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

Evaluation de l’impact de la montée du lac Tanganyika par la détermination de l’indice de la qualité de ses eaux de surface : Cas de la zone de captage de la REGIDESO

Nshimirimana, Jean Pierre; Sous la direction de : Dr Nkurunziza Rémy Marie

2026-03
UB: FSE
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2270

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

INSTITUT DE PEDAGOGIE APPLIQUEE

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE-CHIMIE

EVALUATION DE L'IMPACT DE LA MONTEE DU LAC TANGANYIKA PAR LA DETERMINATION DE L'INDICE DE LA QUALITE DE SES EAUX DE SURFACE : CAS DE LA ZONE DE CAPTAGE DE LA REGIDESO

Par :

NSHIMIRIMANA Jean Pierre

Mémoire présenté et soutenu publiquement en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences, Spécialité : Enseignement de la Chimie

Sous la direction de :

Dr Rémy Marie NKURUNZIZA

Bujumbura, Mars 2026

LES MEMBRES DU JURY

Président : Pr BIGUMANDONDERA Patrice

Secrétaire : Dr AHISHAKIYE Rosine

Directeur : Dr NKURUNZIZA Rémy Marie

DEDICACE

A mes chers parents, Pasteur HASHIMIMANA Laurent et HARERIMANA Euphrasie

A ma très chère épouse, NDAYIZEYE Emelyne ;

A mes enfants : Jaspe L. Jedidya ; Precious L. Maaloth ; Adonaï W. Otniel ; Rohi L. M. Ella et Shiny E. Beloved ;

A mes frères et sœurs ;

A mes beaux-frères et belles-sœurs ;

A mes neveux et nièces ;

A mes cousins et cousines ;

A mes oncles et tantes ;

A tous mes amis et connaissances chez qui l'échange scientifique est un plaisir ;

Je leurs souhaite tout bonheur, toute bénédiction et la vie éternelle.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je remercie avant tout l'Eternel, Dieu des armées célestes de nous avoir gardés en vie et donnés la force et le courage pendant sa réalisation. Je remercie mes parents, ma femme et mes enfants, mais également toute personne et institution qui ont apporté leur soutien durant la réalisation de ce mémoire.

Je pense notamment au Dr Rémy Marie NKURUNZIZA, qui a accepté de diriger ce travail. La pertinence de ses conseils méthodologiques, sa disponibilité et ainsi que son expertise de suivi scientifique ont permis l'aboutissement de ce travail.

A tous les enseignants qui ont participé de près ou de loin à notre formation depuis l'école primaire jusqu'en master ; ceux de l'Université du Burundi et ceux de l'Ecole Normale Supérieure, pour tous leurs efforts consentis infatigablement au cours de notre formation académique. A tous les étudiants de Master, Spécialité Enseignement des Sciences et Langues en général et plus particulièrement ceux de la Chimie avec qui nous avons partagé la vie estudiantine.

Au responsable et techniciens des laboratoires d'analyse chimique à l'Université du Burundi, au campus Mutanga, à la REGIDESO et au Laboratoire d'Analyse des Eaux Africaines sis à Mutanga-Nord, pour leur assistance technique lors de mes analyses qui ont porté sur les eaux brutes de la zone de captage de la REGIDESO au Lac Tanganyika.

Aux directeurs, techniciens et plongeurs de la REGIDESO pour leur acceptation et soutien matériels (véhicule de terrain et bateau) afin d'avoir accès à leur zone de captage pour prélever surtout au niveau de la crépine.

A toute personne qui de près ou de loin, a utilement contribué à la réalisation de ce travail et qui n'a pas pu être cité.

A tous et à chacun, nous disons merci.

RESUME

Depuis longtemps, le lac Tanganyika a connu des fluctuations du niveau de ses eaux de surface **(Bergonzini et al., 2002 et IGEBU, 2024)**. Etant donc indispensables à la vie de tout écosystème, le maintien de la qualité de ces eaux est alors une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir aux divers besoins en eau **(Talhaoui et al., 2020)**.

Pour contribuer au suivi de cette qualité, nous avons mené une étude consistant à l'évaluation de l'impact de la montée du lac Tanganyika observée en 2024, par la détermination de l'indice de la qualité de ses eaux de surface(IQE) ; au point de captage de la REGIDESO. Ainsi, Vingt-cinq paramètres physico-chimiques ont été analysés et quatorze d'eux, choisis pour le calcul de l'IQE. Les échantillons ont été prélevés, au mois de juin, août et octobre 2025 sur site1(en amont) et site2(en aval) et leur analyse montrait une stabilité thermique conforme aux normes, donc des températures de 27,62 à 29 °C mais elle était contrebalancée par une alcalinité élevée, expliquée par un pH variant de 8,79 à 9, dépassant systématiquement la norme de 8,5 et créant un milieu basique susceptible d'altérer les équilibres biologiques. Cette forte alcalinité des eaux étant étroitement liée à une minéralisation exceptionnelle, à voir leur conductivité électrique(609 et 653 µS/cm) , soit plus du double de la norme fixée à 300 µS/cm **(WHO, 2022)**. Bien que les TDS restent sous le seuil de 500 mg/l, leur niveau confirme une présence massive de sels.

L'analyse ionique révélait que cette minéralisation était portée par des teneurs en HCO_3^- de 270 mg/l sur une norme de 120 mg/l **(WHO, 2022)**. La teneur en K^+ affichait des valeurs extrêmes entre 86 et 91 mg/l, soit trente fois par rapport aux normes ; suggérant donc un impact direct de rejets agricoles ou industriels en amont. Quant à la charge organique, indicateur de la pollution organique ; les résultats présentaient un contraste saisissant. Bien que l'oxygène dissout reste satisfaisant au-dessus de 6 mg/l, la DBO_5 excède fréquemment la norme de 5 mg/l, culminant à 9,74 mg/l et traduisant une pollution organique significative. Ce qui s'explique par une transparence très basse des eaux du lac(1,20m au S1 et 4,50m au S2) par rapport à celle de **Dubois, (1958)** atteignant 20m. L'interprétation de l'IQE confirme une corrélation nette entre les sites et de juin à octobre. Les eaux du S2 à un IQE variant de 42 à 48, présente une qualité bonne, de classe II, malgré une légère dégradation alors que celles du S1 avec IQE variant de 58 à 64, affichait une qualité moyenne de classe III. Cette évaluation révèle ainsi une dynamique complexe où s'entremêlent des caractéristiques naturelles et influences anthropiques marquées ; d'où une nécessité d'un suivi scientifique régulier à la suite des fluctuations de niveau des eaux de surface du lac Tanganyika.

Mots-Clés : Physico-chimie, Indice IQE, Pollution anthropique, Minéralisation

ABSTRACT

Lake Tanganyika has long experienced fluctuations in its surface water levels **(Bergonzini et al., 2002 and IGEBU, 2024)**. As these waters are essential to the life of any ecosystem, maintaining their quality is a major concern for a society that must meet its diverse water needs **(Talhaoui et al., 2020)**.

To contribute to monitoring this water quality, we conducted a study assessing the impact of the 2024 rise in Lake Tanganyika's water level by determining the Water Quality Index (WQI) of its surface waters in the REGIDESO catchment area. Twenty-five physicochemical parameters, including heavy metals, were analyzed, and fourteen were selected for calculating the WQI. Samples were collected in June, August, and October 2025 at site 1 (upstream) and site 2 (downstream). Water analysis showed thermal stability within acceptable limits, with temperatures ranging from 27.62 to 29 °C, but this was offset by a concerning alkalinity: the pH, varying from 8.79 to 9, consistently exceeded the standard of 8.5, creating a basic environment likely to disrupt biological balance. This high alkalinity is closely linked to exceptional mineralization, as evidenced by the electrical conductivity (609 and 653 µS/cm), more than double the standard of 300 µS/cm **(WHO, 2022)**. Although the TDS levels remained below the threshold of 500 mg/L, their intensity confirmed a significant presence of salts. Ionic analysis revealed that this mineralization was driven by HCO_3^- concentrations of 270 mg/L, exceeding the standard of 120 mg/L **(WHO, 2022)**. The potassium (K^+) content showed extreme values between 86 and 91 mg/l, thirty times the standard, suggesting a direct impact from upstream agricultural or industrial discharges. As for the organic load, an indicator of organic pollution, the results presented a striking contrast. Although the organic matter (OD) remained satisfactory above 6 mg/l, the BOD_5 frequently exceeded the standard by 5 mg/l, peaking at 9.74 mg/l, and this excess indicates significant organic pollution. This can also be explained by the very low transparency of the lake waters (1.20 m at site S1 and 4.50 m at site S2) compared to that of **Dubois (1958)**, where it reached 20 m. The interpretation of the Water Quality Index (WQI) confirms a clear correlation between the sites from June to October. The waters of S2, with a WQI ranging from 42 to 48, exhibited good quality (Class II), despite slight degradation, while those of S1, with a WQI ranging from 58 to 64, displayed average quality (Class III). This assessment reveals a complex dynamic where natural characteristics and significant anthropogenic influences intertwine; Hence the need for regular scientific monitoring following fluctuations in the surface water levels of Lake Tanganyika.

Keywords: Physico-chemistry, WQI index, Anthropogenic pollution, Mineralization

TABLE DE MATIERES

LES MEMBRES DU JURY……i

DEDICACE.. ……ii

REMERCIEMENTS……...……iii

RESUME….. ……iv

ABSTRACT..……v

TABLE DE MATIERES…. ……vi

LISTE DES TABLEAUX…….viii

LISTE DES FIGURES…… ……ix

LISTE DES ABREVIATIONS……... ……x

AVANT-PROPOS……...……xi

INTRODUCTION GENERALE 1

1. PROBLEMATIQUE 2
2. QUESTION DE RECHERCHE 2
3. OBJECTIFS DE L'ETUDE 2
4. HYPOTHESES DE RECHERCHE 3
5. DÉLIMITATION ET JUSTIFICATION DU SUJET DE RECHERCHE 3
6. JUSTIFICATION DE LA RECHERCHE 4
7. ARCHITECTURE DE NOTRE TRAVAIL 4

CHAPITRE 1. ETAT ENVIRONNEMENTAL DU LAC TANGANYIKA : MENACES, NIVEAU ET QUALITE DES EAUX 5

1.1. GÉNÉRALITÉS SUR LAC TANGANYIKA 5

1.1.1. Localisation du bassin versant du lac Tanganyika 5

1.1.2. Définition et description du Lac Tanganyika 5

1.1.3. Le lac Tanganyika et son âge 6

1.1.4. Le lac Tanganyika, ses affluents et son exutoire 6

1.2. IMPORTANCE DU LAC TANGANYIKA 8

1.2.1. Importance écologique du Lac Tanganyika 8

1.2.2. Importance socio-économique du Lac TANGANYIKA 8

1.3. MENACES PESANT SUR LE LAC TANGANYIKA 9

1.3.1. Pollution des eaux du lac Tanganyika 9

1.3.2. Causes des différents types de pollution du Lac Tanganyika 10

1.3.3. Conséquences de la pollution du lac Tanganyika 10

1.4. VARIABILITE DU NIVEAU DU LAC TANGANYIKA 11
1.4.1. Variabilité du niveau du Lac Tanganyika dans le temps 11
1.4.2. Facteurs responsables de la variation du niveau du Lac 13
1.5. L'INDICE DE LA QUALITE DE L'EAU (IQE) 14
I.5.1. Définitions 14
1.5.2. Importance de l'indice de la qualité de l'eau 15
1.5.3. Détermination de l'indice de la qualité de l'eau 15
1.5.4. Origine et Calcul de l'Indice de la Qualité de l'Eau 16
1.5.5. Evaluation de la qualité de l'eau 17
1.5.6. Paramètres physico-chimiques analysés 18
CHAPITRE 2. PARTIE EXPERIMENTALE 26
2.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 26
2.1.1. Localisation de la zone de captage de la REGIDESO 26
2.1.2. Localisation des sites d'échantillonnage. 26
2.1.3. Chronogramme d'activités et conditions d'échantillonnage 27
2.2. MATERIEL, METHODES ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE 28
2.2.1. Matériel utilisé 28
2.2.2. Les méthodes d'échantillonnage 29
2.3. MÉTHODES ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE 32
CHAPITRE 3. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 34
3.1. RESULTATS D'ANALYSES ET INDICES DE LA QUALITE DES EAUX 34
3.2. DISCUSSION DES RESULTATS SUR LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAUX 36
CONCLUSION ET SUGGESTIONS 48
CONCLUSION GENERALE 48
SUGGESTIONS 48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 50
ANNEXES 55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification de la qualité de l'eau par IQE selon Brown 18
Tableau 2 : Les coordonnées de la zone de captage de la REGIDESO. 26
Tableau 3 : La localisation géographique des différents sites d'échantillonnage 26
Tableau 4 : Le chronogramme d'activités et conditions d'échantillonnage 28
Tableau 5 : Les paramètres analysés, matériel utilisé et méthodes analytiques 32
Tableau 6 : Résultats d'analyse et Indice de la qualité d' eaux 34
Tableau 7 : Les valeurs d'indices de la qualité des eaux du lac. 40
Tableau 8 : Les résultats des métaux lourds analysés en Juin 2025. 41
Tableau 9 : Matrice de corrélation entre les paramètres 43

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte hydrographique du bassin du lac Tanganyika 7
Figure 2 : Hydrologie du lac Tanganyika : a : Bilan mensuel moyen, b : Variabilité du niveau d'eau entre 1858 et 2013 12
Figure 3 : Carte de la zone de captage de la REGIDESO au BURUNDI 27
Figure 4 : Matériel utilisé pendant la collecte et analyse des échantillons..... 29
Figure 5 : Activités d'échantillonnage des eaux du lac Tanganyikas 31
Figure 6 : Variation des paramètres physicochimiques pendant la période d'étude 35
Figure 7 : Le diagramme de Piper des eaux de surface du lac Tanganyika 44
Figure 8 : Diagramme de Stiff, de la qualité de l'eau du lac Tanganyika en 2025 46

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation/ Sigle :

TDS : Total Dissolved Solids ou Solides Dissous Totaux

C.E : Conductivité Electrique

DBO_5 : Demande Biochimique en Oxygène mesurée après 5 jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

O.D : Oxygène Dissout

IQE : Indice de la Qualité de l'Eau

µS/cm : Microsiemens par centimètre

GPS : Global Positioning System

NFU : Nephelometric Formazin Unit

NTU : Unités de Turbidité Néphélométriques.

AEP : Approvisionnement en Eau Potable

REGIDESO : Régie de Production et de Distribution de l'Eau et de l'Electricité

RDC : République Démocratique du Congo

ALT : Autorité du Lac Tanganyika

STEP : Station d'épuration

CICR : Comité International de la Croix-Rouge

GEF (FEM) : Fonds pour l'Environnement Mondial

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

FAO : Food and Agriculture Organization

RSRM : Reflection Seismic-Radiocarbon Method ou Méthode Sismique-Radiocarbone par Réflexion

FNE : Les fluctuations du niveau d'eau

LTRIMP : Lake Tanganyika Regional Integrated Management Programme ou Programme de gestion intégrée régionale du lac Tanganyika

AVANT-PROPOS

La présente étude a été effectuée dans le cadre du mémoire de fin d'étude du cycle de Master en Sciences Chimiques, Spécialité Enseignement de la Chimie. Il s'agit de l'évaluation de l'impact de la montée du lac Tanganyika par la détermination de l'indice de la qualité de ses eaux de surface (IQE) : dans la zone de captage de la REGIDESO, en Province de Bujumbura.

L'objectif de cette étude consiste à relever l'impact de cette montée du lac sur l'indice de la qualité de ses eaux de surface dans la zone de captage afin de contribuer à la gestion durable des ressources en eau et aux décisions prises par les utilisateurs et gestionnaires.

Pour y arriver, vingt-cinq paramètres physico-chimiques et métaux lourds ont été analysés. Les indices de la qualité des eaux calculés, montraient que, de juin, août et octobre ; la qualité de ces eaux variait du site1 au site 2. Ainsi, de juin, aout à octobre, l'IQE a varié respectivement de 58,4 ; 60,2 à 64,8 au S1 et de 42,6 ; 45,1 à 48,9 au S2. Donc, la qualité de ces eaux est moyenne ($51 \leq IQE \leq 75$), de classe III sur S1 (en amont) tandis qu'elle est d'une bonne qualité ($25 \leq IQE \leq 50$) sur S2. Les valeurs des concentrations en métaux lourds montrent que le Plomb, le Cuivre et le Cadmium y étaient absents alors que le Chrome hexavalent était faiblement en excès par rapport à la norme.

La transparence de l'eau est bonne à la surface de la zone de captage dont la valeur maximale est d'environ de 4,45 m au S2(en aval) mais très faible, environ 1,20m au S1(en amont). L'évaluation de la pollution organique indique que les eaux du lac présentaient une forte pollution organique au S1, ce qui pourrait être à la cause de la mortalité ou fuite des poissons et la perturbation sanitaire des autres êtres vivants inférieurs.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau douce est essentielle dans de nombreux aspects de la vie humaine et est généralement considérée comme un facteur de production indispensable et un outil efficace de développement économique **(Damo &s Icka, 2013)**. Leur importance scientifique, économique et touristique, mais aussi leur rôle de réserve en aliments protéiniques et d'eaux destinées aux multiples usages sont indiscutables **(Ntakiyiruta, 2017)**.

Bien que cette eau joue un rôle important dans la prospérité sociale et le bien-être de tous, selon **Damo& Icka, (2013)** ; sa qualité, influencée par divers facteurs naturels et anthropiques, est l'une des questions les plus sensibles au monde **(Millogo et al., 2020)**. Etant donc, essentielle au maintien de la vie sur Terre ; l'état naturel de l'eau a été considérablement altéré et les activités humaines peuvent affecter sa disponibilité pour divers usages, tant en quantité qu'en qualité **(Rocha et al., 2014)**.

C'est ainsi que ces dernières années (décennies), surtout dans la première moitié de l'an 2024; le lac Tanganyika a connu une montée du niveau des eaux de surface, qui avait même atteint des niveaux records sur plusieurs mois **(IGEBU, 2024)**. Au cours de cette période, les eaux qui avaient inondé les zones côtières ou riveraines du Lac; y sont sans doute retournées étant chargées de diverses matières ou substances pouvant polluer les eaux de surface du lac, ce qui serait une menace ainsi à l'utilisation de ces eaux **(Wu et al., 2017)**.

La raison principale de notre étude est de mener une évaluation de l'impact de la montée du Lac Tanganyika sur la qualité de ses eaux de surface. L'étude va se focaliser sur la zone de captage de la REGIDESO vu que 92 % de l'eau potable utilisée en ville de Bujumbura, est fournie par ce réseau comprend une station sur le lac Tanganyika **(Sindayigaya & Toyi, 2023)**.

L'état qualitatif global des eaux du lac devrait être évalué par la détermination de l'indice de la qualité de l'eau vu qu'elle est un critère important pour répondre à la demande et à l'approvisionnement en eau. Donc, garantir une qualité d'eau douce adaptée aux besoins humains et écologiques est de ce fait, un aspect important de la gestion intégrée de l'environnement et du développement durable **(Talhaoui et al., 2020)**.

L'IQE a été ainsi, une expression numérique utilisée pour évaluer cette qualité globale des eaux de surface du lac **(Talhaoui et al., 2020)**. Il a été méthodiquement calculé à partir des résultats d'analyses issus des paramètres physico-chimiques aux échantillons du S1 et du S2 ; prélevés, respectivement de la période de Juin, Aout et Octobre 2025.

1. PROBLEMATIQUE

La problématique pour notre étude s'inscrit dans le constat d'une montée ou hausse spectaculaire du niveau du lac Tanganyika observée au cours des dernières années, selon **Manishatse, (2024)** ; surtout, depuis 2019 à 2024. Ce phénomène s'est considérablement amplifié dans la première moitié de l'an 2024 et, est principalement attribué à des facteurs climatiques extrêmes (précipitations excédentaires liées au phénomène El Niño) **(Manishatse, 2024** et **Niyongabo, 2025)**.

Cette crue ne se limitant pas à une simple modification géographique ; elle a entraîné une immersion des infrastructures côtières, des latrines, des systèmes d'égouts et des zones de décharges sauvages. Malgré cette situation critique, une partie de la population continue d'utiliser ces eaux de surface de manière incontrôlée pour la baignade, le lessivage, l'hygiène domestique et autres. Parallèlement, la REGIDESO, qui capte cette eau pour la distribuer après traitement, fait face à une modification brutale des caractéristiques de la ressource. L'intrusion de sédiments, de débris organiques et de polluants anthropiques (lessivés par la montée des eaux) pourrait altérer l'efficacité des processus de traitement habituels et menacer la survie des écosystèmes lacustres. D'où la surveillance et la gestion de la qualité de ces eaux de surface est indispensable.

2. QUESTION DE RECHERCHE

Dans quelle mesure la montée exceptionnelle du niveau du Lac Tanganyika, observée au cours des dernières années et devenant ainsi très alarmante au mois de mai 2024 ; a-t-elle dégradé la qualité de la ressource dans la zone de captage de la REGIDESO, et quels sont les risques sanitaires et écologiques pouvant être induits par l'usage incontrôlé des eaux de surface de ce lac ?

3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

- **Objectif Global**

L'objectif global est de notre étude est d'évaluer l'impact de la montée du lac Tanganyika par la détermination de l'indice de la qualité de ses eaux de surface plus précisément dans la zone de captage de la REGIDESO.

- **Objectifs Spécifiques :**

Notre travail s'appesanti également sur les objectifs spécifiques suivants :

- Analyser la variabilité des paramètres physico-chimiques intervenant dans la détermination de la qualité des eaux du lac
- Déterminer l'indice de qualité (IQE) des eaux de surface du lac Tanganyika
- Classifier ces eaux de surfaces de la zone d'étude par rapport à leur qualité.

4. HYPOTHESES DE RECHERCHE

Hypothèse 1 :

La montée des eaux du lac Tanganyika aurait impacté négativement ou fait monter l'indice de la qualité des eaux(IQE) de la zone de captage de la REGIDESO.

Hypothèse 2 :

La montée des eaux du lac Tanganyika aurait positivement impacté ou influencé la diminution de l'indice de qualité des eaux (IQE) de la zone de captage de la REGIDESO.

5. DELIMITATION ET JUSTIFICATION DU SUJET DE RECHERCHE.

A. Délimitation spatiale (Géographique)

L'étude se concentre exclusivement sur la zone littorale du Lac Tanganyika, plus précisément dans le périmètre d'influence de la station de captage de la REGIDESO.

Ce choix se justifie par le fait que c'est le point névralgique d'approvisionnement en eau potable pour la ville de Bujumbura.

B. Délimitation temporelle

La recherche couvre la période allant de Juin à Octobre 2025. Cette période correspond à la période de stabilisation ou de décrue progressive, permettant d'analyser les effets rémanents (résiduels) de la pollution.

C. Délimitation thématique (Analytique)

L'étude se limite à l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau. Elle s'appuiera sur le calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) pour synthétiser l'impact de la montée des eaux sur la santé publique et l'équilibre écologique immédiat.

6. JUSTIFICATION DE LA RECHERCHE

A. Justification scientifique et environnementale

La montée des eaux provoque un lessivage massif des sols. Les zones inondées (anciennes latrines, décharges, zones industrielles) libèrent des polluants (nitrates, phosphates, métaux lourds, bactéries fécales) qui convergent vers le lac. Il est crucial de quantifier cette charge polluante pour comprendre comment elle perturbe l'écosystème lacustre.

B. Justification sociale et sanitaire

La population riveraine utilise l'eau brute pour la lessive et la baignade, s'exposant à des maladies hydriques (choléra, dermatoses, typhoïde). Par ailleurs, la REGIDESO pourrait voir ses coûts de traitement augmenter ou l'efficacité de ses procédés diminuer face à une turbidité et une charge organique exceptionnelles. Cette étude justifie la nécessité de réviser les protocoles de potabilisation en période de crise climatique.

C. Justification académique et prospective

Ce travail vient combler un vide documentaire sur les conséquences qualitatives des crues du Lac Tanganyika au 21ème siècle. Les résultats serviront de modèle ou de référence pour les décideurs politiques et les gestionnaires de l'eau afin d'anticiper les futurs cycles de montée des eaux liés au changement climatique.

7. ARCHITECTURE DE NOTRE TRAVAIL

A part l'introduction générale, incluant le contexte général de notre étude en mettant en lumière l'importance de la qualité globale de l'eau et donc, de son indice de la qualité ;

Le présent travail est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre porte sur l'état des lieux du lac Tanganyika qui comprend les généralités du lac Tanganyika ; la variabilité de la montée des eaux de surface dans le temps ; les menaces sur le lac Tanganyika ; l'indice de la qualité des eaux de surface et l'importance des IQE et le tableau de leur valeur issues des recherches antérieures par Brown ;

Le deuxième chapitre décrit le matériel et méthodes de recherche utilisés dans la collecte, l'analyse et le traitement des données ainsi que les normes de conformité ;

Le troisième chapitre porte sur la présentation et discussion des résultats et ;

En fin, la conclusion générale de l'étude et des suggestions pratiques sont formulées pour améliorer la gestion de la qualité globale des eaux de surface de la zone de captage de la REGIDESO.

CHAPITRE 1. ETAT ENVIRONNEMENTAL DU LAC TANGANYIKA : MENACES, NIVEAU ET QUALITE DES EAUX

1.1. GENERALITES SUR LAC TANGANYIKA

1.1.1. Localisation du bassin versant du lac Tanganyika

Le bassin Nord du lac Tanganyika est situé en Afrique de l'Est, entre 3° 20' et 4° 20' de latitude Sud ; 29° 30' de longitude Est (voir la figure1). Il s'étend sur 231 000 km², englobe dans sa partie nord le lac Kivu, qui se déverse dans le Tanganyika par la Rusizi **(Branchu & Bergonzini, 2004 et Laurent et al., 2015)**.

Ainsi, ce bassin est partagé par cinq pays : le Rwanda, le Burundi, la République Démocratique du Congo (RDC), la Tanzanie, et la Zambie **(Cazenave-Piarrot et al., 2015 et Niyoyitungiye, 2020)**.

1.1.2. Définition et description du Lac Tanganyika

Le lac Tanganyika est situé dans une région à un climat tropical humide marqué par une alternance de deux saisons **(Branchu & Bergonzini, 2004)**. L'eau du lac est ainsi une importante source d'eau potable, d'eaux d'irrigation, de l'aquaculture et industrie **(Wu et al., 2017)**. Il présente un vaste réseau hydrographique caractérisé par de nombreux cours d'eaux permanents et temporaires. De plus, la variation saisonnière et la vitesse du courant dans le lac Tanganyika sont déterminées par la dynamique de la zone de convergence intertropicale **(Niyoyitungiye, 2020)**.

Ainsi, les pays riverains du lac Tanganyika sont la RDC, la Tanzanie, le Burundi et la Zambie. Son altitude est de 773 m au-dessus du niveau de la mer ; sa longueur est de 673 km ; sa largeur varie de 12 – 90 km, une moyenne d'environ 50 km ; sa superficie est de 32 600 km^2 et son volume est de 18 880 km^3.

Le Périmètre côtier du lac est de 1 838 km ; sa profondeur maximum 1 320 m dans le bassin nord ; 1 470 m dans le bassin sud et sa profondeur moyenne est de 570 m. La stratification du lac est permanente, méromictique ; sa zone oxygénée est de 70 m de profondeur au nord, 200 m de profondeur au sud ; sa température varie de 23-27 °C et son pH de 8.6 – 9.2 ; son degré de salinité est d'environ 460 mg/litre et sa richesse poissonneuse + de 500 espèces de poissons **(Branchu & Bergonzini, 2004; Kapepula et al., 2015 ; Bergonzini et al., 2002 et IGEBU, 2024)**.

1.1.3. Le lac Tanganyika et son âge

L'estimation de l'âge des plus anciens lacs est importante pour déterminer leur histoire et leur rythme d'évolution biotique et tectonique (Cohen, Soreghan, et al., 1993).

Les estimations d'âge du RSRM suggèrent que les bassins structuraux du centre du lac Tanganyika ont commencé à se former entre 9 et 12 millions d'années selon **Cohen, Soreghan et al., (1993)** alors que celui du lac Tanganyika pourrait s'être rempli de façon continue seulement pendant les derniers 5 millions d'années **(Kapepula et al., 2015)**.

1.1.4. Le lac Tanganyika, ses affluents et son exutoire

La source des eaux du bassin du lac Tanganyika, communément appelé «bassin du Congo», est assez large avec une gamme des affluents et des grandes rivières qui se drainent vers ce bassin **(IGEBU, 2024 et** Kapepula et al., 2015).

Le lac Tanganyika est principalement alimenté par les précipitations et les affluents dont les deux principaux sont : la rivière Rusizi qui draine le lac Kivu au Nord, et la rivière Malagarazi au Sud ; sans oublier aussi les précipitations et autres rivières qui s'y jettent **(Manishatse, 2024 et Branchu & Bergonzini, 2004)**.

Quant à son exutoire, la Lukuga qui est son unique exutoire qui le relie au bassin du fleuve Congo en l'alimentant selon **IGEBU, (2024) et Cazenave-Piarrot et al., (2015)** ; est partiellement bloquée **(Manishatse, 2024)**.

La figure 1 montre la situation hydrographique du lac Tanganyika :



Figure 1: Carte hydrographique du bassin du lac Tanganyika **(Niyoyitungiye , 2020)**.

1.2. IMPORTANCE DU LAC TANGANYIKA

L'eau du lac Tanganyika est une ressource naturelle essentielle qui revêt une importance économique et sociale capitale pour l'humanité **(Jishan, 2022 et Niyongabo et al., 2024)**.

Ce lac a aussi une importance internationale et constitue une ressource vitale partagée entre le Burundi, la République démocratique du Congo, la Tanzanie et la Zambie selon **Lumami et al., (2020)** ; qui offre un fort potentiel de leur développement.

1.2.1. Importance écologique du Lac Tanganyika

Dans le monde entier, le service d'eau dépend de l'approvisionnement en eau et aide les gens à satisfaire leurs besoins quotidiens en eau. La consommation d'eau est un indicateur des besoins en eau. Ainsi, sa disponibilité dépend des paramètres piliers clés ou donc de sa qualité **(Ntakiyiruta et al., 2020)**. Selon **Bergonzini et al., (2002)**; l'eau douce a, toujours été une ressource primordiale et stratégique.

Pour ses richesses écologiques, le lac Tanganyika est reconnu internationalement comme étant un haut lieu mondial de biodiversité: une faune et flore très diversifiées selon **Kapepula et al., (2015)** ; représentant quelques-uns des écosystèmes aquatiques les plus variés au monde **(Cazenave-Piarrot et al., 2015 et Lumami et al., 2020)**.

En plus, ses zones littorales et pélagiques abritent une grande diversité d'oiseaux, d'autres animaux tels que des crocodiles et des hippopotames, de plusieurs espèces de poissons et contiennent toute la gamme des types d'habitats littoraux **(Phiri et al., 2023)**.

1.2.2. Importance socio-économique du Lac TANGANYIKA

La coopération transfrontalière nécessaire au développement socio-économique et à la gestion durable des ressources du lac Tanganyika est encouragée dans le cadre de plusieurs alliances (Autorité du Lac Tanganyika, par exemple) **(Laurent et al., 2015)**.

Le lac Tanganyika fournit ainsi des moyens de subsistance et des opportunités de revenus essentiels à sa population humaine croissante mais également d'autres services socio-économiques, tels qu'une source permanente d'eau potable et d'eau pour les besoins domestiques, ainsi que des ressources pour le développement industriel et agricole **(Phiri et al., 2023 et Ngenzebuhoro et al., 2024)**. C'est un élément essentiel du couloir de transport et de commerce entre l'Afrique Centrale et Orientale.

1.3. MENACES PESANT SUR LE LAC TANGANYIKA

Le lac étant quasi fermé pendant longtemps, les moindres éléments nocifs non dégradés qui y entrent s'y accumulent. De plus, avec l'urbanisation croissante et le rejet d'effluents toxiques provenant des grandes villes, la qualité et la productivité de l'eau du lac Tanganyika se modifient continuellement **(Niyongabo et al., 2023)**.

Le bassin du lac Tanganyika étant surpeuplé; la plupart des habitants de ses rives utilisent son eau pour cuisiner, boire et se laver **(Barankanira et al., 2024)**. Après son utilisation, elle devient "déchet" et elle est rejetée dans le même lac. Il est donc soumis à des menaces et autres sources de pollution dus couramment aux phénomènes habituels et connus **(Niyongabo et al., 2023 et Lumami et al., 2020)**.

La situation de la pollution du lac Tanganyika est tellement alarmante, apportant ainsi des conséquences néfastes ou nuisances graves sur tous les organismes en général et sur la production primaire en particulier **(Kapepula et al., 2015)**. En revanche, les pays riverains et la communauté internationale comme l'Autorité du Lac Tanganyika(ALT) reconnaissent de plus en plus que les menaces qui pèsent sur la richesse biologique du lac et l'exploitation durable de ses ressources s'accroissent rapidement **(Lumami et al., 2020)**.

1.3.1. Pollution des eaux du lac Tanganyika

La pollution des eaux, définie comme étant une dégradation physique, chimique ou biologique et même par des métaux lourds, est provoquée par l'activité humaine. Cette pollution perturbe les conditions de vie et les équilibres aquatiques compromettant ainsi leurs utilisations multiples **(Aw et al., 2011)**. Sachant que toute substance rejetée dans l'environnement, qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle, et ayant des effets biologiques néfastes ; est considérée comme un polluant **(Niyongabo et al., 2023)**.

Donc, la pollution de l'eau survient lorsque des déchets sont rejetés dans les cours d'eau, le lac Tanganyika dans notre cas, sans traitement préalable **(Niyoyitungiye, 2020)**.

Le lac Tanganyika étant l'exutoire des eaux de rejet de la station d'épuration de Buterere, est menacé aussi par l'eutrophisation à cause de l'enrichissement en nutriments de ces eaux qui s'y diverse **(Ntakiyiruta et al., 2020)**.

1.3.2. Causes des différents types de pollution du Lac Tanganyika

Les causes des différents types de pollution du lac Tanganyika sont multiples. De nombreuses études ont montré que divers facteurs contribuent à la contamination de ses eaux. Malgré de nombreuses décisions favorables à l'avenir du lac Tanganyika ; ses eaux sont fortement polluées par différents contaminants nocifs provenant des activités humaines dans les grandes villes établies sur son bassin versant **(Niyoyitungiye, 2020)**.

Le lac connait encore des fluctuations dont les principales sont dues aux contaminants (déchets domestiques et industriels, les métaux lourds, carburants, huiles, produits phytosanitaires et autres) rejetés dans l'environnement se trouvent plus ou moins rapidement dans les milieux aquatiques, notamment les estuaires et les zones côtières, où ils peuvent avoir des effets à court et à long terme **(Lumami et al., 2020)**.

La surpêche et l'utilisation d'engins de pêche destructeurs, les activités humaines et déversements divers dans le bassin du lac ainsi que la sédimentation et l'érosion dues à la déforestation sont à l'origine des problèmes environnementaux les plus graves actuellement face au lac Tanganyika **(Niyongabo et al., 2023 ; Cohen et al., 1993 et Niyoyitungiye, 2020)**.

1.3.3. Conséquences de la pollution du lac Tanganyika

Parmi les principales conséquences de la pollution du lac s'observant généralement dans le bassin nord du lac Tanganyika ; il y a :

- ✓ La sédimentation qui est un processus constant et cumulatif dans le temps, donc très prévisible et sans incertitude, qui peut être géré ; si non, elle a des conséquences graves.
- ✓ L'eutrophisation qui est due à un apport excessif de nutriments dans un milieu aquatique, entraînant la prolifération de plantes (algues), la diminution de l'oxygène, la raréfaction des espèces de poissons, la dégradation générale de la qualité de l'eau et le déséquilibre de l'écosystème **(Niyoyitungiye, 2020 et Cohen et al., 1993)**. Et le coût de traitement des eaux de surface pouvant être élevé ou exorbitant pour les rendre potables.

1.4. VARIABILITE DU NIVEAU DU LAC TANGANYIKA

1.4.1. Variabilité du niveau du Lac Tanganyika dans le temps

- Selon E.-J. Devroey, 1949 ; depuis les années 1846 à 1878, le niveau moyen du lac s'est élevé de la cote 777m 60 à 783m 60cm. Comme pendant cette période le lac était sans écoulement, la hausse de son niveau représentait l'excédent des pluies sur l'évaporation. Après la débâcle de 1878, la baisse des eaux s'est poursuivie pendant une dizaine d'années **(Bergonzini et al., 2002)**.
- Les niveaux mensuels du lac Tanganyika sont disponibles depuis 1932 et ont été l'objet de nombreuses études **(Bergonzini et al., 2002)**.
- Ainsi, au cours du dernier siècle; les variations de niveaux du lac observées en 1949 (772.88m), était le minimum tandis que celle de 1964 (776.82m), était le maximum **(Manishatse, 2024)**. Ajoutons que l'augmentation du niveau d'environ 3 m, de 1961 à 1964 correspond à la crue centenaire du Congo-Zaïre de 1962 **(Bergonzini et al., 2002)**.
- En effet, depuis le début des années 1990, on assistait à une régression, avec un minimum (=773 m) lors des basses eaux de 1994 qui coïncidait avec les sécheresses de 1992 et 1994 **(Bergonzini et al., 2002)**.
- Au cours de ces dernières décennies, le niveau d'eaux de Mai 2024 (777,31m) a été le plus remarquable et a causé des dégâts énormes sur le littoral du Lac par rapport à ceux des années précédentes avec l'exemple du niveau d'eau de 2021, qui s'élevait à 776,58m **(Manishatse, 2024 et IGEBU, 2024)**.

Le lac Tanganyika avait reconnu son précédent record en mai 1964 ; lorsqu'il a subi une inondation unique du dernier siècle **(Manishatse, 2024 et IGEBU, 2024)**.

La figure suivante illustre les variations du niveau mensuel relatif (à gauche) et celle du niveau du lac entre 1858 à 2013.

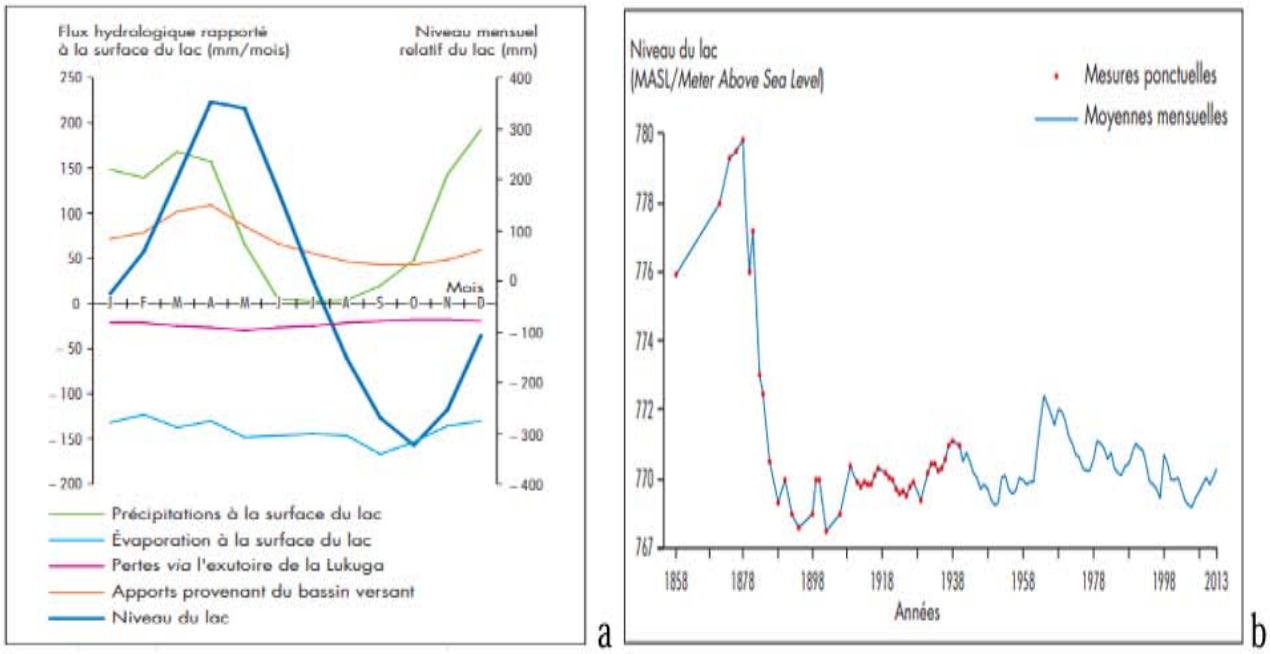


Figure 2 : Hydrologie du lac Tanganyika : a : Bilan mensuel moyen, b : Variabilité du niveau d'eau entre 1858 et 2013 **(Laurent et al., 2015)**.

En bref, les variations de niveaux sont fonction des entrées ou apports et des sorties du Lac **(Bergonzini et al., 2002)**. Le niveau du lac Tanganyika dépend donc du rapport entre les apports d'eau et les pertes **(Manishatse, 2024)**. Ces changements du volume d'eau dans le Lac et par conséquent le niveau du lac, peut être exprimé suivant l'équation ci-dessous :

Les changements de volume du lac = Apports (pluie + écoulements internes) – sorties (évaporation + sorties Lukuga) **(Bergonzini et al., 2002)**.

L'équation (1) donne l'expression du bilan hydrique d'un système lacustre :

$\Delta H = P + E + Qi + Qo$ (1) ;

Où, ΔH : est la variation du niveau lacustre ; P : les précipitations à la surface du lac ; E : l'évaporation à la surface du lac ; Qi : les apports en provenance du bassin versant rapportés à la surface du lac et ; Qo : les pertes à l'exutoire.

Ainsi, l'évaporation constitue la principale voie de sortie des eaux, représentant plus de 80 % des pertes. Ensuite vient la rivière Lukuga, le seul exutoire du lac Tanganyika.

1.4.2. Facteurs responsables de la variation du niveau du Lac

Au regard de la variabilité pluviométrique interannuelle, l'Afrique de l'Est s'individualise, au sein du continent, comme une des régions présentant la plus forte variabilité et la plus forte cohérence spatiale **(Bergonzini et al., 2002)**. La cohérence spatiale des anomalies pluviométriques est forte en Afrique de l'Est **(Richard, 2004)**.

Signalons que la cause de la montée des eaux de surface du lac serait associée à un des événements El Niño, qui est à l'origine de fortes précipitations dans la région de la corne de l'Afrique **(Niyongabo, 2025)**.

Selon Bernard Sindayihebura, Professeur et chercheur à l'Université du Burundi, "le phénomène El Niño provoque de graves inondations", et celui-ci survient toutes les quelques années, bien que le changement climatique les ait rendus plus extrêmes et fréquents **(Manishatse, 2024)**.

De plus, la diminution de la capacité d'évacuation de la Lukuga au début des années 1950 s'explique par la construction d'un batardeau destiné à préserver l'accès aux ports. Inversement les hauts niveaux lacustres du début des années 1960 ont induit à partir de 1964, un auto-curage du lit associé à l'augmentation de la capacité d'écoulement **(Bergonzini et al., 2002)**.

Ce qui aurait fait qu' en Mai 2024, les eaux du lac Tanganyika ont augmenté davantage, atteignant le niveau le plus élevé, jamais enregistré **(IGEBU, 2024)**.

Les facteurs responsables sont en général :

1°. Relation précipitation, saison et hydrologie

En raison de la plus vaste étendue et nombreux affluents du bassin du Congo, l'aval du lac Tanganyika(côté burundaise) connait subitement de la montée des eaux incontournable selon la durée , la fréquence et l'intensité des précipitations tombées dans le bassin-mère de ce lac **(IGEBU, 2024 et Kapepula et al., 2015)**.

2°. Bilan hydrologique et le climat

La variabilité des précipitations constitue le premier élément susceptible d'entraîner des variations d'excédents lacustres et cette dernière serait aussi parallèle à la pluviométrie **(Bergonzini et al., 2002)**.

Les variations extrêmes des côtes du lac Tanganyika peuvent être associées aux conditions hydro-climatiques d'une vaste région **(Bergonzini et al., 2002)**.

Les fluctuations du niveau d'eau (FNE) dans les lacs sont largement influencées par les conditions climatiques régionales et les activités humaines **(Wu et al., 2017)**.

Le bilan hydrologique moyen étant composé d'apports par des: pluies (environ 36 km^3/an), écoulements en provenance du bassin versant (environ 30 km^3/an au total), pertes par évaporation à la surface (environ 56 km^3/an) et, par écoulement via l'exutoire de la Lukuga (environ 10 km^3/an) ; est l'un des facteurs témoignant le maintien du niveau du Lac Tanganyika **(Laurent et al., 2015)**.

Lorsque **le niveau de l'eau augmente**, cela signifie que **les entrées surpassent les sorties**. Cette élévation s'explique par des pluies exceptionnelles, amplifiées par le phénomène climatique El Niño. Dans ce cas, le volume (du lac), disponible pour contenir l'eau se réduit; alors que la masse d'eau reste constante **(Niyongabo, 2025)**.

3°. Modification des conditions de surface.

Les modifications des conditions de surface peuvent constituer un facteur non négligeable de cette évolution car elles peuvent constituer un facteur de la variabilité du bilan hydrologique du lac **(Bergonzini et al., 2002)**. Les conséquences écologiques de la déforestation sont une préoccupation majeure pour les biologistes de la conservation **(Cohen, Bills, et al., 1993)**.

1.5. L'INDICE DE LA QUALITE DE L'EAU (IQE)

I.5.1. Définitions

- **La qualité de l'eau**: est un facteur influençant l'état de santé et la mortalité à la fois chez l'homme et les animaux **(Aw et al., 2011)**. Elle peut être décomposée en de nombreux composants physiques, biologiques et chimiques **(Jishan, 2022)**.
- **L'indice de la qualité de l'eau (IQE)** est une expression numérique utilisée pour évaluer la qualité globale de l'eau à partir d'une grande quantité de données et il est facilement compris par les gestionnaires et décideurs **(Talhaoui et al., 2020)**.

L'IQE est un outil précieux et unique permettant de décrire l'état général de la qualité de l'eau en un seul terme, facilitant ainsi le choix de la technique de traitement appropriée pour répondre aux problèmes rencontrés. Il reflète ensuite l'influence combinée de différents paramètres de qualité de l'eau et communique ces informations au public et aux décideurs politiques **(Tyagi et al., 2013)**.

L'Indice de la qualité de l'eau est utilisé depuis de nombreuses décennies dans d'autres parties du monde selon **Rocha et al., (2014)** ; comme un outil mathématique utile, simple, sensible et adaptable, mais suffisamment élaboré pour pouvoir véhiculer une information intéressante, une expression numérique de la qualité globale de l'eau de surface tant pour les gestionnaires que pour les scientifiques **(Hébert, 1997 et Hyangya, 2021)**.

1.5.2. Importance de l'indice de la qualité de l'eau

De nombreux scientifiques et professionnels ont débattu de la pertinence de l'Indice de la Qualité de l'Eau(IQE) ; réduisant ainsi tous les indicateurs de qualité à un seul indicateur intuitif, facile à comprendre et à interpréter. Aujourd'hui, ce principe est largement utilisé pour évaluer la qualité de l'eau **(El Mansour et al., 2025)**.

Il permet également de réduire le coût des analyses en mettant en évidence les attributs moins importants pour la qualité de l'eau, et donc en autorisant leur omission **(Rocha et al., 2014)**. Il joue également un rôle très important dans le développement socio-économique aussi bien au niveau local, national que régional **(El Mansour et al., 2025)**.

L'Indice de la Qualité de l'Eau est aussi utile pour évaluer de manière fiable la qualité des eaux de surface et adapter les pratiques en conséquence et ainsi l'ensemble des usages potentiels (soit la baignade, les activités nautiques, l'approvisionnement en eau à des fins de consommation, la protection de la vie aquatique et la protection du plan d'eau contre l'eutrophisation) et non pas en fonction d'un usage spécifique **(Hébert, 1997)**.

Il résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise). Ainsi, les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (IQE) de tous les échantillons d'eau de surface ont ensuite été attribuées à l'une des cinq classes de qualité de l'eau **(El Mansour et al., 2025)**.

Etant une technique de classification de cette qualité, elle repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales **(Talhaoui et al., 2020)**.

1.5.3. Détermination de l'indice de la qualité de l'eau

Plusieurs approches ont été introduites pour évaluer la qualité de l'eau sur la base des attributs physico-chimiques et biologiques dans les lacs et rivières. L'un d'eux est le calcul de l'indice IQE, qui permet d'exprimer la qualité de l'eau de manière pratique, compréhensible et comparative **(Hyangya, 2021)**.

D'où cette étude permettra de disposer d'une nouvelle méthode d'évaluation de la qualité des eaux de surface du lac Tanganyika, intégrant tous les attributs ou paramètres indicateurs de la qualité au sein d'un IQE unique **(Rocha et al., 2014)**.

1.5.4. Origine et Calcul de l'Indice de la Qualité de l'Eau

Bien qu'a été initialement adapté par Horton et Brown ; l'IQE est calculé en suivant la méthode de l'indice arithmétique pondéré **(Talhaoui et al., 2020 et Tyagi et al., 2013)**.

Dans son approche, Brown est parti d'une valeur numérique appelée poids relatif (Wi), spécifique à chaque paramètre physico-chimique, calculée selon la formule suivante :

Wi = k/Si (1)

Si : valeur maximale de la norme de potabilité des eaux (Normes Française et de l'OMS pour la qualité des eaux), de chaque paramètre en mg/l sauf pour le pH, la T°C et la conductivité électrique en µS/cm et K : la constante de proportionnalité.

Cette constante K peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}(1/S_i)} \quad (2)$$

Avec n : nombre de paramètres ;

De (1) et (2) ; on en déduit que :

$$Wi = Si/\sum_{i=1}^{n}(1/S_i) \quad (3)$$

Ensuite, une échelle d'évaluation de la qualité (Qi) est calculée pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme dudit paramètre et en multipliant l'ensemble par 100 comme dans la formule suivante :

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{S_i}\right) \times 100 \quad (4)$$

Avec, Qi : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre.

Ci : la concentration de chaque paramètre en mg/l.

Finalement, l'indice global de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

IQE= $\sum_{i=1}^{n}(Qi.Wi)$ (5) ; où **Qi** correspond au paramètre de qualité i, **Wi** à son poids et **n** au nombre de paramètres **(Biswasa et al., 2025)**.

Les calculs de l'indice de qualité de l'eau (IQA) adoptés ici sont basés sur les « Normes de qualité environnementale pour les eaux de surface » **(Wu et al., 2017)**.

En effet, chaque caractéristique (ou paramètre) a été classée selon son impact sur la qualité de l'eau, conformément à la classification de l'OMS (Organisation mondiale de la santé) **(El Mansour et al., 2025)**.

1.5.5. Evaluation de la qualité de l'eau

Certes, les paramètres physico-chimiques ne suffisent pas à expliquer les variations temporelles de la qualité de l'eau. Leurs variations influencent positivement ou négativement la vie biologique et permettent de définir les différents usages de l'eau par les populations riveraines **(Hyangya, 2021)**.

Donc, afin de garantir un approvisionnement en eau potable sûr, il est nécessaire de protéger la qualité de l'eau. Pour évaluer la potabilité de l'eau de la zone de captage de la REGIDESO dans le lac Tanganyika, le calcul d'un indice de qualité de ses eaux de surface(IQE) est indispensable **(Rocha et al., 2014)**.

De nombreuses études ont établi diverses méthodes consistant en cette évaluation tels que des méthodes statistiques multivariées, des techniques de modélisation et des méthodes basées sur des indices multi métriques **(Wu et al., 2017)**.

En fin, dans les écosystèmes aquatiques ; elle repose sur l'analyse de paramètres physico-chimiques et biologiques, afin de mettre en évidence les changements physico-chimiques susceptibles de se produire au cours de l'année (ou d'une période donnée) selon les changements climatiques connus et leur impact sur la qualité de l'eau d'alimentation **(Talhaoui et al., 2020)**.

La qualité de l'eau est classée de I à V, correspondant respectivement à la qualité: Excellente, Bonne, Moyenne, Médiocre et Mauvaise **(Biswasa et al., 2025)**.

Le tableau qui suit donne la classification de l'eau selon Brown **(Talhaoui et al., 2020)**.

Tableau 1 : Classification de la qualité de l'eau par IQE selon Brown

Valeur de l'IQE	Qualité de l'Eau	Usage typique suggéré
0 – 25	Excellente	Consommation, irrigation et usage industriel.
26 – 50	Bonne	Irrigation et usage domestique, après traitement simple
51 – 75	Médiocre (Pauvre)	Irrigation et usage industriel.
76 – 100	Très mediocre	Irrigation restreinte.
> 100	Inapte (insuffisante)	Inapte à la consommation humaine.

1.5.6. Paramètres physico-chimiques analysés

L'analyse a été effectuée sur une série de vingt-cinq paramètres physico-chimiques parmi lesquels, quatorze (14) seulement ont été choisis pour calculer l'indice de la qualité des eaux de surface du lac.

a. Paramètres indicateurs de l'IQE

1. La température de l'eau

Selon **DE Bont, (1972)**, la température des eaux superficielles dépend de l'insolation journalière et les variations saisonnières n'affectent qu'une épaisseur d'eau d'une centaine de mètres. La température de l'eau joue un rôle important et influe considérablement sur la solubilité des sels et des gaz, notamment de l'oxygène indispensable à l'équilibre de la vie **(Lumami et al., 2020)**.

Les températures d'eaux élevées peuvent favoriser la croissance de bactéries et réduire la solubilité de l'oxygène dans l'eau **(Daniel, 2024)**. Ainsi, la température de l'eau, est un facteur écologique qui entraîne d'importantes répercutions écologiques. Elle agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau et la dissociation des sels dissous **(Ferdaous et al., 2015).** Elle impacte la solubilité de l'oxygène et la santé des organismes **(Biswasa et al., 2025)**.

2. Le Potentiel en Hydrogène (pH)

Le pH est un paramètre important pour mesurer l'acidité ou l'alcalinité de l'eau. Un pH de 7 est considéré comme neutre, tandis qu'un pH inférieur à 7 est acide et un pH supérieur à 7 est alcalin. L'eau potable doit avoir un pH compris entre 6,5 et 8,5 pour être considérée comme sûre à boire **(Daniel, 2024)**.

Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates **(Ferdaous et al., 2015)**.

Il joue aussi un grand rôle d'évaluer l'acidité ou l'alcalinité des eaux **(Biswasa et al., 2025)**. Un pH faible (eaux acides) augmente notamment le risque de présence de métaux lourds sous une forme ionique plus toxique et un pH élevé augmente les concentrations d'ammoniac **(Lumami et al., 2020)**.

3. La Conductivité Electrique (C.E)

La mesure de la conductivité constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit en fonction de sa concentration et sa conductivité **(Ferdaous et al., 2015)**. Elle mesure la capacité de l'eau à conduire l'électricité et est influencée par la présence d'ions tels que le calcium, le magnésium, le sodium et le chlorure. Une conductivité élevée peut indiquer une contamination par des produits chimiques ou des métaux lourds **(Daniel, 2024)**. Elle reflète donc la minéralisation et permet d'évaluer le niveau de richesse chimique ou la fraîcheur de l'eau.

4. La turbidité

La turbidité mesure la quantité de matières en suspension dans l'eau, interférant avec le passage de la lumière. Etant un paramètre physique très important pour le contrôle de qualité des eaux ; elle est une mesure globale qui prend en compte toutes ces matières colloïdales, insolubles, d'origine minérale ou organique. Elle est représentative de la transparence d'une eau **(Mohamed, 2013)**.

Les valeurs de la turbidité peuvent s'expliquer par la mauvaise gestion des ordures qui se retrouvent dans les eaux du lac par le biais des eaux de ruissellement **(Dovonou et al., 2024)**. Plus la turbidité est élevée, plus l'eau est trouble. Les matières en suspension peuvent inclure des particules organiques, des sédiments, des algues et des bactéries **(Daniel, 2024)**.

5. Les TDS (Solides Dissous Totaux)

Les solides totalement dissouts (TDS) représentent l'ensemble des sels minéraux et substances inorganiques dissoutes dans l'eau, notamment du calcium, du magnésium, du potassium, du sodium, des bicarbonates, des chlorures et des sulfates et de faibles quantités de matières organiques dissoutes dans l'eau.

Ce paramètre constitue un indicateur global du degré de minéralisation de l'eau et est étroitement lié à la conductivité électrique **(Niyongabo et al., 2023 ; Lumami et al., 2020 et WHO, 2022)**.

Ils sont présents dans l'eau potable provenant de sources naturelles, des eaux usées, des eaux de ruissellement urbaines et des eaux usées industrielles **(WHO, 2022)**.

6. L'oxygène dissout (O.D)

La couche oxygénée de l'eau est très faible par rapport aux énormes profondeurs du lac. Pour une valeur optimale de O.D, les concentrations doivent être supérieures à 5 mg/l. Un déficit d'oxygène survient souvent lors d'une forte turbidité et d'une faible photosynthèse **(Niyongabo et al., 2023 et 2024 et Lumami et al., 2020)**.

La teneur en oxygène dissous de l'eau est influencée par la source, la température de l'eau brute, le traitement et les processus chimiques ou biologiques qui se déroulent dans le réseau de distribution **(WHO, 2022)**.

7. Les ions bicarbonates (HCO_3^-)

Les ions bicarbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux météoriques qui se chargent en CO_2 lors de leur percolation à travers le sol : dans les aquifères carbonatés, les teneurs en bicarbonates sont des quelques centaines de mg/l.

8. L'ion calcium (Ca^{2+})

Le calcium est l'un des éléments minéraux majeurs présents dans les eaux de surface du lac, généralement sous forme de carbonate de calcium ($CaCO_3$). Ce cation intervient également dans la régulation du pH, la dureté totale et la stabilité chimique du milieu aquatique.

9. L'ion magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium participe à l'équilibre ionique et à la dureté totale. Sa concentration influence la photosynthèse du phytoplancton. La concentration en Magnésium libre dans les eaux de surface du lac doit se situer entre 5 et 50 mg/l **(Boyd, 2000)**.

10. Les ions sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates sont des ions naturellement présents dans les eaux de surface et souterraines mais aussi dans de nombreux minéraux issus de la dissolution des roches et des apports anthropiques. Dans les eaux de surface, les teneurs en sulfates sont généralement comprises entre 5 et 50 mg/l **(WHO, 2022)**. Ils sont rejetés dans l'eau par les déchets industriels et par dépôt atmosphérique.

Cependant, dans les régions où l'eau potable présente des concentrations élevées en sulfates, elle peut constituer la principale source d'apport **(WHO, 2022)**.

11. La Demande Biochimique en Oxygène après 5jours

La demande biochimique en oxygène pendant cinq jours, communément désignée sous le terme de DBO5, est un indicateur crucial de la qualité d'une ressource hydrique. Cette mesure offre des perspectives précieuses sur la présence de matière organique biodégradable, élément essentiel à l'évaluation de l'état de l'eau. La DBO5 est une mesure de la quantité d'oxygène utilisée pour la dégradation de la matière organique décomposable par des processus biochimiques **(Lumami et al., 2020)**. Etant un indicateur de la pollution organique, elle revêt une importance capitale dans la surveillance environnementale et la gestion des ressources hydriques.

12. Les ions nitrates

Les nitrates (NO_3^-) se trouvent naturellement dans l'environnement et constitue un nutriment important pour les plantes **(WHO, 2022)**. Ils constituent aussi le stade final de l'oxydation de l'azote, et représentent la forme d'azote au degré d'oxydation le plus élevé présent dans l'eau **(Biswasa et al., 2025)**.

L'impact des affluents consiste en l'enrichissement des eaux par un apport de certains nutriments dont le lac est plutôt déficitaire et leur excès peut entraîner une eutrophisation du plan d'eau, favorisant la prolifération d'algues et la consommation de l'oxygène: d'où une amélioration locale de la productivité primaire **(Nahimana et al., 2008)**. Les dépôts de la Rusizi pourraient augmenter l'azote inorganique et l'alcalinité au large de l'embouchure du lac, ce qui contribue à l'apport des nutriments dans le nord du lac Tanganyika **(Nahimana et al., 2008)**.

Les engrais chimiques entrainés par l'érosion et les rejets urbains jouent un rôle considérable comme source de nutriments **(Ntakiyiruta, 2017)**. Leurs concentrations dans les eaux de surface peuvent varier rapidement du fait du ruissellement des engrais, de l'absorption par le phytoplancton et de la dénitrification par les bactéries **(WHO, 2022)**.

13. Les ions phosphates (PO_4^{3-})

Le phosphore est un nutriment essentiel dans l'écosystème du lac Tanganyika, qui détermine la productivité primaire du lac et influence ensuite les sources de protéines animales pour les pays riverains. Il constitue un nutriment essentiel pour le phytoplancton, base de la chaîne alimentaire aquatique, et sa disponibilité conditionne la production naturelle de nourriture pour

les poissons. Au-delà, l'excès de phosphates peut provoquer une eutrophisation, avec prolifération de cyanobactéries et baisse nocturne d'oxygène.

14. Les ions chlorures

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux douces naturelles mais à de faibles concentrations, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux **(Ferdaous et al., 2015)**.

b. Autres paramètres analysés

1. Le Potassium

Le potassium est un oligo-élément essentiel pour l'être humain et se trouve rarement, voire jamais, dans l'eau potable à des concentrations susceptibles de présenter un risque pour la santé. Il est largement présent dans l'environnement, notamment dans toutes les eaux naturelles. Il peut également se retrouver dans l'eau potable suite à l'utilisation de permanganate de potassium comme oxydant lors du traitement de l'eau **(WHO, 2022)**.

2. Le Sodium

Les sels de sodium (par exemple, le chlorure de sodium) sont présents dans la quasi-totalité des aliments (principale source d'exposition quotidienne) et dans l'eau potable. Bien que la concentration de sodium dans l'eau potable soit généralement inférieure à 20 mg/l, elle peut largement dépasser ce seuil dans certains pays. Les concentrations supérieures à 200 mg/l peuvent altérer le goût de l'eau **(WHO, 2022)**.

3. La dureté totale

La dureté de l'eau est due à la présence de divers ions métalliques polyvalents dissous, principalement des cations calcium et magnésium. La dureté est la mesure traditionnelle de la capacité de l'eau à réagir avec le savon ; une eau dure nécessitant une quantité de savon nettement supérieure pour produire de la mousse **(WHO, 2022)**.

4. La transparence de l'eau

La transparence de l'eau, mesurée avec le disque de Secchi, la profondeur de disparition et de réapparition du disque a permis de déterminer la valeur exacte de la transparence. Elle est un indicateur de la qualité et de la productivité primaire dans les eaux du lac **(Buhungu et al., 2018)**. Dans le lac Tanganyika, la transparence de l'eau varie considérablement d'un endroit à l'autre.

5. La demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO est une mesure de la quantité d'oxygène utilisé pour la dégradation de la matière organique décomposable par des processus biochimiques. C'est un paramètre indicateur de la pollution organique par consommation chimique d'oxygène dissout et qui traduit la présence des matières oxydables d'origine organique et minérale **(Ntakiyiruta et al., 2020)**.

6. Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) dans le lac Tanganyika, composées de sédiments (sable, limon, argile) et de déchets, proviennent majoritairement de l'érosion du bassin versant accentuée par la déforestation. Elles augmentent la turbidité, forment un « voile de boue » réduisant la pénétration de la lumière et de l'oxygène, nuisant ainsi à l'écosystème.

7. Le degré de salinité

La salinité de l'eau d'un lac est liée à la concentration ionique en solution **(Branchu & Bergonzini, 2004)**. Dans le lac Tanganyika, le léger gradient de salinité a un effet marqué sur la stabilité **(Verburga & Hecky, 2009)**.

c. Métaux lourds analysés

Les métaux lourds, appelés également oligo-éléments car ils sont présents en très faibles concentrations dans les systèmes biologiques peuvent causer de graves dommages au milieu aquatique car ils sont non périssables. Les métaux lourds (Plomb, Cadmium, etc.) peuvent provenir du ruissellement agricole, des rejets urbains ou des sols contaminés. Les éléments les plus étudiés dans les eaux de surface pour notre étude sont (Cd, Cr, Cu et Pb). La présence de ces métaux même à des faibles concentrations dans les eaux de surface peut avoir des impacts écologiques et sanitaires importants **(Ferdaous et al., 2015)**.

1. Le cuivre (Cu)

Le cuivre est à la fois un nutriment essentiel et un contaminant de l'eau potable selon **WHO, (2022)**, est un élément essentiel aux organismes et toxique à fortes doses. Il est largement utilisé dans divers domaines (électricité, métallurgie, textile, photographie, agriculture) et trouvé dans la nature soit à l'état métallique (cuivre natif, Cu), soit à l'état d'ion monovalent (Cu^{+}), soit à l'état d'ion bivalent (Cu^{2+}).

L'altération des minéraux primaires libère cet élément qui coprécipite avec les oxydes, les argiles, les carbonates, les sulfures et la matière organique. Le cuivre est donc un oligo-élément essentiel largement répandu dans la nature **(Asfers et al., 2016b)**.

2. Le Plomb (Pb)

C'est un métal hautement toxique pour les organismes aquatiques et humains ; l'OMS indique une valeur-repère de 0,01 mg/l (10 µg/l) **(WHO, 2022)**.

La quantité de plomb dissous dans le système de plomberie dépend de plusieurs facteurs, notamment le pH, la température, l'alcalinité, le tartre dans les tuyaux et le temps de stagnation de l'eau, l'eau douce et acide étant le plus grand solvant du plomb **(WHO, 2022)**.

Le plomb est parmi les métaux toxiques les plus dangereux pour les organismes aquatiques. Il perturbe la production d'hémoglobine et modifie la composition du sang. Son origine dans les eaux de surface peut être expliquer par la forte charge de déversements d'eaux usées et pourrait être anthropique **(Asfers et al., 2016a)**.

3. Le Cadmium (Cd)

Il est un métal ductile se présentant sous forme de poudre bleuâtre ou blanc argenté **(Angelika, 2023)**. Le cadmium, métal toxique non essentiel, est utilisé comme colorant et se retrouve fréquemment dans les alliages et les batteries. Il est très nocif et ses composés, à fortes doses, peuvent provoquer des cancers **(Asfers et al., 2016a)**.

On le trouve naturellement dans les sols (environ 0,2 mg/kg), les minéraux et l'eau. La FAO/OMS recommande que l'apport tolérable en cadmium pour un adulte soit d'environ 0,4 à 0,5 mg/semaine (60 à 70 µg par jour) **(Angelika, 2023)**.

4. Le Chrome IV (Cr IV)

Le chrome est généralement présent dans les eaux naturelles à de faibles concentrations, de l'ordre de 1 à 10 g/L. Les principales sources de pollution des eaux de surface par le chrome sont les ateliers de traitement des sols, les tanneries et l'industrie textile. Le chrome est également présent dans certains engrais et pesticides **(Asfers et al., 2016b)**.

CHAPITRE 2. PARTIE EXPERIMENTALE

2.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1.1. Localisation de la zone de captage de la REGIDESO

Notre zone d'étude se trouve en province de Bujumbura, vers le nord-est du lac Tanganyika à l'Ouest du Burundi. Elle est localisée selon les coordonnées rectangulaires et polaires ainsi fournies par un système de positionnement global (GPS).

Le tableau suivant indique les coordonnées rectangulaires et polaires de la zone de captage de la REGIDESO dans le lac Tanganyika.

Tableau 2 : Les coordonnées de la zone de captage de la REGIDESO.

Les coordonnées géographiques de la zone de captage de la REGIDESO:			
Les coordonnées rectangulaires:	Crépine 1	X= 757713m	Y= 9625551m
	Crépine 2	X= 757670m	Y= 9625460m
Les coordonnées polaires:	Crépine 1	3˚22'55.70'' de latitude	
		29˚19'8.38'' de longitude	
	Crépine 2	3˚23'5.75'' de latitude	
		29˚19'9.80'' de longitude	

2.1.2. Localisation des sites d'échantillonnage.

Ainsi, les sites de prélèvement de nos échantillons sont localisés à des points de coordonnées géographiques ci-dessous. Le tableau suivant décrit la localisation géographique des différents sites d'échantillonnage.

Tableau 3 : La localisation géographique des différents sites d'échantillonnage

Principaux sites d'échantillonnage	Latitude	Longitude
Site1 (S1) : Près du port International de Bujumbura (à 20m de la côte)	3°39´	29°35´
Site2 (S2) : à la surface de la crépine nord (à 3500m du bord du lac)	3°23´08.2´´S	29°19´08.5´´E
Site3 (S3) : à 25m de profondeur par rapport au S2.	3°23´08.2´´S	29°19´08.5´´E

Ces coordonnées précédentes du tableau 2 nous ont permises de cartographier la zone de captage de la REGIDESO.

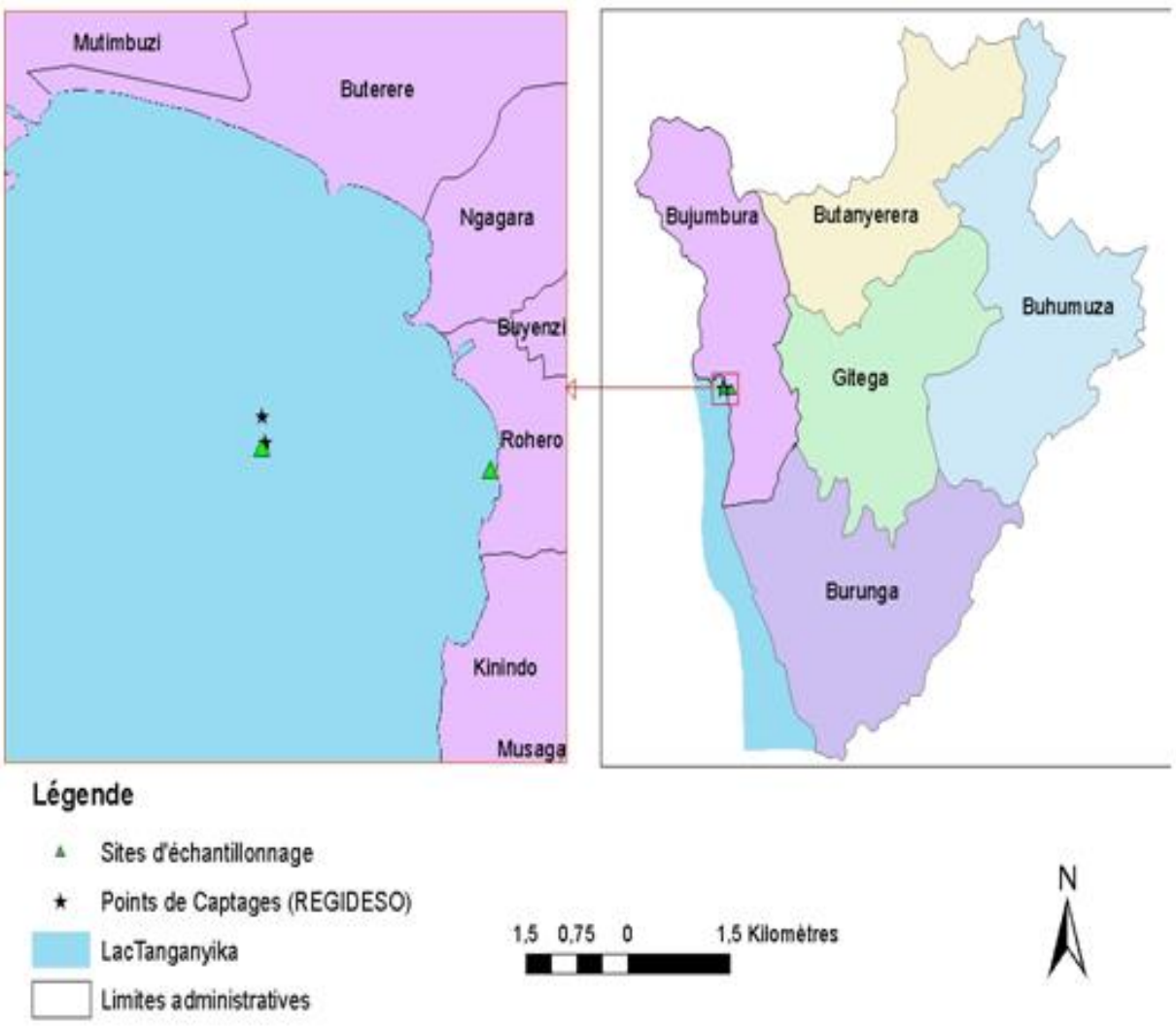


Figure 3 : Carte de la zone de captage de la REGIDESO au BURUNDI

2.1.3. Chronogramme d'activités et conditions d'échantillonnage

L'entrée de la zone d'étude était au niveau du port international de Bujumbura. Le géo-référencement de chaque site a été effectué à l'aide d'un GPS application couramment utilisé par les plongeurs et navigateurs de la REGIDESO. Pour y arriver ; un bateau à moteur de poids assez élevé pouvant résister aux vagues qui, souvent tourbillonnaient surtout vers midi ou selon le climat ; était conduit par ces mêmes experts.

Le tableau suivant nous montre le chronogramme suivi au cours de cette campagne d'activités et les conditions d'échantillonnage.

Tableau 4 : Le chronogramme d'activités et conditions d'échantillonnage :

Dates	Sites	Période	Heures	Conditions du lac
Le 15/06/2025	S1	Saison Semi-pluvieuse	10h05-10h40min	Lac calme
	S2		11h18-11h55min	Lac semi- calme
	S3		11h18-11h55min	Lac semi-agité
Le 15 /08/2025	S1	Saison sèche	9h10-9h55min	Lac semi- calme
	S2		10h35-11h28min	Lac semi-agité
	S3		10h35-11h28min	Lac agité
Le 15/10/2025	S1	Saison pluvieuse	9h40-10h22min	Lac calme
	S2		10h57-11h35min	Lac semi- calme
	S3		10h57-11h35min	Lac semi-agité

2.2. MATERIEL, METHODES ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.2.1. Matériel utilisé

Le matériel utilisé pour le prélèvement et l'analyse des paramètres sont diversifiés. Les principaux sont par exemple : Flacons en polyéthylène de 1,5litres pour l'échantillonnage tels que les flexibles (flacons en plastiques un peu flexibles) et des flacons résistants à la pression de l'eau et (peu déformables) ; PH-mètre à électrodes spécifiques ou multisonde de marque CONSORT C6010 ; Disque de Secchi ; Oxymètre ; Erlenmeyers et béchers ; Spectrophotomètres AL450 avec des cuvettes de diamètre précis ; Etuve réglable de 0 à 230 °C ; Plaque chauffante ; Réfrigérateur (frigo) ; Burettes graduées ; Fioles jaugées ; Entonnoirs ; Agitateur magnétique et Pipettes.

La figure suivante illustre les images de quelques matériels utilisés lors de l'analyse de paramètres in situ ou au laboratoire.



Un pH-mètre aux électrodes spécifiques



Un spectrophotomètre



Un Disque de Secchi



Un Oxymètre

Figure 4 : Matériel utilisé pendant la collecte et analyse des échantillons.

2.2.2. Les méthodes d'échantillonnage

Les prélèvements de l'eau ont été faits chaque fois le mois, sur une période allant de Juin, Août et Octobre 2025 et sur les deux principaux sites (S1, en amont et S2, en aval). C'est uniquement au site3 (S3, au point de captage) où nous avons échantillonné une seule fois, donc en Juin pour l'analyse de métaux lourds. Le choix des sites a été fait, pas selon leur accessibilité mais plutôt selon leur localisation et objectif de l'étude.

En se référant aux protocoles recommandés par Rodier (2009) et recommandations de l'ISO 5667, sous une atmosphère moyennement ensoleillée et à une température des eaux de surface variant 28 à 29˚C ; nous avons procédé à l'échantillonnage et à la collecte des données, en étapes :

- Avant prélèvement (Modes de préparation pour l'échantillonnage) : les flacons préalablement nettoyés étaient rincés avec l'eau dudit site avant le remplissage.
- Pendant le prélèvement (Modes de prélèvement des échantillons) : au niveau des S1 et S2, les échantillons ont été prélevés à la surface (prélèvement surfacique) tandis qu'au niveau de la crépine nord ; ils ont été pris bien sûr par prélèvement mais après immersion d'un plongeur techniquement adapté et bien équipé et mesure de paramètres physico-chimiques in situ ;
- Après prélèvement (Conservation et analyse des échantillons) : ces derniers paramètres tels que la Température, le pH, la Conductivité Electrique (C.E), les Solides Totaux Dissous(TDS), ont été directement mesurés à l'aide pH-mètre à électrodes spécifiques ou multisonde de marque CONSORT C6010 et la transparence de l'eau avec le Disque de Secchi.

Ces flacons contenant de l'eau brute de surface, hermétiquement fermés et bien légendés, ont été immédiatement conservés dans des glaçons pour être transportés, puis mis au réfrigérateur (4 °C) du laboratoire pour y être méthodiquement analysés.

Quelques figures en photos ont été prises pour illustrer les activités d'échantillonnage :



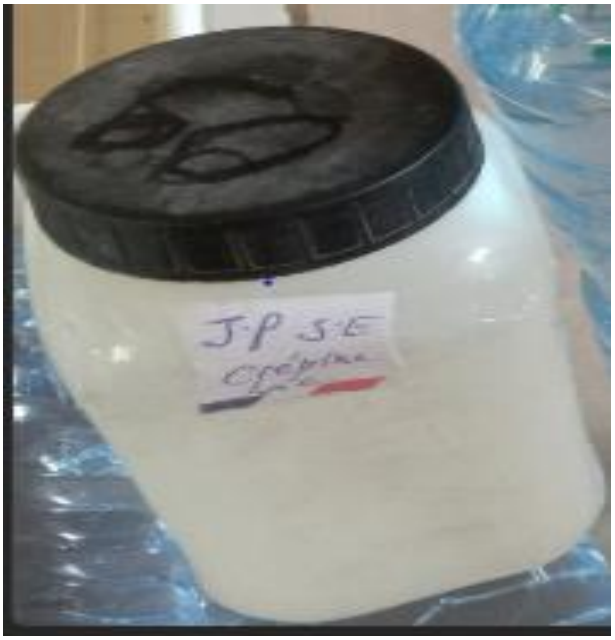
Prélévement des eaux de surface



Un plongeur pour prélever à la crépine-nord



Une série d'échantillons prélevés



Echantillon prélevé à la crépine nord

Figure 5 : Activités d'échantillonnage des eaux du lac Tanganyika

2.3. METHODES ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Les paramètres analysés, le matériel utilisé et les méthodes analytiques correspondantes sont fournis dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Les paramètres analysés, le matériel utilisé et les méthodes analytiques

Paramètres physico-chimiques	**Matériel utilisé**	**Méthodes analytiques**
Température (°C)	pH-mètre avec des sondes spécifiques	Mesure directe
Potentiel en Hydrogène		
Conductivité électrique (µS/cm)		
TDS (mg/l)		
Transparence de l'eau	Disque de Secchi	Mesure directe
Turbidité (mg/l)	Turbidimètre	Méthode ISO 7027 ou HACH 8237
Dureté Totale (mg/l)	Spectrophotomètre	Titrimétries (HACH Method 8329)
Dureté Mg^{2+} (mg/l)		
Dureté Ca^{2+} (mg/l)		
Oxygène Dissout (mg/l)	Oxymètre	Mesure directe
MES (mg/l)	Spectrophotomètre	HACH Method 8006
DBO_5 (mg/l)		Spectrométrique(BODTRACKII)
DCO (mg/l)		HACH Method 8000
SO_4^{2-} (mg/l)	Spectrophotomètre	HACH Method 8051
Cl^- (mg/l)		HACH Method 8113
PO_4^{3-} (mg/l)		HACH Method 8048
NO_3^- (mg/l)		HACH Method8039
HCO_3^- (mg/l)		Titrimétries (HACH Method3)
Degré de salinité (mg/l)		Mesure directe avec HI98194
Na^+ (mg/l)	Spectrophotomètre	Mesure directe avec ISENA
K^+ (mg/l)		HACH Method 8049
Pb^{2+} (mg/l)	Spectrophotomètre	Test kit 486901(exact lead Quick)
Cu Total (mg/l)		Hach Method 8026
Cr^{6+} (mg/l)		Hach Method 8023
Cd^{2+} (mg/l)		Test kit 486904

L'analyse des résultats a été ainsi réalisée conformément aux méthodes ISO 7027 et HACH ; portant ainsi sur l'utilité et l'importance de l'eau ; ce qui a permis la détermination de l'indice de la qualité. Donc, la représentation des résultats a été faite par des graphiques, réalisés à l'aide du logiciel Microsoft Excel (version 2016) sous Microsoft Windows 10 et par des tableaux des indices de qualité de l'eau.

CHAPITRE 3. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

3.1. RESULTATS D'ANALYSES ET INDICES DE LA QUALITE DES EAUX

Tableau 6 : Résultats d'analyse et Indice de la qualité d'eaux (Voir Tableaux en Annexes) :

Paramètre analysé	Unité	Norme	S1-J	S2-J	S1-A	S2-A	S1-O	S2-O
T°	°C	30	29	28,9	28,9	29	27,62	28,9
pH	-	8,5	8,9	8,93	8,98	9	8,79	8,94
CE	µS/cm	300	609	613	624	635	636	653
Turbidité	mg/l	5	0,03	0,09	0,05	0,21	0,12	0,44
TDS	mg/l	500	327	326	328	332	338	339
O.D	mg/l	5	6,23	6,83	6,13	6,96	6,46	7,15
HCO_3^-	mg/l	120	284	269	288	274	294	281
Ca^{2+}	mg/l	75	34	20	35,4	23	40,4	21,33
Mg^{2+}	mg/l	30	6	6	6,29	6,25	7	6,15
SO_4^{2-}	mg/l	150	1	1	1,17	1,24	1,46	1,48
NO_3^-	mg/l	45	0,03	0,04	0,06	0,07	0,18	0,09
DBO5	mg/l	5	8,77	6,38	8,95	7,15	9,74	6,72
$PO4_3^-$	mg/l	1	0,55	0,25	0,59	0,27	0,63	0,3
Cl^-	mg/l	250	21,7	41,7	23,3	41	25,3	41,5
Dureté Totale	mg/l	200	112,00	76,54	118,80	82,41	123,79	80,32
DCO	mg/l	-	13	9	13,45	9,74	14,83	9,83
K^+	mg/l	2,0-3,0	88,20	86,40	88,90	88,00	91,29	89,81
Na^+	mg/l	200	2,35	2,00	2,60	2,33	3,20	2,48
MES	mg/l	50	1,00	0,00	1,20	0,20	1,60	0,23
Transparence	En m	30-40	1,20	4,00	1,25	4,45	1,60	4,15
Degré de salinité	mg/l	35	0,32	0,30	0,35	0,32	0,49	0,40
IQE	-	0-50	58.4	42.6	60.2	45.1	64.8	48.9

Les normes sont celles de l'OMS **(WHO, 2022)**.

Avec : S1-J ou S2-J : Site1 ou Site2 en Juin ;

S1-A ou S2-A : Site1 ou Site2 en Août ;

S1-O ou S2-O : Site1 ou Site2 en Octobre.

La figure suivante montre la variation de quelques paramètres physicochimiques :

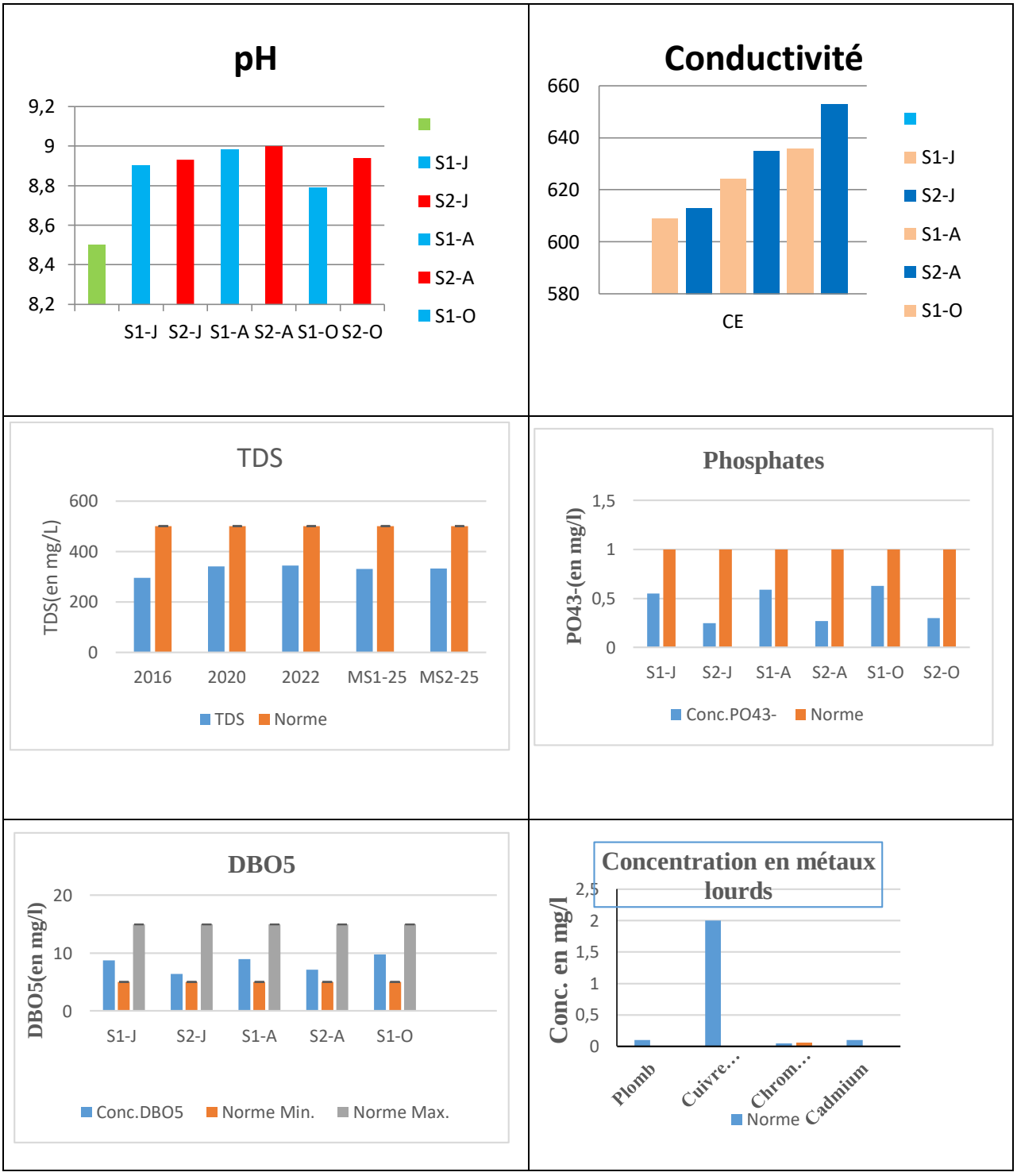


Figure 6 : Variation des paramètres physicochimiques pendant la période d'étude

3.2. DISCUSSION DES RESULTATS SUR LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE D'EAUX

a. Dynamique des paramètres physiques et état trophique

L'analyse des paramètres physiques de notre étude révèle une mutation profonde des eaux du lac Tanganyika par rapport aux observations historiques du siècle dernier. La température des eaux de surface, stabilisée entre 27,6 et 29°C, s'inscrit dans une tendance globale de réchauffement climatique déjà documentée par **Verburg & Hecky, (2009)** ; qui soulignaient que l'augmentation de la température de surface renforce la stabilité thermique du lac et limite le brassage des eaux. Ce réchauffement favorise une alcalinité élevée, comme en témoignent nos mesures de pH oscillant entre 8,79 et 9. Ce pH est similaire de celui de **(Niyongabo et al., 2024)**, égal à 8,5. Ces valeurs sont nettement supérieures aux moyennes historiques rapportées par **Capart (1952)**, qui situait le pH autour de 8,4. Cette dérive vers une basicité accrue pourrait être la conséquence d'une consommation intense du dioxyde de carbone dissous par une activité photosynthétique accrue, signe d'un changement de l'état trophique.

La modification la plus spectaculaire concerne la transparence des eaux. Historiquement, le lac Tanganyika était réputé pour sa clarté exceptionnelle, avec des profondeurs de disque de Secchi atteignant 20 m; la moyenne au cours de l'année se situait aux environs de 15 m **(Dubois, 1958)**. Nos résultats, indiquant une transparence limitée entre 1,20 en amont et 4,45 m en aval ou à 3,5km du bord, à des températures de 28,5-29°C, marquent une rupture radicale mais sont proches à ceux de **Niyongabo et al., (2024)**, en moyenne générale de 1,63 à 0,31m, et celle de **Niyongabo et al., (2023),** de 1,91m pour des températures comprises entre 27 et 28 °C. Cette chute de la visibilité, ces dernières années, est directement corrélée à l'augmentation de la charge organique.

Bien que les matières en suspension restent relativement faibles, en moyenne de 1,2mg/l sur S1 et 0,15mg/l sur S2 dans nos échantillons par rapport à la norme de 5mg/l ; la présence des PO_4^{3-} surtout sur S1 variant de 0,55- 0,63mg/l par rapport à la norme de 1mg/l ; celle des NO_3^- de 0,03 à 0,09 mg/l par rapport à une norme de 45mg/l et de la DBO_5 variant de 9 à 7mg/l du S1 au S2, aussi élevée par rapport à la norme de 5mg/l, ne signifie pas que les eaux de surface de ladite zone sont dépourvues des matières nutritives mais que cette matière organique mesurée par la DBO5 n'a pas encore subi de minéralisation complète en nitrates, confirmant le caractère récent ou continu de la pollution organique à la source.

Cela étant, la valeur de notre DBO_5 reste moins élevée par rapport à celle de **Ntakiyiruta, (2017)** égale à 13,75mg d'O2/l mesurée en saison sèche et est proche de celle de **Niyongabo et al., (2023),** égale à 9,513 mg d'O2/l. Toutefois, ces valeurs suggèrent que cette opacité du lac est liée à une production biologique accrue ou à des apports de substances dissoutes et leur évolution confirme les craintes de concernant l'impact de l'érosion des sols et des apports anthropiques sur les zones littorales, transformant des milieux initialement oligotrophes en zones tendant vers l'eutrophie.

En calculant le degré de dégradation biochimique α (α = DBO5 / DCO), la valeur trouvée est comprise entre 0,50 et 0,77, respectivement proche de 0,66 en amont ou au S1 et de 0,7 en aval ou au S2 ; ce qui indique que la quantité des composés biodégradables est élevée **(Ntakiyiruta, 2017).** A partir des résultats de cette étude, on peut s'imaginer l'impact consécutif à cet apport excessif de nutriments au lac Tanganyika en proie à une dégradation progressive.

La conductivité électrique, mesurée entre 609 et 653 µS/cm, montre également un enrichissement ionique sans précédent. Si l'on compare ces chiffres aux données de référence de **Degens, E.T, (1971),** qui rapportaient des valeurs proches de 330 µS/cm, on constate un quasi-doublement de la minéralisation dans presque 50 ans. La C.E reste élevée aussi par rapport aux résultats (de 479,7 µS/cm) selon **Niyongabo et al., (2023)**. Ce phénomène traduit non seulement une concentration des sels due à l'évaporation, mais surtout un apport constant de minéraux provenant du bassin versant dégradé. Or, le lac Tanganyika, en tant que système quasi-fermé, les moindres éléments nocifs non dégradés ou polluants qui y entrent s'y accumulent selon **Ntakiyiruta, (2017) ;** avec un temps de résidence des eaux dépassant les 400 ans, agit comme un réceptacle où s'accumulent les polluants, rendant chaque augmentation de la conductivité irréversible à l'échelle humaine.

b. Déséquilibre minéral et signature ionique

La composition ionique actuelle du lac se distingue par des contrastes majeurs. L'élément le plus frappant est la concentration en potassium qui s'élève à plus de 86 mg/l, alors que les normes standards (2-3mg/l) **(WHO, 2022).** Cette concentration anormale pourrait résulter d'une altération géochimique spécifique dans le bassin versant ou de l'usage intensif d'engrais potassiques dans les zones agricoles périphériques. Ce taux élevé de potassium, associé à des teneurs en HCO_3^- dépassant 280 mg/l par rapport à la norme de **WHO, (2022)** égale à 120mg/l; confirme que le lac possède un pouvoir tampon exceptionnel, mais que celui-ci est mis à rude épreuve par des apports exogènes massifs. Elle reflète ainsi une minéralisation carbonatée qui influence directement le pH observé.

En revanche, les concentrations en calcium (34- 40mg/l sur S1 et 20-21mg/l sur S2 par rapport à la norme de 75mg/l) et en magnésium (6mg/l sur S1 et 6,25mg/l sur S2 par rapport à la norme de 30mg/l) restent faibles, ce qui est une caractéristique chimique intrinsèque du lac Tanganyika, souvent décrite comme une eau "douce" malgré son alcalinité.

Les chlorures et les sulfates restent également très bas, se conformant aux standards de potabilité et aux observations de **Coulter, (1991)**. Cette faible teneur en sulfates (1-1,2mg/l sur S1 et 1,17-1,48mg/l par rapport à la norme de 150mg/l) et chlorures (21mg/l sur S1 et 41mg/l par rapport à la norme de 250mg/l) mais restant élevés par rapport aux résultats (0,35mg/l) de **Niyongabo et al., (2023),** indique que, malgré la dégradation globale, le lac n'est pas encore massivement impacté par des rejets industriels lourds ou des intrusions salines majeures **(Verburga & Hecky, 2009).**

La salinité mesurée, comprise entre 0,30 et 0,49 mg/l, reste cohérente avec cette signature minérale, bien qu'elle soit en légère progression par rapport à la norme de 35mg/l. Cette faible salinité, influencée par les apports d'écoulements tels que ceux de la rivière RUSIZI a été confirmée par **(Branchu & Bergonzini, 2004 et Verburga & Hecky, 2009)**.

Le sodium présente des valeurs très basses, autour de 2 mg/l, ce qui est inhabituel pour un grand lac de rift africain. Normalement, les processus d'évaporation intense dans ces systèmes favorisent la concentration du sodium. Cette faiblesse pourrait indiquer une dynamique de renouvellement des eaux de surface plus complexe ou une précipitation de certains sels dans des conditions de pH très élevé. Quoi qu'il en soit, l'équilibre ionique actuel montre une prédominance du potassium et des bicarbonates, définissant une signature chimique qui s'écarte des modèles historiques de référence pour ce plan d'eau.

c. Pollution organique et risques d'eutrophisation

L'aspect le plus critique de cette étude réside dans la charge organique mesurée. La Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours dépasse systématiquement la norme de 5 mg/l sur tous les sites, atteignant parfois près de 10 mg/l mais est similaire avec celle de **Niyongabo et al., (2023),** de 9,513mg d'O2/l. Ces valeurs indiquent une présence massive de matière organique biodégradable, dépassant les capacités d'auto-épuration naturelle du lac.

Historiquement, le Tanganyika était caractérisé par une très faible biomasse organique en surface ; aujourd'hui, ces résultats suggèrent un enrichissement lié aux rejets domestiques non traités et aux eaux de ruissellement urbaines.

Les nutriments, et particulièrement les phosphates, jouent un rôle moteur dans cette dégradation. Avec des teneurs atteignant 0,63 mg/l, le phosphore se rapproche du seuil critique d'eutrophisation. **Hecky, R. E., & Bugenyi, F. W., (1992)**, avaient déjà démontré que la productivité primaire du lac Tanganyika est principalement limitée par l'azote et le phosphore. L'apport excédentaire de phosphates favorise la prolifération algale, ce qui explique indirectement l'augmentation du pH et la chute de la transparence. Bien 8que les valeurs en nitrates obtenues au niveau des différentes stations de prélèvement ne représentent pas un danger puisqu'elles sont en dessous de 45 mg/L comme le confirme **Dovonou et al., (2024)**, cela ne signifie pas une absence de pollution azotée, mais plutôt une consommation immédiate de l'azote par le phytoplancton dès son introduction dans le milieu, ou un processus de dénitrification rapide dans les sédiments anoxiques.

Enfin, l'oxygène dissous, bien qu'encore au-dessus du seuil de 5 mg/l, montre des signes de saturation qui varient selon les sites. Une oxygénation correcte en surface est maintenue par le brassage éolien, mais la forte DBO_5 laisse présager une réduction rapide de l'oxygène dès que l'on s'enfonce dans la colonne d'eau. Cette eutrophisation des eaux du lac Tanganyika est un impact ou menace déjà réel sur l'écosystème, qui s'observe déjà par la forte poussée d'algues et de plantes à divers endroits et menaçant des espèces endémiques, notamment les cichlidés et les poissons pélagiques comme les Stolothrissa tantanyicae, dont la survie dépend d'une eau bien oxygénée et peu chargée en matières organiques **(Ntakiyiruta, 2017)**.

L'ensemble de ces données physico-chimiques témoigne d'une vulnérabilité accrue du lac et de la nécessité d'une surveillance continue pour freiner une dégradation qui semble s'accélérer depuis les deux dernières décennies.

d. Indice de qualité de l'eau du lac Tanganyika

Le tableau ci-dessous montre les valeurs d'indices de qualité de l'eau calculés à partir des données du tableau 2.

Tableau 7 : Les valeurs d'indices de la qualité des eaux du lac.

Période	Station	Valeur WQI	Classe de Qualité	État de l'Eau
Juin	S1	58,4	Classe III	Qualité Moyenne
	S2	42,6	Classe II	Bonne Qualité
Août	S1	60,2	Classe III	Qualité Moyenne
	S2	45,1	Classe II	Bonne Qualité
Octobre	S1	64,8	Classe III	Qualité Moyenne
	S2	48,9	Classe II	Bonne Qualité

L'analyse comparative de l'indice de qualité de l'eau (IQE) du lac Tanganyika révèle une dynamique environnementale complexe où la stabilité historique du bassin se heurte à des pressions anthropiques modernes localisées. Selon les travaux de **Capart (1952)** et de **Degens, E.T, (1971)**, le lac Tanganyika a longtemps été caractérisé par une pureté exceptionnelle et une composition chimique d'une grande homogénéité due à son volume colossal. Les données actuelles de notre travail confirment partiellement cet état pour la station S2 qui reste en Classe II, soit une bonne qualité constante entre juin et octobre 2025. Cette observation corrobore les conclusions de **Coulter (1991)** soulignant l'énorme capacité de dilution du lac qui préserve globalement ses caractéristiques naturelles malgré les cycles saisonniers.

Cependant, la station S1 affiche une qualité moyenne de Classe III, marquant une rupture nette avec les standards de référence historiques. Cette dégradation est particulièrement visible dans les études de **Cohen et al., (1993)** et de **Nkotagu (1996)** qui ont été les premiers à documenter l'impact de l'urbanisation rapide de Bujumbura sur le littoral nord. Le passage à une qualité moyenne à la station S1 reflète l'augmentation des rejets domestiques et industriels qui n'étaient pas significatifs lors des premières expéditions scientifiques du XXe siècle. L'évolution de l'indice WQI vers des valeurs plus critiques en octobre 2025, passant de 58,4 à 64,8, s'aligne sur les observations de **Plisnier, (2002)** concernant l'influence des premiers ruissellements de la saison des pluies qui drainent les polluants accumulés sur les sols urbains vers les eaux de surface. Ceci confirme notre première hypothèse que la montée des eaux du lac a impacté négativement la qualité des eaux du lac Tanganyika.

Ainsi, si le cœur du lac maintient l'inertie chimique décrite par les auteurs classiques, la zone littorale représentée par la station S1 témoigne d'une vulnérabilité croissante. Ceci corrobore avec les études récentes confirment une dégradation alarmante du littoral, particulièrement aux abords de Bujumbura, due aux rejets industriels (exemple : SAVONOR, AFRITAN) et aux eaux usées non traitées de la station d'épuration (STEP) **(Ntakiyiruta, 2020)**. La comparaison entre nos résultats et les données antérieures montre que le système n'est plus en équilibre parfait près des centres d'activité humaine. La stabilité ionique séculaire du lac, telle que définie par **Hecky, R. E., & Bugenyi, F. W., (1992)**, est désormais menacée localement par des apports exogènes qui altèrent la transparence et la santé écologique des eaux de surface.

En résumé, si la masse d'eau profonde du lac Tanganyika conserve sa signature ionique historique, nos résultats de l'indice de la qualité illustrent la vulnérabilité croissante de la zone littorale.

La transition de la Classe II à la Classe III à la station S1 est le reflet direct de l'impact anthropique moderne qui n'existait pas dans les inventaires de qualité des décennies précédentes avant la montée du niveau du lac et les inondations qui s'en sont suivies.

Pour la REGIDESO, cette évolution de l'IQE signifie que l'eau du lac n'est plus une ressource "inerte" et stable, mais un milieu réactif dont la dégradation saisonnière est désormais amplifiée par le changement climatique et l'urbanisation non maîtrisée des berges.

e. Discussion des résultats des métaux lourds analysés sur la crépine

Le tableau suivant indique les valeurs mesurées des métaux lourds sur la crépine nord.

Tableau 8 : Les résultats des métaux lourds analysés en Juin 2025.

No	Paramètre analysé	Valeur trouvée	Norme	Méthode d' analyse
1	Plomb (mg/l)	0	0,1	Test kit 486901(exact lead Quick)
2	Cuivre Total (mg/l)	0	2	Hach method 8026
3	Chrome VI (mg/l)	0,056	0,05	Hach method 8023
4	Cadmium (mg/l)	0	0,1	Test kit 486904

L'analyse spécifique des métaux lourds réalisée sur le site S3 apporte une dimension toxicologique critique qui vient compléter l'évaluation physico-chimique globale de la ressource. Le résultat le plus alarmant de cette série de tests concerne le chrome hexavalent dont la concentration d**e 0,056 mg/l** dépasse la norme de potabilité fixée à 0,05.

Bien que cet écart puisse paraître numériquement minime selon **Asfers et al., (2016b)**, il représente une menace sanitaire non négligeable car le chrome VI est une substance classée comme cancérogène avéré par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) mais reste faible par rapport au résultat de **Ferdaous et al., (2015)**, oscillant autour de 0,02mg/l.

Contrairement au chrome trivalent qui peut être un oligo-élément, la forme hexavalente détectée par la méthode Hach 8023 est hautement mobile dans l'eau et peut provoquer des pathologies graves, notamment des dommages hépatiques et des réactions allergiques cutanées sévères en cas de contact prolongé. La présence de ce métal lourd suggère l'existence d'une source de pollution industrielle spécifique en amont du site, telle qu'une tannerie, une unité de traitement de surfaces métalliques ou des rejets de pigments, car le chrome hexavalent se retrouve très rarement à de telles concentrations de manière naturelle dans les eaux de surface **(Asfers et al., 2016a)**.

En revanche, les résultats concernant le plomb, le cuivre total et le cadmium sont particulièrement rassurants puisque les valeurs trouvées sont nulles ou inférieures aux seuils de détection des kits de test utilisés.

L'absence totale de plomb à la station S1 permet d'écarter les risques immédiats liés au saturnisme et aux troubles du développement neurologique, ce qui constitue un point positif majeur pour la sécurité des populations riveraines. De même, la conformité du cuivre total par rapport à la norme de 2 milligrammes par litre confirme que l'eau ne présente aucun risque de toxicité gastrique ou de goût métallique désagréable.

L'absence de cadmium est également un indicateur de bonne santé environnementale concernant les sédiments, car ce métal est connu pour sa haute toxicité rénale et sa capacité de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire **(Angelika, 2023 et Asfers et al., 2016a)**.

Il convient toutefois de souligner que si les méthodes de terrain comme les tests Hach ou les kits Quick Lead apportent une réponse rapide et précieuse, le dépassement constaté pour le chrome hexavalent impose une vérification rigoureuse. Une contre-analyse effectuée en laboratoire par spectrométrie d'absorption atomique serait indispensable pour valider précisément l'ampleur de cette pollution métallique.

En intégrant ces données au profil général du site S1, on comprend que la problématique de cette station n'est pas seulement liée à une charge organique élevée mesurée par la DBO_5, mais qu'elle est désormais aggravée par une toxicité chimique directe.

Cette présence de chrome hexavalent hors-norme disqualifie définitivement l'eau du site S1 pour tout usage de boisson ou de préparation alimentaire sans un traitement spécifique de déchromatation, renforçant ainsi les restrictions d'usage précédemment établies pour cette zone très dégradée.

f. Interprétation des corrélations entre paramètres

Le tableau suivant est celui de la matrice de corrélation entre les paramètres

Tableau 9 : Matrice de corrélation entre les paramètres

Paramètres	**CE**	**Turbidité**	**TDS**	**O.D**	**HCO_3^-**	**Ca^{2+}**	**DBO_5**	**PO_4^{3-}**
C.E	1	0,91	0,98	0,38	0,76	0,15	0,42	-0,12
Turbidité	0,91	1	0,89	0,55	0,48	-0,21	0,11	-0,18
TDS	0,98	0,89	1	0,32	0,81	0,22	0,48	-0,08
O.D	0,38	0,55	0,32	1	-0,18	-0,88	-0,62	-0,84
HCO_3^-	0,76	0,48	0,81	-0,18	1	0,74	0,83	0,45
Ca^{2+}	0,15	-0,21	0,22	-0,88	0,74	1	0,91	0,85
DBO_5	0,42	0,11	0,48	-0,62	0,83	0,91	1	0,88
PO_4^{3-}	-0,12	-0,18	-0,08	-0,84	0,45	0,85	0,88	1

❖ **Minéralisation et Sédiments (CE - TDS - Turbidité :** r>0.9**) :** Il existe une corrélation extrêmement forte entre la conductivité (CE), les solides dissous (TDS) et la turbidité. Cela confirme que la montée des eaux en octobre ne transporte pas seulement des particules visibles (turbidité), mais augmente aussi la charge en minéraux dissous suite au lessivage des berges.

❖ **Pollution Organique et Nutriments (DBO5 - Ca^{2+} - PO_4^{3-} : r>0.85) :** La forte corrélation entre la DBO5 et les phosphates indique que la pollution organique et l'apport en nutriments proviennent de la même source, probablement les eaux usées domestiques et le ruissellement urbain. La corrélation inattendue avec le Calcium suggère que ces polluants sont liés aux particules minérales érodées.

❖ **Oxygène Dissous (O.D) et Pollution :** On observe une **corrélation négative forte** entre l'oxygène dissous et les phosphates/DBO5 (r≈ -0.8). Plus la pollution organique et les nutriments augmentent (favorisant l'eutrophisation), plus l'oxygène disponible dans l'eau diminue, ce qui est un indicateur classique de dégradation de la santé de l'écosystème aquatique.

g. Analyse de la qualité de l'eau

→ Diagramme de Piper

L'analyse hydrochimique des eaux de surface du lac Tanganyika, représentée par ce diagramme de Piper, permet de caractériser la signature ionique et l'évolution de la qualité de l'eau sur deux sites distincts, notés S1 et S2, durant trois périodes spécifiques identifiées par les lettres J (juin), A (Aout) et O(Octobre) 2025.

L'analyse des triangles de base montre que les résultats des analyses se regroupent dans des zones spécifiques. Le triangle des cations situé à gauche, montre que les points sont concentrés vers le pôle magnésien et calcique, avec une présence significative d'alcalins ($Na^+ + K^+$).

Historiquement, les eaux du Tanganyika sont reconnues pour leur richesse en magnésium, dépassant souvent les teneurs en calcium en raison de l'altération des roches silicatées du bassin.

Pour le triangle des anions placé à droite, les échantillons sont massés vers le pôle des bicarbonates (CO_3^{2-}+HCO_3^-), avec de très faibles teneurs en chlorures et sulfates. Cela confirme le caractère fortement bicarbonaté du lac, typique des grands lacs du rift africain **(Hecky, R. E., & Bugenyi, F. W., 1992).**

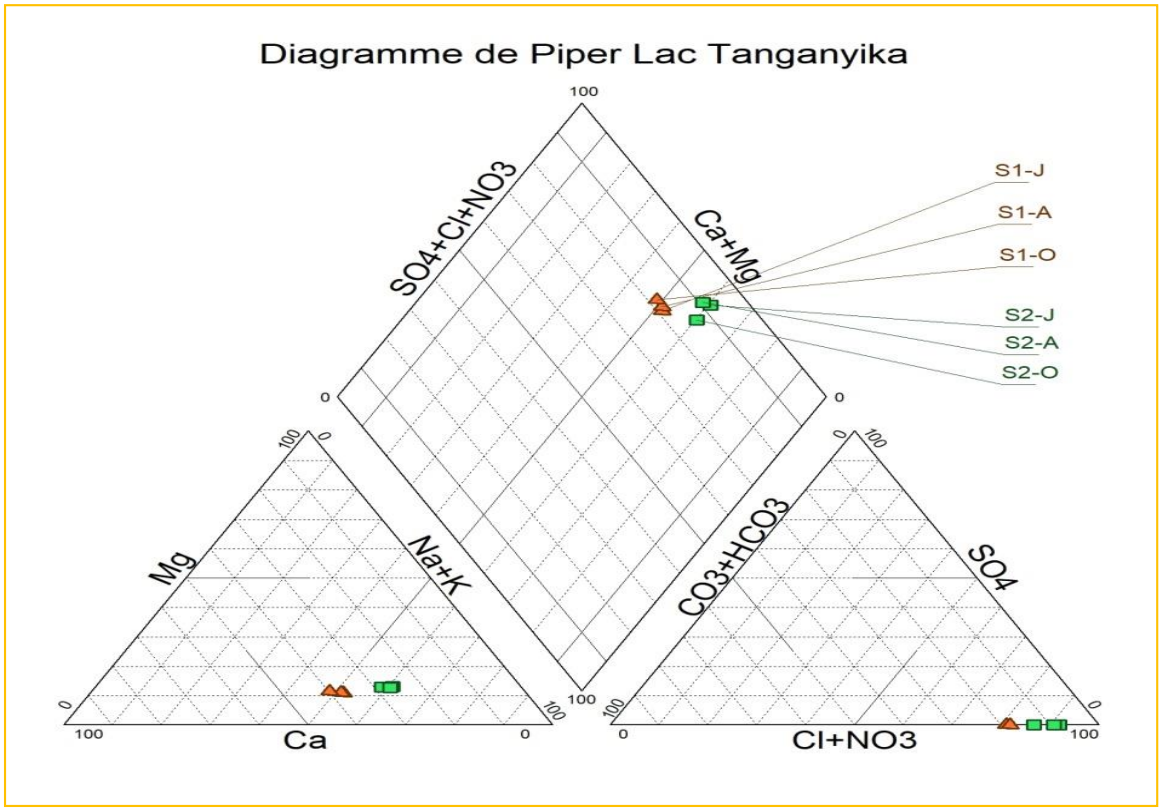


Figure 7 : Le diagramme de Piper des eaux de surface du lac Tanganyika

Dans le losange central, la projection définit un faciès bicarbonaté calcique et magnésien ou calco-magnésien. On note une légère dérive des points S1 représentés par des triangles orange par rapport aux points S2 illustrés par des carrés verts, suggérant une minéralisation légèrement plus prononcée ou une influence différente des affluents selon la localisation.

Au niveau de la comparaison avec les données antérieures, le lac Tanganyika est historiquement décrit comme un système extrêmement stable grâce à son volume colossal, le deuxième mondial par la profondeur, qui agit comme un tampon chimique **(Hecky, R. E., & Bugenyi, F. W. 1992)** Les données du diagramme corroborent cette stabilité ionique car le type d'eau ne change pas radicalement entre juin et octobre 2025, malgré le passage de la saison sèche à la saison des pluies. Cependant, deux évolutions par rapport aux études classiques comme celles **de Degens, E.T, et al (1971)** méritent d'être soulignées. D'abord, concernant les variations de surface, bien que le faciès global reste bicarbonaté, les points S1-O et S2-O d'octobre 2025, montrent un léger décalage. Cela pourrait refléter l'impact des précipitations et des apports fluviaux comme la Rusizi et les autres rivières se jetant dans le lac qui modifient localement la concentration des ions en surface juste avant la grande saison des pluies. Ensuite, pour l'impact anthropique, les données antérieures mettaient l'accent sur une chimie purement géologique alors qu'aujourd'hui, la proximité de sites comme S1 ou S2 avec des zones urbaines comme Bujumbura peut introduire des variations locales en nitrates ou chlorures, bien que le diagramme montre que ces éléments restent encore minoritaires par rapport à la charge minérale naturelle du lac.

En conclusion, ce diagramme de piper confirme que le lac Tanganyika conserve son identité hydrochimique de type bicarbonaté alcalino-terreux. La comparaison avec les données historiques montre que malgré le réchauffement climatique et la montée des eaux documentée récemment, la structure ionique majeure reste inchangée, témoignant de l'inertie chimique exceptionnelle de cet écosystème.

→ **Diagramme de Stiff**

L'analyse hydrochimique des eaux de surface du lac Tanganyika à travers ce diagramme de Stiff, souvent confondu avec celui de Piper par sa finalité mais distinct par sa forme en « miroir », permet une visualisation directe des concentrations ioniques exprimées en milliéquivalents par litre. Ce graphique présente de manière comparative deux stations de prélèvement, S1 et S2, suivies sur trois périodes distinctes, probablement saisonnières, représentées par les lettres J, A et O ; signifiant respectivement juin, aout et octobre.

La structure de chaque polygone offre une signature visuelle unique où les cations, comme le sodium, le potassium, le calcium et le magnésium, sont projetés à gauche de l'axe central, tandis que les anions, tels que les chlorures, les bicarbonates, les carbonates, les sulfates et les nitrates, se situent à droite.

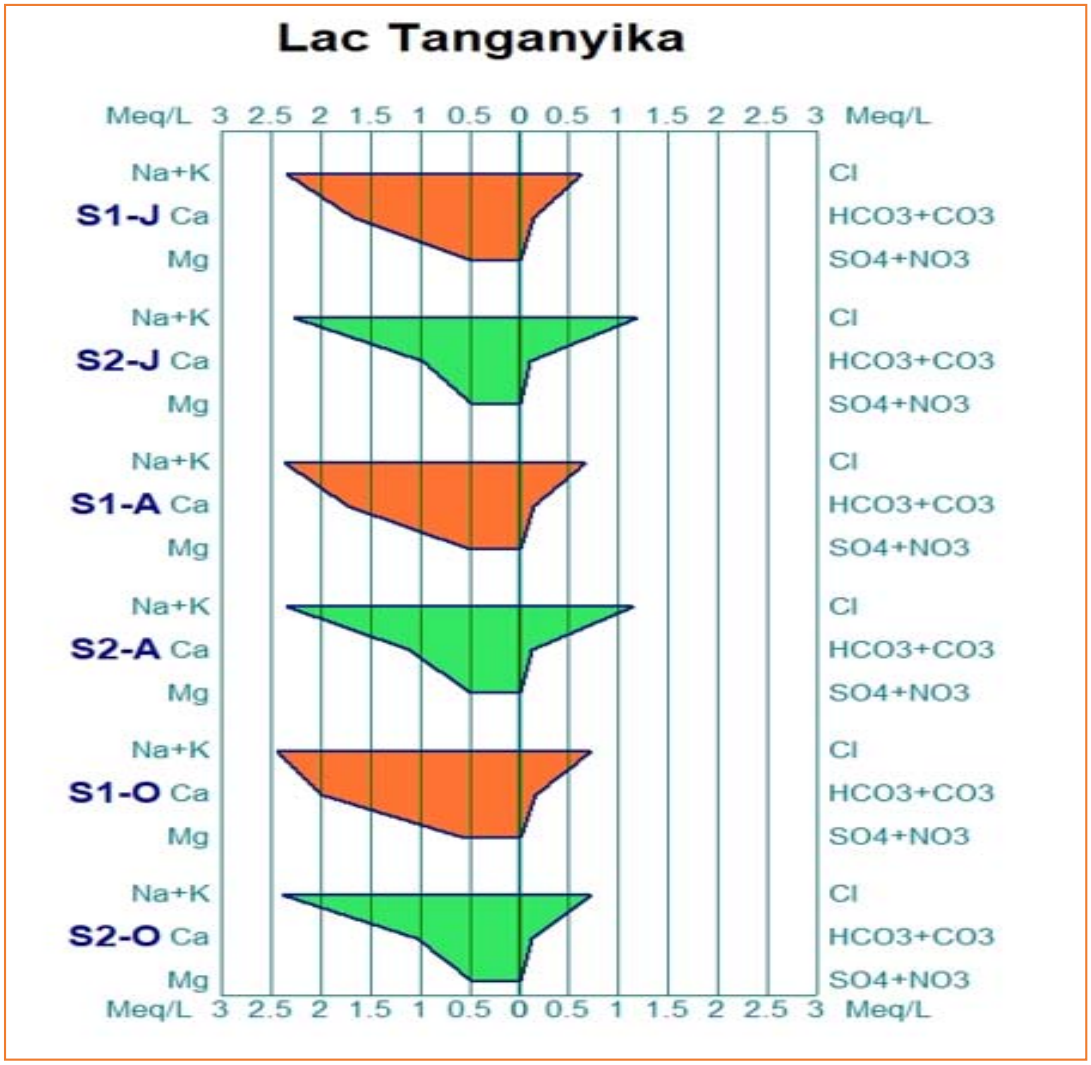


Figure 8 : Diagramme de Stiff, de la qualité de l'eau du lac Tanganyika en 2025

L'examen global des polygones révèle une morphologie particulièrement stable et caractéristique pour l'ensemble des échantillons prélevés. À gauche de l'axe, on observe une prédominance marquée des ions sodium et potassium, suivis de près par le calcium et le magnésium. Cette configuration indique que les eaux du lac Tanganyika possèdent une minéralisation équilibrée mais dominée par le pôle alcalin. Le site S1 présente des concentrations légèrement plus élevées en calcium par rapport au site S2, ce qui pourrait traduire des influences géologiques locales ou des apports sédimentaires différenciés au niveau des zones littorales.

Sur la partie droite des diagrammes, la forme s'étire de manière spectaculaire vers le pôle des bicarbonates et des carbonates. Cette extension horizontale souligne que le système anionique est presque exclusivement contrôlé par le complexe alcalino-terreux carbonaté. En revanche, les concentrations en chlorures, sulfates et nitrates restent extrêmement faibles, se rapprochant de l'axe vertical central. Cette asymétrie entre la richesse en bicarbonates et la rareté des autres anions confirme que le lac Tanganyika est un écosystème d'eau douce très bien tamponné, dont la chimie est régie par l'altération des roches sédimentaires et volcaniques de son vaste bassin versant.

L'aspect temporel, capturé par les séquences Juin, Aout et Octobre, montre une constance remarquable de la forme des polygones. Bien que de légères fluctuations de volume total soient perceptibles, ce qui indique des variations mineures de la concentration globale des ions, la signature hydrochimique reste identique. Cette stabilité témoigne de l'immense capacité de dilution du lac, qui parvient à maintenir une composition ionique constante malgré les variations saisonnières de précipitations ou d'évaporation. Le faciès hydrochimique global défini par ce diagramme de Stiff est donc de type bicarbonaté sodi-potassique et calcique, une signature essentielle pour l'équilibre écologique de ce réservoir de biodiversité.

CONCLUSION ET SUGGESTIONS

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, l'analyse hydrochimique et l'application de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) démontrent que la montée des eaux du lac Tanganyika ne constitue pas seulement un défi infrastructurel, mais une menace réelle pour la potabilité de l'eau. Les résultats révèlent une dégradation spatio-temporelle de la qualité, le site S1(en amont) étant plus vulnérable que le site S2(en aval) en raison de sa proximité avec les foyers de pollution urbaine.

L'augmentation de l'IQE, passant d'un état "Bon"($26<IQE<50$) en aval (au S2) à un état "Moyen" ($51<IQE<75$) en amont (au S1), est intrinsèquement liée au lessivage des sols inondés et au débordement des systèmes d'assainissement précaires. Les corrélations fortes entre la turbidité, la conductivité et la charge organique (DBO_5) confirment que les précipitations d'octobre, couplées à l'élévation du niveau d'eau, mobilisent des polluants auparavant stockés sur les berges.

En effet, l'excès combiné de K^+, des HCO_3^- et matières organiques définit une eau dont l'équilibre est rompu, nécessitant des traitements correctifs profonds avant tout usage domestique.

Bien que les paramètres restent globalement dans les limites de traitabilité, la récurrence de ces pics de pollution impose une adaptation des processus de la REGIDESO pour garantir une eau saine à la population de Bujumbura et une implication d'autres chercheurs, pour un suivi régulier de la qualité de ces eaux, à la suite des fluctuations de niveau du lac Tanganyika.

SUGGESTIONS

1. Adaptation du processus de traitement par la REGIDESO

- **Optimisation de la coagulation-floculation :** il serait techniquement plus mieux d'ajuster les dosages de sulfate d'alumine ou de polymères en temps réel dès que la turbidité ou la conductivité dépasse les seuils d'alerte identifiés en octobre suite aux apports d'eaux de pluies.
- **Correction du pH :** il faut disposer des activités de renforcement des dispositifs de neutralisation pour ramener le pH de l'eau brute (souvent proche de 9) vers des valeurs neutres, pour optimiser ainsi l'efficacité de la désinfection au chlore.

2. Surveillance et Infrastructures

- **Système d'alerte précoce :** Pour assurer un suivi régulier de la qualité des eaux de la zone de captage, il vaut davantage une installation des sondes multi paramètres (pH, CE, Turbidité) en amont des crépines de captage. Une hausse de la conductivité doit être interprétée comme un signal d'alerte à une dégradation imminente de l'IQE.

- **Protection des captages :** Définir un périmètre de protection sanitaire strict autour de la zone de captage serait un atout, interdisant ainsi toute activité de construction ou de rejet de déchets, particulièrement dans les zones vulnérables aux inondations.

3. Gestion environnementale et plaidoyer

- **Assainissement des zones littorales :** nous suggérons à la REGIDESO, qu'il y ait une sincère collaboration avec les services municipaux pour vider et sécuriser les fosses septiques situées dans les zones inondables avant les pics de montée des eaux.

- **Planification urbaine :** Intégrer les données de l'IQE dans les politiques d'aménagement du littoral pour limiter l'urbanisation dans les zones où le lessivage des sols impacte directement la ressource en eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Angelika, E. (2023). *Cadmium Toxicity and Health Effects—A Brief Summary | MDPI*. https://www.mdpi.com/1420-3049/28/18/6620
2. Asfers, Y., Taouil, H., Ahmed, S. I., & Chakit, M. (2016a). *Evaluating Metallic Pollution Caused by Iron, Copper, Lead and Cadmium of Oum Er-Rabia River Water*. https://doi.org/2016%2520January%2520Edition%2520%257Cwww.jbino.com%2520%257C%2520Innovative%2520Association
3. Asfers, Y., Taouil, H., Ahmed, S. I., & Chakit, M. (2016b). Metallic Pollution of Aquatic Ecosystems: Water of Oum Er-Rbia River. *American Journal of Engineering Research*.
4. Aw, S., N'Goran, E. B. Z., Siaka, S., & Parinet, B. (2011). *Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : Cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)*. https://doi.org/www.biosciences.elewa.org
5. Barankanira, E., Nkurunziza, I., Bisore, S., & Niyongabo, D. (2024). Factors influencing households' satisfaction with drinking water availability in Bujumbura Municipality, Burundi. *Water Practice & Technology*, *19*(10), 3895-3908. https://doi.org/10.2166/wpt.2024.205
6. Bergonzini, L., Richard, Y., & Camberlin, P. (2002). Variation interannuelle du bilan hydrique du lac Tanganyika (1932–1995): Changement dans la relation précipitation-excédent lacustre / Interannual variation of the water budget of Lake Tanganyika (1932–1995): changes in the precipitation-lake water excess relationship. *Hydrological Sciences Journal*, *47*(5), 781-796. https://doi.org/10.1080/02626660209492980
7. Biswasa, S., Dasb, D., Lamaa, A., Barmana, N., & Barmanb, D. C. (2025). *Water Quality Degradation and Its Impact on Health of the Riparian Slum Dwellers of River Karala in Jalpaiguri Municipality: Research Insights*.
8. Boyd, C. E. (2000). *Water Quality: An Introduction*. Springer Science & Business Media.
9. Branchu, P., & Bergonzini, L. (2004). Chloride concentrations in Lake Tanganyika: An indicator of the hydrological budget? *Hydrology and Earth System Sciences*, *8*(2), 256-265. https://doi.org/10.5194/hess-8-256-2004
10. Buhungu, S., Montchowui, E., Barankanira, E., Sibomana, C., Ntakimazi, G., & Bonou, C. A. (2018). Caractérisation spatio-temporelle de la qualité de l'eau de la rivière Kinyankonge, affluent du Lac Tanganyika, Burundi. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *12*(1), 576-595. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.44

11. Capart. (1952). *Tanganyika Lake: Strong in Hydrodynamics, Diverse in Ecology | Springer Nature Link*. https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-1-4020-4410-6_168
12. Cohen, A. S., Bills, R., Cocquyt, C. Z., & Caljon, A. g. (1993). The Impact of Sediment Pollution on Biodiversity in Lake Tanganyika. *Conservation Biology*, *7*(3), 667-677. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1993.07030667.x
13. Cohen, A. S., Soreghan, M. J., & Scholz, C. A. (1993). Estimating the age of formation of lakes: An example from Lake Tanganyika, East African Rift system. *Geology*, *21*(6), 511-514. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021%253C0511:ETAOFO%253E2.3.CO;2
14. Coulter. (1991). *Lake Tanganyika and its life | Reviews in Fish Biology and Fisheries | Springer Nature Link*. https://link.springer.com/article/10.1007/BF00042885
15. Damo, R., & Icka, P. (2013). Evaluation of Water Quality Index for Drinking Water. *Polish Journal of Environmental Studies, 22*, 1045-1051. https://doi.org/damo-ro@hotmail.com
16. Daniel. (2024). *Qualité de l'eau potable : Comprendre les classes et les paramètres se*. Ingeauacademy. https://www.ingeauacademy.com/vos-articles/qualit%C3%A9-de-l-eau-potable-comprendre-les-classes-et-les-param%C3%A8tres-selon-l-oms
17. DE Bont. (1972). La productivité du lac Tanganyika : SIL Proceedings, 1922-2010 : Vol 18, No 2 - Get Access. *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen, 18*. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03680770.1972.11899521
18. Degens, E.T. (1971). *Lake Tanganyika: Water chemistry, sediments, geological structure | The Science of Nature | Springer Nature Link*. https://link.springer.com/article/10.1007/BF00602986
19. Dovonou, F. E., Adjagodo, A., Gnonlonsa, L. E., Atchichoe, W. N., & Barthélémy, D. S. (2024). Evaluation de la qualité de l'eau du lac Azili et risques sanitaires associés à sa consommation dans le village lacustre d'Agonvè (commune de Zagnanado, Sud Bénin). *European Scientific Journal, ESJ, 20*(18), 233. https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n18p233
20. Dubois. (1958). *Evolution de la temperature de l'oxygene dissous et de la transparence dans la baie Nord du lac Tanganika | Hydrobiologia | Springer Nature Link*. https://link.springer.com/article/10.1007/BF00142188
21. El Mansour, A., Ait Boughrous, S., Mansouri, I., Abdaoui, A., Squalli, W., Nouayti, A., Abdellaoui, M., Beyouda, E. M., Piscart, C., & Ait Boughrous, A. (2025). Characterization of Water Quality and the Relationship Between WQI and Benthic Macroinvertebrate Communities as Ecological Indicators in the Ghris Watershed, Southeast Morocco. *Water*, *17*(14), 2055. https://doi.org/10.3390/w17142055

22. Ferdaous, L., Benabdelhadi, M., Nouzha, Lahrach, H., & Abrerrahim, L. (2015). Etude de la qualité physicochimique et de la contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Beht (Maroc). *EUROPEAN SCIENTIFIC JOURNAL, ESJ*, *11*, 1857-7881.
23. Hébert, S. (1997). *Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour les rivières du Québec*. (EN/970102).
24. Hecky, R. E., & Bugenyi, F. W. (1992). *Hecky, R.E. and Bugenyi, F.W.B. (1992) Hydrology and Chemistry of the Great Lakes and Water Quality Issues Problems and Solutions. Mitteilungen Internationale Vereinigung für Limnologie, 23, 45-54. - References—Scientific Research Publishing*. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2155074
25. Hyangya, B. L. (2021, octobre 6). *Physico-chemical characterization of littoral water of Lake Kivu (Southern basin, Central Africa) and use of water quality index to assess their anthropogenic disturbances—Hyangya—2021—World Water Policy—Wiley Online Library*. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wwp2.12059?casa_token=gIZVWdtu5NUAAAAA%3ARBtntjqj9zeVzH8_kt3tUwpCO9cd3gV_F-F72jHsZHDs8xXI8bHvWROXkWuH238vcQQECgWKjhcnLN7mlA
26. IGEBU, B. (2024). *Bulletin de suivi de la montée des eaux du lac Tanganyika 10-16 Mai 2024*. Service Hydrométéorologique du Burundi. https://www.igebu.bi/produits/bulletin-de-la-montee-des-eaux-du-lac/bulletin-de-suivi-de-la-montee-des-eaux-du-lac-tanganyika-10-16-mai-2024/
27. Jishan, W. (2022). *A critical review of point-of-use drinking water treatment in the United States | npj Clean Water*. https://www.nature.com/articles/s41545-021-00128-z
28. Kapepula, L., Shekani, A., Salumembe, S., Muyisa, S., Nsengimana, S., & Tika, R. (2015). *Contribution à l'étude de la valeur nutritive de limnothrissa miodon (clupeidae) du bassin nord du lac Tanganyika, de 2008 à 2009*.
29. Laurent, B., Ndayirukiye, S., & Valton, C. (2015). *Atlas des pays du nord-Tanganyika* [Carte]. IRD.
30. Lumami, K., Théophile, N., Musibono, D.-D., Patricia, L. A., Njoyim, E. B. T., Irene, T., & Bart, V. D. B. (2020). Qualitative and quantitative analysis of the pollutant load of effluents discharged Northwestern of Lake Tanganyika, in the Democratic Republic of Congo. *African Journal of Environmental Science and Technology*, *14*(11), 361-373. https://doi.org/10.5897/AJEST2020.2903
31. Manishatse, L. J. (2024, mai 1). Lake Tanganyika reaches record levels, submerging parts of Burundi. *African Arguments*. https://africanarguments.org/2024/05/lake-tanganyika-reaches-record-levels-submerging-parts-of-burundi-floods/

32. Millogo, C., Bakouan, C., & Sawadogo, S. (2020). *Caractérisation physico-chimique des eaux de surface et des altérites du bassin versant du lac Bam, Centre Nord du Burkina Faso*.
33. Mohamed, K. (2013). *Turbidité et matières en suspension dans L'eau : Application à l'évaluation des métaux contenus dans l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/305280631
34. Nahimana, D., Brion, N., Baeyens, W., & Ntakimazi, G. (2008). *General nutrient distribution in the water column of Northern Lake Tanganyika*. https://dx.doi.org/10.1080/14634980701878116
35. Ngenzebuhoro, P. C., Dassargues, A., Bahaj, T., & Hammani, O. (2024). Water Geochemistry and Inorganic Quality: Case of the Lower Rusizi Plain Aquifer, North-Western Burundi. *Water*, *16*(12). https://doi.org/10.3390/w16121712
36. Niyongabo. (2025, mai 20). *« Sans action urgente, nous courons à la catastrophe » —Ejo.bi*. https://ejo.bi/elias-niyongabo-chercheur-environnementaliste-sans-action-urgente-nous-courons-a-la-catastrophe/
37. Niyongabo, A., Guan, Y., Zhang, D., & Ziyuan, W. (2023). Water quality characteristics of Lake Tanganyika in Burundi and Lake Victoria in Uganda. *Water Practice and Technology*, *18*(8), 1756-1774. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.120
38. Niyongabo, A., Zhang, D., Guan, Y., Wang, Z., Imran, M., Nicayenzi, B., Guyasa, A. K., & Hatungimana, P. (2024). Predicting Urban Water Consumption and Health Using Artificial Intelligence Techniques in Tanganyika Lake, East Africa. *Water*, *16*(13), 1793. https://doi.org/10.3390/w16131793
39. Niyoyitungiye, L. (2020). *Diagnostic analysis of the major threats of Lake Tanganyika and proposals for improving its ecological status*. Assam University. https://hal.science/hal-02882704
40. Ntakiyiruta, P. (2017). *Contribution à l'estimation quantitative des nutriments apportés par la rivière Ntahangwa au lac Tanganyika*. http://www.afriquescience.info
41. Ntakiyiruta, P., Nsavyimana, G., Briton, B. G. H., Adouby, K., Nahimana, D., & Ntakimazi, G. (2020). Actions combinées de Eichhornia crassipes et Pistia stratiotes pour traitement tertiaire de l'effluent des bassins facultatifs de la station d'épuration de Buterere, Burundi. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *14*(7), 2463-2475. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i7.8

42. Phiri, H., Mushagalusa, D., Katongo, C., Sibomana, C., Ajode, M. Z., Muderhwa, N., Smith, S., Ntakimazi, G., De Keyzer, E. L. R., Nahimana, D., Mulungula, P. M., Haambiya, L. H., Isumbisho, P. M., Limbu, P., Kimirei, I. A., Marwa, N. B., Mlingi, R. J., & Mangaza, A. M. (2023). Lake Tanganyika: Status, challenges, and opportunities for research collaborations. *Journal of Great Lakes Research*, *49*(6), 102223. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2023.07.009
43. Plisnier. (2002). *Climate variability as recorded in Lake Tanganyika (CLIMLAKE).* https://www.researchgate.net/publication/284440724_Climate_variability_as_recorded_in_Lake_Tanganyika_CLIMLAKE
44. Richard, Y. (2004). *Etudes climatiques régionales Applications à la variabilité pluviométrique en Afrique australe et orientale et à la qualité de l'air en Bourgogne* (p. 56-59).
45. Rocha, F. C., Andrade, E. M., & Lopes, F. B. (2014). Water quality index calculated from biological, physical and chemical attributes. *Environmental Monitoring and Assessment*, *187*(1), 4163. https://doi.org/10.1007/s10661-014-4163-1
46. Sindayigaya, I., & Toyi, O. (2023). *Water public policy in Burundi: Case of the city of Bujumbura*. University of Burundi. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35148.18565
47. Talhaoui, El Hmaidi, A., Jaddi, H., Ousmana, H., & Manssouri, I. (2020). Calcul De L'indice De Qualité De L'eau (IQE) Pour L'évaluation De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Superficielles De L'Oued Moulouya (NE, Maroc). *European Scientific Journal ESJ*, *16*(2). https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n2p64
48. Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*. https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3
49. Verburga, P., & Hecky, R. E. (2009). The physics of the warming of Lake Tanganyika by climate change. *Limnology and Oceanography*, *54*(6part2), 2418-2430. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2418
50. WHO (Éd.). (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (Fourth edition incorporating the first and second addenda). Interligar, Brazil.
51. Wu, Z., Zhang, D., Cai, Y., Wang, X., Zhang, L., & Chen, Y. (2017). Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Scientific Reports*, *7*, 17999. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18285-y

ANNEXES

Tableau 1 : Les paramètres physico-chimiques et biologiques et leurs normes

Paramètre	Unité de mesure	S1J	S2-J	S1-A	S2-A	S1-O	S2-O	Standard SN
T°C	En °C	29	28,9	28,9	29	27,62	28,9	30
Ph	-	8,9	8,93	8,98	9	8,79	8,94	8,5
C.E	µS/cm	609	613	624	635	636	653	300
Turbidité	mg/l	0,03	0,09	0,05	0,21	0,12	0,44	5
TDS	mg/l	327	326	328	332	338	339	500
O.D	mg/l	6,23	6,83	6,13	6,96	6,46	7,15	5
HCO_3^-	mg/l	284	269	288	274	294	281	120
Ca^{2+}	mg/l	34	20	35,4	23	40,4	21,33	75
Mg^{2+}	mg/l	6	6	6,29	6,25	7	6,15	30
SO_4^{2-}	mg/l	1	1	1,17	1,24	1,46	1,48	150
NO_3^-	mg/l	0,03	0,04	0,06	0,07	0,18	0,09	45
DBO_5	mg/l	8,77	6,38	8,95	7,15	9,74	6,72	5
PO_4^{3-}	mg/l	0,55	0,25	0,59	0,27	0,63	0,3	1
Cl^-	mg/l	21,7	41,7	23,3	41	25,3	25,3	250

Tableau 2 : Les paramètres physico-chimiques, indicateurs de l'IQE

Paramètre	S1J	S2J	S1A	S2A	S1O	S2O
T°C	29	28,9	28,9	29	27,62	28,9
Ph	8,91	8,93	8,98	9	8,79	8,94
CE	609	613	624	635	636	653
Turbidité	0,03	0,09	0,05	0,21	0,12	0,44
TDS	327	326	328	332	338	339
O.D	6,23	6,83	6,13	6,96	6,46	7,15
HCO_3^-	284	269	288	274	294	281
Ca^{2+}	34	20	35,4	23	40,4	21,33
Mg^{2+}	6	6	6,29	6,25	7	6,15
SO_4^{2-}	1	1	1,17	1,24	1,46	1,48
NO_3^-	0,03	0,04	0,06	0,07	0,18	0,09
DBO_5	8,77	6,38	8,95	7,15	9,74	6,72
PO_4^{3-}	0,55	0,25	0,59	0,27	0,63	0,3
Cl^-	21,7	41,7	23,3	41	25,3	25,3

Tableau 3 : Calcul de l'IQE sur Site1 en Juin

Paramètre	**Standard SN**	**1/SN**	**SUM 1/SN**	**K= 1/SUM1/SN**	**Wn=K/Sn**	**Ideal value**	**Mean Conc value Vn**	**Vn/Sn**	**(Vn/Sn)*100 =Qn**	**WnQn**
T°C	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	29	0.966667	96.66667	1.959751
pH	8.5	0.117647	1.6442	0.608199	0.07155	7	8.91	1.048235	104.8235	7.500414
CE	300	0.003333	1.6442	0.608199	0.00203	0	609	2.03	203	0.411548
Turbidité	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	0.03	0.006	0.6	0.072984
TDS	500	0.002	1.6442	0.608199	0.00122	0	327	0.654	65.4	0.079552
O.D	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	14	6.23	1.246	124.6	15.15631
HCO_3^-	120	0.008333	1.6442	0.608199	0.00507	0	284	2.366667	236.6667	1.199503
Ca^{2+}	75	0.013333	1.6442	0.608199	0.00811	0	34	0.453333	45.33333	0.367622
Mg^{2+}	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	6	0.2	20	0.405466
SO_4^{2-}	150	0.006667	1.6442	0.608199	0.00405	0	1	0.006667	0.666667	0.002703
NO_3^-	45	0.022222	1.6442	0.608199	0.01352	0	0.03	0.000667	0.066667	0.000901
DBO_5	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	8.77	1.754	175.4	21.3356
PO_4^{3-}	1	1	1.6442	0.608199	0.60820	0	0.55	0.55	55	33.45092
Cl^-	250	0.004	1.6442	0.608199	0.00243	0	21.7	0.0868	8.68	0.021117
									WQI	58.4

Tableau 4 : Calcul de l'IQE sur Site2 en Juin

Paramètre	Standard SN	1/SN	SUM 1/SN	K= 1/SUM1/SN	Wn=K/Sn	Ideal value	Mean Conc value Vn	Vn/Sn	(Vn/Sn)*100 = Qn	WnQn
T°C	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	28.9	0.963333	96.33333	1.952993
pH	8.5	0.117647	1.6442	0.608199	0.07155	7	8.93	1.050588	105.0588	7.517249
CE	300	0.003333	1.6442	0.608199	0.00203	0	613	2.043333	204.3333	0.414251
Turbidité	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	0.09	0.018	1.8	0.218951
TDS	500	0.002	1.6442	0.608199	0.00122	0	326	0.652	65.2	0.079309
O.D	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	14	6.83	1.366	136.6	16.61598
HCO_3^-	120	0.008333	1.6442	0.608199	0.00507	0	269	2.241667	224.1667	1.136149
Ca^{2+}	75	0.013333	1.6442	0.608199	0.00811	0	20	0.266667	26.66667	0.216248
Mg^{2+}	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	6	0.2	20	0.405466
SO_4^{2-}	150	0.006667	1.6442	0.608199	0.00405	0	1	0.006667	0.666667	0.002703
NO_3^-	45	0.022222	1.6442	0.608199	0.01352	0	0.04	0.000889	0.088889	0.001201
DBO_5	5	0.2	1.6442	0.608199	0.1264	0	6.38	1.276	127.6	15.52123
PO_4^{3-}	1	1	1.6442	0.608199	0.60820	0	0.25	0.25	25	15.0496
Cl^-	250	0.004	1.6442	0.608199	0.00243	0	41.7	0.1668	16.68	0.040579
									WQI	42.6

Tableau 5 : Calcul de l'IQE sur Site 1 en Aout

Paramètre	**Standard SN**	**1/SN**	**SUM 1/SN**	**K= 1/SUM1/SN**	**Wn=K/Sn**	**Ideal value**	**Mean Conc value Vn**	**Vn/Sn**	**(Vn/Sn)*100 =Qn**	**WnQn**
T°C	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	28.9	0.963333	96.33333	1.952993
Ph	8.5	0.117647	1.6442	0.608199	0.07155	7	8.98	1.056471	105.6471	7.559339
CE	300	0.003333	1.6442	0.608199	0.00203	0	624	2.08	208	0.421684
Turbidité	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	0.05	0.01	1	0.12164
TDS	500	0.002	1.6442	0.608199	0.00122	0	328	0.656	65.6	0.079796
O.D	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	14	6.13	1.226	122.6	14.91303
HCO_3^-	120	0.008333	1.6442	0.608199	0.00507	0	288	2.4	240	1.216397
Ca^{2+}	75	0.013333	1.6442	0.608199	0.00811	0	35.4	0.472	47.2	0.38276
Mg^{2+}	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	6.29	0.209667	20.96667	0.425063
SO_4^{2-}	150	0.006667	1.6442	0.608199	0.00405	0	1.17	0.78	0.78	0.003163
NO_3^-	45	0.022222	1.6442	0.608199	0.01352	0	0.06	0013	0.133333	0.001802
DBO_5	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	8.95	1.7	179	21.77351
PO_4^{3-}	1	1	1.6442	0.608199	0.60820	0	0.59	0.9	59	35.88371
Cl^-	250	0.004	1.6442	0.608199	0.00243	0	23.3	00932	9.32	0.022674
									WQI	60.2

Tableau 6 : Calcul de l'IQE sur Site 2 en Aout

Paramètre	Standard SN	1/SN	SUM1/SN	K= 1/SUM1/SN	Wn=K/Sn	Ideal value	Mean Conc value Vn	Vn/Sn	(Vn/Sn)*100 =Qn	WnQn
T°C	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	29	0.966667	96.66667	1.959751
Ph	8.5	0.117647	1.6442	0.608199	0.07155	7	9	1.058824	105.8824	7.576175
CE	300	0.003333	1.6442	0.608199	0.00203	0	635	2.116667	211.6667	0.429118
Turbidité	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	0.21	0.042	4.2	0.510887
TDS	500	0.002	1.6442	0.608199	0.00122	0	332	0.664	66.4	0.080769
O.D	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	14	6.96	1.392	139.2	16.93225
HCO_3^-	120	0.008333	1.6442	0.608199	0.00507	0	274	2.283333	228.3333	1.157267
Ca^{2+}	75	0.013333	1.6442	0.608199	0.00811	0	23	0.306667	30.66667	0.248686
Mg^{2+}	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	6.25	0.208333	20.83333	0.42236
SO_4^{2-}	150	0.006667	1.6442	0.608199	0.00405	0	1.24	0.008267	0.826667	0.003352
NO_3^-	45	0.022222	1.6442	0.608199	0.01352	0	0.07	0.001556	0.155556	0.002102
DBO_5	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	7.15	1.43	143	17.39448
PO_4^{3-}	1	1	1.6442	0.608199	0.60820	0	0.27	0.27	27	16.42136
Cl^-	250	0.004	1.6442	0.608199	0.00243	0	41	0.164	16.4	0.039898
									WQI	45.1

Tableau 7 : Calcul de l'IQE sur Site1 en Octobre

Paramètre	**Standard SN**	**1/SN**	**SUM 1/SN**	**K= 1/SUM1/SN**	**Wn=K/Sn**	**Ideal value**	**Mean Conc value Vn**	**Vn/Sn**	**(Vn/Sn)*100 =Qn**	**WnQn**
T°C	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	27.62	0.920667	92.06667	1.866494
Ph	8.5	0.117647	1.6442	0.608199	0.07155	7	8.79	1.034118	103.4118	7.399398
CE	300	0.003333	1.6442	0.608199	0.00203	0	636	2.12	212	0.429794
Turbidité	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	0.12	0.024	2.4	0.291935
TDS	500	0.002	1.6442	0.608199	0.00122	0	338	0.676	67.6	0.082228
O.D	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	14	6.46	1.292	129.2	15.71585
HCO_3^-	120	0.008333	1.6442	0.608199	0.00507	0	294	2.45	245	1.241739
Ca^{2+}	75	0.013333	1.6442	0.608199	0.00811	0	40.4	0.538667	53.86667	0.436822
Mg^{2+}	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	7	0.233333	23.33333	0.473043
SO_4^{2-}	150	0.006667	1.6442	0.608199	0.00405	0	1.46	0.009733	0.973333	0.003947
NO_3^-	45	0.022222	1.6442	0.608199	0.01352	0	0.18	0.004	0.4	0.005406
DBO_5	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	9.74	1.948	194.8	23.69541
PO_4^{3-}	1	1	1.6442	0.608199	0.60820	0	0.63	0.63	63	38.31651
Cl^-	250	0.004	1.6442	0.608199	0.00243	0	25.3	0.1012	10.12	0.02462
									WQI	64.8

Tableau 8 : Calcul de l'IQE sur Site2 en Octobre

Paramètre	**StandardSN**	**1/SN**	**SUM 1/SN**	**K= 1/SUM1/SN**	**Wn=K/Sn**	**Ideal value**	**Mean Conc value Vn**	**Vn/Sn**	**(Vn/Sn)*100 =Qn**	**WnQn**
T°C	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	28.9	0.963333	96.33333	1.952993
Ph	8.5	0.117647	1.6442	0.608199	0.07155	7	8.94	1.051765	105.1765	7.525667
CE	300	0.003333	1.6442	0.608199	0.00203	0	653	2.176667	217.6667	0.441282
Turbidité	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	0	0.44	0.088	8.8	1.070429
TDS	500	0.002	1.44	0.608199	0.00122	0	339	0.678	67.8	0.082472
O.D	5	0.2	1.6442	0.608199	0.12164	14	7.15	1.43	143	17.39448
HCO_3^-	120	0.008333	1.6442	0.608199	0.00507	0	281	2.341667	234.1667	1.186832
Ca^{2+}	75	0.013333	1.6442	0.608199	0.00811	0	21.33	0.2844	28.44	0.230629
Mg^{2+}	30	0.033333	1.6442	0.608199	0.02027	0	6.15	0.205	20.5	0.415602
SO_4^{2-}	150	0.006667	1.6442	0.608199	0.00405	0	1.48	0.009867	0.986667	0.004001
NO_3^-	45	0.022222	1.6442	0.608199	0.01352	0	0.09	0.002	0.2	0.002703
DBO_5	5	0.2	1.6442	0.60819	0.126	0	6.72	1.4	134.4	16.483
PO_4^{3-}	1	1	1.6442	0.608199	0.60820	0	0.3	0.3	30	18.24596
Cl^-	250	0.004	1.6442	0.608199	0.00243	0	25.3	0.1012	10.12	0.02462
									WQI	48.9