémétrer pour une surveillance à temps réel prouvent que l'Observatoire Volcanologique de Goma peut compter sur cette nouvelle technologie qui en plus est à coût réduit afin d'améliorer ses méthodes d'étude et de surveillance des volcans actifs des Virunga et du lac Kivu.

Mots clés: Mesure in situ, gaz volcaniques, volcan Nyiragongo, lac Kivu, Mazuku, flux en gaz

ABSTRACT

The city of Goma in DRC and the city of Gisenyi in Rwanda are located on the northern shores of Lake Kivu and on the ancient lava flows of the Nyiragongo volcano, whose central crater is only 15 km north of these two cities. Diffuse degassing through the ground is commonly observed in this volcanic zone, posing a risk to the surrounding populations. In addition to being exposed to volcanic hazards, the populations of these cities, towns, and villages are also at risk of a possible limnic eruption of Lake Kivu, which could release enormous quantities of CO_2 and CH_4 dissolved in the deep waters of the lake. Therefore, these two systems, the active Virunga volcanoes and Lake Kivu must be thoroughly studied and monitored to alert the population of an impending eruption from either the volcanoes or Lake Kivu. Modern methods are necessary for this purpose. This work aims to predict a volcanic or limnic eruption by discussing gas analysis techniques and their contribution to the study and monitoring of the Nyiragongo volcano and Lake Kivu. These techniques, which make it possible to measure gas concentrations and flows in situ and in real time, were applied in the field. CO_2 and H_2S flux measurements were carried out on the southern main fracture of the Nyiragongo volcano, in the Mazuku and on the water surface of Lake Kivu by the accumulation chamber method, using a West Systems portable fluxmeter. On the other hand, concentrations of CO_2, SO_2 and H_2S were measured in the air above Lake Kivu using a MultiGAS. The data obtained revealed that CO_2 flux was low over the surface waters of Lake Kivu, varying between 0.21 and 61.68 $g/m^2/day$, was average over the main southern fracture of the Nyiragongo volcano (varying between 9.34 and 98,591.95 $g/m^2/day$) but very high in the Mazuku, with values ± 100 times higher than those measured over the fracture. H_2S flux values ranged from 0.01 to 0.14 $g/m^2/day$ on the surface waters of Lake Kivu, from 0 to 0.62 $g/m^2/day$ on the fracture and from 0 to 0.24 $g/m^2/day$ in the Mazuku. In general, measurements of CO_2, SO_2 and H_2S concentrations in the air above the waters of Lake Kivu showed the absence of pollution, apart from a few isolated values obtained in Kabuno Bay. Additional measurements of the physicochemical parameters of Lake Kivu waters were taken using a CTD to give an idea of the state of this lake prior to any large-scale degassing. The reliability of the data obtained using the analytical techniques discussed in this study, along with the possibility of real-time telemetry for continuous monitoring, demonstrates that the Goma Volcano Observatory can rely on this new, cost-effective technology to improve its methods for studying and monitoring the active Virunga volcanoes and Lake Kivu.

Keywords: In situ measurements, volcanic gases, Nyiragongo volcano, Lake Kivu, Mazuku, gas flux

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACES ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ..... **viii**
LISTE DES FIGURES ..... **ix**
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **xi**
AVANT-PROPOS ..... **xii**
INTRODUCTION GENERALE **1**
CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES GAZ VOLCANIQUES ET LES GAZ DU LAC KIVU 6
I.1. Généralités sur les gaz volcaniques 6
I.1.1. Origine et composition des gaz volcaniques 6
I.1.2. Composition des gaz au volcan Nyiragongo 15
I.2. Les gaz dissous dans le lac Kivu 15
I.2.1. Origine et nature des gaz dissous dans les eaux profondes du lac Kivu 15
I.2.2. Risque d'explosion limnique au lac Kivu 18
I.2.3. Extraction de méthane et dégazage de dioxyde de carbone au lac Kivu 19
I.3. Risques volcaniques dans la ville de Goma et ses environs 21
I.3.1. Les coulées de lave 21
I.3.2. Le panache des gaz et l'émission des cendres volcaniques 22
I.3.3. La pollution de l'eau 24
I.3.4. Les Mazuku 25
CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES 28
II.1. Matériel 28

II.1.1. Présentation du milieu d'étude....28

II.1.2. Sites de mesure 32

II.1.3. Description de l'équipement....34

II.2. Méthodes.... 38

II.2.1. Différentes méthodes d'analyses des gaz volcaniques 38

II.2.2. Travaux de terrain et acquisition des données 46

Chapitre III : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 56

III.1. Présentation des résultats 56

III.1.1. Concentration et flux en CO_2 dans les Mazuku et sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo 56

III.1.2. Flux de H_2S dans les Mazuku et sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo 57

III.1.3. Le flux de CO_2 et H_2S émis des eaux de surface du lac Kivu 58

III.1.4. Concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air au-dessus du lac Kivu 59

III.1.5. Les paramètres physicochimiques du lac Kivu 59

III. 2. Discussion des résultats.... 60

III.2.1. Analyse quantitative et qualitative des gaz par la méthode de la chambre d'accumulation 60

III.2.2. Mesure des flux des CO_2 et H_2S au lac Kivu 66

III.2.3 Les paramètres physicochimiques du lac Kivu 67

III.2.4. Mesures spatiales des gaz sur le lac Kivu par le MultiGAS....67

CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... 70

REFERENCES.... 72

ANNEXES 80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques et effets sur la santé de l'exposition humaine aux différents gaz volcaniques (Williams-Jones & Rymer (2015), voir autre compilation dans Balagizi et al., 2018) 14
Tableau 2: Travaux de terrain 48
Tableau 3: Variation des flux de CO_2 dans les Mazuku situés à l'ouest de la ville de Goma et au nord du lac Kivu 56
Tableau 4: Variation du flux en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo 57
Tableau 5: Variation du flux en H_2S dans les Mazuku situés à l'ouest de la ville de Goma et au nord du lac Kivu 58
Tableau 6: Variation du flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo 58
Tableau 7: Valeurs minimales, moyennes et maximales de concentration en CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air pour chaque date de mesure. 59
Tableau 8: Paramètres physicochimiques du lac Kivu 60
Tableau 9: Moyennes des valeurs du flux en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo en fonction de saison 62
Tableau 10: Moyennes des valeurs de flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo en fonction de saison 62

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Profils verticaux des concentrations de CO_2 et de CH_4 dans le grand bassin du lac Kivu d'après Schmid et al. (2005) et le CO_2 à Kabuno d'après Tassi et al. (2009) 17
Figure 2. Pressions partielles de CO_2 et de CH_4 et la pression totale du gaz dans le grand bassin du lac Kivu calculées à partir de leurs concentrations (Schmid et al., 2004). 19
Figure 3. Coulées de lave de l'éruption du Nyiragongo de 2002 autours et dans la ville de Goma (a et b), et coulées de l'éruption du Nyamulagira dans le parc des Virunga (c et d) (Photos OVG/Goma) 22
Figure 4. Vue du lac de lave à l'intérieur du cratère central du volcan Nyiragongo et les gaz qu'il émet en permanence (A) et du panache formé comme vu depuis la ville de Goma (B). 23
Figure 5. Personnes atteintes par la fluorose dentaire (Balagizi et al., 2018) 24
Figure 6. Un mazuku à Bulengo sur le front de coulée de lave avec quelques plantes caractéristiques dont le papyrus. 27
Figure 7. Carte montrant le lac Kivu et les huit volcans majeurs de la chaine volcanique des Virunga, à savoir le Nyiragongo, le Nyamulagira, Mikeno (Mi), Karisimbi (K), Visoke (V), Sabinyo (S), Gahinga (G) et Muhabura (Mu) qui sont situés le long des frontières entre la RDC, le Rwanda et l'Uganda. 31
Figure 8. Carte des sites de mesures de flux en gaz dans les Mazuku et sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo. 33
Figure 9. Cartes des sites de mesures de flux en gaz sur les eaux du lac Kivu (A) et tracés de mesure des gaz dans l'air (B) 33
Figure 10. Images du fluxmètre et ses différentes parties 36
Figure 11. Images d'un MultiGAS avec ses différentes parties 37
Figure 12. Bouteilles de gaz étalons pour le calibrage du MultiGAS, munies de soupapes régulatrices de pression 38
Figure 13. Echantillonnage des gaz volcaniques dans les fumerolles par la bouteille de Giggenbach (A), installation de matériel sur un évent volcanique pour l'échantillonnage des gaz par la méthode de Giggenbach (B). 39
Figure 14. Analyse des gaz par un chromatographe de gaz 40
Figure 15. *Schéma du principe de fonctionnement d'un capteur infrarouge NDIR (Gas measurement specialists, 2024).* 43
Figure 16. *Un appareil FTIR (a), Un appareil LIDAR (b), Système de fonctionnement d'un DOAS (c), Un appareil TDLAS (d).* 45
Figure 17. Courbe classique obtenue d'interprétation des données lors des mesures de flux de CO_2 avec une chambre d'accumulation (Boudoire, 2017 ;West Systems, 2019) 51
Figure 18. Présentation des résultats de mesures par le logiciel FluxRevision en fonction des courbes avant le traitement. 51
Figure 19. Présentation des résultats de mesures par le logiciel FluxRevision en fonction des courbes après le traitement. 52
Figure 20. Suite d'étapes pour télécharger les données depuis le MultiGAS à l'aide du logiciel loggernet 53
Figure 21. Variation du flux en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo 61
Figure 22. Variation de concentration en CO_2 dans les Mazuku 64

Figure 23. Variation de flux en CO_2 dans les Mazuku..... 64
Figure 24. Variation du flux en H_2S dans les Mazuku..... 65
Figure 25. Variation du flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo 65
Figure 26. Variation du flux en CO_2 sur le lac Kivu..... 66
Figure 27. Variation du flux en H_2S sur le lac Kivu 67
Figure 28. Concentration en CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air du grand bassin du lac Kivu à différentes dates (A), (B) et (C) et dans la baie de Kabuno (D)..... 68

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

atm : atmosphère

CFC : chlorofluorocarbone

COS : sulfure de carbonyle

COSPEC: Correlation Spectrometers

DOAS: Differential Optical Absorption Spectroscopy

IR : Infra-Rouge

Kt/j : Kilotonne par jour

LIDAR: Light detection And Ranging

LK : Lac Kivu

Mt : Mégatonne

MultiGAS: Multicomponent Gas Analyzer System

NDIR: Non-Dispersive InfraRed

NIST: National Institute of Standards and Technology

°C : degré Celsius

OMI : Ozone Monitoring Instrument

OP-FTIR: Open Path- Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy

OVG : Observatoire Volcanologique de Goma

PNVi : Parc National des Virunga

ppm : partie par million

PVV : Province Volcanique des Virunga

RDC : République Démocratique du Congo

REMA : Rwanda Environment Management Authority

SIG : Système d'Information Géographique

SREA : Système du Rift Est-Africain

TDLAS: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

T/j: Tonne par jour

TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer

UV : Ultra-Violet

AVANT-PROPOS

Ce mémoire marque la fin de mon parcours en Master en Sciences Chimiques, Spécialité Contrôle et Analyses Chimiques à l'Université du Burundi. Dans ce travail, nous montrons l'apport des nouvelles techniques d'analyse des gaz dans l'étude et la surveillance du volcan Nyiragongo et le lac Kivu.

La ville de Goma (RDC) et celle de Gisenyi (Rwanda) et de nombreux cités et villages sont tous exposés aux risques volcaniques de deux volcans actifs de la région (le Nyiragongo et le Nyamulagira), et de possible éruption limnique du lac Kivu. Parmi ces risques, on compte ceux des gaz diffus à travers le sol et ceux se trouvant dans l'atmosphère, entre autre le CO_2, H_2S et le SO_2 mais aussi ceux dissous dans les eaux profondes du lac Kivu (CO_2 et CH_4). L'étude et la surveillance de ces gaz a fait l'objet de ce travail afin de prévenir la population de l'approche de l'éruption d'un des volcans ou du lac Kivu.

La mesure de ces gaz a été faite par des petits instruments facilement portables et à moindre coût donnant des mesures très précises in situ, dont le flux en CO_2 et H_2S par un fluxmètre sur la fracture principale au sud du volcan Nyiragongo, dans les Mazuku et sur les eaux de surface du lac Kivu tandis que la concentration en CO_2, SO_2 et H_2S a été prise par un MultiGAS dans l'air au-dessus des eaux du lac Kivu.

Les résultats de mesures obtenus par ces instruments de nouvelle génération doté d'un système d'analyse de CO_2 par un détecteur spectrophotométrique basé sur la technologie infrarouge non dispersive et un détecteur électrochimique pour l'analyse de H_2S et SO_2 ont révélé d'une part que le flux en CO_2 était faible, moyen et très élevé respectivement au-dessus des eaux du lac Kivu, sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo et dans les Mazuku, d'autre part les valeurs de flux en H_2S ont été faibles sur tous les sites de mesure. Quant aux mesures des concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air situé au-dessus des eaux du lac Kivu, elles ont montré une absence de pollution à part quelques valeurs isolées obtenues dans la baie de Kabuno.

Une première base de données est constituée pour le lac Kivu avec les mesures de flux en gaz sur les eaux à la surface du lac Kivu et la concentration en gaz dans l'air au-dessus du lac Kivu mais aussi avec la mesure des paramètres physicochimiques des eaux de ce lac à l'aide d'un CTD afin de donner une idée sur l'état de ce lac avant tout dégazage à grande échelle.

La fiabilité des données obtenues par les mesures effectuées par ces techniques d'analyse prouve que l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) qui jadis utilisait des anciennes méthodes dans la surveillance des volcans actifs de la région des Virunga et le lac Kivu, peut désormais compter sur ces nouvelles techniques d'analyse des gaz pour l'amélioration de son travail.

INTRODUCTION GENERALE

Un volcan est une ouverture ou une fissure dans la croûte terrestre par laquelle des matériaux tels que la lave, les gaz et les cendres sont expulsés du manteau de la Terre vers sa surface. De ces matériaux, les gaz sont souvent invisibles mais généralement émis de manière continue et qui témoignent de l'activité volcanique (Williams-Jones & Rymer, 2015), ils sont le moteur des éruptions volcaniques et influencent sur le style éruptif, mais peuvent également avoir de l'influence sur le climat et la composition de l'atmosphère environnante (Lockwood & Hazlett, 2010). Même les volcans en état d'accalmie (qui ne présentent pas de signes d'activité sismique) sont capables de dégazer en permanence (Williams-Jones & Rymer, 2015). Le dégazage diffus à travers le sol est couramment observé dans les zones volcaniques et la surveillance de la concentration et des flux de ces gaz à la surface peut constituer un moyen sûr et efficace de déduire l'état de l'activité du système volcanique (Rinaldi et al., 2012). Les gaz volcaniques étant généralement plus mobiles que le fluide silicaté dont ils sont issus, les gaz transportent vers la surface des informations qui peuvent nous renseigner sur l'état du système magmatique en profondeur, sur les changements des conditions physico-chimiques dans les réservoirs magmatiques intermédiaires et sur le chemin vers la surface. Ces changements peuvent être dus à des réinjections de magma dans le réservoir ou le conduit (Symonds et al., 1994; Goff et al., 1998; Allard, Burton & Muré, 2005), à des injections profondes de fluides riches en CO_2 (Spilliaert, Metrich, and Allard, 2006; Metrich and Wallace, 2008; Moretti et al., 2018) ou à des changements de la pression interne des gaz (Giggenbach, 1996). C'est donc l'expansion des gaz qui apporte le magma à la surface et provoque l'éruption. L'interaction entre la viscosité et la température du magma et la teneur en gaz détermine si une éruption sera effusive ou explosive (Lockwood & Hazlett, 2010). Les changements temporels dans les compositions et les flux de gaz fournissent des informations uniques et instantanées sur l'activité d'un volcan qui sont inestimables pour l'évaluation des risques volcaniques (Moune & Roulleau, 2022).

L'étude des gaz volcaniques est donc cruciale pour plusieurs raisons, à savoir :

(1) **la prédiction des éruptions volcaniques** : les gaz volcaniques, comme le dioxyde de soufre (SO_2), le dioxyde de carbone (CO_2), et d'autres composés volatils, sont souvent émis en grandes quantités avant et pendant une éruption. La surveillance des variations dans la quantité et la composition de ces gaz permet de détecter des signes avant-coureurs d'une éruption, ce qui est essentiel pour la sécurité des populations vivant à proximité des volcans. Ainsi, des fluctuations importantes du dégazage au sol ont été observées avant des éruptions volcaniques (par exemple, le volcan Iwojima au Japon et le volcan Stromboli en Italie ; (Brusca et al., 2004; Notsu et al., 2005).

(2) **La compréhension des processus magmatiques** : les gaz volcaniques fournissent des informations sur la composition du magma et les processus qui se déroulent en profondeur, tels que la différenciation magmatique, la dépressurisation, et la déshydratation des minéraux. Cela aide à comprendre le comportement des volcans et les mécanismes des éruptions. La composition chimique des gaz volcaniques montre des variabilités significatives, selon : la source du magma, du contexte géologique ou tectonique mais aussi de la solubilité des gaz dissous dans le magma et l'interaction à faible profondeur au système hydrothermal, de l'eau de surface tout comme de l'eau de pluie. En dépit de cette variabilité, une tendance générale montre que la phase gazeuse est constituée des composés majeurs qui se rangent selon l'ordre d'importance de la manière suivante : H_2O (50– 90% d'émissions totales), CO_2 (1– 40%), SO_2 (1– 25%), H_2S (1– 10%), HCl (1– 10%) (Textor et al., 2004), suivies par d'autres constituants mineurs tels que : HF, HBr, N_2, He, Ar, Ne, CO, CH_4, H_2, … (Moune & Roulleau, 2022).

(3) **L'évaluation de l'impact sur le climat et l'atmosphère** : les gaz volcaniques, comme le dioxyde de soufre, peuvent avoir un impact significatif sur le climat en formant des aérosols dans la stratosphère qui réfléchissent la lumière solaire, refroidissant ainsi la surface de la Terre. Un exemple notable est l'éruption du mont Pinatubo en 1991 (aux Philippines), qui a provoqué un refroidissement global temporaire**.**

(4) **L'impact sur la santé et l'environnement** : les gaz volcaniques peuvent être toxiques et représenter un danger pour la santé humaine, la faune, et la flore. Par exemple, le dioxyde de soufre peut provoquer des pluies acides, endommager les cultures et les écosystèmes aquatiques, et affecter la qualité de l'air, provoquant des problèmes respiratoires. Les volcans peuvent produire des quantités énormes des gaz lors des éruptions laviques, ces gaz toxiques peuvent être mortels pour une exposition à courte durée lorsque les concentrations dépassent certains seuils, mais une exposition à long terme à une dose plus faible peut également constituer un danger important pour la santé (Williams-Jones & Rymer, 2015).

(5) **Les gaz jouent un rôle crucial dans la formation des minéraux et des gisements** : Les gaz volcaniques sont impliqués dans la formation de certains types de minéraux et de

gisements métalliques importants, comme ceux de soufre natif, de mercure, et d'autres métaux. Leur étude aide à mieux comprendre les processus de formation de ces ressources naturelles.

Différentes méthodes sont utilisées pour analyser les gaz volcaniques, incluant le traditionnel échantillonnage des gaz suivi par des analyses au laboratoire, mesure des gaz diffuses à l'aide des capteurs qui font directement des analyses in situ ainsi que par télédétection à l'aide d'instrument qui mesurent les gaz à distance. Dans la présente étude nous appliquons deux nouvelles méthodes pour quantifier les quantités des gaz émis par les volcans et le lac Kivu, et montrons que ces méthodes sont avantageuses pour la simple raison qu'elles aident à gagner le temps, produisent des résultats très précis et les coûts de matériel reste largement bas par rapport aux équipements traditionnels d'analyse des gaz (par exemple le spectrophotomètre de masse dans la méthode proposée par Giggenbach 1996 ou encore l'OP-FTIR qui sont des équipement trop couteux et très lourds, consommateurs de réactifs et du temps). Les méthodes utilisées dans ce travail permettent de produire des données numériques sur le terrain et de les télémétrer via des modems, ce qui permettrait de suivre en temps réel le niveau d'activité du volcan Nyiragongo, ainsi que la qualité de l'air dans la ville de Goma et ses environs. Les concentrations des gaz tels que le SO_2, CO_2, H_2S et la vapeur d'eau ainsi que les flux du CO_2 et H_2S, sont simultanément mesurés in situ et les données associées à d'autres mesures comme la température et la pression des gaz, de même que les coordonnées géographiques du site d'échantillonnage sont automatiquement prises.

La ville de Goma en République Démocratique du Congo (RDC) et celle de Gisenyi en République du Rwanda sont battues sur les bordures nord du Lac Kivu et sur les anciennes coulées de lave du volcan Nyiragongo dont le cratère central se trouve à seulement 15 km au nord de ces deux villes (Balagizi et al., 2018). Tout comme les villes de Goma et Gisenyi, de nombreux cités et villages se trouvent entre le lac Kivu et les volcans Nyiragongo et Nyamulagira, et sont tous exposés aux risques liés à ces deux volcans actifs, notamment les risques de destructions par des coulées de lave comme ce fut le cas des éruptions de 1977, 2002 et 2021, aux méfaits des émissions continues des gaz volcaniques (principalement le CO_2, SO_2, H_2S, HCl, …) depuis le lac de lave permanent du volcan Nyiragongo ainsi que des émissions depuis le sol (Balagizi et al., 2018; Cuoco et al., 2013a; Komorowski et al., 2003). Bien plus, les populations de ces villes, cités et villages sont exposées à une possible éruption limnique du lac Kivu qui pourrait libérer les énormes quantités

de CO_2 et de CH_4 dissous dans les eaux profondes de ce lac (Halbwachs, 2013; Schmid et al. 2005a; Schmid & Wüest, 2012). Les statistiques montrent que ces deux villes, les cités et villages environnants sont habités par au moins 2,5 millions de personnes (Mairie de Goma, 2023; Muvundja et al., 2022) et qui vivent sous la menace d'éruptions volcaniques du Nyiragongo, de la contamination directe par les gaz émis par ce volcan, ou la possible éruption du lac Kivu. En plus de ces risques, les conflits armés répétitifs qui se vissent dans la Province du Nord Kivu depuis des décennies ont occasionné des déplacements massifs de la population qui s'est installé autour de la ville de Goma dans des lieux où on peut observer un dégazage à teneur élevée de CO_2. Ces lieux où le gaz volcanique s'accumule et devient très riche en CO_2 sont localement connus sous le nom de « **Mazuku** », et la présence des camps des déplacés dans des Mazuku augmente encore plus la vulnérabilité de cette population et donc le risque. Des nombreuses personnes et animaux meurent régulièrement par asphyxie dans ces Mazuku, surtout en cette période où les déplacés sont dans les périphéries de Goma. Il y donc nécessité de disposer des techniques fiables et appropriés aux bourses locales pour permettre l'étude et la surveillance de ces gaz afin d'en connaître les dynamiques de formation et d'émission afin d'intégrer ces techniques dans la stratégie de prévention des risques volcaniques et du lac Kivu, ce qui justifie l'intérêt du présent travail.

Ci-dessous sont reprises les trois principales questions de la présente étude, auxquelles les réponses trouvées de manière méthodique permettront de mieux cerner la problématique liée à la présence des gaz volcaniques dans la région volcanique des Virunga :

- Considérant que les gaz sont le moteur ou déclencheur d'une éruption volcanique, quelles sont les méthodes actuellement utilisées pour les analyser dans la province volcanique des Virunga ?
- Quels sont les principes de base de ces techniques d'analyse des gaz volcaniques in situ ?
- L'introduction des nouvelles techniques d'analyse des gaz in situ conduira-t-elle à l'amélioration de la surveillance du volcan Nyiragongo et du lac Kivu ?

Ces questions ont permis la formulation de l'objectif général de ce travail qui consiste à « améliorer l'étude et la surveillance du volcan Nyiragongo et du lac Kivu par l'usage des nouvelles méthodes d'analyse des gaz in situ ». En plus de cet objectif principal, le présent travail poursuit trois objectifs spécifiques dont :

- L'analyse quantitative des gaz : déterminer la composition quantitative des gaz émis par le volcan Nyiragongo et ceux contenus dans le lac Kivu et obtenir une base de données sur le lac Kivu ;
- Conduire des mesures des variations spatio-temporelles des gaz émis par le volcan Nyiragongo, et contribuer ainsi à l'étude et la surveillance de ce volcan dangereux et aider à la prédiction d'une éventuelle future éruption volcanique ;
- Evaluer le risque lié à certains gaz émis par les volcans en mesurant les concentrations de ces gaz et en comparant les valeurs obtenues aux limites acceptables d'exposition.

Nous avons émis comme hypothèses :

- Les nouvelles méthodes d'analyses des gaz pourraient être utilisées pour l'analyse in situ des gaz émis par le volcan Nyiragongo et ceux contenus dans le lac Kivu ;
- Ces nouvelles méthodes permettraient d'effectuer des mesures spatio-temporelles des gaz émis par le volcan Nyiragongo et le lac Kivu, ce qui augmenterait les capacités de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) à accomplir sa mission d'étude et de surveillance des volcans actifs des Virunga et du lac Kivu ;
- Ces nouvelles méthodes pourraient également être utilisées pour le suivi de la pollution de l'air, surtout la pollution urbaine.

Ce travail aura comme intérêt d'être le premier dans la région des Virunga à utiliser ces nouvelles méthodes ou techniques d'analyses des gaz volcaniques dont les résultats seront exploités par l'OVG pour l'amélioration de la surveillance du volcan Nyiragongo et le lac Kivu.

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES GAZ VOLCANIQUES ET LES GAZ DU LAC KIVU

I.1. Généralités sur les gaz volcaniques

I.1.1. Origine et composition des gaz volcaniques

I.1.1.1. Origine

Les gaz volcaniques sont des émissions naturelles de substances volatiles provenant de l'intérieur de la terre, ils sont généralement libérés lors des éruptions volcaniques ou à travers des fumerolles. Ils comprennent une variété de composés chimiques qui peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement et la santé.

Les gaz volcaniques proviennent de différentes sources internes de la terre. Ils sont généralement d'origine magmatique, toutefois ils peuvent provenir du manteau, de la plaque subductée, de la croûte, tout comme de l'hydrosphère (Oppenheimer, Pyle & Barclay, 2003).

Aiuppa & Gaillard (2016) distinguent les gaz volcaniques en trois types dont :

i) Les « gaz magmatiques » : qui proviennent d'une source magmatique relativement peu profonde, ils sont chauds (>500 °C) et riches en SO_2 et en halogènes (HCl et HF),

ii) Les « gaz hydrothermaux » : sont principalement apportés par des aquifères bouillants chauffés par des gaz magmatiques, ils sont froids et plus riches en vapeur, en CH_4 et en H_2S (et pratiquement sans HCl et HF). Enfin ;

iii) les « gaz du sol », dominés par le CO_2, produisent des émissions diffuses à basse température.

Chaque source influence la composition gazeuse, variant selon le type de volcan et la profondeur du réservoir de magma.

I.1.1.2. Composition

Les gaz volcaniques sont des combinaisons moléculaires de quatre éléments majeurs (H, C, O et S). Bien que leurs proportions relatives dépendent du contexte tectonique et de la composition du magma, les principales espèces volatiles des gaz volcaniques sont invariablement H_2O, CO_2, soufre (SO_2, H_2S) et les espèces halogènes telles que le chlorure d'hydrogène (HCl) et le fluorure

d'hydrogène (HF). En outre, les gaz volcaniques contiennent de nombreux autres composants mineurs et traces, tels que l'hydrogène (H_2), l'azote (N_2), les gaz nobles hélium (He) et l'argon (Ar), et les métaux en traces (plomb, zinc, or) (Carn 2015; Aiuppa & Gaillard, 2016).

a) dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est l'un des principaux gaz émis par les volcans, il vient après l'eau dans la composition des gaz volcaniques. Bien que ce gaz soit incolore et inodore, il a un impact significatif sur l'atmosphère, contribuant à l'effet de serre. Sa libération peut entraîner une acidification locale de l'eau.

Les divers composants des fumées volcaniques ont des solubilités différentes dans le magma qui changent indépendamment en fonction de la pression et de la température. Les compositions de ses bulles de gaz changent au fur et à mesure que la fonte s'élève de son point d'origine jusqu'à l'évent. On pense que le dioxyde de carbone est le principal gaz dissous dans les masses fondues dérivées du manteau qui s'élèvent à travers la croûte inférieure et moyenne, et on estime qu'il représente jusqu'à 0,7 % en poids du magma basaltique juvénile (Gerlach, McGee & Elias, 2002). Cependant, la réduction de la pression est un facteur majeur dans la solubilité du dioxyde de carbone. Un lot typique de basalte en fusion devient sursaturé en CO_2 avant même d'atteindre la croûte peu profonde, ce qui entraîne l'exsolution du CO_2. Avant une activité éruptive on remarque une augmentation de l'émission du CO_2. Lorsque les réservoirs de magma et les intrusions se refroidissent lentement dans la croûte peu profonde, le dioxyde de carbone continue de s'échapper régulièrement, même après une cristallisation importante. Un indicateur clé d'un magma ascendant peu profond est une diffusion lente mais mesurable de CO_2 et d'hélium à partir du sol, un phénomène appelé **efflux du sol**, qui exclut d'autres types de gaz volcaniques en raison de leur solubilité plus élevée dans le magma ou l'eau souterraine (Lockwood & Hazlett, 2010). Les quantités relatives (ratios) des espèces gazeuses sont souvent pertinentes pour caractériser l'activité. En termes de surveillance, deux rapports sont primordiaux : CO_2/S (où $S = SO_2 + H_2S$) et SO_2/H_2S. En raison des solubilités contrastées du CO_2 et du soufre, les variations du rapport CO_2/S sont sensibles aux variations de la profondeur du magma (l'exsolution du CO_2 est plus profonde que celle du S). Ces variations reflètent la dynamique du dégazage. Par exemple, une augmentation du rapport CO_2/S peut refléter l'arrivée de magma profond, riche en CO_2, et, par

conséquent, une pressurisation du système pouvant conduire à une éruption (Aiuppa et al., 2007 ; 2009). Une diminution du rapport CO_2/S est une indication de l'ascension du magma (diminution de la pression, donc plus d'exsolution de S) (Aiuppa et al., 2007). Il a été démontré au Stromboli pendant l'activité de 2006-2007 qu'un faible rapport CO_2/SO_2 (<10) caractérise un état de repos et qu'une augmentation de ce rapport d'un facteur d'environ 2 précède les grandes éruptions explosives. L'augmentation du rapport CO_2/SO_2 est attribuée à des contributions volatiles riches en CO_2 provenant d'une région plus profonde du système magmatique. Cette augmentation de l'approvisionnement en gaz riche en CO_2 d'origine profonde a probablement provoqué un renversement convectif plus rapide du magma dans le conduit peu profond, entraînant une augmentation de l'activité éruptive (Fischer & Chiodini, 2015).

Le dioxyde de carbone (CO_2) piégé dans les zones de basse altitude peut être mortel pour les personnes et les animaux. Le dioxyde de carbone constitue environ 0,04 % de l'air de l'atmosphère terrestre. Au cours d'une année moyenne, les volcans rejettent entre 180 et 440 millions de tonnes de dioxyde de carbone. Ce gaz émis par les volcans, il se dilue généralement très rapidement à de faibles concentrations et ne met pas la vie en danger. Cependant, le dioxyde de carbone froid est plus lourd que l'air et il peut s'écouler dans des zones de faible altitude où il peut atteindre des concentrations beaucoup plus élevées dans certaines conditions atmosphériques très stables (cas des Mazuku). Cela peut présenter des risques graves pour les personnes et les animaux. Respirer de l'air contenant plus de 3 % de CO_2 peut rapidement entraîner des maux de tête, des vertiges, une accélération du rythme cardiaque et des difficultés respiratoires. À des taux de mélange supérieurs à environ 15 %, le dioxyde de carbone provoque rapidement une perte de conscience et la mort (Volcano Hazards Program, 2024; Williams-Jones & Rymer, 2000). Autres détails dans le tableau 1.

b) Le soufre

Après l'eau et le dioxyde de carbone, le soufre est le volatil le plus abondant présent dans les magmas typiques. En raison de ses multiples valences (le soufre peut porter des charges de -2 à +6), le soufre produit de nombreux types de gaz volcaniques, reflétant divers degrés d'oxydation et de réaction avec le CO_2 et l'eau. S_2, SO, SO_2, SO_3, H_2S, H_2SO_4, COS et CS_2 sont tous présents dans les fumées volcaniques (Heald, Naughton & Barnes, 1963; O'Dwyer et al., 2003), bien que

les espèces les plus communes soient de loin le SO_2 et le H_2S. La couleur apparente des nuages de fumées riches en SO_2 change en fonction de la maturité de la lumière incidente. Lorsqu'ils sont observés en lumière transmise (comme lorsqu'on regarde le soleil), les nuages apparaissent brunâtres, alors que lorsqu'ils sont observés en lumière réfléchie (comme lorsque le soleil est derrière vous), ces mêmes nuages apparaissent bleuâtres (Lockwood & Hazlett, 2010).

Les rapports SO_2/H_2S, H_2/H_2O et CO_2/CH_4 fournissent des informations sur les conditions thermodynamiques du système hydrothermal (T, P, conditions redox) (Giggenbach, 1980), en supposant que toutes ces espèces chimiques atteignent l'état d'équilibre chimique à une certaine pression, de la température et des conditions d'oxydoréduction. Par exemple, pour les espèces de soufre, les abondances relatives des espèces, SO_2 et H_2S, sont contrôlées par l'équation:

$$\text{Log}\,(X_{SO2}/X_{H2S}) = \log K_{(1,T)} - 3R_H - \log P.X_{H2O}$$

où X est la fraction molaire de chaque espèce, $K_{(1,T)}$ est la constante d'équilibre pour la réaction $H_2S + 2H_2O = SO_2 + 3H_2$ à une température T, où $R_H = X_{H2}/ X_{H2O}$ (indicateur des conditions d'oxydoréduction qui remplace la fugacité de l'oxygène généralement utilisée en pétrologie) (Giggenbach, 1980). Selon cette équation, un rapport SO_2/H_2S élevé (>1) caractérise les gaz à haute température libérés par des liquides silicatés oxydés (faible humidité relative) à la pression atmosphérique (Symonds et al., 1994; Giggenbach, 1996). En revanche, le H_2S domine (et donc le SO_2/H_2S est faible) dans les fumerolles à basse température où les émissions proviennent de systèmes hydrothermaux profonds réduits (Giggenbach, 1980).

Le soufre est reconnu souvent dans un site post-éruptif par la présence de cristaux jaunâtre autour d'un évent, on trouve également un peu de dioxyde de carbone dans cet endroit est ce milieu est appelé Solfatare (Lockwood & Hazlett, 2010).

Le dioxyde de soufre a une influence majeure sur la qualité de l'air et peut former des pluies acides. Lorsqu'il est libéré, il réagit avec l'eau et l'oxygène, entraînant la création d'acide sulfurique.

Le dégagement de SO_2 dans l'atmosphère peut former des aérosols de manière rapide, réfléchissant la lumière solaire et conduisant à un refroidissement localisé.

Le dioxyde de soufre est un gaz incolore à odeur piquante, il irrite la peau, les tissus et les muqueuses des yeux, du nez et de la gorge mais aussi le système respiratoire. Comme c'est le cas pour le CO_2, les émissions de SO_2 sont responsables des pluies acides et la pollution de l'air dans la direction de vent d'un panache d'un volcan. Lors de très grosses éruptions, le SO_2 qui est un gaz à effet de serre, peut se retrouver à des altitudes supérieures à 10 km dans la stratosphère et s'y transformer en aérosols sulfatés qui réfléchissent la lumière du soleil et ont donc un effet refroidissant sur le climat de la Terre. Ces aérosols jouent également un rôle dans l'appauvrissement de la couche d'ozone, car bon nombre des réactions qui détruisent l'ozone se produisent à la surface de ces aérosols (Volcano Hazards Program, 2024; Lockwood & Hazlett, 2010).

Le sulfure d'hydrogène (H_2S) est très toxique à des concentrations très élevées. Il est reconnu par son odeur nauséabonde tout en étant aussi un gaz incolore et inflammable. Il est parfois appelé « gaz d'égout ». Il est intéressant de noter que le nez humain est plus sensible au H_2S que n'importe quel instrument de surveillance des gaz disponible actuellement : les mélanges d'air contenant aussi peu que 0,000001 % de H_2S sont associés à une odeur d'œuf pourri. Malheureusement, l'odorat humain n'est pas une alarme fiable : à des taux de mélange supérieurs à environ 0,01 %, le H_2S devient inodore et très toxique, provoquant une irritation des voies respiratoires supérieures et, en cas d'exposition prolongée, un œdème pulmonaire. Une exposition à 500 ppm peut faire perdre connaissance à un être humain en 5 minutes et le faire mourir en une heure ou moins (Volcano Hazards Program, 2024).

c) Les Halogènes

Le chlore, le fluor et le brome sont des constituants mineurs des gaz volcaniques. Ils sont supposés être les principaux halogènes volcaniques émis. Quelquefois on trouve aussi de traces de HI dans les gaz volcaniques bien que rares sont les données disponibles sur les émissions volcaniques de HBr et HI qui sont les halogènes les plus lourds. Lorsque H_2O, CO_2 et SO_2 sont mesurables en pourcentage de poids, les halogènes ne sont mesurables qu'en parties par million (ppm), le chlore et le fluor dépassant rarement 5 000 ppm dans une fusion de silicate, et le brome étant généralement inférieur à 250 ppm. (Honda, 1970 ; Aiuppa et al., 2005 ; Witt et al., 2008 ; Aiuppa et al., 2009 ; Wittmer et al., 2014). L'HF et l'HCl sont des aérosols extrêmement acides dans les fumées

volcaniques, ils sont produits par la réaction du fluor et le chlore avec de la vapeur d'eau. La pénétration de la lave en fusion dans la mer provoque une ébullition de l'eau salée créant des nuages de vapeur riches en gouttelettes d'acide chlorhydrique et sulfurique. Les Hawaïens appellent cette vapeur irritante et corrosive laze (« lava » plus « haze »). Avec un pH de 1,5 à 2,5, les gouttes de pluie qui se condensent à partir de la vapeur de laze piquent les yeux et trouent les vêtements des observateurs en peu de temps. Si le laze contient de l'HF, les lentilles et les lunettes peuvent également être endommagées. Il est recommandé d'observer les interactions entre la lave en fusion et l'eau de mer du côté de la direction du vent (Lockwood & Hazlett, 2010).

Le chlore est moins soluble dans les magmas de silicates que le CO_2. Et le CO_2 est moins soluble que le soufre. Cela signifie que les premiers rejets de fumées provenant du magma ascendant seront plus enrichis en chlore par rapport au soufre et au dioxyde de carbone qu'à un stade ultérieur, et que les gaz de soufre deviendront dominants dans les émissions fumeroliennes après la fin d'une éruption. Les fumerolles dominées par les halogènes, semblables aux mofettes et aux solfatares, ne se développent pas, car les concentrations de chlore et de fluor sont généralement très faibles dans les gaz magmatiques (Lockwood & Hazlett, 2010).

L'abondance relative des halogènes dans la phase gazeuse ne peut pas être simplement expliquée par leur abondance dans le magma. L'émission d'halogènes est souvent influencée par les aquifères peu profonds, le système hydrothermal et/ou les saumures souterraines. En fait, plusieurs facteurs, y compris les solubilités individuelles des composés halogénés dans la fonte et l'eau, influencent leur émission (Giggenbach & Sheppard, 1989; Symonds, Gerlach & Reed, 2001; Aiuppa et al., 2009).

La teneur en halogènes des basaltes alcalins est plus faible que celle des magmas subalcalins (tholéithiques). Pinto et al., (1989) suggère que les émissions d'halogènes pourraient être plus abondantes dans les émissions de gaz des volcans de plus en plus alcalins, par exemple l'Etna, l'El Chichon et l'Erebus. Le magma alcalin est plus riche en chlore et aussi en soufre (Woods, Chuan & Rose, 1985). En raison des grandes différences entre les volcans, une estimation globale des émissions et de l'influence subséquente sur le climat est encore difficile à réaliser. Les études sur les panaches volcaniques sont également importantes pour comprendre l'impact direct des

émissions de gaz volcaniques sur les environnements locaux et les effets sur la santé (Delmelle, 2003).

Les oxydes d'halogène et les halocarbures (y compris les chlorofluorocarbures naturels, ou CFC) peuvent se former par des réactions chimiques entre les fluides volcaniques et les roches encaissantes (Mather, Pyle & Allen, 2004). L'un des gaz exotiques les plus intéressants est le monoxyde de brome (BrO), qui a été détecté dans les nuages éruptifs de plusieurs volcans (Lockwood & Hazlett, 2010).

Comme le chlore volcanique et les CFC commerciaux, le BrO joue un rôle dans l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique (O_3), qui protège la vie, en provoquant la dissociation des molécules d'ozone en oxygènes diatomiques ordinaires (O_2). En fait, bien que beaucoup moins abondant que le chlore dans les émissions volcaniques, le BrO peut contribuer annuellement à un tiers de l'appauvrissement de l'ozone volcanique dans le monde. Le BrO est si corrosif pour l'ozone que des trous d'ozone locaux peuvent apparaître temporairement au-dessus des volcans qui ont expulsé une grande quantité de ce gaz (Bobrowski et al., 2003).
Les émissions volcaniques de brome et de chlore peuvent influencer la chimie de l'atmosphère (Pinto, Turco & Toon, 1989; Bureau, Keppler & Métrich, 2000; Halmer, Schmincke & Graf, 2002; Von Glasow, Bobrowski & Kern, 2009; Kutterolf et al., 2013). Par exemple, la présence de brome inorganique dans la troposphère libre pourrait avoir un impact significatif sur le bilan global de l'ozone troposphérique (Von Glasow et al., 2004 ; Lary, 2005 ; Yang et al., 2005 ; Theys et al., 2011).

Les halogénures d'hydrogène (HF, HCl, HBr) sont des acides toxiques. Lorsque le magma remonte près de la surface, les volcans peuvent émettre les halogènes fluor, chlore et brome sous forme d'halogénures d'hydrogène (HF, HCl et HBr). Ces espèces sont très solubles et se dissolvent donc rapidement dans les gouttelettes d'eau à l'intérieur des panaches volcaniques ou dans l'atmosphère, où elles peuvent provoquer des pluies acides. Lors d'une éruption produisant des cendres, les particules de cendres sont souvent recouvertes d'halogénures d'hydrogène. Une fois déposées, ces particules de cendres enrobées peuvent empoisonner les réserves d'eau potable, les cultures agricoles et les pâturages (Volcano Hazards Program, 2024).

d) Gaz traces

Les gaz inertes tels que l'azote, l'hélium et l'argon sont parmi les émissions volcaniques les moins concentrées, bien qu'ils soient presque toujours présents à l'état de traces. Néanmoins, l'hélium a suscité un intérêt particulier car il constitue un traceur utile de la contribution du manteau aux exhalaisons volcaniques.

Des nouvelles espèces de gaz volcaniques en quantités très mineures continuent d'être découvertes dans les émissions volcaniques, dont récemment le HNO_3 et le NO_x (un irritant actif dans le smog urbain) qui résultent tous deux de la décomposition thermique de l'air atmosphérique près de la surface des bassins de lave en fusion (Lockwood & Hazlett, 2010).

Les effets d'exposition aux gaz volcaniques à la santé humaine sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Caractéristiques et effets sur la santé de l'exposition humaine aux différents gaz volcaniques (Williams-Jones & Rymer (2015), voir autre compilation dans Balagizi et al., 2018)

Gaz et caractéristiques	Effets sur la santé d'une exposition de courte à longue durée
Dioxyde de carbone (CO_2) : incolore, dense, inodore	**Court terme** **2 à 5%** : respiration accélérée, fréquence cardiaque accélérée **6 à 10%** : dépression mentale, somnolence, bourdonnements d'oreilles, maux de tête, transpiration, essoufflement, faiblesse musculaire, vertiges, évanouissements **11 à 15%** : contractions musculaires brusques, perte de conscience en une minute ou moins **> 25%** : convulsions, coma, décès **Long terme** **0,5%** : exposition maximale recommandée **1 à 4%** : diminution du pH sanguin, acidose du sang, maux de tête, fatigue **> 4%** : seuil de tolérance dépassé
Dioxyde de soufre (SO_2) : incolore, dense, irritant, goût prononcé	**Court terme** **5 ppm** : exposition maximale recommandée sur 24 h **6-12 ppm** : peut provoquer une irritation immédiate du nez et de la gorge **20 ppm** : peut provoquer une irritation oculaire immédiate **10000 ppm** : irrite la peau humide en quelques minutes **Long terme** Une exposition prolongée à des faibles concentrations peut être dangereuse pour les personnes atteintes de maladies cardiopulmonaires préexistantes. Une exposition chronique peut entraîner une mort prématurée chez la population.
Sulfure d'hydrogène (H_2S) : incolore, odeur d'œuf pourri	**Court terme :** **10 ppm** (0,001%) : exposition maximale recommandée **20 à 150 ppm** : irritation oculaire, nausées, maux de tête, fatigue, étourdissements, démarche chancelante, diarrhée, suivie parfois d'une bronchite et bronchopneumonie **500–700 ppm** : échelonnement, effondrement en 5 min. Peut entraîner la mort après 30 à 60 min **1 000 à 2 000 ppm** : peut entraîner une mort quasi instantanée **Long terme :** Une exposition prolongée à des concentrations aussi faibles que 50 ppm peut entraîner pharyngite et bronchite alors que les concentrations à 250 ppm peuvent entraîner un œdème pulmonaire.
Chlorure d'hydrogène (HCl) : gaz ou liquide fumant incolore, odeur irritante et piquante.	**Court terme :** **5 ppm** : maximum recommandé d'exposition **< 35 ppm** : Irritation des muqueuses des yeux et des voies respiratoires avec sensation de brûlure, d'étouffement et de toux. **>35 ppm** : Irritation de la gorge après une courte exposition. Des sévères difficultés respiratoires peuvent survenir ainsi qu'une inflammation de la peau ou des brûlures. **>100 ppm** : Un œdème pulmonaire et souvent un spasme laryngé. **Long terme :** Une exposition répétée ou prolongée peut conduire à une érosion des dents et des éruptions cutanées.
Fluorure d'hydrogène (HF): Un liquide ou un gaz corrosif clair, incolore, fumant, avec une forte odeur irritante.	**Court terme :** Irritation extrême et corrosion de la peau et des muqueuses. Le contact avec les yeux provoque des brûlures profondes et, si le produit chimique n'est pas éliminé immédiatement, une déficience visuelle permanente ou la cécité permanente peut être produite. Un irritant sévère pour le nez, la gorge et les poumons, l'inhalation des vapeurs peut provoquer des ulcères des voies respiratoires supérieures ; des concentrations de 50 à 250 ppm sont dangereuses même en cas de brève exposition. **Long terme :** Une exposition répétée ou prolongée à des faibles concentrations peut entraîner des changements dans les os ainsi qu'une une irritation chronique du nez, de la gorge et des poumons.

I.1.2. Composition des gaz au volcan Nyiragongo

Le Nyiragongo est le premier volcan au monde émetteur de CO_2 volcanique avec une moyenne de 19 Mt par an (Boudoire, 2017). En mai et juin 2005, janvier 2006 et Juin 2007, les études ont montré que la proportion molaire en gaz dans le panache du volcan Nyiragongo était respectivement de 70, 24, 4.6, 0.87, 0.26, 0.11, et 0.0016% pour l'eau, CO_2, SO_2, CO, HCl, HF, et sulfure de carbonyle (COS) (Sawyer et al., 2008; Balagizi et al., 2018). Cette composition peut varier d'une période à l'autre mais aussi selon l'activité de ce volcan ; Bobrowski et al. (2015) ont trouvé une composition de 48, 43, 7, 0,5% respectivement pour H_2O, CO_2, SO_2, Cl et 210 ppm pour Br pour ce même volcan.

Les mesures satellitaires ont montré des émissions très importantes de SO_2 en mai 2002, et les observations indiquent que ce volcan est l'une des plus grandes sources naturelles de SO_2 sur terre (Carn, 2004). La quantité de SO_2 dans le panache du volcan Nyiragongo mesurée par une station DOAS permanente à proximité de ce volcan varie d'une période à l'autre et selon l'activité du lac de lave quasi permanente observée dans le cratère de ce volcan. Les mesures effectuées entre janvier et septembre 2024 par DOAS ont indiqué une moyenne journalière de 1950 T/J avec une valeur journalière maximale de 10.090 T (OVG, 2024) pendant qu'en janvier 2002 durant les 2-3h de l'éruption, un dégagement du flux de SO_2 (~73 à 147 Kt/jour) a été observé tandis qu'une moyenne journalière de 1123.2 ±777.6 t/jour pendant la période non éruptive entre 2004 et 2012 été calculée (Arellano, 2013; Arellano et al., 2017 ; Balagizi et al., 2016).

I.2. Les gaz dissous dans le lac Kivu

I.2.1. Origine et nature des gaz dissous dans les eaux profondes du lac Kivu

Le lac Kivu qui est l'un des plus grands lacs d'Afrique et regorgeant à son sein la deuxième plus grande île lacustre d'Afrique (l'ile d'Idjwi). Il est composé d'un bassin principal, également appelé Grand Bassin ou Grand Lac dont la profondeur maximale est de 485 m, et de quatre sous-bassins à savoir : (1) la baie de Kabuno (de profondeur maximale d'environ 148 m), le bassin de Kalehe (de profondeur maximale d'environ 200 m), le bassin d'Ishungu (de profondeur maximale d'environ 170 m), ainsi que la baie de Bukavu (de profondeur maximale d'environ 90 m) (Tassi et al., 2009).

Dans le grand bassin, deux couches principales peuvent être distinguées en raison de la stratification causée par la salinité, la température et les concentrations de gaz dissous (Degens et al., 1973) :

- Le **mixolimnion** (ou épilimnion) : cette couche supérieure, située entre 0 et 60-65 m de profondeur, est mélangée par le vent et les variations saisonnières. Elle est oxygénée et constitue la biozone, car la majorité des activités biologiques du lac y sont concentrées, à l'exception des processus microbiens anaérobies tels que la méthanogenèse (Wüest et al., 2012).

- Le **monimolimnion** : Cette strate inférieure, située en dessous de 65 m jusqu'au fond du lac, est anoxique, stratifiée en permanence et ne se mélange jamais (Schmid and Wüest, 2012).

Les eaux profondes anoxiques du lac contiennent environ 300 km^3 de CO_2 et 60 km^3 de CH_4 à 0°C et 1 atm (Halbwachs et al., 2002; Schmid et al., 2005), avec des concentrations augmentant avec la profondeur. D'autres gaz, tels que le H_2S, l'azote et l'argon, y sont présents en faibles quantités (Tassi et al., 2009).

Le lac Kivu se trouvant à seulement environ 18 km au sud du volcan Nyiragongo et dont plusieurs coulées de lave de deux volcans actifs de la région (le Nyiragongo et Nyamulagira) ont fini leurs courses dans ses eaux, en plus des éruptions sous-marines et que des cônes et fractures volcaniques sont retrouvées dans ses eaux profondes comme à la surface, la majeure partie du CO_2 dissous est identifiée de sources magmatiques et pénètre dans le lac par des sources sublacustres, des évents hydrothermaux et quelques rivières de surface issues des champs volcaniques actifs (Degens et al., 1973; Deuser et al., 1973; Schoell, Tietze & Schoberth, 1988; Balagizi et al., 2015; 2018). Une partie du CO_2 est également libérée dans le lac sous forme de gaz dissous, principalement le long de la rive nord, près du champ de Mazuku. Le reste du CO_2 provient de la décomposition de la matière organique. Quant au méthane (CH_4), il est produit à deux tiers par la réduction bactérienne du CO_2 magmatique et à un tiers par la fermentation de la matière organique dans les sédiments (Degens et al., 1973; Deuser et al., 1973; Tietze et al., 1980; Schoell, Tietze & Schoberth, 1988; Schmid et al., 2004 ; Pasche et al., 2009). Selon Pasche et al. (2011), le CH_4 pourrait également

provenir de la réduction du CO_2 géogène (issu de processus géologiques) à l'aide de H_2 géogène, ou d'apports directs de CH_4 géogène.

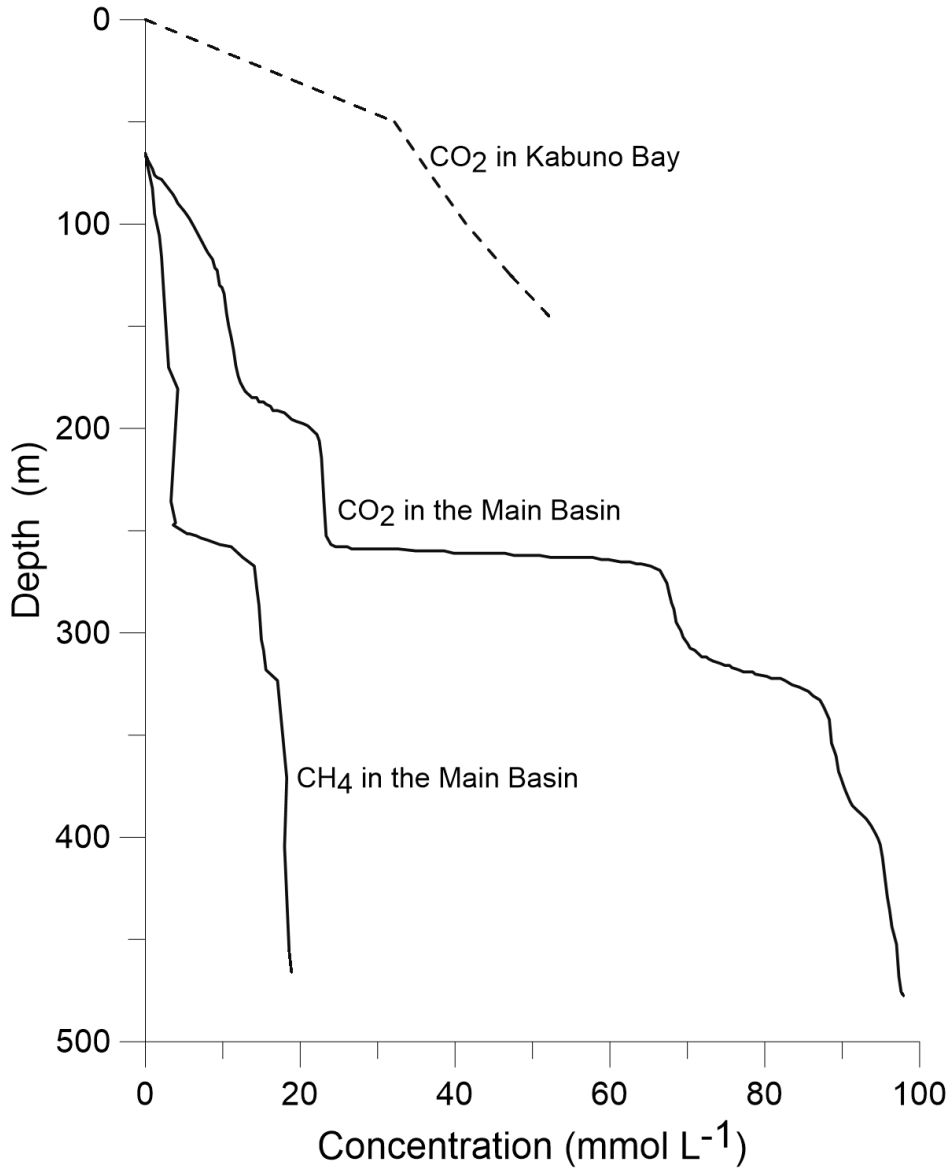


Figure 1. Profils verticaux des concentrations de CO_2 et de CH_4 dans le grand bassin du lac Kivu d'après Schmid et al. (2005) et le CO_2 à Kabuno d'après Tassi et al. (2009)

I.2.2. Risque d'explosion limnique au lac Kivu

On a parlé des éruptions limniques, qui sont reconnues comme des processus géologiques depuis le milieu des années 1980, lorsque deux lacs du cameroun (Monoun et Nyos) ont connu un renversement de leurs eaux dû à un glissement de terrain. Cette catastrophe naturelle a causé la mort de ± 1700 personnes et d'environ 3500 animaux d'élevage. il a été estimé que les gaz avaient atteint jusqu'à 26 km des rives des lacs (Kling et al., 1987; Sigurdsson et al., 1987; Zhang & Kling, 2006). Il a été découvert que ce sont les émissions géogenes de CO_2 qui alimentaient les lacs Monoun et Nyos, qui sont des cratères volcaniques (Tanyileke, Kusakabe & Evans, 1996; Halbwachs, 2013). Ce CO_2 s'est dissous et accumulé dans les eaux profondes, atteignant des concentrations critiques avant que ce glissement de terrain ait déclenché les éruptions.

Le lac Kivu est connu par sa grande superficie et la grande quantité de CO_2 et CH_4 dissous dans ses eaux profondes, contrairement aux lacs Monoun et Nyos, où le CH_4 n'était présent qu'en faibles quantités lors des éruptions. Le méthane du lac Kivu, une fois exsolvé, pourrait s'enflammer, provoquant des explosions et des incendies. Par ailleurs, il reste incertain si le CO_2 et le CH_4 s'exsolvent simultanément, et les interactions entre ces gaz ainsi que la dynamique globale d'une éruption limnique au lac Kivu demeurent inconnues. Ces incertitudes, combinées à la densité de population élevée autour du lac, exposent des millions de personnes à un risque potentiel, faisant du lac Kivu une menace susceptible de provoquer l'éruption limnique la plus dévastatrice de l'histoire (Schmid et al., 2005; Balagizi et al., 2018).
La dynamique des éruptions lacustres est déterminée par les interactions entre les phases gaz-liquide et la stabilité du système (Zhang & Kling, 2006). Ces éruptions sont alimentées par l'exsolution des gaz dissous dans les eaux profondes. La pression hydrostatique joue un rôle clé en maintenant les gaz dissous dans le monimolimnion du lac Kivu. Tant que cette pression reste supérieure à la somme des pressions partielles des gaz dissous, aucune exsolution ou éruption limnique ne peut se produire, sauf si un facteur externe perturbe l'équilibre entre l'eau et les gaz. En raison de la forte pression hydrostatique (Fig. 2), les gaz dissous continuent de s'accumuler en profondeur, atteignant des concentrations critiques (Fig. 1) qui pourraient déclencher une éruption limnique, également appelée éruption lacustre ou renversement du lac.

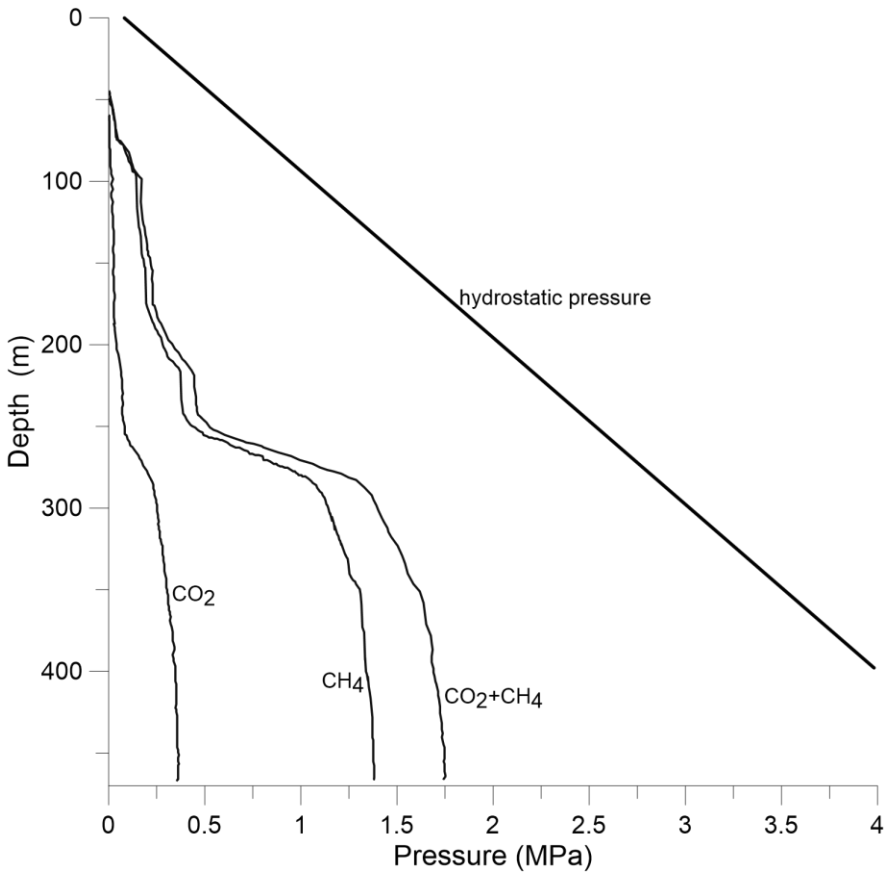


Figure 2. Pressions partielles de CO_2 et de CH_4 et la pression totale du gaz dans le grand bassin du lac Kivu calculées à partir de leurs concentrations (Schmid et al., 2004).

Trois scenarii (les agents internes et externes) sont supposés être les agents déclencheurs d'une possible éruption limnique du lac Kivu en fonction du contexte géologique et géodynamique local. Ci-dessous ils sont énumérés (Pour plus de détail voir dans Balagizi et al., 2018) :

- Augmentation de la concentration des gaz jusqu'à ce que leur pression totale dépasse la pression hydrostatique ;
- Séismes et glissements de terrains ;
- L'éruption volcanique sub-lacustre ou l'interaction des coulées de lave avec le lac.

I.2.3. Extraction de méthane et dégazage de dioxyde de carbone au lac Kivu

Le dégazage du lac Kivu consiste à diminuer la quantité de gaz contenue dans ses eaux profondes, ce qui diminue la pression de ces gaz et donc le risque d'explosion du lac. Ce dégazage consiste à pomper le CO_2 des eaux profondes et l'éjecter dans l'atmosphère, et à extraction ou exploiter le

CH_4 pour la production de l'électricité. Un essai de dégazage a été installé dans la baie de Kabuno depuis 2008, où une colonne de 20 cm de diamètre et de 120 m de long a été ancré pour pomper les eaux profondes pour les amener en surface pour les dégazage tous les gaz (principalement du CO_2 et du H_2S) étant éjecter dans l'atmosphère sans traitement préalable (Halbwachs, 2013). Compte tenu de la quantité de CO_2 qui serait libérée dans l'atmosphère lors du dégazage, l'impact potentiel sur l'environnement est préoccupant. L'exploitation du méthane pourrait contribuer à combler le déficit régional en électricité tout en réduisant la pression totale du gaz (Balagizi et al., 2018). On peut noter que les villes et villages au bord du lac Kivu ont un déficit énorme en électricité alors que le gaz méthane dissous dans ce lac à un potentiel électrique de production de 750 Mégawatts. Seul le Rwanda a commencé à bénéficier de l'électricité de ce gaz avec ces deux sociétés d'exploitation à Rubavu et à Karongi mais du côté de la RDC tout traine encore.

La quantité de CH_4 dans le lac Kivu est ~5 fois inférieure à celle du CO_2 ; cependant, le CH_4 représente ~70 % de la pression totale du gaz. La contribution du CO_2 n'est que de ~27% de la pression gazeuse totale car le CO_2 est ~25 fois plus soluble dans l'eau que le CH_4 dans des conditions similaires. Par conséquent, si le CH_4 était éliminé de la colonne d'eau, la pression totale des gaz diminuerait d'environ 60 à 70 %, ce qui rendrait le lac plus stable et réduirait considérablement le risque d'éruption limnique. Pendant l'extraction du méthane (en cours) et le dégazage du CO_2 à Kabuno, une surveillance appropriée doit être mise en œuvre pour contrôler la sécurité du lac. Du côté Rwandais là où l'exploitation du gaz méthane est déjà effectif, la surveillance du lac est assurée par l'entreprise REMA pour évaluer toute perturbation que causerait cette exploitation au sein du lac, du côté congolais l'OVG est au point de constituer une base de données de l'état du lac avant son exploitation à grande échelle. En effet, l'extraction à grande échelle du CH_4 entraînerait la réinjection près de biozone d'une quantité importante de H_2S toxique contenu dans les eaux usées (c-à-d. ~70 m), qui appauvrirait l'oxygène et aurait donc un impact sur les organismes oxygéno-dépendants. En outre, la réinjection d'eau contenant de grandes quantités de nutriments (phosphate, ammonium, silice et oligo-éléments) dans la biozone entraînerait l'eutrophisation de cette couche, produisant des conditions anoxiques qui ont des conséquences dramatiques sur la vie aquatique (Pasche et al., 2009; 2011; Wüest et al., 2012; Descy, Darchambeau & Schmid, 2012).

I.3. Risques volcaniques dans la ville de Goma et ses environs

Goma (RDC) et Gisenyi (Rwanda) sont des villes jumelles construites sur la rive nord du lac Kivu (Figure 8), les deux villes et des dizaines de villages voisins sont directement affectées par les risques associés aux deux volcans actifs de la chaîne des Virunga en plus d'une possible éruption limnique du lac Kivu. Les troubles politiques persistants dans la région obligent les gens à quitter leurs villages d'origine pour la région de Goma où ils espèrent plus de sécurité et d'opportunités d'emploi. Cet exode rural a considérablement augmenté la population dans et autour de Goma, augmentant ainsi la population vivant dans des zones dangereuses (Balagizi et al., 2018).

Parmi ces risques nous pouvons citer :

I.3.1. Les coulées de lave

Les deux volcans actifs (le Nyiragongo et le Nyamulagira) de la chaîne des Virunga ont présentées multiples éruptions dont celles qui ont été jusqu'alors documentées sortaient par les flancs (appelées en volcanologie des éruptions effusives). Les laves du Nyiragongo sont très alcalines et ont de faibles teneurs en silice (Andersen, Elburg & Erambert, 2012; 2014). Ces laves peu visqueuses peuvent parcourir rapidement de longues distances et ne laissent que peu de temps pour l'évacuation de la population (Tuttle et al., 1990). On a remarqué lors des éruptions du volcan Nyiragongo que les laves coulaient avec une très grande vitesse à tel point que le réservoir du lac de lave se vidait dans moins de 24 heures. La vitesse minimale de ces laves a été estimée à 15-20 Km/h et maximale à 100 Km/h pour l'éruption de 1977 et 10 Km/h était estimé pour l'éruption de 2002, ces vitesses dépendaient du lieu de sortie et de l'inclinaison de la surface d'écoulement. (Tazieff, 1977; Komorowski et al., 2003). De trois éruptions documentées du volcan Nyiragongo, deux (2002 et 2021) ont atteint la ville de Goma dont l'une (2002) a fini sa course dans le lac Kivu, celle de 1977 s'étant arrêtée dans le village Munigi à ± 5 km de la ville de Goma. Toutes ces éruptions orientées vers le flanc sud du volcan (fig. 17) et qui ont laissé des nombreuses victimes humaines à leurs passages montrent que la ville de Goma et ses environs sont et ont toujours été exposés à ce risque naturel.

Les coulées de lave du Nyamulagira se déversent généralement dans la région du Parc National des Virunga. Ce volcan qui est déjà entré en éruption 18 fois entre 1980 et 2024 (Head et al., 2009; cette référence) menace moins la ville de Goma car le Nyiragongo et ses cônes périphériques

forment une barrière naturelle et empêchent ses coulées de lave d'atteindre Goma. Cependant, des coulées de lave de ce volcan ont atteint et détruit des villages au sud, jusqu'à la rive du lac Kivu.

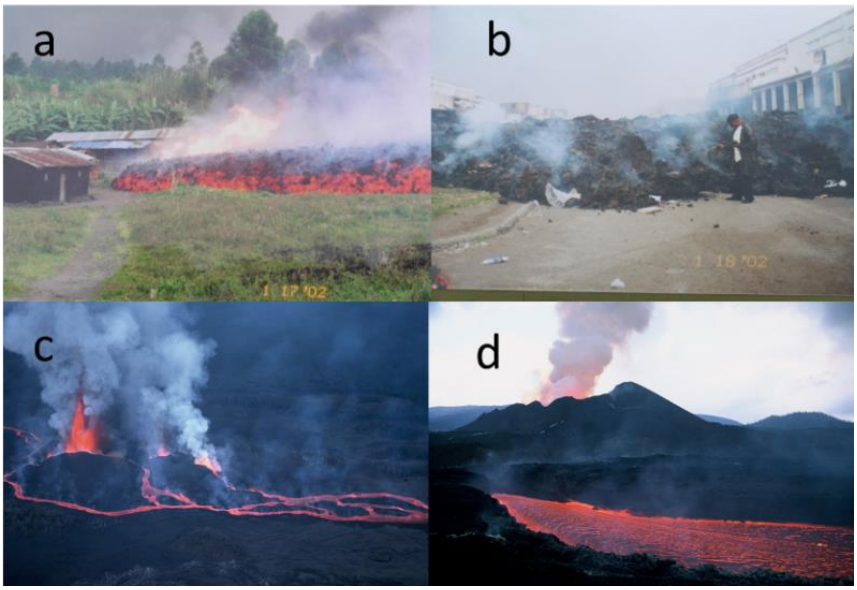


Figure 3. Coulées de lave de l'éruption du Nyiragongo de 2002 autours et dans la ville de Goma (a et b), et coulées de l'éruption du Nyamulagira dans le parc des Virunga (c et d) (Photos OVG/Goma)

I.3.2. Le panache des gaz et l'émission des cendres volcaniques

Quatre mois après l'éruption du Nyiragongo du 17 Janvier 2002, il avait été observé une réapparition du lac de lave (fig. 4) laissant échapper un panache des gaz dans l'atmosphère composé principalement de vapeur d'eau, de CO_2, de dioxyde de soufre (SO_2), de monoxyde de carbone (CO), de chlorure d'hydrogène (HCl) et de fluorure d'hydrogène (HF) tous des gaz nocifs pour l'homme, les animaux et l'environnement (Symonds et al., 1987; Symonds, Reed & Rose, 1992).

Les effets des pluies acides et de la pollution de l'air dus à la transformation du panache des gaz en composés acides ont été enregistrés après les différentes éruptions du volcan Nyamulagira et/ou l'activité intense du volcan Nyiragongo. Dans la partie Ouest des volcans, on a compté des nombreux cadavres d'animaux domestiques et sauvages qui broutaient la végétation des zones touchées par les matériaux volcaniques transportés par le vent dont la direction préférentielle dans la région est de l'Est à l'Ouest, les cendres et les cheveux de Pelé sont transporté par le vent sur plusieurs kilomètres (Yalire et al., 2009; Cuoco et al., 2013a; 2013b; Balagizi et al., 2017;

Kasereka et al., 2021). Les cendres et les cheveux de Pelé peuvent avoir un impact négatif sur le système respiratoire des animaux et des humains, provoquant des maladies respiratoires et l'adsorption de contaminants toxiques (par exemple, le fluorure ou les sulfates) (Baxter, 2002). Le vent transporte et disperse parfois le panache du Nyiragongo jusqu'à Goma, où l'odeur du H_2S (oeufs pourris) et du SO_2 (allumettes brûlées) peut être sentie dans le centre-ville, ce qui stresse les habitants.

Dans la zone ouest de Goma, l'eau de pluie a des valeurs de pH aussi basses que ~2.5 pendant les épisodes éruptifs, alors que le pH varie entre 4 et 5 pendant l'activité normale des lacs de lave (Kasereka et al., 2021). Dans la province volcanique des Virunga (PVV), les pluies acides restent le problème le plus grave pour la population, car elles endommagent gravement la végétation, entraînent une baisse des rendements agricoles et réduisent la production de lait chez les bovins. En outre, l'eau de pluie est utilisée comme eau potable et pour d'autres activités domestiques, car des vastes zones ne disposent pas d'eau douce. Les impacts des pluies acides ou des vents humides chargés de gaz volcaniques corrosifs s'étendent aux bâtiments car ils peuvent endommager les toitures en tôle. Ainsi, les toits doivent être changés tous les 3 à 5 ans dans les zones constamment sous le panache volcanique, alors que les toits des zones non touchées restent en bon état pendant au moins 20 ans. (Balagizi et al., 2018)

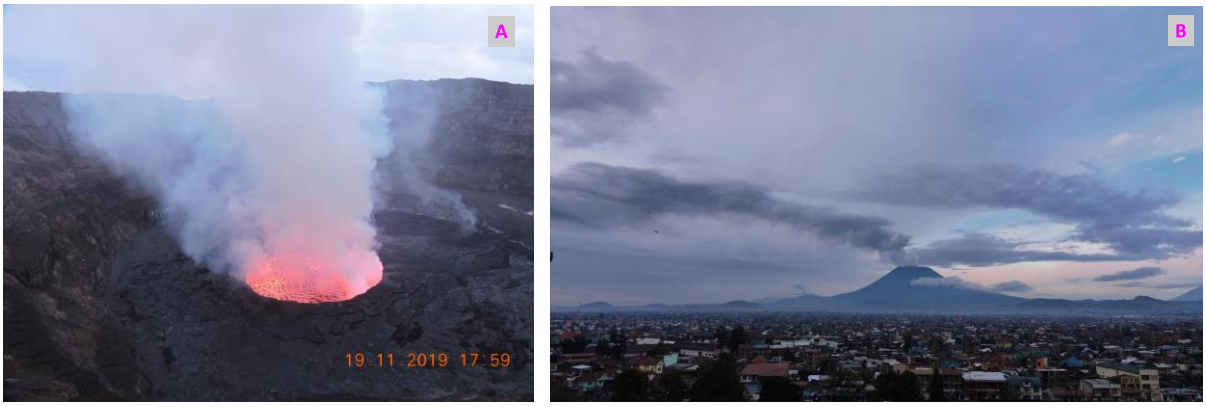


Figure 4. Vue du lac de lave à l'intérieur du cratère central du volcan Nyiragongo et les gaz qu'il émet en permanence (A) et du panache formé comme vu depuis la ville de Goma (B).

I.3.3. La pollution de l'eau

L'activité volcanique a de graves répercussions sur la composition géochimique des eaux de surface et des eaux souterraines dans les Virunga. La région de Goma est buttée à un grand problème d'approvisionnement en eau car la rivière la plus proche de la ville se trouve à l'ouest tout près de la cité de Sake à environ 27 km de la ville. La population de la ville de Goma utilise de l'eau en grande partie du lac Kivu où la Regideso et autres sociétés privées ont installé des captages pour alimenter la ville et se périphéries. Toutefois, une grande partie de la population reste non desservi en eau potable et ne fait que recours à l'eau de pluie. L'accès constant à un approvisionnement en eau propre reste donc un grand défi pour la RDC, en particulier à proximité de Goma où le volcanisme détériore considérablement la qualité de l'eau. For malheureusement, l'eau de pluie a souvent un pH faible et contient parfois du fluor à des concentrations supérieures aux directives et recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour l'eau potable (au maximum 1,5 mg/L, ou 6 mg/jour) (WHO (World Health Organization) 1997; Fawell et al., 2006; Cuoco et al., 2013a; Cuoco et al., 2013b; Balagizi et al., 2017; Kasereka et al., 2021).



Figure 5. Personnes atteintes par la fluorose dentaire (Balagizi et al., 2018)

Dans les Virunga, les gaz volcaniques atteignent également la surface par le biais des émissions du sol et des fractures et se dissolvent dans les aquifères. Les fréquentes pluies acides et les températures élevées accélèrent l'altération des roches et contribuent à la contamination des eaux souterraines et de surface (Balagizi et al., 2015). L'eau du robinet à Goma est pompée dans le grand

bassin du lac Kivu, qui contient une concentration excessive de fluor. Ainsi, la fluorose est observée dans l'ensemble de la région des Virunga, particulièrement dans les localités proches des volcans actifs, et à Goma en particulier. La toxicité du fluor se manifeste surtout par la fluorose dentaire, c'est-à-dire les couleurs jaunâtres ou brunâtres visibles ou les marbrures des dents. Des concentrations de fluor dans l'eau de boisson d'environ 1 mg/L sont associées à une incidence plus faible de caries dentaires, en particulier chez les enfants (Fawell et al., 2006), tandis que des concentrations excessives de fluor (jusqu'à 2,6 mg/L) augmentent l'incidence des caries dentaires (USPHS 1991). Outre les effets sur les dents, un grand nombre d'effets nocifs de l'eau de boisson fluorée sur l'homme ont été documentés (Leland, Powell, and Anderson, 1980; Vartiainen et al., 1994; WHO (World Health Organization) 1997; Lu et al., 2000; IPCS, 2002). Il s'agit notamment de la fluorose squelettique, du cancer du poumon et de la vessie, du risque d'avortement spontané ou de malformations congénitales. L'excès de fluor est également associé à la maladie d'Alzheimer et perturbe l'activité d'hormones fonctionnant normalement (Hileman, 1998).

I.3.4. Les Mazuku

Les Mazuku (« vent diabolique » ou « lieux maléfiques » en dialecte kinyabwisha) sont des endroits riches en CO_2 et pauvres en oxygène dans la PVV où les personnes et les animaux meurent d'asphyxie (Balagizi et al., 2018).

Les Mazuku sont le plus souvent des dépressions, et moins fréquemment des fronts des coulées de lave où le CO_2, accompagné par de très faibles concentrations en radon (Rn), monoxyde de carbone (CO), s'accumule par gravité rendant l'air toxique, voire même létal. Le CO_2 étant un gaz plus lourd que l'air, toxique à des concentrations élevées et asphyxiant, il irrite les yeux, le nez et la gorge et est mortel dès une concentration de 15% (Proctor, Hughes & Hathaway, 1991; Beaubien, Ciotoli & Lombardi, 2003; Langford 2005; Cantrell & Young, 2009; Lockwood & Hazlett 2010; Amaral & Rodrigues, 2011; Kasereka et al., 2017).

Après plusieurs mesures effectuées dans les Mazuku de la PVV, il a été remarqué que dans la plupart de Mazuku, les concentrations de CO_2 sont faibles pendant la journée et augmentent jusqu'à atteindre des niveaux mortels pendant la nuit, augmentant jusqu'à 80 % au fond. Les mazuku sont donc plus dangereux la nuit, tôt le matin ou le soir, ou après les pluies, en raison des températures ambiantes et des vitesses de vent plus faibles.

Les Mazuku sont facilement reconnaissable par une verdure éclatante de l'herbe, de mousse kaki, de papyrus et quelques fois des bambous alors que les centres des Mazuku sont souvent dépourvus de végétation ou présentent une végétation réduite. Les Mazuku à forte concentration en CO_2 présente une absence prononcée de la végétation et à sa place on y remarque une altération avancée des roches de couleur noirâtre ou gris foncé. Les températures dans les dépressions des Mazuku sont plus élevées surtout si la concentration en CO_2 est élevée. La cause est l'absorption du rayonnement par les molécules du CO_2. Ceci crée une sensation de la chaleur, qui est renforcée par une ventilation plus réduite dans les dépressions combinées à la réduction de la respiration de la peau due à l'augmentation du CO_2 et la diminution de l'O_2. (Smets, 2007; Smets et al., 2010; Vaselli et al., 2003). Les animaux morts sont un signe parfait d'indicateur d'un Mazuku. On y retrouve de toutes tailles mais ceux de petite taille sont plus abondants. Par exemple (insectes, oiseaux, lézards, rats, serpents, chiens, chèvres,…), Des cadavres d'éléphants, de lions, d'hippopotames, de buffles, de hyènes, etc. ont également été trouvés dans les Mazuku du parc national des Virunga (Verschuren, 1965). Fonctionnant comme un véritable piège naturel, le Mazuku peut d'abord capturer des insectes, qui peuvent servir d'appât pour attirer des serpents ou des oiseaux qui se font ensuite capturer à leur tour. Malheureusement, les enfants peuvent être capturés et mourir dans les Mazuku parce qu'ils sont attirés par les animaux précédemment capturés. Les enfants sont les plus vulnérables en raison de leur petite taille et parce qu'ils fréquentent les broussailles pour ramasser du bois de chauffage ou faire paître leur bétail.

Le CO_2 étant un gaz à effet de serre, il emprisonne le rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre et conserve de ce fait la chaleur, et donc le CO_2 piégé dans les Mazuku donne une fausse impression de températures plus chaudes, ce qui en a fait des abris de choix pour les réfugiés. Entre 1994 et 1996, on retrouvait beaucoup de cadavres des réfugiés rwandais qui tentaient de s'abriter dans des Mazuku ne sachant pas leur toxicité. Actuellement les zones occupées par les déplacés de guerre des conflits armés dans l'Ouest de Goma sont pour la plupart à forte concentration de CO_2. Plusieurs cas de décès de ces déplacés dans les Mazuku ont déjà été enregistrés par la protection civile de Goma et l'Organisation International pour la Migration (OIM). Des responsables militaires locaux ont également signalé la mort de soldats dans des Mazuku au cours d'opérations de guerre.

Les Mazuku de PVV sont divisés en groupes sud et nord en fonction de leur emplacement relatif par rapport aux volcans Nyiragongo et Nyamulagira. Le groupe sud est formé de Mazuku situés entre Sake et Gisenyi (Fig.17) et sont les plus dangereux en raison de leur proximité avec des régions à forte population ; Le groupe nord de Mazuku se trouve dans le parc national des Virunga et sa proximité, le long du front des coulées de lave de Nyamulagira, loin des activités humaines, ces Mazuku ne représentent pas un risque majeur pour la population, ce qui a en partie retardé leur évaluation complète.

Un autre risque du CO_2 existe sur les sites où les coulées de lave entrent en contact avec l'eau du lac Kivu et émettent du CO_2 à travers le front de lave. Le gaz émis se répand alors à la surface du lac, appauvrit l'air ambiant en oxygène, provoque des troubles respiratoires, des vertiges et des convulsions et peut ensuite entraîner la noyade des nageurs. Ces noyades ont été précédemment attribuées à la remontée de gaz depuis la couche profonde du lac Kivu, mais la remontée diffuse de gaz à la surface n'atteint pas des concentrations létales (Schmid et al., 2005b; Borges et al., 2011; 2012; 2014).



Figure 6. Un mazuku à Bulengo sur le front de coulée de lave avec quelques plantes caractéristiques dont le papyrus.

CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES

II.1. Matériel

II.1.1. Présentation du milieu d'étude

Notre étude s'est faite dans la région des Virunga, regorgeant une chaîne volcanique spectaculaire située dans la région des Grands Lacs d'Afrique de l'Est. Les volcans des Virunga se trouvent à la frontière entre la RDC, le Rwanda et l'Uganda (Figure 7). Ces volcans font partie du Rift Albertin, une branche occidentale du Rift Est-Africain. La chaine des Virunga se compose de huit volcans majeurs à savoir : Le Nyiragongo, le Nyamulagira, le Mikeno, le Karisimbi, le Visoke, le Sabinyo, le Gahinga et le Muhabura.

1. **Le volcan Nyiragongo** : Le volcan Nyiragongo est l'un des volcans les plus actifs et dangereux du monde. Situé dans la région des Grands Lacs d'Afrique centrale, dans l'Est de la RDC, il fait partie de la chaîne des volcans des Virunga, près de la ville de Goma et de la frontière avec le Rwanda (Figure 7). Le Nyiragongo est un stratovolcan qui culmine à environ 3470 mètres au-dessus du niveau de la mer, caractérisé par des éruptions effusives. Il est particulièrement connu pour son lac de lave permanent, l'un des rares au monde. En effet, le cratère principal contient un lac de lave actif qui est l'une de ses principales attractions. Ce lac de lave est célèbre pour la fluidité exceptionnelle de sa lave, en raison de sa composition pauvre en silice et riche en gaz.

La lave du Nyiragongo est extrêmement fluide et peut se déplacer rapidement, atteignant des vitesses allant jusqu'à 60 km/h, ce qui rend les éruptions particulièrement dévastatrices (Balagizi et al., 2018 ; Tazieff, 1977). Les gaz volcaniques, tels que le dioxyde de soufre, peuvent également constituer une menace pour les populations environnantes lors d'une éruption.

Trois éruptions du Nyiragongo sont décrites dans la littérature à savoir :

- **L'éruption du 10 janvier 1977** : L'une des éruptions les plus rapides jamais enregistrées. Le lac de lave s'est vidangé en moins d'une heure, entraînant des coulées de lave dévastatrices qui ont tué plusieurs personnes.

- **L'éruption de du 17 janvier 2002** : Une autre éruption majeure a détruit une grande partie de la ville de Goma. Environ 400 000 personnes ont été déplacées, et les coulées de lave ont causé des dégâts importants aux infrastructures, notamment à l'aéroport.

- **L'éruption de 2021** : le 22 mai 2021, une nouvelle éruption a provoqué des coulées de lave qui ont détruit des villages et causé la mort de dizaines de personnes. La panique a conduit à des déplacements massifs de populations.

Le Nyiragongo représente un intérêt scientifique et touristique. En effet, le volcan Nyiragongo est un laboratoire naturel pour les volcanologues, qui étudient son activité afin de mieux comprendre les processus volcaniques et d'améliorer les systèmes d'alerte précoce. L'ascension du volcan est une activité prisée des touristes, attirés par le spectacle impressionnant de son lac de lave incandescent.

Les éruptions du Nyiragongo ont des impacts significatifs sur les populations locales, qui vivent dans une région déjà vulnérable en raison des conflits armés à répétition et de la pauvreté. Les autorités et les scientifiques travaillent à améliorer les systèmes de surveillance et à sensibiliser les communautés aux risques volcaniques.

2. **Le volcan Nyamulagira :** le Nyamulagira est un autre volcan actif situé dans la région des Virunga, dans l'Est de la RDC et culmine à environ 3058 mètres au-dessus du niveau de la mer. Proche du volcan Nyiragongo dont il est séparé de seulement 15 km, il fait partie de la chaîne volcanique des Virunga, mais il présente des caractéristiques distinctes (Fig. 7). En effet, le Nyamulagira est un volcan bouclier, ce qui signifie qu'il a une forme relativement aplatie, résultant de l'accumulation de coulées de lave très fluides. Ce type de volcan est similaire à ceux que l'on trouve à Hawaï.

Le Nyamulagira est l'un des volcans les plus actifs d'Afrique. Il entre en éruption en moyenne tous les deux à quatre ans. Contrairement au Nyiragongo, il n'a pas de lac de lave permanent dans son cratère principal. Cependant, des lacs de lave temporaires peuvent se former pendant ses éruptions. Sa lave est basique et très fluide, ce qui lui permet de s'étendre sur de grandes distances, notamment dans le Parc National des Virunga, une région riche en biodiversité.

La littérature décrit au moins 44 éruptions du volcan Nyamulagira, ce qui fait qu’il soit considéré comme le volcan le plus actif d’Afrique. Contrairement au Nyiragongo, le Nyamulagira est caractérisé par des éruptions de longue durée qui peuvent s’étaler sur des mois, l’exemple le plus emblématique est celle de l’éruption ayant commencé fin janvier 1938 pour prendre fin juin 1940.

Les coulées de lave du Nyamulagira affectent souvent le Parc National des Virunga, qui abrite une faune et une flore uniques, notamment les gorilles des montagnes. Les éruptions peuvent détruire les écosystèmes locaux, mais elles enrichissent également les sols en nutriments à long terme.
Bien que le Nyamulagira soit moins dangereux pour les humains que le Nyiragongo en raison de son éloignement des zones densément peuplées, il représente toujours une menace pour les communautés vivant à proximité.

Le Nyamulagira est également étudié par les volcanologues pour mieux comprendre les processus éruptifs des volcans boucliers. Son activité fréquente offre une opportunité unique d'observer et de modéliser les éruptions en temps réel.

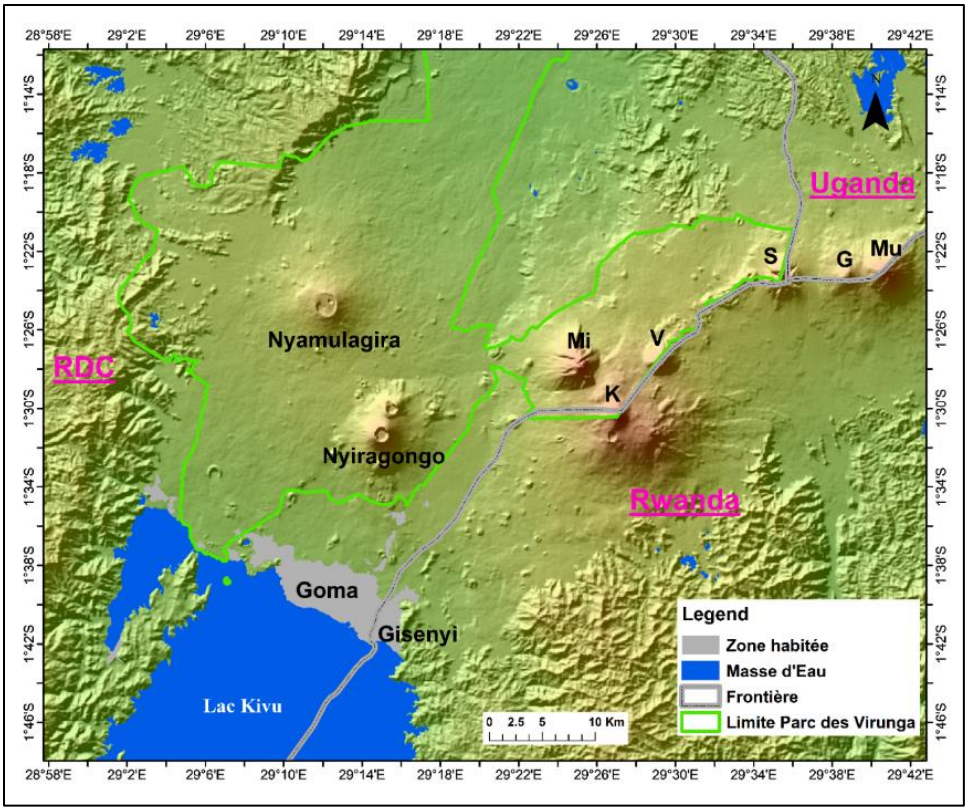


Figure 7. Carte montrant le lac Kivu et les huit volcans majeurs de la chaine volcanique des Virunga, à savoir le Nyiragongo, le Nyamulagira, Mikeno (Mi), Karisimbi (K), Visoke (V), Sabinyo (S), Gahinga (G) et Muhabura (Mu) qui sont situés le long des frontières entre la RDC, le Rwanda et l'Uganda.

3. Les autres volcans majeurs des Virunga sont (tous sont endormis) (voir Figure 7) :

- Le Mikeno : culmine à 4437 mètres d'altitude, est un volcan endormi et est le deuxième plus haut de la chaîne des Virunga. Il est également situé dans le Parc National des Virunga et abrite des gorilles de montagne. Il est moins étudié en raison de son absence d'activité volcanique récente.
- Le Karisimbi : culmine à 4507 mètres d'altitude, possède le plus haut sommet de la chaîne des Virunga. Il est partagé à partir de son sommet entre la RDC et le Rwanda.
- Le Visoke ou Bisoke : il culmine à 3711 mètres d'altitude, c'est un volcan dont le cratère contient un lac au sommet et dont la dernière éruption enregistrée date de 1957. Il est situé à la frontière entre le Rwanda et la RDC.
- Sabyinyo : Culmine à une altitude de 3 634 mètres, avec un sommet érodé, créant plusieurs pointes distinctes, se situe à la frontière entre la RDC, le Rwanda et l'Uganda.

- Gahinga : culmine à 3474 mètres, se situe entre le Sabyinyo et le Muhabura et connu pour ses forêts de bambous, habitat des gorilles. Il est à la frontière entre le Rwanda et l'Ouganda.
- Muhabura : culmine à 4 127 mètres, avec un petit cratère contenant un lac. Partagé entre le Rwanda et la RDC.

Au sud des volcans des Virunga se trouve le lac Kivu (1460 m d'altitude), qui est un lac méromictique formé à la fin du Pléistocène pendant la formation de la chaîne volcanique des Virunga (Degens et al. 1973). Le lac est situé dans la branche occidentale du SREA entre la RDC et le Rwanda, est actuellement bordé au nord par les coulées de lave de Nyiragongo et Nyamulagira, à l'est par les collines Rwandaises, et à l'ouest par la chaîne de Mitumba, et se draine vers le sud par la rivière Ruzizi.

II.1.2. Sites de mesure

La ville de Goma est bâtie sur un champ de lave de différentes éruptions du volcan Nyiragongo, ces multiples éruptions de ce volcan ont laissées un réseau de fractures sur le flanc sud par lesquels s'échappent les gaz volcaniques. De ces différentes fractures, il y a une qui est considérée comme principale et qui a été sollicitée par des coulées de laves de 3 dernières éruptions de ce volcan (1977, 2002 et 2021). C'est sur cette fracture que nous avons pris différents points pour la mesure de concentration et flux en gaz mais aussi sur les fronts de différentes coulées de lave du Nyiragongo et Nyamulagira (les Mazuku). Différents points ont été sélectionnés aussi sur le lac Kivu en tenant compte de deux parties majeures de la zone nord de ce lac dans lesquelles sont dissous d'énormes quantités de gaz.

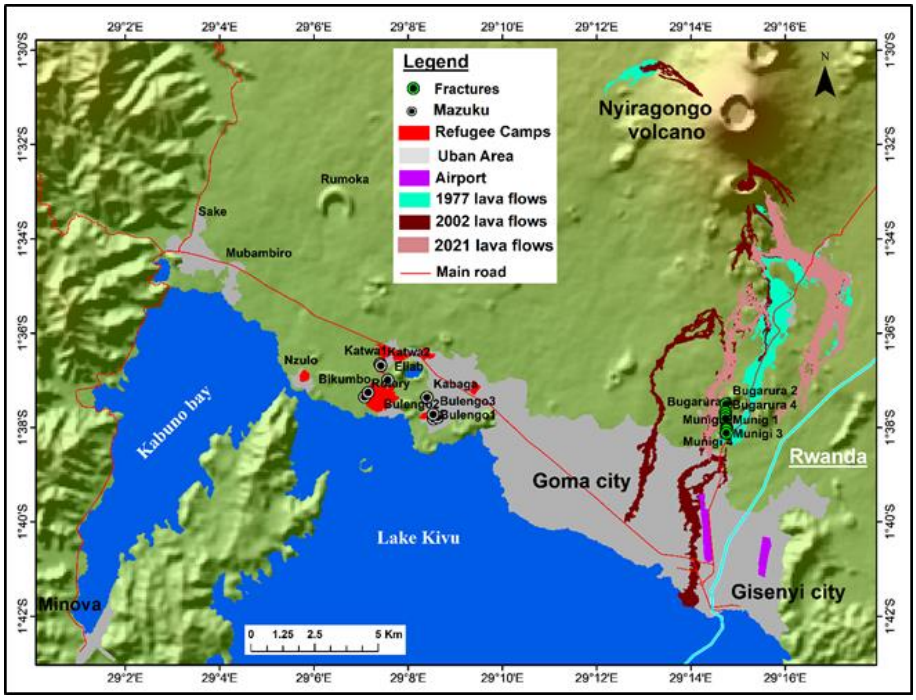


Figure 8. Carte des sites de mesures de flux en gaz dans les Mazuku et sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo.

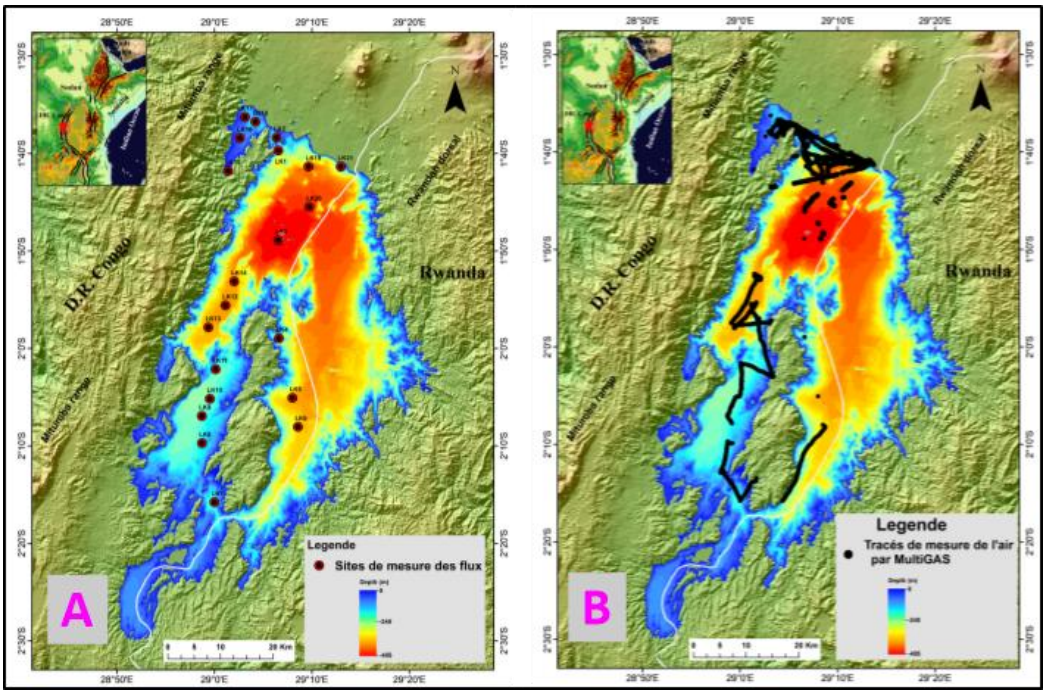


Figure 9. Cartes des sites de mesures de flux en gaz sur les eaux du lac Kivu (A) et tracés de mesure des gaz dans l'air (B)

II.1.3. Description de l'équipement

Dans cette étude, nous avons utilisé trois appareils de mesure de gaz dont un fluxmètre, un MultiGAS et un gazomètre, une sonde CTD a été utilisée pour la mesure des paramètres physicochimiques du lac Kivu et un masque à gaz a servi pour notre protection dans les Mazuku. Deux appareils (le fluxmètre et le MultiGAS) sont décrits ci-dessous, étant les équipements de la nouvelle technologie et principaux de notre étude.

II.1.3.1. Le fluxmètre

Cet appareil est de la marque West Systems constitué d'un détecteur de CO_2, un détecteur de H_2S, une pompe, l'interface électronique, une batterie, un filtre, une chambre d'accumulation et un smartphone ou un ordinateur de poche.

- Pour le dioxyde de carbone le détecteur est basé sur la technologie infrarouge non dispersive, il est un Li-830 dont les spécifications sont une plage de travail de 0 à 20000 ppm CO_2, une limite de détection de 1,5 ppm CO_2, une précision de moins de 3%.
- Pour le H_2S, un détecteur électrochimique, model WS-TOX-05 est utilisé avec une gamme de mesure de 0 à 200 ppm avec une précision de 5%.
- Le smartphone utilisé est intégré d'un GPS avec une précision de 5 mètres, le système d'exploitation Android est utilisé et une application « FluxManager » développée par West Systems.
- Le capteur de pression et de température installé dans la chambre de stockage est un dispositif intégré dont les spécifications techniques garantissent une plage de mesure de pression entre 500 et 1100 hPa avec une précision de 4 hPa, une plage de mesure de température entre -40 et 85°C avec une précision de 1°C.
- la Chambre d'accumulation contient un mélangeur, un détecteur de pression et de température interne, des filtres sur des connexions pneumatiques. Nous avons utilisé deux types de chambres d'accumulation, le type B et le type C. (West Systems, 2019)

  Le type B qui est adapté aux mesures des flux élevés à cause de sa hauteur (H= 200 mm ; V= 0.006186 m^3 et A= 0.0317 m^3) était utilisé sur le sol pendant les mesures dans les Mazuku et sur la fracture et le type C (H= 100 mm ; V= 0.006878 m^3 et A= 0.0712 m^3) ayant une plus grande empreinte et une forte sensibilité, est adapté pour les mesures dans

des zones à faible flux, était utilisé pour les mesures sur la surface du lac Kivu, muni d'un flotteur.

Principe de mesure par la chambre d'accumulation

La technique de la chambre d'accumulation statique non stationnaire consiste à mesurer les concentrations des gaz étudiés (CO_2 et H_2S) à l'intérieur d'un conteneur, ouvert uniquement du côté de l'interface avec le sol, en fonction du temps. En présence d'un flux de gaz spécifique diffusé depuis le sol, on observe une augmentation de la concentration à l'intérieur de la chambre, d'abord linéaire au cours du temps. Le coefficient angulaire (ppm/s) de la ligne de régression de la courbe de concentration en fonction du temps est proportionnel au flux diffus ; la constante de proportionnalité entre le flux molaire diffus de gaz spécifique exprimé en moles par mètre carré par jour (mol/m^2d), et le coefficient angulaire (ppm/s) est en première approximation fonction de la taille et de la géométrie de la chambre, de la pression et de la température atmosphérique. Pour réduire les erreurs systématiques inhérentes à la technique, un second facteur sans dimension est ajouté à ce facteur de proportionnalité appelé constante de la chambre d'accumulation ou coefficient d'étalonnage, déterminé expérimentalement, lors de la phase d'étalonnage (IO TAR 02 « Etalonnage du fluxmètre »). Pour le cas de ce travail, une constante de 0,439 a été utilisée pour la chambre d'accumulation du type B et 0,282 pour le type C obtenus à la température de 30°C et pression de 853 mbar.

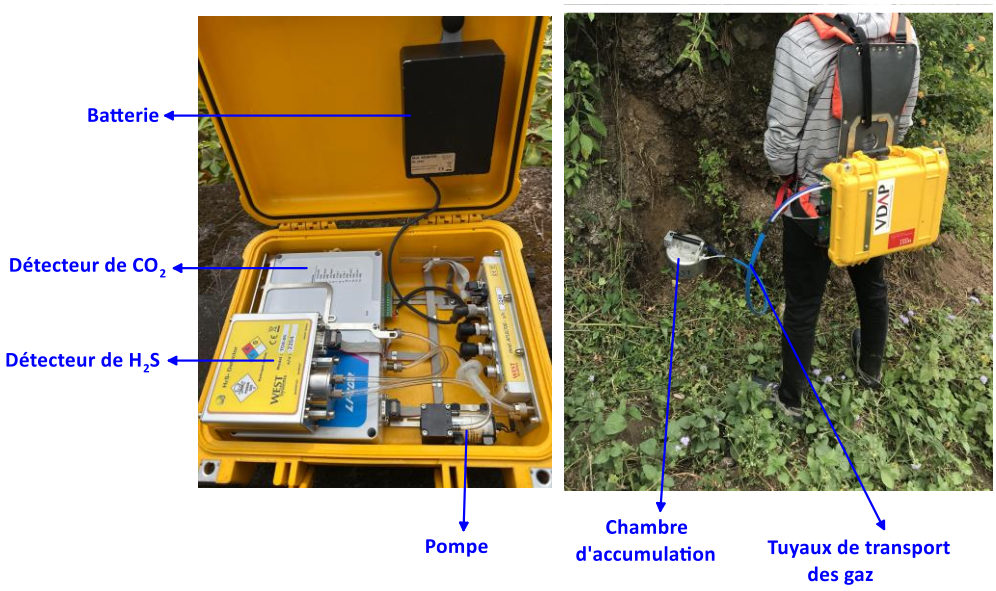


Figure 10. Images du fluxmètre et ses différentes parties

II.1.3.2. Le MultiGAS

La technique MultiGAS (Multi-component Gas Analyser System) a été appliquée pour la première fois aux volcans au milieu des années 2000 (Aiuppa et al., 2005 ; Shinohara & Witter, 2005). Le MultiGAS est un équipement qui assemble des capteurs électrochimiques et infrarouges facilement obtenus sur le marché à moindre coût. On trouve le MultiGAS dans le commerce à un seul kit de capteurs. Le coût raisonnable, la légèreté et la configuration compacte (< 2 kg ; 40 x 20 x 15 cm), la robustesse et la fréquence d'acquisition jusqu'à 0,5 Hz ont fait du MultiGAS un outil idéal pour l'analyse des gaz volcaniques (Aiuppa, 2015a).

L'appareil MultiGAS que nous avons utilisé a été monté dans le laboratoire de l'électronique de l'Observatoire Volcanologique de Cascade (Vancouver USA). Il est contenu dans un boîtier (1), et est constitué d'une pompe (2) qui aide à aspirer l'air qui entre par le tuyau de prélèvement (3) en passant par un filtre (4) qui élimine toute poussière qui serait prise lors du pompage. Ensuite l'air pompé (échantillon) se dirige vers le senseur du CO_2 (5) qui mesure sa concentration, puis l'échantillon est envoyé dans le senseur de SO_2 (6) qui en mesure à son tour la concentration, et en fin dans le senseur de H_2S (7). L'air sort par le tuyau de sortie (8). Les données mesurées sont enregistrées dans une boîte noire appelée « computer » (9) ; ces données renseignent sur les

concentrations des gaz, l'heure de mesure, les températures, ainsi que les coordonnées géographiques du point de mesure. Ces données sont ensuite téléchargées via un câble USB (10) ou par Wi-Fi (11) que génère l'appareil. L'équipement est aussi constitué d'une batterie (12) de 12 V et 5Ah pour l'alimenter et un GPS de marque Garmin (13) pour déterminer la position du lieu de prélèvement des données.

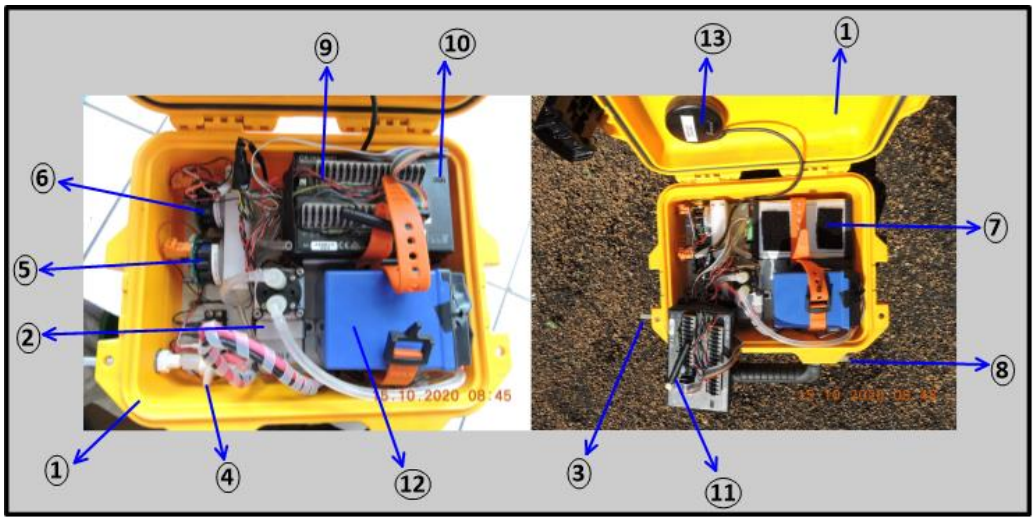


Figure 11. Images d'un MultiGAS avec ses différentes parties

Le MultiGAS a été étalonné en utilisant du sulfure d'hydrogène standard certifié (25 ppm ±5%, dans une matrice d'azote), du dioxyde de soufre (25 ppm ±10%) et du dioxyde de carbone (1000 ppm ±2%) dans la matrice (Fig. 12). Ces gaz d'étalonnage aident à vérifier la fiabilité des mesures effectuées par le MultiGAS. Ainsi, chaque mesure de H_2S est associée d'une erreur de ±5% (soit ±1,25 ppm), de ±10% (soit ±2,5 ppm) pour SO_2 et de ±2% (soit ±20 ppm) pour le CO_2. Cette précision fait que pour des gaz à concentrations très faibles dans la nature, des valeurs négatives puissent être enregistrées par l'équipement. A titre illustratif, une valeur nulle (zéro) pour le H_2S sera comprise entre - 1,25 et 1,25 ppm, une valeur nulle pour le SO_2 sera comprise entre - 2,00 et + 2,00 ppm. Les gaz d'étalonnage sont fournis par Gasco USA et préparés par des techniques gravimétriques ou de pression partielle. Les étalons d'étalonnage sont certifiés par rapport au G.M.I.S. de Gasco. (Norme intermédiaire du fabricant de gaz) qui est soit préparée par des poids traçables au National Institute of Standards and Technology (NIST), soit en utilisant les matériaux de référence standard du NIST, le cas échéant.



Figure 12. Bouteilles de gaz étalons pour le calibrage du MultiGAS, munies de soupapes régulatrices de pression

II.2. Méthodes

II.2.1. Différentes méthodes d'analyses des gaz volcaniques

La mesure des gaz volcaniques est essentielle pour surveiller l'activité volcanique et comprendre les processus magmatiques. Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer la concentration et la composition des gaz volcaniques, chacune ayant ses avantages et inconvénients.

Voici les principales méthodes.

II.2.1.1. Les mesures directes

Échantillonnage direct sur le terrain suivi d'analyse au laboratoire

Echantillonnage par bouteille de Giggenbach : Cette technique d'échantillonnage est la plus utilisée parmi les méthodes directes dans la collecte des gaz volcaniques dans les fumerolles/évents (Figure 13A). Cette méthode utilise des flacons en verre sous vide pour collecter les composants acides (CO_2, SO_2, H_2S, HCl et HF) dans une solution d'hydroxyde de sodium et les gaz non condensables (N_2, O_2, H_2, CO et gaz rares) dans la partie supérieure de la bouteille (Giggenbach et Gougel, 1989 ; Symonds et al., 1994). La collecte sur le terrain est suivie d'une analyse en laboratoire par des méthodes chimiques humides standard et par chromatographie en phase gazeuse.

Flacons à échantillons et sacs de Tedlar : Des échantillons de gaz sont capturés directement à la source (fumerolles, évents) dans des flacons ou des sacs spécialisés. Les échantillons sont ensuite analysés en laboratoire pour déterminer leur composition chimique.

Pièges chimiques : Utilisés pour absorber certains gaz (comme le SO_2) sur le terrain pour une analyse ultérieure.



Figure 13. Echantillonnage des gaz volcaniques dans les fumerolles par la bouteille de Giggenbach (A), installation de matériel sur un évent volcanique pour l'échantillonnage des gaz par la méthode de Giggenbach (B).

Les gaz récoltés sont ensuite conduits au laboratoire pour analyse par un chromatographe de gaz, ce travail demande l'étalonnage de l'appareil par des étalons spécifiques suivi de l'introduction des échantillons dans un port d'échantillonnage, ce dernier est chauffé pour injecter et vaporiser l'analyte simultanément et la suite du processus continu au sein de l'appareil.



Figure 14. Analyse des gaz par un chromatographe de gaz

Capteur in situ : **les MultiGAS**

Les instruments MultiGAS sont également utilisés pour l'échantillonnage direct et surveiller efficacement plusieurs gaz à la fois. Utilisant une combinaison de capteurs optiques et électrochimiques, ces ensembles d'instruments peuvent mesurer les concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S ainsi que des paramètres environnementaux tels que la température et la pression. Ils sont généralement transportés jusqu'aux fumerolles ou aux évents de dégazage pendant les campagnes de mesure, voire installés en permanence dans des endroits situés sous le vent de ces évents. Au lieu de collecter les gaz pour les analyser ultérieurement, les données recueillies peuvent être transmises par radio à un observatoire volcanologique, ce qui permet d'enregistrer minute par minute les changements de concentration de gaz.

Dans ce travail, nous avons utilisé deux appareils de nouvelle génération dont un MultiGAS et un fluxmètre dont les principes de fonctionnement sont détaillés ci-dessous :

Le MultiGAS : il utilise les capteurs électrochimiques et infrarouges pour mesurer les différents types de gaz.

1°) **les capteurs électrochimiques** utilisés dans le MultiGAS mesurent le H_2S et le SO_2.

Principe de fonctionnement des capteurs électrochimiques

Ces capteurs contiennent des cellules où le gaz cible entre en contact avec un électrolyte (le KCl ou le H_2SO_4 (dilué) pour le H_2S et le H_2SO_4 (dilué) ou la solution aqueuse de sulfate comme le

Na_2SO_4 ou le K_2SO_4) pour le SO_2. Le gaz réagit de manière chimique sur une électrode pour produire un courant électrique proportionnel à la concentration du gaz. Il s'observe des réactions d'oxydation :

Pour le H_2S:

A l'électrode de travail (anode) : $H_2S \longrightarrow S + 2H^+ + 2e^-$

A l'électrode de contre-réaction (cathode) : $O_2 + 4é + 4H^+ \longrightarrow 2H_2O$

La variation de courant générée par cette réaction est proportionnelle à la concentration de H_2S dans l'air.

Pour le SO_2:

A l'anode: $SO_2 + 2H_2O \longrightarrow SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^-$

A la cathode : $O_2 + 4é + 4H^+ \longrightarrow 2H_2O$

Le courant généré est proportionnel à la concentration de SO_2 dans l'air.

L'ampleur du courant est proportionnelle au rapport de mélange (en volume) du gaz cible. La sensibilité au gaz et la gamme d'abondance du capteur sont indépendantes du débit traversant la cellule (qui empêche simplement la stagnation de l'air, ce qui empêcherait la détection des abondances de gaz variant rapidement), mais sont contrôlées par la diffusion. D'autres gaz interférents peuvent également se diffuser dans la cellule, générant une réponse de courant supplémentaire connue sous le nom de sensibilité croisée. Certaines de ces sensibilités croisées sont évitées par des filtres spécifiques aux gaz à la surface de la cellule, tandis que d'autres ne peuvent pas être évitées et doivent donc être prises en compte lors de l'analyse des données. La réponse globale du capteur est décrite par l'équation :

$I = B + s \,.\, [X] + \sum cs_Y \,.[Y]$

où I : est le courant de sortie du capteur, en nA,

s : est la réponse calibrée de la sensibilité du capteur, en nA/ppmv, au gaz cible X, dont l'abondance du rapport de mélange est donnée par [X],

ppmv (10^6 mol/mol) cs_Y : est la sensibilité croisée du capteur à d'autres gaz, d'abondance [Y].

B : représente la ligne de base du capteur, en nA.

On peut noter que I, [X], B et [Y] sont tous des fonctions du temps.(Roberts et al., 2012)

La concentration de H_2S ou de SO_2 est obtenue par la relation :

$$C = \frac{I}{k}$$

Où C : est la concentration du gaz,

I : est le courant mesuré, et k est une constante déterminée par calibration.

2°) **Les capteurs infrarouges** utilisées dans cet équipement mesurent le CO_2 et le H_2O, mais pour le cas de ce travail, seul CO_2 a été pris en considération.

Le capteur IR utilisé par cet équipement pour mesurer le CO_2 est un capteur NDIR (**Non-Dispersive InfraRed**).

Principe de fonctionnement des capteurs infrarouge NDIR

Une source infrarouge émet un faisceau lumineux à travers une cellule (un tube) où le gaz (mélange d'air et de CO_2) est présent.

Ce faisceau traverse une chambre de mesure contenant le gaz à analyser.

Un filtre optique sélectionne la longueur d'onde spécifique au CO_2 (généralement 4,26 µm, qui correspond à son pic d'absorption).

Un détecteur infrarouge mesure l'intensité transmise après passage à travers le gaz.

La différence d'intensité entre la source et le détecteur est utilisée pour calculer la concentration de CO_2, en appliquant la loi de Beer-Lambert.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha c L}$$

où : I_0= Intensité initiale de la source IR

I = Intensité transmise après absorption par le CO_2

α = Coefficient d'absorption du CO_2 à la longueur d'onde choisie

c= Concentration du CO_2 dans la chambre de mesure

L = Longueur du trajet optique du faisceau IR à travers le gaz

En réarrangeant cette équation :

$$c = \frac{1}{\alpha L} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Cette équation montre que la concentration de CO_2 est proportionnelle au logarithme du rapport des intensités mesurées.

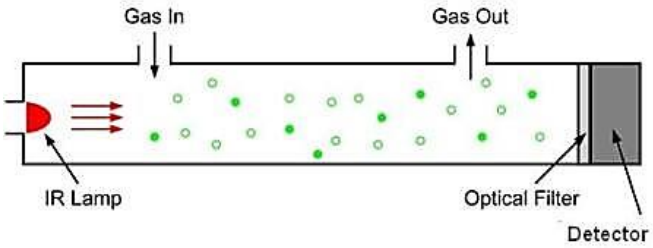


Figure 15. Schéma du principe de fonctionnement d'un capteur infrarouge NDIR (Gas measurement specialists, 2024).

Le fluxmètre : cet équipement utilise les capteurs électrochimique et infrarouge (NDIR).

1°) **le capteur électrochimique** mesure le H_2S en exploitant la réaction chimique qui se produit lorsque ce gaz entre en contact avec les électrodes d'un capteur en présence d'un électrolyte. Le H_2S traverse une membrane semi-perméable du capteur, qui laisse passer uniquement les molécules de H_2S. Une fois dans le capteur, le H_2S réagit chimiquement à l'électrode active en présence d'un électrolyte. La réaction typique au niveau de l'anode est: $H_2S \longrightarrow S + 2H^+ + 2e^-$

Cette oxydation produit des électrons, générant un courant électrique proportionnel à la concentration de H_2S. Le courant produit est mesuré par le circuit électronique du capteur, qui le traduit en concentration de H_2S en ppm, et l'appareil convertit automatiquement cette concentration en flux en H_2S connaissant le débit de ce gaz sur la surface mesurée.

2°) **Le détecteur infrarouge non dispersif (NDIR)**: le fluxmètre qui est aussi un MultiGAS utilise le même principe tel que détaillé dans le paragraphe précédent pour la mesure du CO_2.

II.2.1.2. Mesures indirectes

Spectroscopie à Distance

COSPEC (Correlation Spectrometers) et DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) : Utilise des mesures spectrales pour quantifier les gaz comme SO_2 et BrO à distance en analysant l'absorption de la lumière solaire par les panaches volcaniques (Galle et al., 2003 ; Carn, 2015).

Un spectromètre COSPEC ou DOAS mesure la quantité de dioxyde de soufre dans une section transversale du panache en passant sous le panache ou en le balayant. La mesure est faite en tenant compte de l'orientation et la vitesse du vent. Ces deux éléments permettent de déterminer le taux d'émission de SO_2, et donc la quantité de SO_2 émise dans l'atmosphère chaque seconde, heure ou jour. Ces méthodes de télédétection reposent sur l'analyse de l'absorption différentielle de la lumière par les gaz en fonction de leur signature spectrale.

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) : Permet de mesurer les concentrations de plusieurs gaz volcaniques (CO_2, SO_2, H_2O, HCl, HF) en analysant leur spectre infrarouge. Cette technique peut être utilisée à distance depuis le sol, un avion ou un drone (Allard et al., 2005 ; Burton et al., 2007).

TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) : Utilise des lasers pour mesurer des gaz spécifiques comme le CO_2 et le CH_4 avec une grande sensibilité. Elle est souvent employée pour des mesures précises in situ. (Pedone et al., 2014)

4°) **Le LIDAR (Light Detection And Ranging)** est une technique de télédétection active utilisant un laser pour mesurer la concentration et la distribution des gaz volcaniques dans l'atmosphère. Il repose sur l'analyse de la rétrodiffusion et/ou de l'absorption de la lumière par les molécules de gaz. Il peut cartographier les panaches de gaz. (Aiuppa et al., 2015b)

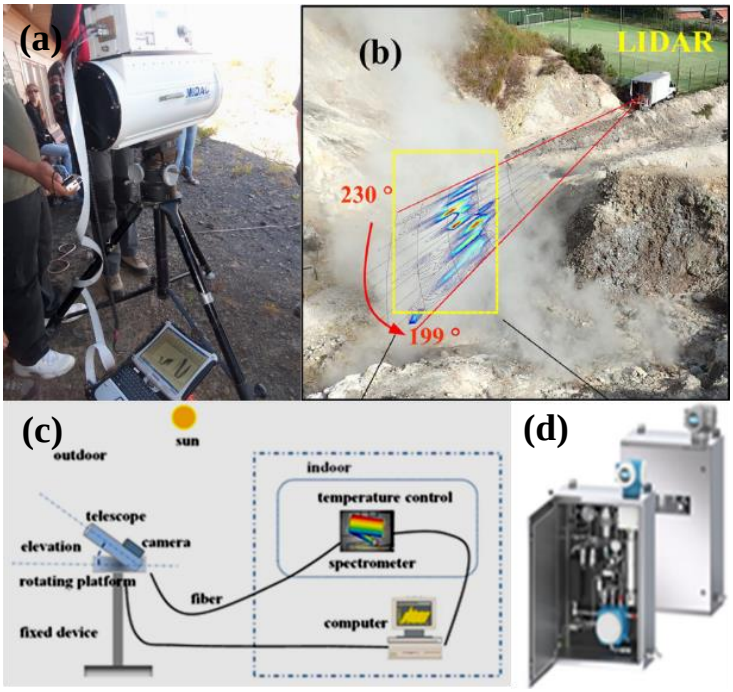


Figure 16. Un appareil FTIR (a), Un appareil LIDAR (b), Système de fonctionnement d'un DOAS (c), Un appareil TDLAS (d).

Caméras à Image Thermique et Ultra-Violet

Caméras UV : Mesurent les flux de SO_2 en capturant des images du panache de gaz et en analysant l'absorption de la lumière UV par le SO_2. (Carn, 2015 ; Delle Donne et al., 2016)

Caméras IR : Utilisées pour mesurer la concentration des gaz émis en surveillant la température et la composition du panache (Carn, 2015).

Satellites

Les Satellites comme le TOMS, TROPOMI et OMI : Mesurent les émissions de SO_2 et autres gaz volcaniques à l'échelle globale. Ils sont particulièrement utiles pour surveiller des volcans dans des régions éloignées ou mal accessibles (Carn, 2015).

II.2.1.3. Avantages et Limites

Les techniques comme par exemple le FTIR tout comme le DOAS ou COSPEC détectent une large gamme de gaz, mais elles sont soumises à des limitations ; notamment : la nécessité d'une source lumineuse appropriée, les complications liées au fonctionnement autonome et le coût d'achat de l'instrument. Ces limitations limitent le déploiement pratique de ces instruments pour la surveillance en temps réel des volcans actifs à l'échelle mondiale. Le DOAS et/ou le COSPEC utilise le rayonnement UV et donc leurs mesurent sont

effectuées seulement la journée bien qu'il soit possible pour des cas exceptionnels de créer une lumière de source artificielle. En outre, certains gaz volcaniques tels que H_2 et Cl_2 ne peuvent pas être détectés par des méthodes spectroscopiques infrarouges, et H_2S ne peut pas être détecté par la technique DOAS passive en raison de la faible intensité du rayonnement UV aux longueurs d'onde requises.

La mise en place des appareils MultiGAS, particulièrement portables qui sont peu coûteux et de faible puissance permettant de caractériser en continu (jour et nuit) et en « temps réel » les mesures des gaz in situ, à l'aide de méthodes électrochimiques et spectroscopiques a amélioré la surveillance de l'atmosphère et de l'environnement. L'application de ces capteurs in situ à l'étude du mélange complexe d'un panache volcanique permet d'étudier les variations spatiales et temporelles de la composition des gaz dans une plus large mesure que ne le permettent l'échantillonnage en fonction du temps ou les méthodes de télédétection dont la moyenne est calculée sur une longueur de trajet. Ces méthodes d'échantillonnage direct fournissent des mesures précises mais sont plus risquées à mettre en œuvre sur des volcans en intense activité (Roberts et al., 2012).

Les méthodes à distance (spectroscopie, satellite) sont moins risquées mais peuvent être affectées par les conditions météorologiques et nécessitent une calibration régulière.

Ces méthodes, souvent combinées, permettent de surveiller efficacement l'activité volcanique et de mieux comprendre les phénomènes associés.

II.2.2. Travaux de terrain et acquisition des données

Ce travail a été effectué en deux étapes :

La première étape consistait à la descente sur terrain pour les mesures du flux en CO_2 et H_2S et concentration du CO_2 sur la fracture sud du volcan Nyiragongo et dans les Mazuku, les mesures du flux en CO_2 et H_2S, des paramètres physicochimiques et de la concentration du CO_2, SO_2 et H_2S sur la surface, dans l'eau et dans l'air du lac Kivu ; et

La deuxième étape a consisté au téléchargement et l'analyse des données au bureau.

Nos descentes sur terrain ont été effectuées selon le calendrier détaillé dans le tableau 2.

NB : Hormis le dates reprises dans le tableau 2, quatre journées de terrain effectuées par nos collègues du département de Géochimie à l'OVG ont été ajoutées dont deux du mois de Mars et deux du mois d'Avril pour avoir une idée sur la variation du flux en CO_2 et H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo pendant la période pluvieuse. Mais aussi une journée de mesure de la concentration en gaz dans l'air sur le lac Kivu dans la partie baie de Kabuno effectué le 21/12/2022 toujours par nos collègues du département a été considéré dans ce travail.

Tableau 2: Travaux de terrain

Dates	Activités	Lieux
Du 22 au 24/06/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les fractures sud du volcan Nyiragongo	Bugarura et Munigi
Le 06/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les Mazuku	Quartier lac vert (Bulengo)
Le 09/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les Mazuku	Quartier lac vert (Bulengo)
Le 10/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les fractures sud du volcan Nyiragongo	Bugarura et Munigi
Le 12/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les Mazuku	Quartier lac vert (Bulengo)
Le 18/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S, des gaz atmosphériques et des paramètres physicochimiques au lac Kivu	Lac Kivu (grand lac)
Le 20/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S, des gaz atmosphériques et des paramètres physicochimiques au lac Kivu	Lac Kivu (grand lac)
Le 23/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration du CO_2 dans les fractures sud du volcan Nyiragongo	Bugarura et Munigi
Le 24/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les Mazuku	Quartier lac vert (Bulengo)
Le 31/07/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les fractures sud du volcan Nyiragongo	Bugarura et Munigi
Le 01/08/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les Mazuku	Quartier lac vert (Bulengo)
Le 02/08/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S, des gaz atmosphériques et des paramètres physicochimiques au lac Kivu	Lac Kivu (zone Ouest)
Le 05/08/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S, des gaz atmosphériques et des paramètres physicochimiques au lac Kivu	Lac Kivu (zone Nord-Ouest)
Le 06/08/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S, des gaz atmosphériques et des paramètres physicochimiques au lac Kivu	Lac Kivu (zone Nord)
Le 19/08/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S, des gaz atmosphériques et des paramètres physicochimiques au lac Kivu	Lac Kivu (grand lac)
Le 22/08/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les fractures sud du volcan Nyiragongo	Bugarura et Munigi
Le 23/08/2024	Mesures du flux en CO_2 et H_2S et de la concentration en CO_2 dans les Mazuku	Quartier lac vert (Bulengo)
Du 28 au 31/08/2024	Campagne de mesures du flux en CO_2 et H_2S, des gaz atmosphériques et des paramètres physicochimiques au lac Kivu	Lac Kivu (contour d'ile d'Idjwi)

II.2.2.1. Mesure du flux en CO_2 par le Fluxmètre

La méthode utilisée est la méthode dite « de la chambre d'accumulation », une station portable de la marque West Systems a été utilisé (Fig. 10) constituée par une chambre d'accumulation (une cloche) placée sur une surface plane, préalablement nettoyée de la végétation et rendue hermétique aux entrées d'air (en exerçant si possible une légère surpression pour la faire pénétrer dans le sol).

Après un temps de chauffe d'environ 10-15 minutes, le gaz est alors pompé, filtré des particules solides et déshumidifié via du perchlorate de magnésium (pour ne pas endommager les capteurs) avant d'être injecté dans un spectromètre IR (Dräger Polytron) qui mesure chaque seconde la concentration injectée avec une précision de 0,01%.

Le gaz analysé est alors réinjecté dans la chambre d'accumulation et homogénéisé via un système de ventilation intérieur (vitesse de rotation standard de 80 tours par minute). Ceci implique une augmentation progressive de la concentration au cours du temps, permettant de calculer un flux ($ppm.s^{-1}$) à partir de la pente temporelle des concentrations.

Ce flux est alors convertible en $g.m^{-2}.j^{-1}$ via la masse molaire du CO_2 et les spécificités surfaciques et volumétriques de la chambre d'accumulation à partir de la relation :

$$FCO_2 = \Delta CO_2/\Delta t \times (1/Mair) \times MCO_2 \times V \times (1/A) \times \delta air$$

où ΔCO_2 correspond à la différence de concentration finale et initiale (ppm), Δt est l'intervalle de temps de mesure, Mair , la masse molaire de l'air ($2{,}8964 \times 10^{-2}$ $kg.mol^{-1}$), MCO_2, la masse molaire du dioxyde de carbone ($4{,}4010 \times 10^{-2}$ $kg.mol^{-1}$), V, le volume de la chambre d'accumulation, A, la surface de la chambre d'accumulation et δair, la densité de l'air ($kg.m^{-3}$) en fonction de la pression (Pa) et de la température (K) : (P/T) x ($3{,}483677 \times 10^{-3}$). (Chiodini et al., 1998; Boudoire, 2017)

NB : Le CO_2 et le H_2S sont mesurés simultanément par l'appareil ; ainsi le CO_2 peut être remplacé par le H_2S dans la formule ci-haut.

Les données acquises ont ensuite été traitées via le logiciel « FluxRevision » qui permet d'apporter une première correction systématique en pression et en température au moment de la mesure.

Sur le terrain, les mesures de flux molaire sont acquises grâce à l'application « FluxManager » conformément au paragraphe précédent, où la chambre d'accumulation est d'abord placée dans l'air pendant 20 secondes pour purger toute concentration précédente en gaz, après elle est placée sur le sol et bien couverte pour empêcher toute entrée de l'air, le gaz est pompé pour l'instant pendant 3 minutes en vérifiant son évolution sur le smartphone qui commande l'appareil.

Une fois collectées, les données de la campagne sont revues à l'aide du logiciel « FluxRevision » qui permet de créer un tableau résumant les données fondamentales telles que les coordonnées géographiques, la température et la pression environnementale, le coefficient de pente de l'interpolation linéaire et l'incertitude relative de la mesure. Grâce à ces données, à la constante de la chambre d'accumulation et au rapport d'étalonnage, les flux de gaz sont convertis de ppm/s, une quantité qui dépend de la géométrie de la chambre, de la pression et de la température ambiante, en mol/ (m^2jour), une grandeur indépendante de la géométrie de la chambre, de la pression et de la température ambiante. L'incertitude de chaque mesure est déterminée. (West Systems, 2019)

Lors du traitement de données le logiciel propose le graphique du flux en fonction du temps pour chaque gaz étudié, avec le curseur de l'ordinateur nous avons eu à déterminer le vrai flux du gaz en nous servant des valeurs de l'erreur relative et du coefficient de corrélation nous proposer par le logiciel (Fig. 18 et 19), La courbe obtenue lors de la mesure se décompose en trois parties (Fig. 17) : la première partie correspond à la purge du système et donc à une mesure de l'air dans le système, elle n'est donc pas représentative; la seconde correspond au « vrai » flux de CO_2 mesuré à travers le sol (ou à travers l'eau dans le cas d'un lac); enfin la dernière partie constitue un palier se formant lorsque la limite instrumentale est atteinte ou plus généralement lorsque la concentration de CO_2 contenue dans le sol est atteinte dans la cloche. (Boudoire, 2017)

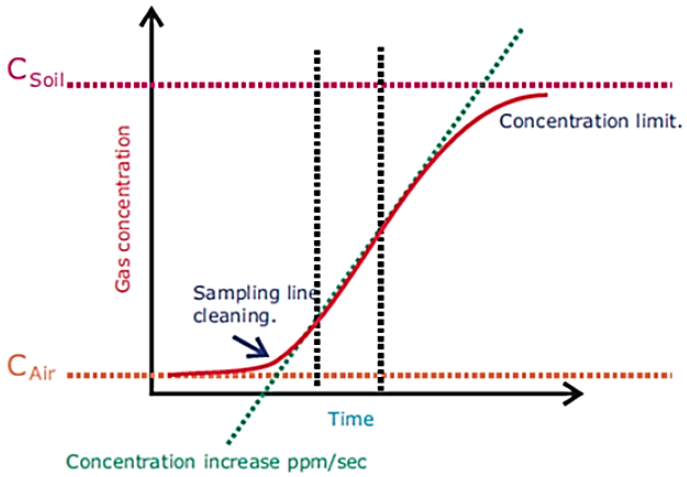


Figure 17. Courbe classique obtenue d'interprétation des données lors des mesures de flux de CO_2 avec une chambre d'accumulation (Boudoire, 2017 ;West Systems, 2019)

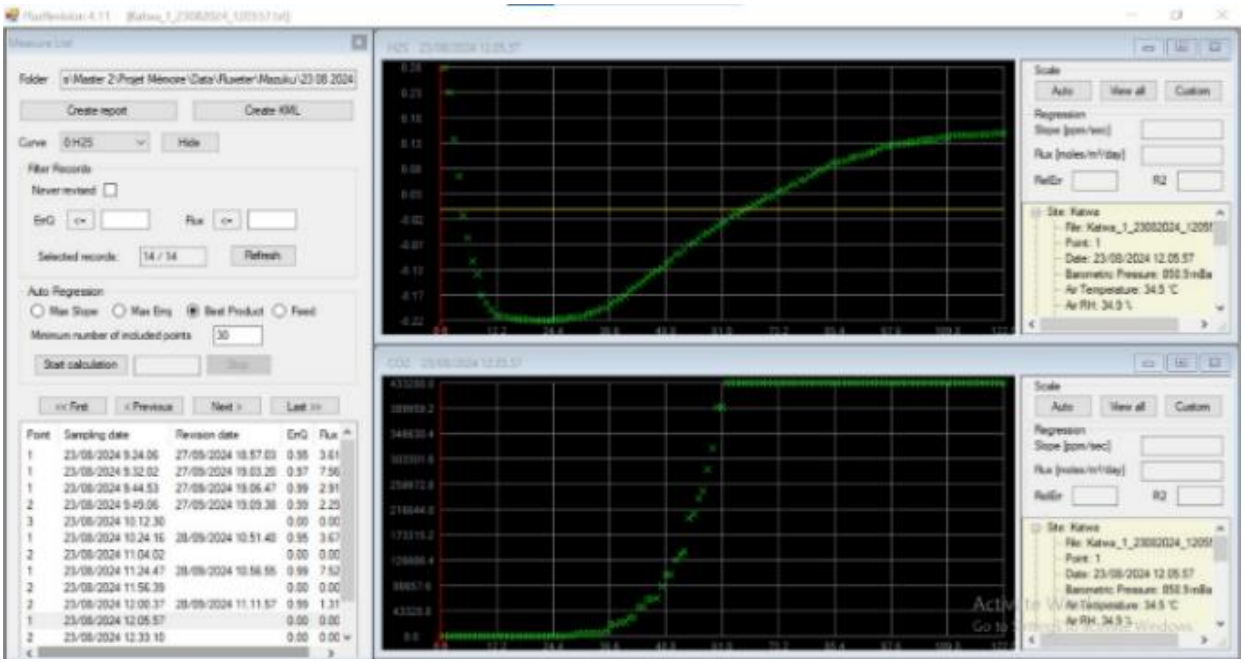


Figure 18. Présentation des résultats de mesures par le logiciel FluxRevision en fonction des courbes avant le traitement.

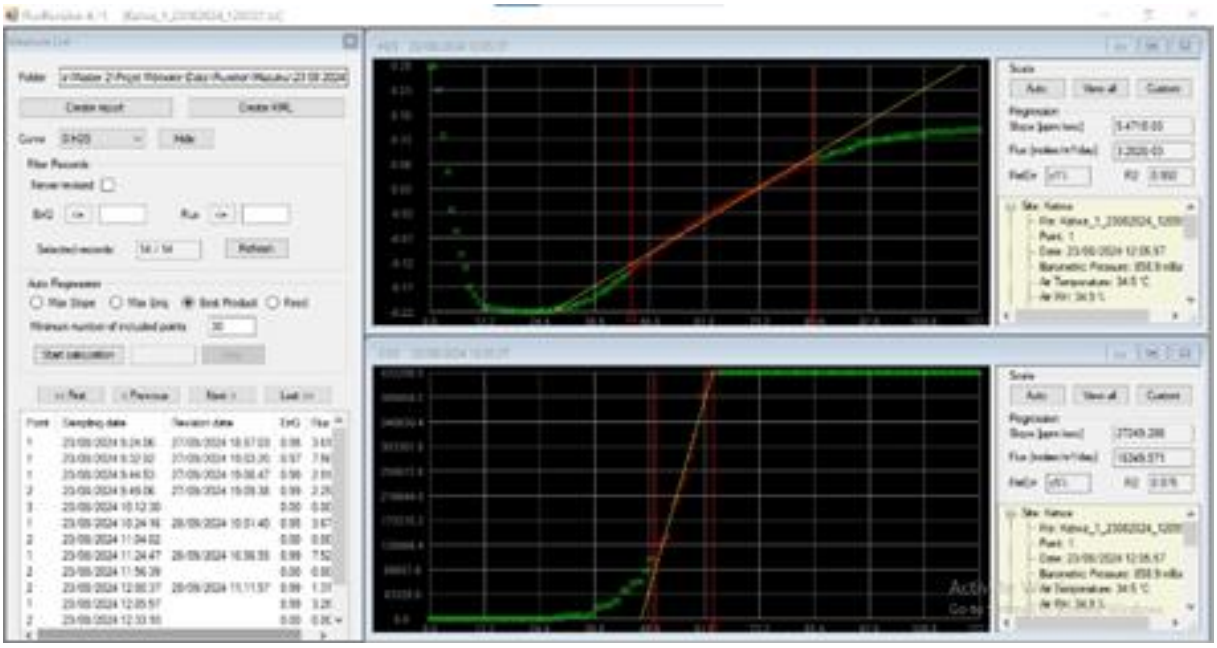


Figure 19. Présentation des résultats de mesures par le logiciel FluxRevision en fonction des courbes après le traitement.

II.2.2.2. Mesure de la concentration en SO_2, CO_2 et H_2S dans l'atmosphère par le MultiGAS

Les mesures de la concentration en SO_2, CO_2 et H_2S dans l'air sec sont effectuées simultanément par le MultiGAS. Cet appareil est allumé et est attaché sur le toit du canot rapide sur le lac et la mesure se fait en continue pendant toute la durée passée sur le terrain. (Annexe 5)

Le téléchargement des données s'est fait avec le logiciel **loggernet**. Le processus de téléchargement (Fig. 20) consistait à connecter l'appareil à un ordinateur par Wi-Fi (Fig. 20A). Ensuite on entrait dans la partie du programme dénommée « customs » (Fig. 20A), puis dans « customers tables » pour sélectionner les dates pour lesquelles on souhaite télécharger les données (exemple : du 02 Août 2024 de 7h au 31 Août 2024 à 18h) (Fig. 20B), puis on clique sur « start connection » pour lancer le téléchargement des données sur l'ordinateur (Fig. 20B&C).

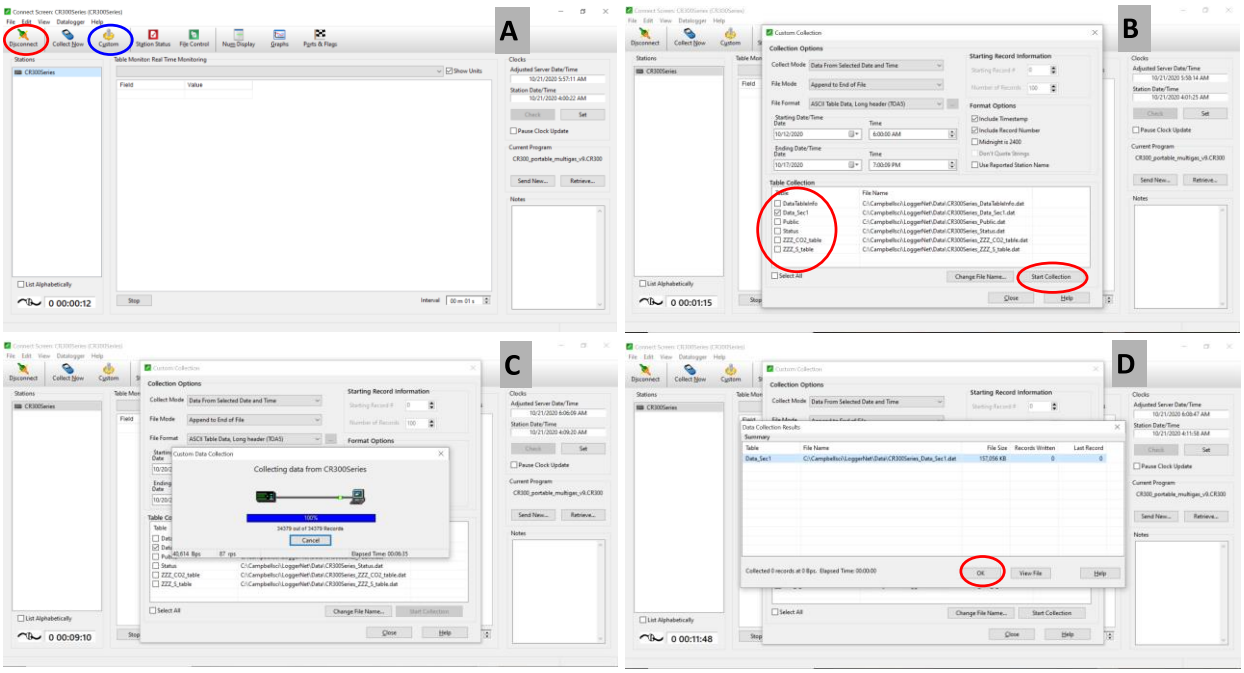


Figure 20. Suite d'étapes pour télécharger les données depuis le MultiGAS à l'aide du logiciel loggernet

Après le téléchargement, le traitement des données a consisté premièrement à trier les données nécessaires qui cadrent avec ce travail depuis la série des données issues du MultiGAS. Le MultiGAS donne en effet une variété d'autres données comme le niveau de la batterie, la vitesse de déplacement, les coordonnées GPS sous d'autres formats, le temps du GPS qui n'est pas différent du temps lié à l'équipement, le nombre de satellites accessibles, l'angle d'inclinaison de l'équipement, la pression des gaz qui entre dans l'équipement, etc.

L'outil Excel a été utilisé pour filtrer les données pour en éliminer toutes mesurées que nous avons supposé être des anomalies (mesures effectuées par l'appareil pendant qu'il se chauffe encore, fumée provenant des bateaux à leur passage à notre extrémité,..), connaissant que le CO_2 atmosphérique occupe autour de 400 ppm dans la composition de l'air, une barre de 400 à 460 ppm a été fixée pour la concentration en CO_2 dans l'atmosphère et toutes les données qui se sont retrouvées en deçà de 400 ou au-delà de 460 ppm pour le CO_2 dans la partie grand bassin ont été éliminées. Comme l'appareil enregistre simultanément les mesures de la concentration en CO_2, SO_2 et H_2S, et donc toutes les mesures pour ces autres gaz qui se retrouvaient dans cette gamme considérée étaient aussi parties d'office. Dans la partie baie de Kabuno, seules les mesures

effectuées pendant le chauffage de l'équipement ont été filtrés et qui avaient des valeurs négatives en concentration en CO_2.

II.2.2.3. Mesure de la concentration en CO_2 par le Gazomètre

Pour mesurer la concentration en CO_2 dans les Mazuku et sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo un analyseur de gaz portable GA5000 (Geotechnical Instruments, UK) a été utilisé, il donnait la concentration en pourcentage en volume (% v) avec une précision typique de ± 0,5%. Le CO_2 est mesuré avec un détecteur infrarouge à longueur d'onde (WIRD) avec un canal de référence. Le GA5000 est doté d'une pompe et d'une entrée de gaz reliée à un tuyau en plastique. L'extrémité du tuyau est placée à l'endroit précis où on veut mesurer la concentration dans les Mazuku et pour le cas de la fracture, une tige en acier inoxydable perforée afin de permettre le transfert de gaz depuis le sol est connectée sur le tuyau en plastique. Les gaz pompés passent d'abord au travers d'un filtre en polysulfone de 0,45 μm et sont par la suite conduits vers un analyseur IR. Les résultats sont affichés directement sur l'écran de l'instrument (Balagizi et al., 2016 ; Kasereka et al., 2017).

II.2.2.4. Mesure des paramètres physicochimiques dans le lac Kivu par la sonde CTD

Une sonde multiparamétrique de la marque (CTD 90 M II) a été utilisée, la sonde était chaque fois plongée dans l'eau et la faire descendre lentement à l'aide d'une corde. Au fur et à mesure que la sonde descendait les données étaient enregistrées par l'appareil, lorsqu'on sentait que la corde a atteint le fond du lac, elle était remontée rapidement. Du retour sur terrain les données étaient directement téléchargées via le logiciel (SST-SDA) en suivant la procédure reprise ci-dessous :

(1) Connecter la sonde sur l'ordinateur via un terminal USB
(2) Sélectionner « option », puis memory probe et en suite choisir la série de sonde
(3) De la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « start communication ». Lorsque le téléchargement atteint 100%, cliquer sur « read out data » qui nous donne la possibilité de choisir où sauvegarder les données.
(4) Les données sauvegardées sont en format .SSD qu'il faut convertir au format texte. Pour y arriver, il faut revenir à « options » où cette fois l'on sélectionne « export data files » qui nous donne la possibilité d'aller chercher les données qui ont été sauvegardées sous format .SSD. Après avoir sélectionné les fichiers que l'on souhaite convertir, on clique sur

« open », la conversion se lance et à la fin tous les fichiers sont convertis au format .TOB qui est un format texte qui est alors aisément converti en Excel. Les données au format Excel peuvent alors être traitées à volonté.

II.2.2.5. Méthodes statistiques et logiciels utilisés

Pour vérifier si la saisonnalité aurait une influence sur le flux en gaz sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo, nous avons procédé au calcul des moyennes de nos données du flux de CO_2 et de H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo, après les tests **t-test** et de **Skewness-Kurtosis** avec le logiciel **Stata 15** et test **U de Mann-Whitney** avec le logiciel **Past** ont été effectués sur ces données, ce qui nous ont donné les moyennes de moyennes de saisons de ces données et les valeurs de p. Les résultats issus de ces analyses sont donnés dans le chapitre 3 suivant.

Le logiciel **arcGis 10.4.2** a été utilisé pour réaliser les différentes cartes (le milieu d'étude et les sites de mesures) et le logiciel **Zotero**, le style Chicago nous a servi dans la constitution de la bibliographie.

Chapitre III : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1. Présentation des résultats

III.1.1. Concentration et flux en CO_2 dans les Mazuku et sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

La concentration et le flux des différents gaz varient selon les sites où les mesures ont été effectuées, des valeurs élevées en concentration et flux en CO_2 ont été enregistrées dans les Mazuku tandis que sur la fracture principale située au sud du volcan Nyiragongo ces valeurs ont été faibles et ce comparativement aux valeurs trouvées dans les Mazuku. La plus grande valeur de concentration en CO_2 dans les Mazuku était de 44,8 % mesurée au site Bulengo 2 en date du 23 août 2024, alors que la faible valeur de 10,9% a été mesurée au site de Bulengo 3 le 09 juillet 2024 (Annexe 1)

Tableau 3: Variation des flux de CO_2 dans les Mazuku situés à l'ouest de la ville de Goma et au nord du lac Kivu

Sites	6 juillet 2024	9 juillet 2024	12 juillet 2024	24 juillet 2024	1 août 2024	1 août 2024
	$g/m^2/jour$	$g/m^2/jour$	$g/m^2/jour$	$g/m^2/jour$	$g/m^2/jour$	$g/m^2/jour$
Bulengo 1	—	381.58	401000.00	59.41	1291374.87	1651120.53
Bulengo 2	—	6955.34	390000.00	107595.25	—	82382.14
Bulengo 3	—	14930.80	65600.00	1108024.37	518559.27	2326174.96
Kabaga	—	187369.14	105000.00	973361.25	19880.68	1102035.05
Eliab	—	2925107.05	383000.00	2266281.75	205955.36	210205.84
Katwa 1	1168883.60	1071508.83	1200000.00	260438.86	796193.27	526480.63
Katwa 2	—	957711.73	1170000.00	1006978.73	22005.92	1216025.35
Rotary	317434.01	6686786.98	841000.00	942641.83	1672759.37	1974543.86
Bikumbo	381384.50	20808.06	583000.00	69224.96	1122321.46	1370588.47

Pour ce qui est de la fracture principale située au sud du volcan Nyiragongo, la plus grande valeur obtenue pour la concentration en CO_2 est de 11,7% mesurée en date du 31 juillet 2024 au site de Munigi 2, tandis que la plus faible valeur était de 0,2% et mesurée au site Bugarura 2 en date du le 22/06/2024. (Annexe 2).

Quant au flux de CO_2, il a été enregistré dans les Mazuku une valeur élevée de 6.686.786,98 g/m^2/jour a été trouvée le 09/07/2024 au site Bulengo 1 et la valeur minimale de 59,41 g/m^2/jour enregistrée le 24/07/2024 (Tableau 3).

Au niveau de la fracture principale sud du volcan Nyiragongo, sur les dix sites de mesure de flux de CO_2, c'est le site de Bugarura 2 qui a présenté les valeurs faibles avec un maximum de 36 g/m^2/jour enregistrée le 13/03/2024 et un minimum de 9 g/m^2/jour enregistrée le 22/08/2024 pour une moyenne de 18 g/m^2/jour tandis que le site de Munigi 5 a présenté des valeurs élevées avec un maximum de 98592 g/m^2/jour enregistrée le 23/03/2024 et un minimum de 2923 g/m^2/jour enregistrée en date du 31/07/2024 avec une moyenne de 48990 g/m^2/jour (Tableau 4).

Tableau 4: Variation du flux en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

Sites	13 mars 2024	23 mars 2024	8 avril 2024	22 avril 2024	22 juin 2024	23 juin 2024	24 juin 2024	10 juillet 2024	23 juillet 2024	31 juillet 2024	22 août 2024	Moyennes
	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour	g/m^2/jour
Bugarura 1	2905.79	–	–	–	1163.47	918.10	1252.73	966.41	377.71	867.49	728.96	1148.00
Bugarura 2	36.03	–	–	–	–	24.13	10.78	10.46	19.36	18.16	9.34	18.00
Bugarura 3	360.90	–	–	–	238.41	333.28	259.28	240.15	301.78	310.87	347.77	299.00
Bugarura 4	4028.30	–	–	–	2672.01	2961.82	1666.58	1858.04	1498.10	1047.36	657.67	2049.00
Munigi 1	2333.90	1384.31	4179.98	4577.00	1748.69	969.50	1291.37	782.28	662.88	552.56	290.77	1707.00
Munigi 2	3597.46	2134.90	1664.46	2279.81	14.17	1021.08	1210.04	677.76	997.70	629.27	885.45	1374.00
Munigi 3	4768.27	16688.95	24724.48	14977.17	2822.71	1258.34	1262.39	17059.90	1560.12	754.46	592.94	7861.00
Munigi 4	1295.63	1961.02	1752.93	22063.89	2480.74	2202.52	2275.94	857.44	275.90	573.62	438.57	3289.00
Munigi 5	77223.60	98591.95	77785.53	32091.17	18916.59	15450.52	30526.22	91829.81	86458.75	2923.18	7088.65	48990.00
Munigi 6	10885.11	9242.87	23488.26	39007.87	1069.77	988.62	2243.10	27492.91	2022.84	1279.20	1351.27	10825.00

III.1.2. Flux de H_2S dans les Mazuku et sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

Le flux de H_2S a été faible dans la plupart de nos sites de mesure, il a été obtenu des valeurs maximales de 0,237 g/m^2/jour équivalent de 0.016 ppm/s (annexe 4) dans les Mazuku sur le site Eliab et de 0,620 g/m^2/jour équivalent de 0.420 ppm/s (annexe 4) sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo sur le site de Munigi 5 tandis qu'une valeur minimale de moins de 0,001 g/m^2/jour a été enregistrée dans plus d'un site dans les Mazuku tout comme sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo (Tableaux 5 et 6)

Tableau 5: Variation du flux en H_2S dans les Mazuku situés à l'ouest de la ville de Goma et au nord du lac Kivu

Sites	6 juillet 2024	9 juillet 2024	12 juillet 2024	24 juillet 2024	1 août 2024	1 août 2024
	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour
Bulengo 1	—	0.019	0.079	0.006	0.095	0.001
Bulengo 2	—	0.013	0.082	0.018	0.015	0.003
Bulengo 3	—	0.020	0.038	0.131	0.078	0.001
Kabaga	—	0.020	0.069	0.071	0.031	0.000
Eliab	—	0.146	0.040	0.200	0.237	0.003
Katwa 1	0.163	0.059	0.090	0.078	0.081	0.001
Katwa 2	—	0.039	0.070	0.074	0.108	0.000
Rotary	0.168	0.064	0.113	0.035	0.189	0.003
Bikumbo	0.031	0.031	0.084	0.078	0.013	0.001

Tableau 6: Variation du flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

Sites	13 mars 2024	23 mars 2024	8 avril 2024	22 avril 2024	22 juin 2024	23 juin 2024	24 juin 2024	10 juillet 2024	23 juillet 2024	31 juillet 2024	22 août 2024	Moyennes
	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour	g/m²/jour
Bugarura 1	0.11	–	–	–	0.17	0.11	0.04	0.05	0.21	0.03	0.23	0.12
Bugarura 2	0.02	–	–	–	–	0.21	0.09	0.09	0.20	0.22	0.13	0.14
Bugarura 3	0.16	–	–	–	0.14	0.06	0.02	0.08	0.24	0.06	0.05	0.10
Bugarura 4	0.15	–	–	–	0.12	0.13	0.08	0.09	0.26	0.06	0.06	0.12
Munigi 1	0.12	0.06	0.21	0.00	0.26	0.12	0.04	0.11	0.36	0.07	0.10	0.13
Munigi 2	0.28	0.11	0.23	0.23	0.24	0.07	0.12	0.03	0.22	0.04	0.03	0.14
Munigi 3	0.22	0.08	0.18	0.21	0.04	0.04	0.07	0.02	0.04	0.03	0.06	0.09
Munigi 4	0.18	0.15	0.21	0.01	0.24	0.06	0.05	0.06	0.11	0.09	0.09	0.12
Munigi 5	0.47	0.27	0.52	0.02	0.26	0.07	0.02	0.36	0.54	0.62	0.09	0.29
Munigi 6	0.10	0.00	0.15	0.16	0.13	0.10	0.04	0.06	0.13	0.16	0.04	0.10

III.1.3. Le flux de CO_2 et H_2S émis des eaux de surface du lac Kivu

Le flux de CO_2 a varié d'un site à l'autre sur le lac Kivu, une valeur élevée de 61,682 g/m²/jour a été obtenue sur le site LK6 (Lac Kivu 6) et la valeur faible de 0,213 g/m²/jour sur le site LK11. Toutefois on a constaté que d'autres valeurs plus ou moins élevées de flux en CO_2 (47,833 ; 34,230 ; 18,239 et 38,423 g/m²/jour respectivement pour les sites LK15, LK16, LK17 et LK18) sont concentrées dans la baie de Kabuno, un sous-bassin du lac (Figures 19A et 25). Quant aux flux de H_2S, une valeur élevée de 0,138 g/m²/jour a été mesurée sur le site LK1 et une valeur faible de 0,006 g/m²/jour a été enregistrée sur le site LK15.

III.1.4. Concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air au-dessus du lac Kivu

La concentration en CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air sur le lac Kivu a varié d'une journée de mesure à l'autre. Après les descentes sur terrain sur le lac Kivu dans la partie grand bassin pour la mesure des gaz, nous avons considéré dans le traitement de données, les mesures effectuées par le MultiGAS pour les deux journées (02 et 05/08/2024) et la campagne du 28 au 31/08/2024 en raison de défaut de données fiables pour les autres journées de mesures. Après avoir filtré les données de ces journées et en ne considérant que celles jugées émanant de l'air propre, les valeurs maximales, moyennes et minimales de ces journées de mesures sont présentées dans le Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7: Valeurs minimales, moyennes et maximales de concentration en CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air pour chaque date de mesure.

	CO_2 (ppm)			SO_2 (ppm)			H_2S (ppm)		
Date	Min	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max
2 août 2024	410.96	422.87	458.46	0.30	0.49	0.64	0.001	0.26	0.85
5 août 2024	432.19	446.95	456.44	0.39	0.57	0.67	0	0.22	0.61
29-31 août 2024	426.12	447.20	459.47	0.31	0.53	0.66	0	0.23	0.75

Du côté de la baie de Kabuno où une plateforme avait été installée pour l'essai de dégazage, nous n'avons pas procédé au filtrage de données et une valeur minimale de CO_2 de 396.82 ppm, moyenne de 581 ppm pour une valeur maximale de 63996.68 ppm ont été obtenues ; pour le SO_2 une valeur minimale et moyenne de 0 ppm et une valeur maximale de 0.086 ppm avaient été obtenues et pour le H_2S une valeur minimale et moyenne de 0 ppm pour une maximale de 9.662 ppm avaient été obtenues dans l'espace.

III.1.5. Les paramètres physicochimiques du lac Kivu

Durant les travaux de terrain sur le lac Kivu, 8 paramètres physicochimiques ont été mesurées dont la profondeur, la température, la conductivité, le pH, la turbidité, l'oxygène dissous (en mg/l et saturation en %) ainsi que la chlorophylle A.

Pendant que la profondeur maximale au sein du grand bassin du lac Kivu est estimée à 485 m et 148 m dans la baie de Kabuno, nous avons mesuré les paramètres physicochimiques sur les sites où les profondeurs maximales ont été de 459 m dans le grand bassin et 133 m dans la baie de

Kabuno. Le tableau ci-dessous présente les valeurs minimales, moyennes et maximales des résultats de mesures de ces paramètres physicochimiques :

Tableau 8: Paramètres physicochimiques du lac Kivu

	Profondeur (m)			Température (°C)			Conductivité (µS/cm)			Saturation (%)		
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
Grand Bassin	0	274	459	23.27	25.03	26.18	1.07	4.21	5.83	0.04	6	79.34
Kabuno	0	67	133	22.66	24.31	25.43	1.47	6.37	8.18	0.2	5.14	85.22
	pH			Turbidité (FTU)			Oxygène dissous (mg/L)			Chlorophylle A		
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
Grand Bassin	6.02	6.57	8.88	0	9.70	363.74	0.003	0.498	6.511	0	1.13	67.54
Kabuno	6.7	6.84	8.56	0	106.63	143.75	0.016	0.426	7.045	0	2.24	12.67

III. 2. Discussion des résultats

III.2.1. Analyse quantitative et qualitative des gaz par la méthode de la chambre d'accumulation

III.2.1.1. Mesures temporelles des flux de CO_2 et H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

Les valeurs du flux de CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo ont été faibles comparées à celles obtenues dans les Mazuku (Tableau 3, Figure 23), toutefois ces valeurs ne sont pas aussi faibles qu'on peut le croire comparées aux résultats obtenus sur d'autres volcans à travers le monde. En effet, sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo, les données de la présente étude montrent une valeur moyenne de flux de CO_2 d'environ 8.600 g/m^2/jour et un maximum de 98.591,95 g/m^2/jour (Tableau 4) ce qui montre un grand dégazage du volcan Nyiragongo comparé aux îles volcaniques en Italie où le flux en CO_2 varie entre un minimum de 0,2 g/m^2/jour et maximum de 2900 g/m^2/jour par point de mesure (Chiodini et al., 1998). La même observation se fait pour le volcan El Hierro (îles canaries) où un maximum de 53,1 g/m^2/jour du flux en CO_2 avait été obtenu avec une moyenne de 12.5 g/m^2/jour (Padrón et al., 2008), tout comme au volcan Furnas (iles Sâo Miguel, Azores Archipel) où un maximum de 2.486 g/m^2/jour était mesuré avec une moyenne de 267 g/m^2/jour (Viveiros et al., 2014), ceci confirme le fait que le volcan Nyiragongo est un des grands contributeurs mondial du CO_2 volcanique.

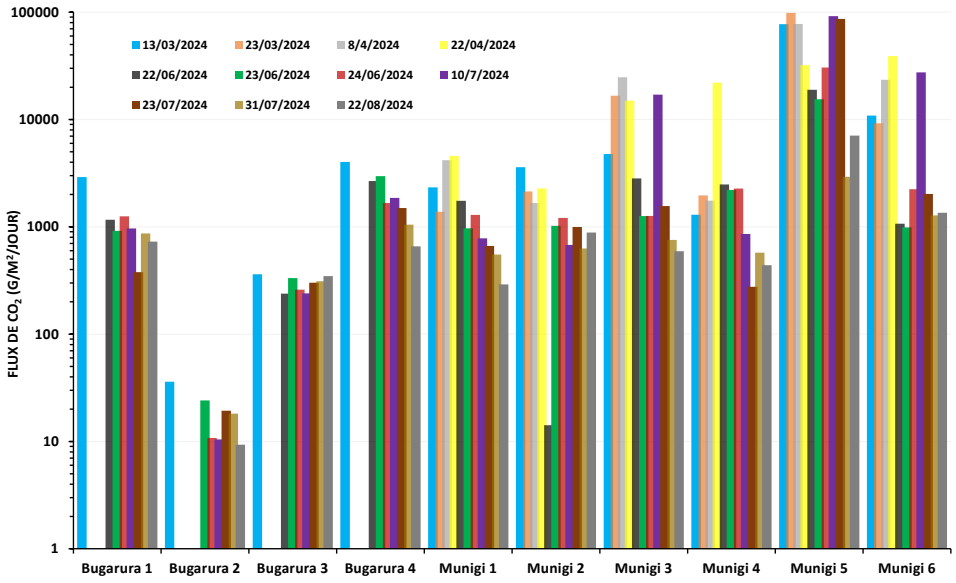


Figure 21. Variation du flux en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

Un dégazage particulièrement élevé a été observé sur le site Munigi 5 où nous avons obtenu une valeur minimale du flux de CO_2 de 2.923 g/m^2/jour, une moyenne de 48.990 g/m^2/jour et un maximum de 98.592 g/m^2/jour. Ces valeurs extrêmement élevées se justifient par la perméabilité du sol observée au niveau de ce site. En effet, à cet endroit de mesure, on observe que la fracture est une roche suffisamment ouverte et laissant le gaz aisément arrivé en surface ce qui conduit à des flux largement élevés.

III.2.1.2. La saisonnalité sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

Pour savoir si la variation de saisons, c'est-à-dire les conditions météorologiques, aurait un impact sur le flux en gaz sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo nous avons eu à grouper les données par saison, les mesures des mois de Mars et Avril ont constitué la saison de pluie et celles de Juin à Août la saison sèche. Les moyennes des valeurs de mesures sur ces sites par saison sont présentées dans les Tableaux 9 et 10. On peut noter que la région de Goma est dominée par deux saisons dont la saison de pluie qui court de mi-Février à mi-Juin et Septembre à Décembre et saison sèche qui court de mi-Juin à fin Août avec une mi-saison sèche qui court de Janvier à mi-Février (Kasereka et al., 2021).

Tableau 9: Moyennes des valeurs du flux en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo en fonction de saison

Sites	Saison de pluie	Saison sèche
	g/m^2/jour	g/m^2/jour
Bugarura 1	2905.79	896.41
Bugarura 2	36.03	15.37
Bugarura 3	360.90	290.22
Bugarura 4	4028.30	1765.94
Munigi 1	3118.80	899.72
Munigi 2	2419.16	776.50
Munigi 3	15289.72	3615.84
Munigi 4	6768.36	1300.68
Munigi 5	71423.06	36170.53
Munigi 6	20656.03	5206.82

Tableau 10: Moyennes des valeurs de flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo en fonction de saison

Sites	Saison de pluie	Saison sèche
	g/m^2/jour	g/m^2/jour
Bugarura 1	0.11	0.12
Bugarura 2	0.02	0.13
Bugarura 3	0.16	0.09
Bugarura 4	0.15	0.12
Munigi 1	0.10	0.15
Munigi 2	0.21	0.11
Munigi 3	0.17	0.04
Munigi 4	0.14	0.10
Munigi 5	0.32	0.28
Munigi 6	0.10	0.09

Après les calculs statistiques par test t de student, la moyenne des moyennes du flux en CO_2 pendant la saison de pluie a donné la valeur de 12.700,62 g/m^2/jour et de 5093.802 g/m^2/jour pour la saison sèche. La valeur p a été p= 0,336. Quant au flux en H_2S la moyenne des moyennes pendant la saison de pluie est de 0.148 g/m^2/jour et de 0.124 g/m^2/jour pour la saison sèche avec un p=0.463.

L'analyse statistique sur la variation du flux en CO_2 et H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo a été utilisée en appliquant le logiciel Stata 15.

Les valeurs de p= 0.336 pour le CO_2 et de p= 0.463 pour le H_2S obtenues par le t-test qui sont largement supérieures à 0.05 montrent qu'il n'y a pas de différence statistique significative entre les valeurs moyennes de flux en CO_2 et H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo entre les deux saisons.

Ayant remarqué que nos valeurs n'étaient pas normalement distribuées selon la loi normale de gauss, le test de normalité ayant été vérifié par le test de Skewness-Kurtosis, un test non paramétrique a été utilisé (test U de Mann-Whitney) avec le logiciel Past. Celui-ci a confirmé le résultat obtenu par le t-test en donnant la valeur de p= 0.162 pour le CO_2 et p= 0.307 pour le H_2S qui restent aussi supérieures à 0.05. Les résultats de ces tests montrent que la variation de saison n'a pas eu d'impact sur le flux en ces gaz pendant la période étudiée, nous conduisant à dire que les quantités de CO_2 émises dépendent uniquement de la source profonde, et donc magmatique, qui produit le gaz qui diffuse vers la surface.

III.2.1.2. Variations spatiales des concentrations et des flux de CO_2 et H_2S dans les Mazuku situés à l'ouest de la ville de Goma

La quasi-totalité des valeurs de mesure de concentration de CO_2 effectuées dans les sites de Mazuku situées à l'Ouest de la ville de Goma dépassent le 15% qui est le seuil létal associé au CO_2 (Figure 22). Les valeurs de flux en CO_2 dans ces Mazuku sont également très élevées (Tableau 3, Figure 23). En comparant ces valeurs de flux à celles obtenues sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo (Tableau 4, Figure 9), on remarque que les valeurs de flux en CO_2 dans les Mazuku sont largement supérieures à celles obtenues sur la fracture (6.686.786 g/m^2/jour la valeur maximale dans les Mazuku contre 98.592 g/m^2/jour sur la fracture).

La majorité de ces sites de mesures sont autour de zones occupées par les déplacés des conflits armés, une population qui ignore par ailleurs la dangerosité de ces lieux, et se trouve donc exposer beaucoup plus au risque d'asphyxie par ce gaz mortel.

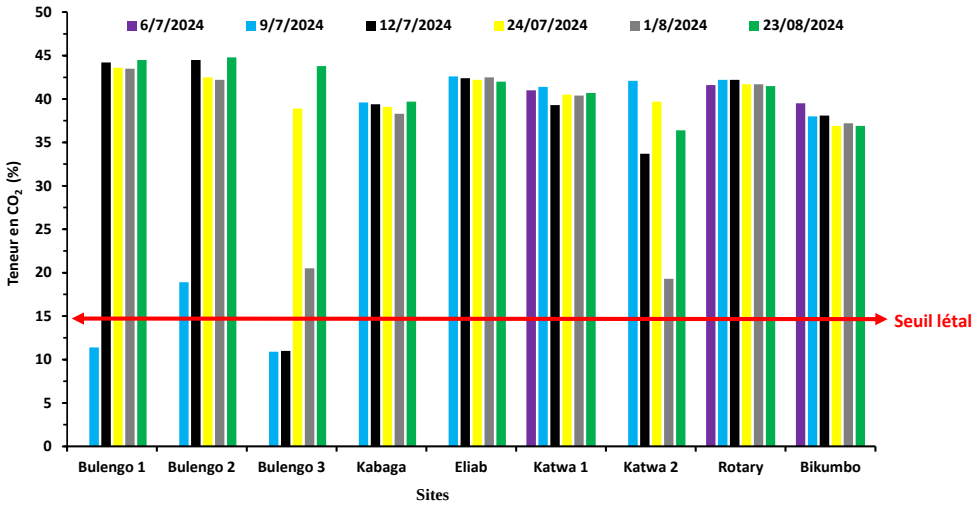


Figure 22. Variation de concentration en CO_2 dans les Mazuku

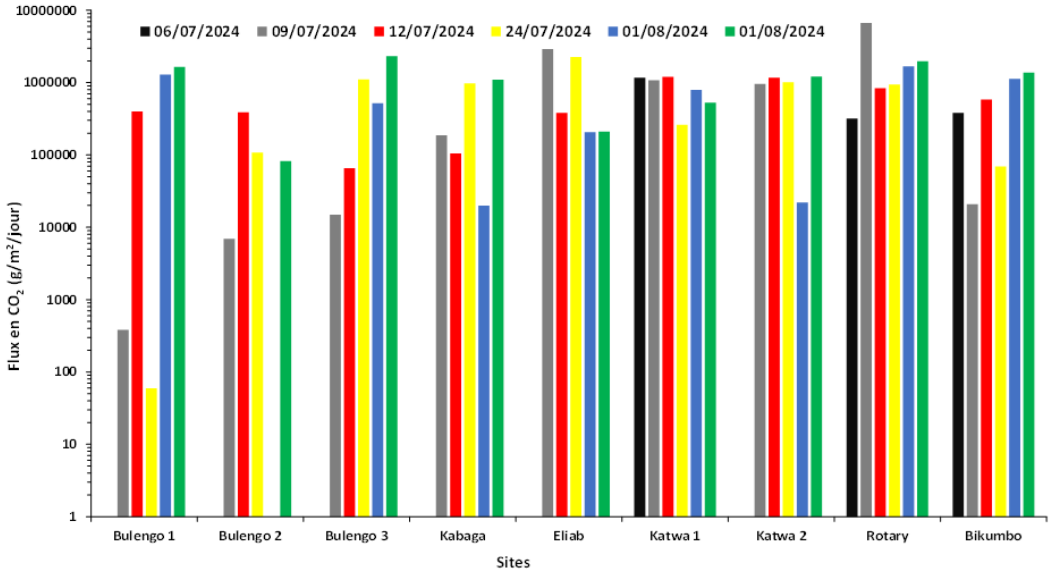


Figure 23. Variation de flux en CO_2 dans les Mazuku

Le flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo tout comme dans les Mazuku a été faible comme on peut le constater sur les Tableaux 5 et 6, Figures 24 et 2 et Annexe 4, ceci se justifie par le fait que le volcan Nyiragongo figure parmi les volcans chauds ou aux fumerolles à haute température et donc riche en SO_2 et ayant un faible apport en H_2S dans la composition de soufre total (Fischer & Chiodini, 2015; Aiuppa & Gaillard 2016; Burgi et al., 2014).

Les valeurs maximales de flux en H_2S de 0.237 g/m^2/jour équivalant à 0.016 ppm/s obtenue dans les Mazuku et de 0.620 g/m^2/jour équivalant à 0.042 ppm/s obtenue sur la fracture principale sud

du volcan Nyiragongo (annexe 4) sont toutes inférieures à 10 ppm qui est la valeur d'exposition maximale recommandée en H_2S à court terme (tableau 1).

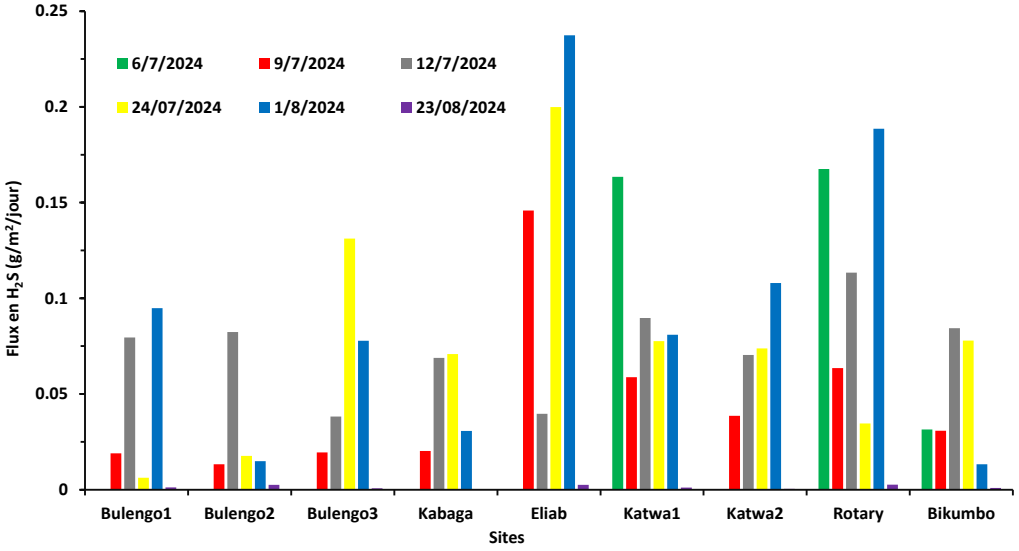


Figure 24. Variation du flux en H_2S dans les Mazuku

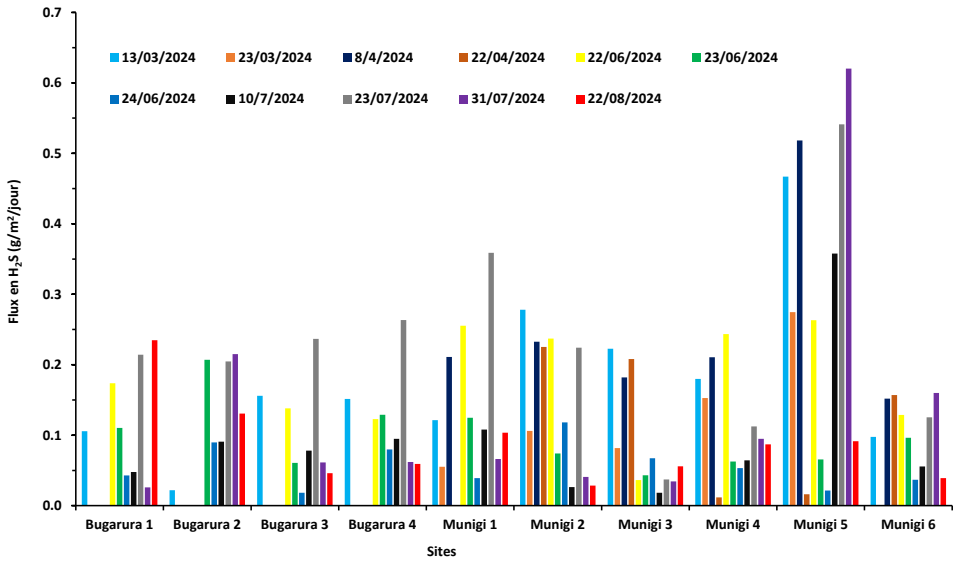


Figure 25. Variation du flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

III.2.2. Mesure des flux des CO_2 et H_2S au lac Kivu

Les valeurs du flux en CO_2 et H_2S obtenues sur chacun des sites sont des premières mesures du flux en gaz par un fluxmètre dans ce lac, la valeur élevée de flux en CO_2 obtenue sur le site LK6, est une valeur isolée et que nous ne pensons pas d'emblée associée à la quantité du CO_2 dissous dans ce lac car les autres mesures sur les sites proches de ce site LK6 ne donnent pas des valeurs similaires. Toutefois, les valeurs plus ou moins élevées obtenues sur les sites LK15, LK16, LK17 et LK18 qui se retrouvent dans une même partie de ce lac (la baie de Kabuno) pourraient se justifier par le fait que les gaz en grande quantité dissous dans ce lac (CO_2 et CH_4) sont proche de la surface du lac (environ 11 mètres de profondeur) contre 70 mètres de profondeur dans le grand bassin, mais aussi l'existence de la plateforme d'essai de dégazage qui fait monter le gaz dans ce lac, ces deux facteurs pourraient avoir de l'impact sur les valeur de flux en CO_2 mesurées.(Fig. 19A et 25 et annexe 3). Les valeurs de flux en ce deux gaz mesurés ultérieurement sur les mêmes sites par le même équipement nous permettront de tirer une bonne conclusion.

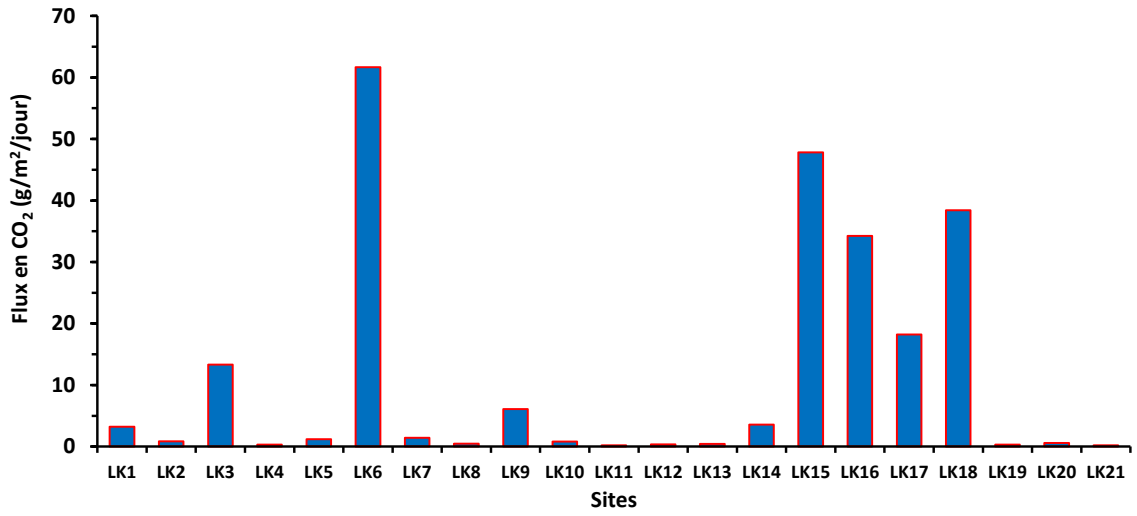


Figure 26. Variation du flux en CO_2 sur le lac Kivu

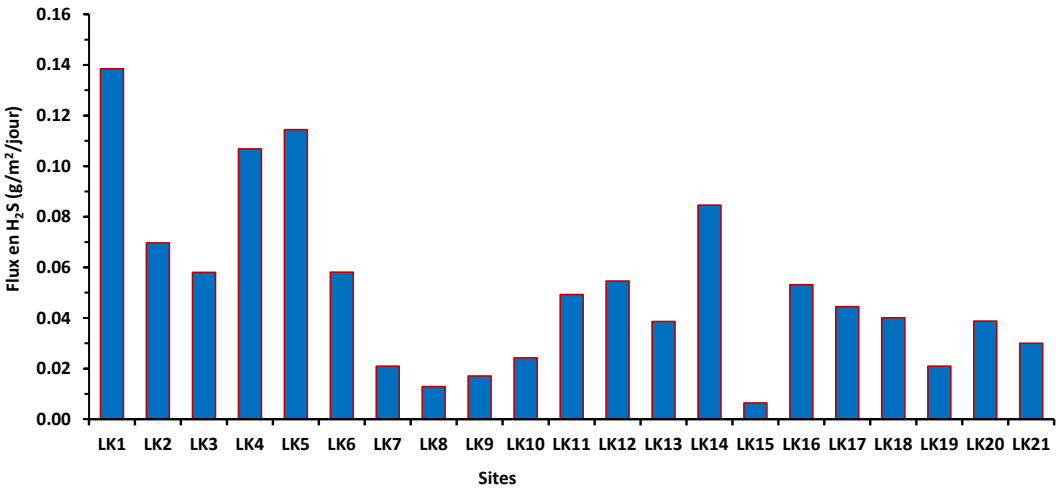


Figure 27. Variation du flux en H_2S sur le lac Kivu

III.2.3 Les paramètres physicochimiques du lac Kivu

Les paramètres physicochimiques des eaux du lac Kivu ont varié en fonction de la profondeur, on a constaté par exemple, que pour la température et le pH en général plus la profondeur augmente, ces valeurs diminuent. C'est ainsi que nous avons pour le pH à 0 mètre dans le grand bassin 8.81 et 6.02 à 459 mètres valeurs qui sont comparables à celles obtenues par Tassi en 2004, pH= 8.76 à 0 mètre et 6.02 à 478 mètres dans la même partie du lac (Tassi et al., 2009).

III.2.4. Mesures spatiales des gaz sur le lac Kivu par le MultiGAS

Les concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S ont été mesurées par le MultiGAS dans l'air à environs 3 mètres de la surface des eaux du lac Kivu, dans son grand bassin et dans la baie de Kabuno. Les données obtenues de ces mesures ont été utilisées pour générer les figures 28A, B et C pour les mesures faites dans le grand bassin, et 28D pour les mesures faites dans la baie de Kabuno. Des figures 28A, B et C, on remarque que les concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S ont des valeurs généralement caractéristiques de l'air des zones non pollués (350 à 450 ppm pour le CO_2, 0,35 à 0,6 ppm pour le SO_2 et < 5 ppm pour le H_2S (Berner and Berner, 2012). Par ailleurs, les petites variations dans les concentrations de CO_2, H_2S et SO_2 sont dues au fait que les mesures étaient effectuées sur un bateau mobile, ces petites variations sont donc dues à une combinaison de la variation dans l'espace et dans le temps du changement du site de mesure et de la composition de l'air qu'on y trouve.

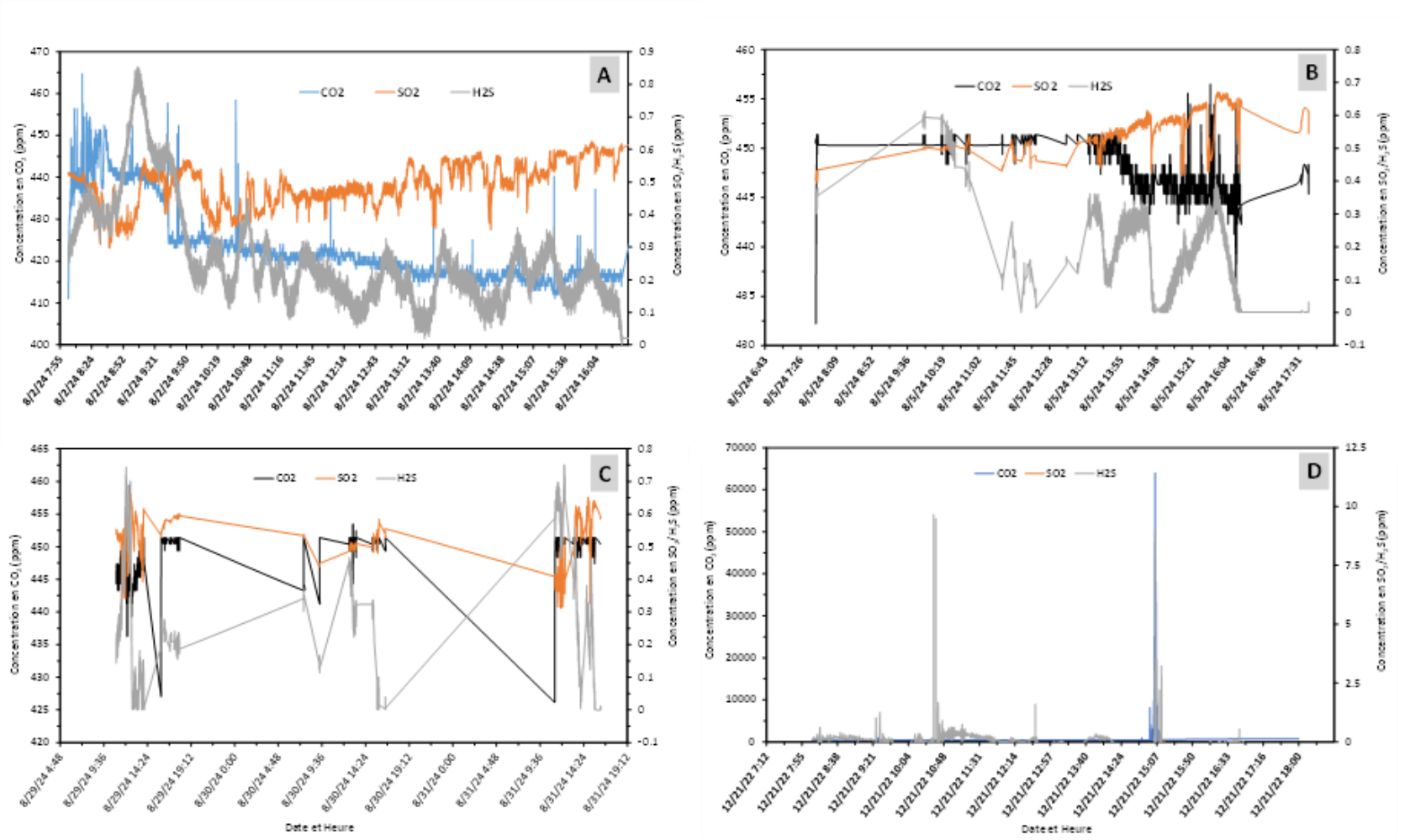


Figure 28. Concentration en CO_2, SO_2 et H_2S dans l'air du grand bassin du lac Kivu à différentes dates (A), (B) et (C) et dans la baie de Kabuno (D)

Dans la baie de Kabuno par contre dont les données sont représentées par la figure 28D, nous observons un pic dans la valeur du CO_2 avec une valeur maximale de 63.996,68 ppm, de même que pour le H_2S qui affiche un pic de de 9 ppm, alors que la concentration de SO_2 reste autour de 0 ppm. En confrontant les coordonnées géographiques, nous remarquons que ces valeurs exceptionnellement élevées ont été obtenues tout près de la plateforme de dégazage dans la baie de Kabuno, et qui pompe des eaux profondes riches en gaz et les dégaze une fois en surface en éjectant les gaz dans l'atmosphère. Ces gaz éjectés dans l'atmosphère ont alors été mesurés par le MultiGAS, la valeur nulle de concentration de SO_2 est due au fait que ce gaz n'est pas présent dans les gaz dissous dans la baie de Kabuno alors que le CO_2 est le gaz dominant suivi du H_2S.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La mesure de flux et/ou la concentration en gaz sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo, dans les Mazuku situés à l'ouest de la ville de Goma, sur les eaux et dans l'air du lac Kivu ont été effectuées par l'utilisation des nouvelles techniques d'analyse des gaz. Ainsi, un fluxmètre portable de la marque West Systems a été utilisé pour la mesure des flux en CO_2 et H_2S alors qu'un MultiGAS mobile a servi à mesurer les concentrations de CO_2, SO_2 et H_2S. Aussi, un gazomètre GA 5000 a été un équipement d'appui dans la détermination de la concentration de CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo et dans les Mazuku, alors qu'un CTD de marque Sea & Sun Technology a été utilisé pour déterminer les paramètres physicochimiques des eaux du lac Kivu. Ces appareils sont tous de nouvelle génération et font des analyses in situ : le fluxmètre est doté d'un système d'analyse de CO_2 par un détecteur spectrophotométrique basé sur la technologie infrarouge non dispersive et un détecteur électrochimique pour l'analyse de H_2S, utilisant la méthode de la chambre d'accumulation, le MultiGAS inclus un spectromètre IR analysant la concentration de CO_2 et un détecteur électrochimique analysant le H_2S et SO_2 dans l'air. Ainsi, ces appareils ont permis l'analyse des gaz ce qui a permis d'obtenir des résultats très fiables qui révèlent ce qui suit :

- Les valeurs des flux de CO_2 ont été très élevées dans les Mazuku et sont jusqu'à 100 fois les valeurs des flux de CO_2 obtenues sur la fracture principale située au sud du volcan Nyiragongo. Toutefois ces valeurs de flux en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo étaient aussi élevées comparées aux valeurs des flux obtenues sur d'autres volcans à travers le monde, observations faites quand nous comparons nos résultats aux données de littérature. Le flux en H_2S sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo tout comme dans les Mazuku ont été faible, très faibles même lorsqu'on les compare aux flux de CO_2 sur les mêmes sites. Ceci est dû au fait que les émissions de CO_2 par un volcan sont largement supérieures aux émissions de H_2S. Les résultats statistiques avec un p-value > 0.05 ont montré que la variation des saisons n'a pas eu d'impact sur les flux en gaz sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo pendant la période d'étude.

- Des mesures des flux en CO_2 et H_2S ont été effectuées sur les eaux du lac Kivu constituant une première base des données pour ce type de mesure au lac Kivu. Il a été observé que les

flux en CO_2 sont élevés dans le sous-bassin de la baie de Kabuno que dans le grand bassin, cette hausse en flux en CO_2 dans cette partie du lac est attribuée entre autres au dégazage en cours dans cette baie, ainsi qu'à la proximité de la concentration en gaz dissous à la surface dans cette partie du lac que dans le grand bassin.

- Les concentrations en CO_2, SO_2 et H_2S mesurées dans l'air au-dessus des eaux de surface du lac Kivu montrent des valeurs qui témoignent d'une absence de pollution dans la partie grand bassin, mais dans la partie baie de Kabuno nous avons obtenu des pics dont les concentrations élevées de CO_2 et H_2S sont associés au dégazage en cours dans cette partie du lac qui jette des gaz dans l'atmosphère, et qui s'y dilue pour le moment.

Les résultats fournis par ces nouvelles méthodes d'analyses montrent que l'OVG peut compter sur cette nouvelle technologie pour améliorer son réseau de surveillance du volcan Nyiragongo et le lac Kivu, surtout que les équipements utilisés sont à des prix abordables par rapport aux prix des équipements traditionnels d'un laboratoire de chimie des gaz. Bien plus, ces équipements sont faciles à transporter et à manipuler, font des mesures in situ donc à temps réel et produisent des résultats très fiables. Il est dès lors souhaitable que l'OVG installe la version « fixe » de ces équipements qui mesurent en continue sur les sites de surveillance du volcan Nyiragongo et au lac Kivu pour suivre à temps réel l'activité de ce volcan et la stabilité du lac Kivu, tout en envoyant les données à temps réel au bureau de l'OVG à travers un système de télémétrie à l'aide d'un Modem/internet ou par radio.

La grande concentration et le flux élevé de CO_2 dans les Mazuku à proximité des agglomérations, et donc de la population, expose cette dernière à un grand risque d'asphyxie par ces gaz présents à des concentrations au-delà du seuil de mortalité. Le gouvernement congolais devrait prendre des mesures idoines pour mettre à l'abri cette population en danger.

Notre étude s'est beaucoup plus intéressée à la capacité de ces nouvelles techniques/méthodes de faire le suivi des mesures ponctuelles des gaz pour montrer que ces nouvelles méthodes sont appropriées dans la surveillance du volcan Nyiragongo et le lac Kivu, et donc peuvent améliorer la surveillance effectuée par l'OVG. Nous recommandons qu'une autre étude se focalise sur le mesurage à temps réel des gaz avec télémétrie des données, et en automatisant le traitement des données.

REFERENCES

Aiuppa et al., 2005. "Emission of Bromine and Iodine from Mount Etna Volcano." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6 (8): 2005GC000965. https://doi.org/10.1029/2005GC000965.

Aiuppa, 2015a. "Volcanic-Gas Monitoring." In *Volcanism and Global Environmental Change*, edited by Anja Schmidt, Kirsten E. Fristad, and Linda T. Elkins-Tanton, 1st ed., 81–96. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415683.009.

Aiuppa et al., 2009. "The 2007 Eruption of Stromboli Volcano: Insights from Real-Time Measurement of the Volcanic Gas Plume CO2/SO2 Ratio." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 182 (3–4): 221–30. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.09.013.

Aiuppa et al., 2015b. "New Ground-Based Lidar Enables Volcanic CO_2 Flux Measurements." *Scientific Reports* 5 (1): 13614. https://doi.org/10.1038/srep13614.

Aiuppa & Gaillard, 2016. "Volcanic Gases." In *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth*, edited by William M. White, 1–4. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39193-9_239-1.

Aiuppa et al., 2007. "Forecasting Etna Eruptions by Real-Time Observation of Volcanic Gas Composition." *Geology* 35 (12): 1115. https://doi.org/10.1130/G24149A.1.

Allard, Burton & Muré, 2005. "Spectroscopic Evidence for a Lava Fountain Driven by Previously Accumulated Magmatic Gas." *Nature* 433 (7024): 407–10. https://doi.org/10.1038/nature03246.

Amaral & Rodrigues, 2011. "Volcanogenic Contaminants: Chronic Exposure." In *Encyclopedia of Environmental Health*, 681–89. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00391-3.

Andersen, Marlina & Muriel, 2014. "Extreme Peralkalinity in Delhayelite- and Andremeyerite-Bearing Nephelinite from Nyiragongo Volcano, East African Rift." *Lithos* 206–207 (October):164–78. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.025.

Andersen, Marlina & Muriel, 2012. "Petrology of Combeite- and Götzenite-Bearing Nephelinite at Nyiragongo, Virunga Volcanic Province in the East African Rift." *Lithos* 152 (November):105–21. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.018.

Arellano et al., 2017. "Long-Term Monitoring of SO_2 Quiescent Degassing from Nyiragongo's Lava Lake." *Journal of African Earth Sciences* 134 (October):866–73. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.07.002.

Arellano, 2013. "Studies of Volcanic Plumes with Spectroscopic Remote Sensing Techniques - DOAS and FTIR Observations at Karymsky, Nyiragongo, Popocatépetl and Tungurahua." Phd thesis, Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology.

Balagizi et al., 2015. "River Geochemistry, Chemical Weathering, and Atmospheric C O_2 Consumption Rates in the V Irunga V Olcanic P Rovince (E Ast A Frica)." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 16 (8): 2637–60. https://doi.org/10.1002/2015GC005999.

Balagizi et al., 2017. "Rain-Plume Interactions at Nyiragongo and Nyamulagira Volcanoes and Associated Rainwater Hazards, East Africa." *Applied Geochemistry* 81 (June):76–89. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.018.

Balagizi et al., 2018. "Natural Hazards in Goma and the Surrounding Villages, East African Rift System." *Natural Hazards* 93 (1): 31–66. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3288-x.

Balagizi et al., 2016. "Soil Temperature and CO2 Degassing, SO2 Fluxes and Field Observations before and after the February 29, 2016 New Vent inside Nyiragongo Crater." *Bulletin of Volcanology* 78 (September). https://doi.org/10.1007/s00445-016-1055-y.

Baxter & Ancia, 2002. "Human Health and Vulnerability in the Nyiragongo Volcano Crisis DR Congo Jun 2002 - Democratic Republic of the Congo | ReliefWeb." June 21, 2002. https://reliefweb.int/report/democratic-republic-congo/human-health-and-vulnerability-nyiragongo-volcano-crisis-dr-congo.

Beaubien, Ciotoli & Lombardi, 2003. "Carbon Dioxide and Radon Gas Hazard in the Alban Hills Area (Central Italy)." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123 (1–2): 63–80. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00028-3.

Berner & Berner, 2012. *Global Environment: Water, Air, and Geochemical Cycles*. 2nd ed. Princeton, N.J: Princeton University Press.

Bobrowski, Hönninger, Galle & Platt, 2003. "Detection of Bromine Monoxide in a Volcanic Plume." *Nature* 423 (6937): 273–76. https://doi.org/10.1038/nature01625.

Bobrowski et al., 2015. "Gas Emission Strength and Evolution of the Molar Ratio of BrO/SO_2 in the Plume of Nyiragongo in Comparison to Etna." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120 (1): 277–91. https://doi.org/10.1002/2013JD021069.

Borges et al., 2011. "Diffusive Methane Emissions to the Atmosphere from Lake Kivu (Eastern Africa)." *Journal of Geophysical Research* 116 (G3): G03032. https://doi.org/10.1029/2011JG001673.

Borges et al., 2012. "Variability of Carbon Dioxide and Methane in the Epilimnion of Lake Kivu." In *Lake Kivu*, edited by Jean-Pierre Descy, François Darchambeau, and Martin Schmid, 47–66. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4243-7_4.

Borges et al., 2014. "Carbon Cycling of Lake Kivu (East Africa): Net Autotrophy in the Epilimnion and Emission of CO2 to the Atmosphere Sustained by Geogenic Inputs." Edited by Moncho Gomez-Gesteira. *PLoS ONE* 9 (10): e109500. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109500.

Brusca et al., 2004. "The 2002–2003 Eruption of Stromboli (Italy): Evaluation of the Volcanic Activity by Means of Continuous Monitoring of Soil Temperature, CO_2 Flux, and Meteorological Parameters." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5 (12): 2004GC000732. https://doi.org/10.1029/2004GC000732.

Bureau, Keppler & Métrich, 2000. "Volcanic Degassing of Bromine and Iodine: Experimental Fluid/Melt Partitioning Data and Applications to Stratospheric Chemistry." *Earth and Planetary Science Letters* 183 (1–2): 51–60. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00258-2.

Burgi, Darrah, Tedesco & Eymold 2014. "Dynamics of the Mount Nyiragongo Lava Lake." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119 (5): 4106–22. https://doi.org/10.1002/2013JB010895.

Cantrell & Young. 2009. "Fatal Fall into a Volcanic Fumarole." *Wilderness & Environmental Medicine* 20 (1): 77–79. https://doi.org/10.1580/08-WEME-CR-199.1.

Carn, 2004. "Eruptive and passive degassing of sulphur dioxide at Nyiragongo volcano (d. r. congo): the 17 january 2002 eruption and its aftermath."

Carn, 2015. "Gas, Plume, and Thermal Monitoring." In *The Encyclopedia of Volcanoes*, 1125–49. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00065-1.

Chiodini et al., 1998. "Soil CO2 Flux Measurements in Volcanic and Geothermal Areas." *Applied Geochemistry* 13 (5): 543–52. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00076-0.

Cuoco et al., 2013a. "Impact of Volcanic Emissions on Rainwater Chemistry: The Case of Mt. Nyiragongo in the Virunga Volcanic Region (DRC)." *Journal of Geochemical Exploration* 125 (February):69–79. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.11.008.

Cuoco et al., 2013b. Impact of volcanic plume emissions on rain water chemistry during the January 2010 Nyamuragira eruptive event: Implications for essential potable water resources. J. Hazard. Mater. 244e245, 570e581. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.055.

Degens et al., 1973. "Lake Kivu: Structure, Chemistry and Biology of an East African Rift Lake." *Geologische Rundschau* 62 (1): 245–77. https://doi.org/10.1007/BF01826830.

Delle Donne et al., 2016. "Gas Mass Derived by Infrasound and UV Cameras: Implications for Mass Flow Rate." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 325 (October):169–78. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.015.

Delmelle, 2003. "Environmental Impacts of Tropospheric Volcanic Gas Plumes." In *Origins, Emissions and Impacts of Volcanic Gases*. London: The Geological Society.

Descy, Darchambeau & Schmid, 2012. "Lake Kivu Research: Conclusions and Perspectives." In *Lake Kivu*, edited by Jean-Pierre Descy, François Darchambeau, and Martin Schmid, 181–90. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4243-7_11.

Deuser, Degens, Harvey and Rubin, 1973. "Methane in Lake Kivu: New Data Bearing on Its Origin." *Science* 181 (4094): 51–54. https://doi.org/10.1126/science.181.4094.51.

Fawell et al., 2006. "Fluoride in Drinking-Water./ J. Fawell ... [et Al.]." https://iris.who.int/handle/10665/43514.

Fischer & Chiodini, 2015. "Volcanic, Magmatic and Hydrothermal Gases." In *The Encyclopedia of Volcanoes*, 779–97. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00045-6.

Gas measurement specialists, 2024. "How Does an NDIR CO_2 Sensor Work?" CO_2 Meter. September 9, 2024. https://www.co2meter.com/blogs/news/how-does-an-ndir-co2-sensor-work.

Gerlach, McGee & Elias, 2002. "Carbon Dioxide Emission Rate of Kilauea Volcano: Implications for Primary Magma and the Summit Reservoir."

Giggenbach & Sheppard, 1989. "Variations in the Temperature and Chemistry of White Island Fumarole Discharges 1972–85. N.Z" 103:119-126.

Giggenbach, 1996. "Chemical Composition of Volcanic Gases." In *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, edited by Roberto Scarpa and Robert I. Tilling, 221–56. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_7.

Giggenbach, 1980. "Geothermal Gas Equilibria." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44 (12): 2021–32. https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90200-8.

Goff et al., 1998. "Geochemical Surveillance of Magmatic Volatiles at Popocatépetl Volcano." *Geological Society of America Bulletin* 110 (6): 0695. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0695:GSOMVA>2.3.CO;2.

Boudoire, 2017. "Architecture et dynamique des systèmes magmatiques associés aux volcans basaltiques: exemple du Piton de la Fournaise. Volcanologie." Thèse, France: Université de la Réunion.

Halbwachs, 2013. "A Physico-Chemical Study of the Gulf of Kabuno Which Highlights the Risk of a Cataclysmic Gas Explosion. Forecasting Volcanic Activity, Reading and Translating the Messages of Nature for Society, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, July 20 - 24, Kagoshima, Japan."

Halbwachs, Tietze, Lorke & Mudaheranwa, 2002. "Investigations in Lake Kivu (East Central Africa) after the Nyiragongo Eruption of January 2002: Specific Study of the Impact of the Sub-Water Lava Inflow on the Lake Stability." Monogr. Solidarité. Paris.

Halmer, Schmincke & Graf, 2002. "The Annual Volcanic Gas Input into the Atmosphere, in Particular into the Stratosphere: A Global Data Set for the Past 100 Years." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 115 (3–4): 511–28. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00318-3.

Head et al., 2009. "Degassing from a Mafic Alkaline Shield Volcano: Nyamulagira, D.R. Congo." In. Portland: The Geological Society of America.

Heald, John, Naughton & Barnes, 1963. "The Chemistry of Volcanic Gases: 2. Use of Equilibrium Calculations in the Interpretation of Volcanic Gas Samples." *Journal of Geophysical Research* 68 (2): 545–57. https://doi.org/10.1029/JZ068i002p00545.

Hileman, 1998. "Fluoridation of Water. Questions about Health Risks and Benefits Remain after More than 40 Years" 66:26–42.

Honda, 1970. "Geochemical Study of Iodine in Volcanic Gases. II. Behavior of Iodine in Volcanic Gases." *GEOCHEMICAL JOURNAL* 3 (4): 201–11. https://doi.org/10.2343/geochemj.3.201.

IPCS, 2002. "Fluorides. Environmental Health Criteria 227." Geneva: World Health Organization.

Kasereka, Cuoco, Zabene and Balagizi, 2021. "Baseline for Rainwater Chemistry and Quality as Influenced by Nyiragongo Volcano Permanent Plume, East Africa." *Chemosphere* 283 (November):130859. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130859.

Kasereka et al., 2017. "Les risques liés aux Mazuku dans la région de Goma, République Démocratique du Congo (Rift Est-Africain)" *J. Wat. Env. Sci.* 1 (2): 164–74.

Kling et al., 1987. "The 1986 Lake Nyos Gas Disaster in Cameroon, West Africa." *Science* 236 (4798): 169–75. https://doi.org/10.1126/science.236.4798.169.

Komorowski et al., 2003. "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," January.

Kutterolf et al., 2013. "Combined Bromine and Chlorine Release from Large Explosive Volcanic Eruptions: A Threat to Stratospheric Ozone?" *Geology* 41 (6): 707–10. https://doi.org/10.1130/G34044.1.

Langford, 2005. "Carbon Dioxide Poisoning:" *Toxicological Reviews* 24 (4): 229–35. https://doi.org/10.2165/00139709-200524040-00003.

Lary, 2005. "Halogens and the Chemistry of the Free Troposphere." *Atmospheric Chemistry and Physics* 5 (1): 227–37. https://doi.org/10.5194/acp-5-227-2005.

Leland, Powell & Anderson, 1980. "A Fluoride Overfeed Incident at Harbor Springs, Mich." *Journal AWWA* 72 (4): 238–43. https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1980.tb04502.x.

Lockwood & Hazlett, 2010. *Volcanoes: Global Perspectives*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.

Lu, 2000. "Effect of High-Fluoride Water on Intelligence in Children." Fluoride 33(2):74–78

Mairie de Goma. 2023. "Tableau synoptique général de la population Congolaise, Étrangère non réfugiée et Étrangère réfugiée de la ville de Goma pour le quatrième trimestre 2022. Bureau de population de la Mairie de Goma, Ministère de l'intérieure, sécurité, décentralisation et affaires coutumières, Goma."

Mather, Pyle & Allen, 2004. "Volcanic Source for Fixed Nitrogen in the Early Earth's Atmosphere." *Geology* 32 (10): 905. https://doi.org/10.1130/G20679.1.

Metrich & Wallace, 2008. "Volatile Abundances in Basaltic Magmas and Their Degassing Paths Tracked by Melt Inclusions." *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 69 (1): 363–402. https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.10.

Moretti et al., 2018. "Degassing vs. Eruptive Styles at Mt. Etna Volcano (Sicily, Italy). Part I: Volatile Stocking, Gas Fluxing, and the Shift from Low-Energy to Highly Explosive Basaltic Eruptions." *Chemical Geology* 482 (April):1–17. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.09.017.

Moune & Roulleau, 2022. *Hazards and Monitoring of Volcanic Activity 3: Gravimetric, Electric and Magnetic Fluids, Products and Methods*. 1st ed. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781394173730.

Muvundja et al., 2022. "Current Status and Strategic Way Forward for Long-Term Management of Lake Kivu (East Africa)." *Journal of Great Lakes Research*, April, 102024. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2022.04.004.

Notsu et al., 2005. "Diffuse CO2 Efflux from Iwojima Volcano, Izu-Ogasawara Arc, Japan." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 139 (3–4): 147–61. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.08.003.

O'Dwyer et al., 2003. "Real-time Measurement of Volcanic H_2S and SO_2 Concentrations by UV Spectroscopy." *Geophysical Research Letters* 30 (12): 2003GL017246. https://doi.org/10.1029/2003GL017246.

Oppenheimer, Pyle & Barclay, 2003. *Volcanic Degassing*. Geological Society Special Publication, no. 213. London : Tulsa, OK: Geological Society ; AAPG Bookstore [distributor].

OVG, 2024. "Rapport Annuel Sur l'activité Des Volcans Actifs Des Virunga." Goma, RD-Congo: Observatoire Volcanologique de Goma.

Padrón et al., 2008. "Changes in the Diffuse CO_2 Emission and Relation to Seismic Activity in and around El Hierro, Canary Islands." *Pure and Applied Geophysics* 165 (1): 95–114. https://doi.org/10.1007/s00024-007-0281-9.

Pasche et al., 2009. "Physical and Biogeochemical Limits to Internal Nutrient Loading of Meromictic Lake Kivu." *Limnology and Oceanography* 54 (6): 1863–73. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.1863.

Pasche et al., 2011. "Methane Sources and Sinks in Lake Kivu." *Journal of Geophysical Research* 116 (G3): G03006. https://doi.org/10.1029/2011JG001690.

Pinto, Turco & Toon, 1989. "Self-limiting Physical and Chemical Effects in Volcanic Eruption Clouds." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 94 (D8): 11165–74. https://doi.org/10.1029/JD094iD08p11165.

Proctor, Hughes & Hathaway, 1991. *Proctor and Hughes' Chemical Hazards of the Workplace*. 3rd ed. New York: Van Nostrand Reinhold.

Rinaldi, Vandemeulebrouck, Todesco & Viveiros, 2012. "Effects of Atmospheric Conditions on Surface Diffuse Degassing." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B11): 2012JB009490. https://doi.org/10.1029/2012JB009490.

Roberts et al., 2012. "Electrochemical Sensing of Volcanic Gases." *Chemical Geology* 332–333 (November):74–91. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.08.027.

Sawyer et al., 2008. "Investigation into Magma Degassing at Nyiragongo Volcano, Democratic Republic of the Congo: MAGMA DEGASSING AT NYIRAGONGO VOLCANO." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9 (2): n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2007GC001829.

Schmid et al., 2004. "How Hazardous Is the Gas Accumulation in Lake Kivu? Arguments for a Risk Assessment in Light of the Nyiragongo Volcano Eruption of 2002" 15(1-2):115–22.

Schmid, Halbwachs, Wehrli & Wüest. 2005a. "Weak Mixing in Lake Kivu: New Insights Indicate Increasing Risk of Uncontrolled Gas Eruption." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6 (7): 2004GC000892. https://doi.org/10.1029/2004GC000892.

Schmid, Halbwachs, Wehrli & Wüest, 2005b. "Weak Mixing in Lake Kivu: New Insights Indicate Increasing Risk of Uncontrolled Gas Eruption." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6 (7): 2004GC000892. https://doi.org/10.1029/2004GC000892.

Schmid & Wüest, 2012. "Stratification, Mixing and Transport Processes in Lake Kivu." In *Lake Kivu*, edited by Jean-Pierre Descy, François Darchambeau, and Martin Schmid, 13–29. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4243-7_2.

Schoell, Tietze & Schoberth, 1988. "Origin of Methane in Lake Kivu (East-Central Africa)." *Chemical Geology* 71 (1–3): 257–65. https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90119-2.

Shinohara & Witter, 2005. "Volcanic Gases Emitted during Mild Strombolian Activity of Villarrica Volcano, Chile." *Geophysical Research Letters* 32 (20): 2005GL024131. https://doi.org/10.1029/2005GL024131.

Sigurdsson et al., 1987. "Origin of the Lethal Gas Burst from Lake Monoun, Cameroun." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 31 (1–2): 1–16. https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90002-3.

Smets, 2007. "Etude Des Mazuku Dans La Région de Goma (République Démocratique Du Congo) et Gestion Des Risques." M.Sc. Thesis, Belgique: Université de Liège.

Smets et al., 2010. "Dry Gas Vents ('Mazuku') in Goma Region (North-Kivu, Democratic Republic of Congo): Formation and Risk Assessment." *Journal of African Earth Sciences* 58 (5): 787–98. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.04.008.

Spilliaert, Metrich & Allard, 2006. "S–Cl–F Degassing Pattern of Water-Rich Alkali Basalt: Modelling and Relationship with Eruption Styles on Mount Etna Volcano." *Earth and Planetary Science Letters* 248 (3–4): 772–86. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.031.

Symonds, Gerlach & Reed, 2001. "Magmatic Gas Scrubbing: Implications for Volcano Monitoring." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 108 (1–4): 303–41. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00292-4.

Symonds, Reed & Rose, 1992. "Origin, Speciation, and Fluxes of Trace-Element Gases at Augustine Volcano, Alaska: Insights into Magma Degassing and Fumarolic Processes." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56 (2): 633–57. https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90087-Y.

Symonds, Rose, Bluth & Gerlach, 1994. "Chapter 1. Volcanic-gas studies: methods, results, and applications." In *Volatiles in Magmas*, edited by Michael R. Carroll and John R. Holloway, 1–66. De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9781501509674-007.

Symonds et al., 1987. "Volatilization, Transport and Sublimation of Metallic and Non-Metallic Elements in High Temperature Gases at Merapi Volcano, Indonesia." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51 (8): 2083–2101. https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90258-4.

Tanyileke, Kusakabe & Evans, 1996. "Chemical and Isotopic Characteristics of Fluids along the Cameroon Volcanic Line, Cameroon." *Journal of African Earth Sciences* 22 (4): 433–41. https://doi.org/10.1016/0899-5362(96)00025-5.

Tassi et al., 2009. "Water and Gas Chemistry at Lake Kivu (DRC): Geochemical Evidence of Vertical and Horizontal Heterogeneities in a Multibasin Structure." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10 (2): 2008GC002191. https://doi.org/10.1029/2008GC002191.

Tazieff, 1977. "An Exceptional Eruption: Mt. Niragongo, Jan. 10th, 1977." *Bulletin Volcanologique* 40 (3): 189–200. https://doi.org/10.1007/BF02596999.

Textor, Graf, Timmreck & Robock, 2004. "Emissions from Volcanoes." In *Emissions of Atmospheric Trace Compounds*, edited by Claire Granier, Paulo Artaxo, and Claire E. Reeves, 18:269–303. Advances in Global Change Research. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2167-1_7.

Theys et al., 2011. "Global Observations of Tropospheric BrO Columns Using GOME-2 Satellite Data." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (4): 1791–1811. https://doi.org/10.5194/acp-11-1791-2011.

Tietze et al., 1980. "The Genesis of the Methane in Lake Kivu (Central Africa)." *Geologische Rundschau* 69 (2): 452–72. https://doi.org/10.1007/BF02104549.

USPHS, 1991. "Review of Fluoride: Benefits and Risks. Report of Ad Hoc Subcommittee on Fluoride of the Committee to Coordinate Environmental Health and Related Programs." Department of Health and Human Services, USA: U.S. Public Health Service.

Vartiainen et al., 1994. "Effect of Drinking Water Fluoridation on Hearing of Patients with Otosclerosis in a Low Fluoride Area: A Follow-up Study." 15(4).

Vaselli et al., 2003. "The '"Evil's Winds"' (Mazukus) at Nyiragongo Volcano (Democratic Republic of Congo)" 14–15(1–2):123–28.

Verschuren, 1965. "Un Facteur de Mortalité Mal Connu, l'asphyxie Par Gaz Toxiques Naturels Au Parc National Albert" 3:215–37.

Viveiros et al., 2014. "Periodic Behavior of Soil CO2 Emissions in Diffuse Degassing Areas of the Azores Archipelago: Application to Seismovolcanic Monitoring" 119:7578–97. https://doi.org/10.1002/ 2014JB011118.

Volcano Hazards Program, 2024. "Volcanic Gases Can Be Harmful to Health, Vegetation and Infrastructure." *Usgs.Gov*, 2024.

Von Glasow et al., 2004. "Impact of Reactive Bromine Chemistry in the Troposphere." https://doi.org/10.5194/acpd-4-4877-2004.

Von Glasow, Bobrowski & Kern, 2009. "The Effects of Volcanic Eruptions on Atmospheric Chemistry." *Chemical Geology* 263 (1–4): 131–42. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.020.

West Systems, 2019. *Portable Diffuse Flux Meter Handbook Release 9.3*.

WHO (World Health Organization), 1997. "Guideline for Drinking Water Quality Health Criteria and Other Supporting Information." 2nd edn. Geneva: World Health Organization.

Williams-Jones & Rymer, 2000. "Hazards of Volcanic Gases." In *Encyclopedia of Volcanoes*, 997–1013. San Diego, CA: Academic Press.

Williams-Jones & Rymer, 2015. "Hazards of Volcanic Gases." In *The Encyclopedia of Volcanoes*, 985–92. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00057-2.

Witt et al., 2008. "Mercury and Halogen Emissions from Masaya and Telica Volcanoes, Nicaragua." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113 (B6): 2007JB005401. https://doi.org/10.1029/2007JB005401.

Wittmer et al., 2014. "Active Alkaline Traps to Determine Acidic-gas Ratios in Volcanic Plumes: Sampling Techniques and Analytical Methods." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 15 (7): 2797–2820. https://doi.org/10.1002/2013GC005133.

Woods, Chuan & Rose, 1985. "Halite Particles Injected into the Stratosphere by the 1982 El Chichon Eruption" 230:170–72.

Wüest et al., 2012. "Methane Formation and Future Extraction in Lake Kivu." In *Lake Kivu*, edited by Jean-Pierre Descy, François Darchambeau, and Martin Schmid, 165–80. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4243-7_10.

Yalire et al., 2009. "Etude de l'impact de l'activité Actuelle Du Volcan Nyiragongo Sur l'environnement de Goma En R. D. Congo" Numéro spécial CRSN-Lwiro 2009.

Yang et al., 2005. "Tropospheric Bromine Chemistry and Its Impacts on Ozone: A Model Study." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110 (D23): 2005JD006244. https://doi.org/10.1029/2005JD006244.

Zhang & Kling, 2006. "Dynamics Of Lake Eruptions And Possible Ocean Eruptions." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34 (1): 293–324. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125001.

ANNEXES

Annexe 1 : Variation de Concentration en CO_2 dans les Mazukus en %

Concentration en CO_2 dans le Mazuku en %						
	6/7/2024	9/7/2024	12/7/2024	24/07/2024	1/8/2024	23/08/2024
Bulengo 1		11.4	44.2	43.6	43.5	44.5
Bulengo 2		18.9	44.5	42.5	42.2	44.8
Bulengo 3		10.9	11	38.9	20.5	43.8
Kabaga		39.6	39.4	39.1	38.3	39.7
Eliab		42.6	42.4	42.2	42.5	42
Katwa 1	41	41.4	39.3	40.5	40.4	40.7
Katwa 2		42.1	33.7	39.7	19.3	36.4
Rotary	41.6	42.2	42.2	41.7	41.7	41.5
Bikumbo	39.5	38	38.1	36.9	37.2	36.9

Annexe 2 : Variation de concentration en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo

Variation de concentration en CO_2 sur la fracture principale sud du volcan Nyiragongo en %							
	22/06/2024	23/06/2024	24/06/2024	10/7/2024	23/07/2024	31/07/2024	22/08/2024
Bugarura 1	1.8	1.7	1.8		1.9	1.8	1.6
Bugarura 2	0.2	0.6	0.6		0.5	0.4	0.4
Bugarura 3	3.1	3.7	3.7		3.8	3	3.7
Bugarura 4	3.1	2.9	2.9		3.1	3.2	3.1
Munigi 1	10.6	10.4	10.7		10.4	10.8	10.6
Munigi 2	11.4	10.9	11.4		11.2	11.7	10.9
Munigi 3	7.5	7	7.3		7.1	7.4	7.3
Munigi 4	9.6	9	9.3	9.5	9.2	9.6	8.8
Munigi 5	7.5	6.7	7.5	8.6	7.6	7.4	7.3
Munigi 6	10	9.8	9.7	10.4	9.3	9.8	9.5

Annexe 3 : Le flux en CO_2 et H_2S sur les eaux du lac Kivu

Site	CO_2	H_2S
	Flux g/m^2/day	Flux g/m^2/day
LK1	3.226	0.138
LK2	0.856	0.070
LK3	13.317	0.058
LK4	0.336	0.107
LK5	1.194	0.114
LK6	61.682	0.058
LK7	1.422	0.021
LK8	0.483	0.013
LK9	6.088	0.017
LK10	0.812	0.024
LK11	0.213	0.049
LK12	0.376	0.055
LK13	0.437	0.039
LK14	3.578	0.085
LK15	47.833	0.006
LK16	34.230	0.053
LK17	18.239	0.044
LK18	38.423	0.040
LK19	0.338	0.021
LK20	0.574	0.039
LK21	0.222	0.030

Annexe 4 : Flux en H_2S dans les Mazuku le 1/8/2024 (A) et Flux en H_2S sur la fracture principale le 31/7/2024 (B)

A

SITE	DATE	H2S_SLOPE [ppm/s]	Flux moles/m2/day	Flux g/m2/day
Bulengo1	1/8/2024	0.006	0.003	0.095
Bulengo2	1/8/2024	0.001	0.000	0.015
Bulengo3	1/8/2024	0.005	0.002	0.078
Kabaga	1/8/2024	0.002	0.001	0.031
eliab	1/8/2024	0.016	0.007	0.237
Katwa1	1/8/2024	0.005	0.002	0.081
Katwa2	1/8/2024	0.007	0.003	0.108
Rotary	1/8/2024	0.013	0.006	0.189
Bikumbo	1/8/2024	0.001	0.000	0.013

B

SITE	DATE	H2S_SLOPE [ppm/s]	Flux moles/m2/day	Flux g/m2/day
Bugarura1	31/07/2024	0.002	0.001	0.026
Bugarura2	31/07/2024	0.014	0.006	0.215
Bugarura3	31/07/2024	0.004	0.002	0.061
Bugarura4	31/07/2024	0.004	0.002	0.062
Munigi1	31/07/2024	0.004	0.002	0.066
Munigi2	31/07/2024	0.003	0.001	0.041
Munigi3	31/07/2024	0.002	0.001	0.034
Munigi4	31/07/2024	0.006	0.003	0.095
Munigi5	31/07/2024	0.042	0.018	0.620
Munigi6	31/07/2024	0.011	0.005	0.160

Annexe 5 : Mesure de concentration en gaz dans l'air au dessus du lac Kivu par le MultiGAS

