

Vulnérabilité des réseaux de distribution d'eau potable et d'électricité dans la ville de Goma, face aux coulées de lave du volcan Nyiragongo (RD Congo)

Vulnerability of the water and the electricity distibution networks in Goma city, facing the lava flows of Nyiragongo volcano (DR Congo)

Assani CIZA¹, Caroline MICHELLIER², Katcho KARUME¹ & François KERVYN²

Abstract: This study evaluates the vulnerability facing the lava flows of Nyiragongo volcano, of the water and electricity distribution networks in the Goma city (DRCongo). The Nyiragongo volcano represents a permanent threat for this city, because of its proximity (approximately 18km to the north) and the direction followed by its lava flows during two known eruptions (1977 and 2002). A series of interviews were carried out with staff members, authorities and partners of the REGIDESO (water distribution institution) and the SNEL (power distribution institution), associated to an intensive field work, led to the design of a Geographic Information System (GIS). Our methodology was built up in order to allow the ranking of the infrastructures according to a vulnerability index and their exposure to Nyiragongo lava flow hazard, using the GIS tool, which allows the staking of various layers. At the end of this study, it is recommended to the persons in charge of SNEL and REGIDESO and to their partners, to always consult the Goma Volcanology Observatory (GVO) to get appropriate advices regarding the choice of new infrastructures sites.

Key words: Vulnerability, Infrastructures, REGIDESO, SNEL, Lava flow, Nyiragongo.

Résumé: Cette étude évalue la vulnérabilité face aux coulées de lave du volcan Nyiragongo, des infrastructures qui composent les réseaux de distribution d'eau potable et d'électricité dans la ville de Goma, en République Démocratique du Congo. Le volcan Nyiragongo constitue une menace permanente pour cette ville, étant donné sa proximité (environ 18km au nord) et la direction suivie par les coulées de lave au cours de ses deux éruptions connues (1977 et 2002). Une série d'interviews menées auprès des agents, des autorités et des partenaires de la SNEL et de la REGIDESO, associée à un travail de terrain intensif ont conduit au développement d'un Système d'Informations Géographiques (SIG). Notre méthodologie a été élaborée pour permettre le classement des infrastructures selon leur niveau de vulnérabilité et leur degré d'exposition aux coulées de laves du Nyiragongo, à partir de l'outil SIG permettant la superposition des couches d'information. Au terme de cette étude, il est recommandé aux responsables et partenaires de la REGIDESO et de la SNEL de consulter l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) pour obtenir les conseils appropriés en vue du choix d'un site pour l'implantation des nouvelles infrastructures.

Mots-clés: Vulnérabilité, Infrastructures, REGIDESO, SNEL, Coulée de lave, Nyiragongo.

INTRODUCTION

Le volcan Nyiragongo (1.52°S, 29.25°E; 3469m) est l'un des deux volcans actifs de la région des Virunga. Situé à environ 18km au nord de la ville de Goma, il présente un danger permanent pour la population urbaine et environnante (SAWYER, 2008). Au cours de ses deux éruptions historiques (janvier 1977 et janvier 2002), le volcan Nyiragongo a fait plusieurs dizaines de morts et plusieurs milliers de sans-abris, et donné lieu à une véritable crise humanitaire en 2002 (KOMOROWSKI *et al*, 2004). Les coulées de lave survenues lors de l'éruption du Nyiragongo de janvier 2002 ont

Observatoire Volcanologique de Goma, RDC, Emails : <u>delphinassani2@yahoo.fr</u>, <u>kkatcho@yahoo.com</u>

² Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique, Emails : <u>caroline.michellier@africamuseum.be</u>, <u>francois.kervyn@africamuseum.be</u>

couvert 10% de la ville de Goma (18 km au sud du cratère du volcan), emportant une grande partie de l'aéroport et du centre économique de la ville et obligeant près de 300.000 personnes à se réfugier au Rwanda (KOMOROWSKI *et al*, 2004 ; SYAVULISEMBO *et al*, *in prep*.).

Le risque lié à l'activité de ce volcan, dans la ville de Goma, est étudié ici à travers les composantes aléa et vulnérabilité.

Le risque est défini comme étant la conjonction territoriale entre un aléa et des éléments vulnérables (CLEYZE, 2002; BROOKS *et al*, 2005; REGHEZZA, 2006; MICHELLIER *et al.*, 2016; BECERRA, 2012; WISNER *et al*, 2004). L'aléa est compris comme un phénomène naturel ou anthropique susceptible de conduire à une catastrophe (PIGEON, 2002; D'ERCOLE & METZGER, 2005). La vulnérabilité correspond à la propension d'une personne, d'un groupe humain ou d'une infrastructure à subir un endommagement suite à un phénomène destructeur (WISNER *et al*, 2004; PIGEON, 2002). Certaines études évaluent la vulnérabilité selon un indice (de 0 à 1) ou un pourcentage de ce qui peut être perdu (vies humaines, infrastructures, écosystèmes) en un lieu donné en cas de catastrophe (par ex. D'ERCOLE, 1996). L'une des difficultés majeures réside dans la cartographie de la vulnérabilité et de ses facteurs, compte tenu d'une menace potentielle donnée (D'ERCOLE, 1996).

Dans cet article, on évalue la vulnérabilité des réseaux de distribution d'eau potable et d'électricité liée à leur qualité (vulnérabilité intrinsèque), ainsi que leur vulnérabilité d'exposition, face aux coulées de lave du volcan Nyiragongo, en reprenant le tracé des coulées survenues en janvier 2002. Ces infrastructures sont gérées par la REGIDESO (l'Etablissement de l'Etat congolais chargé de la production et de la distribution de l'eau potable) et de la SNEL (l'Etablissement de l'Etat congolais chargé de la production et de la distribution de l'électricité). Elles sont interdépendantes car l'électricité est aussi nécessaire pour le fonctionnement des équipements de la REGIDESO. L'accès à l'eau tout comme l'accès à l'électricité, est rendu possible par l'existence d'infrastructures complexes, qui nécessitent une maintenance régulière et spécialisée.

L'objectif global de cette étude est de proposer un outil d'aide à la décision qui puisse être intégré à la politique de prévention et de gestion des risques liés aux coulées de lave. Les objectifs spécifiques consistent en une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des infrastructures de la REGIDESO et de la SNEL, ainsi que de leur vulnérabilité face à un risque de coulées de lave qui seraient similaires à celles de 2002. Enfin, proposer une cartographie des résultats de cette étude de vulnérabilité.

CONTEXTE

Contexte géomorphologique et géologique de Goma

Du point de vue géomorphologique, la ville de Goma est située entre le volcan Nyiragongo et le lac Kivu, reliés par une légère pente. Lors d'une éruption, la lave peut couler jusqu'au lac si son volume et sa fluidité le permettent (SMETS *et al.*, 2010). Quelques bombements visibles en ville et sur son pourtour témoignent de processus volcaniques anciens dont certains furent de nature explosive. Il s'agit en effet de cônes volcaniques issus des produits pyroclastiques (cendres, lapillis et bombes volcaniques) générés par des éruptions phréato-magmatiques et magmatiques explosives (POPPE *et al.*, 2016).

La ville de Goma est construite sur des couches de laves issues des différentes éruptions du volcan Nyiragongo qui la surplombe. Ces laves sont pauvres en silice et riches en alcalis, particulièrement en potasse (PASTEELS, 1961). Elles sont plus alcalines que celles d'autres volcans du champ de Virunga (SAHAMA, 2011). Elles sont aussi très fluides, pouvant se déplacer à 60 km/h (TAZIEFF, 1977). En cas d'éruption de ce volcan, selon le même mode éruptif qu'en 2002, la lave ne mettrait donc que quelques minutes pour entrer dans la ville de Goma. La présence d'anciennes coulées de lave sur toute l'étendue de la ville montre qu'il n'existe pas un seul quartier de Goma qui ne puisse être traversé par la lave en cas d'une nouvelle éruption. Toutes les infrastructures sont donc potentiellement exposées à de futures coulées de lave.

Principales infrastructures de la SNEL et la REGIDESO

Les principales infrastructures qui forment les réseaux de distribution d'eau et d'électricité sont réparties à travers la ville comme indiqué sur la carte de la figure 1. Sur cette carte sont représentés les lignes haute et moyenne tension, le poste de transformation haute tension/moyenne tension (HT/MT) et les stations de la REGIDESO (les stations de captage, les stations de pompage et les réservoirs).

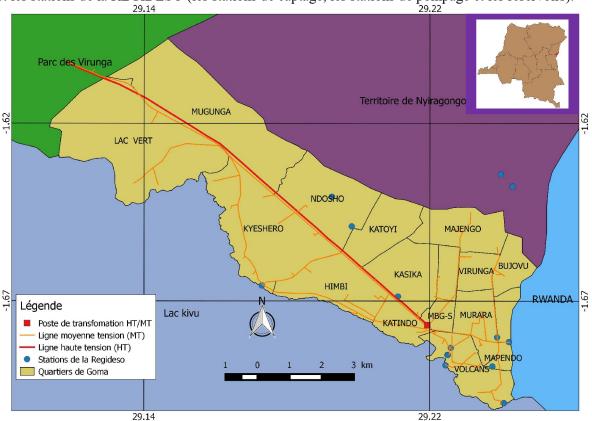


Figure 1: Les principales infrastructures de la REGIDESO et de la SNEL

Fonctionnement de la REGIDESO et de la SNEL, à Goma

La REGIDESO

La REGIDESO est l'institution de l'Etat Congolais, chargée de la production, du transport et de la distribution de l'eau potable en République Démocratique du Congo (RDC).

Pour alimenter la ville de Goma en eau potable, la REGIDESO s'approvisionne exclusivement dans le lac Kivu. Elle gère trois stations de captage installées sur la rive de ce lac: le captage Lac Kivu, le captage Turquoise communément appelé station de pompage Ihusi, et le captage Sotraki à Kyeshero. Chaque station de captage est composée de pompes électriques (Figure 2a), de tuyaux d'aspiration dans le lac (Figure 2b) et d'un pack de chloration avec une doseuse de chlore (Figure 2c). Pendant que l'eau du lac, sale et impropre à la consommation est aspirée, la doseuse de chlore envoie du chlore liquide préparé dans le pack de chloration. Le tuyau d'aspiration emmène ensuite l'eau mélangée au chlore dans la chambre des vannes de distribution. C'est à partir de cette chambre des vannes que cette eau traitée et supposée propre à la consommation est envoyée, via des tuyaux de transport (Figure 2d), vers les robinets, les réservoirs ou les stations de repompage, en fonction de la distance à laquelle se trouvent les populations à desservir. Ce dispositif ne peut fonctionner que s'il est correctement alimenté en électricité.









Figure 2 : Eléments des stations de captage.

a. Pompe actionnée par un moteur, b. Tuyaux d'aspiration dans le lac Kivu c. Packs de chloration, d. Tuyau de transportant de l'eau

Si, comme mentionné ci-dessus, certains consommateurs sont directement desservis après captage ou après repompage, d'autres sont alimentés par des bornes fontaines via des réservoirs de stockage localisés en altitude dans le nord de la ville. C'est principalement les quartiers localisés dans le nord de la ville qui sont alimentés par les bornes fontaines.

La SNEL

d

La Société Nationale d'Electricité (SNEL) est l'institution de l'Etat Congolais, chargée de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

A part une petite centrale thermique de 1,1 Méga watt actuellement hors service, il n'existe pas de centrale de production de l'énergie électrique à Goma. L'énergie utilisée dans cette ville est produite par la centrale hydroélectrique de la Ruzizi située au sud-est de la ville de Bukavu, au Sud

Kivu. Pour faire tourner ses turbines, la centrale utilise l'eau de la rivière Ruzizi, une rivière frontalière entre la RDC, le Rwanda et le Burundi.

La ligne haute tension (HT) qui alimente Goma part de la centrale hydroélectrique de la Ruzizi (à Bukavu) qui alimente en énergie électrique les deux provinces du Nord et du Sud Kivu et deux pays frontaliers de la RDC (le Rwanda et le Burundi). La ligne HT passe par la BRALIMA/Bukavu et la cimenterie de Katana (Mahyuza). Elle quitte Katana avec une tension de 75.000 volts et atteint Goma, au poste HT de Katindo (Figures 3 et 4), avec une tension de 70.000 volts.



Figure 3: Poste HT de Katindo.



Figure 4: Poste de transformation HT/MT (à droite de la photo: un transformateur)

En plus de la ligne HT (Figure 5a) visible le long de la route nationale n°4 (route reliant Goma à Sake), il y a 5 lignes moyenne tension (MT) (Figure 5b) qui assurent le transport du courant électrique vers les cabines de transformation MT/BT à travers la ville. Ces lignes MT sont désignées par leurs départs dénommés « feeders ». Le feeder est une installation électrique constituée d'un disjoncteur et d'un sectionnaire MT.

La distribution de l'énergie électrique est assurée d'une part, par le poste HT de Katindo d'où partent toutes les lignes MT et d'autre part, par les cabines de transformation MT/BT qui sont en fait les véritables unités de distribution (UDI). Toutes les lignes BT qui mènent vers les abonnés, partent des cabines de transformation (Figure 5c, d).



Figure 5 : Eléments des lignes électriques à haute (HT) et moyenne (MT) tension a. Dernier poteau de la ligne HT avant la connexion au poste HT de Katindo b. Poteaux et fils d'une ligne MT, d. Cabine non protégée c. Eléments essentiels d'une cabine MT/BT avec transformateur et tableau général

METHODOLOGIE

Instruments de travail

Un GPS Garmin eTrex 30 a été utilisé pour la collecte des coordonnées géographiques, pendant qu'une fiche de renseignement sur l'infrastructure permettait de noter les informations sur le bâtiment, le personnel, le matériel, le coût, ainsi que sur les effectifs des populations bénéficiaires des services de l'infrastructure. Les caractéristiques du bâtiment, le niveau de compétence et d'expérience du personnel, l'état du matériel sont notamment considérés comme des indicateurs de la vulnérabilité intrinsèque des infrastructures étudiées.

Un guide d'entretien constitué de questions groupées par catégorie, permettait quant à lui, de vérifier la présence d'un indicateur de vulnérabilité, dans la fonctionnalité de l'infrastructure considérée.

Données de terrain

Le travail de terrain commencé le 15 octobre 2014 avait pris fin le 19 décembre 2014. Celui-ci débutait par une courte présentation de l'étude auprès de la personne interviewée en lui expliquant son intérêt et sa plus-value. Les données récoltées étaient à la fois les coordonnées géographiques des

infrastructures étudiées, et des informations sur une série de facteurs qui pourraient amener l'infrastructure à ne plus remplir la fonction pour laquelle elle a été conçue. Ces facteurs ont été alors repris dans la fiche de renseignements sur l'infrastructure et dans le guide d'entretien. L'acquisition des informations sur le bâtiment abritant chaque unité de distribution ou de production a été aisée. Les informations recherchées sont notamment l'âge et la date du dernier entretien (la fréquence de l'entretien a été aussi visée). L'interview parfois accompagnée d'observations permettait de vérifier si l'infrastructure évaluée fonctionnait encore dans le respect des normes.

Tracé des conduites d'eau et des lignes HT et MT

Les coordonnées géographiques des conduites d'eau ont été prises tous les 10 m, sauf aux endroits où se trouvaient des coudes. Au niveau de chaque coude, les coordonnées géographiques ont été prises, quelle que soit la distance à laquelle les précédentes ont été prises. Ces coordonnées ont ensuite été intégrées dans un Système d'Informations Géographiques (SIG) pour une mise en couche sous forme des points. Les points obtenus ont été reliés entre eux lors de la digitalisation pour donner des lignes représentant les conduites.

Les coordonnées géographiques des poteaux HT et MT ont été dans un premier temps enregistrées sur le terrain à l'aide d'un GPS et ensuite intégrées au SIG sous forme de points représentant les positions des poteaux. Le tracé des lignes haute et moyenne tension a été ensuite réalisé par jonction de ces points représentant les poteaux HT et MT.

Calcul de l'indice de vulnérabilité intrinsèque (indice de perte)

Le calcul de l'indice de vulnérabilité intrinsèque des unités de distribution et de production est fait sur base de la sommation des notes attribuées à chaque indicateur de vulnérabilité. Pour le réseau de distribution d'eau de la REGIDESO, ce calcul a été fait séparément pour les conduites, les bornes fontaines et les différentes stations réparties en stations de captage, stations de pompage et réservoirs. Pour les infrastructures de la SNEL, ce calcul a été appliqué uniquement aux cabines de transformation. Les éléments pris en compte dans l'évaluation sont les paramètres repris dans la fiche de renseignement sur l'infrastructure.

Les tableaux 1, 2, 3 et 4 présentent synthétiquement, la manière dont les notes ont été attribuées.

Indicateurs →	Bâtiment	Personnel	Matériel	Type	Opération		Total
Infrastructure	1 - 9	1 - 10	1 - 10	1 - 9	0 - 10	ménage $1 - 4$	/52
minastructure	1-7	1 - 10	1 - 10	1-7	0 - 10	1 - 4	132
,							

Tableau 1: Evaluation des indicateurs de vulnérabilité des stations

Le **bâtiment** est évalué sur 9 points répartis en 5 points pour le type de matériaux de construction, 2 points pour l'âge du bâtiment (plus le bâtiment est âgé, moins il a des points) et 2 points pour la fréquence de son entretien. Au départ, tout bâtiment en matériaux durables compte 5 points pour le type de matériaux. Il perd 1 point s'il est fissuré et 1 point si sa toiture est délabrée. Le même bâtiment a au départ 2 points pour l'âge. Il en perd 1, s'il a plus de 20 ans et tous les deux points s'il a plus de 50 ans. Pour la fréquence de l'entretien, le bâtiment a 2 points s'il est régulièrement entretenu, un seul point s'il est rarement entretenu et zéro s'il n'a jamais été entretenu.

La variable **Personnel** est évaluée sur 10 points: une note maximale de 3 points est consacrée au niveau de compétence, 3 autres points pour l'expérience (ou l'ancienneté dans le métier) et 4 points pour la collaboration entre les agents commis à l'infrastructure. Les 3 points de la compétence sont

attribués pour un agent A0, 2 points pour un agent A1 et 1 point pour un agent A2. Les 3 points de l'expérience sont attribués pour un agent qui a fait plus de 10 ans dans le métier, 2 points pour celui qui a fait entre 6 et 10 ans et 1 point seulement pour celui de 1 à 5ans. La note est entre 3 et 4 pour une collaboration jugée bonne, elle est entre 1 et 2 pour une collaboration jugée faible, et entre 2 et 3 si rien n'est signalé.

La variable **Matériel** est évaluée sur 10 points, note qui est justifiée par l'état du matériel et sa capacité à fournir des services. Trois niveaux d'appréciation sont retenus (1 = bon; 2 = médiocre; 3 = mauvais). La note est entre 1 et 3 points pour le niveau 3; entre 4 et 6 points pour le niveau 2; et entre 7 et 10 points pour le niveau 1.

La variable **Type** est évaluée sur 9 points, note déterminée par la puissance et le débit en eau des motopompes pour les stations de captage et de pompage, et par la capacité de stockage pour les réservoirs.

La variable **Opération** est évaluée sur 10 points. La note attribuée à l'infrastructure dépend de son fonctionnement, la note 0 étant attribuée à une infrastructure totalement hors usage.

La variable **Nombre de ménages desservis** est évaluée sur 4 points. Plus l'unité de distribution dessert un grand nombre de ménages, moins il a des points, et l'absence de cette information conduit à l'attribution de la plus faible note (1 point).

Tableau 2: Evaluation des indicateurs de vulnérabilité des conduites

Indicateurs —	Diamètre	Longueur	Etat	Réalisateur	Total
Infrastructure	1 – 5	1 - 5	1 - 10	1 - 10	/30

La variable **Diamètre** est évaluée sur 5 points. La note obtenue ici par une conduite est inversement proportionnelle au diamètre de la conduite, c'est-à-dire une faible note à une conduite de grand diamètre, ceci parce que plus une infrastructure appartenant à un système d'infrastructures est critique (autrement dit, joue un grand rôle dans le système, qui dépend pour beaucoup de son bon fonctionnement), plus l'ensemble du système est vulnérable au mauvais fonctionnement de ce sous-ensemble (LOGTMEIJER, 2006). C'est ainsi que pour le paramètre **Diamètre** étendu sur 2 classes, la conduite a obtenu une note moyenne de 4 points, si elle se situe dans la classe des diamètres 1 mm à 250 mm, une note moyenne de 2 points si elle se situe dans la classe des diamètres 251 mm à 500 mm ou une note forfaitaire de 1 point si l'information n'a pas été disponible.

La variable **Longueur** est aussi évaluée sur 5 points en suivant le même principe que pour la variable précédente, mais avec 4 classes (longueur de 1 à 250 m, longueur de 251 à 500 m, longueur de 501 à 1000 m et longueur de 1001 m et au-delà). Les notes sont de 5 points pour la première classe, 4 points pour la deuxième classe, 3 points pour la troisième classe, 2 points pour la quatrième classe et 1 point si l'information n'a pas été disponible.

La variable **Etat** est évaluée sur 10 points. Une conduite nouvellement placée par l'ONG *Mercy Corps* en prend 9 et une ancienne conduite n'en prend que 5.

La variable **Réalisateur** est aussi évaluée sur 10 points. Une conduite placée par l'ONG *Mercy Corps* en prend 9 car elle est récente, et a en principe plus de chance d'être placée à un endroit stratégique. Une conduite placée par la REGIDESO n'en prend que 5, car cette dernière est souvent ancienne et peut même être une conduite à l'air libre.

Tableau 3: Evaluation des indicateurs de vulnérabilité des bornes fontaines

Indicateurs	Etat	Opération	Gestion-Entretien	Total
Infrastructure	1 – 10	0 - 10	1 - 10	/30

La variable **Etat** est évaluée sur 10 points. Une borne fontaine nouvellement construite en prend 9, une borne fontaine réhabilitée en prend 8, une borne fontaine non réhabilitée en prend 5, une borne fontaine proposée à la révision n'en prend que 2 et une borne fontaine en prévision n'en prend rien; il sera en effet plus approprié d'ajuster le statut de cette dernière une fois la construction ou la réhabilitation réalisée.

La variable **Opération** est évaluée sur 10 points. Une borne fontaine opérationnelle en prend 8, une borne fontaine non opérationnelle 0, une borne fontaine momentanément hors usage 1 points et une borne fontaine pour laquelle nous n'avons pas d'information reçoit 3 points.

La variable **Gestion-Entretien** est évaluée sur 10 points parmi lesquelles une borne fontaine gérée et entretenue par l'ONG *Mercy Corps* obtient 9 et une borne fontaine gérée et « entretenue » par REGIDESO, 4 points. La gestion d'une borne fontaine par l'ONG *Mercy Corps* constitue une garantie de respect de certaines normes, d'un sérieux dans la gestion et l'entretien des équipements, tandis qu'une infrastructure gérée par la REGIDESO ne reçoit pas toujours l'attention nécessaire à une bonne gestion et un bon entretien.

Tableau 4: Evaluation des indicateurs de vulnérabilité des cabines de transformation

Indicateurs -	Bâtiment	Personnel	Matériel	Nbre de	Durée	Collabo	Total
Infrastructure	1 – 9	1 - 6	1 - 10	ménage 1 – 4	service 1 - 2	Perso. 1 – 4	/40
—							

Le principe de l'évaluation appliqué aux indicateurs de vulnérabilité des cabines de transformation de la SNEL est identique à celui appliqué aux indicateurs de vulnérabilité des stations de la REGIDESO.

L'indice de vulnérabilité intrinsèque est calculé selon la relation :

$$v = \frac{100 - X}{100}$$

où X représente la note obtenue sur 100, par l'unité de distribution ou de production.

Cet indice peut aussi directement être calculé par la relation:

$$v = 1 - \frac{x}{Max}$$

où x est la note obtenue par l'unité de distribution ou de production et Max est la somme de maxima des notes prévues pour les indicateurs de vulnérabilité.

Les valeurs de l'indice de vulnérabilité obtenues ont été ajoutées dans les tables d'attributs correspondantes aux différentes infrastructures afin d'élaborer la carte de la vulnérabilité intrinsèque globale.

Estimation du niveau de vulnérabilité face à des coulées de lave similaires à celles de 2002

Tracé des coulées de lave générées par l'éruption du Nyiragongo en 2002

Les éléments de base de la cartographie des coulées de lave repris de SMETS et al. (2010), ont été obtenues à partir de données multispectrales issues des satellites Landsat, ASTER et de l'imagerie SPOT. Le tracé des coulées de lave ont été intégrées sous la forme d'une couche de données dans le Système d'Informations Géographiques (SIG).

Vulnérabilité d'exposition à un risque de coulées de lave similaires à celles de 2002

La vulnérabilité face à un risque de coulées de lave similaires à l'événement de janvier 2002, et qu'on nomme vulnérabilité d'exposition, a été estimée pour chaque infrastructure, en fonction de la distance séparant l'infrastructure des anciennes coulées de lave du volcan Nyiragongo. En se plaçant dans l'hypothèse que la prochaine éruption du Nyiragongo pourrait produire des coulées de lave s'écoulant sur la même trajectoire qu'en janvier 2002, nous avons considéré comme plus vulnérables les infrastructures les plus proches des anciennes coulées de lave.

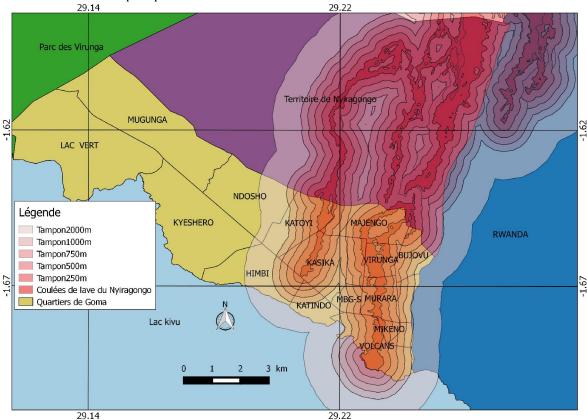


Figure 6: Zones tampons au tour des coulées de lave.

C'est ainsi qu'on a créé, dans le SIG, des zones tampons ayant respectivement un rayon de 250 m, 500 m, 750 m, 1 km et 2 km autour des anciennes coulées du volcan Nyiragongo (Figure 6). En superposant la couche des infrastructures sur celle des tampons créés autour des anciennes coulées de laves, on a estimé le niveau de vulnérabilité de chacune des infrastructures. Les infrastructures situées sur les anciennes coulées ont le niveau de vulnérabilité le plus élevé, tandis que celles situées dans la zone de 2 km de rayon autour des anciennes coulées, ont le niveau de vulnérabilité le plus faible.

La cartographie de cette zonation permet de montrer le niveau de vulnérabilité de chacune des infrastructures de la REGIDESO et de la SNEL.

RESULTATS

Vulnérabilité intrinsèque des infrastructures de la REGIDESO et de la SNEL

Vulnérabilité des infrastructures de la REGIDESO

Les figures 7, 8, 9 montrent le niveau de vulnérabilité intrinsèque des infrastructures de la REGIDESO. Cette vulnérabilité est une expression de la capacité de ces infrastructures à réaliser les fonctions pour lesquelles elles ont été conçues, c'est-à-dire à fournir les services attendus d'elles.

La carte de la figure 7 présente quatre niveaux de vulnérabilité pour les stations de captage, les stations de pompage et les réservoirs de la REGIDESO. La gradation de la couleur rouge suivant le niveau de vulnérabilité permet le classement de ces stations et réservoirs. La station la plus vulnérable est celle de Relais Tennis, tandis que celle du Mont Goma, du captage Lac Kivu, du captage Sotraki et le réservoir de Bushara sont les moins vulnérables.

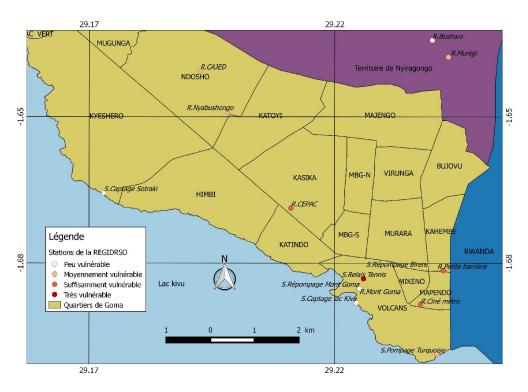


Figure 7: Vulnérabilité intrinsèque des stations de la REGIDESO

La carte de la figure 8 se base sur deux niveaux de vulnérabilité pour les conduites d'eau de la REGIDESO. Ainsi, il apparaît que les conduites du nord de la ville sont les moins vulnérables.

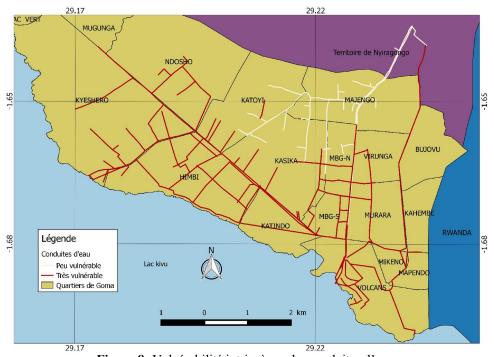


Figure 8: Vulnérabilité intrinsèque des conduites d'eau.

La carte de la figure 9 montre quatre niveaux de vulnérabilité pour les bornes fontaines. Les bornes fontaines « suffisamment vulnérables » sont nombreuses comparé aux autres classes et groupés principalement dans les quartiers Kahembe et Mapendo.

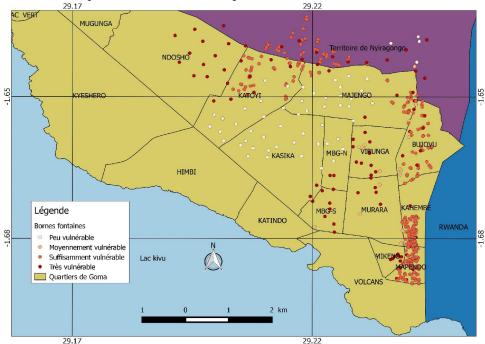


Figure 9: Vulnérabilité intrinsèque des bornes fontaines.

Vulnérabilité des cabines de transformation de la SNEL

La figure 10 montre le niveau de vulnérabilité intrinsèque des cabines de transformation de la SNEL. Basé sur le calcul de l'indice de vulnérabilité intrinsèque des cabines de la SNEL, quatre niveaux de vulnérabilité sont mis en évidence; les moins vulnérables étant principalement localisées dans le quartier Volcans.

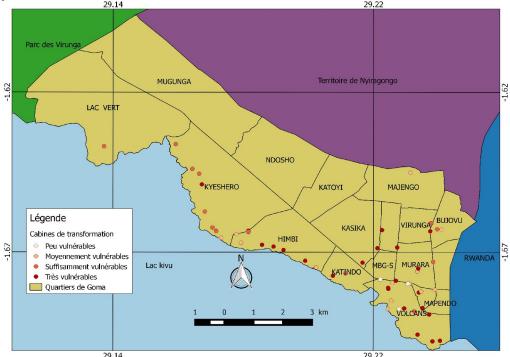


Figure 10: Vulnérabilité intrinsèque des cabines de la SNEL

Vulnérabilité d'exposition des infrastructures de la REGIDESO et de la SNEL face à une éruption similaire à celle de 2002

Exposition des infrastructures de la REGIDESO

Les figures 11, 12 et 13 montrent les niveaux de vulnérabilité d'exposition des infrastructures de la REGIDESO. Cette vulnérabilité traduit, en quelque sorte, la probabilité qu'une infrastructure soit détruite par une éruption du volcan Nyiragongo qui serait similaire à celle survenue en janvier 2002.

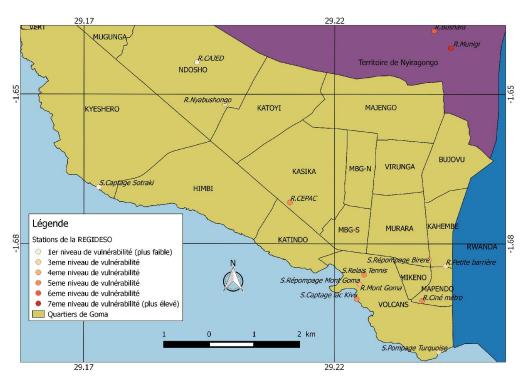


Figure 11: Vulnérabilité d'exposition des stations de la REGIDESO

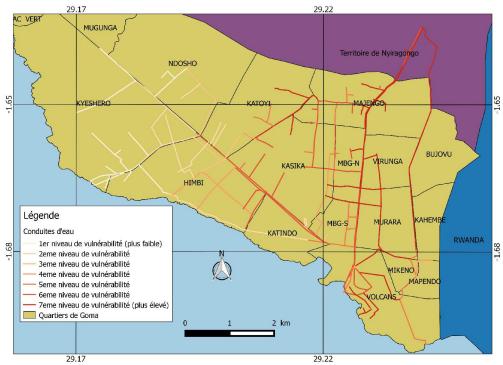


Figure 12: Vulnérabilité d'exposition des conduites d'eau

La carte de la figure 11 montre sept niveaux de vulnérabilité d'exposition des stations de captage, des stations de pompage et des réservoirs de la REGIDESO. Celles situées les plus à l'ouest apparaissent comme étant les moins vulnérables.

La carte de la figure12 montre les sept niveaux de vulnérabilité des conduites d'eau de la REGIDESO dont les plus exposées se trouvent au nord de la ville.

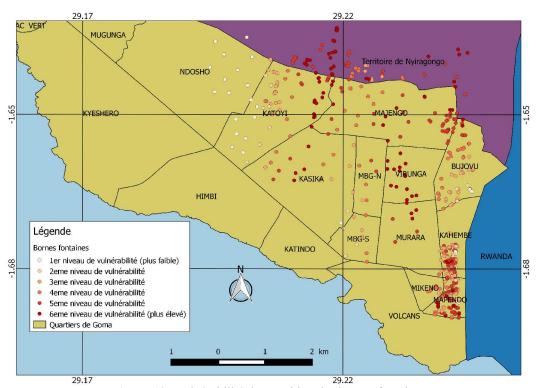


Figure 13: Vulnérabilité d'exposition des bornes fontaines

La carte de la figure 13 montre six niveaux de vulnérabilité pour les bornes fontaines de la REGIDESO dont celles du nord de la ville et du quartier Virunga sont fortement vulnérables.

Exposition des infrastructures de la SNEL

Les figures 14, 15 et 16 montrent le niveau de vulnérabilité, aux coulées de lave, des infrastructures de la Société National d'Electricité.

La carte de la figure 14 montre trois niveaux de vulnérabilité pour la ligne haute tension. Cette ligne comporte une branche très vulnérable située au sud-est, une branche suffisamment vulnérable et une branche peu vulnérable entre les quartiers Mugunga, Lac vert, Kyeshero et Ndosho.

La carte de la figure 15 montre sept niveaux de vulnérabilité, aux coulées de lave, pour les lignes moyenne tension. Le premier niveau représente le niveau le plus faible et le septième niveau représente le niveau le plus élevé, principalement présent dans la partie est de la ville.

La carte de la figure 16 montre sept niveaux de vulnérabilité, aux coulées de lave, pour les cabines de transformation dont les plus vulnérables se trouvent aussi à l'extrême est de la ville, dans les quartiers Murara, Mikeno et Volcans. Le premier niveau représente le niveau le plus faible et le septième niveau représente le niveau le plus élevé.

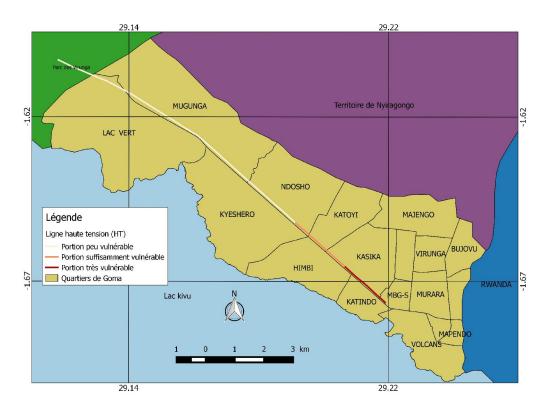
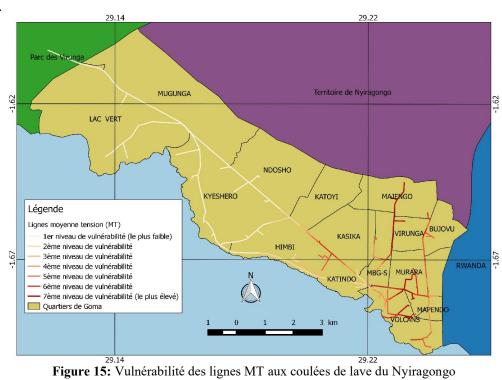


Figure 14: Vulnérabilité de la ligne HT aux coulées de lave du Nyiragongo



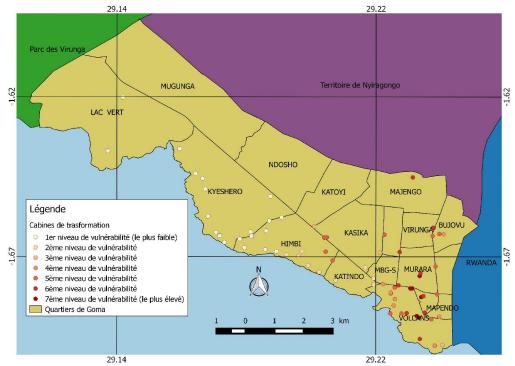


Figure 16: Vulnérabilité des cabines de transformation aux coulées de lave

DISCUSSION

Le réseau de distribution de l'eau potable dans la ville de Goma est formé des trois blocs complémentaires que sont les stations (constituées des stations de captage, des stations de pompage et des réservoirs), les conduites et les bornes fontaines. Ce sont des infrastructures majeures (au sens de D'ERCOLE, 2005) pour la ville de Goma.

Contrairement à la partie sud de la ville qui a un accès plus direct au lac et qui regroupe une population plus aisée pouvant installer ses propres conduites, les parties centre et nord de la ville sont en majorité habitées par des personnes socio-économiquement vulnérables. Comme le soulignent D'ERCOLE & METZGER (2005) dans leur approche qui cherche à identifier les infrastructures majeures du territoire étudié et les espaces où ils se concentrent, il apparaît que les conduites d'eau tout comme les bornes fontaines ne couvrent pas l'ensemble de la ville. D'une part, la configuration actuelle des conduites et des bornes fontaines ne permettent pas aux quartiers Lac vert et Mugunga de bénéficier des services de la REGIDESO. D'autre part, la quasi-totalité des infrastructures du réseau de distribution d'eau potable est concentrée dans la partie est de la ville, alors que c'est de ce côté que les coulées de lave avaient traversé la ville lors de l'éruption du volcan Nyiragongo en janvier 2002. C'est ainsi que plusieurs bornes fontaines et un réservoir sont construits sur les coulées de lave de 2002. Plusieurs conduites sont aussi placées dans ces anciennes coulées. La présence de la majorité du réseau dans la partie est de la ville est avant tout due au fait que c'est dans cette zone que se trouve la majorité de la population, le centre commercial et les principales institutions publiques et privées. Il faut aussi souligner le fait que l'est de la ville est formé des quartiers les plus anciens, autrement dit ceux qui étaient les premiers à être occupés par la population urbaine.

La vulnérabilité intrinsèque de ces infrastructures majeures, s'appuyant sur l'analyse des faiblesses qui les caractérisent (D'ERCOLE, 2005), est révélée sur les cartes des figures 12, 13 et 14. Cette vulnérabilité s'étend sur quatre classes de vulnérabilité, engendrant des infrastructures « peu », « moyennement », « suffisamment » et « très » vulnérables. Une étude du même type effectuée sur les infrastructures majeures du système d'alimentation en eau potable du district métropolitain de Quito, par D'ERCOLE & METZGER (2005), avait débouché sur une analyse similaire présentant trois classes de vulnérabilité. La vulnérabilité intrinsèque du réseau de distribution d'eau semble être réduite dans la partie centrale et nord grâce à l'intervention de l'ONG Mercy Corps qui y a réhabilité

certaines infrastructures (conduites et bornes fontaines) et construit d'autres. La carte de vulnérabilité intrinsèque des bornes fontaines ne représente cependant pas la situation telle qu'elle est aujourd'hui, car parmi les bornes fontaines nouvellement construites par Mercy Corps, certaines ne sont pas encore opérationnelles. Or l'opérationnalité des infrastructures fait partie des indicateurs de vulnérabilité pour ces dernières. La partie centrale et nord de la ville a été privilégiée par Mercy Corps, car, éloignée du lac, elle est restée longtemps sans desserte en eau. Ceci s'explique par le fait que creuser des canaux des conduites sur une grande distance dans un sol rocheux comme celui de Goma n'est pas chose facile et demande donc énormément de moyens et de temps.

Le réseau de distribution de l'électricité, dans la ville de Goma est constitué d'une ligne HT, de cinq lignes MT désignées par leurs feeders et de cabines de transformation MT/BT (Figure 15). La vulnérabilité intrinsèque des cabines de transformation est révélée sur la carte de la figure 16. Cette vulnérabilité s'étend sur quatre classes de vulnérabilité, engendrant ici aussi des infrastructures « peu », « moyennement », « suffisamment » et « très » vulnérables.

La vulnérabilité intrinsèque de ce réseau est essentiellement due à la vétusté des équipements et au personnel technique de la SNEL composé en majorité par des journaliers qui entrent et partent à n'importe quel moment. Par ailleurs, aucune ONG ne s'est jusque-là intéressée au réseau de distribution de l'électricité car, contrairement à la pénurie d'eau, la population de Goma a plusieurs solutions pour pallier la pénurie d'électricité (bois, braises, pétrole, gaz, panneaux solaires et groupes électrogènes). Ce réseau semblait apparemment moins crucial à réhabiliter pour les différents bailleurs. Pourtant, le fonctionnement du réseau de distribution d'eau en dépend fortement. C'est ainsi que la vulnérabilité intrinsèque du réseau de distribution d'eau est fortement influencée par celle du réseau de distribution d'électricité, étant donné que le captage, le pompage, le refoulement, ainsi que la chloration de l'eau par la REGIDESO sont des services qui exigent l'usage de l'énergie électrique. En effet, comme la source d'eau, le lac Kivu est en basse altitude par rapport aux positions des consommateurs (les quartiers de Goma sont élevés par rapport au lac), l'usage des motopompes pour faire remonter l'eau jusqu'aux réservoirs et zones de distribution est inévitable. Puisque les motopompes sont actionnées par le courant électrique et que l'eau ne peut pas monter sans l'usage des motopompes, la disponibilité de l'énergie électrique devient une condition nécessaire à la production et la distribution d'eau potable dans la ville de Goma. Il faut également signaler que la purification de l'eau du lac impropre à la consommation exige la présence de l'énergie électrique pour alimenter la doseuse de chlore. Pour remplir sa mission, la REGIDESO a donc absolument besoin des services de la SNEL. Malheureusement, lorsque la SNEL ne peut pas fournir de l'énergie à ses abonnés, y compris la REGIDESO, cette dernière n'a pas de solution palliative pour desservir ses abonnés en eau. Ses services dépendent donc totalement de ceux de la SNEL.

Enfin, la vulnérabilité d'exposition à l'aléa coulée de lave de ces infrastructures majeures s'échelonne aussi sur sept classes de vulnérabilité allant du niveau le plus faible (niveau 1) au niveau le plus élevé (niveau 7). Les infrastructures qui forment le réseau de distribution d'eau et d'électricité dans la ville de Goma sont concentrées à l'extrême est de la ville et le long du lac. Comme évoqué cidessus, les quartiers les plus anciens de la ville sont situés dans sa partie est, ce qui a eu comme conséquence l'implantation des infrastructures majeures dans cette partie de la ville, pour approvisionner la population déjà installée. Il faut ajouter que le port de Goma et la proximité de la ville rwandaise de Gisenyi, qui tous deux contribuent aux échanges commerciaux entre les provinces du Nord et du Sud Kivu d'une part, et entre la République Démocratique du Congo et le Rwanda d'autre part, sont certainement les facteurs les plus importants qui ont permis l'occupation prioritaire de ces quartiers. Ainsi, le développement historique de Goma est un élément essentiel ayant déterminé l'implantation de ces infrastructures. Les résultats obtenus montrent qu'une grande partie de ces infrastructures, même les plus récentes, se trouvent dans des zones qui pourraient être affectées si une nouvelle éruption surgissait.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

A l'issue de cette étude qui s'est focalisée sur l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux de distribution de l'eau potable et de l'électricité dans la ville de Goma, face aux coulées de lave du volcan Nyiragongo, certains résultats ont été mis en évidence.

La vulnérabilité intrinsèque des infrastructures des réseaux de distribution de l'eau potable et de l'électricité dans la ville de Goma a permis de distinguer des degrés de vulnérabilité liés à leur fonctionnement. Leur vulnérabilité d'exposition à l'aléa de coulées de lave est quant à elle distribuée selon sept niveaux, basé sur un scenario éruptif qui serait similaire à celui de 2002.

Par ailleurs, la distribution des bornes fontaines à travers la ville de Goma montre des inégalités dans la desserte en eau potable. Certains quartiers sont plus desservis que d'autres et les quartiers Mugunga et Lac vert sont non desservis.

De plus, la répartition des conduites d'eau révèle aussi des inégalités. Les conduites d'eau qui partent de l'est de la ville vers l'ouest, viennent s'arrêter à l'entrée du quartier Mugunga et loin avant l'entrée du quartier Lac vert. Et le nombre très réduit (78/553) des bornes fontaines opérationnelles traduit clairement le fait que l'eau est une denrée rare dans la ville de Goma.

De manière plus globale, l'ensemble du réseau de distribution de l'eau potable est localisé dans la partie est de Goma, alors que c'est de ce côté que les coulées de lave avaient traversé la ville lors de l'éruption du volcan Nyiragongo en janvier 2002. C'est ainsi que plusieurs bornes fontaines et un réservoir sont construits sur les coulées de lave de 2002; plus précisément, le réservoir se trouve à quelques pas de la fracture de Munigi. Plusieurs conduites sont aussi placées dans ces anciennes coulées.

Du côté du réseau de distribution de l'électricité, certaines cabines de transformation MT/BT sont construites sur la trajectoire des coulées de lave de 2002 du volcan Nyiragongo. Cet emplacement témoigne de leur exposition à l'aléa coulée de lave si une nouvelle éruption conduisant à de coulées de lave similaires à celles de 2002 se produisait. En ce qui concerne les lignes de transport de l'énergie électrique HT et MT, elles sont susceptibles d'être endommagées si une nouvelle coulée de lave empruntait le tracé des coulées de lave de 2002.

Pour terminer, il est recommandé aux responsables de la SNEL de remplacer les équipements vétustes et de rester très attentifs aux conseils et suggestions de l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) lors de l'implantation des nouvelles infrastructures.

On recommande aussi aux responsables de la REGIDESO ainsi qu'à leurs partenaires, d'associer l'Observatoire Volcanologique de Goma (OVG) dans le choix des sites qui doivent recevoir des nouvelles infrastructures (stations, conduites ou bornes fontaines).

Les recommandations adressées aux autorités politico-administratives de la ville de Goma, de la province du Nord Kivu et de la République Démocratique du Congo seraient de s'impliquer dans la recherche des solutions à la pénurie d'eau et d'électricité pour l'ensemble de la ville, et de veiller à la réduction de la vulnérabilité des réseaux de distribution de l'eau potable et de l'électricité dans cette ville. Pour atteindre ces objectifs, le dialogue entre les institutions et les autorités doit être renforcé.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent au Musée Royal de l'Afrique centrale grâce auquel ce travail a pu être réalisé. La collaboration a été réalisée dans le cadre des projets RA_S1_RGL_GEORISK, de l'Accord-Cadre Coopération belge au développement - Musée Royal de l'Afrique centrale et du projet GeoRisCA de la Politique scientifique belge, programme Science for a Sustainable Development (SSD, bourse SD/RI/02A. Nos remerciement s'adresse également à l'Observatoire Volcanologique de Goma pour nous avoir autorisé à effectuer un stage en Belgique. Au cours de ce stage, les données récoltées sur terrain ont pu être traitées, ce qui a facilité la rédaction de cet article. Nous tenons aussi à remercier Benoit Smets et Mohamed, respectivement, pour le Shape File des coulées de lave du Nyiragongo et pour des informations en cartographie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BECERRA, S., 2012. Vulnérabilité, risques et environnement: l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain. *La revue en sciences de l'environnement*, 12 (1), mai 2012.
- BROOKS, N., NEIL ADGER, W. & MICK KELLY, P., 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*,15: 151–163.
- CLEYZE, J.F, 2002. Les risques-Institut géographique national-Laboratoire COGIT, 256p.
- D'ERCOLE, R., 1996. Représentation cartographique des facteurs de vulnérabilité des populations exposées à une menace volcanique: Application à la région du volcan Cotopaxi (Equateur). *Bull. Inst. Fr. étude des andines*, 25 (3): 479-507.
- D'ERCOLE, R. & METZGER, P., 2005. Repenser le concept de risque pour une gestion préventive du territoire. *PANGEA*, 43/44: 19-36.
- KOMOROWSKI, J.C., 2004. The January 2002 flank eruption of Nyiragongo volcano (Democratic Republic of Congo): chronology, evidence for a tectonic rift trigger, and impact of lava flows on the city of Goma. *Acta volcanologica*: 14 (1-2)/15 (1-2), 27-61. DOI: 10.1400/19077.
- LOGTMEIJER, C., 2006. Energy Demonstrator: regional vulnerability against energy disruptions in Europe. Technical note, EC-DG-TVAU.
- MICHELLIER, C., PIGEON, P. & KERVYN, F., Wolff, E., 2016. Contextualizing vulnerability assessment: a support to geo-risk management in central Africa. *Natural hazards*, 82: 27-42.
- PASTEELS, P., 1961. Géologie et Pétrologie de la région de Kirotshe, Centre scientifique et médical de l'Université libre de Bruxelles en Afrique Centrale, J. Duculot, S. A., Gembloux, 89pp.
- PIGEON, P., 2002. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*, 111(627-628): 452-470.
- 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-Africain Rift: timing and hazard implications. *Bulletin of volcanology*, 78:82. DOI: 10.1007/s00445-016-1074-8.
- REGHEZZA, M., 2006. Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale, Thèse de doctorat en géographie, Université Paris X-Nanterre, 384 p.
- SAHAMA, TH.G., 2011. SAHAMA'S (1910-1983) volcanological and mineralogical studies in Africa: Part I. Expeditions to the Virunga volcanic Field and petrographical mineralogical studies on the Nyiragongo volcano. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 83: 41-55.
- SAWYER, G.M, 2008. Investigation into magma degassing at Nyiragongo volcano, Democratic Republic of the Congo. Geochem. Geophys. Geosystems 9. http://dx.doi.org/10.1029/2007GC001829.
- SMETS, B., WAUTHIER, C. & D'OREYE, N., 2010. A new map of the lava flow field of Nyamulagira (D.R. Congo) from satellite imagery. *Journal of African Earth Sciences*, 58: 778–786.
- SYAVULISEMBO, A.M., MICHELLIER, C. & KERVYN, F.. *In prep.* Nyiragongo volcano: temporal evolution of the potential impacts of 2002-like lava flows on Goma city (Democratic Republic of the Congo). *Journal of African Earth Sciences*.
- TAZIEFF, M., 1977. An exceptional eruption: Mt. Nyiragongo, January 10th, 1977. *Bull. Volcanol.*, 40-3: 1-12. WISNER, B., BLAIKIE, P., CANNON, T. & DAVIS, I., 2004. At Risk: Natural Hazards, Peoples' Vulnerability
- and Disasters, Second edition, London: Routledge.