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

Effets des gaz du volcan Nyiragongo sur la santé des populations riveraines

Mumbere Vyalirendi Belden; Sous la direction de : Dr. Athanase Nkunzimana; Pr. Charles Balagizi

2025
UB, FLSH
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1849

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

UNIVERSITÉ DU BURUNDI

FACULTÉ DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES

Master en Sociétés, Pouvoirs, Territoires et Développement durable (SPTD)

EFFETS DES GAZ DU VOLCAN NYIRAGONGO SUR LA SANTE DES POPULATIONS RIVERAINES

Par

MUMBERE VYALIRENDI Belden

MÉMOIRE

présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention d'un Master en « Sociétés, Pouvoirs, Territoires et Développement durable » (SPTD)

Spécialité : Population et Développement

Sous la direction de :

Dr. Athanase NKUNZIMANA

Pr. Charles BALAGIZI

Bujumbura, Mars 2025

Membres du jury

Président : NDAYISENGA Aloys

Secretaire : HAMENYIMANA Jean Baptiste

Directeur : NKUNZIMANA Athanase

Co-Directeur : BALAGIZI Charles

Dédicace

A KASEREKA BWAKYANAKAZI et à Francine KAVUGHO MBAVUGHAVYO, ce travail qui vous fait honneur est le fruit d'énormes sacrifices et beaucoup de conseils reçus.

Remerciements

À Dieu soit toute la gloire, lui qui pourvoit à nos besoins et exauce les désirs de nos cœurs. Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le soutien et la collaboration de nombreuses personnes envers qui nous exprimons notre profonde gratitude.

Nos remerciements les plus sincères vont à nos professeurs Athanase NKUNZIMANA et Charles BALAGIZI pour leurs précieux conseils, leurs critiques constructives et leur encadrement éclairé tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier les autorités académiques, scientifiques et administratives de l' Université du Burundi pour leur dévouement et leur sacrifice dans notre solide formation. Nos remerciements s'étendent aux facilitateurs de cours du programme de Master SPTD pour leurs orientations précieuses et leurs conseils avisés.

Nous sommes reconnaissants aux agents de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) et de la Division Provinciale de la Santé (DPS) , notamment CT Mathieu YALIRE , CT SAMBA VIKANDI , Bruno AGOLOA , pour leur disponibilité et l'accès qu'ils nous ont accordé à des données essentielles pour cette étude.

À notre famille tutrice, nous exprimons notre gratitude pour son soutien infaillible au cours de ces cinq années. Vos paroles, parfois dures mais toujours encourageantes, ont nourri notre réflexion et renforcé notre détermination.

Nous adressons un merci particulier à notre tante KAHINDO BWAKYANAKAZI , à nos frères Jigaël VYALIRENDI , Privilège VYALIRENDI , Bibuya VYALIRENDI , ainsi qu'à nos sœurs Jischiva VYALIRENDI , Jischivi VYALIRENDI , Espérance KAGHENI , Jeanine KAVITI , Bernadette KAVITI , Confiance KAKURU , pour leur amour, leur affection et leur soutien constant.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Antoine NGABO, qui nous a initiés à LaTeX et avec lequel nous avons rédigé ce mémoire, à Jeans BUDURA pour son aide précieuse dans le traitement des données, ainsi qu'à Salomon BURABUCHIZA pour l'initiation à QGIS.

Nous témoignons notre sympathie à tous nos camarades du programme de Master SPTD pour les moments de camaraderie et de collaboration.

Un merci particulier à nos amis Olivier LUNENO , Samson TENGENEZA , Alex KAPOSO , NZANZU KING , Jérémie LUBEMBE , Disciple MAKASI ,Syntique KAHINDO KENDA KENDA Jissy KIZA , Rosine VALINANDI , pour leur soutien multiforme.

Nous exprimons une profonde gratitude à nos amis du CELAB , qui, bien que ne nous étant pas familiers au départ, sont devenus une véritable famille avec laquelle nous avons partagé le

meilleur et affronté le pire, notamment la perte tragique de notre camarade de classe et voisin, Juste BUDEMA .

Enfin, nous remercions chaleureusement notre colocataire Fred KAMARA, pour ses discussions enrichissantes, ses conseils pratiques et les moments de soutien mutuel qui ont rendu notre vie estudiantine plus agréable.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette œuvre scientifique, nous disons un grand merci.

Résumé

Ce mémoire analyse l'impact des gaz volcaniques du Nyiragongo sur la santé des populations riveraines, en examinant les hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires avant, pendant et après l'éruption de 2021.

L'analyse des données environnementales montre que les émissions de SO_2 étaient particulièrement élevées et variables (M = 66 972.014 tonnes , ET = 40 383.933 , min = 7 322.24 , max = 144 015.73), dans un contexte météorologique caractérisé par une température stable (20.44°C), une humidité élevée (77.5 %) et des prélèvements variant entre 25.6 mm et 200.2 mm . La vitesse du vent (12.917 m/s) a favorisé la dispersion des polluants, modulant leur impact sanitaire.

Sur le plan épidémiologique, les infections respiratoires aiguës (IRA) constituant la principale pathologie à Goma (M = 396,583 cas) et Karisimbi (M = 179,417 cas). La pneumonie simple prédomine à Karisimbi (M = 764,167 cas) et Goma (M = 485,083 cas), tandis que l'hypertension artérielle reste la maladie cardiovasculaire dominante (M = 283,75 cas à Goma , M = 267,583 cas à Karisimbi).

L'analyse de régression multiple (n = 260) révèle un effet significatif de la vitesse du vent sur la réduction des cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires ($\beta = -29,387$, $p < 0,001$). À l'inverse, le SO_2 présente un effet modéré mais significatif ($\beta = -0.002$, $p < 0.05$), atténué par l'interaction avec la vitesse du vent ($\beta = 0.0002518$, $p < 0.01$) et renforcé par une interaction négative avec les précipitations ($\beta = -0.0000129$, $p < 0.05$). Ces résultats confirment que la saisonnalité mensuelle n'explique qu'une faible partie de la variation des cas ($R^2 = 0.025$, p = 0.852), suggérant que d'autres facteurs environnementaux jouent un rôle clé.

Sur le plan géographique, Goma et Karisimbient enregistrent des taux similaires d'hospitalisation, tandis que le Nyiragongo présente une incidence significativement plus faible (-143.849 cas en moyenne, p < 0.001). Le modèle global (F = 12,032, p < 0,001, R^2 = 8,6 %) indique que la variance des hospitalisations est influencée par des facteurs environnementaux et structurels non pris en compte dans l'analyse.

Ces résultats soulignent la nécessité d'un renforcement des systèmes de surveillance sanitaire et d'une meilleure intégration des données environnementales dans la gestion des risques. L'étude recommande le développement de stratégies de résilience, incluant l'amélioration de la coordination institutionnelle et des infrastructures de santé, ainsi qu'une sensibilisation accrue des populations exposées.

Mots-clés : Éruption volcanique, dioxyde de soufre, maladies respiratoires, Nyiragongo, santé publique, gestion des risques, surveillance sanitaire.

Abstract

This thesis analyzes the impact of Nyiragongo's volcanic gases on the health of nearby populations by examining hospitalizations for respiratory and cardiovascular diseases before, during, and after the 2021 eruption.

Environmental data analysis shows that SO_2 emissions were particularly high and variable (M = 66,972.014 tons, SD = 40,383.933, min = 7,322.24, max = 144,015.73), in a meteorological context characterized by stable temperature (20.44°C), high humidity (77.5%), and precipitation ranging between 25.6 mm and 200.2 mm. Wind speed (12.917 m/s) favored pollutant dispersion, modulating their health impact.

Epidemiologically, acute respiratory infections (ARI) were the main pathology in Goma (M = 396.583 cases) and Karisimbi (M = 179.417 cases). Simple pneumonia predominates in Karisimbi (M = 764.167 cases) and Goma (M = 485.083 cases), while hypertension remains the dominant cardiovascular disease (M = 283.75 cases in Goma, M = 267.583 cases in Karisimbi).

Multiple regression analysis (n = 260) reveals a significant effect of wind speed on reducing respiratory and cardiovascular disease cases ($\beta = -29.387$, $p < 0.001$). Conversely, SO_2 shows a moderate but significant effect ($\beta = -0.002$,$p < 0.05$), attenuated by interaction with wind speed ($\beta = 0.0002518$, $p < 0.01$) and reinforced by a negative interaction with precipitation ($\beta = -0.0000129$, $p < 0.05$). These results confirm that monthly seasonality explains only a small portion of case variation ($R^2 = 0.025$, $p = 0.852$), suggesting other environmental factors play key roles.

Geographically, Goma and Karisimbi record similar hospitalization rates, while Nyiragongo shows significantly lower incidence (-143.849 cases on average, $p < 0.001$). The global model ($F = 12.032$, $p < 0.001$, $R^2 = 8.6\%$) indicates that hospitalization variance is influenced by environmental and structural factors not included in the analysis.

These results emphasize the need to strengthen health surveillance systems and better integrate environmental data into risk management. The study recommends developing resilience strategies, including improved institutional coordination and health infrastructure, as well as increased awareness among exposed populations.

Keywordss : Volcanic eruption, sulfur dioxide, respiratory diseases, Nyiragongo, public health, risk management, health surveillance

Table des matières

Membres du jury . . . . . **i**

Dédicace . . . . . **ii**

Remerciements . . . . . **iii**

Résumé . . . . . **v**

Abstract . . . . . **vi**

Table des matières . . . . . **vii**

Liste des tableaux . . . . . **x**

Liste des figures . . . . . **xii**

Liste des sigles et abréviations . . . . . **xiii**

Avant-propos . . . . . **xiv**

Introduction générale **1**

1 Contexte et Justification 1

2 Problématique 2

3 Choix et intérêt du sujet 3

3.1 Sur le plan théorique 4

3.2 Sur le plan institutionnel et de la recherche 4

4 Objectifs du travail 4

4.1 Objectif général 4

4.2 Objectifs spécifiques 4

5 Hypothèses de recherche 5

5.1 Hypothèses secondaires 5

Chapitre 1: Cadre théorique **6**

1.1 Éruptions volcaniques et émissions de gaz 6

1.2 Impacts des gaz volcaniques sur la santé publique 7

1.3 Conséquences environnementales . . . 10
1.4 Mécanismes de dispersion des gaz volcaniques . . . 11
1.5 Connaissances empiriques et résilience communautaire . . . 12
1.6 Les systèmes de surveillance sanitaire : rôle et efficacité . . . 13

Chapitre 2: Description de la zone d'étude . . . 14
2.1 Localisation géographique . . . 14
2.1.1 Contexte géologique . . . 15
2.1.2 Zones de santé riveraines du volcan Nyiragongo . . . 16
2.2 Aperçu des Éruptions du Nyiragongo . . . 18
2.2.1 Dynamique des Gaz Volcaniques et Impact sur la Santé . . . 19
2.2.2 Mesures de Prévention et Gestion des Risques . . . 19
2.2.3 Impact Socio-économique et Environnemental . . . 19
2.2.4 Climat et Environnement . . . 20
2.2.5 Risques Tectoniques et Sismiques . . . 21
2.2.6 Défis de la Gestion des Risques . . . 21

Chapitre 3: Matériels et méthodes . . . 22
3.1 Collecte des données de dioxyde de soufre . . . 23
3.2 Collecte des données de santé publique . . . 23
3.3 Collecte des données météorologiques . . . 24
3.4 Approche qualitative et entretiens avec les experts . . . 24
3.5 Caractéristiques des Variables et Origines des Données . . . 25
3.6 Approches complémentaires . . . 26
3.7 Plan d'analyse des données . . . 26
3.8 Identification des zones de risque . . . 28
3.9 Outils statistiques pour analyses approfondies . . . 28

Chapitre 4: Présentation et discussion des résultats . . . 30
4.1 Présentation des résultats . . . 30
4.1.1 Variation des hospitalisations liées aux maladies respiratoires et cardio-vasculaires en fonction des concentrations de SO_2 . . . 30
4.1.2 Influence des conditions météorologiques sur l'effet du SO_2 sur les hospitalisations . . . 32
4.1.3 Comparaison des modèles à effets fixes et à effets aléatoires . . . 32
4.1.4 Disparités géographiques des hospitalisations dans les zones riveraines du Nyiragongo . . . 38
4.1.5 Carte des Zones à Risque d'Exposition au SO_2 . . . 41
4.1.6 Analyse croisée des entretiens avec les experts de la DPS et de l'OVG . . . 41
4.2 Discussion des résultats . . . 42

4.2.1 Variation des hospitalisations liées aux maladies respiratoires et cardio-vasculaires en fonction des concentrations de SO_2 . . . 43
4.2.2 Influence des conditions météorologiques sur l'effet du SO_2 sur les hospitalisations . . . 43
4.2.3 Disparités géographiques des hospitalisations dans les zones riveraines du Nyiragongo . . . 44
4.2.3.1 Analyse descriptive des pathologies par zone géographique et Comparaison globale entre les zones géographiques . . . 44
4.2.3.2 Résultats de la régression : Effets des zones géographiques sur les hospitalisations . . . 44
4.3 Vérification des hypothèses . . . 45

Conclusions et Perspectives . . . **47**
Conclusion . . . 47
Synthèse des résultats principaux . . . 47

Bibliographie . . . **51**

ANNEXE . . . **58**

Liste des tableaux

Tableau 1: Propriétés et effets sur la santé de l'exposition humaine au CO_2, H_2S, SO_2 (voir compilation dans Balagizi et al., 2018b). 9

Tableau 2: Variables, Techniques d'Analyse et Formules de Régression 25

Tableau 3: Tendances temporelles des cas des maladies 30

Tableau 4: Impact des concentrations de SO_2 et des facteurs environnementaux sur les hospitalisations 31

Tableau 5: Caractéristiques des paramètres environnementaux autour du Nyiragongo sur une période de 12 mois 32

Tableau 6: Résultats du modèle de régression à effets aléatoires des facteurs environnementaux sur le nombre de cas de maladies 32

Tableau 7: Hausman (1978) specification test 33

Tableau 8: Résultats de la régression linéaire - Impact des variables environnementales sur les hospitalisations 33

Tableau 9: Effet des variables environnementales sur le nombre d'hospitalisations : résultats de régression 34

Tableau 10: Hausman (1978) specification test 34

Tableau 11: Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires des déterminants environnementaux des maladies à Goma 35

Tableau 12: Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires des déterminants environnementaux des maladies à Karismbi 36

Tableau 13: Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires des déterminants environnementaux des maladies à Nyiragongo 37

Tableau 14: Hausman (1978) specification test 37

Tableau 15: Analyse descriptive de la répartition des pathologies par zone géographique à Goma, Karisimbi et Nyiragongo 38

Tableau 16: Distribution globale des cas de maladies par zone géographique autour du Nyiragongo 39

Tableau 17: Résultats de la régression des hospitalisations selon les zones géographiques 40

Tableau 18: Comparaison des entretiens avec la DPS et l'OVG 42

Tableau 19: Données météorologiques mensuelles et Taux SO_2 de 2021 62

Tableau 20: Données sanitaires par zone - Année 2021 63
Tableau 21: Données sanitaires de la Zone de Santé de Goma (2021-2022) 63
Tableau 22: Données sanitaires de la Zone de Santé de Karisimbi (2021-2022) 63
Tableau 23: Données sanitaires de la Zone de Santé de Nyiragongo (2021-2022) . . . 64

Table des figures

Figure 1: Carte hypsométrique du volcan Nyiragongo 14
Figure 2: Carte des volcans Nyiragongo et Nyamulagira 16
Figure 3: Carte de la localisation de la zone d'étude 17

Figure 4: Carte des sites de collecte des données 22
Figure 5: Station de mesure du SO_2 et matériel DOAS 23

Figure 6: Carte des zones de risques face à l'exposition de SO_2 41

Liste des sigles et abréviations

- **AIC** : Critère d'information d'Akaike
- **BPCO** : Bronchopneumopathie Chronique Obstructive
- **CT** : Chef de Travaux
- **DPS** : Division Provinciale de la Santé Spectroscopie d'absorption optique différentielle
- **GVP** : Programme mondial sur le volcanisme
- **HTA** : Hypertension Artérielle
- **IRA** : Insuffisance Rénale Aiguë
- **MCV** : Maladies Cardiovasculaires
- **NASA** : Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace
- **NOAA** : Administration nationale des océans et de l'atmosphère
- **OCHA** : Bureau de la coordination des affaires humanitaires
- **ODD** : Objectifs de Développement Durable
- **OMD** : Objectifs du Millénaire pour le Développement
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **OVG** : Observatoire Volcanologique de Goma
- **PM** : Particules Microniques
- **QGIS** : Système d'Information Géographique Quantique
- **RDC** : République Démocratique du Congo
- **SRA** : Symptômes Respiratoires Aigus
- **SIG** : Système d'Information Géographique
- **SO_2** : Dioxyde de soufre
- **UNESCO** : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
- **UNICEF** : Fonds des Nations Unies pour l'enfance

Avant-propos

L'étude sur l'effet des gaz volcaniques du Nyiragongo sur la santé des populations riveraines s'inscrit dans une démarche scientifique visant à comprendre les conséquences sanitaires des émissions de dioxyde de soufre (SO_2) et à identifier les mécanismes d'atténuation adaptés aux réalités locales. En examinant les hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires avant, pendant et après l'éruption de 2021, ce travail apporte des éléments concrets sur l'impact environnemental et sanitaire des éruptions volcaniques.

Au-delà de son intérêt académique, cette recherche revêt une importance pratique pour la gestion des risques sanitaires et environnementaux. Elle met en évidence la nécessité d'un renforcement des systèmes de surveillance et d'une meilleure intégration des données environnementales dans les politiques de santé publique. L'analyse des interactions entre les concentrations de SO_2 , les conditions météorologiques et les hospitalisations permet d'ouvrir des pistes de réflexion sur la prévention et la résilience des populations exposées.

Ce mémoire est le fruit d'un travail rigoureux, rendu possible grâce au soutien et à la collaboration d'experts en santé publique, en volcanologie et en épidémiologie. Il traduit également un engagement personnel en faveur d'une recherche appliquée qui puisse contribuer à la protection des populations vulnérables.

Enfin, ce travail est dédié à tous ceux qui ont apporté leur appui, leurs conseils et leur expertise, et dont la contribution a été essentielle à l'aboutissement de cette étude.

Introduction générale

1 Contexte et Justification

Les activités volcaniques représentent une menace majeure pour les populations vivant à proximité des volcans à travers le monde. Durant les éruptions,les volcans libèrent dans l'atmosphère des quantités importantes de gaz toxiques tels que le dioxyde de soufre (SO_2), le dioxyde de carbone (CO_2) ou le sulfure d'hydrogène (H_2S), contaminant l'air, l'eau ainsi que sols des zones environnantes (A. Hansell & Oppenheimer, 2004).

En Afrique, le Rift Est-Africain abrite des volcans actifs, notamment autour du lac Kivu dans la branche Ouest du rift en République Démocratique du Congo (RDC), où les volcans Nyiragongo et Nyamulagira émettent en continuent des gaz dans l'atmosphère. Cette zone est donc sujette à une activité volcanique intense, menaçant les populations dans leur proximité, comme celles de la ville Goma et celles des villages environnants (C. M. Balagizi et al., 2018 ; J.-C. Komorowski et al., 2018). Le Nyiragongo, avec ses éruptions successives en 1977, 2002 et 2021, a causé de nombreuses victimes et d'importants dégâts dans la ville de Goma (J. C. Komorowski, 2002 ; Robin, 2021 ; Sadiki et al., 2023).

Les risques de contamination par les gaz volcaniques sont particulièrement élevés en RDC. Les éruptions des volcans actifs comme le Nyiragongo et le Nyamulagira libèrent des quantités massives de gaz toxiques, menaçant les populations des villes environnantes comme Goma et Gisenyi, ainsi que des cités comme Sake et Mubambiro (F. M. Balagizi et al., 2018 ; Bobrowski et al., 2017 ; Cuoco et al., 2013 ; Kasereka et al., 2017 ; Lowenstern et al., 2022). La ville de Goma, située au pied du Nyiragongo, est donc directement exposée aux risques liés aux émissions gazeuses continues de ce volcan (Birimwiragi Namogo & Catas, 2018).

Dans ce contexte, il convient d'examiner les impacts sanitaires des émissions de gaz volcaniques, tant pour protéger la santé publique que pour soutenir les efforts globaux en matière de développement durable. Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre de l'Objectif de Développement Durable (ODD) 3 : Bonne santé et bien-être, qui vise à garantir la santé et le bien-être de tous, à tous les âges. En analysant les effets des gaz volcaniques sur la santé des populations urbaines de Goma, cette étude vise à identifier des stratégies d'atténuation pour réduire les risques sanitaires (Nations, 2015).

De plus, cette recherche répond également aux impératifs de l'Objectif du Millénaire pour le Développement (OMD) 7 : Assurer un environnement durable. En évaluant les impacts des émissions volcaniques sur l'environnement urbain et la santé publique, elle contribue à une meilleure compréhension des risques environnementaux et à l'élaboration de politiques visant à préserver un cadre de vie sûr et durable pour les générations futures (Nations, 2000).

2 Problématique

Les éruptions volcaniques représentent une menace majeure pour les populations du monde entier. Au cours du 20ème siècle, ces phénomènes ont causé plus de 90 000 décès directs (Auker et al., 2013). En Afrique, bien que les éruptions soient moins fréquentes qu'en Asie ou en Amérique, leurs impacts sont considérables. Par exemple, l'éruption du Nyiragongo du 10 janvier 1977 a produit des coulées de lave qui ont recouvert environ 16 à 20 km^2 et tué environ 70 personnes (Pottier, 1978), mais s'était arrêtée dans le village de Munigi. L'éruption du Nyiragongo du 17 janvier 2002 a par contre produit deux principales coulées de lave qui ont atteint la ville de Goma et qui ont détruit 10 à 15 % de la ville (C. M. Balagizi et al., 2018 ; J. C. Komorowski, 2002 ; Tedesco et al., 2010), y compris un tiers de la piste de l'aéroport international de Goma. Cette éruption a alors eu des gaves impacts socio-économiques (par exemple, elle a détruit les maisons d'environ 120.000 personnes), a forcé une auto-évacuation massive d'environ 300.000 personnes et a tué environ 140 personnes (voir compilation dans Balagizi et al., 2018) ; et causé des dégâts estimés à 25 millions de dollars (Baxter & Gresham, 2004) . Ces catastrophes liées aux éruptions de 1977 et 2002 des volcans Nyiragongo illustrent le mieux la vulnérabilité de la ville de Goma et ses environs, ainsi que leurs expositions face aux risques volcaniques liées au Nyiragongo. Plus récemment, le volcan Nyiragongo est entré en éruption le 22 mai 2021 et a entraîné l'évacuation de plus de 500.000 personnes et causé la mort d'au moins 32 individus (OCHA, 2021).

Outre les impacts directs des éruptions à savoir ceux liés aux coulées de lave, les émissions continues de gaz volcaniques posent un risque sanitaire chronique pour plus de 1,5 million d'habitants vivant dans la proximité de ce volcan (Michellier et al., 2020). Ces émissions peuvent provoquer des problèmes respiratoires et d'autres complications de santé, mettant en danger la vie quotidienne des résidents.

La proximité de grandes villes avec des volcans actifs, comme c'est le cas de Goma avec le Nyiragongo, pose un défi majeur en termes de gestion des risques naturels dans l'est de la République Démocratique du Congo (Mavonga et al., 2010). Cette région est en effet fortement exposée aux menaces volcaniques et sismiques, entraînant de lourdes conséquences humaines et matérielles (Poppe et al., 2016). Le dégazage magmatique du Nyiragongo libère dans l'atmosphère des quantités substantielles de dioxyde de soufre (SO_2), de dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres composés nocifs (A. Hansell & Oppenheimer, 2004 ; Robock, 2003) . Ces polluants atmosphériques peuvent provoquer des impacts sanitaires, environnementaux et économiques importants, comme la formation de pluies acides et la menace sur la santé des êtres vivants et les activités agricoles (C. M. Balagizi et al., 2018) .

Les émissions de SO_2 lors des éruptions peuvent aggraver les symptômes respiratoires et augmenter les hospitalisations pour asthme, comme observé sur l'île de la Réunion avec le Piton de la Fournaise (Viane et al., 2009) . Il est donc crucial de mieux quantifier et surveiller les

émissions de gaz du Nyiragongo afin d'améliorer la prévention et la gestion des crises. Les émissions de SO_2 des volcans ont des impacts néfastes sur la santé respiratoire, avec une incidence accrue de symptômes respiratoires aigus (SRA) chez les populations vivant à proximité, comme dans la région de Goma (Michellier et al., 2020).

Les risques sanitaires associés aux éruptions et aux émissions de gaz volcaniques comprennent des problèmes respiratoires, des impacts cardiovasculaires, et des risques d'asphyxie (Delfosse et al., 2006) . Les effets sur la mortalité et la morbidité respiratoires sont significatifs, en particulier chez les individus prédisposés (A. L. Hansell et al., 2006) . Une meilleure coordination des acteurs et un renforcement du suivi des émissions sont essentiels pour évaluer l'impact sanitaire et environnemental des éruptions futures.

Questions de Recherche

Question Centrale

Comment les hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaire associées au SO_2 ont-elles évolué parmi la population riveraine du Nyiragongo en relation avec les concentrations de ces gaz, avant, pendant et après l'éruption du volcan en 2021 ?

Questions Secondaires :

1. Quelle est l'influence des variations de concentration de SO_2 sur l'incidence des maladies respiratoires et cardiovasculaires dans la population riveraine du Nyiragongo avant, pendant et après l'éruption de 2021 ?
2. Comment les interactions entre les concentrations de SO_2, la vitesse du vent et les précipitations influencent-elles le nombre d'hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires dans les zones riveraines du Nyiragongo ?
3. Quelle zone (Goma, Karisimbi ou Nyiragongo) présente la plus forte incidence de maladies respiratoires et cardiovasculaires, et dans quelle mesure cette disparité est-elle liée aux différences d'exposition aux concentrations de SO_2 ?

3 Choix et intérêt du sujet

Ayant survécu aux deux dernières éruptions du volcan Nyiragongo, celle de 2002 et celle de 2021, et ayant été témoin des pertes économiques importantes liées à ces éruptions ainsi que de la mort d'un camarade de classe due à une asphyxie par le CO_2, nous avons constaté par ces faits que les volcans menacent des millions de personnes, non seulement celles vivant dans leurs proximités mais aussi celles situées à des distances plus importantes. Les risques volcaniques sont variés et dépendent des produits émis, tels que les coulées de lave, ainsi que les panaches et nuages de gaz toxiques.

3.1 Sur le plan théorique

Ce mémoire apporte une contribution significative à la littérature sur les risques liés aux gaz volcaniques. Les résultats de cette étude mettent en évidence le danger permanent de contamination auquel la population résidant au pied du volcan Nyiragongo est confrontée. Les données et conclusions de ce travail constitueront une source de référence précieuse pour les chercheurs s'engageant dans des études similaires à l'avenir.

3.2 Sur le plan institutionnel et de la recherche

Ce mémoire permettra de consolider notre présence dans les annales scientifiques tout en répondant à l'exigence académique de rédiger un mémoire en fin de cycle. Les réponses issues de notre problématique fourniront des informations essentielles qui pourront être utilisées par les décideurs et les organismes humanitaires dans la zone à risque, ainsi que dans l'élaboration de projets d'aménagement du territoire.

De plus, les résultats de cette étude renforceront nos connaissances sur les volcans et permettront à la population riveraine du volcan Nyiragongo de prendre conscience des risques encourus en vivant au pied d'un volcan actif. En outre, ce mémoire sera un outil de sensibilisation pour les professionnels de la santé, leur permettant de fournir des conseils de protection contre les différents gaz volcaniques. Enfin, ce travail contribuera à renforcer les mécanismes de résilience de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) face aux risques de contamination dus à ces gaz.

4 Objectifs du travail

4.1 Objectif général

Évaluer les effets de l'éruption du Nyiragongo en 2021 sur la santé publique des populations riveraines, en analysant l'évolution des hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires en lien avec les concentrations de SO_2 avant, pendant et après l'événement.

4.2 Objectifs spécifiques

En se basant sur l'objectif général formulé précédemment, voici quelques exemples d'objectifs spécifiques pour cette étude :

- Analyser les effets des concentrations de SO_2 sur l'apparition des maladies cardiovasculaires et respiratoires avant, pendant et après l'éruption volcanique du Nyiragongo en 2021.

- Évaluer l'impact des interactions entre les concentrations de SO_2 et les conditions météorologiques (vitesse du vent, précipitations) sur le nombre d'hospitalisations liées aux maladies respiratoires et cardiovasculaires.
- Analyser les variations géographiques des cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires dans les zones riveraines du volcan Nyiragongo (Goma, Karisimbi et Nyiragongo).

5 Hypothèses de recherche

L'éruption du Nyiragongo en 2021 a entraîné une augmentation significative des hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires parmi la population riveraine, en corrélation avec les concentrations de SO_2 observées avant, pendant et après l'éruption.

5.1 Hypothèses secondaires

1. Les concentrations de SO_2 plus élevées pendant l'éruption du Nyiragongo en 2021 sont associées à une augmentation significative des hospitalisations pour maladies respiratoires (pneumonie, bronchite, asthme) et cardiovasculaires (hypertension, insuffisance cardiaque), par rapport aux périodes avant et après l'éruption.
2. L'impact des concentrations élevées de SO_2 sur le nombre d'hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires est amplifié par des conditions météorologiques spécifiques, telles qu'une faible vitesse du vent favorisant l'accumulation locale de polluants et une faible intensité des précipitations limitant le lessivage atmosphérique.
3. Les zones situées à proximité immédiate du volcan, ainsi que celles situées dans les directions dominantes des vents soufflant depuis le volcan, présentent des niveaux de risque élevé de contamination.

Cette étude vise à fournir une compréhension détaillée des effets des gaz volcaniques sur la santé publique de la population riveraine du volcan Nyiragongo et à identifier les zones les plus à risque de contamination. Les résultats obtenus permettront de mieux préparer les mesures de prévention et de réponse aux futures éruptions volcaniques dans cette région.

Chapitre 1: Cadre théorique

L'étude de l'impact des éruptions volcaniques sur la santé publique constitue un domaine de recherche interdisciplinaire, intégrant des aspects de volcanologie, de santé publique, d'épidémiologie et de sciences environnementales. Les travaux antérieurs sur le Nyiragongo et d'autres volcans fournissent une base solide pour comprendre comment les gaz volcaniques affectent la santé humaine. Cette revue de littérature explore les éléments clés de ces domaines et met en lumière les lacunes persistantes dans la recherche. Les maladies respiratoires et cardiovasculaires figurent parmi les principales causes de morbidité et de mortalité dans le monde.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) rapporte que les maladies cardiovasculaires (MCV) sont responsables de près de 31% des décès mondiaux, tandis que les maladies respiratoires, incluant les infections respiratoires aiguës et chroniques, causent plus de 4 millions de décès par an (OMS, 2023). Parmi les facteurs environnementaux contribuant à l'aggravation de ces pathologies, la pollution atmosphérique occupe une place prépondérante (OMS, 2018).

La pollution de l'air, comprenant des particules fines ($PM_{2.5}$), l'ozone (O_3), le dioxyde de soufre (SO_2) et d'autres polluants, est un facteur déclencheur bien documenté de maladies respiratoires et cardiovasculaires (OMS, 2024). Selon Chow (2006), l'exposition chronique à des niveaux élevés de particules fines et de gaz polluants augmente le risque de maladies coronariennes, d'accidents vasculaires cérébraux, d'asthme et de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO). Hansell et al. (2006) ont démontré que les émissions volcaniques, particulièrement le SO_2, sont de puissants irritants respiratoires susceptibles d'avoir des effets à long terme sur la santé des populations exposées.

1.1 Éruptions volcaniques et émissions de gaz

Les éruptions volcaniques et les émissions de gaz ont fait l'objet de nombreuses études, chaque auteur apportant une perspective unique sur les impacts environnementaux et sanitaires. Les éruptions volcaniques sont souvent accompagnées de rejets de gaz toxiques, entraînant des conséquences significatives pour l'environnement et la santé humaine. Selon (Delmelle et al., 2001), ces phénomènes libèrent une variété de gaz, dont le dioxyde de soufre (SO_2), le dioxyde de carbone (CO_2) et les composés halogénés. Ces gaz peuvent former des aérosols sulfatés dans l'atmosphère, contribuant à la pollution de l'air et aux changements climatiques.

Les effets sur la santé humaine des gaz volcaniques ont été largement explorés. Hansell et Oppenheimer (2004) ont démontré que l'exposition au dioxyde de soufre peut provoquer des troubles respiratoires, en particulier chez les populations vulnérables comme les enfants et les personnes âgées.

De plus, Bernadette et al.(Bernadette et al., 2015) ont étudié les conséquences à long terme de l'exposition aux gaz volcaniques sur la santé publique. Ils ont découvert que les populations vivant à proximité des volcans actifs présentent un risque accru de maladies chroniques, notamment les maladies cardiovasculaires et les cancers.

1.2 Impacts des gaz volcaniques sur la santé publique

L'exposition aux gaz volcaniques est associée à une augmentation des maladies respiratoires, telles que l'asthme, la bronchite chronique, et d'autres affections pulmonaires (Bernadette et al., 2015). Des études menées dans des zones volcaniques actives comme Hawaï et l'Italie ont montré une corrélation significative entre les épisodes d'éruption et une hausse des admissions hospitalières pour des troubles respiratoires (Hinatea, 2021) . Les populations vivant à proximité des volcans sont particulièrement vulnérables, non seulement en raison de la proximité des sources d'émission, mais aussi à cause des caractéristiques sociodémographiques qui peuvent limiter l'accès aux soins de santé (Durand & Grattan, 2001).

Étude des cas des volcans Nyiragongo et Nyamulagira

L'éruption du Nyiragongo en 2002 a été l'une des plus étudiées en raison de sa proximité avec la ville de Goma et des impacts humanitaires et environnementaux considérables qu'elle a causés (Durand & Grattan, 2001). En effet, le taux d'émission de SO_2 durant les deux premières heures de l'éruption du volcan Nyiragongo de 2002 était estimé entre 850 à 1 700 kg par seconde soit, ~73 à 147 000 tones par jour (Carn, 2003). Cette éruption a donc libéré de grandes quantités de SO_2 et de CO_2, entraînant des risques accrus pour la santé publique et l'environnement. Cependant, il existe peu d'études détaillant les impacts à long terme de ces émissions sur la santé respiratoire des habitants de Goma (Baxter & Gresham, 2004) .

Michellier et al. (2020) ont mené une analyse temporelle des effets des éruptions des volcans Nyiragongo et Nyamulagira sur la santé respiratoire des populations locales. Ils ont observé une incidence accrue de symptômes respiratoires aigus (SRA) après certaines éruptions, en particulier celle de Nyiragongo en 2002. Cependant, l'absence de corrélation systématique entre les émissions de SO_2 et les SRA suggère la nécessité d'une évaluation plus précise des expositions individuelles.

Études comparatives

Viane et coll. (2009) ont étudié les émissions de gaz du Piton de la Fournaise , un volcan actif situé dans le sud-est de l'île de La Réunion , un département français de l'océan Indien. Leur recherche a analysé l'impact des éruptions sur les hospitalisations pour asthme et a mis en évidence une corrélation entre les photos d'hospitalisations et les niveaux élevés de SO_2

enregistrés pendant ces épisodes volcaniques. Ces résultats soulignent l'importance des conditions météorologiques et des mécanismes de dispersion des gaz dans l'évaluation des impacts sanitaires des éruptions volcaniques.

Risques sanitaires des gaz volcaniques

Hansell et al. (2006) ont examiné les dangers sanitaires des zones volcaniques et géothermales, en mettant en évidence les effets des gaz tels que le CO_2, SO_2 et le H_2S sur la santé respiratoire et cardiovasculaire. Ils ont souligné que les expositions prolongées aux particules fines de cendres volcaniques peuvent causer des problèmes respiratoires aigus et chroniques. Les effets sur la santé humaine dus au CO_2, H_2S, CO_2 à la suite d'une exposition de courte ou longue durée sont repris dans le tableau 1.

Tableau 1 : *Propriétés et effets sur la santé de l'exposition humaine au CO_2, H_2S, SO_2 (voir compilation dans Balagizi et al., 2018b).*

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 et fréquence cardiaque accélérées 6 à 10% : dépression mentale, somnolence, maux de tête, faiblesse musculaire, évanouissements 11 à 15% : contractions musculaires, perte de conscience rapide > 25% : convulsions, coma, décès **Long terme :** 0,5% : exposition maximale recommandée 1 à 4% : 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 : irritation du nez et de la gorge 20 ppm : irritation oculaire immédiate 10,000 ppm : irrite la peau humide rapidement **Long terme :** Exposition prolongée dangereuse pour maladies cardiopulmonaires Exposition chronique : mort prématurée possible
Sulfure d'hydrogène (H_2S) : Incolore, odeur d'œuf pourri	**Court terme :** 10 ppm : exposition maximale recommandée 20 à 150 ppm : irritation oculaire, nausées, fatigue, diarrhée 500-700 ppm : effondrement en 5 minutes, mort possible après 30 à 60 min 1,000 à 2,000 ppm : mort quasi instantanée **Long terme :** 50 ppm : pharyngite, bronchite 250 ppm : œdème pulmonaire

1.3 Conséquences environnementales

Les émissions de gaz volcaniques exercent une influence profonde sur l'environnement, avec des répercussions qui vont bien au-delà des frontières locales des éruptions. Ces effets se manifestent dans plusieurs dimensions, notamment les changements climatiques, la pollution atmosphérique et les perturbations des écosystèmes.

Les éruptions volcaniques majeures, en libérant d'énormes quantités de gaz et de cendres, jouent un rôle significatif dans la dynamique climatique globale. Robock (Robock, 2003) a détaillé comment les aérosols volcaniques, constitués principalement de dioxyde de soufre (SO_2), peuvent se disperser dans la stratosphère et former des particules d'acide sulfurique. Ces particules ont la capacité de réfléchir une partie importante de la lumière solaire, entraînant un refroidissement temporaire de la surface terrestre. Ce phénomène, connu sous le nom de « refroidissement volcanique », a été observé après plusieurs grandes éruptions. Timmreck et al. (Timmreck et al., 1999), cité par Guillaume Lehir (Guillaume, 2015), a confirmé ces observations en démontrant que les grandes éruptions volcaniques, comme celle du Mont Pinatubo en Philippines (1991), ont provoqué des baisses significatives des températures mondiales. Kilian et al. (Kilian et al., 2020) ont également documenté que cette éruption a entraîné une réduction de la température moyenne mondiale pendant environ deux ans.

L'éruption du Vésuve, situé en Campanie, dans le sud de l'Italie, près de la baie de Naples, en 79 apr. J.-C., est un exemple historique de l'impact dévastateur des nuées ardentes et des retombées de cendres sur l'environnement et les populations humaines. Cette éruption a enseveli les villes de Pompéi et Herculanum sous des couches épaisses de cendres volcaniques, causant des destructions massives et de nombreuses pertes humaines (Universalis, s. d.). D'une violence extrême, elle a dégagé des quantités massives de gaz toxiques et de particules fines, illustrant comment les volcans peuvent affecter durablement les paysages et la biodiversité.

Un autre cas marquant est celui de la Montagne Pelée, un stratovolcan situé à l'extrémité nord de la Martinique, une île des Petites Antilles. Son éruption de 1902 a conduit à la destruction totale de la ville de Saint-Pierre en quelques minutes, causant la mort de près de 30 000 personnes (Universalis, s. d.). Cette catastrophe, liée à une nuée ardente atteignant des températures de plus de 1 000°C, a non seulement décimé la population locale, mais a aussi profondément modifié les écosystèmes environnants, en rasant la végétation et en acidifiant les sols à cause des gaz volcaniques.

En parallèle, les émissions volcaniques contribuent à la pollution atmosphérique de manière complexe. Les gaz volcaniques tels que le dioxyde de carbone (SO_2), l'hydrogène sulfuré (H_2S) et les composés halogénés comme le chlorure d'hydrogène (HCl) interagissent avec l'atmosphère de diverses manières. Le dioxyde de carbone, par exemple, intensifie l'effet de serre, contribuant au réchauffement climatique à long terme (Sutton et al., 2017) .Les émissions de dioxyde de soufre, quant à elles, peuvent se transformer en acide sulfurique, contribuant à la

formation de pluies acides. (Wang et al., 2016) ont montré que ces pluies acides peuvent acidifier les sols et les eaux, perturbant ainsi les cycles biologiques et nuisant à la fertilité des sols et à la santé des écosystèmes aquatiques. Les pluies acides résultantes peuvent également entraîner la dégradation des infrastructures et la diminution de la biodiversité.

Les impacts environnementaux des éruptions volcaniques se manifestent également à une échelle plus locale, affectant les écosystèmes proches des volcans. Les dépôts de cendres peuvent couvrir de vastes zones, étouffant la végétation et modifiant la composition chimique des sols. Les plantes, exposées à des concentrations élevées de cendres et de gaz, peuvent souffrir de brûlures et d'une diminution de leur capacité de photosynthèse (Saputra et al., 2022). Lacroix et Danger (Lacroix & Danger, 2008) ont souligné que ces perturbations peuvent entraîner une réduction de la biodiversité et des altérations dans les réseaux trophiques locaux, affectant la faune et la flore de manière significative.

Des études de cas spécifiques illustrent de manière dramatique les effets des émissions volcaniques sur l'environnement global. L'éruption du Mont Tambora en 1815 est un exemple extrême. Cette éruption a provoqué un refroidissement mondial, connu sous le nom de « l'été sans été » de 1816, avec des impacts dévastateurs sur l'agriculture et les conditions de vie dans de nombreuses régions du monde (Clerbaux, 2018). De même, l'éruption du Mont Pinatubo en 1991 a entraîné une baisse notable des températures mondiales, influençant les régimes climatiques et la qualité de l'air à travers le globe. Les recherches par Timmreck et al. et Abbott et al., (Abbott et al., 2021) ont documenté ces effets, révélant l'ampleur des perturbations climatiques causées par ces événements volcaniques majeurs.

1.4 Mécanismes de dispersion des gaz volcaniques

La dispersion des gaz volcaniques dans l'atmosphère est un phénomène complexe influencé par une variété de facteurs météorologiques, qui déterminent leur propagation et leur concentration dans l'environnement. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour évaluer les impacts des éruptions volcaniques sur la santé publique et l'environnement.

La direction et la vitesse du vent jouent un rôle crucial dans le transport des gaz volcaniques. Lorsqu'un volcan entre en éruption, les gaz et les cendres sont projetés dans l'atmosphère, où ils peuvent être transportés sur de longues distances par les courants aériens. Jervejeva et al (Jevrejeva et al., 2003) ont montré que la vitesse du vent influence la dispersion horizontale des gaz, tandis que la direction du vent détermine les zones géographiques affectées. Cette dynamique a été clairement observée lors de l'éruption du Mont Saint Helens en 1980, où les gaz et les cendres ont été transportés sur des milliers de kilomètres, impactant des régions éloignées du volcan (Crandell & Hoblitt, 1986) . Des observations similaires ont été faites lors de l'éruption du Mont Pinatubo en 1991, où les cendres ont atteint de grandes altitudes et se sont dispersées à travers le globe (Harrison et al., 1993).

La température et l'humidité de l'air sont également des facteurs déterminants dans la dispersion des gaz volcaniques. Une atmosphère plus chaude favorise une dispersion plus large des gaz, tandis qu'une atmosphère plus froide conduit à une concentration accrue près du sol (Sutton et al., 2017) . L'humidité joue un rôle important dans la formation de nuages de cendres et de gaz. Les interactions des gaz volcaniques avec l'humidité atmosphérique peuvent entraîner la formation d'acides et de particules fines, modifiant ainsi la dynamique de dispersion (Durand & Grattan, 2001) . Par exemple, l'éruption du Mont Eyjafjallajökull en 2010 a illustré comment les conditions d'humidité influençaient la formation de nuages de cendres qui ont perturbé le trafic aérien en Europe pendant plusieurs semaines (Rivet, 2013).

1.5 Connaissances empiriques et résilience communautaire

Les communautés vivant à proximité des volcans possèdent souvent une connaissance empirique approfondie des comportements volcaniques et des effets des émissions de gaz. Ces savoirs traditionnels, développés au fil des générations, jouent un rôle crucial dans la gestion des risques volcaniques et la réduction des impacts sur la santé publique et l'environnement. La compréhension des comportements volcaniques est souvent façonnée par des expériences vécues et des observations locales, qui peuvent offrir des perspectives uniques et complémentaires aux données scientifiques.

À Goma, par exemple, les résidents ont développé des stratégies d'adaptation et de résilience face aux éruptions récurrentes du Nyiragongo. Ces stratégies incluent des pratiques telles que la construction de refuges temporaires, l'évacuation préventive et la mise en place de systèmes communautaires de surveillance des émissions de gaz (Gaillard & Le Masson, 2007). Cependant, ces approches basées sur les connaissances locales sont souvent sous-documentées dans la littérature scientifique, malgré leur importance pour la gestion des risques volcaniques.

Les savoirs traditionnels sont souvent fondés sur une observation directe des phénomènes volcaniques. Les communautés locales peuvent détecter des signes précurseurs d'activité volcanique, comme les changements dans la couleur du ciel, les variations de la qualité de l'air ou les modifications dans la faune et la flore environnantes. Ces observations ont été confirmées par des études telles que celles de (Lowenstern et al., 2022), qui ont montré que les indices de déformation du sol et les variations des émissions de gaz sont souvent perçus par les populations locales avant les alertes scientifiques officielles.

Komorowski et al. (J.-C. Komorowski et al., 2018) ont souligné que les connaissances empiriques des communautés locales peuvent être intégrées dans les stratégies de gestion des risques pour améliorer la réactivité et la pertinence des interventions. Les savoirs locaux peuvent compléter les modèles scientifiques en fournissant des informations contextuelles sur les impacts des éruptions et les réponses des communautés. Par exemple, les connaissances locales sur les chemins d'évacuation les plus sûrs ou les refuges naturels peuvent enrichir les plans de gestion des catastrophes (Kelman et al., 2016). En outre, la résilience communautaire face aux

éruptions volcaniques est souvent renforcée par des pratiques culturelles et des mécanismes de soutien social. Dans les régions volcaniques, les communautés développent des réseaux de solidarité et des systèmes de soutien mutuel qui sont essentiels pour faire face aux crises.

Par exemple, les groupes communautaires organisent des formations sur la gestion des risques et des exercices de simulation d'évacuation pour préparer les résidents aux situations d'urgence (Paton et al., 2001) . Ces mécanismes de résilience sont cruciaux pour minimiser les impacts des éruptions et favoriser la récupération rapide des communautés affectées.

Cependant, malgré leur valeur, ces connaissances empiriques sont souvent sous-représentées dans les recherches académiques. Les études de Gaillard et Le Masson (2007) ont noté que les savoirs locaux sont parfois ignorés ou mal compris dans les politiques de gestion des risques volcaniques. L'intégration de ces connaissances dans les stratégies de gestion des risques pourrait améliorer la pertinence et l'efficacité des interventions, en prenant en compte les réalités locales et les pratiques culturelles.

1.6 Les systèmes de surveillance sanitaire : rôle et efficacité

Les systèmes de surveillance sanitaire ont pour mission de détecter et d'alerter sur les tendances épidémiologiques des maladies transmissibles et non transmissibles, y compris celles liées aux risques environnementaux. Thacker et Berkelman, (1988) définissent la surveillance sanitaire comme un processus continu qui permet de collecter, analyser, interpréter et diffuser des données sur la santé publique pour orienter les interventions sanitaires.

Cependant, dans des contextes comme celui du Nord-Kivu, où les risques environnementaux sont liés à l'activité volcanique, les systèmes de surveillance sanitaire peinent souvent à intégrer les données environnementales dans leurs évaluations des risques sanitaires. Selon Hansell et Oppenheimer (2004), un des défis majeurs réside dans le manque de coordination entre les systèmes de surveillance sanitaire et les institutions qui surveillent les risques environnementaux, comme les observatoires volcaniques.

Dans le cas du Nyiragongo, le système de surveillance sanitaire de la région ne semble pas être suffisamment équipé pour capter les effets indirects des émissions de gaz volcaniques sur la santé, notamment en raison d'un manque d'intégration des données environnementales, comme l'a observé Balagizi (2018). La plupart des données sanitaires sont centrées sur les maladies infectieuses et la surveillance épidémiologique, laissant peu de place à une évaluation adéquate des maladies non transmissibles liées à l'environnement, telles que les maladies respiratoires et cardiovasculaires.

Chapitre 2: Description de la zone d'étude

2.1 Localisation géographique

Le volcan Nyiragongo est situé à l'Est de la République Démocratique du Congo (RDC), dans la région des Grands Lacs africains, aux coordonnées géographiques 1°31'S, 29°15'E. Il culmine à 3 470 mètres d'altitude, à environ 15 kilomètres au nord de la ville de Goma, capitale de la province du Nord-Kivu. Ce stratovolcan fait partie de la chaîne des Virunga, qui s'étend le long de la frontière entre la RDC, le Rwanda et l'Ouganda (Platz et al., 2004).Le relief de la région est varié, avec des altitudes allant de 1 460 mètres au niveau du lac Kivu à 4507 mètres au sommet du volcan Karisimbi, le point culminant de la chaîne (@NatGeoFrance, 2021).

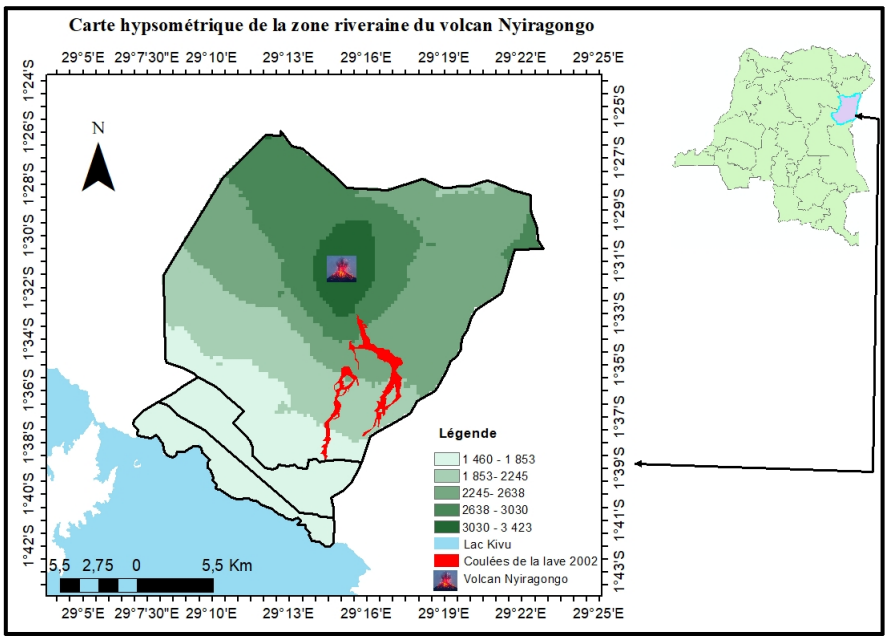


Figure 1 : *Carte hypsométrique de la zone riveraine du volcan Nyiragongo.*

Source : Élaboration personnelle à partir des données topographiques (DEM).

La figure, 4 représente la carte hypsométrique du volcan Nyiragongo, mettant en évidence les variations d'altitude. Cette visualisation fournit un contexte géographique essentiel pour analyser les impacts environnementaux sur la santé des populations riveraines.

2.1.1 Contexte géologique

Le Nyiragongo se trouve au cœur des monts Virunga, une région géologiquement active de la branche occidentale du Rift Est-Africain. Son cratère sommital, d'un diamètre de 1 300 mètres, abrite l'un des plus grands lacs de lave permanents au monde (@NatGeoFrance, 2021). Le volcan culmine à 3 470 mètres et comprend plusieurs cônes adventifs, tels que le Shaheru (2 800 m) et le Baruta (3 200 m), qui se forment le long de fractures géologiques orientées vers le sud et le nord-est (Platz et al., 2004).

Découvert en 1894 par l'explorateur allemand Von Gotzen, le Nyiragongo est reconnu pour ses éruptions de type hawaïen, caractérisées par des coulées de lave très fluides pouvant atteindre des vitesses de 100 km/h (Universalis, s. d.). Ces laves, basiques et riches en alcalines, proviennent d'un magma sous-saturé en silice issu de la série alcaline (Tazieff, 1977).

Le Nyiragongo fait partie du Rift Albertin, une zone tectonique marquée par des processus de rifting actif. Ce dernier résulte de la divergence des plaques tectoniques africaines et somaliennes, entraînant des fractures profondes et la formation de nombreux édifices volcaniques. Ce système est divisé en deux branches : le rift oriental, qui comprend des volcans tels que le Kilimandjaro, et le rift occidental, où se situent les monts Virunga (Mukwege Buhendwa, 2018). L'activité volcanique du Nyiragongo est étroitement liée à l'ouverture de ce rift. Les oscillations du niveau du lac de lave, influencées par la pression magmatique et les mouvements tectoniques, sont des indicateurs clés du risque volcanique (Tedesco et al., 2010). Par exemple, l'éruption latérale de 1977 a vidangé le lac de lave, entraînant des coulées rapides qui ont provoqué d'importantes pertes humaines et matérielles (Global Volcanism Program, 1977).

L'édifice volcanique se compose de trois cônes principaux alignés sur 10 km suivant une direction nord-sud. Le cratère principal est entouré de terrasses successives situées à 3 180 m et 3 050 m, correspondant aux anciens niveaux du lac de lave (Universalis, s. d.) . Le fond du cratère est rempli par un lac de lave, dont la taille et le volume oscillent en fonction des dégazages et des épisodes éruptifs. En juin 2003, après l'éruption de 2002, le niveau du lac était mesuré à 790 m sous la lèvre sommitale (Chakrabarti et al., 2009). Les coulées de lave du Nyiragongo couvrent une superficie de 1 500 km^2, avec un volume augmentant à 500 km^3. Ces laves très fluides, pauvres en silice, sont principalement composées de mélinites et de néphélinites, des roches caractéristiques des magmas alcalins (Syavulisembo et al., 2024).

Le volcan Nyiragongo est entouré par le lac Kivu au sud, les volcans Karisimbi et Mikeno à l'est, et le volcan Nyamulagira au nord-ouest. La proximité immédiate de la ville de Goma et de la ville rwandaise de Gisenyi, situées sur des fractures profondes du rift, exposent ces agglomérations à des risques élevés d'éruptions volcaniques et de séismes associés (Universalis, s. d.).

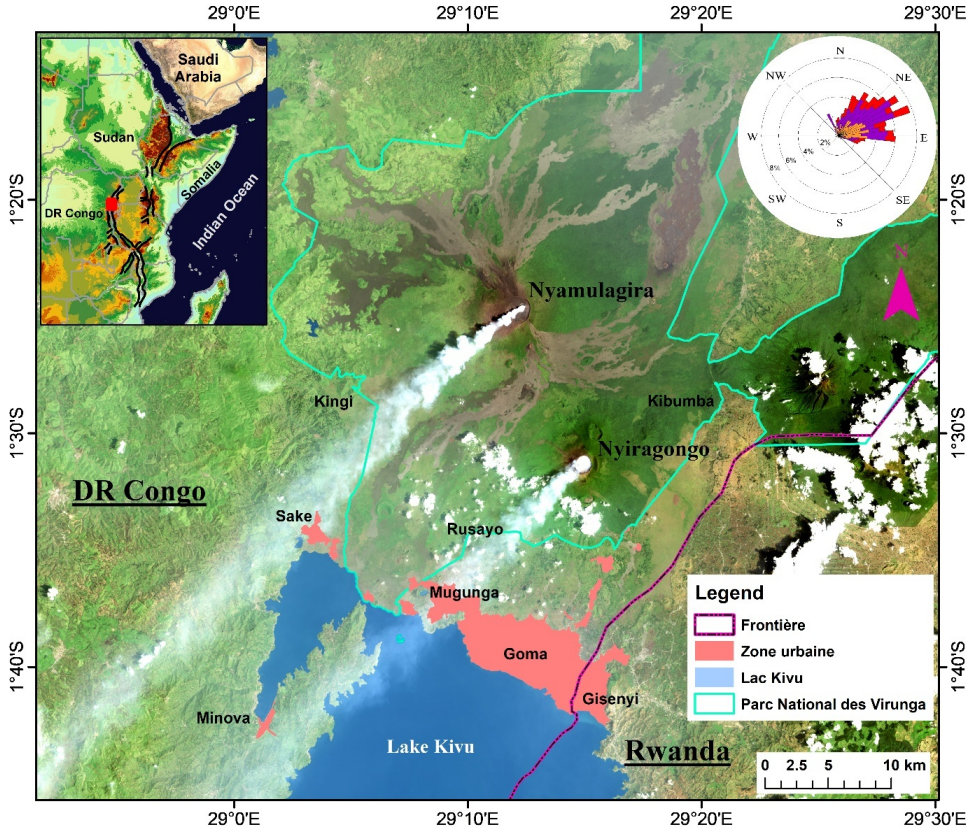


Figure 2 : *Carte des volcans Nyiragongo et Nyamulagira et des panaches de gaz émis.*

Source : Modifié d'après Balagizi et al., 2017.

La figure, 2 illustre la localisation des volcans Nyiragongo et Nyamulagira ainsi que les panaches de gaz qu'ils émettent quotidiennement. On y observe également les villes de Goma (RDC) et Gisenyi (Rwanda) ainsi que les localités environnantes. Cette carte, modifiée d'après Balagizi et al. (2017), permet de visualiser la dispersion des gaz volcaniques et leur impact potentiel sur les populations riveraines.

2.1.2 Zones de santé riveraines du volcan Nyiragongo

Les populations vivant à proximité du volcan Nyiragongo sont exposées à divers risques volcaniques, en particulier les émissions de gaz tels que le dioxyde de soufre (SO_2). Dans cette étude, trois zones de santé sont prises en compte, correspondant à des divisions administratives et géographiques distinctes :

– • Zone de santé de Goma : Correspond à la commune de Goma, située dans la partie sud de la ville. Avec une population urbaine 301 577 (données DPS 2021), cette zone est particulièrement vulnérable aux risques de santé publique liés aux émissions volcaniques en raison de sa proximité avec le lac Kivu, de la stagnation des gaz favorisée par la topographie, de

la présence de méthane et de CO_2 dans le lac, des conditions météorologiques limitant la dispersion des polluants.

– • Zone de santé de Karisimbi : Située au nord de la zone de santé de Goma, elle couvre la commune de Karisimbi, également au sein de la ville de Goma. Cette zone, plus périurbaine, présente une population de 605 124 (données DPS 2021), mais reste fortement exposée aux gaz volcaniques en raison de sa proximité avec le volcan et de l'influence des vents dominants.

– • Zone de santé de Nyiragongo : Correspond au territoire de Nyiragongo, situé au nord du volcan. Cette zone est en grande partie rurale et se trouve directement à proximité du cratère, augmentant les risques d'exposition directe aux gaz volcaniques. La population est moins dense 341 201 (données DPS 2021), que dans les communes de Goma, mais les infrastructures sanitaires y sont également plus limitées.

L'analyse des variations des niveaux de SO_2 et des caractéristiques géographiques et démographiques de ces zones permet de mieux comprendre les impacts sanitaires de l'éruption volcanique sur les populations locales.

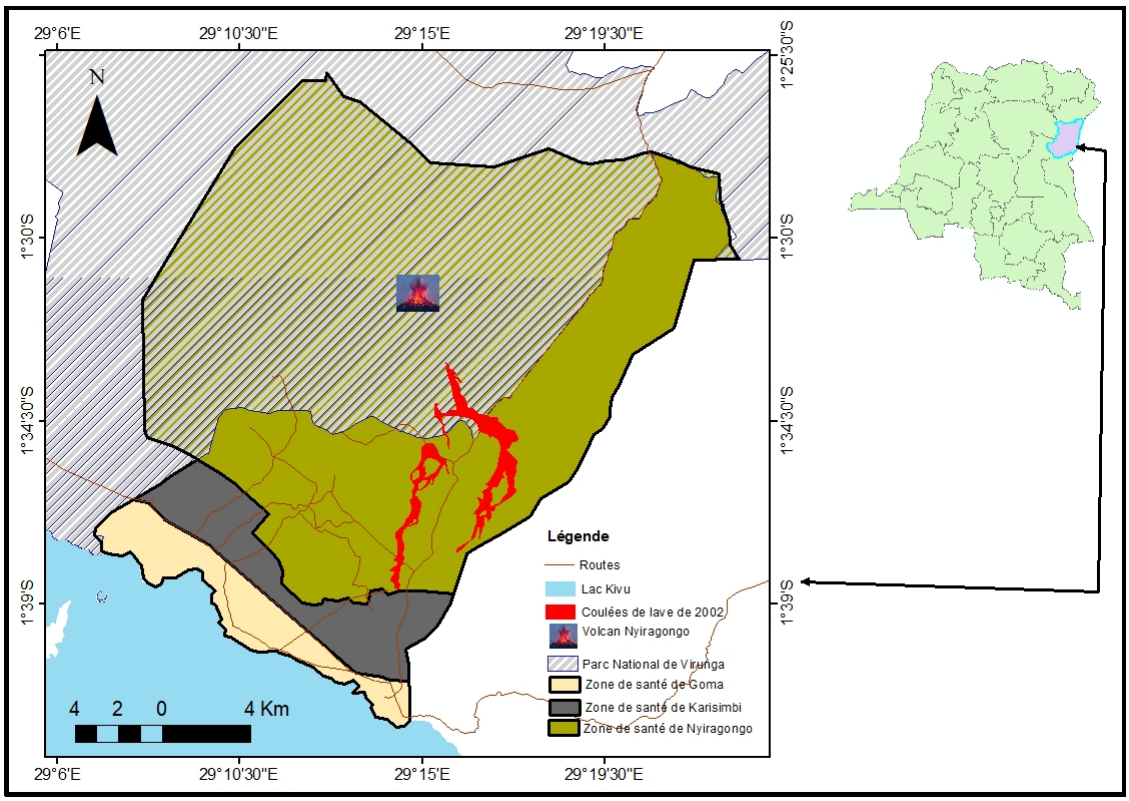


Figure 3 : *Carte de la localisation de la zone d'étude*

Source : Élaboration personnelle à partir des données de la DPS.

2.2 Aperçu des Éruptions du Nyiragongo

Le volcan Nyiragongo, situé dans la région du Rift Est-Africain en République Démocratique du Congo, est l'un des volcans les plus actifs et dangereux au monde. Sa première éruption documentée par des explorateurs occidentaux remonte à 1884 (J. C. Komorowski, 2002). Au XVIIIe et XIXe siècles, le volcan était caractérisé par des éruptions explosives. À partir de 1927, une nouvelle phase d'activité marquée par l'émission de lave très fluides a conduit à la formation d'un lac de lave dans le cratère sommital, découvert par Haroun Tazieff en 1948 (Tazieff, 1977).

Principales Éruptions Historiques

1. **Éruption de 1977** : Le 10 janvier 1977, une éruption latérale spectaculaire a provoqué la vidange brutale du lac de lave en moins d'une heure, générant des coulées extrêmement rapides atteignant une vitesse de 60-100 km/h. Cette éruption a provoqué environ 600 décès et détruit plusieurs villages à proximité (J. C. Komorowski, 2002).La faible densité de la lave du Nyiragongo, une caractéristique notable, permet aux coulées de se déplacer rapidement sur de longues distances avant de se solidifier, mettant en lumière les dangers uniques de ce volcan (Smets et al., 2022).
2. **Éruption de 2002** : Le 17 janvier 2002, une fracture majeure s'est ouverte sur le flanc sud du volcan, libérant environ 25 millions de mètres cubes de lave. Cette éruption, déclenchée par une activité tectonique intense, a affecté gravement la ville de Goma, détruisant environ 18 % de la ville et forçant l'évacuation de plus de 300 000 personnes vers le Rwanda (**komorowski2002** ; Carn, 2003). Les coulées de lave ont également atteint le lac Kivu, soulevant des préoccupations quant à une possible éruption limnique, similaire à celle du lac Nyos au Cameroun, bien qu'aucun dégazage catastrophique n'ait été observé (Edward, 2023).
3. **Éruption du 22 mai 2021** : L'éruption la plus récente du Nyiragongo a eu lieu le 22 mai 2021, vers 18h30 (heure locale). Sans avertissement préalable, le volcan a libéré une coulée de lave qui a détruit environ 3 629 maisons, affectant principalement la partie nord de Goma et ses environs, et laissant près de 20 000 personnes sans abri. Au total, 17 villages ont été détruits, et des infrastructures essentielles, telles que 7 écoles et 4 centres de santé, ont été ravagées. L'éruption a causé la mort d'au moins 32 personnes, dont certaines brûlées vives ou victimes d'accidents lors de l'évacuation. Environ 200 000 habitants ont été privés d'accès à l'eau potable en raison des dégâts sur les installations hydrauliques. Par ailleurs, des fissures dans le sol de Goma ont libéré des gaz volcaniques dangereux comme le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde de carbone (CO_2), exacerbant les problèmes respiratoires parmi les populations riveraines (**georiska20211** ; RDC, 2021 ; Reliefweb, 2021) .

2.2.1 Dynamique des Gaz Volcaniques et Impact sur la Santé

Les émissions de gaz volcaniques du Nyiragongo , dominées par le dioxyde de soufre (SO_2), le dioxyde de carbone (CO_2) et le monobromure de brome (BrO) , ont un impact majeur sur la qualité de l'air et la santé publique, notamment par leur rôle dans l' irritation des voies respiratoires, l'aggravation des maladies pulmonaires préexistantes et l'augmentation des affections cardiovasculaires. (NASA/NOAA, 2021).

Les variations des ratios SO_2/CO_2 , observés avant et pendant les éruptions, sont utilisées comme indicateurs prédictifs pour anticiper les futures éruptions (**bobrowski2017b**). Les études réalisées par Cuoco et al. (2013) sur les émissions de gaz du Nyiragongo ont révélé des fluctuations importantes des ratios CO_2/SO_2 et BrO/SO_2 , corrélées aux changements du niveau du lac de lave . Ces analyses constituent des outils prédictifs essentiels pour évaluer les risques sanitaires et environnementaux liés aux émissions volcaniques.

L'exposition prolongée à ces gaz toxiques, en particulier lors des photos d'émission, a entraîné une augmentation notable des hospitalisations pour maladies respiratoires , en particulier après l'éruption de 2021 (NASA/NOAA, 2021).

Par ailleurs, l'impact sur la qualité de l'air a été significatif , avec des concentrations élevées de gaz acides (SO_2, CO_2, BrO) dépassant les seuils recommandés par l'OMS , affectant directement les zones environnantes. Ces émissions volcaniques ont entraîné une acidification des prélèvements , modifiant la composition chimique des sols et dégradant la qualitéet dégradant la qualité des ressources en eau potable , affectant ainsi les risques environnementaux et sanitaires (Cuoco et al., 2013). Les pluies acides résultant des émissions volcaniques ont également détérioré les sols, compromettant l'accès à l'eau potable et aggravant les problèmes de santé publique(C. M. Balagizi et al., 2018).

2.2.2 Mesures de Prévention et Gestion des Risques

Face à ces menaces, diverses mesures de prévention ont été mises en place, notamment des systèmes d'alerte précoce et des protocoles de gestion des crises (Josue et al., 2024). Malgré ces efforts, les éruptions passées ont révélé des lacunes significatives, notamment en termes de rapidité d'évacuation et de suivi médical systématique. Des campagnes de sensibilisation sur les risques des gaz volcaniques et des programmes de surveillance de la qualité de l'air ont été instaurées pour atténuer les impacts sanitaires (**unicef2022**).

2.2.3 Impact Socio-économique et Environnemental

Les éruptions du Nyiragongo ont eu un impact socio-économique dévastateur sur les localités riveraines. Les coulées de lave, telles que celles de 1977, 2002, et 2021, ont entraîné la

destruction massive des infrastructures, y compris des maisons, des écoles, des routes, et des installations sanitaires. En 2002, environ 18 % de la ville de Goma a été détruite, laissant des milliers de personnes sans abri et perturbant les activités économiques locales, y compris le commerce transfrontalier avec le Rwanda (Baxter, 1990 ; Komorowski, 2002). Les pertes agricoles sont également considérables, car les coulées de lave et les retombées de cendres ont rendu les terres arables infertiles, affectant les moyens de subsistance des agriculteurs locaux. Les cultures, telles que le manioc, le maïs, et les haricots, qui sont des denrées alimentaires de base dans la région, ont été gravement endommagées ou détruites (Robock, 2003).

Le déplacement des populations est un autre impact majeur, avec des milliers de personnes forcées de quitter leurs maisons à la suite des éruptions. Ce déplacement a souvent conduit à une surpopulation dans les zones de refuge, exacerbant les conditions de vie déjà précaires et augmentant les tensions sociales (UNICEF RDC, 2021).

2.2.4 Climat et Environnement

Les effets combinés des montagnes des Virunga et de la forêt équatoriale induisent un microclimat montagneux local dans les hautes terres des Virunga (F. M. Balagizi et al., 2018), même si un climat humide domine à l'échelle régionale. Malgré la pression humaine sur la forêt et d'autres écosystèmes, il existe généralement encore de grandes zones forestières principalement en raison de la présence de plusieurs aires protégées et parcs nationaux, comme le Parc National des Virunga où se trouvent les volcans Nyiragongo et Nyamulagira. Les précipitations annuelles moyennes varient entre 1300 et 1700 mm/an dans les zones situées à moins de 2000 m d'altitude (**Bobrowski2018-1** ; F. M. Balagizi et al., 2018), mais peuvent atteindre jusqu'à 2300 mm/an dans les hautes montagnes situées au-dessus de 2000 m d'altitude (F. M. Balagizi et al., 2018). Le régime des précipitations des Virunga est en grande partie bimodal, avec une saison sèche s'étendant de juillet à août et une saison des pluies de septembre à juin. Il existe cependant une courte période sèche de type secondaire observée en partie entre janvier et février.

La température moyenne mensuelle de l'air pour un endroit donné montre peu de variation en raison de la proximité de l'équateur. Cependant, la température moyenne mensuelle et annuelle montre de grandes disparités entre les basses terres (20 °C, avec des maximas quotidiens jusqu'à 32 °C) et les hautes terres (10 °C, avec des minima quotidiens descendant jusqu'à 7 °C au sommet du volcan Nyiragongo) (F. M. Balagizi et al., 2018)

L'environnement local est riche en biodiversité, particulièrement au sein du parc national des Virunga, qui abrite des espèces endémiques et menacées, telles que le gorille des montagnes. La végétation varie des forêts tropicales denses aux prairies de montagne, avec des sols riches en nutriments en raison de l'activité volcanique (Centre, 2023) .

Cependant, les éruptions volcaniques perturbent cet équilibre écologique. Les gaz toxiques, les cendres, et les coulées de lave altèrent les écosystèmes, détruisant la flore locale et perturbant la faune. L'acidification des eaux de surface causée par les pluies acides a des conséquences sur la qualité de l'eau, affectant à la fois les populations humaines et les habitats naturels (A. Hansell & Oppenheimer, 2004) .

2.2.5 Risques Tectoniques et Sismiques

L'éruption de 2021 a révélé une activité tectonique intense, suggérant que les fractures profondes du rift jouent un rôle crucial dans le déclenchement des éruptions. Les données sismiques ont montré une corrélation entre l'augmentation de la sismicité et l'imminence d'une éruption, mettant en évidence l'importance d'une surveillance volcanologique intégrée combinant des études sismiques et géochimiques pour mieux anticiper les événements futurs (Sadiki et al., 2023). Cette observation renforce l'idée que la surveillance continue des signaux sismiques est essentielle pour prévenir les risques liés aux éruptions soudaines.

2.2.6 Défis de la Gestion des Risques

La gestion des risques volcaniques dans la région du Nyiragongo pose de nombreux défis. Les autorités locales font face à des infrastructures limitées, ce qui complique les efforts d'évacuation et de secours lors des éruptions. La densité de la population dans des zones à haut risque, comme Goma, aggrave les difficultés, car l'évacuation rapide de grandes masses de personnes est logistiquement complexe (Mafuko Nyandwi et al., 2023).

La préparation des populations locales est également un point faible. Bien que des systèmes d'alerte précoce aient été mis en place, la sensibilisation et la formation des communautés sur les mesures à prendre en cas d'éruption restent insuffisantes. Les habitants sont souvent mal informés des risques et des protocoles d'évacuation, ce qui peut entraîner des paniques et des pertes humaines évitables (Dhillon & Sasidharan, 2021).

Les ressources financières et techniques limitées pour la gestion des catastrophes augmentent la vulnérabilité des populations riveraines. Le manque d'équipements modernes pour surveiller l'activité volcanique et le besoin de renforcement des capacités des institutions locales entravent la mise en place d'une gestion des risques efficace. Des efforts internationaux et des partenariats renforcés sont nécessaires pour améliorer la résilience de cette région face aux risques volcaniques(Morrison et al., 2020).

Chapitre 3: Matériels et méthodes

Cette étude a adopté une approche mixte, combinant des méthodes quantitatives et qualitatives pour évaluer l'impact des gaz volcaniques sur la santé publique dans les zones voisines au volcan Nyiragongo.

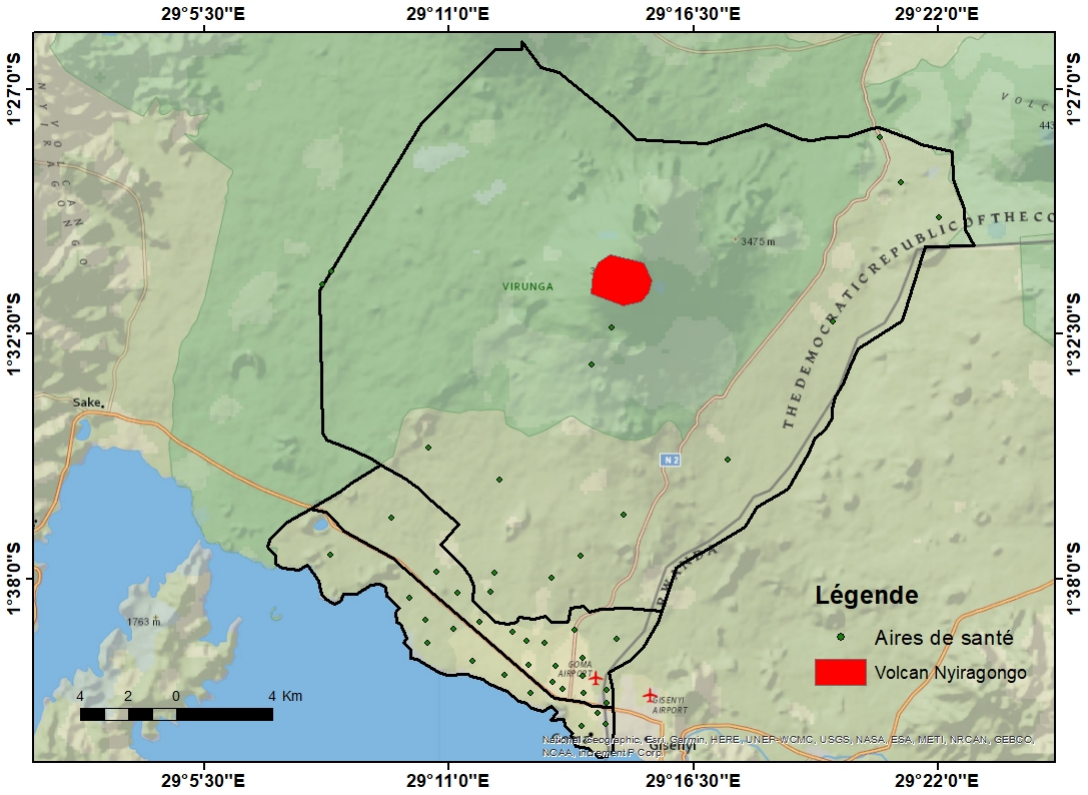


Figure 4 : *Carte des sites de collecte des données*

Source : Élaboration personnelle à partir des données de la DPS.

La figure 4 représente les sites de collecte des données. Cette carte a été élaborée à partir des coordonnées fournies par la DPS.

3.1 Collecte des données de dioxyde de soufre

La mesure des concentrations de gaz volcaniques, notamment du dioxyde de soufre (SO_2), a été réalisée grâce à des instruments de télédétection positionnés à Rusayo **??**. Nous avons utilisé les données de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG), enregistrées par des **spectromètres à absorption optique différentielle** (DOAS) (**??**), un emplacement stratégique autour de Goma, pour mesurer les niveaux de SO_2 produit par le volcan Nyiragongo. Ces spectromètres quantifient les gaz en mesurant l'absorption de la lumière à différentes longueurs d'onde. Cependant, le scanner ne peut pas détecter le panache de gaz durant la nuit.

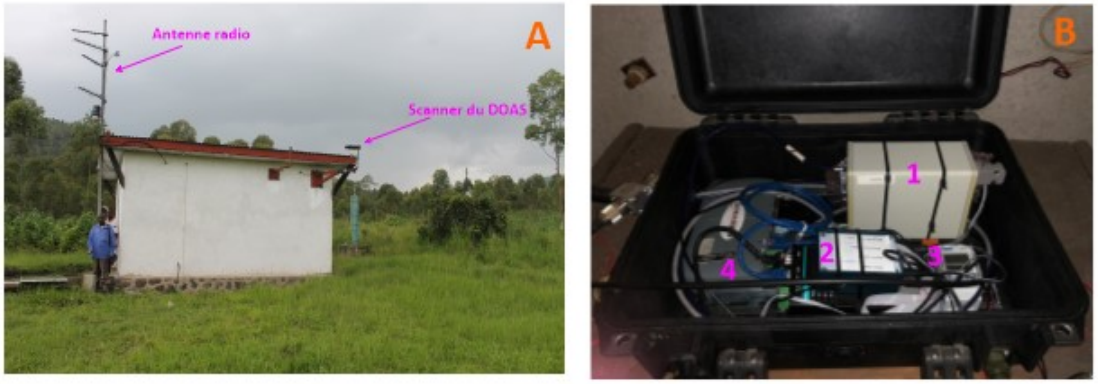


Figure 5 : *Station de mesure du SO_2 et matériel DOAS.*

Source : OVG.

La figure 5 présente (A) une vue de la station de l'OVG située à Rusago, incluant le scanner DOAS et l'antenne pour la transmission des données. (B) Une petite valise contenant le matériel électronique du DOAS, où (1) représente le spectromètre pour l'analyse de la composition du panache, (2) l'ordinateur pour le traitement et le stockage, (3) le Timer pour le chronométrage des activités et (4) la radio pour la transmission des données.

Le scanner, relié au spectromètre par des fibres optiques, enregistre les données brutes en les digitalisant. Un modem radio situé à la station permet le transfert de ces informations. Un minuteur coupe l'enregistrement pendant la nuit et le redémarre le jour, afin que les données puissent être traitées au bureau pour évaluer l'activité volcanique.

3.2 Collecte des données de santé publique

Pour évaluer les effets des émissions de SO_2 sur la santé, des données exhaustives sur **les hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires** ont été obtenues auprès de la Division Provinciale de la Santé du Nord-Kivu (DPS). Ces données comprennent les rapports des hôpitaux et centres de santé autour du volcan, et couvrent les périodes avant, pendant et après l'éruption.

Les données d'hospitalisation ont été segmentées comme suit :

- • **Avant l'éruption** : janvier à avril 2021
- • **Pendant l'éruption** : mai à juin 2021
- • **Après l'éruption** : juillet à décembre 2021

Pour enrichir l'analyse, **des entretiens avec des professionnels de santé locaux** ont été menés. Ces entretiens ont permis de compléter les informations disponibles et de mieux comprendre les variations dans les tendances de santé observées dans les zones proches du volcan.

3.3 Collecte des données météorologiques

Les données météorologiques ont été recueillies sur une période de 12 mois, comprenant les phases avant, pendant et après l'éruption volcanique de mai 2021. Ces données incluent :

- **Vitesse et direction du vent** (m/s) : Données essentielles pour modéliser la dispersion horizontale des gaz.
- **Précipitations** (mm) : Capturant l'effet de lessivage atmosphérique des polluants.
- **Température** (°C) et **humidité** relative (%) : Permettant de caractériser la stabilité atmosphérique, qui influence la dispersion verticale des gaz.

Ces paramètres ont été intégrés aux bases de données environnementales pour être croisées avec les concentrations de SO_2 et les hospitalisations concernées. Les facteurs météorologiques, y compris **la vitesse du vent, les précipitations, la température et l'humidité relative**, ont été pris en compte pour comprendre comment les gaz volcaniques se dispersent dans l'environnement. Ces paramètres influencent la trajectoire des gaz après leur émission, impactant ainsi les populations situées sous le vent.

3.4 Approche qualitative et entretiens avec les experts

En complément des analyses quantitatives, une approche qualitative a été intégrée par le biais d'entretiens semi-directifs avec des experts de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) et de la Division Provinciale de la Santé (DPS). Ces échanges ont eu pour objectif d'approfondir la compréhension des défis liés à la gestion des risques volcaniques et à la surveillance sanitaire dans la région (voir guide d'entretien en annexe).

Les entretiens avec les chercheurs de l'OVG ont notamment permis d'obtenir des informations détaillées sur les techniques de collecte des données environnementales et d'observer le fonctionnement des équipements utilisés, tels que les instruments DOAS. Ces interactions ont également facilité la coordination pour une analyse conjointe des émissions volcaniques et de leur impact sanitaire.

Le choix des personnes interrogées repose sur leur expertise reconnue et leur rôle stratégique dans les domaines d'étude. Les experts de l'OVG, par exemple, ont été sélectionnés en raison de leur connaissance approfondie des dynamiques volcaniques et de leur expérience directe dans le suivi des éruptions du Nyiragongo. Les représentants de la DPS ont été choisis pour leur implication dans la coordination des réponses sanitaires et leur accès à des données clés sur les hospitalisations et les impacts de l'éruption sur la santé publique. Ces acteurs ont été identifiés à travers une analyse préalable des institutions concernées par les problématiques étudiées.

3.5 Caractéristiques des Variables et Origines des Données

Tableau 2 : *Variables, Techniques d'Analyse et Formules de Régression*

Variables	**Techniques d'analyse**	**Type de régression et formule utilisée**
Statistiques descriptives	Moyennes, écarts-types et fréquences pour analyser les variations des cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires avant, pendant et après l'éruption. Calcul des paramètres environnementaux moyens et extrêmes sur 12 mois.	Statistiques descriptives : Pas de régression. Outils utilisés : moyennes ($\bar{X}$), écarts-types (σ), fréquences (f).
Conditions météorologiques	Régression multiple pour évaluation de l'impact combiné des variables environnementales (vitesse du vent, précipitation, température, humidité relative) sur les hospitalisations. Intégration dans des modèles à effets fixes et aléatoires.	Régression multiple : $Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \ldots + \epsilon$
Disparités géographiques des hospitalisations	Modélisation spatiale pour analyser les disparités entre les zones étudiées (Goma, Karisimbi, Nyiragongo). Régression à effets aléatoires pour intégrer les spécificités locales et l'hétérogénéité des facteurs environnementaux.	Modèle à effets aléatoires : $Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \mathrm{SO}_2 + u_j + \epsilon_{ij}$, où u_j représente les effets aléatoires des zones géographiques.
Interactions SO_2 - environnement	Régression avec interactions pour examiner les effets du SO_2 avec la vitesse du vent et les précipitations. Analyse des mécanismes d'atténuation (lessivage atmosphérique) et des amplifications des expositions en aval.	Régression avec interaction : $Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \mathrm{SO}_2 + \beta_2 \cdot \mathrm{Vent} + \beta_3 \cdot (\mathrm{SO}_2 \times \mathrm{Vent}) + \epsilon$

Légende des symboles :

- Y : Variable dépendante (ex. hospitalisations pour maladies respiratoires ou cardiovasculaires).
- β_0 : Interception ou constante du modèle.
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Coefficients des variables indépendantes représentant leur effet sur Y.
- SO_2 : Concentration en dioxyde de soufre.
- $X_1, X_2, \ldots$: Variables indépendantes (ex. conditions météorologiques).
- u_j : Effets aléatoires spécifiques à chaque zone géographique.
- ϵ : Terme d'erreur ou résidu.
- Vent : Vitesse du vent.
- $SO_2 \times$ Vent : Interaction entre la concentration de SO_2 et la vitesse du vent.

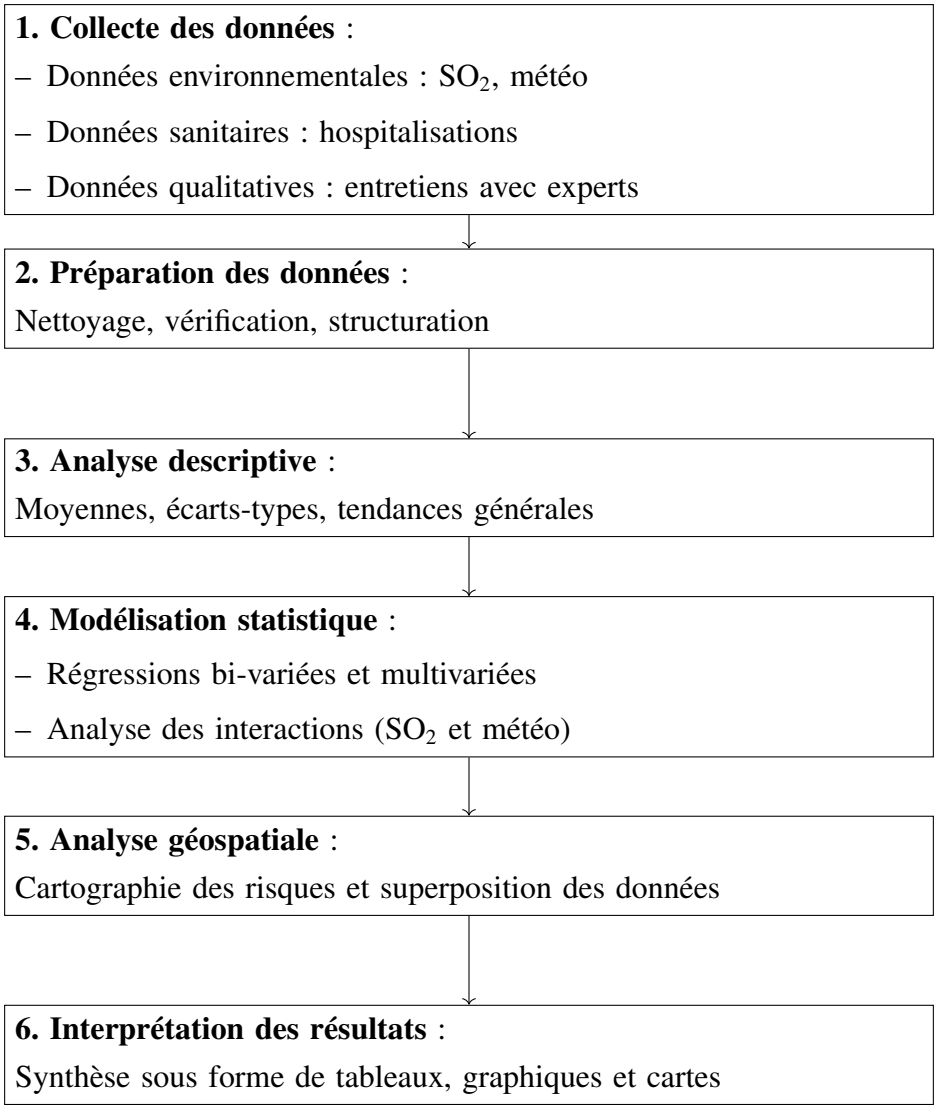
3.6 Approches complémentaires

- **Comparaison des modèles statistiques** : Validation par le test de Hausman pour déterminer la meilleure spécification entre les modèles à effets fixes et aléatoires, garantissant la robustesse des résultats.
- **Analyse temporelle** : Exploration des variations mensuelles des hospitalisations pour détecter d'éventuelles fluctuations saisonnières ou liées à des événements spécifiques.
- **Données qualitatives** : Analyse de contenu des témoignages des professionnels de santé et experts en gestion des risques pour enrichir les conclusions issues des analyses quantitatives.
- **Logiciels** : Les analyses ont été réalisées avec les logiciels Microsoft Excel 2013 pour la saisie des données et Stata pour les analyses statistiques. ArcGIS 10.4.1 a été utilisé pour le traitement géospatial et l'élaboration de cartes de risque.

3.7 Plan d'analyse des données

Schéma méthodologique de l'étude

Le schéma ci-dessous présente de manière simplifiée et visuelle le déroulement méthodologique de l'étude :



Description du schéma :

Ce schéma illustre les étapes principales de l'étude :

- **Étape 1 : Collecte des données** : Réunir les informations environnementales, sanitaires et qualitatives nécessaires.
- **Étape 2 : Préparation des données** :Assurer la qualité et la structuration des données.
- **Étape 3 : Analyse descriptive** : Fournir une vue d'ensemble des données collectées.
- **Étape 4 : Modélisation statistique** : Identifier les relations et interactions entre les variables.
- **Étape 5 : Analyse géospatiale** : Visualiser les disparités géographiques des risques.
- **Étape 6 : Interprétation des résultats** : Présenter les conclusions clés de manière claire et exploitable.

3.8 Identification des zones de risque

Des cartes de concentration d'hospitalisation ont été créées pour identifier les zones à risque élevé, moyen et faible de contamination par SO_2 . Ces cartes ont été superposées à des données démographiques et sanitaires à l'aide de SIG (ArcGIS, QGIS), permettant une visualisation claire des zones les plus exposées.

3.9 Outils statistiques pour analyses approfondies

Cette étude a utilisé une combinaison de méthodes statistiques pour analyser l'impact des émissions de SO_2 sur la santé publique, en particulier pour les maladies respiratoires et cardiovasculaires, dans les zones affectées par l'éruption du Nyiragongo. Les méthodes sélectionnées sont alignées avec les objectifs de recherche et visent à fournir des analyses précises et validées scientifiquement.

a) Concentration des gaz volcaniques

Les mesures de **SO_2** ont été analysées à l'aide de **régression linéaire** pour examiner la relation entre les concentrations de SO_2 et les indicateurs de santé. Cette méthode permet d'évaluer l'impact direct des émissions sur les hospitalisation pour maladies respiratoires et cardiovasculaires.

Interactions avec les conditions météorologiques : Des modèles ont été utilisés pour explorer les effets combinés des concentrations de SO_2 et des paramètres météorologiques (vitesse du vent, précipitation, température et humidité) sur les hospitalisations. Ces modèles permettent de mieux comprendre comment les conditions météorologiques modifient l'impact des émissions de gaz climatiques sur la santé publique.

b) Conditions météorologiques

Une régression multiple a été utilisée pour évaluer l'impact combiné des conditions météorologiques (vitesse du vent, précipitation, température, humidité relative) sur les hospitalisations.

Modèles à effets fixes et aléatoires : Ces modèles ont été appliqués pour intégrer les spécificités locales et tenir compte des variations géographiques dans l'impact des conditions environnementales sur les hospitalisations. L'objectif est de comprendre comment les fluctuations des conditions influencent les niveaux de pollution et, par conséquent, la santé des populations exposées.

c) Indicateurs utilisés de santé respiratoire et cardiovasculaire

Des **régressions logistiques** ont été pour quantifier l'effet des émissions de SO_2 sur les hospitalisations pour maladies respiratoires (pneumonie, bronchite, IRA) et cardiovasculaires (hypertension, insuffisance cardiaque). Cette approche permet d'évaluer les relations entre l'exposition au SO_2 et les résultats de santé dans les zones les plus exposées. **Régression à effets aléatoires** : Des modèles à effets aléatoires ont été appliqués pour prendre en compte les facteurs environnementaux locaux spécifiques et l'hétérogénéité entre les différentes zones géographiques.

d) Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives (moyennes, écarts-types, fréquences) ont été utilisées pour analyser les variations des cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires avant, pendant et après l'éruption du Nyiragongo. Ces analyses permettent de décrire les tendances générales et de comparer les résultats entre les différentes périodes d'exposition aux émissions volcaniques.

Paramètres environnementaux : Les valeurs moyennes et extrêmes des conditions environnementales (température, humidité, etc.) ont également été évaluées sur 12 mois pour comprendre les variations des facteurs climatiques pendant la période d'étude.

e) Interactions SO_2-environnement

Des régressions avec interactions ont été exercées pour examiner l'impact combiné du SO_2 avec des facteurs environnementaux, tels que la vitesse du vent et les précipitations. Ces analyses permettent de comprendre les mécanismes d'atténuation (effet de lessivage atmosphérique) et d'amplification des concentrations de SO_2. Elles fournissent des informations sur la manière dont les conditions météorologiques influencent la dispersion des gaz volcaniques et leur impact sur la santé publique.

Chapitre 4: Présentation et discussion des résultats

4.1 Présentation des résultats

4.1.1 Variation des hospitalisations liées aux maladies respiratoires et cardiovasculaires en fonction des concentrations de SO_2

Tableau 3 : *Tendances temporelles des cas des maladies*

Nombre des cas	**Coef.**	**St.Err.**	**t-value**	**p-value**	**95% Conf. Inf**	**95% Conf. Sup**	**Sig.**
Mois : base 1	0	.	.	.	.	.	
2	-2.952	65.882	-0.04	0.964	-132.711	126.806	
3	21.526	64.433	0.33	0.739	-105.381	148.432	
4	27.619	65.882	0.42	0.675	-102.140	157.378	
5	-6.702	63.790	-0.11	0.916	-132.341	118.936	
6	15.366	65.129	0.24	0.814	-112.910	143.642	
7	106.469	67.593	1.58	0.116	-26.661	239.598	
8	25.095	65.882	0.38	0.704	-104.663	154.854	
9	-0.552	66.700	-0.01	0.993	-131.923	130.818	
10	-21.257	64.433	-0.33	0.742	-148.163	105.650	
11	20.139	65.129	0.31	0.757	-108.137	148.414	
12	70.091	64.433	1.09	0.278	-56.815	196.998	
Constant	128.952	46.585	2.77	0.006	37.199	220.706	***
Statistiques globales							
Mean dependent var	149.319		SD dependent var		211.526		
R-squared	0.025		Number of obs		260		
F-test	0.571		Prob > F		0.852		
Akaike crit. (AIC)	3538.606		Bayesian crit. (BIC)		3581.335		

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

L'analyse de la variation mensuelle du nombre de cas montre une dynamique temporelle où les différences mensuelles par rapport à janvier ne sont généralement pas significatives. Le modèle indique une constante significative de 128.952 cas en janvier ($p < 0.01$). Bien que juillet et décembre affichent des augmentations de 106.469 et 70.091 cas respectivement, ces différences ne sont pas statistiquement significatives ($p > 0.05$). Les autres mois montrent des variations modestes, sans significativité ($p > 0.05$). Le faible R^2 (0.025) et l'insignifiance du test F ($p = 0.852$) suggèrent que la saisonnalité mensuelle n'explique qu'une faible part de la

variation des cas, indiquant que d'autres facteurs, comme les conditions environnementales, influencent davantage le nombre de cas. Ces résultats soulignent l'importance d'une approche intégrée pour la gestion des risques sanitaires dans les zones affectées par le Nyiragongo.

Tableau 4 : *Impact des concentrations de SO_2 et des facteurs environnementaux sur les hospitalisations*

Maladie	**Coef.**	**St.Err.**	**t-value**	**p-value**	**95% Conf. Inf**	**95% Conf. Sup**	**Sig.**
av_so2	0	0	0.00	1.000	0	0	
ap_so2	0	0	0.00	1.000	0	0	
vitesse_vent	0	0.098	-0.00	1.000	-0.193	0.193	
temperature	0	0.988	-0.00	1.000	-1.945	1.945	
humidite	0	0.093	-0.00	1.000	-0.182	0.182	
precipitation	0	0.006	0.00	1.000	-0.011	0.011	
Constant	4.5	24.002	0.19	0.851	-42.747	51.747	
Statistiques globales							
Mean dependent var	4.500		SD dependent var		2.295		
R-squared	0.000		Number of obs		288		
F-test	0.000		Prob > F		1.000		
Akaike crit. (AIC)	1308.878		Bayesian crit. (BIC)		1334.519		

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Les concentrations de SO_2 avant et après l'éruption, ainsi que les autres facteurs environnementaux (vitesse du vent, température, humidité, prélèvement), n'ont aucun effet détectable sur les hospitalisations, avec des coefficients nuls et un R^2 également nul (0,000). Ces résultats révèlent que ni les facteurs environnementaux ni l'éruption de 2021 n'a contribué de manière significative à la variation des cas dans les données analysées.

4.1.2 Influence des conditions météorologiques sur l'effet du SO_2 sur les hospitalisations

Tableau 5 : *Caractéristiques des paramètres environnementaux autour du Nyiragongo sur une période de 12 mois*

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
vitesse vent	12	12.917	2.065	10	17
temperature	12	20.442	0.264	19.8	20.7
humidite	12	77.5	2.747	73	81
precipitation	12	86.433	43.008	25.6	200.2
TauxSO2	12	66972.014	40383.933	7322.24	144015.73

L'analyse descriptive des variables environnementales autour du Nyiragongo (n=12) met en évidence des concentrations élevées et très variables de SO_2 (M = 66 972.014 tonnes, ET = 40 383.933, min = 7 322.24, max = 144 015.73), reflétant une dynamique complexe des émissions volcaniques. Les conditions météorologiques montrent une température stable (M = 20.442°C), une humidité élevée (M = 77.5%) et des précipitations variables (M = 86.433 mm, min = 25.6, max = 200.2 mm). La vitesse du vent (M = 12.917 m/s) suggère des conditions favorables à la dispersion des polluants. Ces données fournissent un contexte clé pour analyser les interactions entre les émissions volcaniques et l'atmosphère locale, ainsi que leurs impacts potentiels sur la santé.

4.1.3 Comparaison des modèles à effets fixes et à effets aléatoires

Tableau 6 : *Résultats du modèle de régression à effets aléatoires des facteurs environnementaux sur le nombre de cas de maladies*

Nombredescas	Coef.	St.Err.	t-value	p-value	[95% Conf	Interval]	Sig
vitesse_vent	-29.387	7.424	-3.96	.000	-43.938	-14.837	***
temperature	-14.679	37.622	-0.39	.696	-88.415	59.058	
humidite	-8.739	5.352	-1.63	.102	-19.228	1.75	
precipitation	1.096	.606	1.81	.071	-.092	2.284	*
TauxSO2	-.002	.001	-2.47	.013	-.004	-.001	**
SO2_Vitvent	.0002518	.0000832	3.03	.002	.0000888	.0004149	***
prec_so2	-.0000129	5.78e-06	-2.23	.026	-.0000242	-1.55e-06	**
Constant	1409.594	1104.864	1.28	.202	-755.899	3575.087	
Mean dependent var	149.319		SD dependent var		211.526		
Overall r-squared	0.023		Number of obs		260		
Chi-square	35.584		Prob > chi2		0.000		
R-squared within	0.133		R-squared between		0.024		
*** p<.01, ** p<.05, * p<.1							

Le modèle de régression multiple ($n = 260$) met en évidence des prédicteurs significatifs du nombre de cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires ($R^2 = 0.133$, $p < 0.001$). La vitesse du vent exerce l'effet le plus marqué ($\beta = -29.387$, $p < 0.001$), réduisant les cas de

maladies grâce à la dispersion des polluants. Les émissions de SO_2 ont un effet direct négatif modéré ($\beta = -0.002$, $p < 0.05$), modulé par deux interactions clés : une interaction positive avec la vitesse du vent ($\beta = 0.0002518$, $p < 0.01$), atténuant l'effet protecteur du vent, et une interaction négative avec les précipitations ($\beta = -0.0000129$, $p < 0.05$), reflétant un effet de lessivage atmosphérique. Les précipitations ($\beta = 1.096$, $p < 0.1$) montrent une tendance marginale à augmenter les cas, tandis que la température et l'humidité n'ont pas d'effets significatifs. Ces résultats confirment l'importance des interactions entre les facteurs environnementaux et les émissions volcaniques dans les dynamiques de santé publique.

Tableau 7 : *Hausman (1978) specification test*

	Coef.
Chi-square test value	1.665
P-value	.797

Le test de Hausman ($\chi^2 = 1.665$, $p = 0.797$) indique que le modèle à effets aléatoires est statistiquement préférable au modèle à effets fixes. Le non-rejet de l'hypothèse nulle confirme l'absence de différence systématique entre les estimateurs, assurant leur consistance et efficience, tout en validant l'exogénéité des variables explicatives. Ce résultat justifie le recours au modèle à effets aléatoires pour une estimation optimale des relations entre les variables environnementales et l'incidence des pathologies.

a) Modèle à effet fixe avec analyse période

Tableau 8 : *Résultats de la régression linéaire - Impact des variables environnementales sur les hospitalisations*

Nombredescas	Coef.	St.Err.	t-value	p-value	[95% Conf.	Interval]	Sig
vitesse_vent	-29.660	7.630	-3.89	0.000	-44.694	-14.626	***
temperature	-9.763	42.677	-0.23	0.819	-93.854	74.328	
humidite	-8.747	5.407	-1.62	0.107	-19.400	1.907	
precipitation	1.101	0.611	1.80	0.073	-0.104	2.305	*
TauxSO_2	-0.003	0.001	-2.10	0.037	-0.005	-0.0002	**
SO_2_Vitvent	0.000259	0.0000913	2.84	0.005	0.000079	0.000439	***
prec_so2	-0.0000127	5.91e-06	-2.14	0.033	-0.0000243	-1.01e-06	**
av_eruption	5.826	26.115	0.22	0.824	-45.630	57.283	
Constant	1327.005	1167.073	1.14	0.257	-972.622	3626.632	
Mean dependent var	149.319	SD dependent var	211.526				
R-squared	0.133	Number of obs	260				
F-test	4.370	Prob > F	0.000				
Akaike crit. (AIC)	3002.107	Bayesian crit. (BIC)	3034.154				
*** p<.01, ** p<.05, * p<.1							

Le modèle à effets fixes ($R^2 = 0.133$, $F = 4.370$, $p < 0.001$) identifie plusieurs associations significatives entre les variables environnementales et les cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires. La vitesse du vent ($\beta = -29.66$, $p < 0.01$) et les concentrations de SO_2

($\beta = -0.003$, $p < 0.05$) ont des effets négatifs sur le nombre de cas, modérés par des interactions significatives : une interaction positive entre SO_2 et la vitesse du vent ($\beta = 0.000259$, $p < 0.01$) et une interaction négative entre SO_2 et les précipitations ($\beta = -0.0000127$, $p < 0.05$). Les précipitations seules montrent une tendance marginale positive ($\beta = 1.101$, $p < 0.1$), tandis que la température et l'humidité restent non significatives. L'absence d'effet notable de la période avant l'éruption ($\beta = 5.826$, $p = 0.824$) suggère une constance des mécanismes étudiés. Ces résultats soulignent l'importance des interactions entre conditions météorologiques et SO_2 pour expliquer les impacts sanitaires des éruptions volcaniques.

b) Modèle à effet aléatoire avec analyse période

Tableau 9 : *Effet des variables environnementales sur le nombre d'hospitalisations : résultats de régression*

Nombredescas	Coef.	St.Err.	t-value	p-value	[95% Conf.	Interval]	Sig
vitesse_vent	-29.724	7.585	-3.92	0.000	-44.591	-14.857	***
temperature	-10.259	42.432	-0.24	0.809	-93.424	72.905	
humidite	-8.823	5.375	-1.64	0.101	-19.359	1.712	
precipitation	1.101	0.608	1.81	0.070	-0.090	2.292	*
TauxSO_2	-0.003	0.001	-2.12	0.034	-0.005	-0.0002	**
SO_2_Vitvent	0.00026	0.0000908	2.86	0.004	0.000082	0.000438	***
prec_so2	-0.0000127	5.88e-06	-2.15	0.031	-0.0000242	-1.14e-06	**
av_eruption	5.895	25.964	0.23	0.820	-44.994	56.784	
Constant	1330.177	1161.176	1.15	0.252	-945.686	3606.040	
Mean dependent var	149.319		SD dependent var	211.526			
Overall r-squared	0.023		Number of obs	260			
Chi-square	35.490		Prob > chi2	0.000			
R-squared within	0.133		R-squared between	0.024			
*** p<.01, ** p<.05, * p<.1							

Tableau 10 : *Hausman (1978) specification test*

	Coef.
Chi-square test value	2.897
P-value	0.716

Suite au test de Hausman, qui a donné des valeurs de probabilité supérieures à 0,05, nous avons opté pour un modèle à effets aléatoires pour analyser l'impact des émissions de SO_2 issues de l'éruption du volcan Nyiragongo sur l'incidence des maladies respiratoires et cardiovasculaires dans la zone d'étude. Les résultats du modèle ($n = 260$) montrent une significativité globale ($\chi^2 = 35.490$, $p < 0.001$), bien que la variance expliquée soit faible (R^2 global = 0.023). La vitesse du vent ($\beta = -29.724$, $p < 0.01$) est le prédicteur le plus significatif, suggérant un effet protecteur de la dispersion des polluants. Les concentrations de SO_2 ont un effet direct ($\beta = -0.003$, $p < 0.05$), modulé par des interactions avec la vitesse du vent (SO_2_Vitvent, $p < 0.01$) et les précipitations (prec_so2, $p < 0.05$), Ces interactions soulignent la complexité

des mécanismes par lesquels les émissions volcaniques affectent la santé publique. En particulier, l'effet du SO_2 varie selon les conditions météorologiques, suggérant que la dispersion atmosphérique et le lessivage par les précipitations jouent un rôle crucial dans la modulation de l'exposition aux polluants. Les précipitations montrent une tendance positive marginalement significative ($\beta = 1.101$, $p < 0.07$), tandis que la variable relative à l'éruption (av_eruption) n'a pas d'effet significatif ($\beta = 5.895$, $p = 0.82$), suggérant que les conditions environnementales immédiates sont plus déterminantes que la période de l'éruption.

Tableau 11 : *Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires des déterminants environnementaux des maladies à Goma*

	(1)	(2)	(3)	(4)
VARIABLES	mal_goma	mal_goma	mal_goma	mal_goma
vitesse_vent	-47.53***	-47.53***	-48.56***	-48.56***
	(15.12)	(15.12)	(15.47)	(15.47)
temperature	-13.61	-13.61	1.061	1.061
	(76.55)	(76.55)	(87.27)	(87.27)
humidite	-10.81	-10.81	-11.04	-11.04
	(10.92)	(10.92)	(11.00)	(11.00)
precipitation	1.365	1.365	1.378	1.378
	(1.248)	(1.248)	(1.256)	(1.256)
TauxSO2	-0.00338*	-0.00338*	-0.00390	-0.00390
	(0.00201)	(0.00201)	(0.00248)	(0.00248)
SO2_Vitvent	0.000360**	0.000360**	0.000385**	0.000385**
	(0.000170)	(0.000170)	(0.000185)	(0.000185)
prec_so2	-1.79e-05	-1.79e-05	-1.72e-05	-1.72e-05
	(1.19e-05)	(1.19e-05)	(1.22e-05)	(1.22e-05)
av_eruption			18.84	18.84
			(52.82)	(52.82)
Constant	1,816	1,816	1,548	1,548
	(2,243)	(2,244)	(2,377)	(2,378)
Observations	96	96	96	96
R-squared	0.214		0.215	
Number of id_maladie	8	8	8	8

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

L'analyse comparative des modèles à effets fixes et aléatoires montre une stabilité notable des coefficients, ce qui témoigne de la robustesse des relations. La vitesse du vent demeure le prédicteur principal, avec un effet négatif significatif constant ($\beta \approx -47.53$ en effets fixes et $\beta \approx -48.56$ en effets aléatoires, $p < 0.01$). L'interaction entre le SO_2 et la vitesse du vent reste significative dans les deux modèles ($p < 0.05$), soulignant un effet modérateur stable. Le taux de SO_2 est marginalement significatif dans les modèles à effets fixes ($\beta = -0.00338$, $p < 0.1$) mais perd sa significativité dans les effets aléatoires ($\beta = -0.00390$). Les variables météorologiques (température, humidité, précipitations) restent non significatives, bien que des variations apparaissent entre les modèles. L'introduction de la variable 'av_eruption' dans le

modèle à effets aléatoires n'améliore que marginalement le pouvoir explicatif. En somme, les modèles montrent une cohérence générale, avec une légère préférence pour les effets aléatoires.

Tableau 12 : *Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires des déterminants environnementaux des maladies à Karismbi*

VARIABLES	(1) mal_kar	(2) mal_kar	(3) mal_kar	(4) mal_kar
vitesse_vent	-20.77**	-20.77**	-22.66**	-22.66**
	(9.271)	(9.271)	(9.430)	(9.430)
temperature	-4.566	-4.566	22.28	22.28
	(46.95)	(46.95)	(53.18)	(53.18)
humidite	-5.792	-5.792	-6.223	-6.223
	(6.697)	(6.697)	(6.703)	(6.703)
precipitation	0.886	0.886	0.910	0.910
	(0.766)	(0.766)	(0.765)	(0.765)
TauxSO2	-0.00108	-0.00108	-0.00202	-0.00202
	(0.00123)	(0.00123)	(0.00151)	(0.00151)
SO2_Vitvent	0.000152	0.000152	0.000198*	0.000198*
	(0.000104)	(0.000104)	(0.000113)	(0.000113)
prec_so2	-1.13e-05	-1.13e-05	-9.95e-06	-9.95e-06
	(7.31e-06)	(7.31e-06)	(7.41e-06)	(7.41e-06)
av_eruption			34.46	34.46
			(32.19)	(32.19)
Constant	898.7	898.7	408.5	408.5
	(1,376)	(1,379)	(1,449)	(1,452)
Observations	96	96	96	96
R-squared	0.111		0.123	
Number of id_maladie	8	8	8	8

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

L'analyse comparative des modèles à effets fixes et à effets aléatoires révèle plusieurs points clés concernant les cas de maladies à Karisimbi. La vitesse du vent est un prédicteur robuste, avec un effet négatif légèrement plus marqué dans les modèles à effets aléatoires ($\beta = -22.66$, $p < 0.05$) par rapport aux modèles à effets fixes ($\beta = -20.77$, $p < 0.05$). L'interaction entre le SO_2 et la vitesse du vent devient significative dans les modèles à effets aléatoires ($\beta = 0.000198$, $p < 0.1$), ce qui suggère que la variabilité inter-individuelle capture mieux cette dynamique. La température montre des variations sensibles selon le modèle, mais reste non significative. L'introduction de la variable 'av_eruption' dans les modèles à effets aléatoires indique une augmentation des cas, bien que non statistiquement significative. Le pouvoir explicatif des modèles est modeste, avec un léger ajustement amélioré dans le modèle à effets aléatoires ($R^2 = 0.123$ contre 0.111 pour les effets fixes). Les autres variables (humidité, précipitations, taux de SO_2) demeurent non significatives, suggérant une robustesse des estimations. Globalement, la vitesse du vent est le facteur prédictif le plus stable, tandis que les autres variables montrent une sensibilité variable selon la spécification du modèle.

Tableau 13 : *Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires des déterminants environnementaux des maladies à Nyiragongo*

VARIABLES	(1) mal_nyir	(2) mal_nyir	(3) mal_nyir	(4) mal_nyir
vitesse_vent	-6.244	-6.244	-4.058	-4.058
	(8.752)	(8.752)	(8.870)	(8.870)
temperature	-17.56	-17.56	-48.60	-48.60
	(44.32)	(44.32)	(50.03)	(50.03)
humidite	-5.148	-5.148	-4.651	-4.651
	(6.322)	(6.322)	(6.305)	(6.305)
precipitation	0.929	0.929	0.901	0.901
	(0.723)	(0.723)	(0.720)	(0.720)
TauxSO2	-0.00128	-0.00128	-0.000187	-0.000187
	(0.00116)	(0.00116)	(0.00142)	(0.00142)
SO2_Vitvent	0.000117	0.000117	6.37e-05	6.37e-05
	(9.84e-05)	(9.84e-05)	(0.000106)	(0.000106)
prec_so2	-8.78e-06	-8.78e-06	-1.03e-05	-1.03e-05
	(6.90e-06)	(6.90e-06)	(6.97e-06)	(6.97e-06)
av_eruption			-39.85	-39.85
			(30.28)	(30.28)
Constant	832.6	832.6	1,399	1,399
	(1,299)	(1,299)	(1,363)	(1,363)
Observations	96	96	96	96
R-squared	0.127		0.145	
Number of id_maladie	8	8	8	8

Standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

L'analyse des modèles à effets fixes et aléatoires pour la région du Nyiragongo montre des patterns distincts dans la relation entre les variables environnementales et les cas de maladies. Les R^2 sont modestes mais comparables (0,127 et 0,145), suggérant une légère amélioration avec les effets aléatoires. Les variables météorologiques montrent des effets non significatifs, avec un effet négatif de la vitesse du vent, une température plus négative dans le modèle à effets aléatoires, et un effet stable de l'humidité. Les précipitations ont un effet positif modeste. Les interactions avec le SO_2 révèlent des effets subtils, le SO_2 ayant un effet plus négatif dans le modèle à effets fixes. L'introduction de la variable d'éruption suggère une possible réduction des cas avant l'éruption, bien que non significative. Les modèles, avec 96 observations sur 8 catégories de maladies, indiquent une constante élevée des cas, indépendamment des facteurs environnementaux.

Tableau 14 : *Hausman (1978) specification test*

	Coef.
Chi-square test value	0
P-value	1

L'application du test de spécification de Hausman (1978) à notre modèle révèle une statistique du Chi-deux de 0 associée à une p-value de 1. Ce résultat est statistiquement significatif et particulièrement éloquent. La p-value de 1, largement supérieure au seuil conventionnel de 0,05,

indique clairement que nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle du test de Hausman. Les résultats statistiques indiquent que l'estimateur à effets aléatoires est non seulement cohérent, mais aussi plus efficace pour notre analyse.

Ce résultat valide notre choix méthodologique d'utiliser un modèle à effets aléatoires pour étudier l'impact de l'éruption du Nyiragongo sur les hospitalisations, plutôt qu'un modèle à effets fixes. L'absence totale de différence systématique entre les deux types d'estimateurs (indiquée par la statistique du Chi-deux de 0) renforce la robustesse de nos résultats et confirme l'absence de biais d'endogénéité significatif dans notre spécification.

4.1.4 Disparités géographiques des hospitalisations dans les zones riveraines du Nyiragongo

Tableau 15 : *Analyse descriptive de la répartition des pathologies par zone géographique à Goma, Karisimbi et Nyiragongo*

	N	Mean	SD	Min	Max	N	Mean	SD	Min	Max
Asthme						**Asthme_bronchite**				
mal goma	12	12.5	4.681	6	22	mal goma	12	26	15.684	7	54
mal kar	12	1.917	1.505	0	5	mal kar	12	3.833	4.303	0	13
mal nyir	12	0.583	1.165	0	4	mal nyir	12	2.333	2.146	0	6
tot mal	12	15	6.453	7	28	tot mal	12	32.167	19.026	7	63
HTA						**Hypertension_arterielle**				
mal goma	12	110.333	22.572	80	154	mal goma	12	283.75	56.175	212	376
mal kar	12	20.667	6.513	13	30	mal kar	12	267.583	52.938	193	366
mal nyir	12	4.25	3.519	1	13	mal nyir	12	24.333	18.994	5	64
tot mal	12	135.25	21.201	107	172	tot mal	12	575.667	70.868	471	707
IRA						**Insuffisance_cardiaque**				
mal goma	12	396.583	214.870	173	917	mal goma	12	35.583	7.740	21	48
mal kar	12	179.417	38.988	138	253	mal kar	12	2.25	2.094	0	6
mal nyir	12	34.167	26.957	4	91	mal nyir	12	0.333	0.492	0	1
tot mal	12	610.167	233.462	321	1154	tot mal	12	38.167	8.953	22	53
Pneumonie_grave						**Pneumonie_simple**				
mal goma	12	233.167	134.592	59	531	mal goma	12	485.083	161.194	318	820
mal kar	12	70.25	39.722	35	187	mal kar	12	764.167	159.301	546	1121
mal nyir	12	10	4.348	3	17	mal nyir	12	266.167	165.263	84	606
tot mal	12	313.417	160.241	128	724	tot mal	12	1515.417	356.916	1190	2297

L'analyse détaillée de la distribution des différentes pathologies respiratoires et cardiovasculaires révèle des patterns distincts selon les zones géographiques autour du Nyiragongo. Les données utilisées couvrent la période allant de janvier 2021 à décembre 2021. Ces cas proviennent des dossiers médicaux des centres de santé et hôpitaux des zones étudiées (voir le details dans les tableaux en Annex).

Maladies respiratoires :

Les Infections Respiratoires Aiguës (IRA) représentent une charge majeure à Goma (M =

396.583 cas) et Karisimbi (M = 179.417 cas), tandis que la pneumonie simple prédomine à Karisimbi (M = 764.167 cas) et Goma (M = 485.083 cas). Les pneumonies graves sont également significatives à Goma (M = 233.167 cas). Les cas d'asthme et d'asthme bronchitique, bien que moins fréquents, restent notables, avec une prépondérance à Goma (M = 12.5 et 26.0 cas respectivement).

Maladies cardiovasculaires :
L'hypertension artérielle constitue la pathologie cardiovasculaire dominante, avec des moyennes élevées à Goma (M = 283.75, ET = 56.175) et Karisimbi (M = 267.583, ET = 52.938). Les cas d'HTA simple montrent également une distribution significative, particulièrement à Goma (M = 110.333, ET = 22.572). L'insuffisance cardiaque présente une incidence plus modérée, principalement concentrée à Goma (M = 35.583, ET = 7.740).

Disparités géographiques :
La distribution spatiale des pathologies montre une incidence élevée à Goma, suivie de Karisimbi, tandis que Nyiragongo enregistre les taux les plus bas. Ces disparités reflètent probablement des différences d'exposition aux émissions volcaniques, de densité de population et d'accès aux soins. Les écarts-types élevés pour certaines pathologies, notamment les IRA et les pneumonies, indiquent une variabilité temporelle liée aux fluctuations environnementales. Ces observations fournissent des bases solides pour prioriser les interventions sanitaires et adapter les stratégies de gestion des risques dans les zones impactées par le Nyiragongo.

Tableau 16 : *Distribution globale des cas de maladies par zone géographique autour du Nyiragongo*

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
mal goma	96	197.875	199.443	6	917
mal kar	96	163.76	253.145	0	1121
mal nyir	96	42.771	103.106	0	606
tot mal	96	404.406	503.478	7	2297

L'analyse descriptive de la distribution des cas de maladies ($n = 96$) montre des disparités marquées entre les zones étudiées. Goma enregistre la moyenne la plus élevée ($M = 197.875$ cas), avec une variabilité importante ($ET = 199.443$, min = 6, max = 917), reflétant une exposition accrue aux risques environnementaux. Karisimbi présente une charge de morbidité notable ($M = 163.76$ cas), avec une forte dispersion ($ET = 253.145$, max = 1121), suggérant des fluctuations temporelles ou différentielles d'exposition. Nyiragongo affiche l'incidence la plus faible ($M = 42.771$ cas, $ET = 103.106$), potentiellement liée à une densité de population moindre. Globalement, les cas totaux ($M = 404.406$, max = 2297) mettent en évidence des épisodes d'exposition aiguë, soulignant l'importance d'une analyse spatiale pour orienter les interventions sanitaires.

Tableau 17 : *Résultats de la régression des hospitalisations selon les zones géographiques*

Nombredescas	Coeff.	St.Err.	t-value	p-value	[95% Conf]	Sig
Goma	0	.	.	.	.	.
Karisimbi	-19.227	29.967	-0.64	0.522	-78.24	.
Nyiragongo	-143.849	31.177	-4.61	0.000	-205.244	***
Constant	197.875	20.724	9.55	0.000	157.064	***
Mean dependent var						149.319
SD dependent var						211.526
R-squared						0.086
Number of obs						260
F-test						12.032
Prob > F						0.000
Akaike crit. (AIC)						3503.837
Bayesian crit. (BIC)						3514.519

*** p<.01, ** p<.05, * p<.1

L'analyse de régression montre des différences notables dans la distribution des cas par zone géographique. Comparée à la zone 1 (référence : Zone de santé de Goma), la zone 2 (zone de santé de Karisimbi) présente une diminution non significative de 19.227 cas, tandis que la zone 3 (zone de santé de Nyiragongo) enregistre une réduction significative de 143.849 cas. La constante de 197.875 représente le nombre moyen de cas dans la zone de référence. Bien que le modèle soit statistiquement significatif ($F = 12.032$, $p < 0.001$), il explique seulement 8.6% de la variance totale, suggérant l'existence d'autres facteurs non inclus dans l'analyse.

4.1.5 Carte des Zones à Risque d'Exposition au SO_2

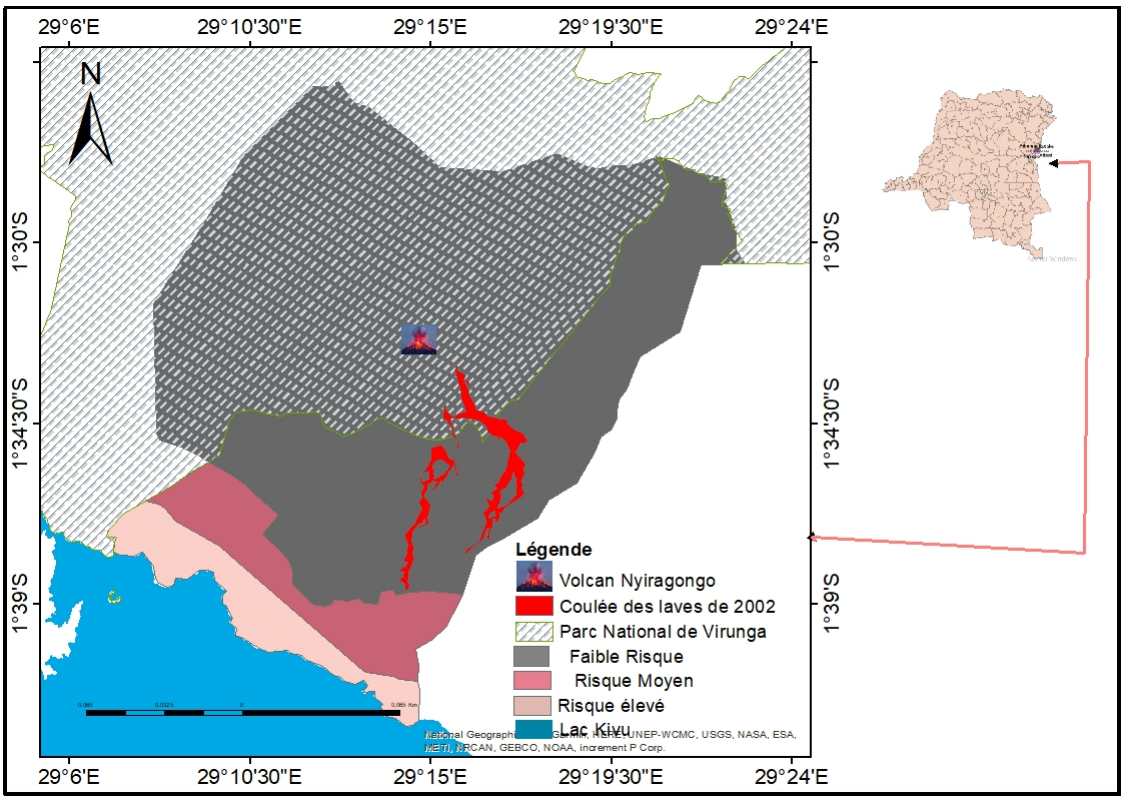


Figure 6 : *Carte des zones de risques face à l'exposition de SO_2*

Source : Élaboration personnelle à partir des données de la DPS.

La figure 6 illustre la cartographie des zones à risque d'exposition au SO_2, basée sur les hospitalisations moyennes enregistrées dans les zones de santé de Goma, Karisimbi et Nyiragongo. Cette analyse repose sur le shapefile des zones de santé fourni par la DPS.

4.1.6 Analyse croisée des entretiens avec les experts de la DPS et de l'OVG

Dans le cadre de cette étude, des entretiens ont été menés auprès d'experts de la Division Provinciale de la Santé (DPS) et de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) afin de mieux comprendre les défis, stratégies et recommandations liés à la surveillance des émissions volcaniques et à leur impact sur la santé publique.

L'objectif de cette analyse est de mettre en évidence les convergences et divergences entre ces deux institutions, l'une étant en charge du suivi sanitaire des populations et l'autre spécialisée dans la surveillance des phénomènes volcaniques.

La comparaison des résultats des entretiens est présentée sous forme de tableau pour faciliter l'identification des principaux défis rencontrés, des stratégies mises en place et des recommandations formulées.

Tableau 18 : *Comparaison des entretiens avec la DPS et l'OVG*

Thèmes	Expert DPS	Expert OVG
Défis identifiés		
Infrastructure	Connectivité internet limitée, transmission des données ralentie	Stations de mesure en panne, manque d'infrastructures modernes
Contraintes financières	Manque de ressources pour le suivi et la riposte	Besoin d'équipements supplémentaires et de financements pour la surveillance
Insécurité	Départ du personnel de santé, instabilité récurrente	Surveillance difficile dans certaines zones en raison du conflit
Coordination	Participation inégale des partenaires dans les réunions stratégiques	Manque de synergie avec les autorités sanitaires pour le partage des données
Stratégies mises en place		
Communication	Usage de WhatsApp pour assurer la transmission rapide des informations	Collecte de données via spectromètres et capteurs en zone accessible
Formation	Sessions régulières de formation pour compenser le turnover du personnel	Sensibilisation des techniciens et formation continue sur l'analyse des gaz

4.2 Discussion des résultats

Les résultats obtenus dans cette étude mettent en évidence des complexes dynamiques entre les concentrations de SO_2, les conditions météorologiques, et la répartition géographique des impacts sanitaires dans les zones riveraines du Nyiragongo. En discutant les principales observations par tableau, nous examinons comment ces facteurs interagissent pour expliquer l'évolution des hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires, tout en les confrontant à la littérature existante.

4.2.1 Variation des hospitalisations liées aux maladies respiratoires et cardiovasculaires en fonction des concentrations de SO_2

Analyse des tendances temporelles

L'analyse des variations mensuelles des hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires et l'impact des concentrations de SO_2 ne montre pas de résultats significatifs dans les deux modèles étudiés ($p > 0{,}05$, $R^2 = 0{,}025$ et $R^2 = 0{,}000$). Ce faible pouvoir explicatif, similaire aux observations de Caillaud et al.(D. Caillaud a et al., 2019) dans des zones industrielles ($R^2 = 0{,}02$), contraste avec des études comme celle de Michellier et al., (2020a) qui rapporte une saisonnalité marquée ($R^2 = 0{,}35$, $p < 0{,}01$). Ces divergences suggèrent que, dans le cas du Nyiragongo, les événements éruptifs ponctuels ou des facteurs locaux tels que la topographie et les caractéristiques socio-environnementales pourraient jouer un rôle prédominant, comme l'ont également noté de (C. M. Balagizi et al., 2018).

Par ailleurs Hansell et Oppenheimer, (2004) ont indiqué qu'une concentration élevée de SO_2 (> 500 µg/m³) peut entraîner une augmentation significative des hospitalisations, en particulier lorsque les conditions météorologiques, comme une faible vitesse du vent ou une forte humidité, limitant la dispersion des polluants. L'absence d'associations significatives dans ce contexte pourrait donc refléter soit une exposition insuffisamment élevée ou mal réalisée, soit une complexité contextuelle non capturée par le modèle.

4.2.2 Influence des conditions météorologiques sur l'effet du SO_2 sur les hospitalisations

Analyse descriptive des paramètres environnementaux

L'analyse des données environnementales montre des concentrations de SO_2 variables (M = 66 972 tonnes, ET = 40 383,933), avec des photos allant jusqu'à 144 015,73 tonnes, ce qui souligne la complexité des émissions du volcan Nyiragongo. Les autres facteurs, comme la température (M = 20,44°C) et l'humidité (M = 77,5%), restent relativement stables, mais la précipitation (M = 86,43 mm) et la vitesse du vent (M = 12,92 m/s) montre des variations significatives, influençant la dispersion et le dépôt des gaz volcaniques. Ces conditions ont été associées par Komorowski et al., (2004)à des variations dans la distribution des polluants autour des volcans.

Modèles de régression : Effets fixes et aléatoires

Les modèles de régression montrent que la vitesse du vent ($\beta = -29,387$, $p < 0,001$) est un facteur clé dans la dispersion des gaz volcaniques, notamment ainsi l'exposition aux pol-

luants. Cette observation est en ligne avec Diaf et Bouchaour, qui ont observé que des vents plus forts réduisent les concentrations de SO_2. L'interaction entre SO_2 et la vitesse du vent ($\beta = 0,000259$, $p < 0,01$) montre que si le vent disperse les gaz, il peut aussi prolonger l'exposition dans certaines zones en aval, comme l'ont suggéré Tedesco et al., (2010). Les résultats montrent également une tendance marginale à l'augmentation des cas de maladies ($\beta = 1,101$, $p < 0,1$), mais l'effet négatif du SO_2 sur ces symptômes ($\beta = -0,0000127$, $p < 0,05$) suggère un phénomène de "lessivage atmosphérique" où les pluies diminuent les concentrations de SO_2 dans l'air (Delmelle et al., 2001).

4.2.3 Disparités géographiques des hospitalisations dans les zones riveraines du Nyiragongo

4.2.3.1 Analyse descriptive des pathologies par zone géographique et Comparaison globale entre les zones géographiques

Les hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires varient significativement Goma, avec sa forte densité de population, enregistre les cas les plus élevés de pathologies respiratoires, soit 485 083 cas de pneumonie simple et 396 583 cas d'infections respiratoires aiguës (IRA). Karisimbi suit avec 764 167 cas de pneumonie simple, tandis que Nyiragongo, malgré sa proximité avec le volcan, affiche des taux bien plus faibles, avec une moyenne de 42 771 cas. Ces écarts s'expliquent principalement par la densité de population : les zones densément peuplées, comme Goma et Karisimbi, ont une exposition accrue aux gaz volcaniques, amplifiant les risques sanitaires. À l'inverse, Nyiragongo, moins peuplée et disposant de moins d'aires de santé, enregistre naturellement un nombre absolu de cas plus bas. Ce phénomène est corroboré par les travaux de Michellier et al., (2020) , qui montre que la population moins dense limite la propagation des maladies.

Les conditions météorologiques jouent également un rôle important. À Nyiragongo, les gaz volcaniques se dispersent plus rapidement grâce à la direction des vents dominants (du sud-est vers le nord-ouest) et à la topographie locale, ce qui réduit l'accumulation des polluants dans la région (Diaf & Bouchaour, s. d.). Ainsi, bien que le Nyiragongo soit géographiquement plus exposé, les facteurs environnementaux et la faible densité de population expliquent en partie les taux d'hospitalisation plus faiblement observés.

4.2.3.2 Résultats de la régression : Effets des zones géographiques sur les hospitalisations

Les hospitalisations à Nyiragongo sont significativement plus faibles ($\beta = -143,849$, $p < 0,001$) par rapport à Goma, qui reste la zone la plus affectée. L'interaction SO_2-vitesse du vent

positif ($\beta = 0,000252$, $p < 0,01$) souligne un mécanisme de dispersion prolongée en aval, comme observé par Tedesco et al., (2010).

Les IRA et l'hypertension dominent les pathologies, avec des proportions similaires à celles documentées par Blong, (1984) : 32% pour les IRA et 16% pour l'hypertension. Ces variations géographiques entraînent une combinaison de densité démographique, de conditions météorologiques et de proximité éruptive, en accord avec les conclusions de (Beckett et al., 2020) .

4.3 Vérification des hypothèses

Cette section examine la validité des hypothèses formulées à la lumière des résultats obtenus. Les analyses effectuées dans les sections précédentes permettent d'évaluer si ces hypothèses sont confirmées ou rejetées, en s'appuyant sur les tableaux et résultats pertinents.

L'hypothèse centrale, selon laquelle l'éruption volcanique du Nyiragongo en 2021 entraînerait une augmentation significative des hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires en lien avec les concentrations de SO_2, est **globalement rejetée**. Bien que des incidences notables de maladies respiratoires et cardiovasculaires aient été observées dans les zones riveraines pendant et après l'éruption, les résultats statistiques n'indiquent pas de lien significatif entre ces maladies et les concentrations de SO_2. Le tableau 3et 4 montrent une tendance générale sans relation claire entre les périodes de fortes concentrations de SO_2 et les hospitalisations. Cette absence de lien suggère que d'autres facteurs, tels que des événements éruptifs ponctuels ou des influences météorologiques et topographiques, pourraient jouer un rôle plus important, nécessitant des analyses supplémentaires pour mieux comprendre la dynamique de ces impacts sanitaires.

Quant à l'hypothèse secondaire 1, qui suggère que les concentrations de SO_2 plus élevées pendant l'éruption sont associées à une augmentation significative des hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires, ***elle n'a pas été totalement vérifiée***. Les résultats du tableau 3 ne montrent pas de variation significative des hospitalisations par mois ($p > 0.05$), et le faible R^2 du modèle (0.025) indique que d'autres facteurs influencent la dynamique des hospitalisations. Par conséquent, bien que l'hypothèse ne soit pas rejetée, les données ne permettent pas de confirmer pleinement cette relation.

En revanche, l'hypothèse secondaire 2, selon laquelle l'impact des concentrations élevées de SO_2 sur le nombre d'hospitalisations est amplifié par des conditions météorologiques spécifiques, telles qu'une faible vitesse du vent et une faible intensité des précipitations, est ***confirmée***. Le modèle de régression multiple, présenté dans le tableau 6 , montre un effet protecteur significatif de la vitesse du vent ($\beta = -29.387$, $p < 0.001$), réduisant les hospitalisations en dispersant les polluants. Les précipitations modèrent également l'impact des concentrations de SO_2, comme le montre l'effet significatif sur la variable prec-SO_2($\beta = -0.0000129$, $p < 0.05$).

De plus, les interactions entre SO_2, vent et précipitations sont significatives, soulignant l'importance de ces facteurs environnementaux dans l'impact des émissions volcaniques sur la santé publique.

Enfin, **l'hypothèse secondaire 3**, qui stipule que les zones situées à proximité immédiate du volcan, ainsi que celles situées dans les directions des vents dominants, présentent des niveaux de risque élevé de contamination, tandis que les zones éloignées présentent des risques moyens à faibles, est ***confirmée en partie***. L'analyse géographique et les résultats du tableau15 montrent une incidence plus élevée des hospitalisations à Goma (M = 197.875 cas) et Karisimbi (M = 163.76 cas), tandis que Nyiragongo affiche des taux significativement plus faibles (M = 42.771 cas). De plus, les résultats de la régression, présentés dans le tableau *"Résultats de la régression des hospitalisations selon les zones géographiques"*, indiquent une réduction significative des hospitalisations dans la zone de Nyiragongo par rapport à Goma ($\beta = -143.849$, $p < 0.001$), confirmant que les zones proches du volcan ne présentent pas un risque plus élevé. Cependant, l'effet des vents dominants n'a pas été spécifiquement testé, ce qui nécessite des investigations complémentaires.

En conclusion, l' hypothèse secondaire 2 a été confirmées, tandis que leshypothèses secondaire 1 et n'ont pas pu être totalement validée en raison de l'absence d'un lien direct et significatif entre les concentrations de SO_2 et les hospitalisations et les données sur la direction du vent au sommet de Nyiragongo. Ces résultats soulignent l'importance des interactions entre les facteurs environnementaux et les émissions volcaniques, tout en mettant en évidence la nécessité d'une analyse approfondie pour tester certaines hypothèses non vérifiées.

Conclusions et Perspectives

1 Conclusion

Le mémoire intitulé *« Effets des gaz du volcan Nyiragongo sur la santé des populations riveraines »* avait pour objectif principal d'évaluer l'impact de l'éruption volcanique du Nyiragongo en 2021 sur la santé publique. L'étude s'est concentrée sur l'analyse de l'évolution des hospitalisations pour maladies respiratoires et cardiovasculaires, en relation avec les concentrations de dioxyde de soufre (SO_2) avant, pendant et après l'éruption.

Dans cette perspective, il s'agissait d'examiner l'influence des concentrations de SO_2sur les maladies respiratoires et cardiovasculaires au cours des différentes phases de l'éruption, tout en tenant compte des interactions avec des conditions météorologiques telles que la vitesse du vent , et les précipitations, qui entraînent la dispersion et l'impact des gaz. L'étude a également exploré les disparités géographiques en comparant les cas de maladies enregistrés dans les zones de santé de Goma, Karisimbi et Nyiragongo, en fonction des niveaux d'exposition aux émissions de gaz volcaniques.

Ces objectifs reprennent une volonté d'approfondir la compréhension des risques sanitaires associés aux émissions volcaniques et de proposer des stratégies efficaces pour renforcer la résilience des populations les plus vulnérables.

Synthèse des résultats principaux

L'analyse des tendances temporelles ont révélé une absence de corrélation significative entre les variations mensuelles des cas de maladies et les émissions de SO_2 ($R^2 = 0{,}025$, $p > 0{,}05$). Cette observation diffère des études précédentes sur la pollution industrielle et suggère que les émissions du Nyiragongo suivent une dynamique particulière, principalement influencée par les facteurs environnementaux et les événements éruptifs plutôt que par des variations saisonnières régulières.

L'étude des conditions météorologiques ont démontré leur rôle crucial dans la dispersion des gaz volcaniques. La vitesse du vent apparaît comme un facteur déterminant ($\beta = -29,387$, $p < 0,001$), capable de disperser les polluants mais aussi de prolonger l'exposition dans certaines zones. Les précipitations contribuent à un effet de "lessivage atmosphérique", réduisant les concentrations de SO_2 dans l'air ($\beta = -0,0000127$, $p < 0,05$).

L'analyse des disparités géographiques révèle des variations significatives entre les zones étudiées. Goma et Karisimbi enregistrent les nombres de cas les plus élevés, principalement en

raison de leur forte densité de population, tandis que Nyiragongo, malgré sa proximité avec le volcan, présente des taux plus faibles. Cette distribution s'explique par une combinaison de facteurs incluant la densité démographique, les conditions météorologiques locales et la topographie, qui influencent la dispersion des polluants et l'exposition des populations.

2 Lacunes, limites et perspectives de recherche

Malgré les progrès importants réalisés dans la compréhension des impacts des gaz volcaniques sur la santé publique, plusieurs lacunes notables persistent, notamment l'absence d'études longitudinales, le manque d'intégration des données environnementales dans les systèmes de surveillance sanitaire, et la variabilité des impacts selon les caractéristiques démographiques et socio-économiques. Ces lacunes mettent en évidence la nécessité de recherches plus approfondies et de stratégies d'intervention améliorées pour mieux protéger les populations exposées.

Limites de l'étude

Cette étude a été limitée par l'accès restreint aux données sur les concentrations de gaz volcaniques dans les zones plus éloignées de Goma, ce qui a réduit la possibilité d'évaluer les impacts sanitaires dans des localités plus éloignées mais exposées aux panaches gazeux. De plus, l'utilisation d'une seule station de mesure pour les gaz volcaniques et les données météorologiques a pu introduire des biais dans l'analyse spatiale des niveaux d'exposition.

Une autre limite importante réside dans l'absence de suivi longitudinal des patients hospitalisés pour maladies respiratoires et cardiovasculaires. L'étude s'est concentrée sur les données d'hospitalisation au cours de l'année 2021, sans évaluer les impacts à long terme des expositions aux gaz volcaniques sur la santé des populations affectées. Cela laisse un champ inexploitable pour analyser les effets chroniques des gaz sur la santé publique.

Enfin, les données qualitatives obtenues à travers des entretiens avec des experts ont été limitées en nombre et en diversité. Une représentation plus large des acteurs locaux, notamment les professionnels de la santé en première ligne et les populations directement exposées, pourrait enrichir les conclusions en fournissant des perspectives complémentaires sur la gestion des risques et les mécanismes de résilience communautaire.

Pistes de recherche future

a)Besoin de recherches longitudinales

Le manque d'études évaluant les effets chroniques de l'exposition aux gaz volcaniques reste une lacune majeure. Les études existantes se concentrent principalement sur les impacts à court terme des éruptions volcaniques et des émissions de gaz, souvent limitées à des périodes de

crise immédiate. Une approche longitudinale permettrait de mieux comprendre l'évolution des pathologies respiratoires et cardiovasculaires liées à une exposition prolongée aux gaz volcaniques, ainsi que leurs impacts sur la qualité de vie des personnes touchées.

b)Intégration des connaissances locales

Les savoirs traditionnels et les observations locales sur les comportements volcaniques et les effets des émissions de gaz sont souvent sous-utilisés dans les approches scientifiques et politiques. L'intégration de ces connaissances locales pourrait améliorer la précision des modèles de prévision et des plans d'évacuation.

c)Variabilité des impacts selon les caractéristiques démographiques et socio-économiques

Les populations vivant dans des zones moins développées ou ayant un accès limité aux soins médicaux peuvent être plus vulnérables aux impacts des gaz volcaniques. Une meilleure prise en compte des facteurs socio-économiques dans les études permettrait de développer des stratégies de mitigation adaptées.

Perspectives et recommandations

Les futures recherches doivent cibler la surveillance des gaz volcaniques, notamment la prédiction des éruptions et l'amélioration des interventions. La collaboration internationale et pluridisciplinaire est essentielle pour développer des solutions durables et renforcer la résilience des populations exposées.

1. **Amélioration de la surveillance sanitaire**
   - Mise en place d'un système de surveillance intégré combinant des capteurs environnementaux et des données hospitalières.
   - Renforcement de la collaboration entre les autorités sanitaires, l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) et les organismes humanitaires.
2. **Développement de modèles prédictifs**
   - Conception de modèles permettant d'anticiper les périodes et zones à risque.
   - Intégration de ces modèles dans des systèmes d'alerte précoce.
3. **Approfondissement des recherches sur les impacts chroniques**
   - Réalisation d'études longitudinales.
   - Analyse des interactions entre polluants volcaniques et conditions socio-économiques.
4. **Renforcement de la résilience communautaire**
   - Sensibilisation des populations aux risques sanitaires.
   - Formation du personnel de santé sur les pathologies associées aux émissions volcaniques.
5. **Innovations dans la gestion des risques volcaniques**

- Intégration des données environnementales et sanitaires dans les politiques publiques.
- Utilisation de la cartographie SIG pour identifier les zones à risque.

6. **Collaboration internationale et multidisciplinaire**
   - Coopération pour le partage des données et technologies de surveillance.
   - Synergie entre experts en volcanologie, épidémiologie et gestion des risques.

Bibliographie

Abbott, P. M., Niemeier, U., Timmreck, C., Riede, F., McConnell, J. R., Severi, M., Fischer, H., Svensson, A., Toohey, M., Reinig, F., & Sigl, M. (2021). Volcanic climate forcing preceding the inception of the Younger Dryas : Implications for tracing the Laacher See eruption. *Quaternary Science Reviews*, *274*, 107260. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107260

Auker, M. R., Sparks, R. S. J., Siebert, L., Crosweller, H. S., & Ewert, J. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, *2*(1), 2. https://doi.org/10.1186/2191-5040-2-2

Balagizi, C. M., Kies, A., Kasereka, M. M., Tedesco, D., Yalire, M. M., & McCausland, W. A. (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, F. M., Kies, A., Kasereka, M. M., Tedesco, D., Yalire, M. M., & McCausland, W. A. (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

Baxter, P. J., & Gresham, A. (2004). Deaths and injuries in the eruption of galeras volcano, colombia, 14 january 1993. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *77*(1), 325-338. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00103-5

Beckett, F. M., Witham, C. S., Leadbetter, S. J., Crocker, R., Webster, H. N., Hort, M. C., Jones, A. R., Devenish, B. J., & Thomson, D. J. (2020). Atmospheric dispersion modelling at the london VAAC : a review of developments since the 2010 eyjafjallajökull volcano ash cloud. *Atmosphere*, *11*(4), 352. https://doi.org/10.3390/atmos11040352

Bernadette, L., Tamar, E., & Claire, J. H. (2015). *Gas_pamphlet_French.pdf*. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://ivhhn.org/uploads/Gas_pamphlet_French.pdf

Birimwiragi Namogo, D., & Catas, U. d. L.
bibinitperiod M. s. g. r. (2018). Estimation de la valeur économique du bâti de la ville de Goma face aux coulées de lave du Volcan Nyiragongo telles que survenues en 2002 : les cas des quartiers Murara et Virunga [Accepted : 2018-09-14T02 :05 :45Z Publisher : Université de Liège, Liège, Belgique Section : Université de Liège]. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/5568

Bobrowski, N., Giuffrida, G., Yalire, M., Lübcke, P., Arellano, S., Balagizi, C., Calabrese, S., Galle, B., & Tedesco, D. (2017). Multi-component gas emission measurements of the active lava lake of nyiragongo, DR congo. *Journal of African Earth Sciences*, *134*, 856-865. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.07.010

Carn, S. A. (2003). ERUPTIVE AND PASSIVE DEGASSING OF SULPHUR DIOXIDE AT NYIRAGONGO VOLCANO (d. r. CONGO) : THE 17 JANUARY 2002 ERUPTION AND ITS AFTERMATH.

Centre, U. W. H. (2023). *Virunga National Park* [UNESCO World Heritage Centre]. Récupérée novembre 17, 2024, à partir de https://whc.unesco.org/en/list/63/

Chakrabarti, R., Sims, K. W., Basu, A. R., Reagan, M., & Durieux, J. (2009). Timescales of magmatic processes and eruption ages of the nyiragongo volcanics from 238u-230th-226ra-210pb disequilibria. *Earth and Planetary Science Letters*, *288*(1), 149-157. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.017

Clerbaux, C. (2018, février 12). *Changement climatique : quel est le rôle des éruptions volcaniques ?* [The conversation]. Récupérée août 11, 2024, à partir de http://theconversation.com/changement-climatique-quel-est-le-role-des-eruptions-volcaniques-91681

Crandell, D. R., & Hoblitt, R. P. (1986). Lateral blasts at mount st. helens and hazard zonation. *Bulletin of Volcanology*, *48*(1), 27-37. https://doi.org/10.1007/BF01073511

Cuoco, E., Tedesco, D., Poreda, R. J., Williams, J. C., De Francesco, S., Balagizi, C., & Darrah, T. H. (2013). Impact of volcanic plume emissions on rain water chemistry during the january 2010 nyamuragira eruptive event : implications for essential potable water resources. *Journal of Hazardous Materials*, *244-245*, 570-581. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.055

D. Caillaud a, A. Bourin c, T. Chinet d, A. Colette e, F. De Blay f, G. Dixsaut g, B. Housset h, J. Kleinpeter i j, L. Malherbe e, I. Roussel k, ... (2019). La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire en france. document d'experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la société de pneumologie de langue française (SPLF) [Publisher : Elsevier Masson]. *Revue des Maladies Respiratoires*, *36*(10), 1150-1183. https://doi.org/10.1016/j.rmr.2019.10.004

Delfosse, T., Delmelle, P., & Delvaux, B. (2006). Sulphate sorption at high equilibrium concentration in andosols. *Geoderma*, *136*(3), 716-722. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.05.009

Delmelle, P., Stix, J., Bourque, C. P.-A., Baxter, P. J., Garcia-Alvarez, J., & Barquero, J. (2001). Dry deposition and heavy acid loading in the vicinity of masaya volcano, a major sulfur and chlorine source in nicaragua. *Environmental Science & Technology*, *35*(7), 1289-1293. https://doi.org/10.1021/es000153m

Dhillon, H., & Sasidharan, S. (2021). Psychological impact of a volcano eruption - Mount Nyiragongo. [Publisher : Egyptian Psychiatric Association]. *Egyptian Journal of Psychiatry*, *42*(3), 176-176. Récupérée novembre 17, 2024, à partir de https://go.gale.com/ps/i.do?p=HRCA&sw=w&issn=11101105&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA677803092&sid=googleScholar&linkaccess=abs

Diaf, N., & Bouchaour, M. (s. d.). Paramètres Influençant la Dispersion des Polluants Gazeux.

Durand, M., & Grattan, J. (2001). Effects of volcanic air pollution on health. *The Lancet*, *357*(9251), 164. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)03586-8

Edward, V. (2023, octobre). *Global Volcanism Program | Nyiragongo*. Récupérée novembre 17, 2024, à partir de https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=223030

Gaillard, J.-C., & Le Masson, V. (2007). Traditional societies' response to volcanic hazards in the philippines : implications for community-based disaster recovery. *Mountain Research and Development*, *27*(4), 313-317. https://doi.org/10.1659/mrd.0949

Global Volcanism Program. (1977). Report on nyiragongo (DR congo) (D. Squires, Éd.). *Scientific Event Alert Network Bulletin*, *2*(3). https://doi.org/10.5479/si.GVP.NSEB197703-223030

Guillaume, L. H. (2015, novembre 12). *Relations volcanisme et climat à différentes échelles de temps — Site des ressources d'ACCES pour enseigner les Sciences de la Vie et de la Terre*. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://acces.ens-lyon.fr/acces/logiciels/videotheque/relations-volcanisme-et-climat-a-differentes-echelles-de-temps

Hansell, A. L., Horwell, C. J., & Oppenheimer, C. (2006). The health hazards of volcanoes and geothermal areas. *Occupational and Environmental Medicine*, *63*(2), 149-156. https://doi.org/10.1136/oem.2005.022459

Hansell, A., & Oppenheimer, C. (2004). Health hazards from volcanic gases : a systematic literature review. *Archives of Environmental Health : An International Journal*, *59*(12), 628-639. https://doi.org/10.1080/00039890409602947

Harrison, P., Minnis, E. F., Stowe, L. L., Gibson, G. G., Denn, F. M., Doelling, D. R., & Smith, W. L. (1993). Radiative Climate Forcing by the Mount Pinatubo Eruption [Publisher : American Association for the Advancement of Science]. *Science*, *259*(5100), 1411-1415. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://www.jstor.org/stable/2880784

Hinatea, C. (2021, avril 17). *La pollution volcanique responsable de maladies respiratoires ?* [Tameteo.com | Meteored] [Section : Actualité]. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://www.tameteo.com/actualites/actualite/pollution-eruption-volcanique-et-augmentation-des-cas-de-maladies-respiratoires.html

Jevrejeva, S., Moore, J. C., & Grinsted, A. (2003). Influence of the arctic oscillation and el niño-southern oscillation (ENSO) on ice conditions in the baltic sea : the wavelet approach. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, *108*, 2003JD003417. https://doi.org/10.1029/2003JD003417

Josue, O. L., Donatien, K. K., & Nabintu, N. Y. (2024). SANTÉ MENTALE DES SINISTRÉS DE VOLCAN NYIRAGONGO EN PROVINCE DU NORD KIVU DE LA RDC (APPROCHE CLINIQUE DES CAS) [Number : 4]. *European Journal of Social Sciences Studies*, *10*(4). https://doi.org/10.46827/ejsss.v10i4.1852

Kasereka, M. M., Yalire, M., Minani, A., Samba, C. V., Bisusa, A. K., Kamathe, E., Mashagiro, N., Syauswa, M., & Kavuke, J. (2017). LES RISQUES LIES AUX MAZUKU DANS LA REGION DE GOMA, REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO (RIFT

EST-AFRICAIN) [Number : 2]. *Journal of Water and Environmental Sciences*, *1*(2), 164-174. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://revues.imist.ma/index.php/jwes/article/view/8722

Kelman, I., Gaillard, J. C., Lewis, J., & Mercer, J. (2016). Learning from the history of disaster vulnerability and resilience research and practice for climate change. *Natural Hazards*, *82*, 129-143. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2294-0

Kilian, M., Brinkop, S., & Jöckel, P. (2020). Impact of the eruption of mt pinatubo on the chemical composition of the stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(20), 11697-11715. https://doi.org/10.5194/acp-20-11697-2020

Komorowski, J. C. (2002). The January 2002 eruption - 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 [Publisher : Istituti editoriali e poligrafici internazionali]. *Acta vulcanologica : Journal of the National Volcanicn Group of Italy : 14/15, 1/2, 2002/2003 [sample copy]*, 1000-1035. https://doi.org/10.1400/19077

Komorowski, J.-C., Morin, J., Jenkins, S., & Kelman, I. (2018). Challenges of volcanic crises on small islands states. In C. J. Fearnley, D. K. Bird, K. Haynes, W. J. McGuire & G. Jolly (Éd.), *Observing the volcano world : volcano crisis communication* (p. 353-371). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/11157_2015_15

Lacroix, G., & Danger, M. (2008). Des réseaux trophiques au fonctionnement des écosystèmes lacustres : vers une intégration de l'hétérogénéité et de la complexité. *Revue des sciences de l'eau*, *21*(2), 155-172. https://doi.org/10.7202/018464ar

Lowenstern, J. B., Wallace, K., Barsotti, S., Sandri, L., Stovall, W., Bernard, B., Privitera, E., Komorowski, J.-C., Fournier, N., Balagizi, C., & Garaebiti, E. (2022). Guidelines for volcano-observatory operations during crises : recommendations from the 2019 volcano observatory best practices meeting. *Journal of Applied Volcanology*, *11*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s13617-021-00112-9

Mafuko Nyandwi, B., Kervyn, M., Muhashy Habiyaremye, F., Kervyn, F., & Michellier, C. (2023). To go or not to go when the lava flow is coming ? understanding evacuation decisions of goma inhabitants during the 2021 nyiragongo eruption crisis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *444*, 107947. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107947

Mavonga, T., Zana, N., & Durrheim, R. (2010). Studies of crustal structure, seismic precursors to volcanic eruptions and earthquake hazard in the eastern provinces of the democratic republic of congo. *Journal of African Earth Sciences*, *58*(4), 623-633. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.08.008

Michellier, C., Katoto, P. d. M. C., Dramaix, M., Nemery, B., & Kervyn, F. (2020). Respiratory health and eruptions of the Nyiragongo and Nyamulagira volcanoes in the De-

mocratic Republic of Congo : a time-series analysis. *Environmental Health*, *19*(1), 62. https://doi.org/10.1186/s12940-020-00615-9

Morrison, A. A., Whittington, A., Smets, B., Kervyn, M., & Sehlke, A. (2020). The rheology of crystallizing basaltic lavas from nyiragongo and nyamuragira volcanoes, d.r.c. [Number : 1]. *Volcanica*, *3*(1), 1-28. https://doi.org/10.30909/vol.03.01.0128

Mukwege Buhendwa, V. (2018, octobre). *Gestion de l'information dans la surveillance des volcans Nyamulagira et Nyiragongo à l'Est de la République Démocratique du Congo*. Récupérée novembre 17, 2024, à partir de https://hal.science/hal-01901969

NASA/NOAA. (2021, juin 22). *Mt. nyiragongo eruption 2021 | NASA applied sciences*. Récupérée août 15, 2024, à partir de http://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/disasters/disasters-activations/mt-nyiragongo-eruption-2021

Nations, U. (2000). *Millennium Development Goals (MDGs)*. [Publisher : United Nations]. Récupérée août 12, 2024, à partir de https://www.un.org/millenniumgoals/environ.shtml

Nations, U. (2015). *Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Récupérée août 12, 2024, à partir de https://sdgs.un.org/goals/goal3

Paton, D., Millar, M., & Johnston, D. (2001). Community resilience to volcanic hazard consequences. *Natural Hazards*, *24*(2), 157-169. https://doi.org/10.1023/A:1011882106373

Platz, T., Foley, S. F., & André, L. (2004). Low-pressure fractionation of the nyiragongo volcanic rocks, virunga province, d.r. congo. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *136*(3), 269-295. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.05.020

Poppe, S., Smets, B., Fontijn, K., Rukeza, M. B., De Marie Fikiri Migabo, A., Milungu, A. K., Namogo, D. B., Kervyn, F., & Kervyn, M. (2016). Holocene phreatomagmatic eruptions alongside the densely populated northern shoreline of lake kivu, east african rift : timing and hazard implications. *Bulletin of Volcanology*, *78*(11), 82. https://doi.org/10.1007/s00445-016-1074-8

RDC, U. (2021, juillet 8). *Éruption du volcan nyiragongo : les conséquences | UNICEF*. Récupérée août 15, 2024, à partir de https://www.unicef.org/drcongo/en/stories/nyiragongo-volcano-eruption-the-aftermath

Reliefweb. (2021). *UNICEF Democratic Republic of the Congo Humanitarian Situation Report No. 5 : May 2021*. Récupérée janvier 24, 2025, à partir de https://reliefweb.int/report/democratic-republic-congo/unicef-drc-humanitarian-situation-report-no-5-may-2021

Rivet, F. (2013). 14 au 21 avril 2010 : fermeture de l'espace aérien européen [Publisher : Éditions Glyphe]. *Outre-Terre*, *35-36*(1), 61-76. https://doi.org/10.3917/oute.035.0061

Robin, G. A. (2021, mai 26). *Le Nyiragongo, volcan le plus dangereux d'Afrique, est entré en éruption* [National Geographic] [Section : Sciences]. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://www.nationalgeographic.fr/sciences/le-nyiragongo-volcan-le-plus-dangereux-dafrique-est-entre-en-eruption

Robock, A. (2003). Introduction : mount pinatubo as a test of climate feedback mechanisms. In A. Robock & C. Oppenheimer (Éd.), *Geophysical monograph series* (p. 1-8, T. 139). American Geophysical Union. https://doi.org/10.1029/139GM01

Sadiki, A. T., Kyambikwa, A. M., Namogo, D. B., Diomi, L. N., Munguiko, O. M., Balezi, G. M., Sifa, L. L., Nzamu, S. M., Mashagiro, N., Balagizi, C. M., & Mavonga, G. T. (2023). Analysis of the seismicity recorded before the may 22, 2021 eruption of nyiragongo volcano, democratic republic of the congo. *Journal of Volcanology and Seismology*, *17*(3), 246-257. https://doi.org/10.1134/S0742046323700136

Saputra, D. D., Sari, R. R., Hairiah, K., Widianto, Suprayogo, D., & Van Noordwijk, M. (2022). Recovery after volcanic ash deposition : vegetation effects on soil organic carbon, soil structure and infiltration rates. *Plant and Soil*, *474*(1), 163-179. https://doi.org/10.1007/s11104-022-05322-7

Smets, A., Vannieuwenhuyze, J., & Ballon, P. (2022). Serendipity in the city : user evaluations of urban recommender systems. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, *73*(1), 19-30. https://doi.org/10.1002/asi.24552

Sutton, S., Wendy, H., & Marie, J. (2017, janvier 27). *Le dioxyde de carbone, un gaz au cœur de l'effet de serre* [Geo.fr] [Section : environnement]. Récupérée août 11, 2024, à partir de https://www.geo.fr/environnement/le-dioxyde-de-carbone-un-gaz-au-caeur-de-l-effet-de-serre-166946

Syavulisembo, A. M., Michellier, C., & Kervyn, F. (2024). Evaluation des risques liés aux coulées de laves du Nyiragongo. Cas de la fracture principale de Munigi(RDCongo) [Accepted : 2024-03-14T13 :05 :10Z]. *Colloque International Résilience aux catastrophes naturelles d origine anthropique en République démocratique du Congo*. Récupérée novembre 17, 2024, à partir de https://orfeo.belnet.be/handle/internal/11411

Tazieff, H. (1977). An exceptional eruption : mt. niragongo, jan. 10th, 1977. *Bulletin Volcanologique*, *40*(3), 189-200. https://doi.org/10.1007/BF02596999

Tedesco, D., Tassi, F., Vaselli, O., Poreda, R. J., Darrah, T., Cuoco, E., & Yalire, M. M. (2010). Gas isotopic signatures (he, c, and ar) in the lake kivu region (western branch of the east african rift system) : geodynamic and volcanological implications. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, *115*, 2008JB006227. https://doi.org/10.1029/2008JB006227

Timmreck, C., Graf, H.-F., & Kirchner, I. (1999). A one and half year interactive MA/ECHAM4 simulation of mount pinatubo aerosol. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, *104*, 9337-9359. https://doi.org/10.1029/1999JD900088

Universalis, E. (s. d.). *NYIRAGONGO ou NIRAGONGO* [Encyclopædia Universalis]. Récupérée novembre 17, 2024, à partir de https://www.universalis.fr/encyclopedie/nyiragongo-niragongo/

Viane, C., Bhugwant, C., Sieja, B., Staudacher, T., & Demoly, P. (2009). Étude comparative des émissions de gaz volcanique du Piton de la Fournaise et des hospitalisations pour

asthme de la population réunionnaise de 2005 à 2007. *Revue Française d'Allergologie*, *49*(4), 346-351. https://doi.org/10.1016/j.reval.2009.02.010

Wang, J., Jiang, Y.-P., Yu, M., Li, K., Shao, Y., & Yan, J. (2016). Responses of soil buffering capacity to acid treatment in three typical subtropical forests. *Science of The Total Environment*, *563-564*, 1068-1077. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.198

ANNEXE

Guide d'entretien auprès des experts de la cellule SNIS

Introduction

Bonjour, je m'appelle Belden VYALIRENDI et je suis en stage à la cellule SNIS. Dans le cadre de mon étude sur « ANALYSE DES PERFORMANCES DU SYSTEME DE SURVEILLANCE SANITAIRE FACE AUX MALADIES RESPIRATOIRES ET CARDIOVASCULAIRES DANS LA ZONE RIVERAINE DU VOLCAN NYIRAGONGO », je souhaite recueillir vos réflexions et expériences. Cet entretien durera environ 30 minutes. Toutes les informations que vous partagerez seront traitées de manière confidentielle.

1. Questions sur le système de surveillance sanitaire

1. Pourriez-vous décrire les principales fonctions de la cellule SNIS dans le suivi des maladies respiratoires et cardiovasculaires dans la région ?
   - Quels types de données collectez-vous régulièrement ?
2. Comment évaluez-vous l'efficacité du système de surveillance sanitaire dans la détection des cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires ?
   - Avez-vous des indicateurs de performance spécifiques que vous utilisez ?
3. Avez-vous observé une augmentation des cas de maladies respiratoires ou cardiovasculaires lors des périodes d'émissions de gaz volcaniques ?
   - Comment ces périodes sont-elles prises en compte dans vos rapports ?

2. Questions sur les défis rencontrés

1. Quels sont les principaux défis que vous rencontrez dans la collecte et l'analyse des données relatives aux maladies respiratoires et cardiovasculaires ?
   - Existe-t-il des problèmes de coordination entre différents acteurs ou de disponibilité des données ?
2. Comment gérez-vous les périodes de surcharge des cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires ?
   - Quelles stratégies avez-vous mises en place pour améliorer la surveillance pendant ces périodes critiques ?

3. Y a-t-il des limitations en termes d'équipements ou de personnel qui affectent votre capacité à surveiller ces maladies efficacement ?

3. Questions sur les recommandations et améliorations

1. Quelles améliorations suggéreriez-vous pour renforcer le système de surveillance sanitaire dans la région ?
   – Y a-t-il des formations ou des outils spécifiques qui pourraient améliorer vos performances ?
2. Comment pensez-vous que la collaboration entre la cellule SNIS et d'autres acteurs de la santé peut être renforcée pour mieux gérer les maladies liées aux émissions volcaniques ?
3. Avez-vous des idées ou des initiatives en cours qui pourraient contribuer à améliorer la détection et la gestion des maladies respiratoires et cardiovasculaires dans la zone du Nyiragongo ?

Conclusion

Merci beaucoup pour votre temps et pour vos réponses précieuses. Vos idées et votre expertise sont essentielles pour améliorer notre système de surveillance. Si vous avez des questions ou souhaitez ajouter quelque chose, n'hésitez pas.

Guide d'entretien auprès des experts de l'OVG

Introduction

Bonjour, je m'appelle Belden VYALIRENDI. Je suis étudiant en master à l'Université du Burundi, dans le programme « Sociétés, Pouvoirs, Territoires et Développement Durable », option : Population et Développement. Dans le cadre de mon étude intitulée « **Effets des gaz du volcan Nyiragongo sur la santé des populations riveraines** », je souhaite recueillir vos réflexions et expériences en tant qu'expert à l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG). Cet entretien durera environ 30 minutes, et je tiens à vous assurer que toutes les informations que vous partagerez seront traitées de manière strictement confidentielle.

1. Questions sur la surveillance des émissions volcaniques

1. **Pouvez-vous expliquer les principales activités de l'OVG dans la surveillance des émissions volcaniques du Nyiragongo ?**

- Quels gaz spécifiques surveillez-vous régulièrement (par exemple SO_2, CO_2, H_2S) ?
- Quelles sont les technologies ou méthodes utilisées pour mesurer ces émissions ?

2. **Comment évaluez-vous la régularité et la précision des mesures effectuées par vos stations de surveillance ?**
   - Y a-t-il des périodes où les données sont difficiles à collecter (pannes, mauvaises conditions météorologiques) ?
3. **Avez-vous observé des variations significatives dans les concentrations de gaz volcaniques avant, pendant, et après l'éruption de 2021 ?**
   - Quels modèles ou tendances avez-vous identifiés concernant la dispersion des gaz dans la région ?
4. **Comment les données sur les émissions volcaniques sont-elles partagées avec les autorités sanitaires ou les autres parties prenantes, comme la DPS ou le SNIS ?**

2. Questions sur l'impact des émissions volcaniques

1. **Selon vos observations, quelles zones de la région sont les plus exposées aux concentrations élevées de gaz volcaniques ?**
   - Quelles conditions météorologiques ou géographiques influencent la dispersion des gaz ?
2. **Avez-vous constaté des impacts significatifs des émissions de gaz volcaniques sur la santé publique, tels qu'une augmentation des maladies respiratoires ou cardiovasculaires ?**
   - Si oui, comment intégrez-vous ces observations dans vos rapports ou recommandations ?
3. **Quels défis rencontrez-vous pour surveiller les effets des émissions volcaniques sur l'environnement et la santé humaine ?**

3. Questions sur les recommandations et les améliorations

1. **Quelles améliorations ou renforcements sont nécessaires pour améliorer le suivi des gaz volcaniques ?**
   - Par exemple, avez-vous besoin d'équipements supplémentaires, de formations, ou d'un soutien financier accru ?
2. **Comment pensez-vous que la collaboration entre l'OVG et les institutions de santé (DPS, SNIS) peut être améliorée ?**
3. **Avez-vous des suggestions sur la manière de mieux sensibiliser les populations locales aux risques liés aux émissions volcaniques et à leurs impacts sur la santé ?**

Conclusion

Merci beaucoup pour votre temps et pour vos réponses précieuses. Vos idées et votre expertise sont essentielles pour améliorer la compréhension et la gestion des risques liés aux émissions volcaniques dans la région du Nyiragongo. Si vous souhaitez ajouter quelque chose ou avez des questions, n'hésitez pas.

Données utilisées

Cette section présente les données brutes utilisées dans cette étude, recueillies auprès des institutions concernées. Les données incluent des paramètres météorologiques mensuels (vitesse et direction du vent, température, humidité, précipitation, et taux de SO_2) et des données sanitaires détaillées par zone de santé (Goma, Karisimbi, et Nyiragongo), couvrant l 'année 2021. Ces informations permettent une analyse approfondie des liens entre les concentrations de gaz volcaniques et les pathologies respiratoires et cardiovasculaires dans les zones étudiées.

Données météorologiques

Tableau 19 : *Données météorologiques mensuelles et Taux SO_2 de 2021*

Mois	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent	Température (°C)	Humidité (%)	Précipitation (mm)	Taux SO_2 ($\mu g/m^3$)
Janvier	12	Nord-Ouest	19,8	80	85,8	93980,15
Février	13	Nord-Ouest	20,3	79	91,2	68112,12
Mars	11	Nord-Ouest	20,3	78	59,8	96295,49
Avril	15	Nord-Ouest	20,4	79	42,4	144015,73
Mai	11	Nord-Ouest	20,7	80	200,2	80996,90
Juin	14	Nord-Ouest	20,7	74	68,4	27711,29
Juillet	10	Nord-Ouest	20,4	73	25,6	14969,56
Août	15	Nord-Ouest	20,7	73	91,6	52384,75
Septembre	13	Nord-Ouest	20,6	77	78,0	75623,42
Octobre	17	Nord-Ouest	20,7	78	94,6	103456,89
Novembre	13	Nord-Ouest	20,4	78	90,2	38795,63
Décembre	11	Nord-Ouest	20,3	81	109,4	7322,24

Données sanitaires par zone

Récapitulatif annuel 2021

Tableau 20 : *Données sanitaires par zone - Année 2021*

Indicateur	Goma	Karisimbi	Nyiragongo
Pneumonie grave	2798	843	120
Pneumonie simple	5821	9170	3194
Asthme/bronchite	312	46	28
Asthme	150	23	7
HTA	1324	248	51
Insuffisance cardiaque	427	27	4
Hypertension artérielle	3405	3211	292
IRA	4759	2153	410

Tableau 21 : *Données sanitaires de la Zone de Santé de Goma (2021-2022)*

Période	Pneumonie grave	Pneumonie simple	Asthme/ bronchite	Asthme	HTA	Insuf. cardiaque	HTA notif.	IRA
Jan 2021	135	440	33	16	86	39	306	304
Fév 2021	148	412	15	12	107	47	212	336
Mars 2021	242	767	42	11	110	38	288	340
Avril 2021	415	511	39	10	80	28	226	382
Mai 2021	222	456	22	19	112	48	257	305
Juin 2021	309	453	38	10	90	36	318	237
Juil 2021	531	820	7	9	96	30	371	579
Août 2021	288	366	10	6	134	21	248	327
Sept 2021	163	337	9	8	98	37	329	209
Oct 2021	151	318	11	15	119	31	235	173
Nov 2021	59	371	32	12	138	40	239	650
Déc 2021	135	570	54	22	154	32	376	917

Tableau 22 : *Données sanitaires de la Zone de Santé de Karisimbi (2021-2022)*

Période	Pneumonie grave	Pneumonie simple	Asthme/ bronchite	Asthme	HTA	Insuf. cardiaque	HTA notif.	IRA
Jan 2021	76	602	13	5	30	6	287	142
Fév 2021	40	699	2	1	30	4	293	138
Mars 2021	81	862	10	2	22	5	366	143
Avril 2021	56	847	5	2	28	2	342	184
Mai 2021	62	734	2	4	20	4	271	188
Juin 2021	66	734	8	3	14	0	282	241
Juil 2021	187	926	0	0	15	1	272	206
Août 2021	41	698	0	1	16	1	227	253
Sept 2021	35	546	1	0	15	0	193	155
Oct 2021	73	609	2	2	27	1	208	144
Nov 2021	54	792	0	1	18	0	262	194
Déc 2021	72	1121	3	2	13	3	208	165

Tableau 23 : *Données sanitaires de la Zone de Santé de Nyiragongo (2021-2022)*

Période	Pneumonie grave	Pneumonie simple	Asthme/ bronchite	Asthme	HTA	Insuf. cardiaque	HTA notif.	IRA
Jan 2021	11	148	0	0	4	0	12	13
Fév 2021	9	96	0	0	3	0	5	37
Mars 2021	8	84	4	1	1	0	6	28
Avril 2021	3	88	0	0	1	0	9	30
Mai 2021	5	148	3	1	3	1	27	20
Juin 2021	6	344	0	0	4	0	64	5
Juil 2021	7	480	4	0	1	0	15	91
Août 2021	14	232	3	0	3	1	26	57
Sept 2021	12	329	5	0	13	0	58	16
Oct 2021	17	303	1	0	4	1	28	4
Nov 2021	15	336	2	1	9	1	17	37
Déc 2021	13	606	6	4	5	0	25	72