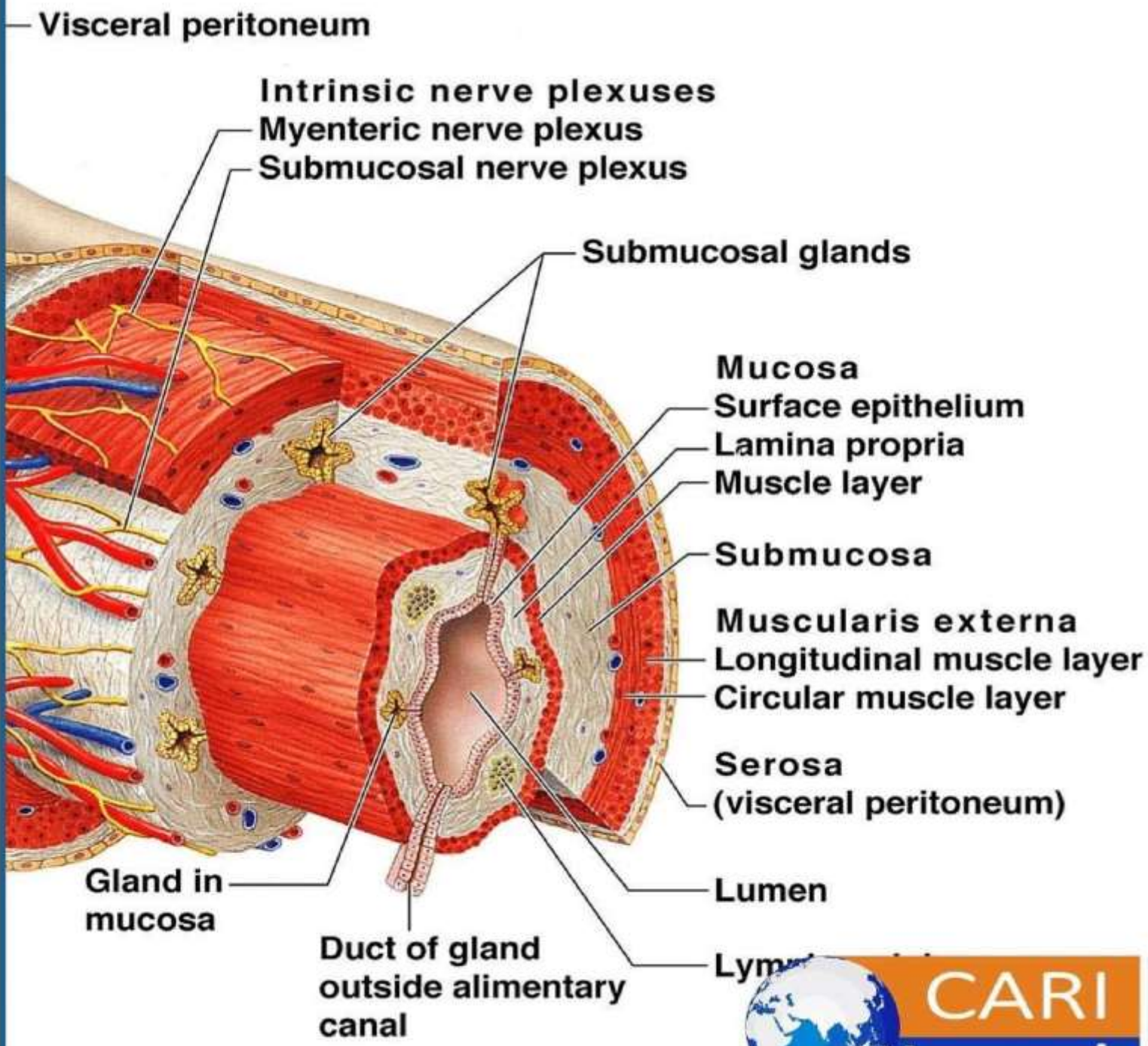
International Journal of
Biological Studies
(IJBS)

Caractéristiques Physico-Chimiques et Bactériologiques des Eaux du Lac Municipal Tshombe (Karavia) à Lubumbashi, R. D. Congo



09 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

CARI Journals

International Journal of Biological Studies
ISSN: 2957-7764 (Online)
Vol. 6, Issue No.1, pp 70 - 86, 2026 www.carijournals.org

Caractéristiques Physico-Chimiques et Bactériologiques des Eaux du Lac Municipal Tshombe (Karavia) à Lubumbashi, R. D. Congo

Mulungulungu Nyamuganira Ho Ali D[1, 2], Kalaka Mayur Clovis*[1]., Badibanga kasumpa D[1]., Lukonzolwa Ngoie M.[1], Lukonzolwa Banza M.[1], Kahozi Sumba[1], Badypwyla Israël[2,3]

[1*]Centre de recherche agro-alimentaire (CRAA) Lubumbashi /R.D.Congo

[2]Ecole de santé publique, Université de Lubumbashi/ R.D.Congo

[3]Faculté de médecine Humaine, Université de Lubumbashi/ R.D.Congo

https://orcid.org/0009-0007-3229-9456

Accepted: 14th September, 2026, Received in Revised Form 30th September, 2026, Published: 13th October, 2026

Résumé :

Objectif : Cette étude avait pour objectif d'évaluer la qualité bactériologique, physico-chimique et chimique des eaux du lac Tshombe et de ses affluents au cours des saisons pluvieuse et sèche. **Méthodes :** Une étude analytique a été réalisée sur 22 échantillons d'eau prélevés aléatoirement dans le lac Tshombe et ses affluents, dont 11 échantillons en février 2025, correspondant à la saison pluvieuse, et 11, en juillet 2025, correspondant à la saison sèche.

Résulté : Les analyses bactériologiques ont révélé des concentrations élevées en coliformes totaux (177 ± 22), en coliformes fécaux (138,5 ± 21) et en *Escherichia coli* (44,5 ± 3,67), supérieures aux valeurs recommandées par l'OMS. Sur le plan chimique, la concentration moyenne en fer était élevée (2,055 mg/L), tandis que le plomb se situait à des concentrations proches des limites recommandées. La majorité des paramètres physico-chimiques analysés se situaient dans les valeurs recommandées, à l'exception de la conductivité électrique dont la valeur moyenne était de 1656,6 ± 310,2 µS/cm. Les résultats montrent que les eaux du lac Tshombe et de ses affluents présentent une contamination bactériologique importante, notamment par des germes indicateurs de contamination fécale.

Recommandations : Ces eaux ne répondent donc pas aux exigences bactériologiques requises pour la consommation humaine sans traitement préalable. Une surveillance régulière de leur qualité ainsi que la mise en place de mesures appropriées de traitement et de protection des ressources en eau sont nécessaires.

Mots clés : *Environnement, Lac, Bactériologique, Physico-chimique, Pollution.*

I. INTRODUCTION

L'eau constitue un élément fondamental de la biosphère et un facteur indispensable à l'apparition, au maintien et à l'évolution de la vie sur Terre. Les données scientifiques indiquent que les premières formes de vie sont apparues dans des environnements aquatiques de la Terre primitive il y a environ 3,5 à 4,0 milliards d'années. Bien que l'eau recouvre près de 71 % de la surface terrestre, seulement environ 2,5 % de cette ressource est constituée d'eau douce, dont une faible proportion est directement accessible pour les usages humains, les écosystèmes et les activités socio-économiques (Rodier and Legube 2016 ; Falkenmark & Rockström, 2020 ; WHO, 2022; UNESCO, 2024).

À l'échelle mondiale, les ressources en eau douce disponibles et potables s'amenuisent sous l'effet combiné des activités anthropiques (industrialisation, urbanisation, agriculture intensive, pollution et exploitation minière) et des facteurs naturels tels que les changements climatiques, les sécheresses récurrentes et la variabilité hydrologique (IPCC, 2023 ; Rodell et al., 2024 ; UNESCO, 2024). Bien que la communauté internationale ait pris davantage conscience, au cours de la dernière décennie de la nécessité de protéger et de gérer durablement les ressources en eau, les décisions en matière de gouvernance restent encore largement influencées par des considérations économiques, politiques et institutionnelles (Gain et al. 2021 ; UNESCO, 2024). Par conséquent, les résultats de la recherche scientifique ainsi que les meilleures pratiques en matière de gestion intégrée des ressources en eau sont encore insuffisamment intégrés dans les politiques publiques, ce qui compromet la réalisation des objectifs de développement durable relatifs à l'eau et à l'assainissement (Hoekstra, 2011 ; UN-Water, 2024 ; Nature Water Editorial, 2024).

L'urbanisation rapide, l'expansion des activités industrielles et le développement de l'agriculture intensive ont considérablement augmenté les pressions exercées sur les ressources en eau, entraînant une pollution chronique et parfois accidentelle des cours d'eau par les eaux usées, les produits chimiques, les nutriments et les métaux lourds (UNEP, 2021; Vörösmarty et al., 2021 ;UNESCO, 2024).

À l'échelle mondiale, une proportion importante des fleuves et des rivières présente une dégradation de la qualité de l'eau, principalement en raison des rejets domestiques, industriels et agricoles insuffisamment traités, ce qui menace la biodiversité aquatique, les services éco systémiques et la santé des populations (OMS,RD/CONGO 2021 ;UNEP, 2021 ; Best, 2022 ; UN-Water, 2024).

Les contrôles ponctuels réalisés République Démocratique du Congo par le PNUE sur 50 sources urbaines et rurales d'approvisionnement en eau potable ont révélé un taux élevé (76 %) de contamination bactériologique, incluant des microbes pathogènes d'origine fécale dans presque un tiers des échantillons (PNUE, 2011 **;** Kayembe, J. M. et al. ,2018)

En RDC en général et au Katanga en particulier la source principale de pollution biologique et chimique serait le rejet direct d'eaux usées non traitées, des effluents liquides des industries minières et des émanations gazeuses dans les cours d'eau ou indirect suite à des infiltrations dans les eaux souterraines (Lutandula and Mwana, 2014). A Lubumbashi, les populations riveraines se plaignent de la pollution des eaux leur servant à accomplir les tâches ménagères et champêtres.

Le lac TSHOMBE milieu principal de notre investigation est un lac de retenue situé près de l'hôtel PULMAN ex KARAVIA et du complexe commercial la Plage sert aux loisirs avec sa plage artificielle et à la pèche. Ses affluents traversent des zones urbaines et leurs eaux servent à certaines tranches de la population aux activités ménagères et champêtres. En outre les eaux noires des fosses septiques et des latrines des résidences avoisinantes sont souvent directement déversées dans le dit lac et ses affluents. L'OMS recommande les valeurs limites pour les eaux de consommation sur le plan sensoriel, macroscopique, microbiologique, chimique et physico-chimique (WHO, 2017). Dans la perspective de prévenir la santé des usagers en mettant en évidence les constituants des eaux du lac TSHOMBE et ses affluents, des analyses organoleptiques, physico-chimiques, chimiques et microbiologiques ont été effectuées au laboratoire et in situ.

II. MILIEU, MATERIELS, POPULATION ET METHODE

II.1. Milieu de recherche

Le Lac TSHOMBE et ses affluents ont constitué nos sites de prélèvement. Le Lac TSHOMBE, lac artificiel et ses affluents sont situés dans le quartier KALUBWE qui est une entité urbano-rurale de la ville de Lubumbashi. Ce dernier est situé dans la commune de Lubumbashi de la province du Haut Katanga en République Démocratique du Congo (RDC).

II.1.1. Situation géographique

Le Lac TSHOMBE est limité : Au Nord par l'Hôtel PULLMAN et le Club Nautique ; Au sud par le pont de la Route du Golf et le milieu récréatif Côte West ; A l'est par certaines habitations des particuliers du quartier KALUBWE ; A l'ouest par la plage Migas GELATO ; La superficie du lac est d'environ 5 km² (Revue du Katanga, 1970).

II.1.2. Historique du Lac TSHOMBE

Le Lac TSHOMBE est un lac de retenue. Il a été ouvert aux publics vers les années 1956, et fut autrement appelé lac aux dames pendant l'époque coloniale. Il était un lieu de divertissement de la communauté blanche de l'époque. Il offrait des possibilités de divertissement de voile et de ski nautique aux touristes, et aux occupants du luxueux Hôtel ex Karavia. Cet hôtel, avec sa vue sur le lac était une belle carte postale de la ville d'Elisabethville. (Revue du Katanga 1970).

International Journal of Biological Studies
ISSN: 2957-7764 (Online)
Vol. 6, Issue No.1, pp 70 - 86, 2026 www.carijournals.org

II.1.3. Cartographie des points de prélèvement d'eau du Lac TSHOMBE et ses affluents

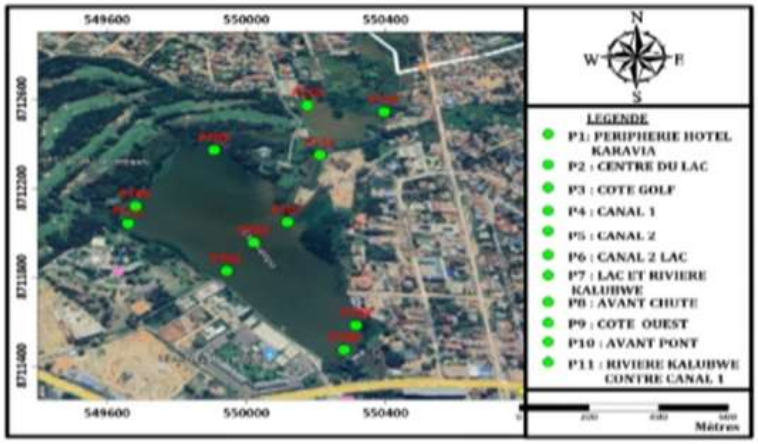


Fig 1: Cartographie des points de prélèvement d'eau dans le lac Tshombe et affluents.

II.2. MATERIELS

Nous avons utilisé divers matériels sur terrain et au laboratoire pour effectuer nos recherches.

II.2.1. Matériels et produit chimique utilisés aux points de prélèvement

Il s'agit de : bouteilles en polyéthylène de 500 ml ; une glacière ; de l'alcool ; de l'ouate ; une pirogue ; une barge. Un GPS de marque Garmin 712 et un logiciel Quantum gif

II.2.2.1. Matériels utilisés pour les analyses physico chimiques et chimiques

a) Verrerie de laboratoire : pipettes graduées, pieds gradués, erlenmeyer, etc.

b) Appareils : pH-mètre KNICK, -Spectrophotomètre UV-Visible, ICP- OES

II.2.2.2. Matériels utilisés pour les analyses bactériologiques

a) Verrerie de laboratoire et autres : Tubes à essai, pipettes graduées, boîtes de Pétri, pieds gradués, erlenmeyer, spatule de DRIGALASKI.

b) Appareils : Incubateur MEMMERT, Etuve de stérilisation BINDER, Balance ACCULAB, Autoclave TUTTNAUER KNOTT, Agitateur magnétique, Plaque chauffante.

c) **Milieux de culture** : Eau Peptonée, Violet Red Bile Agar, Plate Count Agar (PCA), Bouillon d'enrichissement au sélénite, Baird-Parker Medium, Salmonella Shigella Agar (SSA), Gélose Kligler.

II.2.2.3. Matériels utilisés pour les analyses sensorielles

Flacons transparents d'échantillonnage en verre ou en polyéthylène propres (250 à 500 mL)

Cylindre ou bécher transparent ; Fond blanc pour l'observation ; Lampe à lumière blanche ou lumière naturelle et fiche d'observation.

II.3. METHODES

II.3.1. Méthodologie de l'échantillonnage

Nous avons effectué l'étude analytique sur vingt-deux échantillons choisis de manière aléatoire sur le lac TSHOMBE et ses affluents soit 11 échantillons en février (saison pluvieuse) et 11 échantillons en juillet (saison sèche). Les échantillons globaux prélevés dans des emballages en polyéthylène neufs ont été placés dans une glacière puis acheminés rapidement au laboratoire du centre de recherche agroalimentaire (CRAA) pour les examens bactériologiques, macroscopiques, et physico-chimiques. Les analyses chimiques ont été effectuées dans le laboratoire de l'Office congolais de contrôle (OCC) de Lubumbashi.

II.3.2. Analyses bactériologiques

Au Laboratoire, les matrices ont été pesées dans des conditions aseptiques, soumises aux dilutions décimales successives ; la dilution adéquate choisie dans la série des dilutions a été prélevée à l'aide d'une pipette stérile puis ensemencée dans des boites de Pétri. Nous avons réalisé des ensemencements dits en profondeur selon la méthode de la double couche en vue de procéder aux dénombrements bactériens des germes indicateurs ainsi qu'à des ensemencements en surface en vue d'isoler quelques germes pathogènes éventuellement présents dans les échantillons (Rodier et al., 2016). Les analyses microbiologiques des échantillons d'eau ont été réalisées conformément aux méthodes décrites par APHA, AWWA et WEF (2017).

II.3.3. Analyses physicochimiques et chimiques

II.3.3.1. Analyses physicochimiques

Les 22 échantillons d'eau, dont 14 provenant du lac et 8 des affluents, ont été analysés afin de déterminer leurs caractéristiques physico-chimiques à l'aide des méthodes référencées ci-dessous : Le pH des échantillons d'eau du lac Tshombe et affluents a été déterminé selon la méthode décrite par Rodier et al. (2016). La conductivité électrique a été mesurée conformément aux méthodes

standardisées de l'APHA, AWWA et WEF (2017). La turbidité a également été déterminée selon les méthodes normalisées proposées par l'APHA, AWWA et WEF (2017).

La teneur en matières dissoutes a été déterminée selon la méthode décrite par Rodier et al. (2016). L'extrait sec a été évalué conformément à la méthode rapportée par Rodier et al. (2016). Les sulfates ont été dosés selon la méthode décrite par Rodier et al. (2016), tandis que la détermination des chlorures a été réalisée conformément à la méthode normalisée de l'AFNOR (1986). Enfin, les matières organiques ont été déterminées selon la norme ISO 8467 (1993).

II.3.3.2. Analyses chimiques

Les teneurs en Cobalt, Cuivre, Fer, Manganèse, Calcium, Zinc, Aluminium, Nickel, Sodium, Chrome, Plomb, Cadmium, Mercure, Chrome ont été déterminés par ICP-OES **(**ISO.11885 ,2007).

L'ICP (plasma à couplage inductif) est une technique d'analyse élémentaire dans laquelle l'échantillon, généralement sous forme d'aérosol, est introduit dans un plasma d'argon à très haute température. La chaleur du plasma provoque la désolvatation, l'atomisation et l'ionisation des éléments présents dans l'échantillon. En ICP-OES**,** les atomes et ions excités émettent des rayonnements caractéristiques dont l'intensité est proportionnelle à leur concentration. Cette technique permet l'analyse simultanée de nombreux éléments à l'état de traces dans les eaux et autres matrices environnementales (U.S. EPA, 1994).

II.3.4. Analyses sensorielles

Les caractéristiques sensorielles des eaux du lac, notamment la couleur, l'odeur et l'aspect, ont été déterminées par observation directe des échantillons. La couleur apparente a été examinée visuellement dans des flacons transparents et incolores, sur un fond blanc, conformément à la méthode décrite par la norme ISO 7887(2011).
L'odeur a été appréciée par examen olfactif de l'échantillon dans un récipient propre et inodore.
L'aspect a été évalué visuellement en recherchant la limpidité. Les observations ont été consignées sous forme qualitative (ISO 7887 :2011).
Les observations sont réalisées immédiatement après le prélèvement afin d'éviter toute modification des propriétés de l'échantillon comme le recommande Rodier et al (Rodier et al., 2016).

III. PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats que nous présentons dans ce paragraphe concernent les analyses sensorielles, microbiologiques, physico chimiques et chimiques des échantillons d'eaux prélevées. Ces résultats concernent les 22 échantillons répertoriés sur la figure 1. de la cartographie du lac TSHOMBE et ses affluents.

International Journal of Biological Studies
ISSN: 2957-7764 (Online)
Vol. 6, Issue No.1, pp 70 - 86, 2026 www.carijournals.org

Tableau I. Caractéristiques sensorielles des échantillons de l'eau du lac TSHOMBE et affluents

Apparence	Aspect	Odeur	Couleur
P 1	Limpide	Inodore	Incolore
P 2	Limpide	Inodore	Incolore
P 3	Limpide	Mauvaise	Coloré
P4	Trouble	Inodore	Incolore
.P5	Limpide	Inodore	Incolore
P6	Limpide	Inodore	Incolore
P7	Trouble	Mauvaise	Coloré
P 8	Limpide	Inodore	Incolore
P9	Limpide	Inodore	Incolore
P10	Limpide	Inodore	Incolore
P11	Limpide	Inodore	Incolore
P 1'	Limpide	Inodore	Incolore
P2'	Limpide	Inodore	Incolore
P3'	Limpide	Inodore	Incolore
P 4'	Limpide	Inodore	Incolore
P5'	Limpide	Inodore	Incolore
P6'	Limpide	Inodore	Incolore
P7'	Limpide	Mauvaise	Incolore
P8'	Limpide	Inodore	Incolore
P9'	Limpide	Inodore	Incolore
P10'	Limpide	Inodore	Incolore
P11'	Limpide	Inodore	Incolore

Légende : les échantillons 1 à 11 ont étés prélevés en session de pluie et de 1' à 11' en session sèche.

L'observation de ce tableau nous révèle que les échantillons 4 et 7 présentent un aspect trouble ; trois échantillons (3,7 et 7') ont présenté une mauvaise odeur. En outre, nous constatons que vingt échantillons répondent aux normes en ce qui concerne l'aspect, la couleur. En ce qui concerne l'odeur dix-neuf échantillons répondent aux normes de l'OMS.

Tableau II. Analyses bactériologiques des échantillons de l'eau du lac TSHOMBE et affluents. (Moyennes des 22 échantillons pour les deux saisons où 1 à 11 pour la saison sèche et 1' à 11' pour la saison des pluies).

Microorganisme	Flore aérobies mésophiles	Coliformes totaux	Coliformes fécaux	Escherichia coli	Clostridium perfringens
Teneurs Moyennes dans les 22 échantillons (UFC/100ml)	64,5	177	138,5	44,5	0
Ecart type	14,33	22	21	3,67	0
Valeur guide de l'OMS dans 100ml d'eau (WHO 2013)	10^6	0	0	0	0

Légende : les échantillons 1 à 11 ont étés prélevés en session de pluie et de 1' à 11' en session sèche.

En observant les résultats des analyses bactériologiques repris dans le tableau II, il se dégage que tous les échantillons analysés sont chargées des microorganismes recherchés. Aucun échantillon ne contient des Clostridium perfringens.

Tableau III : Eléments chimiques (mg/L) dans l'eau du lac TSHOMBE et affluents

Echantillons	Co	Cu	Fe	Mn	Ca	Mg	Zn	Al	Ni	Na	Pb	Cd	Hg	Cr
P1	0,013	0	1,113	0,007	17,029	13,577	0	0	0	39,136	0,009	0	0	0
P2	0,013	0	1,319	0,005	14,302	15,105	0	0	0	41,424	0,015	0	0	0
P3	0,037	0	1,738	0,161	14,653	17,439	0,056	0	0	45,939	0,008	0	0	0
P4	0,037	0	3,867	2,04	14,067	12,497	0,368	0,117	0	37,428	0,017	0	0	0
P5	0,018	0	2,025	0,084	14,598	13,539	0,177	0,046	0	33,96	0,014	0	0	0
P6	0,013	0	2,073	0,028	14,961	19,345	0	0	0	47,49	0,005	0	0	0
P7	0,005	0	2,04	0,015	14,509	15,776	0	0	0	26,473	0,014	0	0	0
P 8	0,016	0	3,006	0,008	14,831	19,309	0	0	0	46,167	0,011	0	0	0
P9 P10	0,055	0	2,005	0,035	10,688	11,291	0,034	0	0,132	45,606	0,008	0	0	0,001
P11	0,068	0,43	2,014	0,085	14,596	18,681	5,1	0	0,15	46,654	0,008	0	0	0
P 1'	0,015	0	1,110	0,005	17,029	13,577	0	0	0	39,136	0,009	0	0	0
P2'	0,017	0	1,319	0,005	14,302	15,105	0	0	0	41,424	0,015	0	0	0
P3'	0,039	0	1,738	0,161	14,653	17,439	0,056	0	0	45,939	0,008	0	0	0
P4'	0,037	0	3,867	2,04	14,067	12,497	0,368	0,117	0	37,428	0,017	0	0	0
P5'	0,020	0	2,025	0,084	14,598	13,539	0,177	0,046	0	33,96	0,014	0	0	0
P6'	0,015	0	2,073	0,028	14,961	19,345	0	0	0	47,49	0,005	0	0	0
P7'	0,008	0	2,04	0,015	14,509	15,776	0	0	0	26,473	0,014	0	0	0
P 8'	0,018	0	3,006	0,008	14,831	19,309	0	0	0	46,167	0,011	0	0	0
P9'	0,012	0	1,403	0	14,683	19,851	0	0	0	33,495	0,007	0	0	0
P 10'	0,055	0	2,005	0,035	10,688	11,291	0,034	0	0,132	45,606	0,008	0	0	0,001
P11'	0,069	0,43	2,014	0,085	14,596	18,681	5,1	0	0,15	46,654	0,008	0	0	0
Moyenne	**0,026**	**0,039**	**2,055**	**0,224**	**14,447**	**16,037**	**0,521**	**0,015**	**0,026**	**40,343**	**0,011**	**0,000**	**0,000**	**0,000**
Normes de l'OMS en mg/L (OMS ,2006)	0,05 à 0,1	2	0,3	0,4	75	50	3	0,2	0 ,07	200	0,01	0,003	0,006	0,05

Légende : les échantillons 1 à 11 ont étés prélevés en session de pluie et de 1' à 11' en session sèche.

Les résultats des teneurs moyennes des éléments métalliques, repris dans le tableau III indiquent des valeurs élevées en fer par rapport aux normes de l'OMS soit 2,055 mg/L. Le plomb se retrouve en moyenne aux concentrations limites.

Tableau IV. Résultats des paramètres physico-chimiques de l'eau du lac TSHOMBE et affluents

Echantillons	pH	Cond (µS/cm)	Turbidité (ppm)	TDS (mg/L)	Extrait sec (mg/L)	SO_4^{-2} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	Matières organiques (mg/L)
P1	7,3	1200	7,8	343	957	185	122	4,2
P2	6,7	1550	7,4	361	230	235	213	6,4
P3	7,6	1473	10,8	267	400	283	142	5
P4	7,6	1432	8,4	248	600	0	164	6,8
P5	7,7	1320	7,6	356	710	377	255	4,3
P6	7,6	2819	10,6	354	511	0	204	4,4
P7	7,6	1827	10,4	345	526	0	125	6,4
P8	8,3	1659	9,9	472	826	335	205	5,3
P9	8,2	1535	8,1	267	113	226	258	3
P10	8,2	2015	9,7	383	500	0	213	6
P11	7,8	1300	7,3	365	610	336	142	4,6
P1'	7,8	1302	7,3	466	994	236	242	3,2
P 2'	7,7	1556	7	461	652	250	256	4,6
P3'	7,6	1483	10,5	670	1000	380	248	4,1
P4'	7,6	1460	8,2	485	1000	0	234	3,4
P5'	7,7	1322	7,4	569	1000	477	355	3,2
P 6'	7,6	2821	10,3	548	1001	0	284	3,6
P7'	7,6	1837	10	455	952	0	255	0,4
P8'	8,3	1669	9,7	725	726	445	205	0,3
P9'	8,2	1545	8	670	1000	306	284	3,3
P10'	8,2	2018	9,5	830	998	0	263	0,5
P11'	7,8	1302	7,2	655	1000	436	140	0,4
Moyenne	**7,8**	**1656,6**	**8,8**	**468,0**	**741,2**	**204,9**	**218,6**	**3,8**
Ecart type	**0,3**	**310,2**	**1,2**	**128,4**	**234,1**	**150,8**	**48,1**	**1,5**
Normes OMS (2022)	**6,0- 9,0**	**500-1000**	**50**	**1000**	**1000**	**250**	**250**	**< 50**

Légende : les échantillons 1 à 11 ont étés prélevés en session de pluie et de 1' à 11' en session sèche.

Tous les paramètres recherchés se retrouvent dans les normes par rapport aux valeurs supérieures limites recommandées par l'OMS à l'exception de la conductivité électrique dont la moyenne est de 1656,6 ± 310,2 (µS/cm).

IV. DISCUSSION

La conductivité (1656,6 ± 310,2 (µS/cm) et la teneur en fer (2,055 mg/L)) déterminées dans les eaux du lac Tshombe dépassent les valeurs guides recommandées par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), qui sont respectivement de 500-1000 µS/cm pour la conductivité électrique et 0,3 mg/L pour le fer.

Ces résultats témoignent d'une importante minéralisation du milieu aquatique ainsi que d'un enrichissement significatif en fer dissous, traduisant une influence probable des caractéristiques géologiques du bassin versant et des activités anthropiques, notamment minières.

Dans sa recherche, John Kalenga a montré que plusieurs cours d'eau du Haut-Katanga, notamment autour de Lubumbashi, Likasi et Kafubu, présentent des concentrations élevées en métaux, dont le fer, directement liées aux rejets liquides et solides des exploitations minières. (Kalenga, 2019).

La contamination en fer et en plusieurs éléments traces dans le bassin de la rivière Lubumbashi, les rivières Kafubu, Kimilolo et Kinkalabwamba, confirmant que les eaux de surface de Lubumbashi sont fortement influencées par les activités minières et métallurgiques (Bamba Bukengu Muhaya et al. 2017).

Ainsi, les fortes concentrations en fer (2,055 mg/L) et la conductivité élevée (1716,2 µS/cm) mesurées dans le lac Tshombe s'inscrivent dans le contexte environnemental de la Copperbelt congolaise. Les similitudes observées avec les études menées à Lubumbashi suggèrent que les processus de lessivage des haldes minières, la dissolution des minéraux métallifères, le drainage minier et les rejets industriels constituent les principaux mécanismes responsables de la dégradation de la qualité des eaux de surface dans cette région.

Des conditions similaires ont été décrites dans les lacs post-miniers de l'Arc de Muskau (Pologne), où la conductivité électrique et la composition chimique des eaux sont fortement contrôlées par le drainage minier acide et l'oxydation des sulfures. Les auteurs montrent que la forte variabilité de la conductivité, du pH et des concentrations métalliques est directement liée à la géochimie des anciens sites d'exploitation du lignite (Gąsiorowski et al. 2021).

Les investigations réalisées dans le bassin houillé indiquent que les eaux de drainage minier renferment des concentrations élevées en fer, résultant principalement de l'oxydation de la pyrite et de la précipitation secondaire d'oxy-hydroxydes ferriques. Ces processus contrôlent la minéralogie des précipités ferriques ainsi que la qualité physicochimique des eaux de surface (Murad 2018).

En Asie, plusieurs travaux réalisés en Chine et en Inde montrent que les eaux de surface situées à proximité des exploitations minières présentent des conductivités fréquemment supérieures à 1000 µS/cm ainsi que des concentrations élevées en fer, conséquence directe du drainage minier, des effluents industriels et de l'intense altération des roches métallifères. Les mécanismes décrits sont similaires à ceux susceptibles d'expliquer les résultats obtenus au lac Tshombe, bien

que les concentrations observées varient selon la nature géologique des bassins versants et l'intensité des activités anthropiques.

En Amérique du Nord, les recherches menées dans le lac Cœur d'Alène (États-Unis), fortement affecté par les activités minières, montrent que les sédiments renferment plus de 10 % de métaux, dont près de 80 % de fer. Les auteurs démontrent que les bactéries réductrices du fer favorisent la mobilisation du Fe(II) dans les sédiments anoxiques, augmentant ainsi sa disponibilité dans la colonne d'eau (Cummings et al. 2000).

Cette dynamique biogéochimique pourrait également intervenir dans le lac Tshombe, où les processus microbiens et les conditions d'oxydoréduction sont susceptibles de contrôler la mobilité du fer dissous.

En Amérique du Sud, des études réalisées dans les lagunes tropicales influencées par l'exploitation du minerai de fer au Brésil montrent que les activités minières augmentent non seulement les concentrations en fer, mais également la conductivité des eaux par enrichissement en ions dissous. Pereira et al. (2008**)** rapportent que les rejets miniers modifient profondément la spéciation des métaux, leur mobilité et leur biodisponibilité, ce qui est cohérent avec les niveaux élevés de fer et de conductivité mesurés dans le lac Tshombe.

Dans l'ensemble, la comparaison avec la littérature internationale met en évidence une convergence des mécanismes responsables des fortes concentrations en fer et de la conductivité élevée dans les milieux aquatiques soumis à une influence minière. Les similitudes observées concernent principalement la dissolution des minéraux ferrifères, les réactions d'oxydo-réduction, l'activité des microorganismes impliqués dans le cycle du fer, le drainage minier et les apports anthropiques. En revanche, les différences de concentrations entre les continents s'expliquent par la variabilité de la géologie, des conditions climatiques, de l'intensité des activités minières, des caractéristiques hydrologiques des bassins versants ainsi que par les politiques de gestion environnementale. Dans le cas du lac Tshombe, la combinaison d'un contexte géologique riche en métaux et de l'influence des activités minières de la région de Lubumbashi constitue l'hypothèse la plus probable expliquant les concentrations élevées en fer et la forte conductivité observées.

Les analyses bactéiologiques des eaux du lac Tshombe ont révélé une charge bactérienne caractérisée par des teneurs moyennes de 64,5 UFC/mL pour les bactéries aérobies mésophiles, 177 UFC/100 mL pour les coliformes totaux, 138,5 UFC/100 mL pour les coliformes fécaux, 44,5 UFC/100 mL pour Escherichia coli et une absence de Clostridium perfringens **(**0 UFC/100 mL**)**. Les écarts-types relativement faibles observés pour les différents indicateurs (14,33 ; 22 ; 21 ; 3,67 et 0, respectivement) traduisent une faible variabilité entre les échantillons, suggérant une contamination bactériologique relativement homogène du plan d'eau.

La concentration moyenne en bactéries aérobies mésophiles (64,5 UFC/mL) traduit une activité microbiologique importante dans le lac. Bien que ce groupe ne soit pas considéré comme un indicateur spécifique de contamination fécale, il constitue un excellent indicateur de la charge

organique biodégradable et de l'état microbiologique général des eaux. Des concentrations élevées sont généralement associées à une forte disponibilité de matière organique et à des conditions environnementales favorables à la prolifération bactérienne (WHO, 2013).

Les concentrations moyennes en coliformes totaux (177 UFC/100 mL) et en coliformes fécaux (138,5 UFC/100 mL) indiquent une contamination microbiologique importante des eaux du lac Tshombe. Les coliformes totaux regroupent des bactéries d'origine environnementale et intestinale, tandis que les coliformes fécaux sont davantage associés aux déjections des animaux à sang chaud et constituent un indicateur de pollution fécale récente. Ces résultats suggèrent que le lac reçoit des apports continus d'eaux usées domestiques, de ruissellements urbains, d'excréments d'animaux ou de rejets anthropiques insuffisamment traités (WHO, 2022 ; APHA, AWWA & WEF, 2023).

La présence d'Escherichia coli à une concentration moyenne de 44,5 UFC/100 mL confirme l'existence d'une contamination fécale récente. Selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé, E. coli ne doit être détecté dans aucun échantillon de 100 mL d'eau destinée à la consommation humaine (WHO,2022). Ainsi, les concentrations observées dépassent largement cette exigence microbiologique, indiquant un risque potentiel de présence d'autres agents pathogènes entériques tels que Salmonella spp., Shigella spp., Campylobacter spp., les entérovirus, les norovirus, Giardia duodenalis et Cryptosporidium spp., fréquemment associés aux contaminations d'origine fécale.

L'absence de Clostridium perfringens dans tous les échantillons constitue un résultat encourageant. Cette bactérie sporulée est reconnue comme un indicateur de contamination fécale ancienne ou intermittente en raison de la forte résistance de ses spores aux conditions environnementales et aux procédés de désinfection. Son absence suggère que les contaminations observées sont probablement récentes plutôt qu'anciennes ou chroniques. Toutefois, cette interprétation doit être nuancée, car la présence de C. perfringens dépend également des conditions hydrologiques, de la dynamique des sédiments et de la persistance des spores dans le milieu aquatique (WHO 2022)

Dans l'ensemble, les résultats obtenus traduisent une dégradation de la qualité microbiologique des eaux du lac Tshombe, principalement imputable à des apports de matières fécales d'origine humaine ou animale. Les concentrations élevées en coliformes et en E. coli témoignent d'un risque sanitaire non négligeable pour les populations utilisant directement les eaux du lac à des fins domestiques, récréatives ou alimentaires. En revanche, l'absence de Clostridium perfringens laisse supposer que cette contamination est essentiellement récente ou intermittente. Ces observations soulignent la nécessité de renforcer les mesures de surveillance microbiologique, d'améliorer les infrastructures d'assainissement et de limiter les rejets d'eaux usées dans le bassin versant afin de préserver durablement la qualité sanitaire du lac Tshombe.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Notre travail, portant sur les caractéristiques des eaux du Lac TSHOMBE et de ses affluents a pour but d'évaluer le degré de pollution de ces dernières afin de préserver la santé de la population riveraine. Pour parvenir à la réalisation de ce travail, nous avons effectué diverses analyses de caractérisation.

Ainsi, 22 échantillons d'eaux (11 échantillons pendant la session sèche et 11 échantillons pendant la session de pluie) ont été prélevés dans des bouteilles neuves en polyéthylène sur le Lac TSHOMBE et ses affluents et étiquetés pour être analysés au laboratoire. Les tests organoleptiques et les analyses, bactériologiques, physico-chimiques et chimiques nous ont renseigné que : L'eau du lac et ses affluents dans l'ensemble contient des matières organiques en suspension et est inodore, insipide, incolore et limpide ; Les échantillons d'eau du lac et ses affluents renferment une forte concentration des microorganismes indicateurs de pollution.

Eu regard à ce qui précède, il se dégage que l'eau du Lac TSHOMBE et ses affluents est en général polluée du point vue bactériologique et auraient un impact sur la santé des riverains et des animaux marins. Ainsi, nous invitons les autorités publiques à encadrer la population riveraine vivant aux alentours du Lac TSHOMBE et ses affluents afin de leur permettre d'améliorer les modes d'évacuation des déchets et eaux usées pour prévenir les maladies hydriques liées à l'eau polluée. Un mécanisme de contrôle microbiologique régulier de ces eaux est indispensable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR. (1986). *NF T90-009 : Essais des eaux — Dosage des ions sulfate — Méthode gravimétrique*. Paris : AFNOR.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). Washington, DC.

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (24th ed.)

Bamba Bukengu Muhaya, Matthieu Kayembe wa Kayembe, Sonia Catherine Mulongo, Clarisse Zoza Kunyonga, and Faustin Zigabe Mushobekwa. 2017. "Trace Metal Contamination of Water in the Lubumbashi River Basin, Kafubu, Kimilolo and Kinkalabwamba Rivers in Lubumbashi City, Democratic Republic of Congo." *Journal of Environmental Science and Engineering B* 6(6):301–11. doi: 10.17265/2162-5263/2017.06.002.

Best, J. (2022). Anthropogenic stresses on rivers and freshwater ecosystems in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 602–614.

Cummings, D. E., March, A. W., Bostick, B., Spring, S., Caccavo, F., Fendorf, S., & Rosenzweig, R. F. (2000). *Evidence for microbial Fe(III) reduction in anoxic, mining-*

impacted lake sediments (Lake Coeur d'Alene, Idaho). Applied and Environmental Microbiology, 66(1), 154–162. https://doi.org/10.1128/AEM.66.1.154-162.2000

Falkenmark, M., & Rockström, J. (2020). *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology*. Earthscan/Routledge.

Gain, A. K., Giupponi, C., & Wada, Y. (2021). Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*, 16(12).

Gąsiorowski, Michał, Jacek Stienss, Elwira Sienkiewicz, and Ilona Sekudewicz. 2021. "Geochemical Variability of Surface Sediment in Post-Mining Lakes Located in the Muskau Arch (Poland) and Its Relation to Water Chemistry." *Water, Air, and Soil Pollution* 232(3). doi: 10.1007/s11270-021-05057-8.

Hoekstra, Arjen Y. 2011. "The Global Dimension of Water Governance: Why the River Basin Approach Is No Longer Sufficient and Why Cooperative Action at Global Level Is Needed." *Water (Switzerland)* 3(1):21–46. doi: 10.3390/w3010021.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: IPCC.

ISO. (2011). *ISO 7887:2011 — Qualité de l'eau — Examen et détermination de la couleur*. Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO. (1993). *ISO 8467:1993, Qualité de l'eau — Détermination de l'indice de permanganate*. Organisation internationale de normalisation, Genève. La norme ISO 8467:1993 est actuellement confirmée comme version en vigueur.

ISO. (2007). *ISO 11885:2007 — Qualité de l'eau — Dosage d'éléments choisis par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-OES).* Genève : Organisation internationale de normalisation.

Kalenga, John Ngoy. 2019. "Assessment of Heavy Metal Concentrations in Streams and Economic Effects in Haut-Katanga Province of the Democratic Republic of Congo." *The Hosei University Economic Review* 86(3):1–21.

Kayembe, J. M., Thevenon, F., Laffite, A., et al. (2018). High levels of faecal contamination in drinking groundwater and recreational water due to poor sanitation, in the sub-rural neighbourhoods of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(3), 400–408. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.003

Lutandula, Michel Shengo, and Kalenga Ngoy Mwana. 2014. "Perturbations from the Recycled Water Chemical Components on Flotation of Oxidized Ores of Copper - The Case of Bicarbonate Ions." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2(1):190–98. doi: 10.1016/j.jece.2013.12.012.

Muimba-Kankolongo, Ambayeba, Célestin Banza Lubaba Nkulu, Jacob Mwitwa, Florence M.

Kampemba, Misery Mulele Nabuyanda, Vincent Haufroid, Erik Smolders, and Benoit Nemery. 2021. "Contamination of Water and Food Crops by Trace Elements in the African Copperbelt: A Collaborative Cross-Border Study in Zambia and the Democratic Republic of Congo." *Environmental Advances* 6. doi: 10.1016/j.envadv.2021.100103.

Murad. 2018. "MURAD." 40(4):427–40. doi: https://doi.org/10.1180/0009855054040181.

Nature Water Editorial. (2024). Peace with nature. *Nature Water*, 2, 297.

Pereira, A. A., van Hattum, A. G. M., Brouwer, A., van Bodegom, P. M., Rezende, C. E., & Salomons, W. (2008). *Effects of iron-ore mining and processing on metal bioavailability in a tropical coastal lagoon*. Journal of Soils and Sediments, 8(4), 239–252. https://doi.org/10.1007/s11368-008-0017-1

Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). (2011). *Problématique de l'eau en République démocratique du Congo : Défis et opportunités pour une gestion durable des ressources en eau*. Nairobi, Kenya : PNUE.

Rodell, M., et al. (2024). Global freshwater availability under climate and human pressures. *Nature Water*. *(Article récent sur les pressions exercées sur les ressources mondiales en eau.)*

Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). *L'Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. Paris : Dunod.

Rodier, Jean and, and Bernard Legube. 2016. *L'Analyse de l'EAU : Contrôle et Interprétation*. Vol. 10e éditio. Dunod.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Progress on Ambient Water Quality – SDG Indicator 6.3.2*. Nairobi, Kenya.

UN-Water. (2024). *UN World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2024). *United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris: UNESCO.

U.S. EPA (1994). *Method 200.8: Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, Revision 5.4*. Cincinnati, Ohio: United States Environmental Protection Agency.

Vörösmarty, C. J., et al. (2021). Global threats to human water security and river biodiversity: Progress and future challenges. *Nature Reviews Earth & Environment*

World Health Organization (WHO). (2022). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed., incorporating the second addendum). Geneva: WHO.

WHO (World Health Organization (WHO), 2017. Directives sur la qualité de l'eau de boisson Quatrième édition ISBN 978-92-4-254995-9

WHO. 2013. *Heterotrophic Plate Counts and Drinking-Water Safety: The Significance of HPCs for Water Quality and Human Health*. Vol. 12. doi: 10.2166/9781780405940

2026 by the Authors. This Article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)