



Caractérisation hydrothermale de deux sources d'Irhambi Katana, Est de la République Démocratique du Congo

Bagalwa M. J.-J.^{1,5}, Bagalwa M. L.², Mwanga Mwanga I. J.-C.¹, Bayongwa C.³, Wani B.⁴, Karume K.^{4,5}

¹Departement de Biologie, Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro, DS Bukavu, République Démocratique du Congo

²Departement de Géophysique, Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro, DS Bukavu, République Démocratique du Congo

³Institut Supérieur Technique Commercial et Economique, République Démocratique du Congo

⁴Centre de Recherche en Géothermie, Bukavu, République Démocratique du Congo

⁵Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université Evangélique en Afrique, Bukavu, République Démocratique du Congo.

Submission 10th June 2024. Published online at <https://www.m.elewa.org/Journals/> on 31st August 2024. <https://doi.org/10.35759/JABs.199.1>

RÉSUMÉ

Objectif : Une étude sur la caractérisation hydrothermale de deux sources dans la région de Katana, Province du Sud Kivu, Est de la RDC a été conduite pour la première fois pour une prospection sur le plan de la structure, biodiversité, géochimie et géophysique. L'objectif de cette étude multidisciplinaire est de déterminer les caractéristiques hydro-chimique, faunistique et floristique de deux sources dans une région géo-dynamiquement active. Ceci permettra de mieux cerner les mécanismes tectoniques responsables de ces résurgences et de mettre en évidence leurs caractéristiques typologiques et leur parenté chimique.

Méthodologie et Résultats : Une approche pluridisciplinaire axée sur la caractérisation hydro-chimique, la biodiversité, la géologie, la géophysique, l'hydrodynamique et l'hydrochimie a été utilisée pour la collecte des données. Les deux sources ont des concentrations en éléments chimiques variables. L'analyse jumelée de Wilcoxon montre que la différence est significative entre les valeurs de ces deux sites d'échantillonnage ($z=2,329$, $p<0,05$). Le site de Cirojo a des valeurs des paramètres physicochimiques élevées que dans le site Kabucina. La présence des éléments comme le sulfate, calcium, hydrocarbonate et le chlorure montre que ces eaux sont riches en sels minéraux dissouts. Mais les deux sources ont des compositions différentes selon le diagramme de Piper. Les eaux thermales de Cirojo sont Bicarbonatées - Magnésiennes tandis que celles de Kabucina sont Bicarbonatées-chlorurées- sulfatées. Les caractéristiques chimiques agissant aussi sur la biodiversité, montrent que les deux sources ont des différences du point de vue de leur biodiversité.

Conclusion et Application de résultats: Les ions contenus dans les deux sources ont des propriétés thérapeutiques contre, le rhumatisme, les troubles digestifs, circulatoires et peuvent

soigner les dents, le foie. Ainsi, cette étude, suggère la possibilité de l'utilisation de la ressource thermique de cette région à des fins géothermiques et thérapeutiques et recommande des études complémentaires.

Mots clés : Eau thermale, Hydrochimie, Biodiversité, Irhambi-Katana, RD Congo

ABSTRACT

Objective: A study on hydrothermal characterization of two springs in the Katana region, South Kivu Province, eastern DRC has been carried out for first time, to prospect the structure, biodiversity, geochemistry and geophysics of these springs. The objective of this multidisciplinary study is to determine the hydro-chemical, faunal and floristic characteristics of two springs in a geodynamically active region. The study intends to better understand the tectonic mechanisms responsible for these resurgences and to highlight their typological characteristics and their chemical relationship.

Methodology and Results: A multidisciplinary approach based on hydrochemical characterization, biodiversity, geology, geophysics, hydrodynamics and hydrochemistry was used for data collection. Both sources have different concentrations of chemical elements. The Wilcoxon paired analysis shows that the difference is significant between the values of these two sampling sites ($z=2.329$, $p<0.05$). The Cirojo site has higher physicochemical parameter values than the Kabucina site. The presence of elements such as sulphate, calcium, hydrocarbonate and chloride indicates that these waters are rich in dissolved mineral salts. But the two sources have different compositions according to Piper's diagram. The Cirojo thermal waters are Bicarbonated - Magnesian while those of Kabucina are Bicarbonated-chlorinated-sulfated. The chemical characteristics also acting on biodiversity show that the two sources have different bio diversities.

Conclusion and Application of results: The ions contained in the two springs have therapeutic properties against rheumatism, digestive and circulatory disorders and can treat teeth, and liver. Thus, this study suggests the possibility of using the thermal resource of this region for geothermal and therapeutic purposes and recommends further studies.

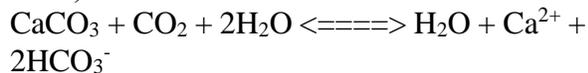
Keywords: Thermal water, Hydrochemistry, Biodiversity, Irhambi-Katana, DR Congo.

INTRODUCTION

La naissance des différentes sources provient de l'apparition de l'eau à la surface due à l'effet de deux paramètres considérables : la structure géologique et les caractéristiques topographiques (Chalikakis, 2006). Les sources thermales sont celles qui contiennent des eaux de températures atteignant le point d'ébullition dans certaines sources (Finizola, 2002). Les résurgences d'eau peuvent alors donner une formation des dépressions tout au long de contact lithologique s'il y a présence d'une formation de faible perméabilité supposée par une formation perméable (Castelli, 2012 ; Boudoukha et Athamena, 2012). Ces sources thermales se refroidissent

en coulant dans des canaux donnant des eaux de températures qui permettent la colonisation des organismes aquatiques (Verissimo *et al.*, 1991). Les processus de mélange entre l'eau thermale et l'eau non thermale peuvent être renforcés par des failles dans une zone géothermique (Han *et al.*, 2010). Dans ces processus complexes de circulation, les interactions eau-roche jouent un rôle important dans l'hydro-géochimie des eaux dans les systèmes géothermiques (Baïoumy *et al.*, 2015 ; Shi *et al.*, 2017). La classification de ces sources est basée sur des considérations géomorphologiques, les caractéristiques d'écoulement, la qualité de

l'eau et la géochimie, les habitats, et les variations climatiques et biologiques incluant les micros habitats ainsi que les aspects de gestion de l'eau et du territoire (Castelli, 2012). Ces sources hydrothermales sont caractérisées par les dépôts de tufs calcaires (ou travertins) qu'elles déposent à son émergence ou dans le lit du cours d'eau (Arfib, 2010) ou il se forme par la précipitation des calcaires naturellement dans l'eau, selon la formule suivante :



Elles sont utilisées par la population riveraine pour leurs diverses activités notamment la thérapeutique, l'abreuvement des animaux, la cuisson des aliments, la production de l'électricité et les aspects culturels (Bagalwa *et al.*, 2015a,b, Makuku, 2019 ; Mulenda *et al.*, 2020). En effet, ces minéraux qu'elles contiennent ont une capacité détoxifiante et un remède contre les affections cutanées, notamment l'acné, l'eczéma et le psoriasis, en raison de leurs produits chimiques dissous, notamment le bicarbonate de sodium, le chlorure et le soufre (Levin et Miller, 2011). Généralement, les produits chimiques pénètrent dans l'eau des sources chaudes par la dissolution de la roche là où elle passe et le sol dans lequel l'eau s'infiltre (Zhang *et al.*, 2019). Elle est le résultat de la dissolution des roches carbonatées au contact de l'eau chargée en acide carbonique (H_2CO_3), qui dérive du gaz carbonique de l'air, plus rarement de gaz carbonique d'origine profonde (associé à de l'hydrothermalisme). L'écoulement souterrain à plus ou moins grande profondeur, et au contact de roches diverses, permet à l'eau de se réchauffer et (ou) d'acquérir une minéralisation (Arfib, 2010). De nombreux systèmes hydrothermaux existent sans manifestation de magma en profondeur (Moeck, 2014). Les plus étudiés sont associés à des zones d'extension (rift, graben) ou à des bassins (intra-cratoniques ou d'avant-pays) (Faulds

et al., 2010). Il existe plusieurs sources d'eaux thermales dans la région de Katana due à la géologie de la région (Boutakoff, 1939 ; Ilunga, 1991 ; Bagalwa *et al.*, 2015a). En effet, le volcanisme et les fractures causés par le processus des tremblements de terre, la succession des chaînes des montagnes et les failles actives favorisent la montée des eaux souterraines sous forme des sources thermales. Durant un séisme, le glissement sur la faille permet la réouverture des fractures fermées ou scellées, et/ou la génération de nouvelles fractures (Géraud *et al.*, 2006), augmentant la perméabilité, reconnectant les fluides en profondeur avec la surface, et favorisant la circulation des fluides hydrothermaux. Ainsi, les failles dont l'activité quaternaire est attestée localisent favorablement les systèmes hydrothermaux actuels (Faulds *et al.*, 2010). L'évaluation des ressources hydrogéothermiques de cette région nécessite une bonne connaissance des données géologiques et géophysiques, ainsi que de la répartition des caractéristiques chimiques des eaux, de la température, de l'hydrodynamisme des réservoirs et de leurs caractéristiques pétrophysiques (Grillot et Dazy, 1983). L'enjeu sociétal lié à l'hydrothermalisme est aujourd'hui double. Avec la diminution des ressources en énergie fossiles, l'extraction de la chaleur du sol pour la production d'électricité en fait une cible incontournable pour l'exploration géothermique haute température (Makuku, 2019 ; Bhavani, 2020). L'étude des caractéristiques des eaux thermales est souvent destinée à préciser les variations potentielles de leur qualité et de leurs origines (Chevalier-Lemire *et al.*, 1990) ou de présenter leur localisation (Djorfi, 1988). Les sources thermales sont des sujets d'étude intéressante du point de vue écologique et faunistique regardant dans leur relation constante avec le régime de température qui diffère des autres eaux dans une région donnée. Dans les sources thermales, on peut

y avoir des espèces caractéristiques (Bagalwa et al., 2015) et très distinctes de celles rencontrées dans les sources froides. Pour cette raison, la connaissance de la faune des sources thermales est très importante. Très peu des travaux scientifiques ont abordé cet aspect des communautés des sources thermales dans l'ensemble. Les eaux thermales de Katana ont été étudiées partiellement. Seules les sources de Kakondo ont été prospectées durant ces études (Sindimo, 1979 ; Bagalwa et al., 2015a,b) car elles sont de haute enthalpie et c'est pourquoi elles ont attiré l'attention des plusieurs chercheurs. Mais ces études antérieures dans la région de Katana, n'ont pas permis d'appréhender l'ensemble des mécanismes ayant contribué à ces résurgences. Malgré les quelques études dans la région sur les eaux thermales à Katana (Mulenda et al., 2020 ; Bagalwa et al., 2015a,b), certaines sources n'ont jamais fait objet d'études sur leurs effets hydrothermaux. Certaines de ces sources de moyenne et faible enthalpie

situées dans la région n'ont jamais été étudiée à notre connaissance et nécessitent aussi des études approfondies en vue d'expliquer hydrogéothermisme de la région (Mulenda et al., 2020). Ainsi, deux sources dans la région ont été prospectées pour la première fois dans cette étude sur le plan structural, géochimique et géothermométrie. Ces sources s'avèrent être non encore reportées dans aucune ancienne publication comme celle de Passau (1933) ou de Boutakoff (1934) et ni récente. Après le séisme de 2012, il a été observé une augmentation des activités hydrothermales de ces deux sources. L'objectif du présent travail multidisciplinaire est de déterminer la caractérisation hydrochimique, faunistique et floristique de ces deux sources dans une région géodynamiquement active. Ceci permettra de mieux comprendre les mécanismes tectoniques responsables de ces résurgences et de mettre en évidence leurs caractéristiques typologiques et leur parenté chimique.

MATERIEL ET METHODES

Description du milieu : Le secteur de l'étude se situe sur la côte occidentale du Lac Kivu et la partie orientale du PNKB entre 02° 12' 08'' - 02° 09' 54,6'' Sud et 028° 50' 33,5'' - 028° 49' 23,9'' Est, 1463 m et 2200 m d'altitude faisant partie des hautes terres de l'Est du Kivu. Son relief est dans son ensemble marqué par les mouvements tectoniques qui affectent le rift africain (Ilunga, 1991 ; Zana et Tanaka, 1981). Ce secteur compte beaucoup de cours d'eaux, sources et étangs d'eaux froides, des sources et des griffons d'eaux thermales (Bagalwa et al., 2015a,b ; Makuku, 2019). Il connaît un climat tropical humide tempéré d'altitude influencé par sa position entre le Lac Kivu et le PNKB. La température moyenne annuelle est de 19°C et

les précipitations moyennes annuelles est de 1500 mm, avec deux saisons, celle de pluies de Septembre à Mai et la saison sèche de mi-mai à Août (Bagalwa et Baluku, 1997). La Géologie de ce secteur est très complexe en raison de nombreuses surfaces de chevauchement et failles qui perturbent les successions des formations essentiellement sédimentaires (Cahen et Lepersonne, 1967). D'autre part, la région de Katana est une région volcanique dont le principal cratère est le Kahuzi qui est à ce stade inactif. La région est recouverte par un épisode des coulées basaltiques de la phase III, et III' (Villeneuve, 1974). La figure 1 ci – dessous illustre cette région volcanique.

analyses chimiques ont été effectuées par colorimétrie pour les nutriments et par la méthode tritrimétrique pour les autres paramètres. Ainsi, les éléments majeurs, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, ont été analysés au laboratoire du Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro par titrage (Golterman *et al.*, 1978 ; APHA, 1981). Le dosage de l'alcalinité a été réalisé par titrage d'acide chlorhydrique 0,1N en présence du méthylorange (indicateur coloré à 0.5%). La dureté totale a été faite par complexométrie à l'EDTA après ajout d'une solution tampon (chlorure d'ammonium, ammoniacque et tartrate double de potassium et de sodium) et d'un indicateur coloré qui est le noir d'Erichrome T ; la dureté calcique a été déterminée également par complexométrie à l'EDTA mais après ajustement le NaOH et addition du murexide (coloration rose) ; la dureté magnésienne quant à elle, est déduite par différence entre les deux précédentes (Benabdellonahad, 2006). Les chlorures ont été dosés avec le nitrate d'argent selon la méthode de Mohr après ajout d'un indicateur coloré qui est le chromate de potassium (Golterman *et al.*, 1978). Le dosage des sulfates a été effectué par la méthode néphélométrique. En milieu chlorhydrique, les sulfates sont précipités à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé par une solution de tween 20. La suspension homogène est par la suite mesurée par spectrophotométrie à 650 nm. Les analyses des nutriments (N, NO₃⁻, NH₄⁺, P et PO₄³⁻), ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre (Wetzel and Liken, 2000). A la fin des analyses chimiques, les résultats ont été portés dans le logiciel d'hydrochimie pour obtenir le diagramme de Piper afin de caractériser les eaux thermales d'Irhambi. Le diagramme de Piper a été utilisé pour comparer la qualité des eaux de Cirojo et de Kabucina pour étudier la cohérence des données. C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation

d'analyses d'eau. Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. Pour l'élaboration des balances ioniques seules les analyses disponibles étaient prises en compte. Analyse jumelée de Wilcoxon a été utilisée pour comparer les paramètres de Cirojo et Kabucina avec un seuil de 0,05.

Caractérisation de la biodiversité

i. Macro-invertébrés benthiques :

Les macro-invertébrés benthiques ont été récoltés à l'aide d'un filet troubleau de 90 cm de circonférence, suivant la méthode homme-temps d'Olivier et Scheiderman (1956). Cette récolte se faisait en raclant sur la berge et le fond par une personne pendant 10 minutes par site. Les espèces capturées dans le filet étaient saisies à l'aide d'une pince et placées dans des flacons contenant du formol à 10% (Cunha *et al.*, 1997). L'identification et le comptage des spécimens étaient fait au laboratoire de Malacologie du Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro suivant les clés de détermination de Micha (1982), Poisson (1969), Brown (1994), Pennak (1953), Sire (1967).

ii. Inventaire des communautés végétales aux alentours des sources :

Avant tout, une phase exploratoire des visites a été organisée aux alentours des eaux thermales. Après, les données sur la végétation aux alentours de ces eaux thermales ont été collectées pendant l'expédition en utilisant la méthode phytosociologique de Braun-Blanquet à 4 quadrats de 5 m² par sites. Toutes les espèces des plantes occupant les quadrats délimités ont été inventoriées et classifiées sur terrain selon l'échelle de Braun-Blanquet. Au moins un échantillon de chaque espèce a été récolté et transporté à l'herbarium (LWI) du Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro. Dans le but de déterminer l'organisation de la couverture

végétale dans ces sites, la méthode de relevé phytosociologique recommandée par Braun-Blanquet (1932) a été utilisée. Cette méthode consiste à choisir des emplacements aussi typiques que possibles (l'homogénéité) pour les inventaires floristiques, de dresser une liste complète des espèces en accordant le coefficient d'abondance-dominance pour chaque espèce. Un total de huit quadrats de 5 x 5 m ont été délimités dans chaque site suivant une homogénéité des espèces. L'échelle mixte de Braun-Blanquet, a permis d'apprécier le coefficient d'abondance-dominance. Ainsi, 5 = nombre d'individus recouvrant plus de $\frac{3}{4}$ de la surface délimitée ; 4 = nombre d'individus recouvrant de la $\frac{1}{2}$ au $\frac{3}{4}$ de la surface délimitée ; 3 = nombre d'individus recouvrant du $\frac{1}{4}$ à la $\frac{1}{2}$ de la surface délimitée ; 2 = nombre d'individus recouvrant au moins $\frac{1}{20}$ de la surface délimitée ; 1 = nombre d'individus très peu nombreux avec un degré de recouvrement faible + = nombre d'individus très peu nombreux avec un degré de recouvrement très faible ou insignifiant. Les espèces présentes ont été récoltées dans le quadrat et ont été identifiées directement sur le terrain. Les inconnues ou certaines espèces prêtant confusion sur le terrain ont été transportées à l'herbarium pour identification. A cet effet, les clés de détermination de Letouzey (1982 - 1983) et Fischer (1993) ainsi que la comparaison des spécimens à l'herbarium du

Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro ont été utilisées.

iii. **Identification des algues (les Périphytons et phytoplanctons) :** Les algues benthiques ont été raclées sur 1 cm² des feuilles mortes se trouvant dans le fond des eaux. L'échantillon ainsi obtenu a été dissout dans 1 ml d'eau distillée puis 3 aliquotes de 0,1 ml chacun ont été déposés au microscope optique au grossissement X 400. Les algues ont été identifiées à l'aide de clés de détermination de Van Meel (1954), Kufferath (1957) ; Needham (1962), de Cox (1967) et de Maillard (1978).

iv. **Identification des zooplanctons :** Un litre d'eau a été puisé et filtré à l'aide d'un tamis de maille de 47 microns. Le filtrat contenant les zooplanctons ont été mis dans l'éthanol à 60 %. Les observations ont été faites au Laboratoire de Malacologie. Le comptage et l'identification se réalisent à la loupe suivant les clés de détermination de Needham et Needham (1962) et Cox (1967).
Caractéristiques géologiques et géophysiques : La prospection géophysique a concernée l'analyse des données sismiques de la région se trouvant dans les bulletins séismologiques au Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro. La méthode de mesure sismique concernant la vitesse de propagation des ondes sismiques mais aussi la méthode géologique va identifier le type de sol dans la région d'étude (Muralt *et al.*, 1977).

RESULTATS

Caractéristiques hydro chimiques des eaux : Les analyses des eaux thermales de ces deux sources Cirojo et Kabucina sont présentées dans le tableau 1. La température est la principale caractéristique des eaux étudiées, les eaux thermales. Cirojo et Kabucina se classent comme des sources

hypo thermales avec des températures variant entre 30 et 23°C. Les deux sources ont des concentrations en éléments chimiques variables. L'analyse jumelée de Wilcoxon montre que la différence est significative entre les valeurs de ces deux sites d'échantillonnage ($z=2,329$, $p<0,05$).

Tableau 1. Résultats d'analyses des eaux thermales de Cirojo et Kabucina

Paramètres		Cirojo	Kabucina
HCO ₃ ⁻	mg/L	160±60	40±7
O ₂	mg/L	5,2±0,12	5,05±0,3
Chlorure	mg/L	2,8±0.2	1,6±0,05
Dureté calcique	mg/L	231±85	104±29
Dureté totale	mg/L	329±112	252±52
Sulfate	mg/L	180,5±194,6	177,6±44,2
Dureté magnésique	mg/L	98±28	149±23
TP	μmol/L	0,4±0,3	0,6±0.1
SRP	μmol/L	0,2±0.09	0,3±0.06
TN	μmol/L	1,9±1,2	0,5±0.05
NH ₄ ⁺	μmol/L	3,1±1,5	1,7±1,7
NO ₃ ⁻	μmol/L	1,5±1.1	1,2±0.8
Température	°C	30,3±0.05	23,4±1,7
pH		7,7±0.3	7,5±0,3
MES	mg/L	0,08±0.02	0,15±0.1

Les eaux une fois sorties des sources sont oxygénées avec une concentration de moins de 6 mg/L. La dureté totale et la dureté calcique sont plus élevées dans le site de Cirojo que dans le site de Kabucina. Mais c'est dans ce dernier où la dureté magnésique est plus élevée. Mais en général le site de Cirojo a des valeurs des paramètres physicochimiques élevées que dans le site Kabucina. Cependant, la teneur en sulfate et

la dureté magnésique sont plus élevées à Kabucina qu'à Cirojo. La présence des éléments comme le sulfate, calcium, hydrocarbonate et le chlorure montre que ces eaux sont riches en sels minéraux dissouts. Et les valeurs de ces minéraux sont plus élevées dans le site de Cirojo que dans le site de Kabucina. Le diagramme de Piper de ces deux sources thermales est présenté dans la figure 2.

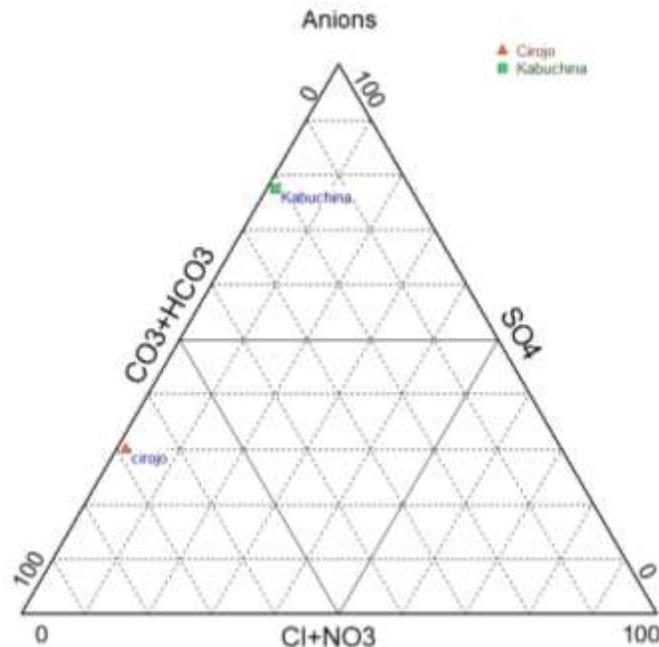


Figure 2 : Diagramme de Piper des sources Cirojo et Kabucina

Ce diagramme montre que les deux sources ont des compositions différentes. Le site de Kabucina est riche en chlorure et sulfate et celle de Cirojo est riche en magnésium et calcium. Selon le diagramme les eaux thermales de Cirojo sont Bicarbonatée-Magnésienne tandis que celles de Kabucina sont Bicarbonatée- chlorurée- sulfatée.

Caractéristiques de la biodiversité

i. **Les algues (les périphytons et phytoplanctons) :** L'inventaire des espèces des périphytons et des phytoplanctons dans les eaux thermales de Cirojo et Kabucina est présenté dans le tableau 2.

Tableau 2 : Espèces d'algues (les Periphytons et phytoplanctons) inventoriées dans les eaux thermales de Cirojo et Kabucina

Familles	Espèces	Cirojo	Kabucina
Algues bleues/Cyanophycées	<i>Tetrapedia sp</i>	1	-
	<i>Coelosphaerium sp</i>	2	5
Myxophycées	<i>Oscillatoria pseudogeminata</i>	2	1
	<i>Rivularia dura</i>	1	-
	<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	2	-
	<i>Nodularia spumigena</i>	-	1
	<i>Tolypothrix tenuis</i>	-	1
Diatomées/Bacillariophycées	<i>Melosira crenulata</i>	-	2
	<i>Cymbella tumida</i>	-	1
	<i>Pinnularia nobilis</i>	-	2
	<i>Stauroneis phoenicenteron</i>	-	1
	<i>Nitzschia thermalis</i>	-	1
	<i>Navicula zanoni</i>	-	3

	<i>Synedra acus</i>	-	1
	<i>Gyrosigma kuetzii</i>	-	1
	<i>Frustulia vulgaris</i>	-	2
	<i>Diatoma hiemale</i>	-	2
	<i>Cocconeis placentula</i>	3	-
	<i>Eunotia lunaris</i>	1	-
	<i>Campylodiscus sp</i>	3	-
Euglénophycées	<i>Euglena gracilis</i>	-	3
Chlorophycées	<i>Cosmarium portianum</i>	-	2
	<i>Spyrogyra porticalis</i>	-	1
	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	-	1
	<i>Closterium aburptum</i>	2	3
	<i>Gonatozygon monotaenium</i>	1	-
	<i>Zygnema insigne</i>	3	-
Desmidiacées	<i>Genicularia sp</i>	-	3
Nombre de taxa		11 (39,3%)	20 (71,7%)
Abondance de taxa		21 (36,2%)	37 (63,8%)

Les résultats repris dans le tableau 2 montrent que lors de récoltes, seulement 6 familles d'algues (periphytons et phytoplanctons) ont été identifiées (*Cyanophycées*, *Myxophycées*, *Chlorophycées*, *Bacillariophycées*, *Euglénophycées* et *Desmidiacées*) et 28 espèces. Le site Kabucina possède plus de taxa que le site Cirojo soit 6 familles (100 %), 20 espèces (71,4 %) et 37 individus (63,8 %) contre 4 familles (66,6 %), 11 espèces (39,3 %) et 21 individus (36,2 %) dans le site Cirojo. La famille Diatomées/Bacillariophycées est la plus représentative que les autres familles avec 13 espèces à elle seule soit 46,4 % et 23 individus soit 39,6 % et les familles *Euglénophycées* et *Desmidiacées* sont les

moins représentatives avec 1 espèce soit 3,5 % et 3 individus soit 5,1 % chacune. Les espèces *Coelosphaerium sp* et *Closterium aburptum* sont les plus représentées avec 7 individus soit 12,0 % et 5 individus soit 8,6 % respectivement et les autres espèces y sont en petit nombre.

ii **Les zooplanctons:** Les investigations dans les eaux thermales de ces deux sites (Cirojo et Kabucina) n'ont pas montré la présence des zooplanctons.

iii **La végétation environnante:** La flore environnante des sources hydrothermales dans les sites de Ciroja et de Kabucina a été inventoriée et est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Espèces de la flore inventoriées autour des eaux thermales de Cirojo et Kabucina

		Cirojo				Kabucina			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
Acanthaceae	<i>Brillantaisia cicatricosa</i> Lindau	-	-	-	-	-	-	-	+
	<i>Acanthus pubescens</i> (Thomson ex Oliv.) Engl.	-	-	-	-	-	+	-	-
	<i>Asystasia gangetica</i> (L.) T. Anderson	+	-	+	-	+	-	-	-
	<i>Dyschoriste radicans</i> Nees	+	+	+	-	-	-	-	-
Amaranthaceae	<i>Achyranthes aspera</i> L.	-	-	-	+	-	+	-	+
	<i>Amaranthus viridis</i> L.	-	-	+	-	-	-	-	-
Apiaceae	<i>Hydrocotyle mannii</i> Hook. f.	-	-	-	+	+	-	-	+
	<i>Centella asiatica</i> (L.) Urb.	+	+	+	-	+	-	-	-
Araceae	<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.) Schott	-	+	+	+	-	-	-	-
Aspleniaceae	<i>Asplenium</i> sp.	-	+	-	-	-	-	-	-
Asteraceae	<i>Acmella caulirhiza</i> Delile	-	+	+	-	-	-	-	-
	<i>Ageratum conyzoides</i> L.	+	+	+	+	-	-	+	+
	<i>Bidens pilosa</i> L.	+	+	+	-	-	-	-	-
	<i>Bothriocline longipes</i> (Oliv. & Hiern) N. E. Br.	-	-	-	-	+	-	-	-
	<i>Conyza sumatrensis</i> (Retz.) E. H. Walker	-	1	+	-	+	-	-	-
	<i>Crassocephalum crepidioides</i> (Benth.) S. Moore	+	+	+	4	-	-	-	-
	<i>Crassocephalum montuosum</i> (S. Moore) Milne-Redh.	+	+	+	-	-	-	+	-
	<i>Crassocephalum vitellinum</i> (Benth.) S. Moore	-	-	+	-	3	+	-	-
	<i>Galinsoga ciliata</i> (Rafin.) S. F. Blake	+	-	+	+	-	-	-	+
	<i>Guizotia scabra</i> (Vis.) Chiov.	+	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Gynura ruwenzoriensis</i> (S. Moore) S. Moore	-	-	-	+	-	+	-	+
	<i>Helichrysum</i> sp.	-	-	-	+	-	-	-	-
	<i>Lactuca inermis</i> Forssk.	+	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Lactuca serriole</i> L.	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Melanthera scandens</i> (Schumach. & Thonn.) Roberty	+	+	+	-	-	+	-	-
	<i>Microglossa pyrifolia</i> (Lam.) Kuntze	-	-	-	-	1	+	-	4
	<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) A. Gray	+	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Vernonia amygdalina</i> Delile	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Vernonia lasiopus</i> O. Hoffm.	-	-	+	-	+	-	+	-
Balsaminaceae	<i>Impatiens burtonii</i> Hook. f.	-	-	-	-	+	+	-	+

Brassicaceae	<i>Erucastrum arabicum</i> Fisch. & C. A. Mey.	+	-	-	-	-	-	-	-
Cannaceae	<i>Canna indica</i> L.	+	-	-	-	-	-	-	-
Caryophyllaceae	<i>Drymaria cordata</i> (L.) Willd. Ex Roem. & Schult.	+	-	+	-	+	+	-	+
	<i>Gypsophila elegans</i> M. Bieb.	-	-	-	+	-	-	-	-
	<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	-	-	+	-	-	-	-	-
Clusiaceae	<i>Harungana madagascariensis</i> Lam. ex Poir.	-	+	-	-	+	+	+	-
Commelinaceae	<i>Aneilema speckei</i> C. B. Clarke	-	-	-	-	-	-	-	+
	<i>Commelina benghalensis</i> L.	+	-	+	+	+	-	-	+
	<i>Commelina diffusa</i> Burm. f.	+	+	+	+	-	-	-	-
Convolvulaceae	<i>Convolvulus farinosus</i> L.	+	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Hewittia malabarica</i> (L.) Suresh	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Ipomoea batatas</i> (Choisy) Griseb.	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Ipomoea cairica</i> (L.) Sweet	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Ipomoea involucrata</i> F. Dietr. ex Choisy	+	+	-	-	-	-	-	-
Cyatheaceae	<i>Cyathea manniana</i> Hook.	-	-	-	-	-	-	-	+
Cyperaceae	<i>Kyllinga bulbosa</i> P. Beauv.	-	-	+	-	+	-	-	+
	<i>Carex</i> sp.	-	-	-	+	-	-	-	-
	<i>Cyperus distans</i> L. f.	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Cyperus latifolius</i> Poir.	4	-	-	1	-	-	-	-
Dennstaedtiaceae	<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn	-	-	-	-	-	+	-	+
Dioscoreaceae	<i>Dioscorea alata</i> L.	-	-	+	-	-	-	-	-
Fabaceae	<i>Crotalaria incana</i> L.	+	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Indigofera erecta</i> Eckl. & Zeyh.	+	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Milletia dura</i>	-	-	-	-	-	+	+	-
	<i>Mimosa invisa</i>	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Sesbania sesban</i> (L.) Merr.	+	-	-	-	-	-	-	-
Lamiaceae	<i>Clerodendron johnstonii</i> Oliv.	-	-	-	-	-	-	+	-
	<i>Leonotis nepetaefolia</i> (L.) R. Br.	+	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Mentha aquatica</i> L.	+	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Plectranthus</i> sp	-	-	-	-	2	3	3	-
Lobeliaceae	<i>Lobelia giberroa</i> Hemsl.	-	-	-	-	-	-	+	-
Lycopodiaceae	<i>Lycopodiella cernua</i> (L.) Pic. Serm.	-	-	-	-	+	-	-	-
Malvaceae	<i>Corchorus trilocularis</i> L.	-	+	-	-	-	-	-	-

	<i>Hibiscus sabdarifa</i> L.	+	+	+	-	-	-	-	-
	<i>Hibiscus sp.</i>	-	-	-	-	-	+	-	-
	<i>Sida acuta</i> Burm. f.	+	+	+	-	-	-	-	-
	<i>Sida rhomboidea</i> Roxb. ex Fleming	+	-	-	-	+	-	-	-
	<i>Triumfetta cordifolia</i> A. Rich.	+	+	+	-	+	-	-	-
	<i>Triumfetta rhomboidea</i> Jacq.	+	-	-	-	+	+	-	-
Marattiaceae	<i>Marattia fraxinea</i> Sm.	-	-	-	-	-	-	-	+
Melastomataceae	<i>Dissotis trothae</i> Gilg	-	+	-	+	+	+	+	+
	<i>Heterotis rotundifolia</i> (Sm.) Jacq.- Fél.	-	+	-	-	-	-	-	-
Musaceae	<i>Musa cavendishii</i> Lamb.	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Musa paradisiaca</i> L.	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Musa sapiensis</i>	-	+	-	-	-	-	-	-
Myrsinaceae	<i>Maesa lanceolata</i> Forssk.	-	-	-	-	-	-	+	-
Nephrolepidaceae	<i>Nephrolepis undulata</i>	-	-	-	-	-	-	+	-
Onagraceae	<i>Ludwigia abyssinica</i> A. Rich.	+	+	+	+	-	-	-	-
Oxalidaceae	<i>Biophytum helenae</i> Buscal. & Muschl.	-	-	-	-	+	-	+	+
	<i>Oxalis corniculata</i>	+	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Oxalis corrymbosa</i>	+	+	+	-	-	+	-	-
	<i>Oxalis radicata</i> A. Rich.	+	-	-	-	-	-	-	-
Phyllanthaceae	<i>Bridelia bridelifolia</i> (Pax.) Fedde	-	-	+	-	-	+	-	+
	<i>Phyllanthus capilaris</i> Schumach. & Thonn.	-	-	-	-	-	+	-	-
	<i>Phyllanthus niruri</i> L.	+	+	+	-	-	-	-	-
Plantaginaceae	<i>Plantago palmata</i> Hook. f.	+	-	-	-	-	-	-	-
Poaceae	<i>Digitaria abyssinica</i> (A. Rich.) Stapf	1	-	+	+	-	1	-	-
	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Isachne buettneri</i> Hack.	2	4	3	+	+	-	+	+
	<i>Panicum maximum</i> L.	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Paspalum conjugatum</i>	-	-	-	-	+	-	+	+
	<i>Pennisetum purpureum</i>	-	-	-	+	+	+	+	1
	<i>Rhychelictum repens</i> (Willd) C.E. Hubb.	-	-	-	-	-	-	+	-
	<i>Saccharum officinarum</i> L.	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Setaria barbata</i> (Lam.) Kunth	+	+	+	-	-	-	-	+
	<i>Setaria pumila</i> (Poir.) Roem.	+	-	+	-	+	-	-	-

Polygonaceae	<i>Persicaria serrulata</i> (Lag.) Webb & Moq.	-	-	-	+	-	-	+	-
	<i>Polygonum nepalense</i> Meisn.	-	-	-	-	+	-	-	-
	<i>Polygonum pulchrum</i> Blume	-	-	+	+	-	-	-	-
Rosaceae	<i>Rubus apetalus</i> Poir.	-	-	-	-	-	+	2	-
	<i>Rubus steudneri</i> Schweinf.	-	+	-	-	-	-	-	-
Rubiaceae	<i>Pentas zanzibarica</i> (Klotzsch) Vatke	-	-	-	-	-	+	+	-
	<i>Spermacoce princeae</i> (K. Schum.) Verdc.	-	-	+	-	+	+	+	+
	<i>Spermacoce</i> sp.	-	-	-	-	+	-	-	-
	<i>Virectaria major</i> (K. Schum.) Verdc.	-	-	-	-	-	+	+	-
Solanaceae	<i>Physalis peruviana</i> L.	+	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Solanum angustispinosum</i> De Wild.	-	-	-	-	+	+	+	-
	<i>Solanum mauritianum</i> Scop.	+	-	-	-	+	-	+	-
Thelypteridaceae	<i>Pseudocyclosorus camerounensis</i> Holttum	-	-	-	-	-	+	-	-
Ulmaceae	<i>Trema orientalis</i> (L.) Blume	-	+	-	-	+	+	-	-
Urticaceae	<i>Bouhemeria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	-
	<i>Musanga leo-errerae</i>	-	+	-	-	-	-	-	-
Verbenaceae	<i>Lantana camara</i> L.	+	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Lantana trifolia</i> L.	+	-	-	+	-	-	-	-
Vitaceae	<i>Cissus</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	+
Woodsiaceae	<i>Athyrium</i> sp.	-	+	-	-	+	-	+	-

Les investigations floristiques conduites aux alentours des eaux thermales d'Irhambi-Katana ont permis de recenser une liste de 116 espèces, réparties dans 94 genres et 42 familles de plantes. Les familles des *Asteraceae*, *Poaceae* et *Malvaceae* sont les plus abondantes, avec respectivement 19, 10 et 7 espèces, soit 16,38%, 8,62% et 6,03%, tandis que plusieurs autres familles n'ont qu'une seule espèce (soit 0,86%). Signalons que ces deux sites ont une similitude très faible, de moins de 20%. Le site Cirojo possède plus de taxa 86 (74,14 %) que le site Kabucina 30 (25,86 %). Malgré le nombre élevé de taxa enregistrés au site Cirojo, la végétation dans ce site est fortement anthropisée. Plusieurs espèces cultivées (*Amaranthus viridis*, *Saccharum officinarum*, ... etc) sont visibles sur ce site. Tandis qu'au site Kabucina, ce dernier est un site abandonné et laissé en jachère depuis longtemps. Sur base des données collectées sur le terrain, deux groupes de végétation ont été établis selon qu'ils s'agissaient d'espèces

du site de Cirojo et de Kabucina (Figure 3). Ces groupes se présentent comme suit :

Le premier groupe est formé des 4 quadrats délimités autour du site de Kabucina et caractérise la végétation d'une jachère longtemps abandonnée, évoluant à une savane arbustive. Le groupement à *Microglossa pyrifolia* (Lam.) Kuntze et *Plectranthus sp.* caractérise ce milieu. L'abondance des individus d'*Harungana madagascariensis* Lam. ex Poir. et de *Lobelia giberroa* Hemsl. ainsi que de la présence de quelques pieds de *Cyathea manniana* Hook. montrent déjà une évolution de la végétation en formation forestière. Le second groupe caractérise la végétation aux alentours des eaux thermales mais beaucoup plus perturbée et anthropisée. Ce groupe est caractérisé par le groupement à *Isachne buettneri* Hack. et *Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore. Néanmoins, plusieurs espèces cultivées sont visibles dans ce site.

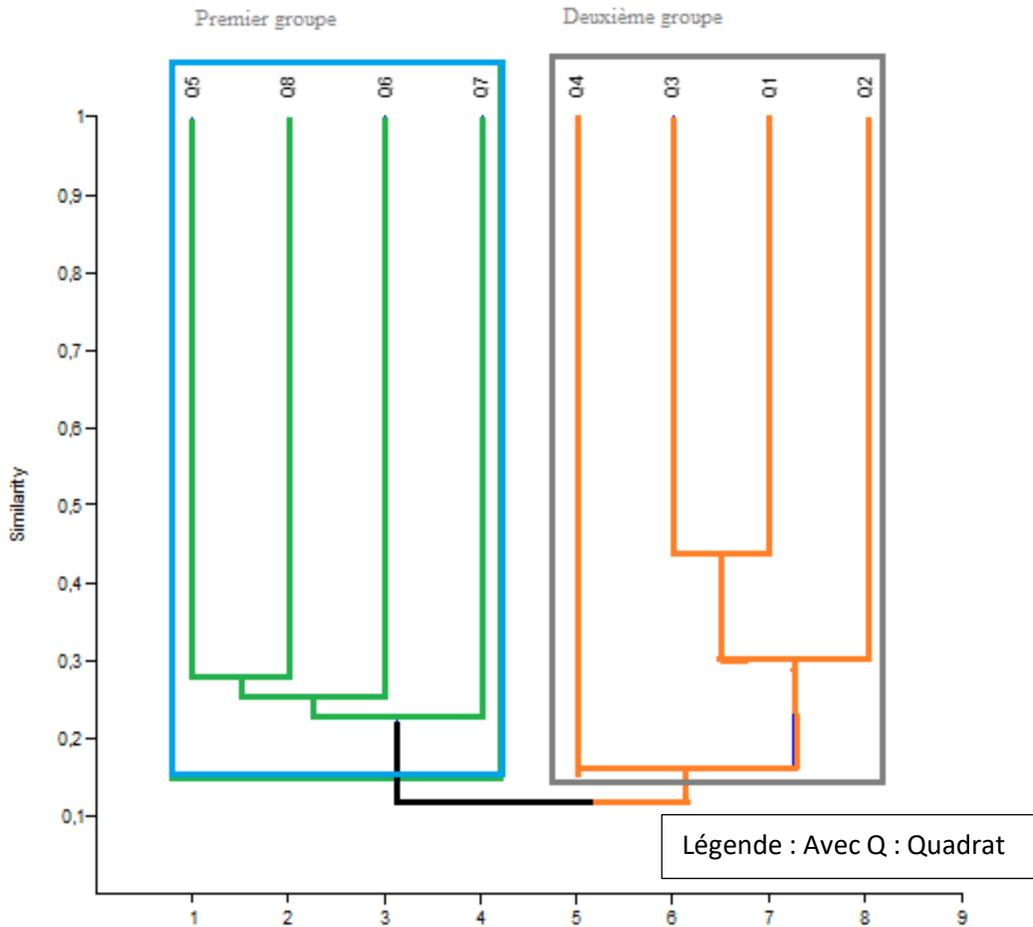


Figure 3 : Dendrogramme de similarité issu des données des deux sources thermales d'Irhambi-Katana

i. **Les macro-invertébrés benthiques dans les sources thermales :** L'inventaire des macro-invertébrés dans les sources thermales de Cirojo et Kabucina durant la période d'études est présenté dans le tableau 4.

Tableau 4 : Espèces de la faune inventoriées autour des eaux thermales de Cirojo et Kabucina

TAXA	Cirojo	Kabucina	TOTAL	Fréquence (%)
E. Mollusques				
CL. Gastropodes				
O.Gasteropodes pulmonés				
F.Lymnaeidae				
<i>Lymnaea natalensis</i>	5	0	5	1,6
F. Potatiopsidae				
<i>Tomchia haendrexis</i>	5	0	5	1,6
F. Planorbidae				
<i>Biomphalaria pfeifferi</i>	4	0	4	1,3
F. Thiaridae				
<i>Melanoides tuberculata</i>	258	0	258	81,9
E. ARTHROPODES				

Cl. Insectes				
O. Coleoptera				
F. Gyrinidae				
<i>Gyrinus notatora</i>	6	0	6	1,9
O. Hemiptere				
F. Velidae				
<i>Velia cuneus</i>	4	0		1,3
F. Naucoridae				
<i>Pelocoris femoratus</i>	10	0	10	3,2
O. Diptera				
F. Chironomidae				
<i>Tendipens tantans</i>	6	4	10	3,2
CL Arachnidae				
O. Araneide				
F. Agyronectidae				
<i>Argyronecta aquatica</i>	10	1	11	3,5
Cl. Crustacés				
O. Decapoda				
F. Potamonidae				
<i>Potamon sp</i>	2	0	2	0,6
Total	310	5	315	100
Richesse spécifique	10	2	-	-

Il ressort de ce tableau que le nombre d'espèces varie d'un site à l'autre pour les deux sites prospectés, le site de Cirojo est plus peuplé par rapport au site de Kabucina. Le premier site contient deux embranchements, celui des mollusques et l'autre des Arthropodes. L'embranchement des mollusques contient une classe (classe des gastéropodes) et un ordre (ordre des gastéropodes pulmonés) et trois familles (famille de Lymnaeidae, famille de Pomatiopsidae et la famille de Planorbidae). L'embranchement des Arthropodes contient trois classes (classe des insectes, classe des arachnidés et la classe des crustacés), il contient cinq ordres (ordre des coléoptères, ordre des hémiptères, ordre des aranéides et l'ordre de décapodes) et six familles (famille des Gyrinidae, famille des Velidae, famille des Naucoridae, famille des Chironomidae, famille des Agyronectidae et la famille des Potamonidae). Le site n'a qu'un seul embranchement celui des Arthropodes, deux

ordres celui des diptères et Araneide ; deux familles, celle des Chironomidae et Agyronectidae. Le tableau 4 montre que la richesse spécifique globale varie d'un site à un autre de 2 (site 1) à 10 (site 2). De tous les sites prospectés les mollusques *Melanoides tuberculata* est l'espèce la plus abondante de tous les macro-invertébrés récoltés (81,9 %) ; *Potamon sp* est l'espèce la plus rare (0,6 %)

ii. **Caractéristiques géologiques et géophysiques :** Quatre points d'émergences majeures de l'hydrothermalisme du milieu ont été identifiés et observés et échantillonnés, regroupés en deux principales sources. Les griffons 1 et 2 figurent au premier groupe des sources de Cirojo et les deux autres sont ceux de Kabucina vers le Nord-Ouest du premier. Les caractéristiques géologiques et géophysiques de la région sont décrites suivants la région et chaque milieu étudié.

a. Griffon 1: S 2°12'08.3'', E 28°50'33.5'' et altitude 1497 m. Cette

eau chaude sort sur une fissure d'orientation N50E ou S225W à mi-bas d'une colline de pente N35E.

- b. Griffon 2 : S 02°12'08.1'', E 28°49'32.5'' et altitude 1507 m. La sortie de l'eau est orientée sur fissure de N60W. Une colline de pente N40W en forme de dôme y fait face devant laquelle une rivière coule mais dont la source n'est pas identifiée. Par les observations, la source de la rivière serait souterraine et se jette dans le Lac Kivu.
- c. Griffon 4 : S 02°09'59.5'', E 28°49'31.7'' et altitude de 1755 m.
- d. Griffon 5 : S02°09'54.5'', E 28°49'21.4'' et altitude 1755 m. La direction de la sortie fissurale de la source est N20E. Ce site avait subi une contrainte du au tremblement de terre du 03/2/2008 qui a provoqué un affaissement sur le flanc de la colline l'encaissant. L'orientation de l'arrachement de masse est N20W au point de coordonnées : S02°9'54.5'', E28°49'20.8'' et altitude de 1756m.

En utilisant les données préliminaires des bulletins de sismicités durant la période de Décembre 1979 à Décembre 1980, une forte concentration de séismes se retrouve dans la partie Sud-Ouest du bassin avec des magnitudes inférieures ou égale à 3,5 ($M \geq 3,5$). Et depuis l'année 1997, le bassin du Lac Kivu connaît une forte recrudescence de l'activité sismique en date du 24 Octobre 2002, un tremblement de terre de magnitude ($M_w = 6.2$) avec comme épicerentre la partie Ouest du bassin dans le territoire de Kalehe (près du site d'étude), a fortement secoué le bassin du Lac Kivu et ses environs. Plusieurs sources thermales ont vu leurs griffons disparaître. Mais le 3 Février 2008, un autre tremblement de terre de magnitude ($m_b = 6.1$) a secoué de nouveau le bassin du Lac Kivu dans sa partie Sud-Ouest dans la localité de Birava. Cet événement sismique a été aussi associé à plusieurs répliques qui ont continué à faire des dégâts jusqu'au mois de Juin 2008 et ressentis jusqu'en Septembre 2008 et les griffons qui étaient disparus ont resurgis en surface notamment Cirojo et Kabuchina. La distribution des séismes dans le bassin du Lac Kivu est présentée sur la Figure 4.

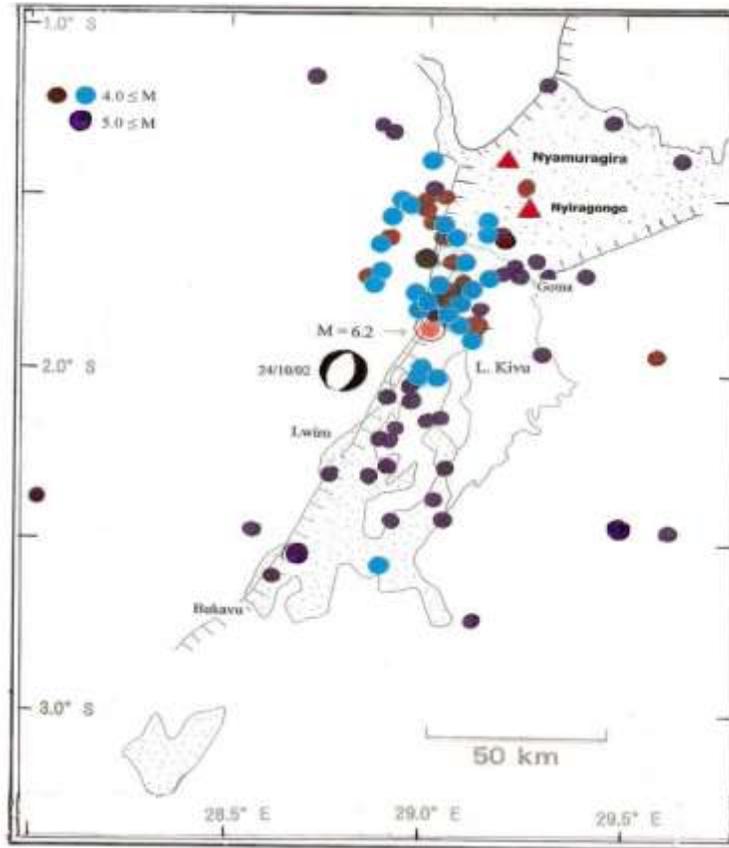


Figure 4 : Distribution des séismes dans le bassin du Lac Kivu

DISCUSSION

La région de Katana est une région volcanique et est affectée par plusieurs failles de direction NE-SW entrecoupées par des failles principales NE - SW, NW - SE and NEE - SWW (Villeneuve, 1979). La tectonique est à l'origine des différentes fracturations. Les émergences thermales se situent sur le tracé de la faille principale. Les eaux thermales de Cirojo et Kabucina sont hypo-thermales conformément à la classification des eaux thermales selon Gorchkov et Yakouchova (1967). Ces sources ont disparu pendant une période et lors de séisme elles sont réapparues avec une faible chaleur. C'est particulièrement vrai durant les périodes post et inter-sismiques durant lesquelles les contraintes se ré-équilibrent au niveau des zones de rupture et les failles recommencent à se charger sous l'effet de la contrainte tectonique régionale

comme l'avait constaté Sibson, (1994). En effet, l'activité hydrothermale augmente durant ou après les crises sismiques (Howald *et al.*, 2015). Cox *et al.*, (2015) et Howald *et al.*, (2015) montrent que ce phénomène facilite également l'infiltration de fluides froids en sub-surface et leur potentiel mélange avec les fluides hydrothermaux, diminuant les températures et modifiant les signatures chimiques des sources hydrothermales lors des crises sismiques comme le cas de ces deux sources. Outre la température, un faible pH d'eau entraîne également une plus grande lixiviation des matières inorganiques des roches et du sol, augmentant le risque que des substances inorganiques naturelles s'accumulent à des concentrations plus élevées que prévu (Van der Sloot *et al.*, 1997). Les sources Cirojo et Kabucina ont une dureté faible car même le

carbonate est absent dans les deux sites contrairement à ceux qu'on trouve dans les autres eaux thermales de la région (Hatekezimana *et al.*, 2022 ; Bagalwa *et al.*, 2015a). Le pH des eaux thermales dans la région volcanique active est supérieur à 8 avec la présence de chlorure et bicarbonate et le pH compris entre 7 et 8 coïncide avec l'absence de chlorure et bicarbonate dans les sources de Kankule, Maziba, Mahyuza, Mutsora,... (Vikandy *et al.*, 2008). Aucun dépôt de travertin n'a été remarqué dans les deux sites, ce qui donnerait un sens trop juvénile à ces sources contrôlées par les failles. En effet, selon Evrad, (2012) et Pens, (2006), les ions et composés chimiques comme Ca^{2+} , H_2S , CO_2 , SiO_2 , K^+ et H^+ sont extraits de la roche mère et passent en solution tandis que le Mg^{2+} , SO_4^{2-} et Na^+ sont extraits à l'eau de la nappe. Ceci confirme que les sources sont d'origine de circulation profonde des eaux rencontrant un jeu de failles et fractures. Les dépôts ferrugineux observés au niveau de la plupart des émergences thermales dans les deux sites témoignent de l'extension des formations détritiques du Néogène (grès et conglomérats roux). La composition chimique de ces eaux thermales est dominée par la présence abondante de minéraux sulfurés. Les principales sources d'ions sulfate dans les eaux souterraines sont : i) le gaz fumarolique de dioxyde de soufre, ii) le gypse des minéraux formant la roche ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et 3) les minéraux formant la roche de la pyrite (Seki *et al.*, 2004). Cependant, la pyrite a besoin de beaucoup d'oxygène pour former l'ion sulfate ($\text{FeS}_2 + 4\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 6\text{H}^+$) (Jolie, 2010). Contrairement aux sources des eaux de Kakondo qui sont alimentées par les calcaires et les dolomies (Bagalwa *et al.*, 2015a). Cette situation a été observée ailleurs dans les eaux thermales de Ain Témouchent et les régions de Tlemcen et de Saida (Blavoux et Collignon, 1986 ; Fekraoui, 2007). La projection des

coordonnées de ces deux sources sur la carte de failles de la région montre que ces deux sources se retrouvent sur une même faille mais curieusement leur composition hydrochimique diffère. Ceci est contraire avec les sources de montagnes de Russie dont les sources se trouvant dans la même faille ont les caractéristiques identiques (Glazier et Gooch, 1987). En effet, placés dans le diagramme de Piper, les résultats d'analyses chimiques ont révélé qu'il s'agit des eaux essentiellement de type bicarbonaté-chloruré-sulfaté et calcique pour la source de Kabucina et bicarbonaté-magnésien pour la source Cirojo où l'eau est plus riche en calcium et magnésium. La salinité de ces deux sources reflète la présence de formations triasiques (gypse, sel gemme, potasse) dans leur bassin hydrogéologique. Vikandy *et al.*, (2008) ayant étudié les sources thermales de la région volcanique active des Virunga au Nord Kivu et celle du sud Kivu au volcanisme cénozoïque inactif, ils ont démontré que les premières possèdent une grande concentration en HCO_3^- et Cl^- , soit entre 2000 et 4500 et 1000 et 1200 respectivement. Les mêmes auteurs obtiennent une faible valeur de ces deux composés dans la région de Katana avec les sources thermales de Kankule et de Maziba. Getahun (2010) indique que les sources thermales dans le Rift Ouest du système des Rifts Est Africain resurgissent en association avec les failles et que le CO_2 ensemble avec les composés volatiles comme CH_4 et H_2O sont rencontrés aussi en association avec les failles qui passent dans le Lac Kivu. Gehahun (2010) montrent que ces gaz volatiles auraient une origine mantellique. Ainsi, dans notre cas les sources thermales de Cirojo et Kabucina ont une faible concentration en HCO_3^- et Cl^- comparables aux résultats trouvés par Vikandy (2008). Les composés sulfates sont en concentration relativement supérieure à celles de Kankule, Maziba et Mahyuza mais alors largement inférieure à

celles de régions des Virunga, et de Beni et comparable à celle de Sake ; partant des travaux de Vikandy (2008). Certes, les circulations profondes des eaux par un échauffement au niveau du manteau à cause de l'amincissement de la croûte (l'épaisseur sismogénique inférieure à 15 Km) seraient le facteur originel des sources thermales de Cirojo et Kabucina contrôlées par les failles comme c'est le cas au Madagascar (Andrianairo, 2011). Les phosphates sont des matières organiques provenant de diverses sources, notamment des plantes mortes et des engrais chimiques. Si la concentration de phosphates est élevée dans l'eau, elle nourrit les algues pour se développer et rend l'eau verte et trouble, une concentration accrue a des effets possibles sur la santé des utilisateurs. Selon Alley (1993), les sulfates sont présents à l'état naturel et abondants dans l'environnement, provenant principalement des gisements minéraux, des sols, des roches et de la combustion de combustibles soufrés. L'exposition à une concentration élevée de sulfates a de nombreux effets sur la santé, notamment une réduction des fonctions pulmonaires et cardiaques (Iyama et Takana, 2004). Les caractéristiques chimiques agissant aussi sur la biodiversité et leurs avantages qu'elles donnent à l'eau sont tels que ce sont des ions qui ont des propriétés thérapeutiques contre l'obésité, le rhumatisme, les troubles digestifs, circulatoires et peuvent soigner les dents. Les caractéristiques biologiques sont influencées par les deux précédentes, surtout la température qui affecte toutes les autres (Boutakoff, 1939 ; Snel, 1956). Les résultats montrent que le type de source et les caractéristiques de la végétation aux alentours affectent la composition faunistique. En général les facteurs en cause de cette variation de la composition faunistique seraient la couverture végétale et la composition hydrochimique. Ces facteurs agissent en combinaison comme confirmé

dans les sources froides (Glazier et Gooch, 1987 ; Khmelava *et al.*, 1994). L'avantage de cette végétation riveraine qui existe autour des eaux thermales est d'épurer l'air. Les algues trouvées démontrent que certains organismes peuvent tolérer ces conditions de vie dans les eaux thermales. En effet, les espèces des sources thermales ne diffèrent pas de celles des autres eaux de la région déjà étudiées (Bisimwa *et al.*, 2013) et peuvent être considérées comme des espèces thermo-tolérantes tel le cas ailleurs dans le Rift (Mpawenayo *et al.*, 2006). La biodiversité biologique rare ou inexistante prouve la pollution thermique de ces eaux comme le signale Sindimo, (1979), c'est le cas des zooplanctons dont aucun n'a été identifié au cours de cette étude. Certaines espèces de la flore riveraine sont caractéristiques des eaux thermales, c'est le cas de *Bidens pilosa*, *Pseudocyclosorus camerounensis*, *Ipomoea cairica*, *Lantana camara*, *Lantana trifolia*, *Imperata cylindrica*, *Asistasia gangetica*, *Mentha aquatica*, ... (Bagalwa *et al.*, 2015b) ; certaines de ces espèces (*Mentha aquatica*, *Cyperus divers*, *Commelina spp.*,...) ont été récoltées et identifiées dans les sites d'étude Cirojo et Kabucina, ce qui permet de les associer à d'autres sources d'eaux thermales de la région. L'absence de certaines espèces de la flore riveraine caractéristiques des eaux thermales dans les sites d'étude témoignent que ces sources d'eaux thermales ont des caractéristiques différentes des celles des autres eaux thermales connues dans la région ou seraient des sources récentes (Kakondo, Maziba, Kankule, Byalumbu, Buhandahanda, Ciziri, ...) ou peut être serait du à cette anthropisation observée, surtout dans le site de Cirojo. Pour les deux sources, la composition faunistique diffère par comparaison avec les sources d'eau froide de la région environnante (Bagalwa *et al.*, 2009). Glazier et Gooch (1987) concluent dans leurs travaux sur la composition faunistique des sources que les conditions environnementales

déterminent l'assemblage de la faune que les interactions interspécifiques. L'espèce *Melanoides tuberculata* est spécifique pour la source Cirojo. Cette espèce n'a jamais été récoltée dans les cours d'eau de la région sauf

dans le Lac Kivu (Batumike *et al.*, 2022). Sa présence est une particularité pour cette source thermale de Cirojo car c'est une espèce exigeante du point de vue écologique mais qui prolifère dans ce site.

CONCLUSION ET APPLICATION DES RESULTATS

L'analyse chimique préliminaire a montré que ces sources thermales de Cirojo et Kabucina sont différentes alors qu'elles se retrouvent sur la même faille telle que les observations géophysiques les font remarquer. Ces eaux essentiellement de type chloruré-sulfaté et calcique pour la source de Kabucina et magnésien pour la source Cirojo où l'eau est plus riche en calcium et magnésium. Le mollusque *Melanoides tuberculata* est l'espèce faunistique caractéristique des eaux thermales de Cirojo. Les espèces *Microglossa pyrifolia* (Lam.) Kuntze, *Plectranthus sp.*, *Harungana madagascariensis* Lam. ex Poir., *Lobelia giberroa* Hemsl., *Cyathea manniana* Hook., *Isachne buettneri* Hack. et *Crassocephalum*

crepidioides (Benth.) S. Moore sont caractéristiques dans les deux sites d'étude Cirojo et Kabucina. Le site de Kabucina contrairement à celui de Cirojo est sur l'intersection de la faille de N – S parallèle au rift principal du Lac Kivu et la faille NW – SE qui se prolonge jusqu'à Birava. L'évaluation des ressources hydrogéothermiques de la région de Katana nécessite une bonne connaissance des données géologiques et géophysiques ainsi que de la répartition des caractéristiques chimiques des eaux, de la température, de l'hydrodynamique des réservoirs et de leurs caractéristiques petro-physiques. Des telles études sont nécessaires dans cette région.

BIBLIOGRAPHIE

- Alley W. M., 1993. Regional ground-water quality. John Wiley & Sons.
- Al-Rehaili, A.M., 2003. Comparative chemical clarification for silica removal from RO groundwater feed. *Desalination*, 159, 21–31.
- Andrianairo L., 2011. Caractéristiques générales des systèmes et des régions géothermiques de Madagascar. *Medamines*, 2, 11 – 21.
- APHA (American Public Health Association), 1981. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (15th edn). Washington DC, USA, 1587pp.
- Arfib B., 2010. Les sources karstiques », Association Française de Karstologie. Grottes et Karst de France, pp 30-31.
- Bagalwa M. L., Bagalwa M., and Karume K., 2015a. Hydrochemical characterization of Katana thermal waters, Lake Kivu watershed. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 3 (1B): 98 – 103
- Bagalwa M., Bagalwa M., Karume K., Iragi K., Kubisimbwa M., Burume N., Ndahama N., et Bayongwa C., 2015b. Caractérisation physico-chimique et identification des espèces végétales indicatrices des eaux thermales de Katana, Sud-Kivu, République Démocratique du Congo. *Afrique Science*, 11, 5, 406 – 421.
- Bagalwa M., and Kubuya B., 2009. Study of water quality of a mountain Cirhanyobowa River, Eastern of Democratic Republic of Congo .

- Cahier du CERUKI, Numéro Special, CRSN-LWIRO, pp 34–44.
- Bagalwa, M., et Baluku B., 1997. Distribution des mollusques dulcicoles hôtes intermédiaires des schistosomoses humains à Katana, Sud-Kivu. *Médecine Tropicale*, 57, 369–372.
- Baioumy H., Nawawi M., Wagner K., and Arifin M. H., 2015. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 290, 12–22.
- Batumike C., Bagalwa M., Ndegeyi K., Bahizre K., et Baluku B., 2022. Distribution thermo-spatiale de *Melanoides tuberculata* (Müller, 1774) (Gastropoda: Thiaridae) dans quelques écosystèmes aquatiques de la région de Katana Est de la République Démocratique du Congo. *NOVAPEX*, 23, 2, 75-83
- Benabdellonahad S., 2006. Structure, dynamique et typologies physico-chimiques et phytoplanctoniques de l'estuaire du Bon Regreg (Côte Atlantique Marocaine). Thèse de Doc, Université Mohammed V, 293p.
- Bisimwa M., Ngera M., Bisimwa K., Bagalwa M., and Mushayuma N., 2013. A Preliminary Checklist of Epilithic Algae of Kahuzi-Biega National Park, Democratic Republic of the Congo. *Greener Journal of Biological Science*, Vol. 3, 8, 282-291.
- Bhavani B., 2020. Caractérisation du système hydrothermal du Piton des Neiges par des méthodes géochimiques et isotopiques. Thèse en Géochimie. Université de la Réunion, 198p.
- Blavoux B., et Collignon B., 1986. Les sources bicarbonatées tièdes des Piémonts de la Mesata Oranaise. 6^{ème} Séminaire National des Sciences de la terre, Alger.
- Boudoukha, A., et Athamena, M., 2012. Caractérisation des eaux thermales de l'ensemble Sud sétifien. Est algérien. *Revue des sciences de l'eau*, 25, 2, 103–118
- Boutakoff N., 1934. Sur la découverte de deux massifs de volcans éteints au Sud – Ouest du Lac Kivu. *Bln de la société Belge de Géologie (de Paléontologie et Hydrologie)*. Tome XLIII, 41 – 85.
- Boutakoff N., 1939. Géologie des territoires situés à l'Ouest et Nord-Ouest du fossé tectonique du Kivu, Louvain.
- Braun-Blanquet J., 1932 - Plant sociology. The study of plant communities. Édit. McGraw-Hill, New-York (USA) - Londres (GB), traduit par G.D. FULLER et H.S. CONRAD, XVIII + 439 p.
- Brown S. D., 1994. Freshwater snails of Africa and their medical importance. Taylor and Francis, London, 487p.
- Cahen L., and Lepersonne J., 1967. The Precambrian of the Congo, Rwanda and Burundi. In: Rankama K (ed) *The Precambrian*. Interscience Publishers, New York, 143–290.
- Castelli S., 2012. Hydrogéochimie des sources associées aux eskers de l'Abitibi, Québec ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrises science appliquées, université de Québec, pp 5-12
- Chalikakis M. K., 2006. Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques. Thèse en Géophysique, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 224p.
- Chevalier-Lemire G., Pigassou R., Rigail R., et Vilmus T., 1990. Etude des variations naturelles du débit des sources thermales a Luchon (Haute-

- Garonne, France). Bull BRGM, 4, 287-296.
- Cox C.R., 1967. Techniques et contrôle du traitement des eaux. OMS, Genève, 429p.
- Cox S. C., Menzies C. D., Sutherland R., Denys P. H., Chamberlain C., and Teagle D. A. 2015. Changes in hot spring temperature and hydrogeology of the alpine fault hanging wall, new zealand, induced by distal South Island earthquakes. *Geofluids*, 15(1-2) :216–239.
- Cunha M.R., Sorbe J.C. and Bernardes C., 1997. On the structure of the coastal suprabenthic communities from the continental shelf of Aveiro(New Portugal). Nova serie, 3, 3, pp165-188.
- Djorfi S., 1988. Étude des eaux minérales et thermales du nord-est algérien et leur importance socio-économique. Thèse Doct. PhD, Univ. d'état d'Azerbaïdjan (URSS) ,196 p.
- Evrard C., 2012. Processus métallogéniques associés aux interactions hydrothermales entre l'eau de mer et les roches ultrabasiques du manteau, exemple de la ride Médio-Atlantique. Géochimie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 224p.
- Finizola A., 2002. Etude de systèmes hydrothermaux de volcans actifs : Misti (Pérou) et Stromboli (Italie) ; Approches géophysiques et géochimiques. Thèse en Géologie appliquée, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 206p
- Faulds, J., Coolbaugh, M., Bouchot, V., Moek, I., and Oguz, K. (2010). Characterizing structural controls of geothermal reservoirs in the great basin, usa, and western turkey: Developing successful exploration strategies in extended terranes. In *World Geothermal Congress 2010*, pages 11–p.
- Fekraoui A., 2007. Caractéristiques géochimiques des eaux géothermales de la région d'Oran. Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda, 75-80
- Fischer E., 1993. La végétation du Parc National de Kahuzi-Biega (Sud-Kivu/Zaire) Bonn. 93p.
- Géraud, Y., Diraison, M., and Orellana, N. (2006). Fault zone geometry of a mature active normal fault : a potential high permeability channel (pirgaki fault, corinth rift, greece). *Tectonophysics*, 426(1) :61–76.
- Getahun D., 2010. Mantle Influence, Rifting and Magmatism in the East African Rift System (EARS): A Regional View of the Controls on Hydrothermal Activity. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010
- Glazier D. S., and Gooch J. L., 1987. Macroinvertebrate assemblages in Pennsylvania (U.S.A.) springs. *Hydrobiologia*, 150, 33–43
- Golterman H. L., Clymo R. S., and Ohnstad M. A. M., 1978. Methods for Physical and Chemical Analysis of Fresh Waters. Blackwell, London, 213pp.
- Gorchkov G. et Yakouchova A., 1967. Géologie générale. Published by Mir, 596 pp. (French).
- Grillot J. C., et Dazy J., 1983. Photo interprétation, tectonique cassante et thermalisme : exemple du domaine alpin (France). Géol. Alpine, Grenoble, Fr., 59, 45-60.
- Guibert Ph., 1977. Contribution à l'étude du volcanisme du Sud-Kivu (Zaire); I. La chaîne volcanique Tshibinda-Kalehe. II. Les épanchements basaltiques anciens et récents de l'île Idjwi. Arch. Sc. Genève, 30, 1, 15-43.
- Han D., Liang X., Jin M., Currell M., Song M., and Liu C., 2010. Evaluation of

- groundwater hydrochemical characteristics and mixing behavior in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 1-2, 92–104.
- Hategekimana F., Mugerwa T., Nsengiyumva C., Byiringiro F. V., and Rwabuhungu D., 2022. Geochemical Characterization of Nyamyumba Hot Springs, Northwest Rwanda. *Applied Chem*, 2, 4, 247-258
- Howald T., Person M., Campbell A., Lueth V., Hofstra A., Sweetkind D., Gable C. W., Banerjee A., Luijendijk E., Crossey L., Karlsrom K., Kelley S., and Phillips F. M., 2015. Evidence for long timescale (> 103 years) changes in hydrothermal activity induced by seismic events. *Geofluids*, 15(1-2) :252–268.
- Ilunga L., 1991. Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du Sud-Kivu. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 27, 209-228.
- Iyama J., and Tanaka N., 2004. Gastrointestinal function, the liver, and hot spring bathing. In: *The Japanese society of balneology, climatology and physical medicine, New onsen medicine*. Tokyo: JTB Printech; 194–198.
- Jolie E., 2010. Geothermal Exploration in the Virunga. Prospect, Northern Part of Rwanda. In *Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*, 25–29
- Khmelava N., Nesterovich A. and Czachorowski s., 1994. The macroinvertebrate fauna of some Byelorussian, Karelian and Attaian springs and its relation with certain factors. *Acta Hydrobiol.*, 36, 1, pp 75-90.
- Kufferath J., 1957. Quelques algues des rapides de la Ruzizi à Bugarama (Rwanda-Urundi). *Acad. Royale des sci. Col.*, Tome , fasc. 3, 62p.
- Letouzey R., 1982. *Manuel de botanique forestière de l'Afrique Tropicale Tome 1*, Centre technique Forestier Tropical.
- Levin J., and Miller R., 2011. A guide to the ingredients and potential benefits of over-the-counter cleansers and moisturizers for Rosacea patients. *The Journal of Clinical and Aesthetic Dermatology*; 4, 8, 31–49
- Maillard R., 1978. Contribution à la connaissance des diatomées d'eau douce de la Nouvelle-Calédonie (Océanie). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, 12, 2, 143-172.
- Makuku L., 2019. Inventory of geothermal sources in the DRC and their development plan for the electrification of local areas. Case of the eastern part of the DRC."2nd International Geothermal Conference, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 249, 012016.
- Micha J. C., et Moiset J. L., 1982. Evaluation biologique de la pollution de ruisseaux et rivières par les macro-invertébrés aquatiques, *Probio Revue*, 5, 1,142p.
- Moeck I. S., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37 :867– 882.
- Mpawenoyo B., Cocquyt C., et Ninderera A., 2006. Les diatomées (Bacilariophyta) et autres algues des sources thermales du Burundi (Afrique Centrale) en relation avec des caractéristiques physiques et chimiques des eaux. *Belgian Journal of Botany*, 138, 2, 152 – 164.
- Mulenda M. A., Cimbela K.J., et Kabasele Y. Y. A., 2020. Etude différentielle des

- sites géothermiques de Kankule à Katana au Sud-Kivu. *Journal of Applied Physics*, 12, 3, 37-45
- Muralt R., Vuataz F. D., Schonborn G., Sommaruga A., et Jenny J., 1977. Intégration des méthodes hydrochimiques, géologiques et géophysiques pour la prospection d'une nouvelle ressource en eau thermale. Cas d'Yverdon-les-Bains, pied de Jura. *Eclogae geol. Helv.*, 90, 179-197.
- Needham J.G., and Needham P.R., 1962. A guide to the study of freshwater biology. Holden day, Inc, San Francisco.
- Olivier L., and Scheidermane M., 1956. Method for estimation of the density of aquatic snail population. *Exp. Parasitol.*, 5, 109-117.
- Passau M. G., 1933. Les Sources thermales de la Province Orientale (Congo Belge). Institut Royal Colonial Beige. Bruxelles Paleis del' Akademien, Brussel, IV - 1933 - 3, pp. 778 - 815.
- Pennak R. W., 1953. Freshwater invertebrates of the United States. the Ronald Press Compagny, New-York ,769p.
- Pens M., 2016. Etude expérimentale de l'altération hydrothermale des roches ultrabasiques. Sciences de la Terre. Université de Lyon, 293.
- Poisson A., 1969. Hétéroptères aquatiques. Exploration hydrobiologique du Bassin du Lac Bangwelo et de Luapula, 14, 11, 50 p.
- Seki Y., Nakajima T., Kamioka H., Kinai Y., Manaka M., and Tsukimura K., 2004. Discharged water from deep wells in the eastern Kanto region. *J. Balneol. Soc. Jpn.*, 54, 1-24
- Shi Z. M, Liao F., Wang G. C., Xu Q. Y., Mu W. Q., and Sun X. Y., 2017. Hydrogeochemical characteristics and evolution of hot springs in eastern Tibetan Plateau geothermal belt, Western China: insight from multivariate statistical analysis. *Geofluids*, 2017, Article ID 6546014, 11 pages.
- Sibson, R. H. (1994). Crustal stress, faulting and fluid flow. *Geological Society, London, Special Publications*, 78(1) :69-84
- Sindimo P., 1979. Hydrobiologie des sources thermales au Kivu, 3^e colloque, CERUKI Bukavu, pp.81-85
- Sire M., 1967. Les élevages de petits animaux. Vol. I, Ed. Paul Lechevalier, Paris V. 554p.
- Snel J.M., 1956. Etudes des formations des travertins calcaires de la Province du Kivu, vol 2, Serv.Géol Bukavu, 32 p.
- Van der Sloot H. A., and Hoede D., 1997. Comparison of pH Static Leach Test Data with ANC Test Data; Netherlands Energy Research Foundation: Petten, The Netherlands.
- Van Meel L., 1954. Etat actuel de nos connaissances sur les Grands lacs Est-africains et leurs phytoplanctons. Bruxelles, vol. IV, 152p.
- Verissimo A., Marrao G., Gomes Da Silva F., and Da Costa M.S., 1991. Distribution of *Legionella spp* in hydrothermal areas in continental Portugal and Island of Sao Miguel, Azores. *Applied and Environmental Microbiology*, 57, 10, 2921 - 2927.
- Vikandy, M.S., Mahinda, K., Mapendano, Y. and Mifundu, W., 2008. Geothermal potential of eastern D.R. of Congo, ARGeo C-2 geothermal conference, 24-25, Entebbe, Uganda.
- Villeneuve M., 1974. Remarques sur le volcanisme du Sud - Kivu. Extrait du Rapport annuel pour l'année 1973 du département de Géologie de l'Institut pour la Recherche Scientifique en Afrique centrale, p. 21 - 28.

- Villeneuve M., 1979. Les centres d'émission volcanique du Rift Africain au Sud du lac Kivu (République du Zaïre). *Rev. Geogr. Phys. Et Géol. Dynam.* (2), XX, fasc. 4, p. 323-334.
- Wetzel R.G., and ikens G.E., 2000. *Limnological analysis*. Springer, 429p
- Zana N., and Tanaka K., 1981. Focal mechanism of major earthquakes in the Western Rift Valley of Africa. *Tohoku Geophys Journal*, 28, 119 - 129
- Zhang L., Wang Y., Miao X., Gan M., and Li X., 2019. Geochemistry in geologic CO₂ utilization and storage: A brief review. *Adv. Geo-Energy Res.*, 3, 304–313