



Caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux littorales du Lac Kivu face à l'explosion démographique

[Characterization of the physico-chemical parameters of the coastal waters of Lake Kivu in the face of the demographic explosion in eastern D.R.C]

Doudou Mayaka Kintu^{1,2*}, Pascal Mwapu Isumbisho^{1,4}, Cush Ngonzo Luwesi^{1,3}, Yves Aseke Lukuke¹, Richard Sabimana Gasigwa¹, Rigobert Zola Lunga¹, Marcel Adoko Bagala¹ & Arnold Bamba Madiumba¹

¹Ecole Régionale de l'Eau (ERE) & Centre de Recherche en Ressource en Eau du Bassin du Congo (CRREBaC), BP 127 Université de Kinshasa, R.D. Congo

²Université de Kindu ;

³African University of management and Technology, Congo-Brazzaville ;

⁴Laboratoire d'Etude des Milieux Aquatiques (LEMA), Département de Biologie, Institut Supérieur Pédagogique (ISP) de Kinshasa, RDC.

Résumé

En Afrique sub saharienne, la croissance démographique accompagnée d'une urbanisation rapide est à la base de nombreuses perturbations pour les milieux aquatiques. Les répercussions de ces différentes perturbations sont plus fortement ressenties dans la zone littorale que dans la zone pélagique. Pour ce faire, l'analyse statistique a été réalisée sur 6 échantillons et 10 variables (Temp, DO, Cond., pH, Turb., Transp., NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} et SiO_2) à l'aide du logiciel R. Les résultats ont montré que les teneurs enregistrées de pH dépassent la valeur guide de l'OMS (6,5-8,5) et peuvent provoquer des risques sanitaires pour l'homme. Les Eaux du lac sont fortement minéralisées (Conductivité électrique $>1000 \mu\text{S.cm}^{-1}$), et constitue un indicateur de conditions salines (salées) de l'eau du Lac. L'Ammonium et le Phosphate sont les paramètres qui ont enregistrés de grandes fluctuations inter-stations, respectivement (0.74 ± 1.13) et (1.26 ± 1.41), par contre le pH (9.34 ± 0.0647) et la conductivité électrique (1165 ± 6.02) n'ont presque pas subi de fluctuations dans nos six sites de prélèvement d'eau. Cela étant, des mesures urgentes doivent être prises, permettant de mettre en œuvre des politiques de gestion intégrée et concertée des zones littorales du lac. Cela permettra d'améliorer la qualité des eaux et d'assurer le maintien de la biodiversité, concentrée dans les zones riveraines du lac.

Mots-clés : Physico-chimie, anthropisation, zone littorale, Explosion démographique et Qualité de l'eau

Abstract

In sub-Saharan Africa, demographic growth accompanied by rapid urbanisation is at the root of numerous disturbances to aquatic environments. The repercussions of these various disturbances are more strongly felt in the coastal zone than in the pelagic zone. Statistical analysis was carried out on 6 samples and 10 variables (Temp, DO, Cond, pH, Turb, Transp, NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} and SiO_2) using R software. The results showed that the pH levels recorded exceed the WHO guide value (6.5-8.5) and may pose health risks to humans. The lake water is highly mineralised (electrical conductivity $>1000 \mu\text{S.cm}^{-1}$), and is an indicator of saline (salty) conditions in the lake water. Ammonium and phosphate were the parameters that showed the greatest inter-station fluctuations, respectively (0.74 ± 1.13) and (1.26 ± 1.41), while pH (9.34 ± 0.0647) and electrical conductivity (1165 ± 6.02) showed almost no fluctuations in our six water sampling sites. This being the case, urgent measures need to be taken to implement integrated and concerted management policies for the lake's littoral zones. This will help to improve water quality and maintain biodiversity, which is concentrated in the lake's riparian zones.

Keywords: Physico-chemistry, anthropisation, coastal zone, Population explosion, Water quality.

*Auteur correspondant: Doudou Mayaka Kintu, (mayakadoudou@gmail.com). Tél. : (+243) 971698842

 <https://orcid.org/0009-0005-3984-3544>; Reçu le 31/12/2025; Révisé le 27/01/2026 ; Accepté le 19/02/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i1.233>

Copyright: ©2026 Kintu et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

Les écosystèmes d'eau douce constituent une ressource indispensable à la vie et méritent une attention toute particulière, vu qu'ils sont très altérés et sérieusement menacés par les activités humaines (Makhoukh, 2011).

En Afrique sub saharienne, la croissance démographique accompagnée d'une urbanisation rapide est à la base de nombreuses perturbations pour les milieux aquatiques (Kinney, 2002). En outre, l'industrialisation, l'utilisation non rationnelle des engrais et pesticides et le manque de sensibilisation de la population envers la protection de l'environnement, conduisent autant à un déséquilibre de l'écosystème et génèrent des éléments polluants qui peuvent affecter la qualité physico-chimique et biologique des milieux aquatiques récepteurs (Mullis et al., 1997), mais aussi altérer les usages de l'eau (captage de l'eau, baignade, etc.) (Burton & Pitt, 2001).

Les lacs sont considérés comme des « sentinelles » en raison de leur sensibilité et de leur réponse rapide à tout changement environnemental (Jacquemin, 2019).

Similairement à d'autres vastes lacs africains, le bassin du lac Kivu abrite un écosystème distinct et exceptionnel, tout en étant au cœur d'activités humaines significatives telles que la pêche et la production d'électricité, offrant un potentiel considérable pour l'exploitation d'hydrocarbures (Sarmiento, 2006).

Le lac Kivu couvre une superficie de plus de 2370 km². Sur ses rives rwandaises et congolaises, résident au moins 2 millions de personnes, majoritairement concentrées dans d'importantes agglomérations telles que Goma et Bukavu, et dans une moindre mesure Gisenyi et Kibuye. La pêche, si elle est moins importante qu'ailleurs dans la région, représente tout de même 10.000 tonnes de poissons par an, et est une source de protéines animales pour la population locale des deux pays riverains (Philippe, 2016).

En outre, les rejets liquides d'origines domestiques et industrielles générés par ces villes précitées sont déversés directement dans le lac d'une façon précaire et sans traitement préalable (Fabrice et al., 2009).

Cette forte pression anthropique sur le lac et les effets cumulés de la variabilité climatique est sujet alors à d'importants risques de pollution qui menacent

la qualité physico-chimique des eaux en compromettant les divers usages (Sami, 2016).

Il se remarque alors que les répercussions de ces différentes perturbations qui ont lieu dans le bassin versant du lac sont plus fortement ressenties dans la zone littorale que dans la zone pélagique (Hyangya et al., 2021).

Un diagnostic plus complet de la situation actuelle de la variable physico-chimique et un suivi rigoureux de son évolution, s'avèrent d'une grande nécessité pour la sauvegarde de cet écosystème (Moussa et al., 2018). C'est dans cette perspective que s'inscrit notre travail qui consiste à caractériser les variables qualité physico-chimique des eaux littorale du Lac Kivu face aux pressions anthropiques et à l'heure du changement climatique.

2. Matériel et méthodes

2.1 Site d'étude

Le Lac Kivu est un lac d'origine volcanique (Isumbisho, 2006). C'est un lac profond et méromictique, avec des caractéristiques limnologiques très particulières. Ce lac combine une zone euphotique relativement peu profonde (plus au moins 18 m), habituellement inférieure à la zone de mélange (20 à 60 m), avec un gradient thermique faible dans le mixolimnion et est clairement oligotrophe (Sarmiento, 2006). Il est situé au sud de l'équateur entre 1°34'- 2°30'S et 28°50'- 29°23'E. Avec une superficie de 2370 km², une profondeur maximale de 489 m et une profondeur moyenne de 240 m (Marshall 1993), et constitue une frontière naturelle entre la République Démocratique du Congo et la République du Rwanda. Il est l'un des quatre grands lacs du "Rift" Est-africain. Il est formé, sur 102 km de long et 50 km de large (dans sa plus grande largeur) et, est situé à 1463 m d'altitude par rapport au niveau de la mer (Descy, 1991).

Le lac est divisé en quatre grands bassins (Degens et al., 1973) appelés bassin nord (Goma), bassin sud (Bukavu), bassin Est de l'île d'Idjwi et bassin Ouest (Territoire de Kalehe). Cette étude a été réalisée dans tous les 4 sous bassins enfin de ressortir les caractéristiques de chaque sous Bassin (tableau I).

Tableau I. Localisation et Caractéristique des différents sites de prélèvement d'eau

N°	Nom de Site	Coordonnées Géographiques	Caractéristiques
01	Goma	S : 01°39.817 et E : 29°09.408	Un site anthropisé, perturbé par les activités humaines, situé le long de la baie de Kituku (Marché Kituku) à Goma.
02	Bukavu/Nyofu	S : 2°29.849 et E : 28°52.281	Zone non anthropisée, elle est considérée comme relativement stable et se caractérise par une zone de captage immédiatement inhabitée, recouverte, bordée par les Eucalyptus.
03	Bukavu/Ndendere	S : 2°29.612 et E : 28°53.099	Zone anthropisée, présence de cage flottante pour la production halieutique, berge dominée par des graminées et la prolifération des déchets plastiques. Ce site est caractérisé par un littoral complètement modifié par le déversement d'un canal transportant les eaux des zones résidentielles situées à moins de 5 m du rivage.
04	Makelele	S : 01°44.143 et E : 29°04.141	Le lit du lac à dominance sableuse est parsemé d'argile, de vase, de débris végétaux avec des troncs d'arbres morts. On remarque une présence des végétaux aquatiques.
05	Lwandjovu	S : 01°51.761 et E : 29°00.672	Le lit du lac à dominance sableuse est parsemé d'argile, de vase, de débris végétaux avec des troncs d'arbres morts.
06	Idjwi	S : 01°56.622', E : 029°01.617	Une zone relativement peu perturbée, le paysage est dominé par des plantations d'Eucalyptus

2.2. Stratégies d'échantillonnage

En tenant compte des diverses activités anthropiques recensées dans la zone d'étude (eaux usées domestiques, industrielles, agricoles et autres), six sites de prélèvements des données dont Goma (1), Bukavu Nyofu (2), Bukavu Ndendere sur les cages flottantes piscicoles(3), Makelele dans le territoire de Kalehe (4), Lwandjovu dans le territoire de Kalehe (5) et Idjwi(6), réparties le long du Lac Kivu (partie Congolaise) ont été retenues de telle sorte qu'elles soient accessibles et reflètent les caractéristiques réelles des eaux du Lac au niveau de la zone d'étude.

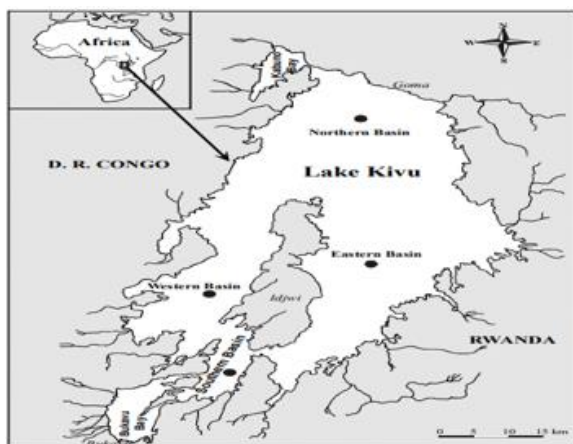


Figure 1: Situation géographique du lac Kivu et localisation des sites d'échantillonnage. (Isumbisho, 2006)

Rev. Cong. Sci. Technol., Vol. 05, No. 01, pp. 192-201 (2026)

Le plan d'échantillonnage a été réalisé entre le 17 juin 2023 au 02 juillet 2023. Les mesures de la température, de l'oxygène dissous, de la conductivité électrique, du pH, de la turbidité et de la transparence de l'eau ont été faites in situ à l'aide d'une sonde multiparamétrique de marque PRO DSS.

Après ces mesures, les prélèvements d'eau ont été faits à l'aide d'une bouteille hydrologique de type Van Dorn de contenance 6 000 ml, stockés dans des bocaux (1000 ml) conservés dans une glacière à 4 °C puis ramenés au laboratoire de l'Unité d'Enseignement et de Recherche en Hydrobiologie Appliquée de l'Institut Supérieurs Pédagogique de Bukavu (UERHA-ISP/Bukavu).

Au laboratoire, les concentrations d'Ammonium (NH_4^+), de Nitrites (NO_2^-), de Phosphates (PO_4^{3-}) et silice (SiO_2) ont fait l'objet de dosages grâce aux techniques normalisées d'analyse spectrophotométrique UV-Visible des échantillons d'eau (Apha, 2005). La technique consiste à transformer l'ion à analyser en un complexe coloré pour lequel le pic d'absorption se situe dans le domaine UV-Visible. La silice réactive soluble a été déterminée à l'aide de la méthode du complexe molybdate, tandis que le phosphore réactif soluble (SRP) a été déterminé à l'aide de la méthode du bleu de molybdène. Les espèces d'azote ont été analysées

comme suit: ion ammonium (NH_4^+) par la méthode du dichloroisocyanurate-salicylate et les nitrites (NO_2^-) par la méthode du complexe azoïque. (Rodier et al., 2009). Les calculs stœchiométriques ont été effectués en utilisant la loi de Beer Lambert qui permet de convertir l'absorbance (A) mesurée à un point de mesure correspondant.

2.3 Analyse des données

L'analyse descriptive des paramètres physico-chimique a concerné les valeurs extrêmes (minimum et maximum), la moyenne (valeur centrale), l'écart-type (paramètre de dispersion) ainsi que le coefficient de variation (CV). L'analyse statistique a été réalisée sur 6 échantillons et 10 variables (Temp, DO, Cond., pH, Turb., Transp., NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} et SiO_2) à l'aide du logiciel R.

Cette analyse avait pour but de comprendre les différentes corrélations qui existent entre les variables prises deux à deux, de choisir les différents axes factoriels, la contribution de chaque variable à la constitution des axes factoriels et les différents mécanismes qui interviennent dans la minéralisation des eaux du Lac Kivu.

En outre, nous avons utilisé l'analyse à composante principale (ACP) qui est l'une de méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est constituée, en lignes par des « individus » (Site de prélèvement) sur lesquels sont mesurées des « variables quantitatives » (les éléments majeurs et les éléments traces) disposées en colonnes. Elle permet de réduire le nombre de variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes factoriels ou facteurs (Cloutier et al., 2008).

3. Résultats

3.1. Analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques ainsi que la statistique descriptive des eaux du Lac Kivu sont présentés dans les tableaux 2 et 3. Le pH des eaux analysées varie de 9,23 à 9,4, avec une moyenne de 9,34, un écart-type de 0.0647 et un coefficient de variation de 0.693. La température quant à elle, varie entre 23.8 et 24.9°C, avec une moyenne de 24.4 °C, un écart-type de 0.447°C et un coefficient de variation de 1.83. L'oxygène dissout des eaux littorales du Lac Kivu varie de 6,2 à 7,53 mg. L^{-1} , la moyenne est de 6,96 mg. L^{-1} , l'écart-type de 0.514 avec un coefficient de variation de 7,38. Ces

eaux présentent des conductivités électriques qui varient de 1158 à 1173 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, avec une moyenne de 1165 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, un écart-type de 6,02 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ et un coefficient de variation de 0.517. La turbidité varie de 0.02 à 0.77 NTU avec une moyenne de 0.34 NTU, un écart-type de 0.244 et un coefficient de variation de 71,8. La transparence de l'eau dans les zones littorales varie du 2,6 à 3,6 m, une moyenne de 2,9, un écart-type de 0.374 m et un coefficient de variation de 12,9.

Concernant les nutriments, les ions PO_4^{+3} varient entre 0,123 et 3,4 mg. L^{-1} , avec une moyenne de 1,26 mg. L^{-1} , l'écart-type de 1,41 mg. L^{-1} et un coefficient de variation de 112. Les ions NO_2^- varient 0.005 à 0.034 mg. L^{-1} , une moyenne de 0.0135 mg. L^{-1} , un écart-type de 0.0106 mg. L^{-1} et un coefficient de variation de 78,2. Les ions NH_4^+ varient entre 0.047 et 2,98 mg. L^{-1} , avec une moyenne de 0,74 mg. L^{-1} , un écart-type de 1,13 mg. L^{-1} et un coefficient de variation de 153. Et enfin le SiO_2 des eaux littorales du Lac Kivu varie de 3,86 à 7,3 mg. L^{-1} , une moyenne de 5,64 mg. L^{-1} , un écart-type de 1,22 mg. L^{-1} et un coefficient de variation de 21,6.

De manière générale, les teneurs enregistrées de pH dépassent la valeur guide de l'OMS (6,5-8,5) et peuvent provoquer des risques sanitaires pour l'homme. Il se constate en suite que les Eaux du lac sont fortement minéralisées (Conductivité électrique $>1000 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$), ce phénomène serait dû par la qualité du sol (sols gypseux) (Brémond, 1979) et constitue un indicateur de conditions salines (salées) de l'eau du Lac (Jessica et al., 2021). De même, à l'exception de site 2 et 6 (Bukavu/Nyofu et Idjwi) où la teneur de PO_4 est conforme aux normes de l'OMS, les autres sites 1, 3, 4 et 5 (Goma, Bukavu/Ndendere, Makelele et Lwandjovu) ont des valeurs supérieures au guide. Les fortes activités anthropiques exercées sur ces sites, seraient à l'origine de taux élevé de Phosphate.

Les autres paramètres tels que la teneur en nitrite (NO_2^-), en oxygène dissout (DO), en ammonium (NH_4) sauf au site 1 (Goma) et en silice (SiO_2) ont des valeurs inférieures à celles fixées par les normes de l'OMS.

L'Ammonium et le Phosphate sont les paramètres qui ont enregistrés de grandes fluctuations inter-stations, respectivement (0.74 1.13) et (1.26 1.41), par contre le pH (9.34 0.0647) et la conductivité électrique (1165 6.02) n'ont presque pas subi de fluctuations dans nos six sites de prélèvement d'eau.

3.2. Analyse en composantes principales (ACP)

Cette analyse normée a été réalisée sur 6 échantillons et 10 paramètres (Temp, DO, Cond., pH,

Turb., Transp., NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} et SiO_2). Elle nous a permis de calculer les valeurs propres, les variances exprimées pour chaque axe factoriel, leur cumul, les coefficients de corrélation entre tous les paramètres pris deux à deux, ainsi que la constitution des axes factoriels. Les résultats de cette analyse sont présentés dans les tableaux suivants: **tableau IV** pour la corrélation des variables prises deux à deux; **tableau V** pour les axes factoriels et la **figure 2** présentera le résultat de l'ACP. L'analyse de corrélation montre des bonnes corrélations positives entre la Conductivité et la Température (p-value: 0.02), des moyennes corrélations entre l'Ammonium et le Phosphate (p-value: 0.03) et des faibles corrélations entre le Phosphate et l'Oxygène dissous ainsi qu'entre le Silice et l'Ammonium (p-value: 0.05).

Aucune corrélation n'est observée entre les autres variables sous études étant données que leurs valeurs de p-value étaient supérieures au seuil standard de signification de 5%. Ces corrélations montrent clairement les différents liens qui existent entre les différentes variables et leur évolution dans les eaux littorales du Lac Kivu.

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) effectuée à partir des valeurs des paramètres physico-chimiques ont montré que 68,5% de l'inertie totale des données sont exprimées par les deux premiers axes, dont 40,2% pour le premier axe et 28,3% pour le deuxième (**figure 2**). Ces renseignements sont suffisants pour fournir des informations sur les différentes interactions physico-chimiques qui se déroulent dans les régions littorales du Lac Kivu.

Ces deux axes ont été retenus pour l'expression des résultats de l'ACP et montrent que l'axe 1 est corrélé positivement aux ions ammonium, nitrite et phosphate ainsi qu'aux silices et l'oxygène dissout. Mais les teneurs en pH et turbidité sont corrélés positivement à l'axe 2.

Ainsi, nous pouvons mettre en évidence une zonalité de la minéralisation avec deux domaines distincts (axes): - Un domaine au nord et au Sud du Lac, qui est fortement anthropisé (représenté par les sites 1 et 3) où on constate des fortes teneurs en nutriments (Phosphate, Ammonium, Nitrite et Silice). Ceci s'expliquerait par d'importants rejets liquides d'origines domestiques et industrielles générés par les villes de Goma et Bukavu. En outre, d'autres causes seraient la présence d'un marché des produits agricole

aux berges du Lac (Marché Kituku à Goma) et des installations des Cages flottantes pour la production piscicole (à Bukavu). - Un domaine à l'Est et à l'Ouest du Lac (représenté par les sites: 4, 5 et 6) avec des faibles perturbations d'eaux liées aux activités anthropiques. Ce domaine se distingue par une minéralisation nettement plus faible par rapport à la distribution générale de la salinité.

Tableau II. Données physico-chimiques des eaux littorales du Lac Kivu (Prélevé en juin et juillet 2023)

Paramètre	pH	Temp	D.O	Cond.	Turb.	Transp	PO_4	NO_2	NH_4	SiO_2
S1	9,23	24,6	7,53	1163	0,28	2,6	3,402	0,014	2,982	7,305
S2	9,3	23,9	6,2	1158	0,32	3,6	0,266	0,007	0,051	4,805
S3	9,39	23,8	7,4	1160	0,27	3	2,694	0,034	0,763	6,487
S4	9,32	24,5	7,21	1167	0,38	2,8	0,635	0,009	0,047	3,864
S5	9,37	24,9	6,86	1171	0,77	2,8	0,445	0,005	0,153	5,493
S6	9,4	24,7	6,57	1173	0,02	2,6	0,123	0,012	0,445	5,906

Tableau III. Statistique descriptive des résultats physico-chimique des eaux littorales du Lac Kivu

Paramètre Physico-Chimique	Unité de Mesure	Valeurs Guide de l'OMS de 2017 et Française	Nombre d'échantillons	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	CV
pH	Pas l'unité	6,5 à 8,5	06	9.23	9.4	9.34	0.0647	0.693
Temp	°C	-	06	23.8	24.9	24.4	0.447	1.83
DO	mg. L ⁻¹	6,5-8	06	6.2	7.53	6.96	0.514	7.38
Cond	$\mu\text{S. cm}^{-1}$	0 - 200	06	1158	1173	1165	6.02	0.517
Turb	UTN	0-5	06	0.02	0.77	0.34	0.244	71.8
Transp	-	-	06	2.6	3.6	2.9	0.374	12.9
PO_4	mg. L ⁻¹	0,1 à 1,5	06	0.123	3.4	1.26	1.41	112
NO_2	mg. L ⁻¹	3	06	0.005	0.034	0.0135	0.0106	78.2
NH_4	mg. L ⁻¹	< 0,2 (peut aller jusqu'à 0,3 dans une eau anaérobique)	06	0.047	2.98	0.74	1.13	153
SiO_2	mg. L ⁻¹	< 30	06	3.86	7.3	5.64	1.22	21.6

Tableau IV. Corrélation entre les différentes

Variable1	Variable2	Coef de corrélation	p-value	Décision
Temp	pH	-0.01	0.99	Pas de corrélation
D.O	pH	-0.25	0.63	Pas de corrélation
D.O	Temp	0.08	0.89	Pas de corrélation
Cond.	pH	0.45	0.37	Pas de corrélation
Cond.	Temp	0.87	0.02	fortement corrélée
Cond.	D.O	-0.08	0.88	Pas de corrélation
Turb.	pH	-0.04	0.94	Pas de corrélation
Turb.	Temp	0.30	0.57	Pas de corrélation
Turb.	D.O	0.07	0.90	Pas de corrélation
Turb.	Cond.	0.10	0.86	Pas de corrélation
Transp	pH	-0.07	0.89	Pas de corrélation
Transp	Temp	-0.74	0.09	Pas de corrélation
Transp	D.O	-0.58	0.23	Pas de corrélation

Transp	Cond.	-0.71	0.11	Pas de corrélation
Transp	Turb.	0.10	0.85	Pas de corrélation
PO ₄	pH	-0.45	0.37	Pas de corrélation
PO ₄	Temp	-0.24	0.65	Pas de corrélation
PO ₄	D.O	0.82	0.05	corrélée
PO ₄	Cond.	-0.46	0.35	Pas de corrélation
PO ₄	Turb.	-0.13	0.81	Pas de corrélation
PO ₄	Transp	-0.27	0.61	Pas de corrélation
NO ₂	pH	0.29	0.58	Pas de corrélation
NO ₂	Temp	-0.60	0.21	Pas de corrélation
NO ₂	D.O	0.54	0.27	Pas de corrélation
NO ₂	Cond.	-0.41	0.42	Pas de corrélation
NO ₂	Turb.	-0.36	0.48	Pas de corrélation
NO ₂	Transp	-0.05	0.93	Pas de corrélation
NO ₂	PO ₄	0.65	0.16	Pas de corrélation
NH ₄	pH	-0.65	0.16	Pas de corrélation
NH ₄	Temp	0.13	0.81	Pas de corrélation
NH ₄	D.O	0.62	0.19	Pas de corrélation
NH ₄	Cond.	-0.21	0.69	Pas de corrélation
NH ₄	Turb.	-0.22	0.67	Pas de corrélation
NH ₄	Transp	-0.44	0.38	Pas de corrélation
NH ₄	PO ₄	0.85	0.03	Très corrélée
NH ₄	NO ₂	0.24	0.64	Pas de corrélation
SiO ₂	pH	-0.15	0.77	Pas de corrélation
SiO ₂	Temp	0.03	0.96	Pas de corrélation
SiO ₂	D.O	0.45	0.37	Pas de corrélation
SiO ₂	Cond.	-0.11	0.84	Pas de corrélation
SiO ₂	Turb.	-0.24	0.64	Pas de corrélation
SiO ₂	Transp	-0.39	0.45	Pas de corrélation
SiO ₂	PO ₄	0.76	0.08	Pas de corrélation
SiO ₂	NO ₂	0.50	0.31	Pas de corrélation
SiO ₂	NH ₄	0.81	0.05	corrélée

Tableau V. Valeurs propres et pourcentages exprimés pour les axes principaux.

N	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Standard deviation	2.006	1.682	1.273	1.003	0.7225	1.41e-14
Proportion of Variance	0.402	0.283	0.162	0.101	0.0522	0.00e+00
Cumulative Proportion	0.402	0.685	0.847	0.948	1.0000	1.00e+00

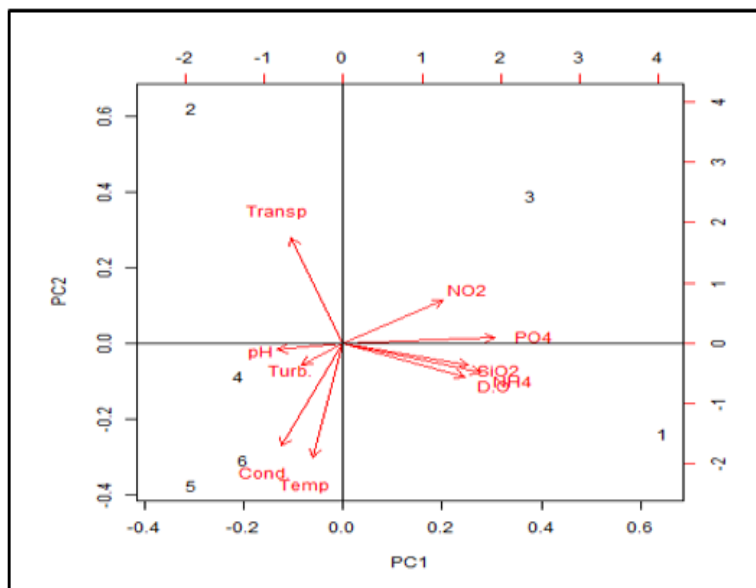


Figure 2. Espace des variables des plans factoriels PC1 et PC2.

4. Discussion

4.1. Analyses physico-chimiques

De manière générale, les eaux des zones littorales du Lac Kivu sont alcalines avec des pH allant de 9,23 à 9,4, et une moyenne de 9,34. Ces résultats s'accordent avec ceux obtenus par Hyangya et al. (2021) qui stipulent que les valeurs de pH reflétaient de fortes fluctuations dans les eaux côtières du Lac Kivu avec des eaux très alcalines. De même, il est à signaler que la nature des eaux du Lac Kivu résulte des grandes quantités de carbonates alcalins et les bicarbonates contenus dans les eaux (Degens et al., 1971, 1972 ; Muvundja et al., 2014). Il est reconnu que le pH est l'un des paramètres de qualité de l'eau les plus importants dont les fluctuations peuvent affecter la qualité de l'eau et des conditions de vie en influençant d'autres paramètres aquatiques (ANZECC, 2000).

Les résultats obtenus lors de cette étude ont montré que la température des eaux varie de 23,8 et 24,9°C, avec une moyenne de 24,4 °C. Cette gamme de variation est presque en concordance avec les travaux Hyangya et al (2021) qui ont montré que la température de l'eau du lac dans sa zone littorale varie entre 22,7°C et 25,6°C. De même, Newman (1976) et Bisimwa (2009) trouvaient dans la zone littorale du lac Kivu, des températures qui étaient comprises respectivement entre 22 à 24°C et 23,1 et 24,6°C. Ces mêmes valeurs sont également situées dans les niveaux de température des eaux de surface d'autres Lacs du Rift Albertin près du lac Kivu, tels que le lac

Albert (26-29 °C), le lac Édouard (26 °C) et Lac Tanganyika (23,2-27,3°C) (Lindqvist et al., 1999). Houéyi et al (2022) montrent que, dans le Lac Nokoué au Sud du Bénin, la valeur la plus élevée de la température a été de 32,40 °C et la plus faible a été de 26,80 °C. ABAKIR, 2020 montre que les températures sur le Lac Kivu sont étroitement corrélées à la topographie. Plus l'altitude est élevée, plus les températures sont basses. Il est important de noter que les différences des températures diurnes sont plus importantes que les différences annuelles.

L'oxygène dissout des eaux littorales du Lac Kivu varie de 6,2 à 7,53 mg. L⁻¹, la moyenne est de 6,96 mg. L⁻¹. Odjohou et al, 2020 trouvaient que les teneurs en oxygène dissous à la surface du lac Labion pendant la grande saison sèche varient peu (8,2 mg/l à 8,85 mg/L) avec une moyenne de 8,5 mg/L. Malgré la respiration des organismes, la turbidité élevée et la température élevée de l'eau, les activités humaines autour des plans d'eau ont une grande influence sur la concentration en oxygène dissous dans le lac en perturbant la vie aquatique de certaines espèces (Dupont, 2004 ; Hade, 2002 et Hyangya, 2021).

Nos résultats montrent que les valeurs de conductivité étaient relativement élevées par rapport à l'intervalle limite (200 µScm1) pour l'eau douce (Hade, 2002), néanmoins, ces résultats sont restés similaires aux résultats obtenus dans le même lac, fluctuant entre 1 140 et 1 200 µScm1 (Degens et al., 1973 ; Schmid et al., 2005). Ces résultats sont très supérieurs avec ceux trouvés par Odjohou et al, 2020 qui varie de 40,55 µS/cm à 42,3 µS/cm avec une moyenne de 41,44 µS/cm et un écart-type de 0,64 dans un Lac en côte d'Ivoire.

Par ailleurs, Lemoalle. (2018) montre que, les perturbations dans le Lac Victoria ont entraîné des diminutions de silice dissoute, mais des augmentations de phosphates et surtout de nitrates, ont notablement et durablement modifié la composition planctonique puisque, par exemple, les diatomées prédominantes dans les années 1960 sont désormais moins denses et supplantées tout au cours de l'année par des cyanobactéries fixatrices d'azote. Certes les diatomées sont toujours présentes, voire même encore abondantes, mais elles sont beaucoup moins diversifiées, et il y a remplacement des espèces à riche teneur en silice, dominantes dans les années 1960, par des formes peu riches en silice à l'heure actuelle. Il est d'ailleurs fréquent de constater que l'eutrophisation

des lacs est presque toujours accompagnée d'une diminution de la teneur en silice. Quoiqu'il en soit, il semble que la productivité primaire a sensiblement augmenté puisqu'elle est passée, en moyenne, de 7,4 en 1960 à 13,9 en 1990 (en mg. L⁻¹), soit presque le double (Mugidde, 1993).

Dans le cadre de notre recherche, l'Ammonium, le Phosphate et à faible niveau le Nitrite sont les paramètres qui ont enregistré de grandes fluctuations inter-stations, respectivement (0.74 1.13) et (1.26 1.41), par contre le pH (9.34 0.0647) et la conductivité électrique (1165 6.02) n'ont presque pas subi de fluctuations dans nos six sites de prélèvement d'eau.

Cette variation remarquable des nitrates entre les stations a mis en évidence par l'effet des perturbations anthropiques dans le bassin versant du lac et le long des rives du lac Kivu. Ces variations de trouble sont liées aux observations faites le long des rives d'autres lacs du Rift Albertin, comme le Lac Victoria (Odada et al., 2004 ; Odada et al., 2006) et lac Tanganyika (Hecky, 1993). Par ailleurs, la forte croissance démographique et les activités associées augmentent non seulement les usages domestiques de l'eau, mais contribuent également à une augmentation des rejets de déchets et de polluants toutes sortes qui affectent la qualité de l'eau dans les zones littorales des lacs (Bootsma et Hecky, 1993 ; Busch et coll., 2018 ; Palacios-Fest et al., 2005). (Bootsma & Hecky, 1993 ; Busch & coll., 2018 ; Palacios-Fest & al., 2005).

Avec une population du bassin du Lac Kivu estimée à 11 millions d'habitants pour l'année 2020 (ABAKIR, 2020), réparti à hauteur de 1,7 millions d'habitants au Burundi (15%), 6,8 millions d'habitants en RDC (62%) et 2,5 millions d'habitants au Rwanda (23%). Ces populations exercent des activités humaines dans le bassin versant du lac et qui progressivement nuisent à la qualité de l'eau du lac. Actuellement, l'érosion des sols, les eaux usées et divers rejets de déchets semblent être les problèmes les plus plausibles (Hade, 2002).

4.2. Analyse en composantes principales (ACP)

Nos résultats ont montré que les deux premiers axes expriment 68,5% de la variance totale dont 40,2% pour le premier axe et 28,3% pour le deuxième. L'axe 1 est corrélé positivement aux ions ammonium, Nitrite et phosphate ainsi qu'aux silices et l'oxygène dissout. Mais les teneurs en pH et turbidité sont corrélés positivement à l'axe 2.

Ces résultats ne sont pas en concordance avec ceux trouvés par Houéyi et al (2022) qui ont montré que, dans le Lac Nokoué au Sud du Bénin, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) effectuée à partir des valeurs des paramètres physico-chimiques ont été de 51,60% de l'inertie totale des données sont exprimées par les deux premiers axes dont le premier est corrélé positivement à la conductivité, au TDS, à l'ion ammonium et à l'ion phosphate et le second avec l'oxygène dissous, la vitesse du courant, la salinité et la profondeur.

De même, Souley en 2018 montre que les trois premiers axes expriment 65,56% de la variance totale dont 33,05% pour le premier axe, 21,22% pour le deuxième et 11,3% pour le troisième. La poursuite de l'analyse jusqu'à trois axes factoriels est due au fait que les deux premiers axes ne donnent pas une variance totale suffisante pour fournir des renseignements sur les différentes interactions hydrogéochimiques.

5. Conclusion

L'étude réalisée, portant sur la caractérisation physico-chimique de zone littorale du Lac face à l'explosion démographique avait pour objectif principal de caractériser la physico-chimie des eaux du lac Kivu.

Les résultats ont révélé que, certains paramètres (pH, Conductivité électrique, et dans certains sites, le Phosphate) dépassent la valeur guide de l'OMS et peuvent provoquer des risques sanitaires pour l'homme.

Les autres paramètres tels que la teneur en nitrite (NO_2), en oxygène dissout (DO), en ammonium (NH_4) sauf au site 1 (Goma) et en silice (SiO_2) ont des valeurs inférieures à celles fixées par les normes de l'OMS.

L'Ammonium et le Phosphate sont les paramètres qui ont enregistré de grandes fluctuations inter-stations, par contre le pH et la conductivité électrique n'ont presque pas subi de fluctuations dans nos six sites de prélèvement d'eau.

Ces valeurs plus élevées dans les stations à forte pression anthropique reflètent l'influence négative des perturbations humaines sur la qualité de l'eau dans la zone littorale du Lac Kivu. Cela étant, des mesures urgentes doivent être prises, permettant de mettre en œuvre des politiques de gestion intégrée et concertée des zones littorales du lac. Par ailleurs, la vulgarisation des textes relatifs à la protection des eaux et de l'environnement, la sensibilisation de la population

riveraine du lac à la gestion des déchets domestiques et les eaux usées, la bonne utilisation des terres agricoles, la création des zones de frayère et le reboisement savèrent important pour limiter les dangers anthropiques qui pèsent sur les eaux côtières du Lac Kivu. Cela permettra d'améliorer la qualité des eaux et d'assurer le maintien de la biodiversité, concentrée dans les zones riveraines du lac.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude à l'Unité d'Enseignement et de Recherche en Hydrobiologie Appliquée (UERHA) de l'Institut Supérieur Pédagogique de Bukavu (ISP-Bukavu) pour l'appui précieux apporté lors de la collecte et de l'analyse des données en laboratoire. Leur expertise et leur accompagnement ont été essentiels à la bonne réalisation de cette étude.

Financement

Les auteurs adressent leurs vifs remerciements à WaterNet pour le soutien financier partiel accordé à la présente recherche. Cet appui a été déterminant pour la collecte et l'analyse des données, et témoigne de l'engagement constant de WaterNet en faveur de la promotion de la recherche scientifique et de la gestion durable des ressources en eau en Afrique.

Conflit d'Intérêt

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt. La recherche sur le terrain n'a présenté aucune menace pour les communautés ou les espèces protégées. Aucune organisation informelle ou légale n'a joué un rôle clé dans la conception de l'étude, la collecte et l'analyse des données en vue de décider du résultat final de l'étude. La décision de préparer le manuscrit et de le publier a été prise uniquement par les auteurs.

Considérations d'Ethiques

La présente étude a été réalisée dans le respect des principes éthiques de la recherche scientifique. Aucun préjudice n'a été causé aux populations locales, et toutes les informations obtenues ont été utilisées exclusivement à des fins scientifiques. Les activités de collecte des échantillons ont été conduites de manière à minimiser l'impact sur l'environnement et la biodiversité du Lac Kivu. De plus, les habitants et acteurs locaux ont été informés des objectifs de l'étude et ont donné leur accord verbal pour toute interaction ou observation les concernant. Enfin, toutes les données recueillies ont été traitées de manière confidentielle et utilisées uniquement dans le cadre de ce manuscrit.

Contributions des Auteurs

K.M.D : a conçu, collecté et analysé les données au laboratoire et a rédigé ce manuscrit.

L.N.C et I.M. P : ont supervisé en mettant en place des orientations méthodologiques, a révisé ce travail et ont validé des analyses statistiques.

G.S.R : a réalisé des analyses statistiques de ce travail.

B.A.M; M.B.A.J; L.A.Y et L.Z.R: ont contribué à la rédaction de la partie bibliographique et aux discussions sur les résultats.

ORCID des Auteurs

ISUMBISHO. M. P: <https://orcid.org/0000-0003-0228-1670>.

LUKUKE, A.Y : <https://orcid.org/0009-0008-4359-0481>.

GASIGWA, S.R: <https://orcid.org/0000-0002-1525-9133>.

BAGALA. A.M. : <https://orcid.org/0009-0002-6752-766X>.

MADIUMBA. B.A.J: <https://orcid.org/0009-0002-8387-3300>.

LUNGA Z. R. : <https://orcid.org/0009-0002-8387-3300>

LUWESI N.C: <https://orcid.org/0000-0001-7224-6737>.

Références bibliographiques

ABAKIR. (2020). *Étude de base du bassin du Lac Kivu et de la rivière Ruzizi* (Rapport de décembre 2020, p. 17).

American Public Health Association (APHA), Eaton, A., Clesceri, L. S., Rice, E. W., & Greenberg, A. E. (Eds.). (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (21st ed., Centennial ed., 69 pp.). APHA, AWWA & WEF.

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC). (2002). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality* (pp. 1–103). Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand.

Béni Lwikitcha Hyangya, J., Walumona Rikiki, J., Mulungula Masilya, P., Zagabe Zabene, F., Lufungula Alunga, G., Mwenyemali Kaningini,

B., & Busanga Kankonda, A. (2021). Physico-chemical characterization of littoral water of Lake Kivu (Southern basin, Central Africa) and use of water quality index to assess their anthropogenic disturbances. *Water Quality Research Journal*, 56(4), 1–12. <https://doi.org/10.1002/www2.12059>

Bisimwa, M. (2009). *Water quality management in Lake Kivu basin: A case study of Bukavu sub-basin, DR Congo* (Master's thesis, University of Dar-es-Salaam).

Bootsma, H. A., & Hecky, R. E. (1993). Conservation of the African Great Lakes: A limnological perspective. *Conservation Biology*, 7(3), 644–656. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1993.07030644.x>

Bremond, R., & Perrodon, C. (1979). *Paramètres de la qualité des eaux* (2e éd.). Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie.

Burton, G. A., Jr., & Pitt, R. E. (2001). *Stormwater effects handbook: A toolbox for watershed managers, scientists, and engineers*. CRC/Lewis Publishers.

Busch, J., Soreghan, M., de Beurs, K., McGlue, M., Kimirei, I., Cohen, A., & Ryan, E. (2018). Linking watershed disturbance with nearshore sedimentation and the shell beds of Lake Tanganyika (Mahale Mountains, Tanzania). *Environmental Earth Sciences*, 77(13), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7644-7>

Capo-chichi, H. B. P., Adandedjan, D., Agblonon Houelome, T. M., & Laleye, P. (2022). Physico-chimie et pollution organique du lac Nokoué au Sud du Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 170, 17752–17775. <https://doi.org/10.4314/jab.v170i1.3>

Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353, 294–313.

Degens, E. T., von Herzen, R. P., Wong, H. K., Deuser, W. G., & Jannasch, H. W. (1973). Lake Kivu: Structure, chemistry and biology of an East African rift lake. *Geologische Rundschau*, 62(1), 245–277. <https://doi.org/10.1007/BF01826830>

- Descy, J.-P. (1991). *Étude de la production planctonique au lac Kivu*. Projet RWA/87/012.
- Dupont, J. (2004). On the solid, liquid and solution structural organization of imidazolium ionic liquids. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 15(3), 341–350. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532004000300002>
- Hade, A. (2002). *Nos lacs – les connaître pour mieux les protéger*. Éditions Fides.
- Jacquemin, C. (2019). *Vulnérabilité des lacs de haute altitude au changement climatique* (Thèse de doctorat). Aix-Marseille Université.
- Korderas, J., Livingstone, A., & Thompson, M. (2021). DataStream Initiative: Un guide de surveillance de la qualité de l'eau. *DataStream*. <https://datastream.org>
- Lecrenier, P. (2016). *Le Lac Kivu, un eldorado à surveiller – Réflexions*. uliege.be
- Lemoalle, J. (2018). *Le lac Victoria, un écosystème bouleversé par l'Homme*. Éditions IRD.
- Lindqvist, O. V., Mölsä, H., Solonen, K., & Sarvala, J. (Eds.). (1999). *from limnology to fisheries: Lake Tanganyika and other large lakes* (Vol. 141). Springer Science & Business Media.
- Makhoukh, M., Sbaa, M., Berrahou, A., & Van Clooster, M. (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). *Larhyss Journal*, 9, 149–169.
- McKinney, M. L. (2002). Urbanization, biodiversity, and conservation. *BioScience*, 52(10), 883–890. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0883:UBAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2)
- Mugidde, R. (1993). The increase in phytoplankton primary productivity and biomass in Lake Victoria (Uganda). *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 25, 846–849.
- Mulliss, R. M., Revitt, D. M., & Shutes, R. B. E. (1997). The impacts of discharges from two combined sewer overflows on the water quality of an urban watercourse. *Water Science and Technology*, 36(5), 195–199. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0453>
- Muvundja, F. A., Pasche, N., Bugenyi, F. W. B., Isumbisho, M., Müller, B., Namugize, J.-N., Rinta, P., Schmid, M., Stierli, R., & Wüest, A. (2009). Balancing nutrient inputs to Lake Kivu. *Journal of Great Lakes Research*, 35(3), 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2009.03.004>
- Newman, F. C. (1976). Temperature steps in Lake Kivu: A bottom heated saline lake. *Journal of Physical Oceanography*, 6(2), 157–163. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0157:TSILKA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0157:TSILKA>2.0.CO;2)
- Odada, E. O., Olago, D. O., & Ochola, W. (Eds.). (2006). *Environment for development: An ecosystems assessment of Lake Victoria Basin*. UNEP/PASS.
- Odada, E. O., Olago, D. O., Kulindwa, K., Ntiba, M., & Wandiga, S. (2004). Mitigation of environmental problems in Lake Victoria, East Africa: Casual chain and policy options analyses. *Ambio*, 33, 13–23. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.1.13>
- Odjohou, E., Amani, M., Soro, G., & Monde, S. (2020). Caractérisation physico-chimique des eaux d'un système lacustre du cordon littoral ivoirien: Cas du lac Labion. *Journal of Applied Biosciences*, 170, 17752–17775. <https://doi.org/10.4314/jab.v170i1.3>
- Palacios-Fest, M., Cohen, A., Lezzar, K., Nahimana, L., & Tanner, B. (2005). Paleolimnological investigations of anthropogenic environmental change in Lake Tanganyika: III. Physical stratigraphy and charcoal analysis. *Journal of Paleolimnology*, 34, 31–49. <https://doi.org/10.1007/s10933-005-2396-2>
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & coll. (2009). *L'analyse de l'eau* (9e éd.). Dunod.
- Sami, S. (2016). Effets des changements globaux sur les écosystèmes aquatiques d'Europe Occidentale — rôle des communautés planctoniques. *Ecosystem Complexity Research Group, Station Marine de Wimereux, Université des Sciences et Technologies de Lille CNRS – FRE 2816 ELICO*.
- Sarmento, H. (2006). *Écologie du phytoplancton du lac Kivu* (Afrique de l'Est). Presses universitaires de Namur.
- Schmid, M., Halbwachs, M., Wehrli, B., & Wüest, A. (2005). Weak mixing in Lake Kivu: New insights indicate increasing risk of uncontrolled gas eruption. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7). <https://doi.org/10.1029/2004gc000892>
- Souley Moussa, R., Malam Alma, M. M., Laouali, M. S., Natatou, I., & Issa, H. (2018). Caractérisation physico-chimique des eaux des aquifères du Continental Intercalaire / Hamadien et du Continentalsiems Terminal de la région de Zinder (Niger). <http://www.ifgdg.org>