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

Analyse de la qualité de l’eau des étangs piscicoles de la plaine de l’Imbo : Cas de Bujumbura

Nkurunziza, Hermès; Sous la direction de : Dr Nkurunziza Rémy Marie

2026-01
UB, IPA
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2219

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

MASTER EN SCIENCES

SPECIALITE : ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE

ANALYSE DE LA QUALITE DE L'EAU DES ETANGS PISCICOLES DE LA PLAINE DE L'IMBO : CAS DE BUJUMBURA

Par :

NKURUNZIZA Hermès

Sous la direction de :

Dr NKURUNZIZA Rémy Marie

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

Bujumbura, Janvier 2026

MEMBRES DU JURY

Président : Pr NINEZA Claire

Secrétaire : Dr AHISHAKIYE Rosine

Directeur : Dr NKURUNZIZA Rémy Marie

DEDICACE

Avec une profonde émotion, un immense respect et beaucoup d'amour,

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère épouse, IRAKOZE Julienne,

A ma chère fille aînée, feue NKURUNZIZA Zarah Anaïa,

A mon cher père, feu MINANI Zerbabel

A ma chère maman, NICIMPAYE Vastine

A toute ma famille,

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ma formation, à mon épanouissement et à la réalisation de ce travail,

J'exprime ma reconnaissance la plus sincère et ma gratitude éternelle.

REMERCIEMENTS

Je souhaite, avant toute chose, exprimer ma profonde reconnaissance à Dieu Tout-Puissant, dont la bonté, la protection et la sagesse ont guidé chacune des étapes de mon parcours académique et personnel. Par Sa grâce, cet effort de recherche a pu être mené à terme. J'adresse ensuite mes remerciements les plus respectueux à mon Directeur de mémoire, Dr. NKURUNZIZA Rémy Marie, pour son encadrement exemplaire, sa rigueur scientifique, ainsi que sa disponibilité constante. Ses orientations méthodologiques pertinentes, son sens critique et ses observations constructives ont largement contribué à la qualité et à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) pour l'accès à ses installations scientifiques, notamment le Laboratoire d'Analyse des Sols et Produits Agro-Alimentaires. L'appui technique du personnel et les moyens mis à disposition ont été déterminants pour la réalisation des analyses et l'obtention des résultats. Mes vifs remerciements s'adressent également à la Direction de la Pêche du Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage (MINEAGRIE) pour sa collaboration et les facilités accordées, qui ont permis la bonne conduite des investigations de terrain et la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite également témoigner ma reconnaissance à l'Université du Burundi, et plus particulièrement à l'Institut de Pédagogie Appliquée (IPA), pour la qualité de la formation académique dispensée et pour le cadre scientifique propice au développement de compétences analytiques et méthodologiques. J'exprime ma gratitude à l'ensemble du corps professoral, dont l'engagement pédagogique et l'exigence intellectuelle ont marqué de manière positive mon cursus. Mes pensées vont aussi à mes condisciples de promotion, pour l'esprit de solidarité, les échanges académiques enrichissants et le soutien constant qui ont accompagné notre parcours commun.

Je tiens également à remercier la famille NSABIMBONA Metoucela pour son soutien moral et matériel ainsi que pour ses encouragements constants, particulièrement durant les moments les plus exigeants de ce travail.

Enfin, je ne saurais omettre toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, par leurs conseils, leur appui logistique ou leur bienveillance. Qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de ma considération la plus distinguée.

RESUME

La pisciculture en étangs au Burundi progresse grâce à des initiatives gouvernementales et à des projets nationaux et internationaux visant la sécurité alimentaire et le développement rural. Afin de contribuer à la planification d'une gestion durable des étangs piscicoles de la plaine de l'Imbo, une étude de la qualité de l'eau a été menée sur deux étangs piscicoles situés à RUKARAMU (site 1) et au MINEAGRIE (site 2). Des échantillons ont été récoltés en juillet 2025, à une profondeur de 30 à 40 cm, puis analysés au laboratoire de l'ISABU. Treize paramètres physico-chimiques ont été étudiés : température, pH, conductivité, TDS, OD, nutriments (nitrates, phosphates), éléments majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, F^{-}), alcalinité, azote Kjeldhal, éléments mineurs (Fe, Mn), dureté totale, métaux lourds (Pb, Cd) et transparence.

Les résultats indiquent que la majorité des paramètres respectent les normes recommandées pour la pisciculture tropicale. Les nitrates sont conformes (0,1–1 mg/l), tandis que les phosphates présentent des valeurs légèrement élevées (0,05–0,07 mg/l), suggérant un risque potentiel d'eutrophisation. L'oxygène dissous est largement suffisant au site 1 (7,56–9,23 mg/l), au-delà du seuil minimal recommandé de 5 mg/l, alors que le site 2 présente des valeurs médiocres (2,03–2,18 mgO_2/l), avec un écart moyen de 6,58 mgO_2/l, traduisant un stress important lié à une forte charge organique. La conductivité électrique est nettement plus élevée au site 2 qu'au site 1, avec un écart moyen de 556,33 µS/cm, tout en restant dans la plage normative (100–2000 µS/cm). Les TDS (285–312 mg/l) et la dureté totale (252–291 mg/l $CaCO_3$) dépassent les valeurs recommandées pour les étangs piscicoles tropicaux (80–200 mg/l et 50–150 mg/l). Le fer (3,0–3,2 mg/l) et le manganèse (0,2–0,4 mg/l) sont élevés au site 1, tandis qu'ils demeurent conformes au site 2 (Fe 0,20–0,25 mg/l ; Mn 0 mg/l). Le dendrogramme met en évidence une homogénéité des eaux au site1 et une hétérogénéité au site2, confirmées par les diagrammes de Stiff et de Schöller, indiquant une minéralisation stable au site 1 et des concentrations critiques de nitrates et de sulfates au site 2.

Les résultats montrent que les deux étangs présentent un potentiel aquacole, mais avec des contraintes distinctes. Le site 1, faiblement minéralisé et marqué par des teneurs élevées en fer et en manganèse, nécessite une surveillance et des actions correctives. A l'inverse, le site 2 présente une eau plus dure, mieux tamponnée et chimiquement plus stable, globalement plus favorable à une pisciculture durable, malgré une faible teneur en oxygène dissous corrigeable par une gestion appropriée.

Mots-clés : Étangs piscicoles ; Qualité de l'eau ; Paramètres physico-chimiques ; Diagrammes de qualité de l'eau.

ABSTRACT

Pond aquaculture in Burundi is expanding through government initiatives and national and international projects aimed at enhancing food security and rural development. To support the planning of sustainable management strategies for fish ponds in the Imbo Plain, a water quality study was conducted on two ponds located at RUKARAMU (site 1) and MINEAGRIE (site 2). Samples were collected in July 2025 at a depth of 30–40 cm and analyzed at the laboratory of the ISABU. Thirteen physico-chemical parameters were investigated: temperature, pH, electrical conductivity, TDS, DO, nutrients (nitrates, phosphates), major ions (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, F^{-}), alkalinity, Kjeldahl nitrogen, minor elements (Fe, Mn), total hardness, and heavy metals (Pb, Cd) and transparency.

The results indicate that most parameters comply with recommended standards for tropical aquaculture. Nitrate concentrations are within acceptable limits (0.1–1 mg/l), whereas phosphate levels are slightly elevated (0.05–0.07 mg/l), suggesting a potential risk of eutrophication. Dissolved oxygen is largely sufficient at site 1 (7.56–9.23 mg/l), exceeding the minimum recommended threshold of 5 mg/l, while site 2 shows poor values (2.03–2.18 mg O_2/l), with a mean difference of 6.58 mg O_2/l between the two sites, indicating significant stress associated with a high organic load. Electrical conductivity is markedly higher at site 2 than at site 1, with a mean difference of 556.33 µS/cm, although remaining within the recommended range (100–2000 µS/cm). TDS (285–312 mg/l) and total hardness (252–291 mg/l as $CaCO_3$) exceed recommended values for tropical fish ponds (80–200 mg/l and 50–150 mg/l, respectively). Iron (3.0–3.2 mg/l) and manganese (0.2–0.4 mg/l) are elevated at site 1, whereas they remain within acceptable limits at site 2 (Fe 0.20–0.25 mg/l; Mn 0 mg/l). Cluster analysis (dendrogram) reveals homogeneous water quality at site 1 and heterogeneous conditions at site 2, as confirmed by Stiff and Schoeller diagrams, indicating stable mineralization at site 1 and critical nitrate and sulfate concentrations at site 2.

The results show that both ponds have aquaculture potential, but with distinct constraints. Site 1 is weakly mineralized and characterized by elevated iron and manganese concentrations, requiring close monitoring and corrective management measures. In contrast, Site 2 has harder, better-buffered, and chemically more stable water, making it overall more suitable for sustainable aquaculture, despite low dissolved oxygen levels that can be corrected through appropriate management practices.

Keywords: Fish ponds; Water quality; Physico-chemical parameters; Water quality diagrams.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACE ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ..... **ix**
LISTE DES FIGURES ..... **x**
LISTE DES ACRONYMES ..... **xi**
AVANT-PROPOS ..... **xiii**
CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE **1**
1.1. Présentation de l'étude 1
1.2. Cadre et justification de l'étude 2
1.3. Problématique 3
1.4. Objectifs de l'étude 3
1.4.1. Objectif général 3
1.4.2. Objectifs spécifiques 4
1.5. Intérêt et portée de l'étude 4
CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTERATURE **5**
2.1. Généralités sur l'Aquaculture 5
2.1.1. Aquaculture 5
2.1.1.1. Définition 5
2.1.1.2. Objectif de l'aquaculture 5
2.2. Organisation du secteur de la pisciculture au Burundi 6
2.2.1. Etat des lieux de la pisciculture au Burundi 6
2.2.2. Evolution du secteur et enjeux économiques et environnementaux 6
2.2.3. Les différents systèmes de production piscicole 7
2.2.3.1. La pisciculture extensive 7
2.2.3.2. La pisciculture semi-intensive 7
2.2.3.3. La pisciculture intensive 7
2.2.3.4. La pisciculture super-intensive 8
2.3. Caractéristiques de la région d'étude 8
2.3.1. Localisation géographique et limites de la région d'étude. 8

2.3.2. Relief et altitude....9
2.3.3. Climat et précipitations....9
2.3.4. Hydrographie et ressources en eau....9
2.3.5. Sols et géologie....10
2.3.6. Défis écologiques....11
2.4. Préparation et construction des étangs piscicoles....11
2.4.1. Choix du site d'implantation....11
2.4.2. Avantages et inconvénients des principaux types d'étangs piscicoles....12
2.5. Alimentation en eau des étangs piscicoles....14
2.5.1. Sources d'alimentation en eau....14
2.5.2. Conception du réseau hydraulique....15
2.6. Cycle biologique de l'étang....16
2.7. Les espèces d'élevage piscicole pour la région d'étude....17
2.7.1. Le poisson-chat africain ou Silure (Clarias gariepinus) :....17
2.7.2. Le Tilapia du Nil (Oreochromis nilotica)....19
2.8. Gestion de la qualité de l'eau....20
2.9. Paramètres d'analyses physico-chimiques....21
2.9.1. Température....21
2.9.2. pH....21
2.9.3. Conductivité....21
2.9.4. TDS (Total Dissolved Solids)....22
2.9.5. Concentration en nutriments....22
2.9.5.1. Nitrate (NO_3^-)....22
2.9.5.2. Phosphate (PO_4^{3-})....23
2.9.6. Eléments minéraux majeurs....23
2.9.6.1. Calcium (Ca^{2+})....23
2.9.6.2. Magnésium (Mg^{2+})....24
2.9.6.3. Sodium (Na^+)....24
2.9.6.4. Potassium (K^+)....24
2.9.6.5. Chlorures (Cl^-)....24
2.9.6.6. Sulfates (SO_4^{2-})....24
2.9.6.7. Fluorures (F^-)....25
2.9.7. Eléments minéraux mineurs....25
2.9.7.1. Fer....25

2.9.7.2. Manganèse (Mn^{2+}).....25
2.9.8. Dureté totale 25
2.9.9. Alcalinité 26
2.9.10. N-Kjeldhal 26
2.9.11. Analyse des métaux lourds.....26
2.9.11.1. Plomb 27
2.9.11.2. Cadmium.....27
2.9.12. Oxygène dissous 27
2.9.13. Transparence de l'eau.....28
CHAPITRE 3 : PARTIE EXPERIMENTALE.....29
3.1. Matériel et Méthodes.....29
3.1.1. Matériel.....29
3.1.2. Méthodes d'échantillonnage et d'analyses chimiques.....30
3.1.2.1. Méthodes d'échantillonnage 30
3.1.2.2. Sites d'échantillonnages.....31
3.1.2.2.1. Etang piscicole de RUKARAMU (Site 1) 32
3.1.2.2.2. Etang piscicole de Ngagara (Site 2) 32
3.2. Présentation et discussion des résultats 34
3.2.1. Résultats d'analyse physicochimique 34
3.2.2. Discussion des résultats 35
3.2.2.1. Paramètres physiques.....35
3.2.2.2. Paramètres chimiques 39
3.2.3. Analyse statistique 47
3.2.4. Diagramme de la qualité de l'eau selon Stiff.....53
3.2.5. Diagramme de Schöller 54
CHAPITRE 4 : CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS.....57
4.1. Conclusion générale 57
4.2. Suggestions.....59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SITOLOGIQUES 61
ANNEXES 68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Synthèse des avantages et inconvénients des principaux types d'étangs piscicoles 13

Tableau 2.2: Principaux systèmes d'alimentation des étangs. 15

Tableau 2.3: Table de rationnement (% du poids corporel jour-1) de C. gariepinus en fonction de la température (T°C).....18

Tableau 3.1: Tableau synthétique des résultats analytiques ainsi que leurs moyennes 34

Tableau 3.2: Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés.....47

Tableau 3.3: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) des paramètres physico-chimiques entre les sites étudiés. 51

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Carte des 5 régions écoclimatiques du Burundi. 8

Figure 1.2: Carte hydrographique 10

Figure 1.3: Cycle biologique de l'étang.....16

Figure 1.4: Clarias gariepinus Burchell, 1822 17

Figure 1.5: Caractéristique morphologique spécifiques d'O. Niloticus. 19

Figure 3.1: Carte de la zone d'étude montrant la localisation des sites d'échantillonnage. 31

Figure 3.2: Etang piscicole de RUKARAMU (Site 1) 32

Figure 3.3: Etang piscicole de Ngagara (Site 2) 33

Figure 3.4: Evolution des paramètres physiques au cours de trois jours dans les deux sites ..35

Figure 3.5: Evolution des paramètres chimiques au cours de trois jours dans les deux sites..39

Figure 3.6: Dendrogramme de classification hiérarchique des étangs en fonction des paramètres physico-chimiques de l'eau. 49

Figure 3.7: Diagramme de Stiff illustrant la qualité de l'eau des étangs étudiés.....53

Figure 3.8: Diagrammes de Schöller représentant la composition ionique et la qualité de l'eau des étangs étudiés.....55

LISTE DES ACRONYMES

µg/l	: Microgrammes par litre
µS/cm	: Microsiemens par centimètre
AIDR	: Association Internationale pour le Développement Rural
cm	: Centimètre
DBO_5	: Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours
DCO	: Demande Chimique en Oxygène
TDS	: Total dissolved solids (Solides dissous totaux)
OD	: Oxygène dissous (en anglais DO: Dissolved Oxygen)
ED	: Energie digestible
EPA	: United States Environmental Protection Agency (en français : Agence de protection de l'environnement des États-Unis).
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nation (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture).
FCR	: Feed Conversion Ratio (en français : rapport aliment/poids gagné)
FIDA	: Fonds International de Développement Agricole (en anglais : IFAD : International Fond for Agricultural Development).
SR	: Site de RUKARAMU
SM	: Site de MINAGRIE
ISABU	: Institut des Sciences Agronomiques du Burundi
Kg/ha	: Kilogrammes par hectare
kJ/g	: Kilojoules par gramme
MINEAGRIE	: Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé (en anglais, WHO : World Health Organization).
ONG	: Organisation non gouvernementale
PAM	: Programme Alimentaire Mondial (en anglais, WFP : World Food Programme).
pH	: Potentiel d'hydrogène
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement (en anglais : UNDP : United Nations Development Programme).
RAS	: Recirculating Aquaculture System (en français : Système d'aquaculture en recirculation de l'eau).

SAA : Spectromètre d'Absorption Atomique

SHV : Septicémie Hémorragique Virale

spp : Species pluralis (plusieurs espèces)

t/ha : Tonnes par hectare

UV : Ultraviolets

VPC : Virémie Printanière de la Carpe

AVANT-PROPOS

La pisciculture en étangs constitue aujourd'hui une activité stratégique pour la sécurité alimentaire, la création de revenus et le développement rural au Burundi. Face à la croissance démographique et à la pression exercée sur les ressources halieutiques naturelles, l'amélioration des pratiques piscicoles apparaît comme une nécessité incontournable. Parmi les facteurs déterminants de la réussite de cette activité, la qualité de l'eau occupe une place centrale, car elle conditionne directement la croissance, la survie et la productivité des poissons.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent ouvrage, issu d'une étude consacrée à l'analyse de la qualité de l'eau des étangs piscicoles situés dans la plaine de l'Imbo, précisément à Rukaramu (site 1) et au MINEAGRIE (site 2). Cette étude vise à analyser les principaux paramètres physicochimiques de l'eau, afin d'apprécier leur conformité aux normes recommandées pour la pisciculture tropicale.

A travers cette analyse, ce travail ambitionne d'apporter une contribution scientifique et pratique à la gestion durable des étangs piscicoles. Il se veut un outil d'aide à la décision destiné aux pisciculteurs, aux techniciens, aux chercheurs et aux autorités impliquées dans le développement du secteur halieutique au Burundi.

Enfin, cet ouvrage se veut une modeste contribution à l'enrichissement des connaissances sur la qualité des eaux piscicoles en milieu tropical, tout en encourageant l'adoption de pratiques rationnelles et durables susceptibles d'améliorer la production piscicole, de renforcer la sécurité alimentaire et de soutenir le développement socio-économique national.

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE

1.1. Présentation de l'étude

La pisciculture, ou élevage de poissons en milieu contrôlé, constitue un secteur stratégique dans la production de protéines animales, particulièrement dans les pays en développement comme le Burundi (Mapfumo,2022).

Face à une demande croissante en produits halieutiques, les étangs piscicoles jouent un rôle important dans la sécurité alimentaire et la diversification des sources de revenus des ménages ruraux.

Au Burundi, les systèmes piscicoles sont dominés par l'élevage du Tilapia (Oreochromis niloticus) et du poisson-chat (Clarias spp.), espèces reconnues pour leur adaptation aux conditions environnementales locales et leur forte acceptabilité sur le marché national (Boyd & Tucker, 2012).

Les étangs piscicoles, définis comme des masses d'eau artificiellement stagnantes, de faible profondeur et vidangeables, constituent l'unité de production principale de ce secteur (Dr Djamel, 2016; Ledoux et al., 2025; Trintignac et Kerleo, 2004).

Cependant, la productivité de ces étangs dépend étroitement de la qualité de l'eau, qui représente l'écosystème central du milieu piscicole. Les paramètres physico-chimiques de l'eau, tels que l'oxygène dissous, la température, le pH, la conductivité, la turbidité et la disponibilité des nutriments, influencent directement la croissance, la survie et la reproduction des poissons (Boyd, 2000).

Au Burundi, la pisciculture demeure en phase de développement et la faible maîtrise de la qualité de l'eau constitue l'une des principales contraintes à l'optimisation des rendements piscicoles (FAO, 2018). Dans ce contexte, la plaine de l'Imbo représente une zone à fort potentiel aquacole, mais encore insuffisamment documentée sur le plan de la qualité physico-chimique des eaux d'étangs. C'est dans cette optique que la présente étude a été conduite afin d'évaluer la qualité de l'eau de deux étangs piscicoles situés à Rukaramu (site 1) et au MINEAGRIE (site 2), en analysant les principaux paramètres physico-chimiques susceptibles d'influencer la productivité piscicole et la durabilité des systèmes d'élevage.

La dégradation de ces paramètres peut réduire la biomasse produite et affecter la santé des poissons, tandis qu'une gestion appropriée permet d'optimiser la croissance et la conversion alimentaire, en particulier pour le Tilapia et le Clarias.

1.2. Cadre et justification de l'étude

La plaine de l'Imbo, située dans l'Ouest du Burundi, présente un potentiel significatif pour le développement de la pisciculture, en raison de l'abondance de ses ressources en eau douce et de conditions climatiques favorables. Cependant, de nombreux pisciculteurs de la région signalent des difficultés persistantes liées à la gestion de la qualité de l'eau, se traduisant par des mortalités élevées des poissons et des rendements insuffisants. La surveillance des paramètres de qualité de l'eau demeure en effet limitée, et plusieurs étangs piscicoles présentent d'importantes variations physico-chimiques susceptibles d'affecter le bien-être et la santé des poissons.

Malgré ce potentiel naturel, la productivité des étangs piscicoles de la plaine de l'Imbo reste globalement faible. Les pisciculteurs font face à des contraintes récurrentes liées à une maîtrise insuffisante des paramètres physico-chimiques de l'eau, notamment le pH, l'oxygène dissous et les nutriments. Ces variations non contrôlées peuvent perturber le métabolisme des poissons, accroître leur vulnérabilité aux maladies et réduire la performance globale des systèmes piscicoles.

Les données scientifiques locales relatives à la qualité physico-chimique des eaux d'étangs piscicoles dans la plaine de l'Imbo demeurent limitées et fragmentaires. Le manque de suivi régulier et d'analyses comparatives des paramètres clés de la qualité de l'eau constitue un frein majeur à l'élaboration de stratégies de gestion adaptées aux conditions locales (Boyd & Tucker, 2012 ; Mapfumo, 2022).

Dans ce contexte, une évaluation approfondie de la qualité de l'eau des étangs piscicoles, fondée sur l'analyse des principaux paramètres physico-chimiques et leur comparaison aux normes recommandées pour la pisciculture tropicale, apparaît indispensable. Une telle démarche permet non seulement d'identifier les contraintes environnementales affectant la productivité piscicole, mais également de fournir une base scientifique solide en vue de l'amélioration et de la durabilité des systèmes piscicoles de la plaine de l'Imbo.

Enfin, plusieurs études menées dans d'autres pays africains et tropicaux ont mis en évidence l'importance du suivi des paramètres physico-chimiques dans la gestion durable des étangs piscicoles. Au Kenya, (Minoo, 2015) a montré que les variations du pH, de l'oxygène dissous, de la conductivité et des nutriments influencent directement la productivité et la santé des poissons. De même, en Ouganda, (Akello, 2024 ; Shibah, 2023) ont démontré que des concentrations élevées en nutriments, une faible teneur en oxygène dissous et une

minéralisation excessive constituent des facteurs limitants majeurs pour la pisciculture en étangs, en l'absence d'un suivi régulier de la qualité de l'eau. Ces travaux soulignent que l'analyse intégrée des paramètres physico-chimiques constitue une approche scientifique éprouvée pour améliorer la performance aquacole. Toutefois, au Burundi, et particulièrement dans la plaine de l'Imbo, de telles investigations demeurent rares, ce qui justifie pleinement la pertinence et l'originalité de la présente étude.

1.3. Problématique

La productivité des étangs piscicoles au Burundi dépend fortement des paramètres de la qualité de l'eau et de leur influence directe sur la santé des poissons et la conversion alimentaire (Boyd, 2000).

Malgré le potentiel aquacole de la plaine de l'Imbo, la surveillance et la gestion de la qualité de l'eau restent limitées, conduisant à des performances aquacoles inférieures aux standards internationaux (Boyd & Tucker, 2012).

Les pisciculteurs observent une croissance lente du tilapia (Oreochromis niloticus) et du clarias (Clarias gariepinus), accompagnée de mortalités parfois élevées, particulièrement à certaines périodes. Ces difficultés de production suggèrent l'existence de contraintes liées aux conditions du milieu aquatique, notamment aux variations des paramètres physico-chimiques de l'eau des étangs.

Les questions principales qui découlent de cette problématique sont :

- Quels sont les paramètres les plus critiques à surveiller pour optimiser la productivité de ces deux espèces ?
- Quelles pratiques de gestion peuvent être mises en place pour améliorer la qualité de l'eau et assurer une bonne productivité ?

1.4. Objectifs de l'étude

1.4.1. Objectif général

Analyser les paramètres de la qualité de l'eau des étangs piscicoles de la plaine de l'Imbo pouvant influencer leur productivité.

1.4.2. Objectifs spécifiques

- Identifier et mesurer les paramètres clés de la qualité de l'eau.
- Comparer les résultats obtenus avec les normes internationales recommandées en pisciculture.
- Proposer des pratiques de gestion adaptées pour favoriser une aquaculture durable au Burundi.

1.5. Intérêt et portée de l'étude

Cette étude revêt un intérêt scientifique, pratique et socio-économique :

- Scientifique : elle enrichit les connaissances sur l'impact de qualité de l'eau sur la productivité des étangs piscicoles au Burundi, particulièrement pour deux espèces de poissons dont le Tilapia et le Clarias.
- Pratique : elle fournit des suggestions et pratiques concrètes aux pisciculteurs pour améliorer la gestion des étangs.
- Socio-économique : elle contribue à la sécurité alimentaire, à la création d'emplois et à la diversification des ressources halieutiques locales.

Notre travail est subdivisé en quatre grands chapitres :

- Le premier chapitre offre un aperçu général de l'étude en présentant le contexte de la pisciculture au Burundi et en mettant en lumière l'importance de la qualité de l'eau pour espérer une bonne productivité dans les étangs piscicoles ;
- Le deuxième chapitre propose une revue de la littérature sur l'aquaculture, en se focalisant sur les différents paramètres de la qualité de l'eau et leur rôle dans le bien-être et la santé des poissons ;
- Le troisième chapitre détaille la partie expérimentale, en expliquant les méthodologies de collecte des données, les paramètres mesurés et les outils d'analyse utilisés pour caractériser la qualité de l'eau ;
- Le quatrième chapitre présente la conclusion générale de l'étude et formule des suggestions pratiques pour améliorer la gestion de la qualité de l'eau dans les étangs piscicoles, afin d'assurer un environnement aquatique durable et favorable à l'élevage du Tilapia et du Clarias.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTERATURE

2.1. Généralités sur l'Aquaculture

La pisciculture constitue une branche de l'aquaculture et correspond à l'élevage de poissons dans des environnements confinés, tels que des étangs, des bassins en béton ou en plastique, ainsi que des nasses ou des cages.

Cette approche permet non seulement de protéger les poissons contre les prédateurs, mais également de mieux gérer leur alimentation, leur santé et leur capture (Ben, 2020; Boumaraf, 2019; François LE COR, 2021, Labed, 2020; Onodje, 2000; Vanacker, 2016).

2.1.1. Aquaculture

2.1.1.1. Définition

L'aquaculture désigne l'élevage contrôlé d'organismes vivant dans les milieux aquatiques, qu'il s'agisse d'animaux ou de végétaux (Bouregba et al., 2022, FAO, 1987).

Elle concerne principalement :

- La conchyliculture concerne l'élevage des mollusques.
- La pisciculture qui est l'élevage des poissons.
- L'astaciculture définissant l'élevage de l'écrevisse genre astacia.
- L'algoculture définissant la culture des algues.
- L'échiniculture concerne l'élevage des oursins.
- La carcinoculture concerne l'élevage des crustacés

Ces productions peuvent être réalisées aussi bien en eau douce, saumâtre ou marine, dans des systèmes à eau stagnante ou renouvelée à différents débits (Boumaraf, 2019; Onodje, 2000).

2.1.1.2. Objectif de l'aquaculture

L'aquaculture vise avant tout à exploiter pleinement son potentiel afin de :

- Favoriser la prospérité des communautés et contribuer à une meilleure santé des populations ;
- Offrir davantage d'opportunités pour améliorer les moyens de subsistance, notamment à travers l'accroissement des revenus et l'amélioration de la nutrition ;

- Renforcer l'autonomisation des aquaculteurs, en particulier celle des femmes (Ababouch et al., 2023; Mapfumo, 2022).

2.2. Organisation du secteur de la pisciculture au Burundi

Le secteur de la pisciculture au Burundi constitue un levier important pour la sécurité alimentaire, la lutte contre la pauvreté et la création d'emplois (burundiforum, 2018; FAO, 2024a ; Kuriyo, 2019 ;Yusoff et al., 2024).

2.2.1. Etat des lieux de la pisciculture au Burundi

La pisciculture a été introduite au Burundi dans les années 1950, sous le protectorat belge du Ruanda-Urundi, avec la mise en place d'étangs visant à diversifier l'apport en protéines et renforcer la sécurité alimentaire. Cependant, ces installations ont souvent été peu exploitées ou abandonnées en raison de difficultés techniques et organisationnelles, malgré la construction de nombreux étangs à travers le pays et la production initiale de Tilapia (Charles Niyonkuru et al., 2015; FAO, 1986, 2020; MINAGRIE, 2008).

Le Centre piscicole de Karusi, inauguré en 1952, a fonctionné jusqu'en 1959 avant d'être abandonné et n'a connu qu'une reprise limitée entre 1972 et 1974 grâce à l'AIDR belge (Charles Niyonkuru et al., 2015).

Les tentatives de relance dans les années 1977–1984 ont été éphémères, laissant la plupart des étangs asséchés et dégradés (FAO, 1986, 2020).

Après l'indépendance en 1962, le gouvernement a poursuivi la promotion de la pisciculture comme activité complémentaire à la pêche traditionnelle autour du lac Tanganyika. Malgré ces efforts, le secteur est resté sous-développé pendant plusieurs décennies, limité par le manque de formation technique, d'infrastructures et d'accès au financement (FAO, 2020; UN au Burundi, IDA, 2021).

Ces dernières années, la pisciculture a connu un regain d'intérêt grâce à des projets nationaux et internationaux visant à améliorer les pratiques d'élevage, renforcer les capacités des producteurs et promouvoir une gestion durable des ressources aquatiques (Yusoff et al., 2024).

2.2.2. Evolution du secteur et enjeux économiques et environnementaux

Depuis l'introduction de la pisciculture, le secteur a connu des périodes de développement limité et de relances ponctuelles. L'intensification récente des élevages a permis d'améliorer la production, mais elle a aussi mis en évidence des enjeux environnementaux majeurs. L'accumulation de nutriments dans les étangs piscicoles provoque

fréquemment une eutrophisation, qui détériore la qualité de l'eau et menace la santé des poissons (Banderol, 2024; Charles Niyonkuru et al., 2015; Henry-Silva & Camargo, 2008; Lefrançois, 2009).

Sur le plan économique, les pisciculteurs doivent faire face à l'accès aux marchés et à la rentabilité des investissements. Les pertes de poissons dues à une mauvaise qualité de l'eau réduisent considérablement les gains, même lorsque les techniques de production sont améliorées. Pour un développement durable, il est donc nécessaire de renforcer les compétences techniques des producteurs, de moderniser les infrastructures et d'instaurer des politiques efficaces de gestion de la qualité de l'eau et des ressources aquatiques (Ababouch et al., 2023; Bouregba et al., 2022, FAO, 2024; Yusoff et al., 2024).

2.2.3. Les différents systèmes de production piscicole

On distingue quatre types de pisciculture :

- La pisciculture extensive,
- La pisciculture semi-intensive,
- La pisciculture intensive,
- La pisciculture super-intensive.

2.2.3.1. La pisciculture extensive

La pisciculture extensive exploite les ressources naturelles disponibles dans les étangs, sans ajout d'aliments ou de fertilisants. Elle repose sur l'équilibre écologique naturel pour soutenir la croissance des poissons, avec des rendements faibles, généralement de 100 à 150 kg/ha/an (Fermon, 2010; Labed, 2020; Lacroix, 2004; Onodje, 2000).

2.2.3.2. La pisciculture semi-intensive

La pisciculture semi-intensive combine la production naturelle avec un apport complémentaire en nourriture ou en engrais organiques. Cette méthode augmente la croissance des poissons et permet des rendements plus élevés, allant de 1,5 à 2,5 tonnes/ha/an (Fermon, 2010; Labed, 2020; Lacroix, 2004 ; Onodje, 2000).

2.2.3.3. La pisciculture intensive

La pisciculture intensive contrôle strictement les conditions d'élevage, notamment la qualité de l'eau et l'alimentation régulière. Elle vise une production rapide et élevée, avec des

rendements de 5 à 10 tonnes/ha/an en étangs et 50 à 100 kg/m³/an en cages (Labed, 2020 ; Lacroix, 2004; Onodje, 2000).

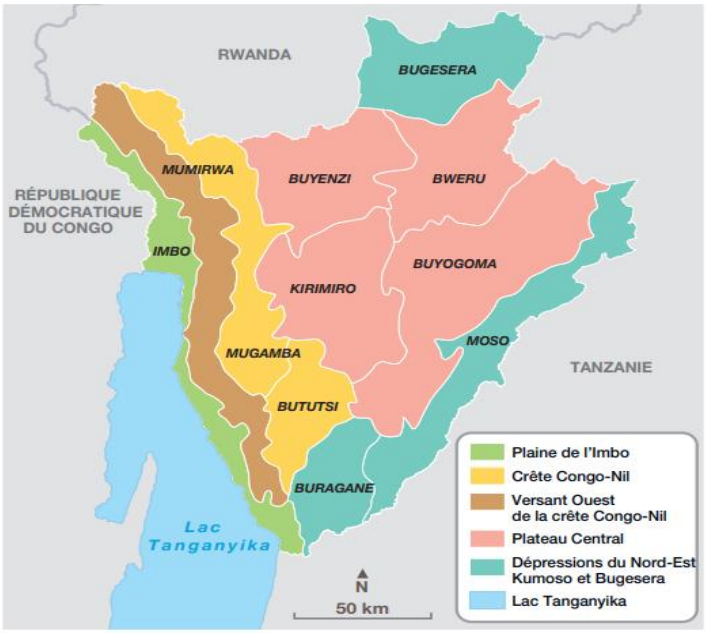
2.2.3.4. La pisciculture super-intensive

La pisciculture super-intensive utilise des technologies avancées et une densité très élevée de poissons. Elle repose sur un contrôle complet de la température, de l'eau et de l'alimentation automatique. Elle permet des productions très élevées, pouvant atteindre jusqu'à 3 600 tonnes/ha/an sur un cycle complet, mais n'est pas pratiquée au Burundi à cause des besoins industriels et énergétiques (Fermon, 2010; Labed, 2020; Lacroix, 2004; Onodje, 2000).

2.3. Caractéristiques de la région d'étude

2.3.1. Localisation géographique et limites de la région d'étude.

La Plaine de l'Imbo est située dans la partie occidentale du Burundi, le long de la rive nord-est du lac Tanganyika, s'étendant du nord de la commune de Cibitoke jusqu'au sud de la commune de Rumonge, en passant par la ville de Bujumbura. Elle constitue l'une des cinq grandes régions naturelles du Burundi, caractérisée par un relief de plaine à basse altitude. Elle est délimitée à l'est par les collines du Mumirwa et à l'ouest par le lac Tanganyika et la rivière Rusizi, qui marque la frontière avec la République Démocratique du Congo (Nkurunziza et al., 2023; Nsabimana, 1990; République du Burundi,2013).



Source : Martens A. et Sauttiaux G. (ISABU, 1979) modifiée et cartographiée par le Centre d'information environnementale (CIE), Bujumbura, Burundi.

Figure 1.1: Carte des 5 régions écoclimatiques du Burundi. (République du Burundi, 2013; UNICEF, 2021)

2.3.2. Relief et altitude

Le relief de la plaine de l'Imbo est faiblement ondulé, avec une altitude moyenne comprise entre 774 m (niveau du lac Tanganyika) et 1 000 à 1 200 m vers l'est, au pied des collines du Mumirwa.

Ce relief plat favorise l'agriculture intensive et le développement des étangs piscicoles. La pente douce facilite également l'irrigation naturelle, mais rend la zone vulnérable aux inondations pendant la saison des pluies (République du Burundi, 2021; World Bank, 2022).

2.3.3. Climat et précipitations

La plaine de l'Imbo bénéficie d'un climat tropical chaud de basse altitude, caractérisé par une température moyenne annuelle supérieure à 23 °C. Les pluies annuelles varient de 800 à 1 100 mm, avec une saison pluvieuse s'étendant d'octobre à mai et une saison sèche marquée de juin à septembre.

Ce climat chaud et humide crée des conditions favorables à la pisciculture, mais expose aussi les étangs à l'évaporation et à la variation de la qualité de l'eau (M. Rocío Rivas-L´opez et al., 2022; République du Burundi, 2013).

2.3.4. Hydrographie et ressources en eau

La plaine de l'Imbo est drainée par un vaste réseau hydrographique. Le principal cours d'eau est la Rusizi, qui reçoit plusieurs affluents tels que Kagera, Nyabagere, Mutimbuzi, Ntahangwa, et Mubone, se jetant dans le lac Tanganyika. Ces cours d'eau, associés à la nappe phréatique peu profonde, assurent une disponibilité permanente d'eau pour les activités agricoles et piscicoles. Toutefois, les zones basses sont fréquemment inondées pendant la saison des pluies.

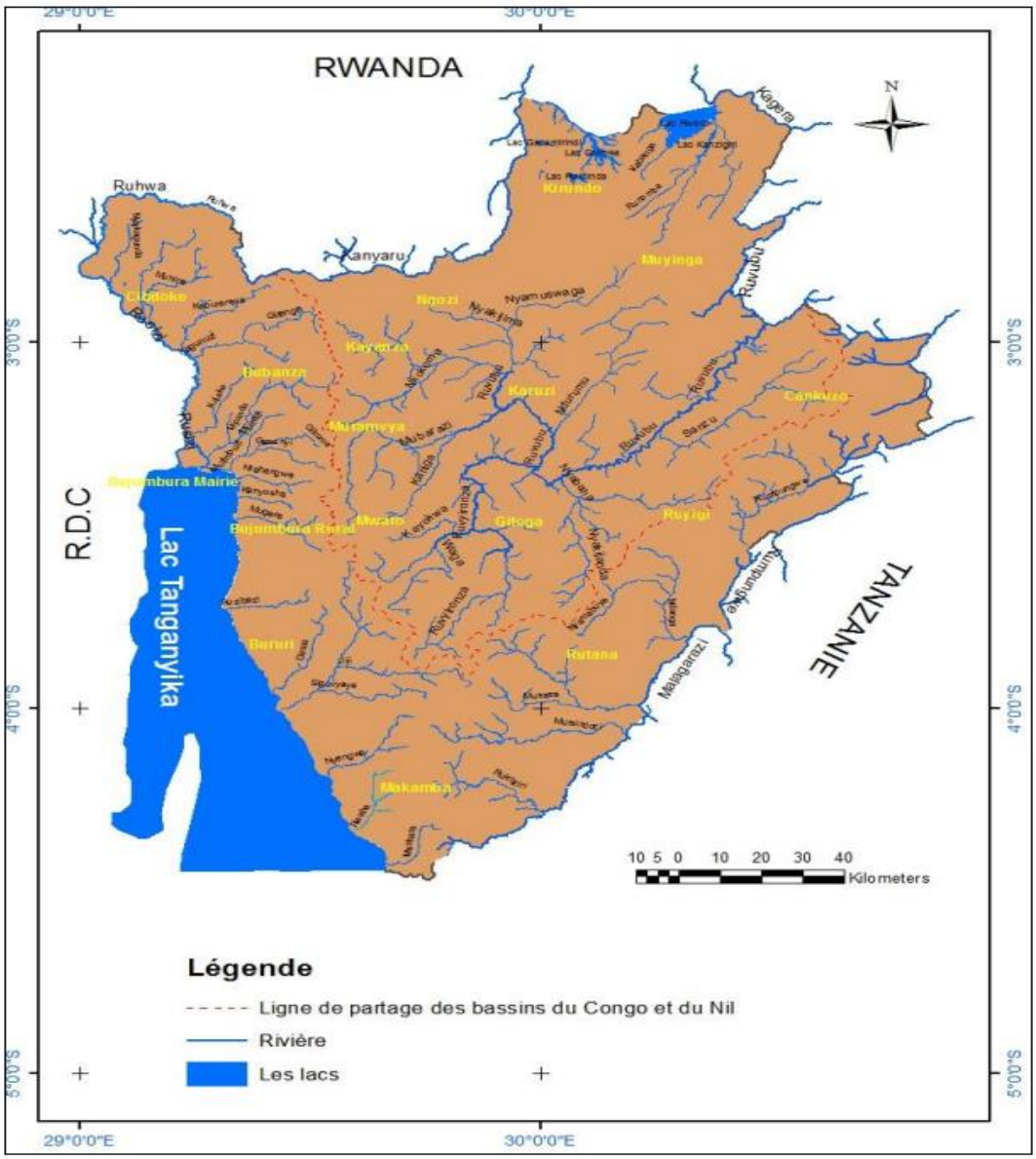


Figure 2.2: Carte hydrographique (République du Burundi, 2021)

2.3.5. Sols et géologie

Les sols de la plaine de l'Imbo sont majoritairement alluviaux, issus des dépôts fluviatiles et lacustres. Ils présentent une texture argileuse à limoneuse, souvent hydromorphe, avec une bonne capacité de rétention d'eau.

Dans certaines zones, les sols peuvent être légèrement salins ou alcalins, et parfois sujets à la compaction. Ces caractéristiques les rendent favorables à la riziculture et à la pisciculture (faible infiltration et rétention de l'eau dans les étangs) (IFDC et ISABU, 2022; République du Burundi, 2013).

2.3.6. Défis écologiques

La Plaine de l'Imbo fait face à plusieurs défis environnementaux : inondations récurrentes, érosion des sols, déforestation, et pollution agricole. Ces phénomènes affectent la disponibilité et la qualité de l'eau utilisée dans les étangs piscicoles, réduisant parfois la productivité aquacole.

Les programmes récents du gouvernement et de partenaires comme la Banque mondiale ou la FAO visent à améliorer la gestion de l'eau et à promouvoir des pratiques durables (MINAGRIE, 2008 ; World Bank, 2022).

2.4. Préparation et construction des étangs piscicoles

La réussite d'une pisciculture repose en grande partie sur la qualité de la préparation et de la construction des étangs. Ces opérations déterminent non seulement la productivité des poissons, mais aussi la stabilité écologique du système aquatique.

Un étang bien conçu et bien aménagé garantit une bonne gestion de l'eau, une meilleure oxygénation et une régulation optimale de la température (Austin et al., 1996; Smith et al., 2016; Srivastava & Raizada, 2012; Van den Berg et al., 1992; Willis et al., 2010).

2.4.1. Choix du site d'implantation

Le choix du site constitue la première étape déterminante dans la mise en place d'une pisciculture. Il conditionne la disponibilité et la qualité de l'eau, la facilité de gestion ainsi que la durabilité de l'exploitation. Avant d'entreprendre la construction d'un étang, il est indispensable d'effectuer une étude approfondie du site.

Les conditions de base suivantes doivent être vérifiées avant la création des étangs d'aquaculture. Il s'agit de: (RECA Niger, 2010; Van den Berg et al., 1992)

- Disponibilité en eau : présence d'une source permanente (rivière, source, canal ou nappe phréatique) assurant un débit suffisant toute l'année.
- Qualité de l'eau : l'eau doit être claire, non polluée.
- Disponibilité des aliments : il est important de garantir un approvisionnement régulier en aliments pour poissons.
- Nature du sol : les sols argileux sont préférables pour leur imperméabilité, tandis que les sols sablonneux entraînent des pertes d'eau.

- Topographie : une pente douce (1 à 3 %) facilite la vidange et limite les coûts de terrassement.
- Accessibilité : proximité des routes et des marchés pour faciliter la commercialisation du poisson.

2.4.2. Avantages et inconvénients des principaux types d'étangs piscicoles

L'élevage piscicole peut être pratiqué selon différents systèmes d'étangs, chacun présentant des caractéristiques propres qui influencent la productivité, la gestion de la qualité de l'eau et le bien-être des poissons. Comprendre les avantages et les limites de chaque type d'étang est essentiel pour choisir la technique la mieux adaptée aux objectifs de production et aux conditions locales.

Le tableau ci-après synthétise les principaux avantages et inconvénients des types d'étangs piscicoles les plus couramment utilisés dans la pratique, permettant ainsi aux producteurs et aux décideurs de mieux orienter leurs choix de gestion et d'investissement.

Tableau 2.1: Synthèse des avantages et inconvénients des principaux types d'étangs piscicoles (FAO, 1994)

Type	Avantages	Inconvénients
Etang en déblai	Digues inutiles, sauf pour la protection contre les crues. Pas de plan d'eau nécessaire à l'alimentation en eau. Construction possible par une main-d'œuvre peu qualifiée.	Le niveau d'eau risque d'avoir des variations saisonnières considérables. Exige un travail d'excavation plus important. Non vidangeable ; pas de contrôle de l'alimentation en eau, à moins d'installer un système de pompage, qui risque d'être coûteux. Faible productivité naturelle des eaux souterraines. Gestion de l'étang difficile.
Etang de barrage	Simplicité de conception dans le cas de petits cours d'eau. Coûts de construction relativement faibles, sauf en présence de problèmes de protection contre les inondations. La productivité naturelle peut être élevée suivant la qualité de l'eau d'alimentation.	La digue doit être solidement ancrée. Il faut prévoir un déversoir et son canal d'évacuation. Pas de contrôle à l'arrivée d'eau (quantité, qualité, poissons sauvages) Impossible à vidanger entièrement, sauf en cas d'assèchement complet de la source d'alimentation en eau. Gestion de l'étang difficile (fertilisation, alimentation) à cause de l'irrégularité de l'approvisionnement en eau. Forme et dimensions irrégulières
Etang en déviation	Facilité de régulation de l'approvisionnement en eau. Possibilité d'une bonne gestion de l'étang. Coûts de construction plus élevés sur terrain plat. Vidange totale possible. Réalisation possible d'étangs de formes et de dimensions régulières.	Coûts de construction plus élevés par comparaison aux étangs de barrage. Productivité naturelle plus faible, surtout lorsque l'étang est construit sur un sol non fertile. Les travaux de construction exigent au préalable des levés topographiques soigneux et un piquetage détaillé.

2.5. Alimentation en eau des étangs piscicoles

L'alimentation en eau constitue l'un des facteurs les plus déterminants pour la réussite d'une pisciculture.

La disponibilité, la qualité et la régularité de l'eau influencent directement la productivité, la santé des poissons et la stabilité écologique du système aquatique.

Un système d'approvisionnement bien conçu permet d'assurer un équilibre entre les besoins hydriques des poissons, la durabilité des ressources et la stabilité des paramètres physico-chimiques (Boyd, 2000).

2.5.1. Sources d'alimentation en eau

Les étangs piscicoles peuvent être alimentés à partir de diverses sources naturelles ou artificielles selon les conditions topographiques et hydrologiques locales :

- **Les eaux de surface** (rivières, ruisseaux, lacs, canaux) offrent un volume important mais peuvent présenter des variations saisonnières et des risques de pollution.
- **Les eaux souterraines**, issues de nappes phréatiques ou de forages, sont souvent stables et de bonne qualité mais parfois froides et à débit limité.
- **Les eaux pluviales et de ruissellement** représentent une option économique, mais exigent une bonne gestion du drainage et du stockage.
- **Les eaux recyclées**, après décantation et filtration, peuvent être réutilisées pour limiter les pertes hydriques dans les systèmes intégrés.

La sélection d'une source d'eau dépend de sa quantité, qualité, accessibilité et de la stabilité saisonnière du débit (Miller, 2009; Symeonidou & Mente, 2024; Tsuchiya, 2010).

Selon la topographie et la disponibilité en eau, on peut différencier trois systèmes majeurs d'alimentation et de circulation de l'eau dans les étangs piscicoles.

Tableau 2.2: Principaux systèmes d'alimentation des étangs.

Système	**Description**	**Caractéristiques principales**	**Utilisation typique**
Système à eau stagnante	L'eau reste dans l'étang pendant toute la période d'élevage, sans renouvellement régulier.	Entretien simple, pertes d'eau limitées, mais risque d'appauvrissement en oxygène.	Pisciculture extensive.
Système à eau renouvelée	L'eau est partiellement remplacée selon un débit régulier contrôlé.	Meilleure oxygénation et stabilité des paramètres de qualité de l'eau.	Pisciculture semi-intensive
Système à écoulement continu	L'eau entre et sort en permanence, assurant un flux constant.	Forte oxygénation, température plus stable, mais consommation d'eau élevée	Pisciculture intensive ou expérimentale.

2.5.2. Conception du réseau hydraulique

Un système hydraulique performant inclut plusieurs éléments essentiels :

- Des canaux d'alimentation permettant l'entrée de l'eau dans les étangs, dotés d'un dispositif de régulation (vanne ou prise d'eau) ;
- Des canaux de vidange assurant l'évacuation de l'eau et facilitant la récolte des poissons ;
- Des déversoirs de sécurité conçus pour évacuer les excédents d'eau en cas de crue ;
- Des bassins de décantation ou des filtres destinés à réduire la turbidité et à empêcher l'introduction d'organismes indésirables.

L'ensemble de ces ouvrages doit être dimensionné en fonction du relief, du volume d'eau disponible et des besoins spécifiques des espèces élevées (Bhatnagar & Devi, 2019).

2.6. Cycle biologique de l'étang

« La bonne santé » d'un étang est liée à sa productivité, qui va elle-même dépendre du bon fonctionnement de son cycle biologique.

La chaîne alimentaire se met en place avec la production de phytoplancton, de plancton animal ou zooplancton puis ensuite d'invertébrés aquatiques (Trintignac et al., 2013).

Cette production permet le développement de vertébrés aquatiques comme les batraciens et les poissons. Ce processus se nomme **le cycle biologique de l'étang**.

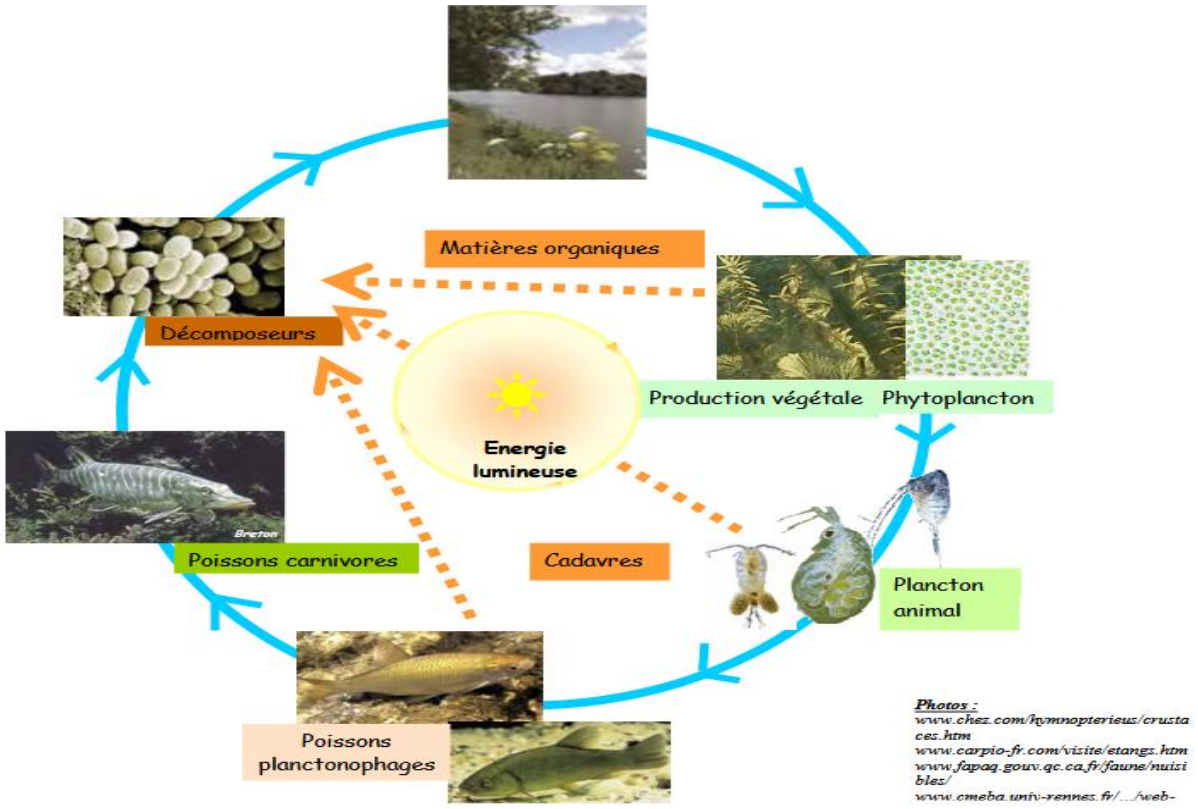


Figure 1.3: Cycle biologique de l'étang (Trintignac et al., 2013)

Le cycle biologique est important car en permettant la croissance du poisson, il va favoriser la l'assimilation ou « la digestion » d'une partie des nutriments et de la matière organique produit par l'écosystème étang ainsi qu'une partie de ceux provenant du bassin versant. Une part de ces nutriments va être incorporée dans la chaîne trophique de l'étang permettant le développement des végétaux et de la faune aquatique, dont les poissons qui seront récoltés. Ces éléments « consommés » ne se retrouveront donc pas à la sortie dans le milieu lors de la vidange (Trintignac et al., 2013).

2.7. Les espèces d'élevage piscicole pour la région d'étude

2.7.1. Le poisson-chat africain ou Silure (Clarias gariepinus) :

Le poisson-chat africain (Clarias gariepinus) est réputé pour sa résistance aux maladies et sa grande capacité d'adaptation à différents environnements aquatiques. Apprécié pour sa croissance rapide, sa chair ferme et savoureuse et le faible nombre d'arêtes, il constitue un produit très recherché sur les marchés locaux et internationaux. Sa reproduction artificielle est également favorable, grâce à un grand nombre d'œufs viables, un taux d'éclosion élevé et une bonne survie des post-larves, ce qui en fait une espèce prisée pour la pisciculture intensive et semi-intensive (Lacroix, 2004 ; Rehif & Melha, 2017).

Le poisson-chat africain (Clarias gariepinus) possède un corps allongé sans écailles, muni de barbillons sensoriels et adapté à la vie benthique.

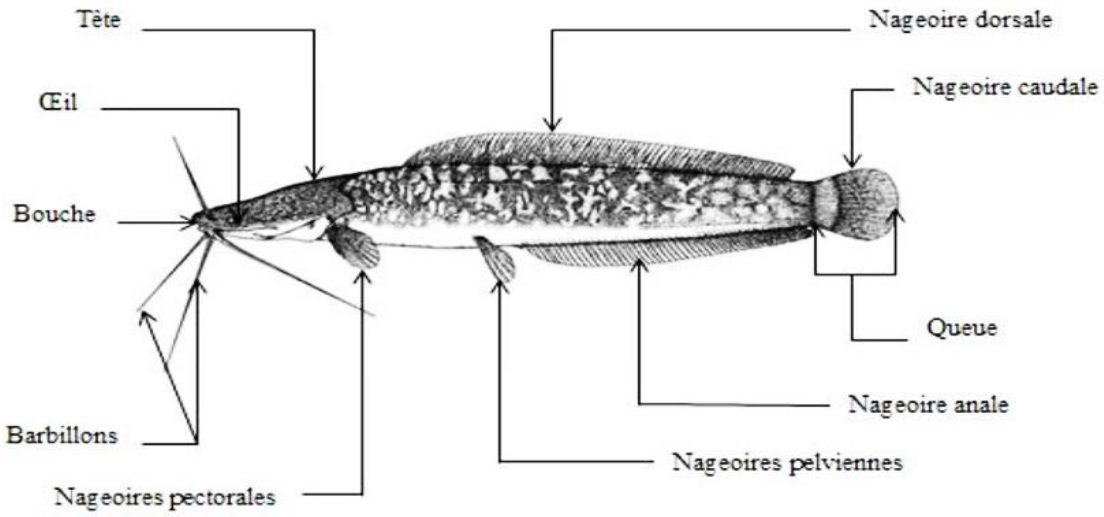


Figure 1.4: Clarias gariepinus Burchell, 1822 (Paugy, Lévêque et Teugels, 2004)

Sur le plan systématique, C. gariepinus appartient à l'ordre des Siluriformes, qui regroupe près du tiers des poissons d'eau douce connus avec 34 familles, 437 genres et plus de 2700 espèces, majoritairement d'eau douce ou saumâtre (Alli, 2024 ; Bouregba et al., 2022 ; Rehif & Melha, 2017 ; Teugels, 1996). Sa classification est la suivante : **Famille : Clariidae, Sous-famille : Tilapinés, Genre : Clarias, Espèce : Clarias gariepinus** (Géoffroy et al., 2019).

En milieu naturel, C. gariepinus est omnivore et opportuniste. Il consomme insectes aquatiques, crabes, plancton, petits poissons, détritus animaux, matières végétales et fruits. Le régime alimentaire varie avec l'âge : les juvéniles privilégient insectes et crustacés, suivis des mollusques et du plancton, tandis que les adultes se nourrissent principalement de poissons, ce

qui illustre sa capacité d'adaptation aux ressources disponibles (Géoffroy et al., 2019 ; Rehif & Melha, 2017).

Le régime alimentaire évolue selon la taille des individus : les juvéniles privilégient principalement les insectes et les crustacés, suivis des mollusques, des détritus et du plancton. Les adultes et subadultes, quant à eux, consomment surtout des poissons.

Tableau 2.3: Table de rationnement (% du poids corporel jour-1) de C. gariepinus en fonction de la température (T°C) (Rehif & Melha, 2017)

	Poids moyen en (g)											
T^{O}C	1	5	1-10	10-25	25	25-50	50	50-100	100	200	100-300	300-800
20	2,9	1,9	5,0	3,0	1,2	2,0	1,0	1,5	0,9	-	1,2	1,0
22	4,4	3,1	6,8	4,5	2,2	3,0	1,9	2,4	1,6	1,4	2,0	1,7
24	5,8	4,2	8,1	6,0	3,1	4,0	2,7	3,0	2,3	2,0	2,5	2,2
26	7,0	5,1	9,5	6,6	3,7	5,1	3,3	3,6	2,8	2,5	3,2	2,8
28	7,7	5,6	10,0	7,0	4,0	5,5	3,5	4,0	3,0	2,6	3,5	3,1
30	8,0	5,6	9,8	6,8	3,9	5,3	3,4	3,7	2,9	2,5	3,2	2,9
32	7,9	5,3	9,5	6,5	3,6	5,0	3,0	3,5	2,6	-	3,0	2,8

Ce tableau met en évidence l'influence de la température et du poids sur les besoins alimentaires de C. gariepinus, soulignant l'importance d'adapter les régimes alimentaires pour optimiser la croissance et la santé des poissons, tout en améliorant l'efficacité et la rentabilité des élevages.

2.7.2. Le Tilapia du Nil (Oreochromis nilotica)

Le Tilapia du Nil (Oreochromis niloticus) appartient à la famille des Cichlidae et constitue l'une des espèces les plus importantes en aquaculture mondiale. Il est particulièrement apprécié pour sa croissance rapide, son rendement élevé et sa grande capacité d'adaptation aux variations de température, de salinité et de concentration en oxygène dissous, ce qui favorise son élevage dans divers contextes tropicaux et subtropicaux (FAO, 2009 ; Ndiwa et al., 2016 ; Tibihika et al., 2018 ; Balakamatchi et al., 2022).

Le Tilapia du Nil (Oreochromis niloticus) est un poisson incubateur buccal maternel, au corps latéralement aplati et marqué de bandes verticales, possédant des nageoires et des branchiospines adaptées à la filtration et à la protection des œufs et alevins.

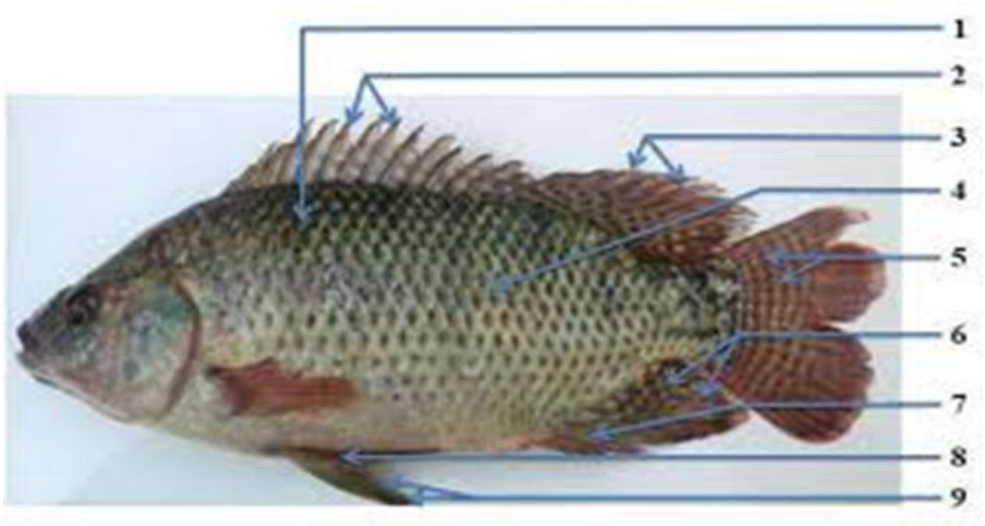


Figure 1.5: Caractéristique morphologique spécifiques d'O. Niloticus (Boukhris, & Manamani, 2018).

1ère ligne latérale ; 2 : Rayons épineux de la nageoire dorsale ; 3 : Rayons moues de la nageoire dorsale ; 4 : 2ème ligne latérale ; 5 : Bandes verticales claires et noires sur la nageoire caudale ; 6 : Rayons moues de la nageoire anale ; 7 : Rayons épineux de la nageoire anale ; 8 : Rayon dur de la nageoire pelvienne ; 9 : Rayons moues de la nageoire pelvienne.

Sur le plan systématique, O. niloticus est classé comme suit : **Famille : Cichlidae, Sous-famille : Pseudocrenilabrinae, Genre : Oreochromis, Espèce : Oreochromis niloticus (Linnaeus, 1758)**. Son introduction volontaire dans de nombreuses régions du monde a fortement contribué à son expansion, aussi bien pour la consommation humaine que pour le développement de systèmes aquacoles performants (Alli, 2024 ; Boukhris & Manamani, 2018a).

En milieu naturel, le Tilapia du Nil présente un régime alimentaire omnivore opportuniste. Il se nourrit principalement de phytoplancton, de zooplancton, de détritus organiques, d'insectes aquatiques et de fragments végétaux. Cette plasticité alimentaire lui confère une grande capacité d'adaptation écologique et explique en partie son succès dans les systèmes d'élevage extensifs, semi-intensifs et intensifs (FAO, 2009 ; Lacroix, 2004 ; Boukhris & Manamani, 2018).

2.8. Gestion de la qualité de l'eau

La qualité de l'eau constitue un facteur déterminant pour la réussite de la production aquacole, influençant toutes les phases, de la prise d'eau à son utilisation et à la gestion des rejets. Des pratiques inadéquates peuvent non seulement réduire la productivité, mais également provoquer des impacts environnementaux et sociaux négatifs (AquacultureFeedMag, 2024; Gunjita Sinha & Dr. Mainak Banerjee, 2025; Yusoff et al., 2024).

L'évaluation de la qualité de l'eau dans différents systèmes d'aquaculture révèle que les effluents non maîtrisés peuvent altérer les écosystèmes aquatiques naturels. Pour garantir une production durable, il est donc crucial de mettre en place une gestion rigoureuse de la qualité de l'eau et des déchets (AquacultureFeedMag, 2024).

Parmi les solutions proposées :

- L'adoption de technologies avancées pour le traitement et le recyclage des eaux usées ;
- Le renforcement des compétences techniques des professionnels en matière de contrôle de la qualité de l'eau ;
- L'optimisation de la gestion des déchets générés par les systèmes aquacoles.

En Afrique, le manque de connaissance et de suivi de la qualité de l'eau demeure un facteur limitant majeur pour la production. Une gestion efficace et durable de ce paramètre est susceptible d'améliorer significativement la productivité et de contribuer à la soutenabilité du secteur sur le long terme (AquacultureFeedMag, 2024).

2.9. Paramètres d'analyses physico-chimiques

La qualité physico-chimique de l'eau est un facteur déterminant du bon fonctionnement des étangs piscicoles. Elle influence directement la santé, la croissance et la reproduction des poissons, ainsi que la dynamique écologique du milieu. Une surveillance rigoureuse de ces paramètres permet d'évaluer la productivité potentielle des étangs et d'identifier les déséquilibres susceptibles de compromettre la durabilité de la production (Trintignac et al,.2013).

2.9.1. Température

La température est le facteur écologique le plus influent dans les écosystèmes aquatiques. Elle conditionne le métabolisme, la respiration, la digestion et la croissance des poissons. De plus, elle contrôle la solubilité de l'oxygène dans l'eau : plus la température augmente, moins l'eau peut retenir d'oxygène dissous.

Pour les poissons tropicaux comme le tilapia (Oreochromis niloticus) et le poisson-chat africain (Clarias gariepinus), les températures optimales se situent entre 25 et 30 °C. Des températures inférieures à 20 °C ralentissent leur croissance, tandis que des températures supérieures à 35 °C peuvent entraîner une mortalité rapide par stress thermique et manque d'oxygène (Bhatnagar & Devi, 2019; Boyd & Tucker, 2012).

2.9.2. pH

Le pH traduit l'équilibre acido-basique du milieu. Le pH des eaux naturelles est fortement influencé par la concentration en dioxyde de carbone (CO_2), un gaz acide qui, en se dissolvant dans l'eau, forme de l'acide carbonique et abaisse ainsi le pH.

Un pH trop bas (< 6) provoque des lésions branchiales et diminue la croissance, tandis qu'un pH trop élevé (> 9) entraîne une précipitation des minéraux et des troubles physiologiques. La plupart des espèces piscicoles prospèrent dans un pH compris entre 6,5 et 9 (Bhatnagar & Devi, 2019; Boyd & Tucker, 2012).

2.9.3. Conductivité

La conductivité mesure la concentration totale en ions dissous, cette dernière dépend principalement de la concentration en ions majeurs tels que Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, NO_3^- et PO_4^{3-}, mais aussi de la température et de la quantité de matières dissoutes. Elle reflète donc la minéralisation et permet d'évaluer le niveau de richesse chimique ou la fraîcheur de l'eau.

Une conductivité trop faible indique une eau pauvre en sels minéraux, peu tamponnée et chimiquement instable. A l'inverse, une conductivité trop élevée peut révéler une pollution saline ou minérale excessive.

Dans les étangs piscicoles tropicaux, la conductivité optimale se situe entre 100 et 2000 µS/cm, selon la composition géologique et les espèces élevées (Bhatnagar & Devi, 2019).

2.9.4. TDS (Total Dissolved Solids)

Les solides dissous totaux (TDS) représentent l'ensemble des sels minéraux et substances inorganiques dissoutes dans l'eau, notamment les ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^{+}), potassium (K^{+}), chlorures (Cl^{-}), sulfates (SO_4^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^{-}).

Ce paramètre constitue un indicateur global du degré de minéralisation de l'eau et est étroitement lié à la conductivité électrique.

Dans les étangs piscicoles, des valeurs de TDS trop faibles traduisent une eau chimiquement instable et peu productive, tandis que des valeurs trop élevées peuvent provoquer un stress osmotique chez les poissons. Dans les systèmes d'eau douce, des teneurs comprises entre 80 et 200 mg/l sont généralement observées dans des milieux favorables à la pisciculture (Boyd, 2000 ; WHO, 2017).

2.9.5. Concentration en nutriments

Les nutriments (azote et phosphore principalement) constituent la base de la productivité biologique des étangs. Leur présence à des concentrations équilibrées favorise le développement du phytoplancton, source d'oxygène et de nourriture pour les poissons. Cependant, des excès entraînent une eutrophisation nuisible (prolifération d'algues, déficit nocturne en oxygène).

2.9.5.1. Nitrate (NO_3^-)

Les nitrates représentent la forme oxydée de l'azote. Ils proviennent de la dégradation des protéines alimentaires, des excréments et des engrais utilisés dans les étangs, de l'oxydation biologique de l'ammoniac (NH_3) puis du nitrite (NO_2^-) par les bactéries autotrophes du genre Nitrobacter. Ce processus, appelé nitrification, transforme des composés toxiques pour les poissons (ammoniac et nitrite) en une forme beaucoup plus stable et peu nocive. Dans un écosystème aquatique équilibré, les concentrations en nitrates se situent généralement entre 0,1

et 1 mg/l. Ces valeurs traduisent une activité biologique normale et un bon fonctionnement du processus de nitrification sans excès d'azote dans le milieu.

Lorsque la concentration en nitrates devient excessive, elle peut entraîner une eutrophisation du plan d'eau, favorisant la prolifération d'algues et la consommation de l'oxygène dissous, ce qui compromet la santé du milieu piscicole (Bhatnagar & Devi, 2019).

2.9.5.2. Phosphate (PO_4^{3-})

Le phosphate est le principal facteur limitant de la productivité primaire dans les étangs piscicoles. 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.

Des concentrations optimales de 0,05 à 0,07 mg/l favorisent une croissance équilibrée du phytoplancton. Au-delà, l'excès de phosphates peut provoquer une eutrophisation, avec prolifération de cyanobactéries et baisse nocturne d'oxygène.

En cas de déficit, une fertilisation minérale peut être appliquée pour enrichir l'eau, tout en maintenant un rapport azote/phosphore adapté, afin d'éviter les déséquilibres écologiques (Bhatnagar & Devi, 2019; Trintignac et al., 2013).

2.9.6. Eléments minéraux majeurs

Les éléments minéraux majeurs constituent des composantes essentielles de la qualité physico-chimique de l'eau des étangs piscicoles, car ils interviennent directement dans la régulation osmotique, la dureté, l'alcalinité et le maintien de l'équilibre physiologique des poissons, conditionnant ainsi leur croissance, leur santé et la stabilité du milieu aquatique.

2.9.6.1. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium est l'un des éléments minéraux majeurs présents dans les eaux et les sols des étangs piscicoles, généralement sous forme de carbonate de calcium ($CaCO_3$). Ce dernier joue un rôle essentiel dans la formation des os, des écailles et dans le fonctionnement musculaire.

Une eau trop douce (pauvre en calcium) rend les poissons vulnérables aux stress, les poissons peuvent absorber le calcium soit directement à partir de l'eau, soit indirectement par leur alimentation. Ce cation intervient également dans la régulation du pH, la dureté totale et la stabilité chimique du milieu aquatique. La concentration en calcium libre dans l'eau de culture piscicole doit se situer entre 25 et 100 mg/l (Bhatnagar & Devi, 2019).

2.9.6.2. 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 l'eau de culture piscicole doit se situer entre 5 et 50 mg/l (Boyd, 2000).

2.9.6.3. Sodium (Na^{+})

Le sodium est un ion majeur impliqué dans la régulation osmotique, l'équilibre hydrominéral et le fonctionnement neuromusculaire des poissons. Il intervient principalement au niveau des échanges ioniques branchiaux.

Dans les eaux douces utilisées en pisciculture, la concentration en sodium est généralement faible et se situe le plus souvent entre 2 et 20 mg/l, valeurs compatibles avec le maintien de l'équilibre physiologique des poissons (Boyd, 2000).

2.9.6.4. Potassium (K^{+})

Le potassium est un élément indispensable au fonctionnement cellulaire, à l'activité enzymatique et à la contraction musculaire. Bien qu'essentiel, il est requis en très faible quantité.

Dans les étangs piscicoles, les concentrations en potassium sont généralement comprises entre 1 et 5 mg/l. Des valeurs supérieures peuvent entraîner des déséquilibres ioniques et affecter la survie des poissons (WHO, 2022).

2.9.6.5. Chlorures (Cl^{-})

Les chlorures jouent un rôle important dans l'équilibre osmotique et la protection des poissons contre la toxicité des nitrites. Ils sont naturellement présents dans les eaux douces à faible concentration.

Dans les étangs piscicoles d'eau douce, les teneurs en chlorures se situent généralement entre 2 et 50 mg/l. Des concentrations plus élevées peuvent indiquer une augmentation de la salinité et, à long terme, provoquer des lésions branchiales (Boyd & Tucker, 2012 ; WHO, 2022).

2.9.6.6. Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates sont des ions naturellement présents dans les eaux de surface et souterraines, issus de la dissolution des roches et des apports anthropiques. A des concentrations modérées, ils n'ont pas d'effet négatif sur les poissons.

Dans les eaux utilisées en pisciculture, les teneurs en sulfates sont généralement comprises entre 5 et 50 mg/l, valeurs considérées compatibles avec le bon fonctionnement biologique des étangs (WHO, 2022).

2.9.6.7. Fluorures (F^-)

Les fluorures sont présents à l'état de traces dans les eaux naturelles. À faible concentration, ils ne présentent pas de risque pour les organismes aquatiques, mais à des teneurs élevées, ils peuvent provoquer des troubles physiologiques et osseux chez les poissons.

Dans les eaux douces destinées à la pisciculture, les concentrations en fluorures sont généralement nulles ou inférieures à 1 mg/l (WHO, 2022).

2.9.7. Eléments minéraux mineurs

2.9.7.1. Fer

Le fer est un métal dit « essentiel » en très faible quantité mais toxique en excès. Dans un contexte d'étang piscicole : Une concentration élevée de Fe (> 0,3 mg/l) peut troubler l'eau (turbidité, dépôts ferrugineux), obstruer les branchies des poissons et réduire l'oxygénation de l'eau.

Pour le fer (Fe) : la norme de l'United States Environmental Protection Agency (EPA) est 0,3 mg/l (Ndayisenga & Dusabe, 2022; US EPA, 2015).

2.9.7.2. Manganèse (Mn^{2+})

Le manganèse est un élément mineur essentiel à très faible dose, mais il devient toxique lorsque sa concentration augmente. En milieu aquatique, un excès de manganèse peut entraîner une coloration de l'eau, des dépôts sur les branchies et une diminution de l'oxygénation.

Dans les eaux utilisées pour la pisciculture, la concentration en manganèse est généralement inférieure à 0,1 mg/l, valeur au-delà de laquelle des effets négatifs sur la qualité de l'eau et la santé des poissons peuvent apparaître (WHO, 2022 ; USE PA, 2015).

2.9.8. Dureté totale

La dureté est un indicateur de la minéralisation de l'eau car elle prend en considération tous les sels minéraux dissous dans l'eau. Toutefois, même si des minéraux en très faibles quantités peuvent contribuer à sa valeur, la dureté totale exprime la concentration combinée de calcium et magnésium, exprimée en mg/l de $CaCO_3$ ou en degré français (°f). Elle affecte la stabilité chimique de l'eau et la santé osmotique des poissons.

Pour la pisciculture, une dureté entre 50 et 150 mg/l assure une bonne stabilité (Boyd, 2000).

Pour réduire la dureté de l'eau dans un étang piscicole, il est conseillé d'ajouter de la chaux vive, de l'alun ou les deux, tout en incorporant de la zéolite, ce qui permet de diminuer efficacement la concentration de calcium et de magnésium.

De plus, lors de fortes pluies, il convient d'éviter que les eaux de ruissellement chargées de limon et de sédiments pénètrent dans l'étang, afin de prévenir une augmentation excessive de la dureté et de préserver un environnement stable pour les poissons.

2.9.9. Alcalinité

L'alcalinité représente la capacité de l'eau à résister aux variations de pH, c'est-à-dire son pouvoir tampon. L'alcalinité joue un rôle essentiel dans la stabilité chimique des étangs piscicoles : elle atténue les fluctuations quotidiennes du pH dues à la photosynthèse et à la respiration. Une eau faiblement alcaline subit rapidement des changements de pH, pouvant devenir stressante pour les poissons et les organismes aquatiques.

Elle est principalement due aux ions carbonates (HCO_3^- et CO_3^{2-}).

Une faible alcalinité (< 50 mg/l $CaCO_3$) rend l'eau instable et vulnérable aux variations de pH journalières, tandis qu'une alcalinité de 50–200 mg/l $CaCO_3$ favorise un bon équilibre (Bhatnagar & Devi, 2019).

2.9.10. N-Kjeldhal

Ce paramètre évalue la teneur totale en azote, incluant l'ammoniac (NH_3) et l'azote organique provenant de la matière organique présente dans l'étang. Il renseigne sur la charge organique du bassin et sur la qualité de l'alimentation des poissons.

Des valeurs élevées indiquent un excès de matières organiques non dégradées, ce qui peut entraîner l'accumulation d'ammoniac toxique. Un suivi régulier de ce paramètre est donc essentiel pour maintenir un environnement sain et prévenir les risques pour les poissons. Bien qu'il n'existe pas de norme fixe, toute augmentation brusque doit être surveillée et traitée rapidement (APHA, AWWA & WEF, 2017).

2.9.11. Analyse des métaux lourds

Les métaux lourds (On les appelle 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 (fer, plomb, cadmium, etc.)

peuvent provenir du ruissellement agricole, des rejets urbains ou des sols contaminés. Ils s'accumulent dans les sédiments et les tissus des poissons, posant un risque sanitaire (Nashid et al., 2017).

2.9.11.1. Plomb

Le plomb est un métal hautement toxique pour les organismes aquatiques et humains. Il affecte notamment le système nerveux, la reproduction, et peut s'accumuler dans les muscles et les organes internes des poissons.

Pour le plomb (Pb) : l'OMS indique une valeur-repère de 0,01 mg/l (10 µg/l) (Ndayisenga & Dusabe, 2022; WHO, 2022).

2.9.11.2. Cadmium

Le cadmium est un métal non-essentiel, très toxique et bioaccumulatif : même à faible dose, il peut induire des effets chroniques graves chez les poissons et via consommation humaine.

Pour le cadmium (Cd) : l'OMS indique une valeur-repère de 0,003 mg/l (3 µg/l) pour l'eau potable (Ndayisenga & Dusabe, 2022; WHO,2011).

2.9.12. Oxygène dissous

L'oxygène dissous est essentiel à la respiration des poissons et à la dégradation de la matière organique, mais sa solubilité dans l'eau est faible. Un déficit entraîne une baisse de l'appétit, une réduction de la croissance, un stress métabolique et peut conduire à la mortalité.

Pour une production piscicole optimale, les concentrations doivent être supérieures à 5 mg/l, tandis que certaines espèces tolèrent ponctuellement 4 mg/l, mais des niveaux < 0,3 mg/l sont létaux.

Un déficit d'oxygène survient souvent lors d'une forte turbidité et d'une faible photosynthèse. Pour maintenir des conditions favorables, il convient d'éviter la surfertilisation, de contrôler la biomasse végétale, d'aérer ou recycler l'eau et de surveiller régulièrement les concentrations. Le maintien d'un niveau adéquat d'oxygène dissous permet de réduire le stress, prévenir la mortalité et favoriser une croissance stable des poissons (Bhatnagar & Devi, 2019; Trintignac et al.,2013).

2.9.13. Transparence de l'eau

La transparence de l'eau, mesurée au disque de Secchi, est un indicateur de la qualité et de la productivité biologique des étangs. Elle reflète la quantité de phytoplancton et de particules en suspension.

Une transparence entre 20 et 60 cm est considérée optimale pour la production piscicole. Une valeur < 20 cm indique une turbidité excessive pouvant être liée à une prolifération d'algues ou à l'action des poissons fouisseurs, nécessitant la vérification de l'oxygène dissous. À l'inverse, une transparence > 60 cm traduit un faible phytoplancton et une baisse de productivité naturelle, justifiant un apport modéré de fumure organique, après contrôle de l'oxygène.

Pour réduire la turbidité excessive, des coagulants comme la chaux vive CaO ou l'alun $Al_2(SO_4)_3$ à ~20 mg/l, ou du gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ à ~200 kg/1 000 m^3, peuvent être appliqués pour favoriser la floculation et la sédimentation des particules, tout en assurant une surveillance de l'oxygène dissous (Bhatnagar & Devi, 2019; Schlumberger & Girard, 2013; Trintignac et al.,2013).

CHAPITRE 3 : PARTIE EXPERIMENTALE

3.1. Matériel et Méthodes

3.1.1. Matériel

Au cours de notre travail, nous avons utilisé le matériel suivant pour l'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau :

- ✓ Balance technique (marque TP-303) : utilisée pour peser avec précision les réactifs solides nécessaires à la préparation des solutions.
- ✓ Ballons de verre : servent à la préparation et au mélange des différentes solutions chimiques.
- ✓ Étuve réglable de 0 à 230 °C (marque Binder) : utilisée pour sécher le matériel lavé afin d'éviter toute contamination.
- ✓ Plaque chauffante (marque KP515) : sert à chauffer certaines solutions pendant les analyses.
- ✓ Erlenmeyers et béchers : utilisés pour contenir, mélanger ou chauffer les solutions.
- ✓ Réfrigérateur (frigo) : permet de conserver et transporter les échantillons d'eau à basse température avant analyse.
- ✓ Flacons : destinés à la collecte et au stockage des échantillons d'eau.
- ✓ Pipettes automatiques : permettent de prélever avec précision des volumes définis de liquides.
- ✓ Fioles jaugées : utilisées pour la préparation des solutions à concentration exacte.
- ✓ Entonnoirs : facilitent le transfert et la filtration des liquides.
- ✓ Agitateur magnétique : permet d'obtenir un mélange homogène des solutions.

Pour les mesures spécifiques:

- ✓ Température et pH : mesurés à l'aide d'un pH-mètre électronique muni d'une sonde combinée.
- ✓ Conductivité électrique : mesurée avec un conductimètre modèle 3310.
- ✓ Solides dissous totaux (TDS) : déterminés à l'aide d'un TDS-mètre électronique ou estimés par conversion à partir des valeurs de conductivité électrique.

- ✓ D'un bain-marie et d'un spectrophotomètre.
- ✓ Éléments minéraux : déterminés à l'aide d'un Spectromètre d'Absorption Atomique (SAA) à flamme et four à lecture directe.
- ✓ Dureté totale : calculée à partir des concentrations de calcium et de magnésium.
- ✓ Alcalinité : mesurée à l'aide d'une burette graduée.
- ✓ Azote Kjeldahl (N-Kjeldahl) : utilisation d'un matras Kjeldahl, d'un minéralisateur, d'un distillateur et d'une burette de précision.
- ✓ Métaux lourds : analysés à l'aide du SAA/flamme et four à lecture directe.
- ✓ Oxygène dissous (DO) : déterminé au laboratoire à l'aide du matériel de titrage chimique et d'un équipement de mesure approprié, flacons spéciaux pour le dosage d'oxygène.
- ✓ Transparence de l'eau : déterminée à l'aide d'un disque de Secchi. Ce disque est circulaire et gradué en centimètres.

3.1.2. Méthodes d'échantillonnage et d'analyses chimiques

3.1.2.1. Méthodes d'échantillonnage

Les campagnes d'échantillonnage ont été réalisées dans deux étangs piscicoles choisis selon leur accessibilité, leur mode de gestion et leur représentativité écologique. Les deux sites retenus sont :

- Site 1 : zone de RUKARAMU, étang appartenant à un particulier.
- Site 2 : zone de Ntahangwa, étang géré par le Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage (MINEAGRIE).

Chaque site comporte deux étangs, mais un seul a été retenu par tirage aléatoire pour les prélèvements et les mesures physico-chimiques.

Les échantillonnages ont été réalisés le matin, entre 8h00 et 9h00, afin de limiter les fluctuations diurnes de température et de pH.

Les paramètres physico-chimiques mesurés in situ comprenaient : la température, le pH, la conductivité électrique et la Transparence de l'eau.

Les prélèvements d'eau ont été effectués à une profondeur de 30 à 40 cm sous la surface de l'eau, conformément aux recommandations de l'ISO 5667-6 :2016 pour les étangs de faible

profondeur. Cette profondeur permet d'éviter les perturbations superficielles tout en obtenant un échantillon représentatif de la colonne d'eau.

Les échantillons ont été recueillis dans des flacons stériles en plastique (5l), soigneusement rincés à l'eau du site avant le prélèvement, puis placés immédiatement dans une glacière réfrigérée (4 °C). Ils ont ensuite été transportés au laboratoire de l'ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi) pour les analyses physico-chimiques complémentaires.

3.1.2.2. Sites d'échantillonnages

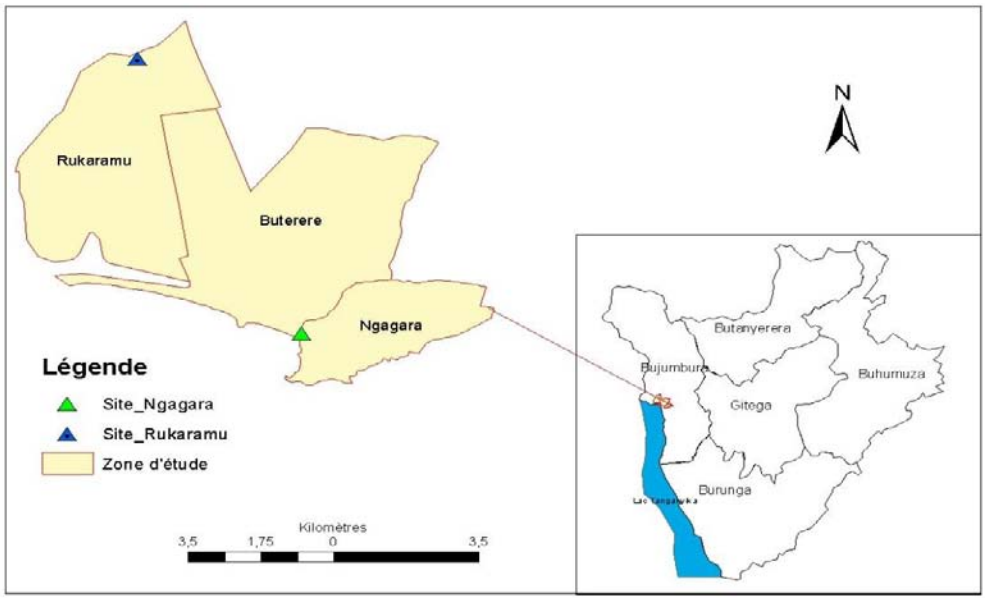


Figure 3.1: Carte de la zone d'étude montrant la localisation des sites d'échantillonnage.

Le Site 1 est situé dans la zone de RUKARAMU (Province de Bujumbura), aux coordonnées GPS S03°17.422' ; E029°18.352', à une altitude d'environ 800 m.

Le Site 2 est localisé dans la zone de Ngagara, sur la route de Gatumba (Province de Bujumbura), aux coordonnées S03°21.622' ; E029°20.494', à une altitude d'environ 778 m.

3.1.2.2.1. Etang piscicole de RUKARAMU (Site 1)

L'étang étudié est alimenté par la rivière Mpanda, principale source d'eau de la région.

Trois séries d'échantillons ont été prélevées, espacées de quatre jours chacune, afin de suivre les variations temporelles à court terme.

Pour chaque série, les prélèvements ont été effectués à trois points représentatifs : les deux rives et le centre de l'étang, à une profondeur moyenne de 35 cm.

Les mesures in situ (température, pH, conductivité, transparence) ont été réalisées directement sur le terrain avant conditionnement des échantillons.

Après chaque série, les échantillons ont été conservés dans le réfrigérateur portable et transportés vers le laboratoire de l'ISABU pour analyse.



Figure 3.2: Etang piscicole de RUKARAMU (Site 1)

3.1.2.2.2. Etang piscicole de Ngagara (Site 2)

L'étang sélectionné est alimenté par un affluent de la rivière Chanique, ce qui assure une alimentation quasi permanente en eau douce.

Comme pour le premier site, trois échantillonnages espacés de quatre jours ont été réalisés entre 8h00 et 9h00 du matin.

Les prélèvements ont été effectués à trois points différents (bords et centre) et à une profondeur moyenne de 35 cm.

Les mesures in situ ont concerné la température, le pH, la conductivité et la transparence. Après chaque série, les échantillons ont été placés dans une glacière réfrigérée et acheminés vers le laboratoire de l'ISABU pour analyses complémentaires.



Figure 3.3: Etang piscicole de Ngagara (Site 2)

3.2. Présentation et discussion des résultats

3.2.1. Résultats d'analyse physicochimique

Le tableau suivant présente les résultats des analyses physico-chimiques des étangs piscicoles étudiés, ainsi que les valeurs moyennes pour chaque paramètre.

Tableau 3.1: Tableau synthétique des résultats analytiques ainsi que leurs moyennes

Paramètres physico-chimiques	Site1				Site2				Ecart-moyen
	1er jour	2ème jour	3ème jour	Moyenne	1er jour	2ème jour	3ème jour	Moyenne	
Température en ºC	25,8	24,5	25,1	25,13	25,9	25,2	26,2	25,77	0,64
pH	7,88	7,27	7,16	7,44	8,00	7,77	7,79	7,85	0,41
Conductivité(µS/cm)	223	223	226	224,00	813	787	741	780,33	556,33
TDS(mg/l)	118	123	132	124,33	285	298	312	298,33	174
Nitrate(mg/l)	0,267	0,451	0,174	0,30	0,225	0,337	0,393	0,32	0,02
Phosphate(mg/l)	1,24	0,390	0,319	0,65	0,602	0,667	0,525	0,60	0,05
Calcium(mg/l)	9,59	9,20	9,47	9,42	46,3	39,8	31,7	39,27	29,85
Magnésium(mg/l)	5,68	5,65	5,69	5,67	42,5	42,1	42,0	42,20	36,53
Sodium(mg/l)	6,8	7	7,3	7,03	13	13,2	13,8	13,33	6,3
Potassium(mg/l)	2	2,2	2,5	2,23	3,4	3,6	3,7	3,57	1,34
Chlorures(mg/l)	5,80	6,10	6,00	5,97	11	11,2	11,4	11,2	5,23
Sulfates(mg/l)	18	19	21	19,33	41	43	45	43	23,67
Fluorures(mg/l)	0	0	0	0	0,2	0,1	0	0,1	0,1
Fer(mg/l)	3	3	3,2	3,07	0,2	0,25	0,23	0,23	2,84
Manganèse(mg/l)	0,4	0,2	0,3	0,3	0	0	0	0	0,30
Dureté totale (mg/l $CaCO_3$)	47,3	46,2	47,1	46,87	291	273	252	272,00	225,13
Carbonates (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bicarbonates(mg/l $CaCO_3$)	51	42,6	50	47,9	203,50	191	198,50	197,7	149,8
N-Kjeldhal (mg/l)	6,72	6,30	6,42	6,48	6,77	5,97	5,95	6,23	0,25
Plomb	≤0,5	≤0,5	≤0,5	–	≤0,5	≤0,5	≤0,5	–	–
Cadmium	≤0,02	≤0,02	≤0,02	–	≤0,02	≤0,02	≤0,02	–	–
Oxygène dissous (mg/l)	9,23	9,18	7,56	8,66	2,05	2,03	2,18	2,08	6,58
Transparence de l'eau (Cm)	32,06	31,20	28,12	30,46	25,92	25,02	25,38	25,44	5,02

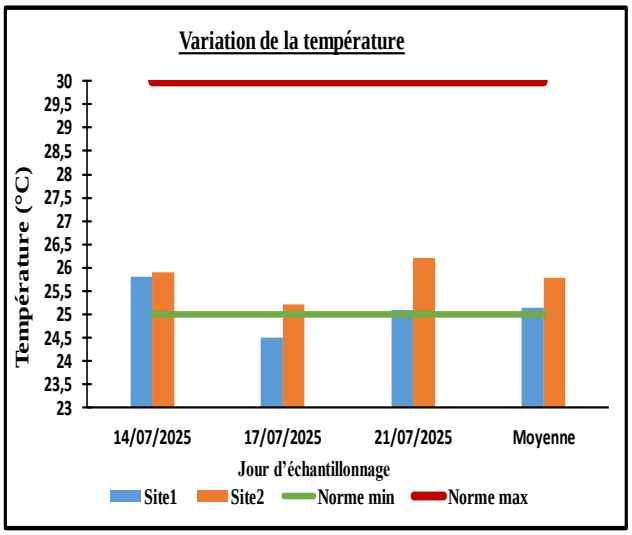
3.2.2. Discussion des résultats

3.2.2.1. Paramètres physiques

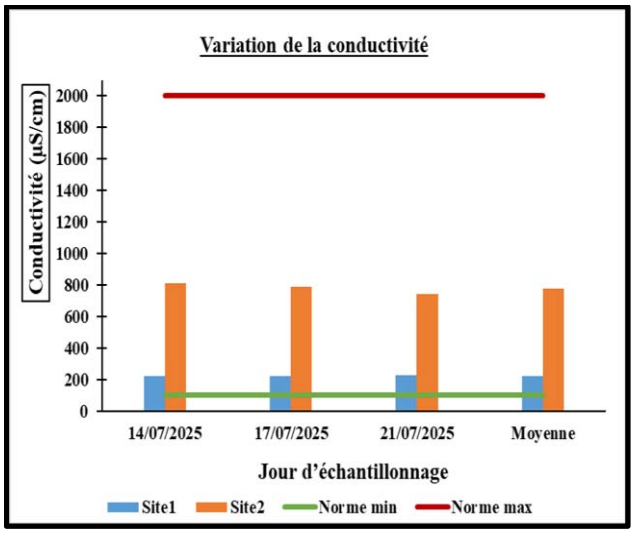
Les figures ci-après illustrent l'évolution des paramètres physiques au niveau des différentes stations d'échantillonnage.

Figure 3.4: Evolution des paramètres physiques au cours de trois jours dans les deux sites

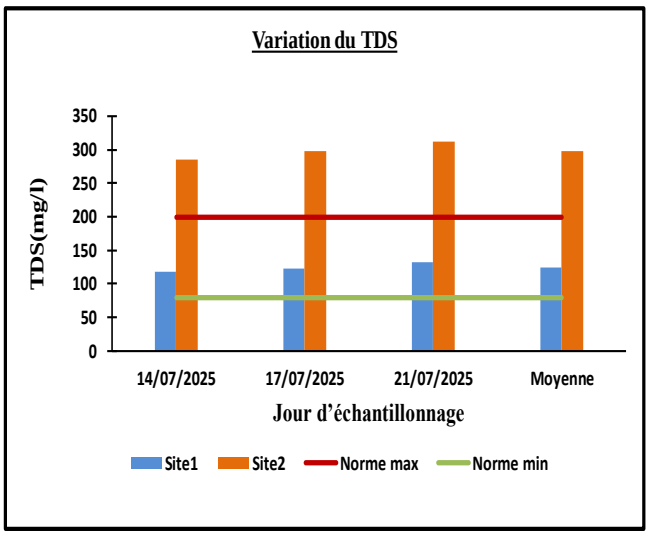
(1)



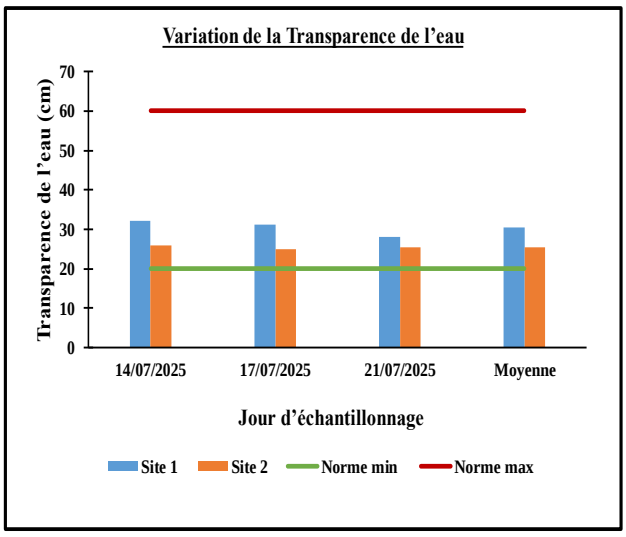
(2)



(3)



(4)



Pour les paramètres physiques, les résultats montrent des variations modérées, mais contrastées selon les sites, tout en restant globalement compatibles avec les exigences de la pisciculture tropicale. Les paramètres analysés comprennent la température de l'eau (1), la conductivité électrique (2), les solides dissous totaux – TDS (3) et la transparence (4), qui

constituent des indicateurs essentiels de la stabilité physique et hydrologique des étangs piscicoles (Boyd & Tucker, 2012 ; FAO, 2018).

Pour la température (1), les résultats expérimentaux montrent que, pour le site 1, la température de l'eau varie entre 24,5 °C et 25,8 °C, avec une moyenne de 25,13 °C sur l'ensemble de la période d'étude. Ces valeurs se situent globalement dans la plage normative recommandée pour la pisciculture tropicale, comprise entre 25 °C (norme minimale) et 30 °C (norme maximale). La faible amplitude thermique observée traduit une bonne stabilité du milieu aquatique, caractéristique des étangs à profondeur moyenne bénéficiant d'un renouvellement régulier de l'eau. Cette stabilité thermique est favorable aux processus physiologiques des poissons, notamment la digestion, la croissance et la reproduction, tout en maintenant une solubilité adéquate de l'oxygène dissous. Le régime thermique du site 1 suggère ainsi un environnement équilibré, probablement lié à l'homogénéité bathymétrique de l'étang et à l'influence régulatrice de l'alimentation en eau provenant de la rivière Mpanda. Au site 2, les températures mesurées varient entre 25,2 °C et 26,2 °C, avec une moyenne de 25,77 °C, valeur légèrement supérieure à celle du site 1. Cette différence thermique peut être attribuée aux conditions environnementales locales, notamment une exposition solaire plus directe, une couverture végétale réduite et un renouvellement de l'eau plus limité. Bien que ces températures restent conformes aux normes piscicoles (25–30 °C), une élévation thermique persistante pourrait, en cas d'augmentation de la charge organique ou de la densité piscicole, entraîner une diminution de la concentration en oxygène dissous. La comparaison entre les deux sites met en évidence un écart moyen de 0,64 °C, le site 2 étant légèrement plus chaud. L'évolution temporelle montre des variations modérées et parallèles, avec une légère baisse au deuxième jour, suivie d'une remontée progressive au troisième jour, traduisant une réponse normale du milieu aux conditions climatiques et indiquant l'absence de stress thermique significatif pour les poissons. La température de l'eau dans les deux sites respecte la norme minimale de 25 °C et demeure largement inférieure à la norme maximale de 30 °C, confirmant un régime thermique stable et favorable à la croissance, à la reproduction et à la productivité piscicole (Boyd, 2020).

Pour la conductivité (2), au site 1, la conductivité de l'eau varie faiblement entre 223 et 226 µS/cm, avec une moyenne de 224 µS/cm. Cette valeur se situe confortablement dans la plage recommandée pour les étangs piscicoles tropicaux (100–2000 µS/cm). La très faible amplitude observée traduit une bonne stabilité ionique, typique des étangs alimentés par des eaux de surface douces et régulièrement renouvelées, notamment par la rivière Mpanda. Cette

conductivité indique une teneur modérée en sels dissous, favorable à l'équilibre osmotique des poissons et au développement du plancton.

Au site 2, les valeurs sont nettement plus élevées, comprises entre 741 et 813 µS/cm, avec une moyenne de 780,33 µS/cm, également inférieures au seuil maximal recommandé de 2000 µS/cm. Cette forte conductivité traduit une minéralisation élevée, probablement liée à la nature du substrat, à l'évaporation et à un renouvellement hydrique limité. Malgré ces valeurs supérieures à celles du site 1, elles restent tolérables pour les espèces piscicoles tropicales, notamment le tilapia et le poisson-chat africain.

L'écart moyen entre les deux sites est de 556,33 µS/cm, révélant des conditions hydrogéochimiques très contrastées. Le site 1 présente un milieu faiblement minéralisé et chimiquement stable, tandis que le site 2, plus minéralisé, pourrait influencer la productivité et la qualité de l'eau à long terme. La diminution progressive de la conductivité observée au site 2 suggère un effet de dilution, possiblement lié à des apports d'eau douce provenant de précipitations ou du lac Tanganyika.

Ainsi, la conductivité du site 1 est proche de la plage optimale et favorable à la pisciculture, tandis que celle du site 2, bien que plus élevée, demeure compatible avec la pisciculture tropicale sous condition d'un renouvellement hydrique régulier (Boyd & Tucker, 2012).

Pour les TDS (3), au site 1, les valeurs varient de 118 à 132 mg/l, avec une moyenne de 124,33 mg/l, comprise entre la norme minimale (80 mg/l) et la norme maximale (200 mg/l), traduisant une minéralisation modérée et favorable à la pisciculture. Au site 2, les valeurs s'échelonnent de 285 à 312 mg/l, avec une moyenne de 298,33 mg/l, supérieure à la norme maximale, indiquant une minéralisation élevée, probablement liée à l'accumulation de sels dissous et à un renouvellement hydrique limité, possiblement influencé par le lac Tanganyika. L'écart moyen entre les deux sites est de 174 mg/l, révélant des conditions de minéralisation nettement contrastées. Le site 1 respecte les normes piscicoles, tandis que le site 2, bien que hors norme, reste tolérable pour les espèces tropicales sous réserve d'un renouvellement régulier de l'eau (Boyd, 2020).

Pour la transparence (4), Au site 1, les mesures de transparence sont de 32,06 cm, 31,20 cm et 28,12 cm, avec une moyenne de 30,46 cm. Ces valeurs se situent bien dans la plage optimale (20–60 cm), indiquant une transparence modérée compatible avec une activité photosynthétique suffisante et une production biologique équilibrée. La légère baisse observée le troisième jour suggère une augmentation temporaire de particules en suspension, telles que

des sédiments remués ou une prolifération passagère d'algues. Les variations observées reflètent une dynamique naturelle de l'eau et du phytoplancton, sans compromettre la qualité générale du milieu. Au site 2, les valeurs sont de 25,92 cm, 25,02 cm et 25,38 cm, avec une moyenne de 25,44 cm. La transparence est donc inférieure à celle du site 1, mais reste dans la plage optimale, indiquant un environnement stable. Les variations très faibles suggèrent un état stable, mais marqué par une turbidité persistante, pouvant limiter partiellement la photosynthèse et l'oxygénation de l'eau, et contribuant aux faibles concentrations en oxygène observées précédemment. La comparaison montre que le site 1 offre un environnement aquatique plus productif et équilibré, avec une transparence adéquate et des fluctuations naturelles favorables à la croissance des poissons. Le site 2, bien que non critique, présente une transparence plus faible et nécessite un suivi régulier pour éviter que la turbidité ne devienne un facteur limitant pour la photosynthèse et l'oxygénation. L'écart moyen de transparence entre les deux sites est de 5,02 cm (30,46 − 25,44 cm), soulignant un avantage notable du site 1 en termes de clarté et de conditions environnementales favorables à la pisciculture (Boyd & Tucker, 2012).

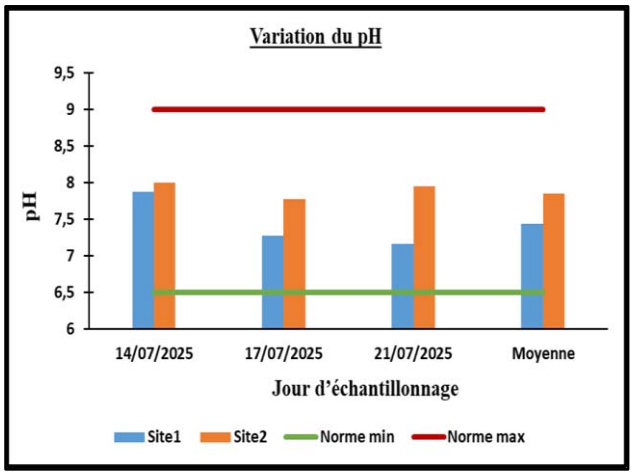
Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les deux sites présentent des conditions physico-chimiques compatibles avec la pisciculture tropicale. Le site 1 se distingue par une stabilité thermique, une conductivité modérée, une minéralisation équilibrée et une transparence optimale, offrant un environnement favorable à la croissance, à la reproduction et à la productivité piscicole. Le site 2, bien que plus minéralisé et légèrement plus turbide, reste exploitable sous réserve d'une gestion attentive du renouvellement de l'eau et de la charge organique, garantissant ainsi le maintien d'un milieu aquatique sain et productif pour les espèces tropicales élevées.

3.2.2.2. Paramètres chimiques

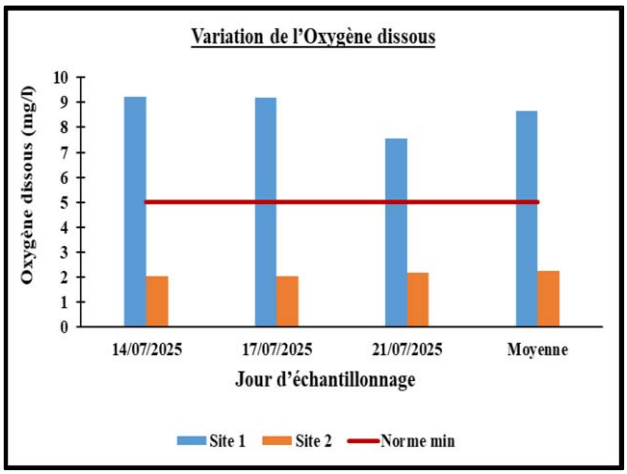
Les figures ci-après présentent l'évolution des paramètres chimiques aux différentes stations d'échantillonnage.

Figure 3.5: Evolution des paramètres chimiques au cours de trois jours dans les deux sites

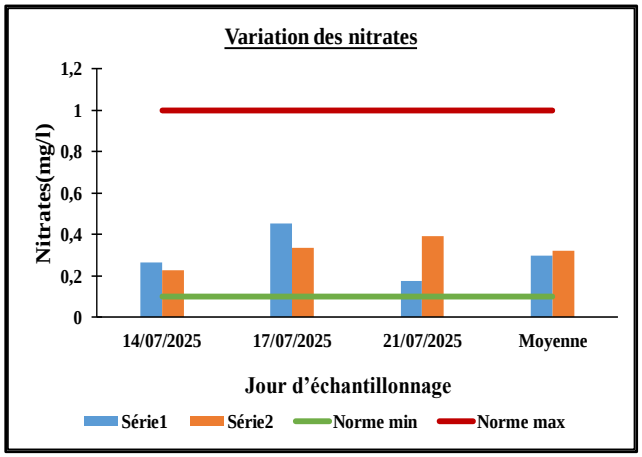
(1)



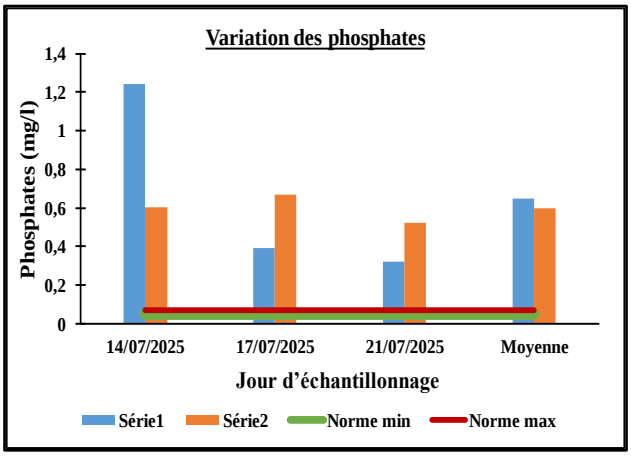
(2)



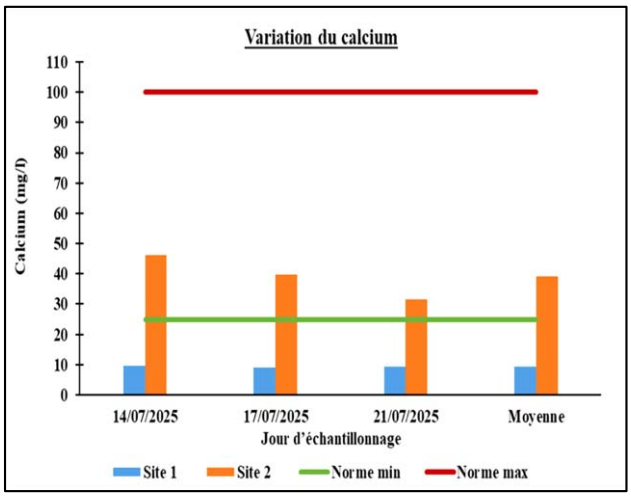
(3)



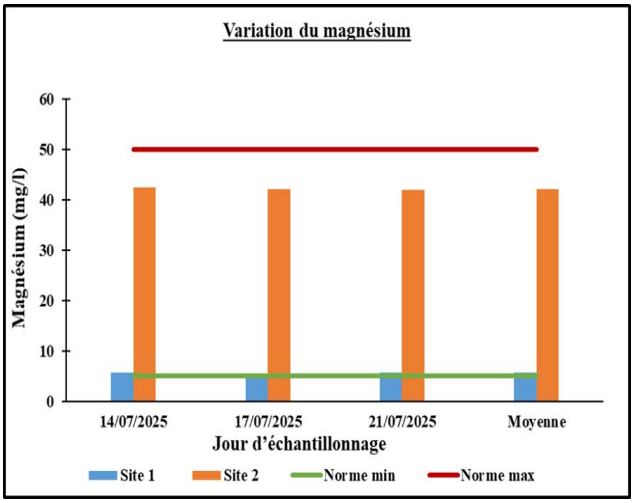
(4)



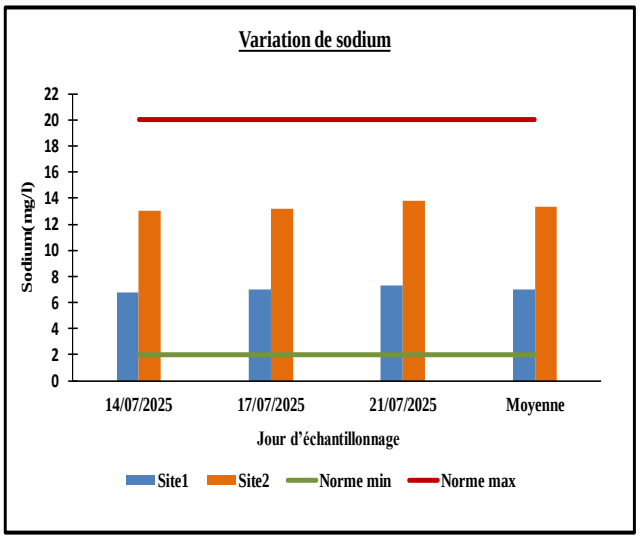
(5)


Variation du calcium
Calcium (mg/l)
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
14/07/2025
17/07/2025
21/07/2025
Moyenne
Jour d'échantillonnage
Site 1
Site 2
Norme min
Norme max

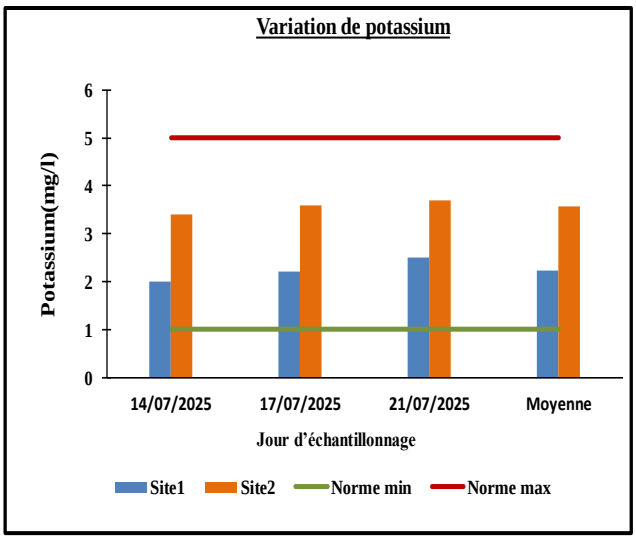
(6)


Variation du magnésium
Magnésium (mg/l)
60
50
40
30
20
10
0
14/07/2025
17/07/2025
21/07/2025
Moyenne
Jour d'échantillonnage
Site 1
Site 2
Norme min
Norme max

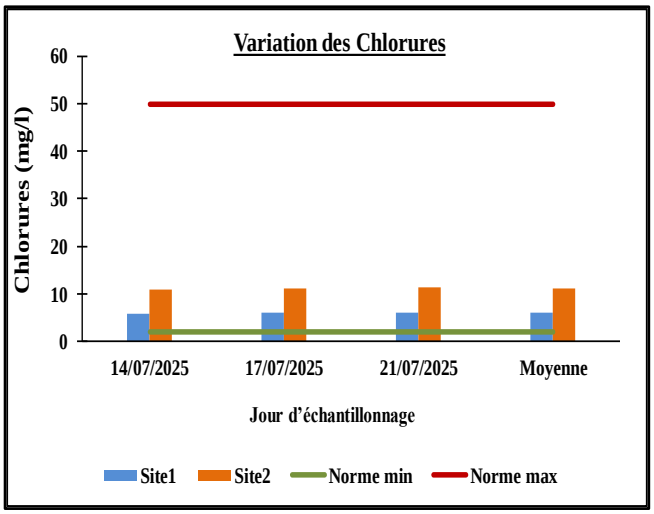
(7)


Variation de sodium
Sodium(mg/l)
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
14/07/2025
17/07/2025
21/07/2025
Moyenne
Jour d'échantillonnage
Site1
Site2
Norme min
Norme max

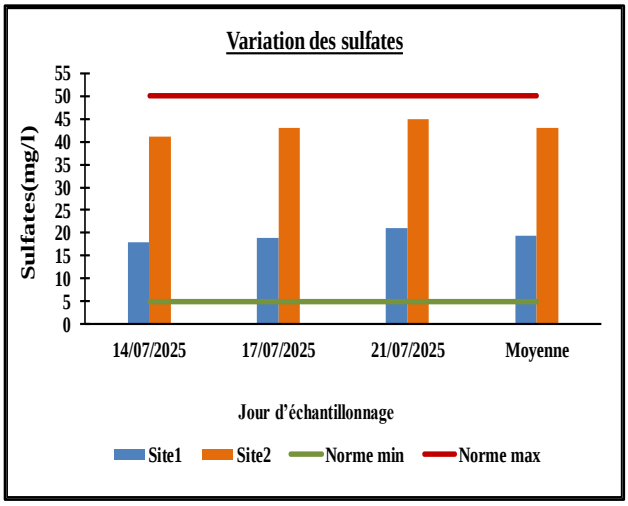
(8)


Variation de potassium
Potassium(mg/l)
6
5
4
3
2
1
0
14/07/2025
17/07/2025
21/07/2025
Moyenne
Jour d'échantillonnage
Site1
Site2
Norme min
Norme max

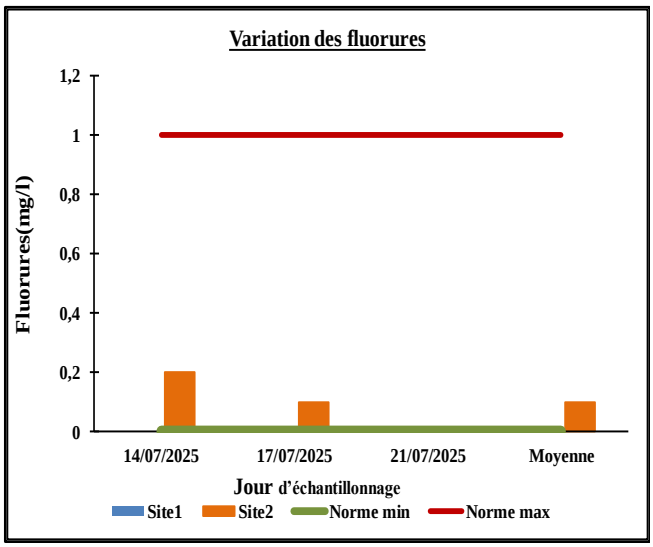
(9)


Variation des Chlorures
Chlorures (mg/l)
60
50
40
30
20
10
0
14/07/2025
17/07/2025
21/07/2025
Moyenne
Jour d'échantillonnage
Site1
Site2
Norme min
Norme max

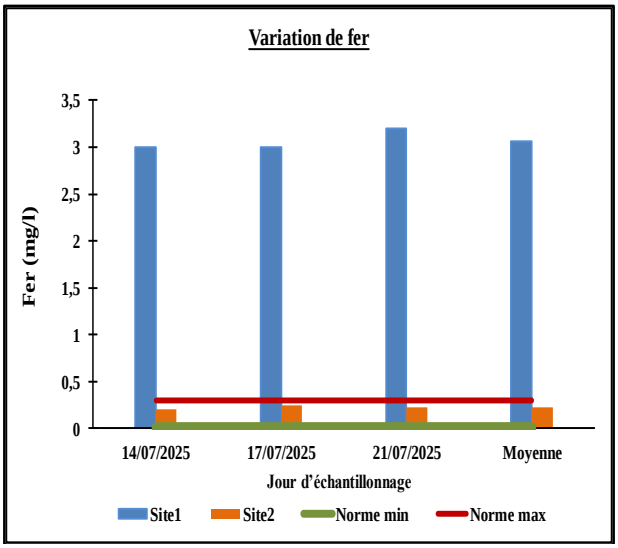
(10)


Variation des sulfates
Sulfates(mg/l)
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
14/07/2025
17/07/2025
21/07/2025
Moyenne
Jour d'échantillonnage
Site1
Site2
Norme min
Norme max

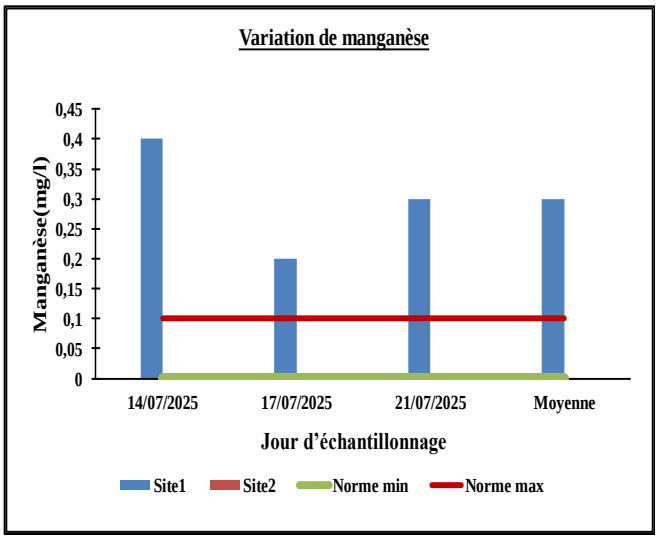
(11)



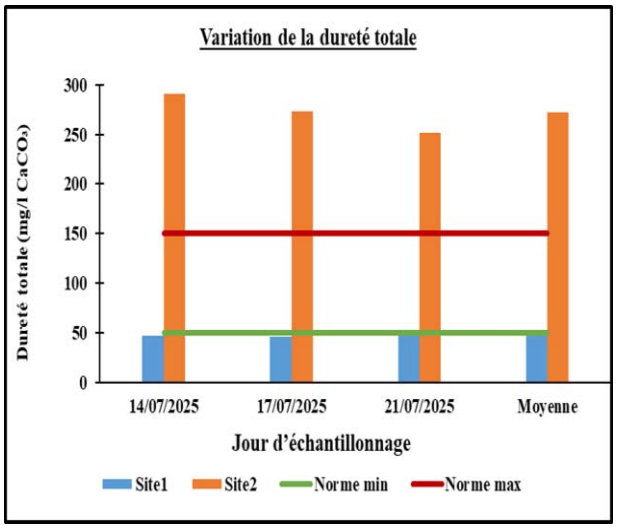
(12)



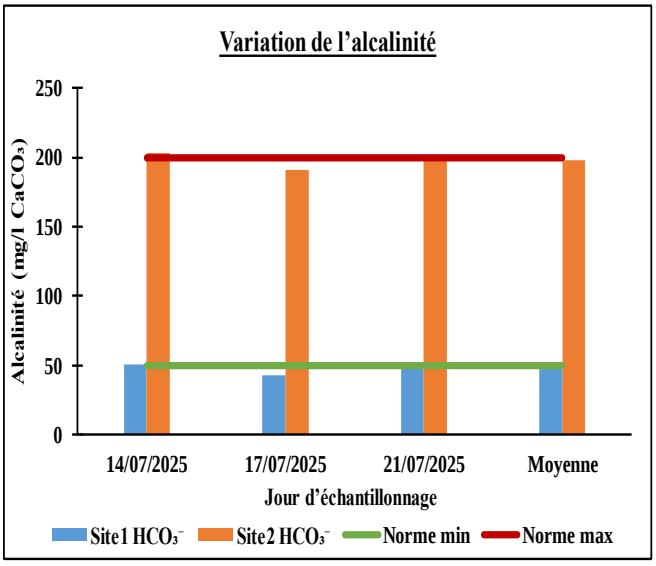
(13)



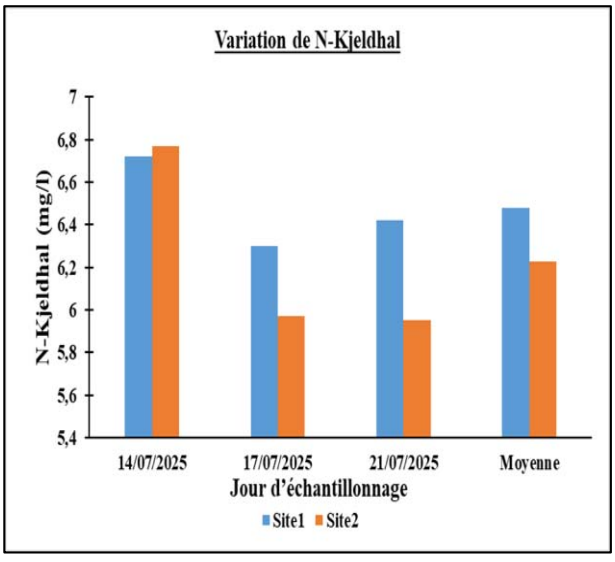
(14)



(15)



(16)



Pour les paramètres chimiques, les résultats montrent des conditions contrastées entre les deux sites, avec des implications directes sur la qualité de l'eau et la pisciculture.

Pour le pH (1), les mesures au site 1 varient entre 7,16 et 7,88, avec une moyenne de 7,44, traduisant un milieu légèrement alcalin, conforme à la norme minimale de 6,5 et largement inférieure à la norme maximale de 9,0 recommandée pour la pisciculture tropicale. Ce pH (1) modéré favorise la croissance du phytoplancton, l'assimilation des nutriments et le métabolisme normal des poissons. La légère diminution observée au troisième jour (7,16) peut être liée à une accumulation de matière organique et à la respiration microbienne, qui libère du CO_2 et abaisse temporairement le pH. Au site 2, les valeurs du pH (1) sont plus élevées, comprises entre 7,77 et 8,00, avec une moyenne de 7,85, indiquant un milieu plus alcalin, probablement influencé par une concentration plus élevée en carbonates et bicarbonates et une activité photosynthétique plus intense. Cette alcalinité favorise la productivité primaire, améliore la disponibilité en oxygène dissous et contribue à la stabilité biologique du site. L'écart moyen de 0,41 unité de pH (1) entre les sites traduit une différence physico-chimique liée à la composition du sol, à la charge organique et à la dynamique photosynthétique. Le site 1 présente un équilibre acido-basique plus neutre, tandis que le site 2 bénéficie d'une alcalinité propice à une productivité élevée et à une meilleure régulation du pH (Al-Mashagbah, 2015).

L'oxygène dissous (2) montre également des différences importantes. Au site 1, les valeurs sont de 9,23 mg/l, 9,18 mg/l et 7,56 mg/l, moyenne 8,66 mg/l, largement supérieures au seuil minimal de 5 mg/l, assurant un métabolisme optimal, une respiration efficace et une croissance normale des poissons. La baisse du troisième jour reflète probablement un pic d'activité biologique ou une diminution temporaire de la photosynthèse, mais reste non critique. En revanche, au site 2, l'oxygène dissous (2) est très faible, compris entre 2,03 mg/l et 2,18 mg/l, moyenne 2,08 mg/l, traduisant un stress hydrique sévère pour les poissons, avec des risques de ralentissement de croissance et de baisse d'appétit. Cette situation peut résulter de la turbidité élevée, d'une forte charge organique et d'un renouvellement d'eau insuffisant. L'écart moyen de 6,58 mg/l souligne des conditions hydriques très contrastées, ce qui nécessite des mesures correctives pour le site 2, comme l'aération ou la régulation de densité piscicole (Boyd & Tucker, 2012).

Pour les nutriments, les nitrates (3) au site 1 varient entre 0,174 et 0,451 mg/l, moyenne 0,30 mg/l, et au site 2 de 0,225 à 0,393 mg/l, moyenne 0,32 mg/l. Ces concentrations restent dans les limites recommandées (0,1–1 mg/l), assurant une disponibilité équilibrée en azote sans

risque d'eutrophisation. L'écart moyen de 0,02 mg/l indique des conditions azotées comparables entre les sites.

Les phosphates (4) au site 1 varient de 0,319 à 1,24 mg/l, moyenne 0,65 mg/l, et au site 2 de 0,525 à 0,667 mg/l, moyenne 0,60 mg/l. Ces valeurs dépassent la plage optimale (0,05–0,07 mg/l), traduisant un enrichissement en phosphore favorable à la productivité, mais nécessitant un suivi pour éviter une eutrophisation excessive. Le site 1 présente une variabilité plus marquée, liée à des apports ponctuels et à une assimilation rapide, tandis que le site 2 montre une dynamique plus stable. L'écart moyen en phosphates de 0,05 mg/l est modéré, confirmant que les deux sites offrent un potentiel nutritif adéquat pour la pisciculture (FAO, 2018).

Pour les éléments majeurs, le site 1 se caractérise par une faible minéralisation. Le calcium (5) varie de 9,20 à 9,59 mg/l, avec une moyenne de 9,42 mg/l, valeur inférieure à la plage recommandée pour la pisciculture tropicale (25–100 mg/l), traduisant une eau peu dure et un pouvoir tampon limité. Le magnésium (6) est compris entre 5,65 et 5,69 mg/l, avec une moyenne de 5,67 mg/l, se situant dans la plage recommandée (5–50 mg/l) et assurant un apport suffisant pour le métabolisme et l'osmorégulation des poissons.

Les concentrations en sodium (7) varient de 6,8 à 7,3 mg/l, avec une moyenne de 7,03 mg/l, valeurs inférieures à la plage recommandée (20–200 mg/l), indiquant un apport faible mais généralement tolérable en pisciculture continentale. Le potassium (8) varie de 2 à 2,5 mg/l, avec une moyenne de 2,23 mg/l, se situant dans la plage recommandée (1–5 mg/l) et contribuant à l'équilibre ionique du milieu. Les chlorures (9) présentent des concentrations comprises entre 5,80 et 6,10 mg/l, avec une moyenne de 5,97 mg/l, valeurs conformes à la plage recommandée (2–50 mg/l) et traduisant une faible salinité. Les sulfates (10) sont compris entre 18 et 21 mg/l, avec une moyenne de 19,33 mg/l, respectant la plage recommandée (5–50 mg/l) et indiquant une minéralisation modérée. Enfin, les fluorures (11) sont nuls, avec une moyenne de 0 mg/l, restant dans la limite admissible (0–1 mg/l). L'ensemble de ces résultats traduit une eau douce, chimiquement stable mais faiblement tamponnée, adaptée à la pisciculture tropicale, bien que sensible aux variations physico-chimiques.

Au site 2, les concentrations ioniques sont nettement plus élevées, traduisant une minéralisation plus marquée. Le calcium (5) varie de 31,7 à 46,3 mg/l, avec une moyenne de 39,27 mg/l, se situant dans la plage recommandée, conférant à l'eau une dureté modérée et une meilleure capacité tampon. Le magnésium (6) est compris entre 42,0 et 42,5 mg/l, avec une

moyenne de 42,2 mg/l, respectant les recommandations normatives et contribuant efficacement aux fonctions physiologiques des poissons.

Le sodium (7) présente des concentrations de 13 à 13,8 mg/l, avec une moyenne de 13,33 mg/l, valeurs inférieures aux recommandations, mais restant compatibles avec un élevage piscicole continental. Le potassium (8) varie de 3,4 à 3,7 mg/l, avec une moyenne de 3,57 mg/l, se situant dans la plage recommandée. Les chlorures (9) affichent des concentrations de 11 à 11,4 mg/l, avec une moyenne de 11,2 mg/l, valeurs conformes aux recommandations. Les sulfates (10) varient de 41 à 45 mg/l, avec une moyenne de 43 mg/l, restant dans la plage recommandée, bien qu'à des niveaux relativement élevés. Les fluorures (11) sont compris entre 0 et 0,2 mg/l, avec une moyenne de 0,1 mg/l, demeurant conformes aux seuils admissibles. Ces caractéristiques traduisent une eau plus minéralisée et chimiquement stable, présentant une capacité tampon supérieure, favorable au métabolisme des poissons et à la productivité piscicole.

Les écarts moyens notables observés entre les deux sites (Ca^{2+} : 29,85 mg/l ; Mg^{2+} : 36,53 mg/l ; SO_4^{2-} : 23,67 mg/l) mettent en évidence une forte disparité géochimique, conférant au site 2 une eau plus dure et mieux tamponnée, présentant un potentiel chimique plus favorable à l'élevage d'espèces tropicales, telles que le tilapia et le poisson-chat africain (Bhatnagar & Devi, 2019, Boyd, 2000).

Pour les éléments mineurs, le fer (12) et le manganèse (13) montrent des différences marquées. Au site 1, le fer (12) varie entre 3,0 et 3,2 mg/l, moyenne 3,07 mg/l, et le manganèse (13) entre 0,2 et 0,4 mg/l, moyenne 0,30 mg/l, dépassant largement les normes (0–0,3 mg/l pour le fer et 0–0,1 mg/l pour le manganèse). Cette surcharge peut entraîner un colmatage des branchies, une réduction de l'efficacité respiratoire et une altération de la qualité de l'eau. Elle est principalement attribuable aux activités agricoles environnantes, à l'érosion des sols riches en oxydes ferriques et manganésiens, et au ruissellement qui transporte ces éléments dans l'étang. En revanche, au site 2, le fer (12) est compris entre 0,20 et 0,25 mg/l, moyenne 0,23 mg/l, et le manganèse (13) est nul (0 mg/l), respectant pleinement les normes piscicoles. Cette conformité peut être expliquée par plusieurs facteurs : une pression agricole moindre, un renouvellement régulier de l'eau qui dilue les métaux, une turbidité plus faible et une dynamique biologique favorisant la précipitation et l'immobilisation du fer et du manganèse dans les sédiments, limitant leur disponibilité en solution.

L'écart moyen entre les deux sites est notable, avec Fe^{2+} : 2,84 mg/l et Mn^{2+} : 0,30 mg/l, révélant une forte disparité géochimique et soulignant l'importance de la gestion des apports métalliques pour maintenir la qualité de l'eau dans les étangs piscicoles. Ainsi, le site 2 offre un environnement stable et sûr pour les poissons, sans risque de stress métallique, garantissant un fonctionnement optimal des branchies, une respiration efficace, un métabolisme énergétique normal et une croissance harmonieuse, tout en minimisant le risque de bioaccumulation de métaux lourds dans les tissus, ce qui est essentiel pour la productivité durable des étangs piscicoles (Boyd, 2000).

La dureté totale (14) au site 1 varie de 46,2 à 47,3 mg/l, avec une moyenne de 46,87 mg/l, légèrement inférieure à la limite minimale recommandée pour la pisciculture tropicale (50 mg/l) et bien en deçà de la limite maximale (150 mg/l), mais restant compatible avec un bon équilibre chimique de l'eau. Au site 2, elle se situe entre 252 et 291 mg/l, avec une moyenne de 272 mg/l, indiquant une eau très dure. L'écart moyen entre les deux sites est de 225,13 mg/l, reflétant une forte hétérogénéité minérale entre les zones étudiées, ce qui peut influencer la disponibilité des ions pour la croissance des poissons et le maintien d'un équilibre ionique optimal.

L'alcalinité (15) au site 1 est faible, comprise entre 42,6 et 51 mg/l $CaCO_3$, avec une moyenne de 47,9 mg/l $CaCO_3$, tandis qu'au site 2 elle est élevée, variant de 191 à 203,5 mg/l $CaCO_3$, pour une moyenne de 197,7 mg/l $CaCO_3$. Ces valeurs se situent respectivement légèrement en dessous de la norme minimale (50 mg/l $CaCO_3$) et dans la fourchette supérieure recommandée (200 mg/l $CaCO_3$), conférant au site 2 un excellent pouvoir tampon et une stabilité chimique optimale. L'écart moyen entre les deux sites est de 149,8 mg/l $CaCO_3$, indiquant une différence significative de capacité tampon qui peut affecter la résistance de l'eau aux variations de pH (Boyd & Tucker, 2012).

La concentration en N-Kjeldhal (16) reflète la charge organique de l'étang et influence directement la disponibilité de nutriments pour le phytoplancton et la production naturelle de nourriture pour les poissons. Au site 1, les concentrations varient entre 6,30 mg/l et 6,72 mg/l, avec une moyenne de 6,48 mg/l, indiquant une charge organique modérée. Au site 2, elles varient entre 5,95 mg/l et 6,77 mg/l, avec une moyenne de 6,23 mg/l, légèrement inférieure à celle du site 1. L'écart moyen de 0,25 mg/l montre une légère supériorité du site 1 en apport organique. Cette stabilité de la charge organique est favorable à une productivité piscicole durable et limite l'accumulation d'ammoniac toxique.

Au cours des trois jours d'échantillonnage, les analyses ont montré l'absence de détection de plomb (Pb) et de cadmium (Cd) dans les eaux des deux sites. Il est important de préciser que cette observation ne signifie pas nécessairement que ces métaux sont totalement absents. Les limites de détection de l'appareil utilisé (Spectrométrie d'Absorption Atomique en flamme – SAA/flamme) imposent certaines contraintes : Pb ≤ 0,5 mg/l et Cd ≤ 0,02 mg/l. Ainsi, de très faibles quantités pourraient être présentes mais restent inférieures à la sensibilité de l'instrument. Les sédiments peuvent contenir certains métaux adsorbés, non dissous et à des concentrations indétectables dans l'eau. Cela souligne l'importance d'une surveillance régulière afin de prévenir tout impact à long terme sur la santé des poissons et sur la qualité de l'eau. Des analyses plus sensibles, telles que la spectrométrie de masse à plasma induit couplée à un générateur d'ions (ICP-MS) ou la pré-concentration des échantillons, permettraient une évaluation plus précise des traces de métaux lourds (Boyd, 2000).

En conclusion, le site 1 se caractérise par une eau faiblement minéralisée, avec une dureté et une alcalinité relativement basse, traduisant un pouvoir tampon limité et une sensibilité accrue aux variations physico-chimiques. Bien que le pH, l'oxygène dissous et les nutriments y soient globalement compatibles avec la pisciculture tropicale, les concentrations élevées en fer et en manganèse constituent un facteur de risque pour la santé des poissons, pouvant affecter la respiration branchiale et la qualité globale de l'eau. Ce site nécessite donc un suivi rigoureux et des mesures de gestion adaptées afin de limiter les apports métalliques d'origine anthropique.

A l'inverse, le site 2 présente une eau plus dure, mieux tamponnée et chimiquement plus stable, avec des concentrations élevées mais conformes en calcium, magnésium et alcalinité, assurant une meilleure régulation du pH et un environnement plus résilient face aux perturbations. Les teneurs en fer et manganèse y respectent les normes piscicoles, réduisant les risques de stress métallique et de bioaccumulation. Malgré une faible concentration en oxygène dissous, paramètre techniquement corrigeable par des pratiques de gestion appropriées, le site 2 offre globalement des conditions chimiques plus favorables à la croissance, à la reproduction et à la durabilité de la pisciculture tropicale.

Ainsi, les deux sites disposent d'un potentiel piscicole, mais le site 2 présente un avantage chimique net en termes de stabilité et de sécurité environnementale, tandis que le site 1 requiert des actions correctives pour optimiser durablement la production piscicole.

3.2.3. Analyse statistique

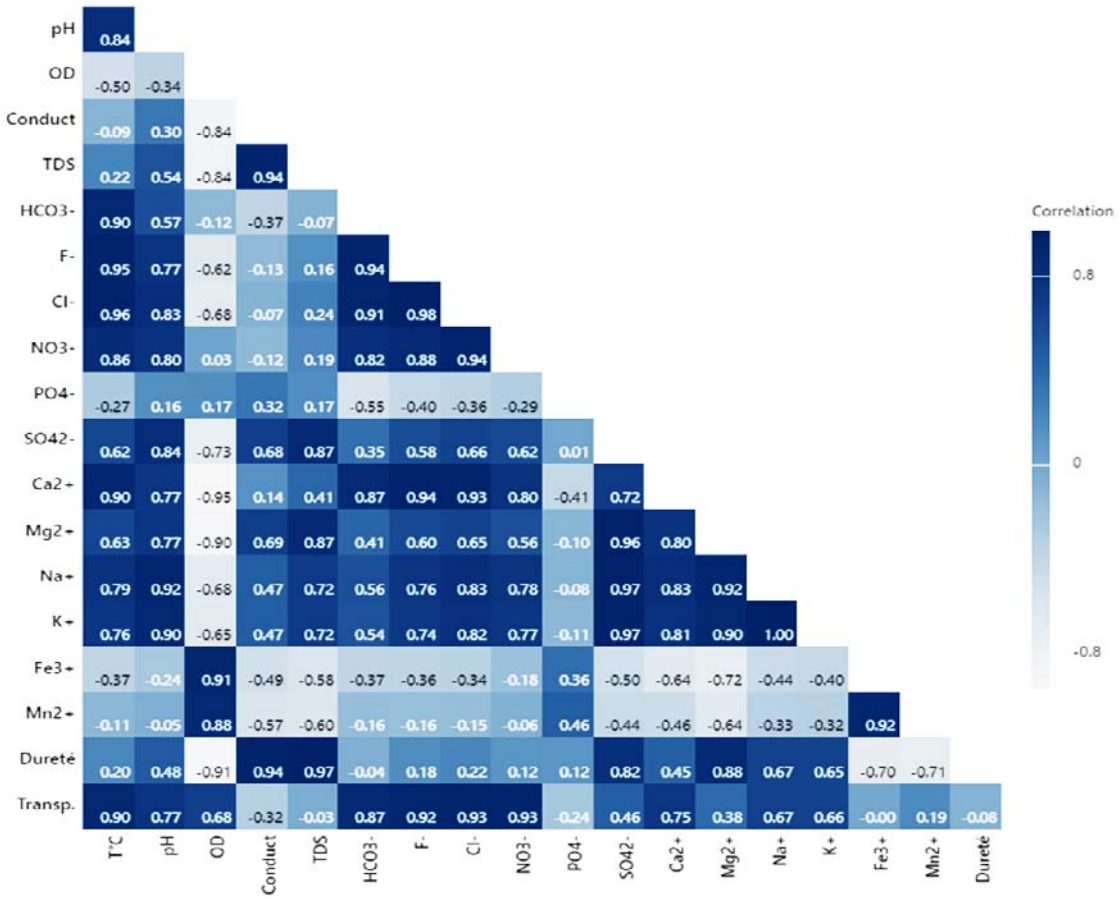
Les analyses statistiques ont été réalisées afin de mieux comprendre les relations entre les paramètres physico-chimiques étudiés et d'identifier les similarités ou différences entre les sites échantillonnés. Trois approches principales ont été utilisées : **l'analyse de corrélation** et le **dendrogramme (classification hiérarchique) et l'analyse de la variance (ANOVA)**.

- ✓ **Corrélation** : L'analyse de corrélation permet d'évaluer la force et le sens de la relation entre deux variables.
  Cette méthode est particulièrement utile pour déterminer quels paramètres physico-chimiques évoluent de manière similaire ou opposée, et pour identifier les variables influençant le plus la qualité de l'eau.

  Elle se base généralement sur le coefficient de corrélation de Pearson (r), qui varie entre –1 et +1.

  Le tableau suivant montre les corrélations entre les différents paramètres analysés.

Tableau 3.2: Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés



La température (T°C) montre une corrélation positive élevée avec le pH ($r \approx 0,84$), suggérant que des températures plus élevées sont associées à un pH légèrement plus alcalin. Cette relation est souvent observée dans des environnements aquatiques tropicaux et peut favoriser l'activité biologique ainsi que la croissance des poissons, tant que les valeurs demeurent dans des seuils écologiques acceptables.

L'oxygène dissous (OD) présente une corrélation négative significative avec la conductivité ($r \approx -0,84$) et les solides dissous totaux (TDS) ($r \approx -0,84$), indiquant qu'une augmentation de la charge ionique et de la minéralisation de l'eau s'accompagne d'une diminution de la solubilité de l'oxygène. Ce phénomène peut être expliqué par l'effet combiné de la température, de la salinité et d'une respiration biologique accrue, engendrant des conditions critiques pour la survie des poissons en étang.

Les ions majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) présentent des corrélations très élevées entre eux ($r > 0,80$), ce qui confirme un enrichissement minéral global lié à la dissolution des formations géologiques, au ruissellement et aux activités anthropiques. La dureté totale, dominée par le calcium et le magnésium, est fortement corrélée à la conductivité et aux bicarbonates (HCO_3^-) ($r \approx 0,94$), soulignant le rôle clé de ces ions dans le pouvoir tampon de l'eau, essentiel pour limiter les fluctuations du pH et maintenir un environnement favorable à la physiologie des poissons et au développement du plancton.

Les nutriments, tels que les phosphates (PO_4^{3-}) et les sulfates (SO_4^{2-}), affichent des corrélations modérées avec la conductivité et certains ions majeurs, indiquant leur contribution à la charge ionique globale et à la productivité biologique des étangs, sans dominer la chimie de l'eau. Le fer total (Fe^{3+}) montre une corrélation positive forte avec l'oxygène dissous ($r \approx 0,91$), suggérant que des concentrations élevées de fer coïncident avec des niveaux suffisants d'oxygène dans l'eau. De plus, le manganèse (Mn^{2+}) présente également une forte corrélation positive avec l'oxygène dissous ($r \approx 0,88$), indiquant que des conditions favorables à l'oxygénation de l'eau sont associées à la présence de ces éléments.

Ces corrélations révèlent une qualité de l'eau globalement équilibrée, caractérisée par une minéralisation cohérente et une stabilité chimique satisfaisante. Les conditions physico-chimiques semblent compatibles avec la pisciculture. Cependant, il est crucial d'effectuer un suivi régulier et intégré des paramètres pour prévenir les déséquilibres susceptibles d'affecter la santé des poissons et la productivité des étangs.

- ✓ **Dendrogramme** : Le dendrogramme est un outil graphique issu de la classification hiérarchique ascendante.

  Il permet de regrouper les paramètres ou les sites en fonction de leur degré de similarité. Les éléments les plus proches (donc les plus similaires) sont fusionnés en premiers, tandis que les éléments plus éloignés se regroupent plus tard, formant un arbre hiérarchique.

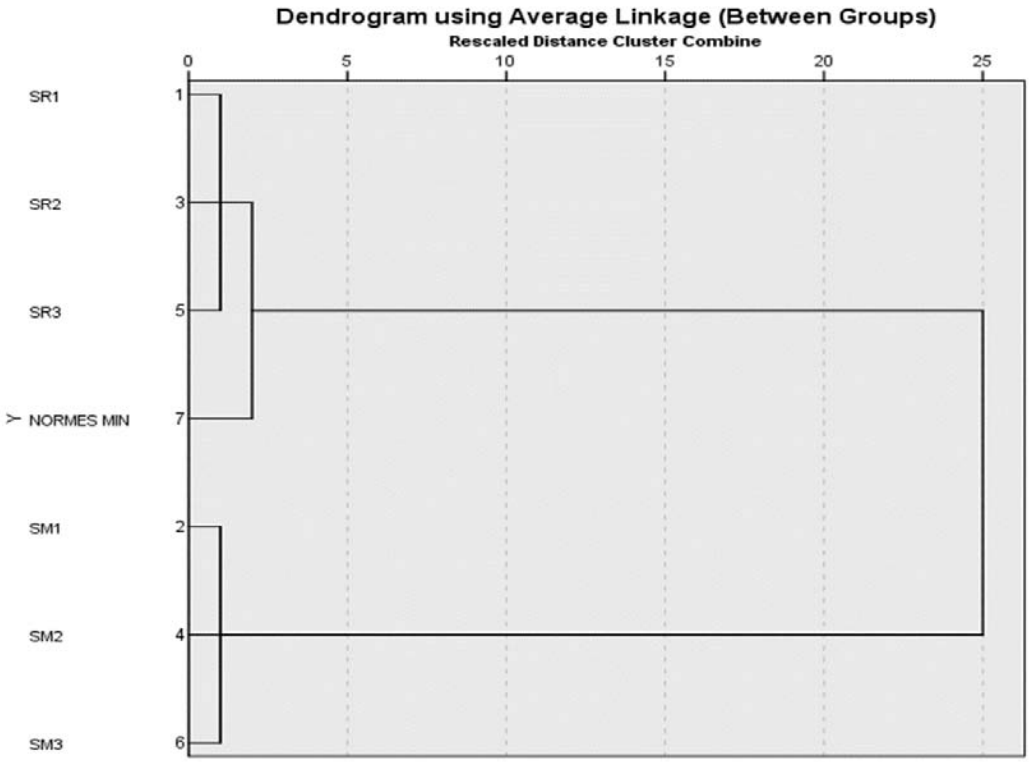


Figure 3.6: Dendrogramme de classification hiérarchique des étangs en fonction des paramètres physico-chimiques de l'eau.

L'analyse de la qualité de l'eau des étangs piscicoles aux sites de RUKARAMU (SR) et MINAGRIE (SM) a été réalisée sur une période de trois jours. Le dendrogramme révèle que les échantillons des étangs de RUKARAMU présentent une homogénéité marquée, indiquant des conditions environnementales similaires au sein de ce site. En revanche, les échantillons de MINEAGRIE se distinguent nettement, signalant des variations significatives dans la qualité de l'eau. Ces différences peuvent être attribuées à des sources de pollution, notamment un assainissement tout proche et des inondations répétitives, qui introduisent des contaminants nuisibles à la biodiversité aquatique.

Un déclin de la qualité de l'eau peut avoir des effets néfastes sur les populations aquatiques, entraînant des maladies chez les poissons et perturbant les écosystèmes. Pour cette raison, une surveillance continue de la qualité de l'eau s'avère cruciale afin de détecter rapidement toute dégradation et d'apporter les corrections nécessaires. Cela pourrait inclure des améliorations des infrastructures d'assainissement et une meilleure gestion des événements d'inondation pour réduire leur impact.

Il est essentiel d'adopter des pratiques de gestion durables, en tenant compte des spécificités de chaque site. Pour le site de RUKARAMU, il est important de maintenir les bonnes conditions actuelles, tandis que pour MINEAGRIE, l'accent doit être mis sur la mitigation des sources de pollution pour améliorer la qualité de l'eau.

Cette analyse souligne la nécessité d'une approche intégrée pour gérer la qualité de l'eau des étangs piscicoles, garantissant ainsi la durabilité de ces ressources aquatiques essentielles et la protection des écosystèmes qui en dépendent.

- ✓ **ANOVA :** L'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée pour déterminer l'existence de différences statistiquement significatives entre les moyennes des paramètres physico-chimiques mesurés selon différents sites, périodes ou conditions d'échantillonnage. Elle permet d'évaluer l'effet des facteurs étudiés sur la qualité de l'eau et d'identifier les paramètres les plus discriminants. Les différences sont considérées comme significatives lorsque la valeur de p est inférieure au seuil retenu (généralement $p < 0,05$)

Tableau 3.3: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) des paramètres physico-chimiques entre les sites étudiés.

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
T°C	Between Groups	2.333	2	1.167	3.500	.164
	Within Groups	1.000	3	.333		
	Total	3.333	5			
pH	Between Groups	.333	2	.167	.500	.650
	Within Groups	1.000	3	.333		
	Total	1.333	5			
OD	Between Groups	.333	2	.167	.007	.993
	Within Groups	67.000	3	22.333		
	Total	67.333	5			
Conduct	Between Groups	1214.333	2	607.167	.004	.996
	Within Groups	465710.500	3	155236.833		
	Total	466924.833	5			
TDS	Between Groups	422.333	2	211.167	.014	.986
	Within Groups	45457.000	3	15152.333		
	Total	45879.333	5			
HCO3-	Between Groups	.000	2	.000	.000	1.000
	Within Groups	13.500	3	4.500		
	Total	13.500	5			
NO3-	Between Groups	.000	2	.000	.	.
	Within Groups	.000	3	.000		
	Total	.000	5			
PO4-	Between Groups	.333	2	.167	.500	.650
	Within Groups	1.000	3	.333		
	Total	1.333	5			
SO42-	Between Groups	12.333	2	6.167	.022	.978
	Within Groups	840.500	3	280.167		
	Total	852.833	5			
Ca2+	Between Groups	56.333	2	28.167	.061	.942
	Within Groups	1393.000	3	464.333		
	Total	1449.333	5			
Mg2+	Between Groups	.000	2	.000	.000	1.000
	Within Groups	1944.000	3	648.000		
	Total	1944.000	5			
Na+	Between Groups	.333	2	.167	.008	.992
	Within Groups	60.500	3	20.167		
	Total	60.833	5			
K+	Between Groups	.333	2	.167	.111	.898
	Within Groups	4.500	3	1.500		
	Total	4.833	5			
Fe3+	Between Groups	.000	2	.000	.000	1.000
	Within Groups	13.500	3	4.500		
	Total	13.500	5			
Dur	Between Groups	380.333	2	190.167	.007	.993
	Within Groups	76545.000	3	25515.000		
	Total	76925.333	5			
Trans	Between Groups	6.333	2	3.167	.235	.804
	Within Groups	40.500	3	13.500		
	Total	46.833	5			

L'analyse de la variance (ANOVA) réalisée sur les étangs piscicoles de RUKARAMU (SR) et MINEAGRIE (SM) a permis d'évaluer la qualité physico-chimique de l'eau, en considérant des paramètres essentiels pour le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, tels que la température, le pH, l'oxygène dissous (OD), la conductivité, les solides dissous totaux (TDS), les bicarbonates, phosphates, sulfates, les cations majeurs ainsi que la turbidité et la transparence.

Pour la température, F = 3,500 et p = 0,164 indiquent qu'aucune différence significative (p > 0,05) n'a été observée entre les étangs. La légère variation suggérée par F est faible et ne compromet pas la stabilité thermique nécessaire au métabolisme et à la croissance des poissons tropicaux. Cette homogénéité relative est rassurante, mais elle justifie un suivi régulier, car des fluctuations ponctuelles pourraient induire du stress thermique.

Le pH présente F = 0,500 et p = 0,650, ce qui confirme une stabilité chimique entre les étangs. Cette constance favorise la disponibilité des nutriments et la solubilité des minéraux essentiels, limitant les risques de perturbation physiologique des poissons. Même si aucune différence statistique n'est détectée, la surveillance demeure importante pour anticiper d'éventuelles variations locales.

L'oxygène dissous montre F = 0,007 et p = 0,993, traduisant une oxygénation homogène et adéquate pour les poissons et la dégradation de la matière organique. La très faible valeur de F indique que la variance intra-étangs est presque identique à la variance entre étangs, confirmant la régularité de ce paramètre. Toutefois, de petites variations ponctuelles pourraient avoir un impact immédiat sur la santé des poissons, soulignant la nécessité d'un suivi continu.

La conductivité (F = 0,004, p = 0,996) et les TDS (F = 0,014, p = 0,986) indiquent également une composition minérale stable. Cette homogénéité permet de maintenir l'équilibre osmotique et la physiologie normale des poissons, tout en reflétant l'absence d'apports excessifs en nutriments ou de pollution.

Pour les bicarbonates, phosphates et sulfates, les valeurs de F et p confirment l'absence de variations significatives, ce qui traduit une capacité tampon stable et une disponibilité équilibrée des nutriments. Cela contribue à prévenir l'eutrophisation et à maintenir un environnement favorable à la productivité primaire et à la santé des poissons.

Les cations majeurs, incluant le calcium (F = 0,061, p = 0,942), le magnésium (F = 0,000, p = 1,000), le sodium (F = 0,008, p = 0,992), le potassium (F = 0,111, p = 0,898) et le fer (F = 0,000, p = 1,000), demeurent également stables entre les étangs. Cette régularité garantit le maintien de l'équilibre ionique, la contraction musculaire et l'activité enzymatique des poissons, confirmant la qualité biologique de l'eau.

Enfin, les indices de turbidité et de transparence (F = 0,235, p = 0,804) montrent que la clarté et la visibilité de l'eau sont homogènes et favorables à la photosynthèse des plantes aquatiques, contribuant ainsi à la productivité naturelle des étangs.

Dans l'ensemble, l'ANOVA démontre que la qualité physico-chimique de l'eau dans les étangs de RUKARAMU et MINEAGRIE est globalement stable et homogène. L'absence de différences significatives entre étangs indique que les conditions environnementales sont adéquates pour la croissance et le bien-être des poissons. Néanmoins, même si les variations actuelles sont faibles et non significatives, elles ne doivent pas être négligées. Un suivi régulier reste essentiel pour détecter rapidement toute fluctuation pouvant résulter de changements environnementaux ou d'activités anthropiques, afin de garantir la durabilité et la productivité des étangs piscicoles.

3.2.4. Diagramme de la qualité de l'eau selon Stiff

Le diagramme de Stiff, présenté ci-après, constitue un outil graphique permettant de visualiser rapidement la composition ionique de l'eau. Il joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la qualité de l'eau, car il met en évidence les déséquilibres entre cations et anions, facilite la comparaison entre différents sites et permet d'identifier les signatures hydrogéochimiques caractéristiques des étangs étudiés (Hem,1985).

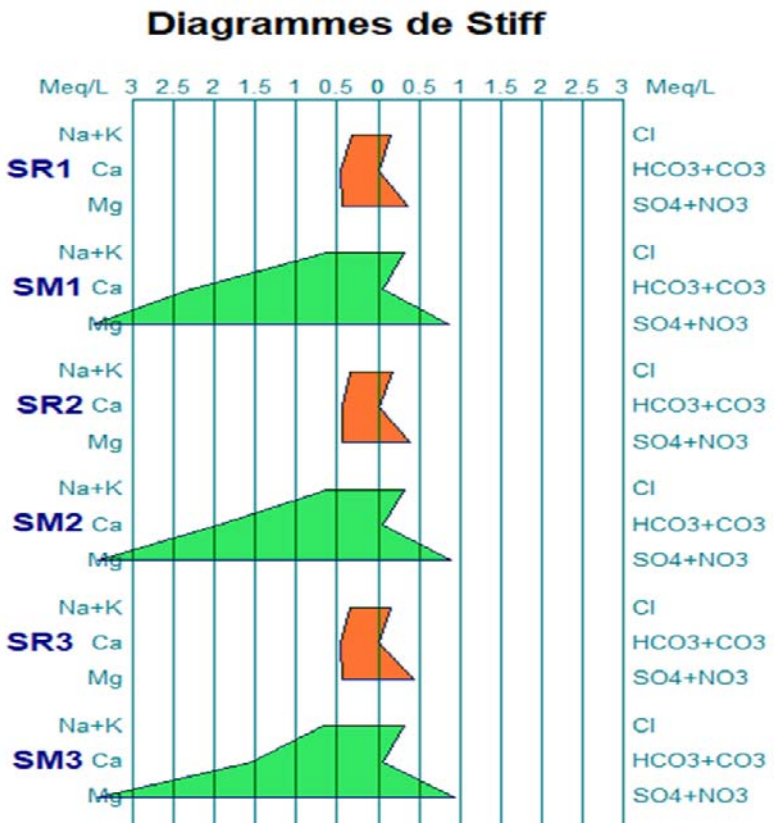


Figure 3.7: Diagramme de Stiff illustrant la qualité de l'eau des étangs étudiés.

L'échantillon SR1 révèle des concentrations élevées de sodium et de calcium, ainsi qu'une forte présence d'ions bicarbonates, attestant d'une eau de bonne qualité, favorable à l'aquaculture. L'échantillon SR2 présente des tendances similaires, avec une légère hausse des concentrations, renforçant l'idée d'une qualité d'eau saine pour le développement des espèces aquatiques.

En revanche, l'échantillon SR3 montre une légère baisse des niveaux de sodium et de calcium, suggérant potentiellement une dilution ou des changements environnementaux qui pourraient nécessiter une attention particulière.

Pour le site de MINEAGRIE, les résultats sont préoccupants. L'échantillon SM1 se distingue par des niveaux élevés de nitrates et de sulfates, signalant une qualité de l'eau compromise par des sources de pollution. SM2 maintient cette tendance, affichant des concentrations similaires de nitrates et de sulfates, ce qui confirme la persistance des problèmes de pollution. Enfin, SM3 continue d'afficher des niveaux critiques, soulignant l'urgence d'interventions pour améliorer la qualité de l'eau dans cette région.

L'analyse comparative des échantillons SR (Site de RUKARAMU) et SM (Site de MINEAGRIE) met en évidence des disparités marquées dans la qualité de l'eau. Alors que les étangs de RUKARAMU semblent bénéficier de bonnes conditions pour l'aquaculture, ceux de MINEAGRIE souffrent d'une pollution accrue, menaçant la biodiversité. Pour assurer la durabilité des ressources aquatiques, une surveillance continue est essentielle, en particulier pour MINEAGRIE. Des actions concrètes doivent être entreprises pour réduire les sources de pollution et protéger les écosystèmes aquatiques, afin de garantir un milieu sain et productif.

3.2.5. Diagramme de Schöller

Le diagramme de Schöller est un outil graphique d'analyse hydrochimique utilisé pour représenter et comparer la composition ionique des eaux. Il permet d'identifier rapidement le faciès chimique dominant, de comparer plusieurs échantillons ou sites, et d'apprécier les variations spatiales et temporelles de la qualité de l'eau des étangs.

Ce diagramme repose sur un graphique semi-logarithmique, où les concentrations des principaux ions dissous sont reportées sur l'axe vertical (en mg/L ou en meq/L), tandis que les ions majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, $Na^{+} + K^{+}$, $HCO_3^{-} + CO_3^{2-}$, SO_4^{2-}, Cl^{-}) sont disposés successivement sur l'axe horizontal. (Hem, J.D,1985).

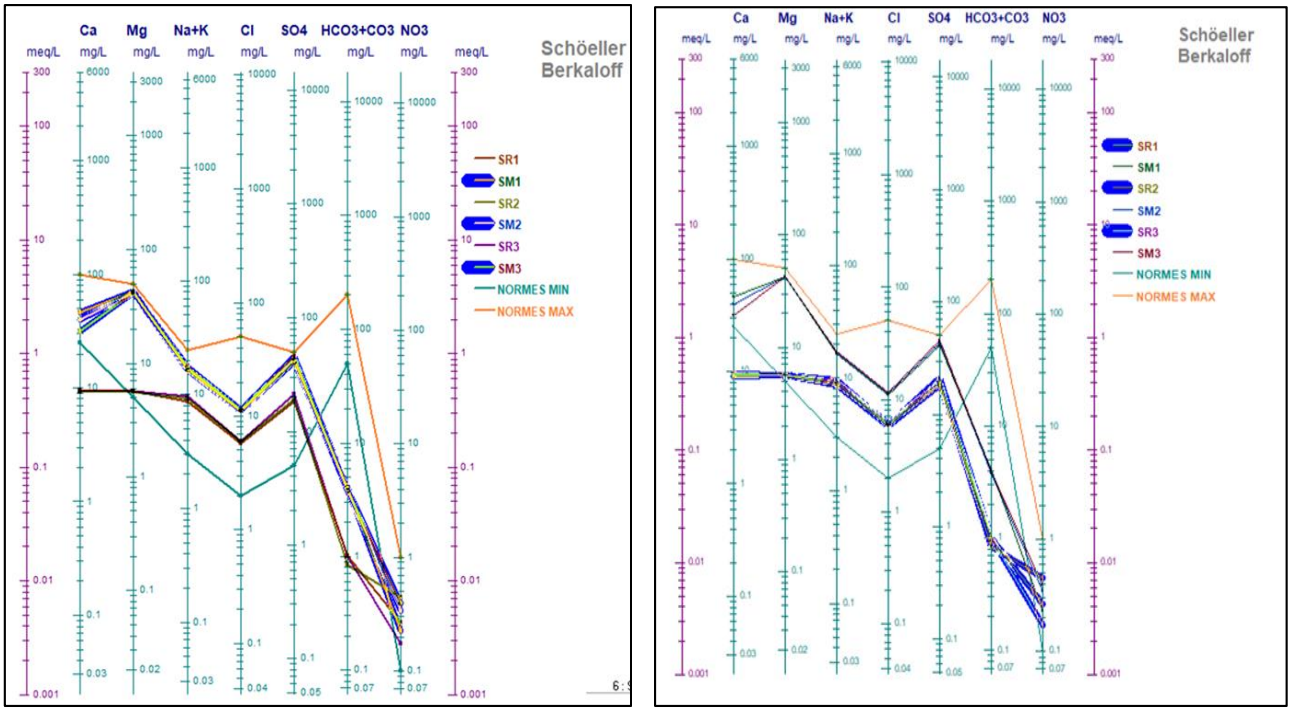


Figure 3.8: Diagrammes de Schöller représentant la composition ionique et la qualité de l'eau des étangs étudiés.

Les échantillons SR1 et SR2 montrent des concentrations généralement stables en calcium (Ca) et magnésium (Mg), ce qui indique des conditions favorables à l'aquaculture. Des niveaux adéquats de ces éléments favorisent la santé des organismes aquatiques, y compris les poissons et les organismes benthiques. Les concentrations de sodium (Na+K) et de bicarbonates se maintiennent également au-dessus des normes minimales, contribuant à un environnement aquatique stable et optimal.

Cependant, l'échantillon SR3 révèle des variations significatives, avec une diminution des concentrations d'ions clés, suggérant des changements environnementaux qui pourraient nécessiter une vigilance accrue. Ces fluctuations peuvent résulter de divers facteurs, tels que des changements saisonniers, la pollution ou l'eutrophisation, et pourraient avoir des impacts négatifs sur la faune aquatique. Un suivi régulier est donc recommandé pour identifier les causes de ces variations et mettre en œuvre des mesures préventives.

A l'inverse, les échantillons SM1, SM2, et SM3 des étangs de MINEAGRIE affichent des niveaux alarmants de nitrates et de sulfates, dépassant fréquemment les normes maximales. En particulier, SM1 présente des concentrations de nitrates préoccupantes, indiquant une pollution potentielle, probablement due à des activités agricoles, comme l'utilisation excessive d'engrais et le ruissellement.

Les niveaux élevés de ces contaminants peuvent entraîner des processus d'eutrophisation, favorisant la croissance algale et la diminution des niveaux d'oxygène dans l'eau, ce qui a des conséquences néfastes sur la biodiversité aquatique. Les variations observées dans SM2 et SM3 soulignent l'urgence de mettre en œuvre des interventions pour remédier à cette dégradation. Des initiatives telles que l'éducation des agriculteurs sur des pratiques agricoles durables et l'introduction de systèmes de filtration des eaux de ruissellement peuvent être bénéfiques.

L'analyse des diagrammes de Schöller révèle des disparités significatives dans la qualité de l'eau entre RUKARAMU et MINEAGRIE. Alors que RUKARAMU présente un environnement aquatique généralement favorable à l'aquaculture, MINEAGRIE fait face à des défis sérieux liés à la pollution par les nitrates et les sulfates. Pour assurer la durabilité des écosystèmes aquatiques, il est impératif de continuer à surveiller les niveaux de contaminants et de mettre en œuvre des mesures correctives adaptées afin de préserver la biodiversité aquatique. Une approche intégrée est essentielle pour garantir un environnement aquatique sain et productif.

CHAPITRE 4 : CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

4.1. Conclusion générale

Au terme de notre étude sur l'analyse de la qualité de l'eau sur les étangs piscicoles de la plaine de l'Imbo : cas de Bujumbura, il apparaît clairement que ces milieux aquatiques présentent des conditions globalement favorables à l'élevage des poissons tropicaux, tout en révélant certaines limites nécessitant une attention particulière pour assurer une production durable et rentable. L'analyse des différents paramètres physico-chimiques, combinée aux statistiques (corrélations, ANOVA, dendrogrammes) et aux observations par échantillonnage, a permis de caractériser précisément l'état actuel des étangs et d'évaluer leur capacité à soutenir des activités piscicoles à long terme.

Les mesures de température montrent que les étangs se situent dans la plage optimale de 24,5 à 25,8 °C pour le site 1 et légèrement plus élevée pour le site 2, correspondant aux exigences physiologiques du tilapia (Oreochromis niloticus) et du poisson-chat africain (Clarias gariepinus). La température stable, confirmée par l'ANOVA ($p > 0,05$), favorise le métabolisme, la croissance et la reproduction des poissons, tout en limitant le stress thermique. La corrélation positive avec le pH ($r = 0,84$, $p > 0,05$) indique qu'une hausse thermique peut légèrement alcaliniser l'eau, un facteur favorable pour la pisciculture.

Le pH, majoritairement neutre à légèrement alcalin, combiné à une alcalinité et une dureté modérées, assure un pouvoir tampon suffisant pour limiter les variations brusques du milieu. Ces conditions garantissent la stabilité chimique essentielle au développement du phytoplancton et à l'assimilation des nutriments. Cependant, la faible alcalinité et dureté du site 1 (HCO_3^- = 0,96 meq/l ; dureté = 46,87 mg/l) révèle une sensibilité accrue aux variations de pH, tandis que le site 2, plus minéralisé et alcalin (HCO_3^- = 3,95 meq/l ; dureté = 272 mg/l), offre une meilleure stabilité chimique et un pouvoir tampon supérieur.

La minéralisation des eaux, évaluée par les concentrations en Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^- et F^-, ainsi que par la conductivité et les TDS, présente des valeurs globalement compatibles avec les besoins physiologiques des poissons. Les ions majeurs sont fortement corrélés entre eux ($r > 0,80$), traduisant un enrichissement cohérent en sels minéraux. Les variations significatives entre sites pour la conductivité ($p = 0,996$) et les TDS ($p = 0,986$) mettent en évidence des différences hydrogéochimiques notables, probablement liées à la géologie, à l'évaporation et aux apports anthropiques. Le site 1 est faiblement minéralisé, tandis que le site 2 présente une eau dure favorable au maintien d'un milieu stable et à la croissance piscicole.

Concernant les nutriments, les concentrations en nitrates, phosphates et azote total (N-Kjeldhal) indiquent que les étangs disposent d'une fertilité suffisante pour soutenir la production planctonique, tout en restant en dessous des seuils d'eutrophisation. Le site 1 est légèrement plus enrichi en nitrates et azote total, tandis que le site 2 montre une stabilité plus homogène mais des phosphates relativement élevés, traduisant une capacité d'autorégulation biologique.

Les éléments minéraux mineurs Fe et Mn sont préoccupants au site 1, dépassant largement les normes piscicoles (Fe = 3,07 mg/l ; Mn = 0,3 mg/l), probablement en raison de l'érosion des sols et des apports agricoles, alors que le site 2 reste dans les normes. La surveillance régulière de ces métaux est essentielle pour éviter des effets toxiques ou des altérations de la qualité de l'eau. Les métaux lourds Pb et Cd n'ont pas été détectés, confirmant l'absence de pollution critique dans la fraction dissoute.

L'oxygène dissous et la transparence de l'eau soulignent des conditions contrastées : le site 1 est bien oxygéné et transparent (OD = 8,66 mg/l ; transparence = 30,46 cm), assurant un environnement stable et productif, tandis que le site 2 présente un déficit important en oxygène dissous (OD = 2,08 mg/l) et une turbidité persistante (transparence = 25,44 cm), nécessitant des interventions telles que l'aération et le contrôle de la matière organique.

Les analyses statistiques (corrélations et ANOVA) confirment que la majorité des paramètres essentiels (température, pH, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Fe^{3+}) sont stables et homogènes entre les sites, assurant un environnement favorable à la pisciculture. Les différences significatives pour la conductivité et les TDS doivent toutefois être suivies, car elles reflètent des variations de minéralisation pouvant affecter la disponibilité des nutriments et l'oxygénation.

Enfin, l'analyse des échantillons SR et SM par diagrammes de Schöller et de Stiff renforce cette conclusion : les étangs de RUKARAMU (SR) présentent une eau de qualité, stable et favorable à l'aquaculture, tandis que ceux de MINEAGRIE (SM) montrent des niveaux élevés de nitrates et de sulfates, traduisant une pollution persistante et la nécessité d'actions correctives pour préserver la biodiversité et assurer la durabilité de la production piscicole.

En résumé, les étangs piscicoles étudiés possèdent un potentiel réel pour la pisciculture, avec des conditions physico-chimiques globalement favorables. Toutefois, la variabilité entre sites, la présence ponctuelle des éléments minéraux mineurs et la faible oxygénation dans certains étangs soulignent l'importance d'une gestion intégrée, incluant la surveillance

régulière des paramètres physico-chimiques, la régulation des apports nutritifs, la maîtrise de la turbidité et la prévention du stress environnemental. Cette approche permettra de garantir une production durable, la sécurité alimentaire, et le développement économique local.

4.2. Suggestions

Nous ne pourrions clore ce travail sans formuler quelques suggestions concrètes visant à améliorer la qualité de l'eau, à renforcer les capacités techniques et à favoriser le développement durable de la pisciculture au Burundi.

1. Pour le gouvernement burundais : Des politiques publiques adaptées doivent être développées afin de soutenir le secteur piscicole, notamment par la facilitation de l'accès aux financements, la modernisation des infrastructures aquacoles et la mise en œuvre de programmes nationaux de formation technique. Le suivi institutionnel de la qualité de l'eau et la promotion de pratiques durables contribueraient à réduire les risques environnementaux et à renforcer la sécurité alimentaire.
2. Pour l'Université du Burundi : Il est indispensable de renforcer les capacités du laboratoire universitaire en le dotant de matériels modernes et de réactifs appropriés, permettant la réalisation d'analyses complètes, notamment la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO_5). Un tel renforcement favoriserait l'approfondissement des recherches en pisciculture.
3. Pour les bailleurs de fonds : Un appui financier ciblé est nécessaire pour l'installation d'équipements essentiels, tels que les aérateurs mécaniques, ainsi que pour l'amélioration de la gestion de l'écoulement de l'eau dans les étangs. Ces interventions permettront d'assurer un niveau d'oxygène dissous suffisant, de limiter la stagnation de l'eau et d'améliorer les performances de production.
4. Pour l'ensemble des acteurs (exploitants, chercheurs, autorités et partenaires) : Il est recommandé de mettre en place un plan de gestion intégrée des étangs piscicoles, combinant le suivi régulier des paramètres physico-chimiques, la planification des apports en eau et en nutriments, ainsi que la prévention des stress environnementaux. Une approche coordonnée et participative permettra d'assurer la durabilité écologique et la productivité à long terme des systèmes piscicoles.

5. Pour les exploitants et formateurs : Les producteurs devraient bénéficier de formations continues portant sur la gestion des densités de poissons, l'analyse régulière de la qualité de l'eau et l'adoption de techniques modernes d'élevage. Ces compétences sont essentielles pour améliorer la rentabilité des étangs et réduire les pertes liées aux déséquilibres environnementaux.
6. Pour les pisciculteurs : Il est recommandé d'adopter des pratiques de gestion intégrée des étangs, incluant l'aération régulière de l'eau, le contrôle de la turbidité et de la fertilisation, ainsi que le maintien de l'équilibre acido-basique et de la minéralisation. L'utilisation raisonnée d'amendements naturels, tels que le carbonate de calcium, permettrait de stabiliser le pH et d'optimiser les conditions de croissance des poissons. L'établissement d'un calendrier de suivi périodique des paramètres physico-chimiques est également essentiel pour détecter précocement toute anomalie et prévenir la dégradation de la qualité de l'eau.
7. Pour les chercheurs et étudiants : Il est souhaitable que de futures études complètent ce travail en intégrant des paramètres non étudiés et en comparant différents types d'étangs piscicoles. Ces recherches contribueraient à enrichir les connaissances scientifiques et à améliorer les stratégies de gestion de la pisciculture au Burundi.

Ces suggestions visent à encourager l'ensemble des acteurs pisciculteurs, université du Burundi, gouvernement et organisations internationales telles que la FAO, l'IFAD et le PAM à collaborer activement pour le développement durable de la pisciculture au Burundi. En s'inspirant de l'expérience d'autres pays pilotes tels que la Chine**,** le Vietnam, ainsi que des pays européens comme la Norvège et l'Espagne**,** où la pisciculture contribue de manière significative à la sécurité alimentaire, à la création d'emplois et au développement économique local, il est essentiel de renforcer les capacités techniques des pisciculteurs, d'améliorer l'accès aux matériels et produits nécessaires, et de soutenir la recherche scientifique sur la qualité de l'eau et la gestion des étangs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SITOLOGIQUES

1. Ababouch, L.et al. (2023). Value chains and market access for aquaculture products. Journal, 54.
2. Akello, G. M. (2024). Effect of earthen pond fish farming practices on water quality: A case of Buikwe District. Uganda Christian University, 110, 58-60.
3. Alli, M.F. (2024)., Effets de différentes sources d'aliments aquacoles sur les performances de croissance et le profil en acides gras de dix Tilapias rouges élevés dans le système d'élevage intensif, Université 8 Mai 1945 Guelma, pge7-10(88).
4. Al-Mashagbah, A. F. (2015). Assessment of Surface Water Quality of King Abdullah Canal, Using Physico-Chemical Characteristics and Water Quality Index, Jordan. Journal of Water Resource and Protection, 7(4), 339-352.
5. AquacultureFeedMag. (2024, septembre 19). Gestion de la qualité de l'eau en aquaculture. https://aquaculturefeedmag.com/fr/2024/09/19/gestion-de-la-qualite-de-leau-en aquaculture/
6. Austin, M.et al (1996), Ohio Pond Management Handbook: A guide to managing ponds for fishing and attracting wildlife. Ohio Department of Natural Resources, Division of Wildlife, 74 p. https://freshwateraquaculture.extension.org/wpcontent/uploads/2019/08/OhioPondManagement.pdf?utm_source=chatgpt.com
7. APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23e éd.). American Public Health Association
8. Balakamatchi, T., Aparna S., M. T., & Ramabhai V. (2022). Nutritional Requirement of Nile Tilapia (Oreochromis niloticus) in a Commercial Farm: A Review. International Journal of Zoological Investigations, 08(02), 34-41. https://doi.org/10.33745/ijzi.2022.v08i02.006
9. Banderol, M. (2024). Eutrophication Effects on Water Quality and Fish Farm Productivity. Journal of Fisheries & Livestock Production, 12(11),
10. Ben, B. (2020). La pisciculture intégrée à l'agriculture dans le Situation et perspective de développement. Université Mohamed Khider de Biskra, pge1-8.
11. Bhatnagar, A., & Devi, P. (2019). Water quality guidelines for the management of pond fish culture. Journal, 5.

12. Boukhris, S., & Manamani, R. (2018). Reproduction et alevinage du Tilapia du Nil (Oreochromis niloticus) dans le CNRDPA (Hassi ben Abdallah – Ouargla). Université Kasdi-Merbah–Ouargla,55 p.https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/20754/1/BOUKHRIS-Siham_compressed.pdf

13. Boumaraf, H., Thème : La pisciculture aux Ziban, situation et perspectives de développement, p6-7 (111), Université de BISKRA, 2019. pge2

http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/13297/1/boumaraf_haroun.pdf

14. Bouregba S. et al. (2022). Manuel de pisciculture semi intensive en étang : cas sur les Potentialités de la région de Guelma - Est d'Algérie, pge8,33 (120).

15. Boyd, C. E. (2000). Water Quality: An Introduction. Springer Science & Business Media.

16. Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2012). Pond Aquaculture Water Quality Management (Vol.712). Springer Science & Business Media.

17. burundiforum. (2018). Burundi:Signature de deux conventions de partenariat public-privé avec le Fida. https://burundi-forum.org/11482/burundisignature-de-deux-conventions-de-partenariat-public-prive-fida/?utm_source=chatgpt.com

18. Charles Niyonkuru, Emile Nibona, & Acques Moreau. (2015). Characteristics, Constraints and Perspectives of the Fish Farming in Burundi. Journal of Environmental Science and Engineering B, 4(5). https://doi.org/10.17265/2162-5263/2015.05.002

19. Dr Djamel, E. Z. (2016). Cours de génie aquacole Les structures d'élevage. ALGERIE.

20. FAO. (1986). Pêche—Pisciculture Analyse Sectorielle Et Programme D'intervention. https://www.fao.org/4/AC593F/AC593F01.htm

21. FAO. (1987, avril). Introduction to Aquaculture. https://www.fao.org/4/ac169e/ac169e00.htm?utm_source=chatgpt.com

22. FAO. (1994). Les étangs et leurs ouvrages : Ouvrages et agencement des Fermes piscicoles. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708f/x6708f01.htm

23. FAO. (2009). Oreochromis niloticus (Tilapia du Nil). https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/aquaculture/I1129m/file/fr/fr_niletilapia.htm

24. FAO (2018). Meeting the sustainable development goals.

25. FAO. (2020). Etude sous-sectorielle : Les pêches et la pisciculture au Burundi. https://www.fao.org/4/AC591F/AC591F04.htm

26. FAO. (2024a). Résumé de La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2024. FAO. https://doi.org/10.4060/cd0690fr

27. FAO. (2024b, juin). Burundi—Profils des pêches et de l'aquaculture par pays. https://www.fao.org/fishery/fr/facp/bdi?lang=fr#prodsectoraquaculture

28. Fermon Y., (2010). La Pisciculture de Subsistance en Étangs en Afrique,p15 (294).

29. François LE COR. (2021)., Etangs et qualité des cours d'eau de têtes de bassins versants agricoles : impact sur le devenir des pesticides et leurs produits de transformation. Université de Lorraine, p56-60(407).75.

30. Géoffroy, E. O., et al. (2019). Synthèse Bibliographique sur des Paramètres Biologiques et Zootechniques du Poisson-chat Africain Clarias gariepinus Burchell, 1822. European Scientific Journal ESJ, 15(27). https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n27p54

31. Gretchen L.G.,et al. (2025). Nile tilapia Oreochromis niloticus (Linnaeus, 1758) establishment in temperate Mississippi, USA: Multi-year survival confirmed by otolith ages. https://doi.org/10.3391/ai.2012.7.3.008

32. Gunjita Sinha &, Dr. Mainak Banerjee. (2025). Water Quality Management In Aquaculture: Trends And Techniques.

https://www.researchgate.net/publication/393775706_Water_Quality_Management_In_Aquaculture_Trends_And_Techniques

33. Hem, J.D. (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey, pge175-176

34. Henry-Silva, G. G., & Camargo, A. F. M. (2008). Impacto das atividades de aqüicultura e sistemas de tratamento de efluentes com macrófitas aquáticas í relato de caso. Boletim do Instituto de Pesca, 34(1), 163-173.

35. IFDC et ISABU. (2022). Soil Acidity and Fertility Mapping in Burundi. https://ifdc.org/2022/12/08/soil-acidity-and-fertility-mapping-in-burundi-2022-edition/

36. Kuriyo, B. (2019). Programme d'Aquaculture Intégrée : Des villages aquacoles pour pallier à l'insécurité alimentaire. Burundi Eco. https://burundi-eco.com/programme-daquaculture-integree-des-villages-aquacoles-pour-pallier-a-linsecurite-alimentaire/

37. L. D. Magblénou et al. (2024).: Coupling Aquaculture—Crop Productions and Using of Water Drained from Ponds Rearing Clarias gariepinus as Fertilizer for Okra Production (Abelmoschus esculentus var. Clemson spineless, L. Moench). Open Journal of Applied Sciences, 14(9), 2628-2647. https://doi.org/10.4236/ojapps.2024.149173

38. Labed, R. (2000)., Thème : Essaie de substitution du type d'aliment sur quelques paramètres de production de Tilapia rouge dans la région de Biskra, p2-3 (47), Université de BISKRA.

http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/15842/1/labed_rokaya.pdf

39. Lacroix, E (2004), Pisciculture en Zone Tropicale, GFA Terra Systems, Eulenkrugstraße 82 22 359 Hamburg Allemagne, pge 12-13 (231). https://reca-niger.org/IMG/pdf/Manuel_pisciculture_GTZ.pdf

40. Ledoux, Y.et al (2025), Caractérisation et identification des Etangs de Pisciculture actuels et potentiels des Pays de la Loire. pge1. https://univ-orleans.hal.science/hal-05112972/document

41. Lefrançois, P. (2009). Système de captage des matières décantables dans un étang piscicole, École Polytechnique de Montréal, pge 134.

https://publications.polymtl.ca/231/1/2009_PhilippeLefrancois.pdf

42.M. Rocío Rivas-L´opez et al. (2022). Potential hydro-meteorological impacts over Burundi from climate change. Journal of Hydrology: Regional Studies, 42, 101130. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101130

43.Mapfumo, B. (2022). Regional review on status and trends in aquaculture development in sub-Saharan Africa – 2020 (Vol. 100). Food & Agriculture Org.

44. Miller, J. W. (2009). Farm ponds for water, fish and livelihoods. Rome: FAO, pge. 14–23. https://www.fao.org/4/i0528e/i0528e.pdf?utm_source=chatgpt.com

45. MINAGRIE (2008), Stratégie agricole nationale, Bujumbura, pge 15. https://faolex.fao.org/docs/pdf/bur143702.pdf

46.Minoo, M. C. (2015). Impacts of Aquaculture on Water Quality and Economic Benefits in Central Kenya: A Case Study of Gatundu South Constituency. University of Nairobi, 107, 67-72.

47. Nashid, S et al. (2017). Study on the Determination of Heavy Metals in Freshwater Aquaculture Ponds of Mymensingh. Bangladesh Medical, 3(1), 143-149.

48. Ndayisenga, J. D., & Dusabe, S. (2022). Ponds' Water Quality Analysis and Impact of Heavy Metals on Fishes' Body. Journal of Sustainability and Environmental Management, 1(2), 62-72. https://doi.org/10.3126/josem.v1i2.45334

49. Ndiwa, T. C et al. (2016). Morphological variations of wild populations of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) living in extreme environmental conditions in the Kenyan Rift-Valley | Environmental Biology of Fishes.

https://link.springer.com/article/10.1007/s10641-016-0492-y?utm_source=chatgpt.com

50. Nkurunziza, S., et al. (2023). Prevalence and associated risk factors assessment of bovine fasciolosis in the Imbo Region, Burundi. Parasitology Research, 123(1), 33. https://doi.org/10.1007/s00436-023-08040-w

51. Nsabimana, S. (1990). L'aménagement agricole de l'Imbo au Burundi. https://www.persee.fr/doc/payen_0989-6007_1990_act_3_1_858

52. Onodje, K. (2000). Etude Biotechnique Et Socio-Economique (pge 11-14 (93).

53. RECA Niger, (2010). Fiche de collecte d'informations – Étangs d'aquaculture, version 1. RECA Niger, pge12 p.

https://reca-niger.org/IMG/pdf/Fiche_etang_d_aquaculture-version_1.pdf

54. Rehif, H., & Melha, S. (2017). Reproduction du poisson-chat africain Clarias gariepinus (Burchell, 1822) provoquée par des inducteurs hormonaux. Mémoire de Master, Université de Khemis Miliana, 77 p.

55. République du Burundi. (2013). Stratégie nationale et plan d'action sur la biodiversité – Burundi [CBD Strategy and Action Plan – Burundi]. Institut national pour l'environnement et la conservation de la nature (INECN).

56. République du Burundi. (2021). Circonstances nationales — changement climatique https://bi.chm-cbd.net/sites/bi/files/2021-07/circonstances_nationales_cc.pdf

57. Rodier, J. et al., (1996). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (7e éd.). Dunod, Paris.

58. Rodier, J., et al. (2016). L'Analyse de l'eau – Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 9e édition, Dunod, Paris.

59. Shibah, K. (2023). The effect of earthen pond aquaculture on the water quality and phytoplankton communities of Kajjansi stream [Thesis, Makerere University]. http://dissertations.mak.ac.ug/handle/20.500.12281/16827

60. Schlumberger, O., & Girard, P. (2013). Mémento de pisciculture d'étangs (5e éd.). Versailles : Quae., pge328.

61. Smith, J., et al. (2016). MP360: Farm Pond Management for Recreational Fishing. University of Arkansas at Pine Bluff.

https://www.uaex.uada.edu/publications/pdf/MP360.pdf?utm_source=chatgpt.com

62. Srivastava, P. P., & Raizada, S. (2012). Breeding and Larval Rearing of Asian Catfish, Clarias batrachus (Linnaeus, 1758) on Live and Artificial Feed. Journal of Aquaculture Research & Development, 03(04). https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000134

63. Symeonidou, S., & Mente, E. (2024). Water Consumption and the Water Footprint in Aquaculture: A Review. Water, 16(23), 3376. https://doi.org/10.3390/w16233376

64. Teugels, G. G. (1996). Taxonomy, phylogeny and biogeography of catfishes (Ostariophysi, Siluroidei) : An overview. Aquatic Living Resources, 9, 9-34. https://doi.org/10.1051/alr:1996039

65. Tibihika, P. D., et al. (2018). Anthropogenic impacts on the contextual morphological diversification and adaptation of Nile tilapia (Oreochromis niloticus, L. 1758) in East Africa. Environmental Biology of Fishes, 101(3), 363-381. https://doi.org/10.1007/s10641-017-0704-0

66. Trintignac, P. et al., (2013), Guide de bonnes pratiques pour la gestion piscicole des étangs dans les Pays de la Loire.SMIDAP, pge220. https://www.epicsolutions.fr/Files/Other/Guide_de_Bonnes_Pratiques-Version_finale_du_26-04-13-173_1.pdf

67. Trintignac, P., Kerleo V. (2004). Impacts Des Etangs a Gestion Piscicole Sur L'environnemment. Pays De La Loire, 3-10.

68. Tsuchiya, Y. (2010). Water Supply for Agriculture, Aquaculture, and Fisheries. EOLSS Publications, 1.

69. UN au Burundi,FIDA. (2021). Avec l'appui du FIDA, le poisson n'est plus un mythe en dehors du lac Tanganyika | Les Nations Unies au Burundi.

https://burundi.un.org/fr/126323-avec-lappui-du-fida-le-poisson-n%E2%80%99est-plus-un-mythe-en-dehors-du-lac-tanganyika

70. UNICEF. (2021). L'impact du climat, de l'énergie et de l'environnement sur les enfants et leurs familles au Burundi https://www.unicef.org/burundi/media/1691/file/SitAnClimatBurundi-2021-FR-low.pdf

71. US EPA, O. (2015). Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals [Overviews and Factsheets].

https://www.epa.gov/sdwa/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals

72. Van den Berg, F. V.et al.(1992). Manuel pour le développement de la pisciculture à Madagascar. https://www.fao.org/4/ab847f/ab847f02.htm

73. Vanacker, M. (2016). Les points de basculement dans les étangs piscicoles : Relation entre la qualité de l'eau et la biodiversité. AgroParisTech, 280, 5.

74. WHO. (2022). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. World Health Organization. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK579461/

75. WHO. (2011). Cadmium: Chemical fact sheet.

https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/cadmium-chemical-fact-sheet.pdf?utm_source=chatgpt.com

76. Willis, D. W., et al. (2010). Farm Ponds and Small Impoundments. Inland Fisheries Management in North America, pge 501–544

77. World Bank. (2022). Cadre de gestion environnementale et sociale (CGES) – Projet de facilitation du commerce et d'intégration dans la région des Grands Lacs (PFCIGL, P174814). https://documents1.worldbank.org/curated/en/099950009212232925/pdf/P17481406fbdc00170823b0bc57b8236c1b.pdf

78. Yusoff, F. M et al.,(2024). Water quality management in aquaculture. Cambridge Prisms: Water, 2, e8. https://doi.org/10.1017/wat.2024.6

ANNEXES

Annexe1

Produits chimiques utilisés

Au cours de notre travail, nous avons utilisé les produits chimiques suivants :

- ❖ Concentration en nutriments

Pour déterminer les nitrates (NO_3^-), nous avons utilisé les réactifs suivants :

- Solution de salicylate de sodium à 10 g/l (à renouveler toutes les 24 heures),
- Acide sulfurique concentré (H_2SO_4),
- Solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) et tartrate double de sodium et potassium,
- Solution mère étalon d'azote nitrique à 0,1 g/l,
- Solution fille étalon d'azote nitrique à 0,0005 g/l.

Pour les phosphates (PO_4^{3-}), nous avons utilisé :

- Acide sulfurique,
- Molybdate d'ammonium,
- Acide ascorbique,
- Solution d'émétique (stabilisante),
- Solution mère étalon à 0,050 g/l de phosphate,
- Solution fille étalon à 1 mg/l de phosphore.

- ❖ Éléments minéraux : Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+), Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Fluorures (F^-).

Nous avons utilisé :

- Solutions étalons mères et filles de Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, F^-
- Eau distillée déionisée pour dilution

- ❖ Alcalinité

Nous avons utilisé les réactifs suivants :

- Acide chlorhydrique (HCl) 0,02 N,
- Solution de phénolphtaléine dans l'alcool à 0,5 % (indicateur, point de virage pH ≈ 8,3).

❖ Azote Kjeldahl (N-Kjeldahl)

Nous avons utilisé :

- Acide sulfurique concentré (H_2SO_4),
- Acide ascorbique (10 g/l),
- Hydroxyde de sodium (NaOH, ~400 g/l)
- Catalyseur de minéralisation (mélange de sulfate de potassium et sélénium ou cuivre),
- Solution indicatrice de rouge de méthyle et vert de bromocrésol,
- Solution mixte de vert de bromocrésol et rouge de méthyle (indicateur, point de virage pH ≈ 4,5).

❖ Oligo-éléments et métaux lourds (Fer Fe, Manganèse Mn, Plomb Pb, Cadmium Cd)

Nous avons utilisé les réactifs suivants :

- Acide nitrique concentré (HNO_3) pour la digestion,
- Solutions étalons de Fe, Mn, Pb et Cd pour l'étalonnage des mesures.

❖ Oxygène dissous (O_2)

Pour la détermination de l'oxygène dissous, nous avons utilisé les réactifs nécessaires à la méthode de Winkler :

- Chlorure de manganèse ($MnCl_2$),
- Solution alcaline d'iodure de potassium (KI) contenant de la soude (NaOH),
- Acide chlorhydrique (HCl),
- Solution d'empois d'amidon (indicateur),
- Thiosulfate de sodium ($Na_2S_2O_3$) N/100 pour le titrage.

❖ Solides dissous totaux (TDS)

Pour la détermination des solides dissous totaux (TDS)a été réalisée à partir :

- D'eau distillée déionisée pour l'étalonnage,
- De solutions étalons de conductivité, utilisées pour la calibration de l'appareil de mesure des TDS. (Rodier et al. 1996, 2016)

Annexe 2

Méthodes d'analyses chimiques

1. Température

1.1. Principe

La température est un paramètre fondamental qui influence directement les processus biologiques, chimiques et physiques du milieu aquatique. Elle agit sur la solubilité des gaz (notamment l'oxygène), la vitesse des réactions métaboliques des poissons et des microorganismes, ainsi que sur la toxicité de certains composés chimiques.

1.2. Mode opératoire

La mesure de la température est effectuée in situ à l'aide d'une sonde thermométrique intégrée au pH-mètre, immergée directement dans l'eau à une profondeur d'environ 10cm. Les relevés sont réalisés tôt le matin et aucun réactif chimique n'est nécessaire : la lecture se fait directement sur l'écran de l'appareil après stabilisation de la valeur affichée.

Unité : degré Celsius (°C)

2. pH

2.1. Principe

Le pH indique le degré d'acidité ou d'alcalinité de l'eau. Il influence la disponibilité des éléments nutritifs, la toxicité des métaux lourds et l'efficacité des processus biologiques dans l'étang. Une eau trop acide ou trop basique peut perturber la respiration et la reproduction des poissons.

2.2. Mode opératoire

La mesure du pH est réalisée à l'aide d'un pH-mètre électronique portable ou de laboratoire. Avant la mesure, l'appareil est étalonné à l'aide de solutions tampons standards de pH 4,00-7,00-10,00.

La sonde est ensuite rincée à l'eau distillée, immergée dans l'échantillon d'eau à la profondeur de prélèvement, et la valeur est lue une fois la stabilisation obtenue.

Unité : sans unité (échelle de 0 à 14).

3. Conductivité

3.1. Principe

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, dépendant de la concentration totale en ions dissous (sels minéraux, bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, etc.). Elle reflète la minéralisation globale et la qualité chimique du milieu aquatique. Une conductivité trop faible peut traduire une eau pauvre en minéraux, tandis qu'une valeur trop élevée peut indiquer une pollution d'origine agricole ou domestique.

3.2. Mode opératoire

La conductivité est mesurée in situ à l'aide d'un conductimètre électronique. L'appareil est préalablement calibré avec une solution standard (généralement 1413 µS/cm à 25 °C).

La sonde est immergée dans l'échantillon à la même profondeur que les autres mesures (10–20 cm). La lecture s'effectue lorsque la valeur est stable.

Unité : microsiemens par centimètre (µS/cm)

4. Concentration en nutriments

4.1. Nitrate (NO_3^-)

4.1.1 Principe

La méthode au salicylate de sodium consiste à transformer les nitrates présents dans l'échantillon en un composé coloré par réaction avec le salicylate en milieu alcalin.

Sous l'action d'un oxydant (souvent l'hypochlorite de sodium), il se forme un complexe jaune dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en nitrates.

La mesure de la coloration se fait au colorimètre ou au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 415 nm.

4.1.2. Mode opératoire

Pour doser les nitrates, nous avons prélevé 10 ml d'eau de l'échantillon et l'avons faiblement alcalinisé avec de l'hydroxyde de sodium**.** Nous avons ensuite ajouté la solution de salicylate de sodium et quelques gouttes d'hypochlorite de sodium**,** puis laissé réagir pendant dix minutes jusqu'à l'apparition d'une coloration jaune. Un témoin préparé avec de l'eau bidistillée a permis de corriger les mesures.

Enfin, nous avons mesuré l'absorbance au spectrophotomètre à 415 nm et déterminé la concentration en azote nitrique grâce à la courbe d'étalonnage.

Expression des résultats

La teneur en nitrate (NO_3^-) a été calculée en multipliant l'azote nitrique par le facteur 4,43 suivant cette équation : $(NO_3^-) = (NO_3^-\text{-N}) \times 4{,}43$.

Ainsi, chaque échantillon a été caractérisé par sa concentration finale en nitrate (mg/l), reflétant directement la quantité de nitrates présents dans l'eau prélevée.

4.2. Phosphate (PO_4^{3-})

4.2.1 Principe

Cette méthode consiste à détecter et doser les orthophosphates présents dans l'eau par colorimétrie. En milieu acide, les orthophosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium pour former un complexe phospho-molybdique, qui est ensuite réduit par l'acide ascorbique afin de produire un composé bleu intense, appelé bleu de molybdène.

L'intensité de cette coloration bleue est proportionnelle à la concentration en orthophosphates et peut être mesurée au colorimètre à 800 nm**.** L'emploi d'un catalyseur tel que le tartrate double d'antimoine et potassium accélère le développement de la coloration, notamment lorsque certaines formes organiques sont hydrolysées pour libérer des orthophosphates.

4.2.2. Mode opératoire

Nous avons d'abord vérifié le pH de l'échantillon, qui devait être proche de 7 (±1), et l'avons ajusté si nécessaire. Ensuite, nous avons introduit 20 ml d'eau de l'échantillon dans une fiole jaugée de 25 ml, puis ajouté 1 ml de solution d'acide ascorbique. Nous avons poursuivi le protocole comme pour l'établissement de la courbe d'étalonnage, en préparant également un témoin avec de l'eau bidistillée afin de corriger les absorbances. Enfin, nous avons lu les absorbances au colorimètre et reporté les valeurs sur la courbe d'étalonnage pour déterminer la concentration en phosphore.

Expression des résultats

La courbe d'étalonnage permet de déterminer directement la teneur en phosphore (P), exprimée en mg/l pour la prise d'essai.

Pour convertir les valeurs :

- ✓ 1 mg/l de phosphate (PO_4^{3-}) = 0,747 mg/l de P_2O_5
- ✓ 1 mg/l de phosphate (PO_4^{3-}) = 0,326 mg/l de P

5. Eléments minéraux

5.1. Principe général

La détermination des éléments minéraux dissous dans l'eau repose sur des méthodes analytiques adaptées à la nature ionique des espèces étudiées. Le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) peuvent être dosés par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA), tandis que les autres ions majeurs (Na^+, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, F^-) sont déterminés par méthodes titrimétries, colorimétriques ou photométriques.

Le principe de la SAA repose sur le fait que les atomes de calcium et de magnésium, portés à l'état libre dans une flamme ou un four à graphite, absorbent la lumière émise par une lampe à cathode creuse spécifique. L'intensité de l'absorption lumineuse à une longueur d'onde déterminée est directement proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon. Les longueurs d'onde utilisées sont:

- Calcium: 422,7 nm
- Magnesium: 285,2 nm

Pour le sodium (Na^+) et le potassium (K^+), le dosage est effectué par photométrie de flamme, basée sur l'émission d'une radiation caractéristique lorsque les atomes sont excités dans la flamme. L'intensité de l'émission lumineuse est proportionnelle à la concentration des ions.

Pour les anions, les méthodes adoptées sont :

- Chlorures (Cl^-) : titrage argent métrique selon Mohr.
- Sulfates (SO_4^{2-}) : méthode turbidimétrique après précipitation sous forme de $BaSO_4$.
- Fluorures (F^-) : méthode colorimétrique au zirconium–alizarine.

5.2. Mode opératoire

5.2.1. Calcium et Magnésium

- Les échantillons d'eau sont filtrés pour éliminer les particules en suspension.
- Des solutions étalons de Ca^{2+} et Mg^{2+} sont préparées à partir de chlorure de calcium et sulfate de magnésium pour établir la courbe d'étalonnage.

- Le spectromètre d'absorption atomique à flamme est calibré avec ces étalons.
- Les mesures sont réalisées à 422,7 nm pour Ca^{2+} et 285,2 nm pour Mg^{2+}.
- Les concentrations sont obtenues à partir de la courbe d'étalonnage et exprimées en mg/l.

5.2.2. Sodium et Potassium

- Les échantillons filtrés sont introduits dans le photomètre de flamme.
- Les solutions étalons de Na^+ et K^+ permettent d'établir les courbes d'étalonnage.
- Les intensités d'émission sont mesurées et les concentrations déterminées par interpolation sur la courbe.
- Résultats exprimés en mg/l.

5.2.3. Chlorures (Cl^-)

- Un volume connu d'échantillon est titré avec $AgNO_3$ en présence de chromate de potassium comme indicateur.
- Le point d'équivalence est atteint à l'apparition d'une couleur brun-rouge persistante.
- La concentration en Cl^- est calculée à partir du volume de titrant consommé.

5.2.4. Sulfates (SO_4^{2-})

- L'échantillon est traité par chlorure de baryum pour précipiter les sulfates en $BaSO_4$.
- La turbidité développée est mesurée au spectrophotomètre.
- La concentration en sulfates est déterminée à partir de la courbe d'étalonnage.

5.2.5. Fluorures (F^-)

- Le réactif zirconium–alizarine est ajouté à l'échantillon.
- La diminution d'intensité colorée est mesurée au spectrophotomètre.
- La concentration en fluorures est déterminée par comparaison avec une gamme étalon et l'expression des résultats est donnée en mg/l.

6. Dureté totale

6.1 Principe

Cette méthode consiste à calculer la dureté totale de l'eau à partir des teneurs en calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) obtenues par analyse. La dureté s'exprime en mg/l de carbonate de calcium ($CaCO_3$).

6.2. Mode opératoire

Nous avons déterminé les concentrations de Ca^{2+} et Mg^{2+}, puis calculé la dureté totale selon la formule :

Dureté totale (mg/l $CaCO_3$) =(Ca^{2+}×2,497) +(Mg^{2+}×4,116)

Les résultats sont exprimés en mg/l $CaCO_3$. (Rodier et al. 1996, 2016)

7. Alcalinité

7.1 Principe

La méthode titrimétrique consiste à déterminer la teneur en bases dissoutes dans l'eau (bicarbonates, carbonates et hydroxydes) par titrage avec un acide fort (souvent H_2SO_4 N/50). On distingue :

- Le TA (Titre Alcalimétrique à la phénolphtaléine) : correspond aux carbonates et hydroxydes.
- Le TAC (Titre Alcalimétrique Complet) : correspond aux carbonates et bicarbonates.

Le titrage se fait en deux étapes successives à l'aide d'indicateurs colorés.

7.2. Mode opératoire

Nous avons prélevé 100l d'eau à analyser dans un erlenmeyer propre, puis ajouté 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine. Une coloration rose est apparue ; nous avons titré cette solution avec de l'acide sulfurique N/50 jusqu'à disparition complète de la couleur. Le volume d'acide consommé correspond au Titre Alcalimétrique (TA).

Nous avons ensuite ajouté quelques gouttes de rouge de méthyle et poursuivi le titrage jusqu'à la disparition de la couleur bleu-verdâtre et apparition d'une coloration orangée, correspondant au Titre Alcalimétrique Complet (TAC). (Rodier et al. 1996, 2016)

Expression des résultats

Les volumes d'acide consommés (V_1 pour le TA et V_2 pour le TAC) ont permis de calculer :

$$\text{TA (méq/l)} = \frac{V1 \times N \times 1000}{Vs}$$

$$\text{TAC (méq/l)} = \frac{V2 \times N \times 1000}{Vs}$$

- V1 = volume d'acide sulfurique utilisé pour le TA (ml)
- V2 = volume d'acide sulfurique utilisé pour le TAC (ml)
- N = normalité de l'acide (N/50)
- Vs = volume de l'échantillon (ml)

8. N-Kjeldhal

8.1 Principe

La méthode de dosage de l'azote Kjeldahl (NK) permet de déterminer la somme de l'azote organique et de l'azote ammoniacal présents dans un échantillon : $NK = N_{organique} + N{-}NH4^+$

Le principe repose sur quatre étapes successives :

- **Minéralisation** de la matière organique en milieu acide concentré, en présence d'un catalyseur, pour transformer l'azote en ion ammonium ($NH4^+$) ;
- **Alcalinisation** par ajout d'hydroxyde de sodium pour libérer l'ammoniac (NH_3) ;
- **Distillation** à la vapeur pour entraîner l'ammoniac ;
- **Dosage** de l'ammoniac recueilli par titrimétrie à l'aide d'un acide fort.

L'azote ammoniacal seul peut être dosé selon le même principe, mais sans la phase de minéralisation**.**

Ainsi, l'azote organique est obtenu par différence : $N_{organique} = NK - N - NH_4^+$

8.2. Mode opératoire

- **Minéralisation**

Nous avons introduit 100 ml d'échantillon dans un ballon de Kjeldahl, ajouté quelques billes de verre pour réguler l'ébullition, 1 g de catalyseur (sulfate de cuivre ou sélénium) et 10 ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4).Le ballon a été placé sur un bloc de minéralisation, recouvert d'un système d'extraction des fumées, puis chauffé lentement jusqu'à l'apparition

de fumées blanches. Nous avons poursuivi la digestion environ 2 heures, jusqu'à obtention d'un liquide limpide. Après refroidissement, la solution a été préparée pour la distillation.

- **Distillation**

Nous avons ajouté 50 ml d'hydroxyde de sodium (NaOH 400 g/l) dans le ballon pour rendre la solution alcaline. Le distillat a été recueilli dans un erlenmeyer contenant 10 ml d'acide borique (H_3BO_3 à 10 g/l). L'entraînement à la vapeur a été maintenu pendant environ 20 minutes pour piéger l'ammoniac dans l'acide borique.

- **Dosage**

Nous avons ajouté 2 à 3 gouttes d'indicateur mixte (rouge de méthyle + bleu de méthylène) dans l'erlenmeyer contenant le distillat, puis titré avec une solution d'acide sulfurique 0,05 mol/l (N/20) jusqu'au changement de couleur de l'indicateur. (Rodier et al. 1996, 2016)

Expression des résultats

L'équation générale des réactions successives est la suivante :

- **Minéralisation :**
  Matière organique + H_2SO_4 (catalyseur) → NH_4^+ autres produits
- **Libération de l'ammoniac :**
  $NH_4^+ + OH^- \rightarrow NH_3 + H_2O$
- **Piégeage dans l'acide borique :**
  $NH_3 + H_3BO_3 \rightarrow NH_4^+ + H_2BO_3^-$
- **Titrage:**
  $2(H_2BO_3^-, NH_4^+) + H_2SO_4 \rightarrow 2H_3BO_3 + (NH_4)_2SO_4$

Le calcul de la teneur en azote total Kjeldahl (NK) s'exprime par la formule :

$$N(mg/l) = \frac{2(V1 - Vo).C.1000.14}{Vs}$$

Où :

- V_1 = volume d'acide sulfurique (ou chlorhydrique) utilisé pour l'échantillon (ml),
- V_0 = volume d'acide utilisé pour le blanc (ml),
- C = concentration molaire de l'acide titrant (mol/l),
- 14 = masse atomique de l'azote (mg/mmol),
- Vs = volume de l'échantillon titré (ml).

9. Analyse des métaux lourds et oligo-éléments.

9.1. Fer

9.1.1. Principe

La détermination du fer repose sur la conversion du fer total en forme soluble, puis mesure par SAA à flamme. La concentration est proportionnelle à l'absorbance de l'échantillon.

9.1. 2. Mode opératoire

Nous avons prélevé 50 ml d'échantillon, puis l'avons digéré dans un four pour dissoudre toutes les formes de fer (Fe^{2+} et Fe^{3+}).

Après refroidissement, nous avons introduit l'échantillon dans le spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme, réglé pour la longueur d'onde spécifique du fer.

La concentration en fer a été déterminée par comparaison avec une courbe d'étalonnage préparée avec des solutions standards de Fe^{2+}.(Rodier et al. 1996, 2016)

9.2. Plomb

9.2.1. Principe

Le plomb dissous est dosé par SAA à flamme, après transformation des composés en forme soluble.

9.2.2. Mode opératoire

Nous avons prélevé 100 ml d'échantillon, acidifié à pH 2 avec HNO_3, puis digéré dans un four pour libérer tout le plomb.

L'échantillon digéré a été analysé à l'aide de la SAA à flamme, et la concentration en plomb a été calculée à partir d'une courbe d'étalonnage obtenue avec des solutions standards de Pb^{2+}.

9.3. Cadmium

9.3.1. Principe

Le cadmium est déterminé par SAA à flamme, après minéralisation des échantillons solides ou liquides.

9.3.2. Mode opératoire

Nous avons prélevé 100 ml d'échantillon, puis l'avons digéré dans un four pour dissoudre toutes les formes de cadmium.

L'échantillon a ensuite été analysé par SAA à flamme, et la teneur en cadmium a été obtenue en comparant l'absorbance à une courbe d'étalonnage réalisée avec des solutions standard de Cd^{2+}. (Rodier et al. 1996, 2016)

9.4. Manganèse

9.4.1. Principe

Le manganèse dissous est déterminé par Spectrométrie d'Absorption Atomique à flamme après digestion acide.

9.4.2. Mode opératoire

L'échantillon digéré a été analysé par SAA à la longueur d'onde spécifique du manganèse, et la concentration a été obtenue par comparaison avec une courbe d'étalonnage. (Rodier et al. 1996, 2016)

10. Oxygène dissous

10.1. Principe

La méthode Winkler permet de déterminer l'oxygène dissous (OD) dans l'eau.

Cette méthode repose sur la précipitation de l'hydroxyde de manganèse dans l'eau, qui absorbe l'oxygène dissous pour former de l'hydroxyde manganique ($MnO(OH)_2$).

Sous l'action de l'acide chlorhydrique, ce précipité donne du chlorure manganique ($MnCl_2$) et libère l'iode de l'iodure de potassium, lequel est ensuite titré par la solution de thiosulfate de sodium. La quantité de thiosulfate consommée est proportionnelle à l'oxygène dissous.

10.2. Mode opératoire

Nous avons rempli un flacon de 250 ml avec l'échantillon sans introduire de bulles. Nous avons ensuite ajouté 1ml de mélange soude-iodure de potassium et 1 ml de chlorure de manganèse, bouché et agité le flacon pour précipiter l'hydroxyde manganique.

Après clarification, nous avons ajouté 2,5 ml d'acide chlorhydrique, transvasé la solution dans un erlenmeyer, ajouté de l'empois d'amidon et titré avec $Na_2S_2O_3$ N/100 jusqu'à disparition de la couleur.

Expression des résultats :

OD (mg/l) = n×0,08

Où n = volume de thiosulfate utilisé (ml).

11. Transparence de l'eau

11.1. Principe

La transparence de l'eau reflète sa clarté et sa turbidité, liée aux particules en suspension (sédiments, phytoplancton, matières organiques). Elle permet d'évaluer la qualité de l'eau et la pénétration de la lumière pour les organismes aquatiques.

Cette méthode consiste à mesurer la profondeur maximale à laquelle un objet est visible dans l'eau, ce qui fournit une estimation directe de la transparence.

11.2. Mode opératoire

Nous avons utilisé un disque de Secchi que nous avons laissé descendre dans l'eau. Nous avons mesuré la profondeur à partir de laquelle le disque cesse d'être visible.

Pour plus de précision, l'opération a été répétée en plusieurs points de l'étang afin d'obtenir une valeur représentative. La transparence est exprimée en centimètres (cm), correspondant à la profondeur maximale de visibilité du disque. (Rodier et al. 1996, 2016)