

Etude De La Qualité Physico-Chimique Et Bactériologique De L'eau Brute Et Traitée : Cas Du Lac Mandroseza Antananarivo A Madagascar

[Study Of The Physico-Chemical And Bacteriological Quality Of Raw And Treated Water: Case Of Lake Mandroseza Antananarivo In Madagascar]

Andry Harinaina RABEARISOA^{1*}, Ravo Victoire NASOLOMAMPIONONA¹, Bertrand MANJOLONGO¹

¹Université de Fianarantsoa, Sciences et Technologies

Ecole Normale Supérieure, Université de Fianarantsoa (BP :301), Madagascar

rabea2@yahoo.com, victoirenasolo@gmail.com



Résumé—En vue d'améliorer la qualité de l'eau du lac Mandroseza, Antananarivo, Madagascar, une étude sur les caractéristiques physico-chimique et bactériologique des eaux brutes et traitées a été réalisée. Des échantillons ont été prélevés pendant 20 jours au cours du mois d'août 2023, durant la saison sèche. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses incluant les paramètres physico-chimiques et microbiologiques, suivies d'un traitement par la JIRAMA. Les résultats d'analyses ont montré une conformité générale aux normes malgaches en matière de qualité de l'eau, avec des variations mineures post-traitement mettant en avant l'efficacité du traitement, améliorant plusieurs paramètres clés de la qualité physico-chimique et bactériologiques du lac. Les températures moyennes, le pH, les conductivités électriques, la turbidité, le titre alcalimétrie, titre alcalimétrie complet, duretés total et calcique, fer total, calcium, magnésium, matières organiques, ammonium, chlorure, nitrite, nitrate, coliformes totaux, Escherichia coli, Streptocoques fécaux et Anaérobies sulfite-réducteurs des eaux brutes sont respectivement 18,63°C, 6,56, 40µS/cm, 10,55NTU, 0°F, 1,62°F, 17,2mg/l CaCO₃ et 8,35mg/l, 2,29mg/l, 2,09mg/l, 3,68mg/l, 6,22mg/l, 0,32mg/l, 7,92mg/l, 0,06mg/l, 5,47mg/l, 57ufc/100ml, 14ufc/100ml, 48ufc/100ml et 40ufc/100ml. Après le traitement, ces valeurs ont été améliorées respectivement de 18,93°C, 7,12, 60µS/cm, 2,55NTU, 0°F, 0,57°F, 25,02mg/l et 10,52mg/l, 0,08mg/l, 2,62mg/l, 6,04mg/l, 2,72mg/l, 0,006mg/l, 11,46mg/l, 0mg/l et 0,56mg/l pour la qualité physico-chimique et aucune bactérie n'a été présente dans l'eau après le traitement. Malgré les niveaux élevés de germes bactériens dans l'eau brute dépassant les normes, les résultats post-traitement démontrent une amélioration significative, rendant les eaux propres à la consommation humaine grâce à l'efficacité du traitement effectué.

Mots Clés : qualité physico-chimique, qualité bactériologique, eau brute, eau traitée, lac Mandroseza.

Abstract— In order to improve the quality of the water in Lake Mandroseza, Antananarivo, Madagascar, we conducted a study of the physico-chemical and bacteriological characteristics of raw and treated water. Samples were collected for 20 days in August 2023, during the dry season. These samples were analyzed for physico-chemical and microbiological parameters, followed by treatment by the JIRAMA. The results of the analyses showed a general compliance with Malagasy standards for water quality, with minor variations post-treatment highlighting the effectiveness of the treatment, improving several key parameters of the physico-chemical and bacteriological quality of the lake. Average temperatures, pH, electrical conductivities, turbidity, alkaline titer, full alkaline titer, total and calcium hardness, total iron, calcium, magnesium, organic matter, ammonium, chloride, nitrite, nitrate, total coliforms, Escherichia coli, Fecal streptococci and Sulphite-reducing anaerobes in raw water are respectively 18.63°C, 6.56, 40µS/cm, 10.55NTU, 0°F, 1.62°F, 17.2mg/l CaCO₃ and 8.35mg/l, 2.29mg/l, 2.09mg/l, 3.68mg/l, 6.22mg/l, 0.32mg/l, 7.92mg/l, 0.06mg/l, 5.47mg/l, 57cfu/100ml, 14cfu/100ml, 48cfu/100ml and 40cfu/100ml. After the treatment, these values were improved respectively by 18.93°C, 7.12, 60µS/cm, 2.55NTU, 0°F, 0.57°F, 25.02mg/l and 10.52mg/l, 0.08mg/l, 2.62mg/l, 6.04mg/l, 2.72mg/l, 0.006mg/l, 11.46mg/l, 0mg/l and 0.56mg/l for the physico-chemical quality and no bacteria was present in the water after treatment. Despite the high levels of bacterial germs in the raw water exceeding the standards, the post-treatment results demonstrate a significant improvement, making the water suitable for human consumption thanks to the effectiveness of the treatment performed.

0.57°f, 25.02mg/l and 10.52mg/l, 0.08mg/l, 2.62mg/l, 6.04mg/l, 2.72mg/l, 0.006mg/l, 11.46mg/l, 0mg/l and 0.56mg/l for physical and chemical quality and no bacteria was present in the water after treatment. Despite high levels of bacterial germs in the raw water exceeding the standards values, the post-treatment results showed a significant improvement, making the water safe for human consumption, thanks to the effectiveness of the performed treatment.

Keywords— Physico-Chemical Quality, Bacteriological Quality, Raw Water, Treated Water, Lake Mandrozeza.

I. INTRODUCTION

L'eau est un élément important à la survie humaine et au développement socioéconomique durable de l'humanité [1]. L'Organisation Mondiale de la Santé au travers de la Décennie Internationale de l'eau potable et assainissement, recommande l'eau potable et l'assainissement pour tous. La dégradation de la qualité des ressources en eau devient ainsi une préoccupation à l'échelle mondiale [2]. L'eau douce, essentielle à nos besoins, ne représente qu'une fine quantité de 1% du total de l'eau présente sur la Terre, le reste est formé par l'eau salée (des mers et des océans). Actuellement, plus d'un milliard de personnes sont obligées de boire de l'eau insalubre, ce qui les expose à des parasites responsables de diverses maladies [3]. Sur les continents d'Afrique, d'Asie et d'Amérique, 57 % en moyenne de la population n'a pas accès à l'eau potable [4]. A Madagascar, 23% de la population a accès à l'eau potable [5]. Plus de 80 % de la population malgache d'Antananarivo vit en zone rurale et seulement 34 % ont accès à l'eau potable.

La station de traitement de la JIRAMA à Mandrozeza est le plus grand site et aussi la première à assurer l'approvisionnement en eau de la ville d'Antananarivo. Pourtant, la pollution de l'eau du lac Mandrozeza constitue une préoccupation environnementale majeure. Le lac, situé à Antananarivo, Madagascar, est fréquemment affecté par une pollution causée par des déchets solides, des rejets industriels et des activités humaines. Ces facteurs peuvent engendrer des conséquences graves sur l'écosystème du lac et la santé des habitants du Fokontany. Selon l'OMS (2005), chaque année, 1,8 million de personnes, dont 90% d'enfants de moins de cinq ans, perdent la vie en raison des maladies diarrhéiques et du choléra, cela principalement dans les pays en développement [6]. Cette étude a pour objectif de comparer la qualité physico-chimique ainsi que microbiologique de l'eau brute et traité pour le cas du lac Mandrozeza Antananarivo à Madagascar afin d'éliminer les pollutions chimiques et microbiologiques. Pour ce faire, le paramètre physico-chimique tels que : la température, le pH, la conductivité, la turbidité, le titre alcalimétrie (TA), le titre alcalimétrie complet (TAC), les duretés calciques, le magnésium et le total, le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le carbonate (CO_3^{2-}), les bicarbonates (HCO_3^{2-}), les matières organiques (MO), l'ammonium (NH_4^+), le fer total, le chlorure (Cl^-), le nitrite (NO_2^-) et nitrate (NO_3^-); ainsi que des paramètres microbiologique dont les coliformes totaux (CT), l'*Escherichia coli* (E. coli), les *Streptocoques fécaux* (SF) et l'*Anaérobie sulfito-réducteurs* (ASR) ont été analysés au laboratoire du Centre Nationale de Recherche sur l'Environnement (CNRE) à Fiadanana-Antananarivo et laboratoire du JIRAMA à Mandrozeza-Antananarivo.

II. MATERIELS ET METHODES

2.1. Le Site de prélèvement

Le lac Mandrozeza est situé dans la zone Sud Est de la Commune Urbaine d'Antananarivo Madagascar, entre la latitude Sud - 18.931 et la longitude Est 47.553 avec une altitude de 1 266 mètres selon la figure 1. Sa superficie est de 47ha et sa profondeur est de 3 à 4 m [7]. Il a environ 900m de longueur et 300m de largeur. Puis, il possède une capacité moyenne de 1 600 000m³ pour assurer l'adduction en eau potable de la ville d'Antananarivo. Ce lac est artificiel, est alimenté par le fleuve d'Ikopa et les bassins versants environnants, est entouré de verdure, d'espaces libres et de nombreux poissons. Il est également utilisé pour diverses activités humaines, telles que la pêche, la navigation et les loisirs.

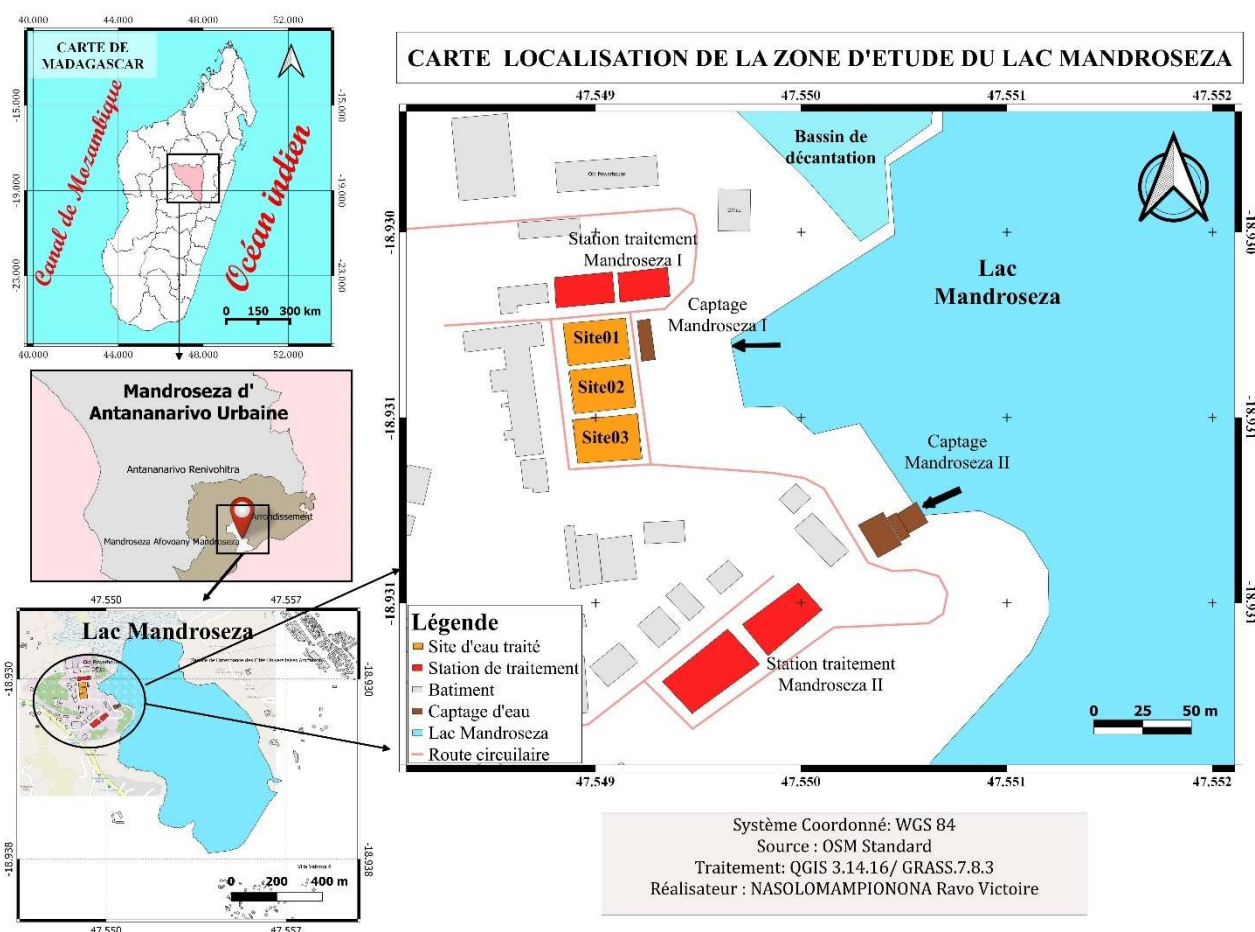


Figure 1: Présentation de la zone d'étude

2.2. Echantillonnage de l'eau

En Aout 2023, à la fin de la saison sèche, des échantillons d'eau ont été collectés pendant 20 jours. Des flacons en plastique d'un litre ont été utilisés. Ils ont été rincés deux fois à l'eau du robinet et trois fois avec l'échantillon de l'eau à prélever. Au total, quarante échantillons ont été prélevés, dont vingt échantillons d'eau brute et vingt échantillons d'eau traitée, en vue de l'analyse physico-chimique. De plus, quarante échantillons ont été collectés pour l'analyse microbiologique, couvrant les deux types d'eaux. Les échantillons ont été étiquetés, conservés et transportés dans une glacière maintenue à une température de 6°C, à l'abri des rayons ultra-violet (UV) et des activités biologiques. Ils ont été conservés dans un réfrigérateur à 4°C jusqu'à l'analyse au laboratoire.

2.3. Analyse physico-chimique

Les paramètres de température, le pH et la conductivité dans l'eau ont été mesurés sur l'appareil multifonction de marque 415521 et la turbidité a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre de marque Hach 46500-00. Ces paramètres sont tous mesurés in situ lors de la campagne d'échantillonnage. Les paramètres chimiques tels le titre alcalimétrie (TA), titre alcalimétrie complet (TAC), les duretés calciques, le magnésium et total, le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le carbonate (CO_3^{2-}), les bicarbonates (HCO_3^{2-}), les matières organiques (MO), l'ammonium (NH_4^+), le fer total, le chlorure (Cl^-), le nitrite (NO_2^-) et nitrate (NO_3^-) ont été mesurés in vitro.

Pour le Titre alcalimétrique et le titre alcalimétrique complet : ce sont deux gouttes de solution alcoolique de phénolphtaléine qui ont été ajoutées dans 100mL d'eau. Lorsque le développement de la couleur rose apparaît ($\text{pH} < 8,3$), l'acide sulfurique de concentration $\frac{N}{5}$ sont tiré doucement à l'aide d'une burette graduée et on agiterait constamment le mélange jusqu'à la décoloration

complète (pH = 8,3). Dans le cas contraire (TA nul), deux gouttes de solution d'hélianthine sont ajoutées de nouveaux dans la solution et titrer de nouveau avec le même acide jusqu'à disparition de la coloration jaune orangé et apparition de la couleur rouge (pH = 4,5).

$$\text{Expression des résultats : } TA = \frac{V}{5} \quad (1) \quad \text{et} \quad TAC = \frac{V'}{5} \quad (2)$$

Les équations (1) et (2) expriment respectivement le titre alcalimétrique (TA) et le titre alcalimétrie complet (TAC) en milliéquivalents par litre ; V et V' expriment respectivement les titres alcalimétriques en degrés français (1° f correspond à 10 mg de carbonate de calcium ou à 0,2 mEq/l ; 10mg de carbonate de calcium= 6mg de carbonate + 4mg de calcium) et titre alcalimétrie complet en degré français (1° f correspond à 12,4 mg de carbonate de calcium ou à 0,24 mEq/l ; 12,4mg de carbonate de calcium= 6mg de carbonate + 4mg de calcium + 2,4mg de magnésium) ; 5 veut dire dilution cinq fois de la concentration N de l'acide sulfurique (H₂SO₄).

Les Duretés totale calcique et magnésium : 2 ml de la solution tampon TH (respectivement 2ml de NaOH) a été versée dans 100mL d'eau à analyser pour déterminer la dureté totale (respectivement la dureté calcique) de l'eau. Cette solution a été ensuite titrée par l'agent complexant EDTA, jusqu'à l'obtention de la coloration bleue permanente (respectivement bleue), après avoir ajouté deux gouttes de l'indicateur NET (respectivement deux gouttes de Patton Reeder). Le volume de l'EDTA utilisé a été pris à la fin de l'expérience et les duretés totale (TH), calcique (THCa) et magnésium (THMg) ont été calculées comme indique les équations 3, 4 et 5 :

$$TH \text{ (mg/l en CaCO}_3\text{)} = V1 \times EDTA \quad (3)$$

$$THCa \text{ (mg/l en CaCO}_3\text{)} = V2 \times EDTA \quad (4)$$

$$THMg \text{ (mg/l en CaCO}_3\text{)} = TH - THCa \quad (5)$$

V1 et V2 : volumes de l'EDTA utilisés ; EDTA : concentration de la solution de l'EDTA exprimée en millimoles par litre

Les paramètres calcium et magnésium ont été respectivement calculés par les expressions suivantes : le calcium a été obtenu par la dureté calcique (THCa) :

$$1 \text{ (mg/l en CaCO}_3\text{) de THCa} = 4 \text{ mg/l de [Ca]} \quad (6)$$

Tandis que la concentration de magnésium a été obtenue par la dureté magnésium (THMg) :

$$1 \text{ (mg/l en CaCO}_3\text{) de THMg} = 2,4 \text{ mg/l de [Mg]} \quad (7)$$

Les chlorures ont été trouvés, par la méthode de Morh [12], en titrant 100 ml d'eau à analyser avec AgNO₃ jusqu'à l'apparition d'une coloration rouge brique, en utilisant 5 gouttes de chromate de potassium comme indicateur.

$$\text{Expression des résultats : } Cl^- \text{ (mg/l)} = V_{AgNO_3} \times 35,5 \quad (8)$$

La teneur en fer a été obtenue en versant une petite quantité de dithionite de sodium, 2 ml de diméthyle glyoxine et 2 ml d'ammoniaque dans 100 ml d'eau à analyser. La couleur de cette solution est ensuite comparée avec celle des plaquettes d'étalons. La lecture de la teneur correspondant à la valeur mentionnée est prise à la fin de l'expérience.

Pour déterminer la teneur en matières organiques, 100 ml d'eau a été prise en ajoutant 5 ml de NaHCO₃, puis 10 ml de KMnO₄. Le mélange est ensuite chauffé sur un appareil de chauffage pendant 10 à 15 min. Après, 5 ml de H₂SO₄ et 10 ml de sel de Mohr ont été ajoutés au mélange avant d'être titré avec KMnO₄ jusqu'à l'apparition d'une coloration persistante. Le volume de KMnO₄ a été prise au point de virage (coloration rose) comme indique la figure 2.

$$\text{Expression des résultats : } MO \text{ (mg/l)} = \text{Volume(KMnO}_4\text{)} - \text{Blanc} \quad (9)$$

Blanc : volume de KMnO₄ versé pour ce dosage (affichée sur la bouteille).



Figure 2 : Mode opératoire de la matière organique

Les paramètres tels que l'ammonium, le nitrite et le nitrate ont été déterminés à l'aide d'un spectrophotomètre ultraviolet de référence LU-1810D par les mélanges suivants : Pour l'ammonium, 25ml d'eau à analyser (eau brute ou eau traitée) a été prise dans un bécher avant d'y ajouter 20mL de trisodium citrate et 5ml d'eau de Javel. 2,5 ml de ce mélange ont été ensuite prise et versé par 1mL de phénol et 1ml de nitroprussite.

Quant au nitrite, qui s'oxyde facilement en nitrate, il a été déterminé en versant une goutte d'acide phosphorique et 1ml de réactif coloré dans 50ml d'eau à analyser.

Le nitrate a été trouvé grâce à l'équation 10 :

$$NO_3^- = (Nat - Nit) \times 4,443 \quad (10)$$

Nat est la valeur trouvée à l'écran du spectrophotomètre ; Nit est celle de nitrite ; NO_3^- est la teneur en nitrate. La concentration en Nat a été mesurée par spectrophotométrie UV en mélangeant 50 ml d'eau avec une goutte de NaOH et 1,25 ml de tampon concentré. La moitié du mélange a été utilisée comme blanc dans l'appareil. Le reste du mélange a été ensuite additionné de 1 ml de réactif coloré.

2.4. Analyse microbiologique

Les analyses microbiologiques, incluant les coliformes totaux (CT), *Escherichia coli* (E. coli), *Streptocoques fécaux* (SF), et Anaérobies sulfito-réducteurs (ASR), ont été réalisées par la filtration de 100 ml d'eau à travers une membrane de 45 μ m de porosité, conformément aux normes ISO 9308-1 :2000 et 7899-2:2000. Les membranes filtrées ont été placées sur des boîtes de Pétri stériles contenant un milieu de culture spécifique pour chaque groupe de microorganismes, puis incubées dans un incubateur. Des réactifs tels que le lactose, slantz and bartley, et le glucose ont été utilisés respectivement pour la recherche des coliformes totaux à 37°C, d'*Escherichia coli* à 44°C, des streptocoques fécaux à 37°C, et des anaérobies sulfito-réducteurs à 37°C.

2.5. Traitement de l'eau

Le traitement de l'eau du lac a été réalisé en cinq étapes distinctes. Afin d'éliminer les plus grosses particules et aussi les petits déchets, la première étape consistait à suivre un processus de dégrillage et tamisage, filtrant à travers une grille et passant ensuite par des tamis de maille fine. Ensuite, la deuxième étape, une coagulation-floculation a été mise en œuvre en ajoutant du sulfate d'alumine et de la chaux comme agents de coagulation pour le traitement. Elle visait à éliminer les matières en suspension pour clarifier l'eau. Par la suite, l'eau a été décantée à l'aide d'un décanteur à vitesse réduite, évitant ainsi les turbulences et permettant l'élimination des matières en suspension et des floccs par gravité. Environ 90% des matières en suspension restantes ont été éliminées au cours de cette étape. En continuant le processus, l'eau décantée a été filtrée à travers des sables fins et du charbon actif pour éliminer les 10% restants des matières en suspension et des floccs. Enfin, l'eau filtrée a été désinfectée par chloration afin de prévenir le développement des bactéries et de maintenir la qualité de l'eau tout au long de son parcours dans la canalisation.

III. RESULTATS

Les données issues des analyses physico-chimiques et microbiologiques ont été traitées à l'aide des logiciels SPSS et Excel. Par la suite, ces résultats ont été comparés aux normes malgaches établies [12].

3.1. Résultats des paramètres physiques

Les résultats de l'analyse des paramètres physiques de l'eau brute et de l'eau traitée du lac Mandrozeza à Madagascar sont présentés dans le tableau 1 et par la figure 3 : la température de l'eau brute varie de 17 à 21°C, avec une moyenne de 18,62°C, tandis que celle de l'eau traitée fluctue de 18 à 20°C, avec une valeur moyenne de 18,93°C. Ces valeurs restent inférieures à la norme malgache de 25°C. La légère variation de la température entre l'eau brute et l'eau traitée suggère que le traitement n'a pas un impact significatif sur ce paramètre. Le pH de l'eau analysée est acide, variant entre 6 et 7,2, avec une moyenne de 6,59 pour l'eau brute, restant dans les limites de la norme de potabilité malgache de 6,5 à 9. Pour l'eau traitée, le pH varie de 7 à 7,4, avec une moyenne de 7,12, montrant une légère augmentation après le traitement, indiquant peut-être une légère alcalinisation. Les valeurs de conductivité sont en dessous de la norme maximale (3000 µS/cm), oscillant entre 23 et 40 µS/cm avec une moyenne de 31,95 µS/cm pour l'eau brute. Pour l'eau traitée, elles varient de 35 à 60 µS/cm, avec une moyenne de 52,2 µS/cm. Cela suggère que l'eau brute a une faible minéralisation par rapport à l'eau traitée. La turbidité de l'eau brute est significativement élevée par rapport à la norme malgache, avec des valeurs comprises entre 8 et 15 NTU et une moyenne de 10,55 NTU. Cela indique une présence élevée de matières en suspension dans l'eau du lac. En revanche, la turbidité de l'eau traitée diminue considérablement après le traitement, variant de 1,5 à 3,25 NTU avec une valeur moyenne de 2,54 NTU, répondant ainsi à la norme de potabilité malgache et indiquant une amélioration notable de la clarté de l'eau après le traitement.

Tableau 1 : résultats d'analyse des paramètres physiques de l'eau brute et l'eau traitée.

Types d'eaux	Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Norme Malgache	Unité
EAUX BRUTE	Temperature	17	21	18,625	1,317	25	°C
	Ph	6	7,2	6,595	0,383	6,5-9	-
	Conductivité	23	40	31,95	5,472	3000	µS/cm
	Turbidité	8	15	10,55	2,114	5	NTU
EAUX TRAITEE	Température	18	20	18,930	0,631	25	°C
	Ph	7	7,4	7,120	0,128	6,5-9	-
	Conductivité	35	60	52,20	6,955	3000	µS/cm
	Turbidité	1,50	3,25	2,546	0,513	5	NTU

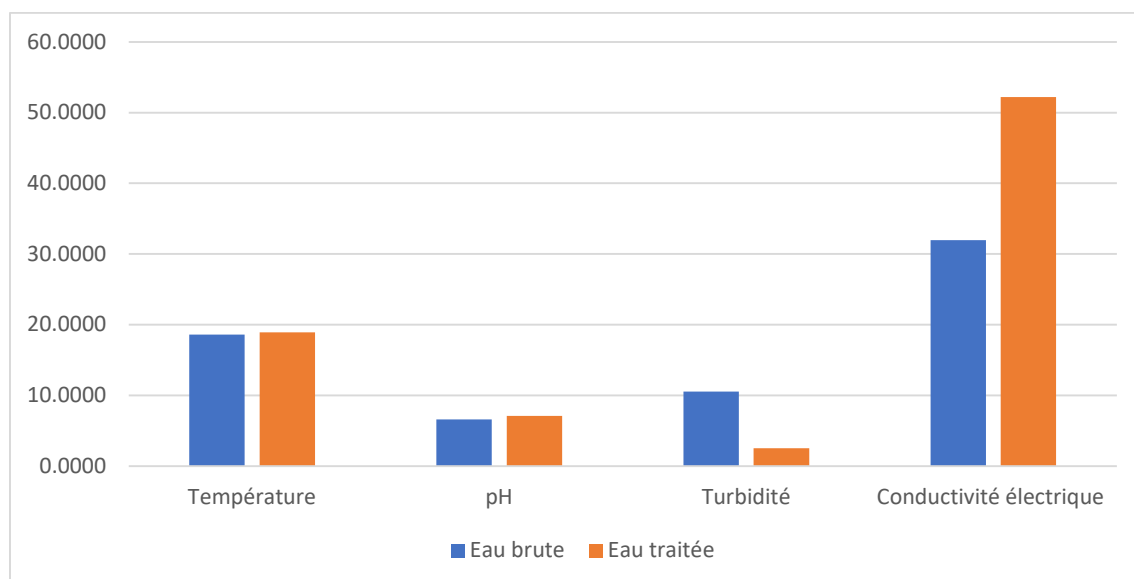


Figure 3 : Valeurs moyennes des paramètres physiques de l'eau brute et traité

3.2. Résultats des paramètres chimiques

Les résultats des analyses chimiques de l'eau brute et traitée du lac Mandrozeza sont présentés dans le tableau 2 et par la figure 4.

Le titre alcalimétrique est nul pour l'eau brute et traitée, indiquant l'absence d'hydroxydes et de carbonates dans ce lac. Les valeurs du titre alcalimétrique complet, variant entre 1 et 2,5°f avec une moyenne de 1,617°f dans l'eau brute, et de 1,5 à 3,25°f avec une valeur moyenne de 2,23 °f dans l'eau traitée, demeurent relativement faibles. La matière organique dans l'eau brute, entre 3 et 8 mg/l avec une moyenne de 6,22 mg/l, est en dessous de la valeur suggérée par la norme Malagasy. Après le traitement, la concentration diminue, variant de 1 à 4 mg/l avec une moyenne de 2,72 mg/l, correspondant à la norme de potabilité malgache.

La dureté totale de l'eau brute oscille entre 13 et 20 mg/l en CaCO_3 , avec une moyenne de 17,2 mg/l en CaCO_3 . Après le traitement, elle augmente de 16 à 30 mg/l, avec une moyenne de 25,015 mg/l en CaCO_3 . Les résultats avant et après traitement restent inférieurs à la limite de la norme Malagasy (500mg/l en CaCO_3). La dureté calcique de l'eau brute varie de 6 à 12 mg/l, avec une moyenne de 8,35 mg/l. Après le traitement, la variation est de 8 à 15 mg/l, avec une moyenne de 10,515 mg/l, suivant une tendance similaire à la dureté totale. La concentration d'ammonium de l'eau brute varie de 0,2 à 0,4 mg/l, avec une moyenne de 0,315 mg/l. Après le traitement, la concentration diminue considérablement, variant de 0,001 à 0,01 mg/l, avec une moyenne de 0,0062 mg/l. Ces valeurs respectent toutes la norme Malagasy (inférieure à 0,5 mg/l). La teneur en fer total oscille entre 1 et 4 mg/l, avec une moyenne de 2,29 mg/l pour l'eau brute, tandis que celle de l'eau traitée varie de 0 à 0,2 mg/l, avec une valeur moyenne de 0,0827 mg/l, respectant la norme Malagasy (inférieure à 0,5 mg/l).

Le chlorure varie de 5 à 14 mg/l, avec une moyenne de 7,915 mg/l pour l'eau brute, et de 8 à 15 mg/l, avec une valeur moyenne de 11,46 mg/l, pour l'eau traitée. La teneur en chlorure respecte la norme Malagasy établie (250mg/l) pour l'eau brute et traitée. La concentration de calcium varie de 1,5 à 3 mg/l, avec une moyenne de 2,087 mg/l pour l'eau brute, et de 2 à 3,75 mg/l, avec une valeur moyenne de 2,622mg/l, pour l'eau traitée, respectant la norme établie (inférieure à 200mg/l). Le magnésium varie de 1,66 à 5,833 mg/l, avec une moyenne de 3,686 mg/l, pour l'eau brute, et de 2,5 à 8,958 mg/l, avec une valeur moyenne de 6,04 mg/l, pour l'eau traitée, restant toutes inférieures à 50mg/l, conforme à la norme de la JIRAMA Malagasy. Les nitrates varient de 3 à 8 mg/l, avec une moyenne de 5,47 mg/l, pour l'eau brute, et de 0,1 à 1 mg/l, avec une valeur moyenne de 0,5635 mg/l, pour l'eau traitée, conformément à la norme Malagasy établie (<50mg/l). La concentration en nitrite est inférieure à la norme Malagasy (<0,1 mg/l), variant entre 0,03 et 0,09 mg/l, avec une valeur moyenne de 0,059mg/l, pour l'eau brute. Pour l'eau traitée, cette concentration est réduite à 0mg/l, ce qui la rend propre à la consommation.

Tableau 2 : Résultats d'analyse des paramètres chimiques de l'eau brute et l'eau traitée.

Type d'eaux	Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Norme Malagasy	Unité
EAUX BRUTE	Titre alcalimétrie	0	0	0	0	-	°f
	Titre alcalimétrie complet	1,00	2,50	1,6175	0,4617	-	°f
	Matières organiques	3	8	6,220	1,3308	5	mg/l
	Dureté totale	13	20	17,200	1,9695	500	mg/l
	Dureté calcique	6	12	8,350	1,7176	-	mg/l
	Ammonium	0,2	0,400	0,315	0,0637	0,5	mg/l
	Fer	1	4	2,29	0,9171	0,5	mg/l
	Chlorure	5	14	7,915	2,2153	250	mg/l
	Calcium	1,5	3	2,0875	0,4293	200	mg/l
	Magnésium	1,66	5,833	3,6863	1,1944	50	mg/l
	Nitrite	0,03	0,09	0,0590	0,0191	0,1	mg/l
	Nitrate	3	8	5,4700	1,6566	1,5	mg/l
EAUX TRAITEE	Titre alcalimétrie	0	0	0	0	-	°f
	Titre alcalimétrie complet	1,5	3,25	2,2325	0,5722	-	°f
	Matières organiques	1	4	2,720	0,8128	5	mg/l
	Dureté totale	16	30	25,015	4,5381	500	mg/l
	Dureté calcique	8	15	10,515	2,2229	-	mg/l
	Ammonium	0,001	0,01	0,0062	0,0026	0,5	mg/l
	Fer	0	0,2	0,0827	0,0652	0,5	mg/l
	Chlorure	8	15	11,460	2,7204	250	mg/l
	Calcium	2	3,750	2,6225	0,5564	200	mg/l
	Magnésium	2,5	8,958	6,0413	2,1917	50	mg/l
	Nitrite	0	0	0	0	0,1	mg/l
	Nitrate	0,1	1	0,5635	0,2826	1,5	mg/l

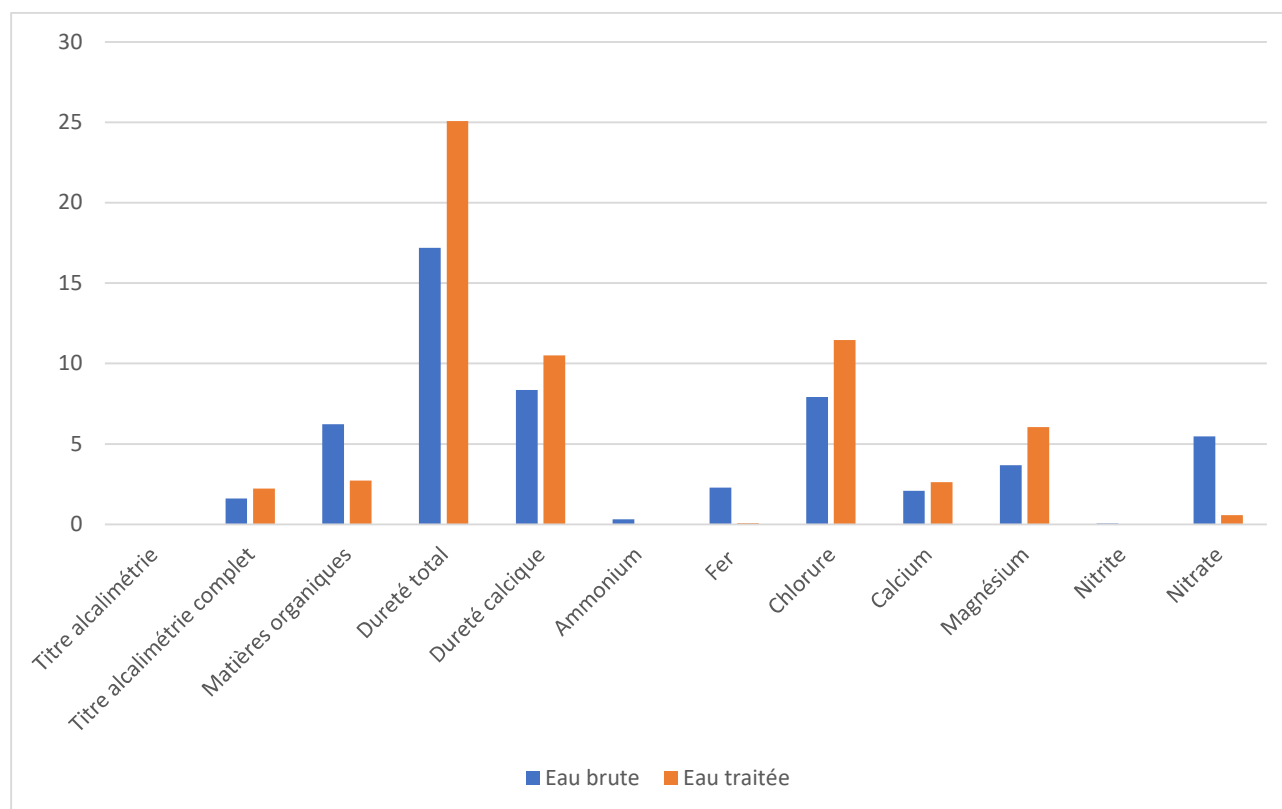


Figure 4 : Valeurs moyennes des paramètres chimiques de l'eau brute et traité.

3.3. Résultats des paramètres microbiologiques

Les concentrations en germes bactériens, déterminées pour les eaux brutes et traitées, sont exposées dans le tableau 3 et la figure 5. L'eau brute présente des niveaux de coliformes totaux, de l'*Escherichia Coli*, des streptocoques fécaux, et des anaérobies sulfito-réducteurs dépassant les normes malgaches. Les coliformes totaux varient de 13 à 100 ufc/100ml, avec une moyenne de 57,40 ufc/100ml.

Les valeurs des streptocoques fécaux se situent entre 6 et 90 ufc/100ml, avec une moyenne de 48 ufc/100ml. Les concentrations d'*E. coli* varient de 8 à 20 ufc/100ml, avec une moyenne de 14 ufc/100ml, tandis que les aérobies sulfito-réductrices fluctuent de 25 à 56 ufc/100ml, avec une moyenne de 40 ufc/100ml. Les résultats post-traitement révèlent l'absence de bactéries dans l'eau.

Tableau 3 : résultats d'analyse des paramètres microbiologique de l'eau brute et l'eau traitée.

Type d'eau	Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Norme Malagasy	Unité
EAUX BRUTE	Coliformes totaux	13	100	57	27	0	UFC/100ml
	Streptocoques fécaux	6	90	48	25	0	UFC/100ml
	Escherichia Coli	8	20	14	4	0	UFC/100ml
	Aerobie Sulfito-reductrice	25	56	40	10	0	UFC/100ml
EAUX TRAITEE	Coliformes totaux	0	0	0	0	0	UFC/100ml
	Streptocoques fécaux	0	0	0	0	0	UFC/100ml
	Escherichia Coli	0	0	0	0	0	UFC/100ml
	Aerobie Sulfito-reductrice	0	0	0	0	0	UFC/100ml

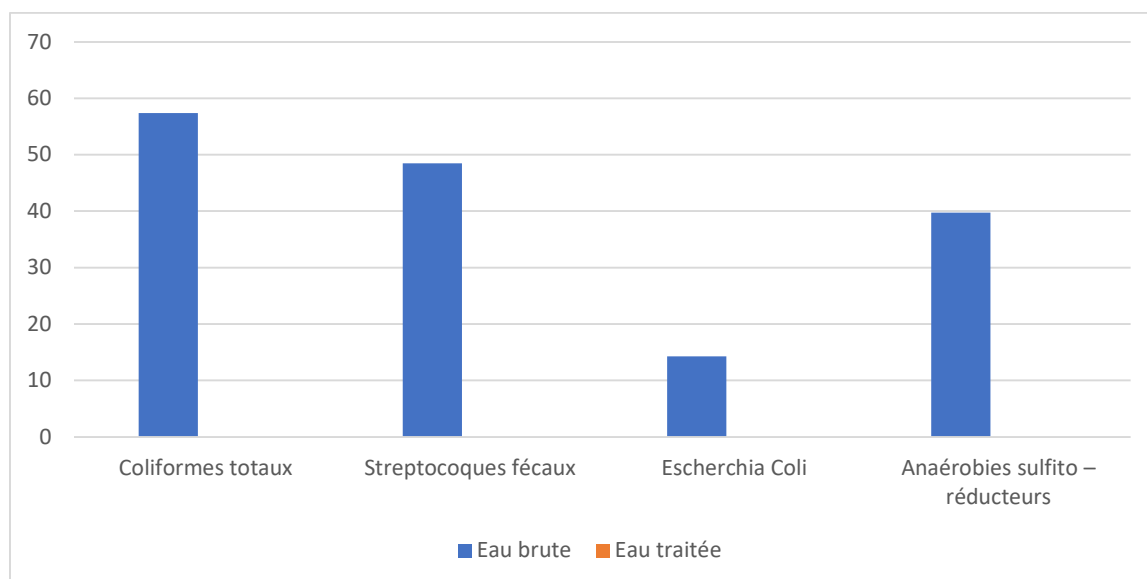


Figure 5 : Valeurs moyennes des paramètres microbiologiques de l'eau brute et traité.

IV. DISCUSSION

Dans l'objectif d'étudier la qualité de l'eau brute et traitée, des analyses comparées ont été réalisées entre les paramètres d'étude. L'article présente ainsi une analyse détaillée des paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'eau brute et de l'eau traitée du lac Mandrozeza à Madagascar, offrant des observations significatives sur la qualité de l'eau et les effets du traitement.

4.1. Evolution de la qualité physique

Les résultats indiquent que la température de l'eau brute varie de 17 à 21°C, avec une moyenne de 18,62°C, tandis que celle de l'eau traitée fluctue de 18 à 20°C, avec une moyenne de 18,93°C. Ces valeurs restent en dessous de la norme malgache de 25°C et similaire aux résultats de Fatima dans l'étude des eaux du barrage de Bouhanifia Wilaya de Mascara en Algérie en 2017 [8], ce qui est positif pour la préservation de la qualité de l'eau. Il a confirmé que ce paramètre joue un rôle primordial dans la vitesse des réactions chimiques (coagulation-floculation). La légère variation entre l'eau brute et l'eau traitée suggère que le traitement n'a qu'un impact minime sur la température, ce qui est cohérent avec les attentes. Le pH contribue sur l'équilibre calco-carbonique de l'eau qui renferme un système tampon constitué de bicarbonates et de carbonates. Celui-ci mesure de l'acidité ou de la basicité de l'eau [9]. L'acidité du pH de l'eau brute, variant entre 6 et 7,2, avec une moyenne de 6,59 qui contient faiblement de calcaire selon l'étude menée par Moussa Haidar [9], reste dans les limites de la norme de potabilité Malagasy de 6,5 à 9, et en dessous des valeurs trouvées par Gartet et al. [10] et dans la plage des valeurs d'Ouhmidou et al. [11].

Pour l'eau traitée, le pH varie de 7 à 7,4, avec une moyenne de 7,12, montrant une légère augmentation et rapprochant de la neutralité après le traitement. Cette légère alcalinisation post-traitement demeure dans les limites acceptables, et la stabilité du pH est un aspect positif.

La conductivité électrique est liée aux charges des matières organiques d'origine interne et externe, qui génèrent des sels après décomposition et minéralisation. Elle est également influencée par le phénomène d'évaporation, qui concentre ces sels dans l'eau [12], [13]. Ces valeurs sont en dessous de la norme maximale (3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), oscillant entre 23 et 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 31,95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau brute. Ce résultat traduit une faible minéralisation par rapport à celui d'Ouhmidou et al. et Fatima [11], [9].

Pour l'eau traitée, elles varient de 35 à 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 52,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette différence suggère que l'eau brute a une faible minéralisation par rapport à l'eau traitée, ce qui peut être attribuable aux processus de traitement car certains éléments minéraux ont été ajoutés comme l'ajout sulfate d'aluminium pourrait augmenter la conductivité de l'eau. La turbidité est la capacité d'un fluide à absorber, diffuser et/ou réfléchir la lumière. Dans les eaux naturelles, elle est généralement causée par la présence de matières en suspension et de particules colloïdales. Ces matières peuvent être des particules de terre, du sable, de la matière

organique ou des micro-organismes [8], [14]. Pour l'eau brute, elle est significativement élevée par rapport à la norme malgache, avec une moyenne de 10,55 NTU et similaire à celui de Fatma [8], indiquant ainsi une présence élevée de matières en suspension dans l'eau du lac.

Cependant, la turbidité de l'eau traitée diminue considérablement après le traitement, avec une moyenne de 2,54 NTU, répondant ainsi à la norme de potabilité malgache.

Cette réduction significative indique une nette amélioration de la transparence de l'eau suite au traitement, et la différence marquée entre les niveaux de turbidité de l'eau brute et ceux de l'eau traitée pourrait être attribuée à l'efficacité de la filtration appliqué e aux eaux brutes durant le processus de traitement [15].

4.2. Evolution de la qualité chimique

L'alcalinité est une propriété des eaux qui mesure leur capacité à neutraliser les acides. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité est principalement due à la présence de minéraux tels que les hydrogénocarbonates, les carbonates et les hydroxydes [12], [16], [17]. Les analyses ont montré que les eaux brutes et traitées du lac ne contiennent ni carbonates ni hydroxydes, ce qui explique le titre alcalimétrique nul des deux types d'eau. Le titre alcalimétrique complet était également faible, avec une valeur moyenne de 1,617°f pour l'eau brute et de 2,23°f pour l'eau traitée. Ces résultats corroborent ceux d'une étude menée aux eaux de barrage BAB LOUTA [18]. Cette constatation suggère une stabilité dans la composition alcaline de l'eau malgré le traitement. Les matières organiques sont une composante naturelle des eaux de surface brutes. Elles sont produites par la décomposition des matières animales et végétales par les micro-organismes [8]. Elles se situent dans l'eau brute se situe entre 3 et 8 mg/l, avec une moyenne de 6,22 mg/l, restant en dessous des normes malgaches. Après le traitement, la concentration diminue, se maintenant dans les limites de la norme de potabilité malgache. Cela témoigne de l'efficacité du traitement dans la réduction des composés organiques. La dureté totale de l'eau est généralement causée par la présence de sels de calcium et de magnésium [20]. Les niveaux de dureté totale de l'eau brute et traitée demeurent en deçà de la limite établie par la norme malgache (500 mg/l en CaCO_3), avec des valeurs moyennes respectives de 17,2 °f et 25,015 °f. Ces valeurs sont considérablement inférieures à celles enregistrées dans les eaux d'adduction publique de la Société Tchadienne par Mahamat et al. (2015), qui affichaient des moyennes de 47,457±20,61 mg/l pour l'eau brute et 42,66±11,73 mg/l pour l'eau traitée [15]. La tendance à l'augmentation après le traitement est observée par l'ajout de chaux vive dans le processus de coagulation-floculation. L'ammonium résulte de la réduction ultime des composés azotés organiques ainsi que de la matière inorganique présente dans les eaux et les sols. Son origine comprend également l'excrétion des organismes vivants, la réduction, et la biodégradation des déchets, tout en tenant compte des apports provenant des sources domestiques, industrielles, et agricoles [20]. La concentration d'ammonium dans l'eau brute est conforme à la norme malgache, et après le traitement, elle diminue considérablement. Ces résultats soulignent l'efficacité du traitement dans la réduction des niveaux d'ammonium, maintenant l'eau dans des conditions acceptables pour la consommation. Le fer, élément naturel contenu dans le sol et les roches, peut être présent dans l'eau suite au lessivage des sols, aux déversements industriels, à la corrosion des canalisations métalliques, et à l'utilisation de sels ferriques en tant que coagulants, comme indiqué dans l'article de Fatma [8]. Les valeurs trouvées avant le traitement sont toutes au-dessus de la norme de potabilité et différents des résultats trouvés par [8]. Les rejets industriels pourraient contaminer l'eau du lac, ce qui pourrait la rendre corrosive et endommager les canalisations de la JIRAMA. Les niveaux de fer dans l'eau respectent bien la norme Malagasy après le traitement, avec des concentrations inférieures à 0,5 mg/l. La concentration en fer a été réduite de 2,29 mg/l (eau brute) à 0,0827 mg/l (eau traitée). Les valeurs de chlorure respectent la norme Malagasy, indiquant une conformité aux normes de potabilité pour l'eau brute et traitée. La concentration élevée moyenne en ions Cl^- dans les eaux traitées s'explique par l'ajout de chlore aux eaux brutes pour assurer la désinfection bactérienne. Le calcium et le magnésium sont deux éléments majeurs de la dureté de l'eau. Leur teneur varie en fonction de la nature des terrains traversés [12]. Les concentrations en calcium et magnésium restent inférieures aux normes établies par la JIRAMA Malagasy, assurant la qualité de l'eau conformément aux exigences. Une différence significative est observée entre les valeurs moyennes des eaux brutes et traitées pour les ions magnésium, calcium et chlorure. Ces résultats indiquent que le processus de traitement a considérablement réduit la concentration de ces ions dans les eaux traitées. Avant le traitement, les valeurs étaient respectivement de 3,6863 mg/l, 2,0875 mg/l et 7,915 mg/l pour le magnésium, le calcium et le chlorure, tandis qu'après le traitement, elles sont de 6,0413 mg/l, 2,6225 mg/l et 11,460 mg/l. Les nitrates (NO_3^-) présents dans les eaux naturelles proviennent de la décomposition naturelle de matière organique azotée, telle que les protéines végétales, animales, les produits agricoles et les excréments animaux, effectuée par des microorganismes [21], [22].

L'ion ammonium ainsi formé subit une oxydation pour donner des nitrates. La présence de nitrates dans l'environnement découle naturellement du cycle de l'azote [12]. Les résultats d'analyse du lac Mandrozeza démontrent des valeurs variant de 3 à 8 mg/l, similaires à ceux du barrage étudié par Safiatou [23]. Ces résultats suggèrent alors une pollution significative attribuable aux activités agricoles dans l'environnement. Le nitrite (NO_2^-), quant à lui, résulte soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniac, soit d'une réduction des nitrates [12]. Les valeurs obtenues indiquent une concentration élevée de nitrites, atteignant en moyenne 0,0590 mg/l, ce qui concorde avec les résultats de Mahamat et al. [15], suggérant ainsi une pollution environnementale. Suite au traitement, les niveaux de nitrates et de nitrites demeurent conformes aux normes malgaches, témoignant de la qualité de l'eau traitée pour la consommation humaine. Ces valeurs ont été réduites respectivement de 0,5635 mg/l et 0 mg/l.

4.3. Evolution de la qualité microbiologique

Les résultats des analyses bactériologiques révèlent des concentrations significatives de divers germes bactériens dans l'eau brute, dépassant les normes malgaches. Les niveaux de coliformes totaux dans l'eau brute varient de 13 à 100 ufc/100ml, avec une moyenne de 57 ufc/100ml. De plus, les concentrations de streptocoques fécaux, d'E. coli et d'aérobies sulfito-réductrices dans l'eau brute, variant respectivement entre 6 et 90 ufc/100ml, 8 et 20 ufc/100ml, et 25 et 56 ufc/100ml, excèdent également les normes malgaches. Ces résultats sont faibles par rapport à ceux de Ouahchia et al. [24], de Fatma, Derfoufi et al. [25] et soulignent la présence des sources fécales et la possibilité d'une contamination d'origine humaine ou animale. Les résultats post-traitement sont particulièrement encourageants, indiquant l'absence de bactéries dans l'eau. Cela suggère que les mesures de traitement mises en place ont été efficaces pour éliminer la contamination bactérienne, assurant ainsi une eau traitée conforme aux normes sanitaires.

En conclusion, les résultats de l'analyse indiquent une conformité générale aux normes malgaches en matière de qualité de l'eau, avec des variations mineures post-traitement. Ces conclusions prometteuses mettent en avant l'efficacité du traitement, améliorant plusieurs paramètres clés de la qualité de l'eau physico-chimique du lac Mandrozeza. Malgré des niveaux élevés de germes bactériens dans l'eau brute dépassant les normes, les résultats après traitement démontrent une amélioration significative. Ainsi, l'efficacité des processus de traitement souligne l'importance des mesures prises pour garantir la potabilité de l'eau du lac Mandrozeza à Madagascar et assurer la sécurité sanitaire de l'eau destinée à la consommation.

V. CONCLUSION

A l'issue de cette étude, les caractéristiques physicochimiques et bactériologiques des eaux brutes et traitées du Lac Mandrozeza ont été déterminées lors du stage à la JIRAMA Mandrozeza Antananarivo. L'analyse physico-chimique de la qualité de l'eau du lac Mandrozeza montre que ce processus de traitement peut réduire efficacement les matières en suspension et améliorer la transparence de l'eau. L'eau est toujours potable car le pH traité, l'alcalinité, la matière organique, la dureté totale, l'ammonium, le fer, le chlorure, le magnésium, le calcium, les nitrates et les nitrites répondent tous aux normes de Madagascar. L'eau brute est moins minéralisée que l'eau traitée, ce qui indique l'efficacité du processus de traitement. L'analyse bactériologique montre que la qualité microbiologique de l'eau peut être contaminée par des excréments humains ou animaux. Les méthodes de traitement utilisées permettent d'éliminer efficacement la contamination bactérienne et de garantir que l'eau traitée répond aux normes sanitaires pour la consommation humaine. Dans l'ensemble, les mesures prises après traitement confirment que la qualité de l'eau du lac Mandrozeza est adaptée à la consommation humaine.

REFERENCES

- [1] Hind DERFOUFI, «Suivi de la qualité bactériologique des eaux de surface du Maroc oriental,» *Revue des Sciences de l'Eau Journal of Water Science*, vol. 32, n° 13, pp. 276-288, 2019.
- [2] K. K. G-R, Vers une gestion rationnelle de l'eau dans une situation complexe d'urbanisation anarchique dans un pays en développement : Cas du bassin versant de l'Abiergue (Yaoundé-Cameroun), Cameroun: Université de Liège, 2013.
- [3] F. Orelie, Etude de la qualite de l'eau destinee a la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable, (Anse-a-Veau): MatheO, 2017.
- [4] P. Vermande, La Gestion Intégrée de l'Eau : les enjeux mondiaux et régionaux. In : Actes du Colloque International

réalisé à Port-au-Prince, 2002.

- [5] Projet d'E.S.D.D.A.E TaToM, «Projet d'Elaboration du Schéma Directeur pour le Développement de l'Axe Economique TaToM. Plan d'Urbanisme Directeur de l'agglomération d'Antananarivo», Antananarivo-Toamasina, Madagasikara., 2019.
- [6] OMS, *Combatre les maladies véhiculées par l'eau à la maison*, Genève: Suisse: Organisation Mondiale de la Santé, 2005.
- [7] R. Antsa Niaina Saholimalala Fleuris, « Etudes de la performance des ouvrages pour le traitement d'eau potable, cas de la jirama mandrozeza », Antananarivo, 2016.
- [8] D. Fatima, «Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux brutes et traitées du barrage de Bouhanifia de Wilaya de Mascara (Ouest d'Algérie),» *Revue des BioRessources*, vol. 7, n° 12, pp. 99- 109, 2017.
- [9] C. M. Haidar, *Évaluation de la qualité de l'eau du bassin supérieur de la rivière du Litani, Liban : approche hydrogéochimique*, Liban: Université de Lorraine, 2018.
- [10] A. Gartet, M. El Fengour, J. Gartet et C. Conesa García, «Dégradation de la qualité des eaux du barrage Sahla: Traitement et gestion des risques de pollution,» *Papeles de Geografía*, vol. 49, n° 150, p. 14, 2009.
- [11] M. Ouhmidou, A. Chahlaoui, Kharroubi et M. Chahboune, «Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux du barrage Hassan Addakhil d'Errachidia (Maroc),» *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 6, n° 16, pp. 1663-1671, 2015.
- [12] R. Jean, L. Bernard, M. Nicole et Coll, *L'Analyse de l'eau*, vol. 09, Paris: Dunod , 2009.
- [13] D. Hamza et N. B. Eddine, *Etude de qualité des eaux des barrages de l'Est Algérien*, Algérie: Université Larbi Ben M'hidi, 2015.
- [14] C. Volk et J. J., «Paramètres prédictifs de l'apparition des coliformes dans les réseaux de distribution d'eau alimentaire,» *Revue des Sciences de l'eau*, vol. 7, n° 12, pp. 131-152, 1994.
- [15] S. A. M. Mahamat, M. Theophile, A. Tidjani, G. Ndoumtamia et B. Loukhman, «Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux d'adduction publique de la Société Tchadienne des Eaux à N'djamena au Tchad,» *Journal Applied Bioscience*, n° 195, p. 8973 – 8980, 2015.
- [16] M. H. Hassiba, *Etude de l'influence des particules argileuses sur le traitement des eaux*, Belkaid: UniversitéABOU BEKR BELKAID, 2015.
- [17] A. Farida, *Evaluation de la qualité des eaux de surface destinées à l'irrigation: cas du barrage de Dahmouni*, Wilaya de Tiaret, Blinda: Université de Blinda1, 2015.
- [18] A. Mohamed, S. Ghita, A. Abdelouahad et L. Mohammed, «Etude de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de barrage BAB LOUTA,» *International Journal of Innovation and Applied Studies* , vol. 20, n° 14, p. 2017, 1246-1255 .
- [19] M. Belghiti, A. Chahlaoui, D. Bengoumi et R. El Moustaine, «Étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe Plio-Quaternaire dans la Région de Meknès (Maroc),» *Larhyss Journal*, Vols. 1 sur 2ISSN 1112-3680, n° 114, pp. 21-36, 2013.
- [20] E. Derwich, L. Benaabidate, A. Zian, O. Sadki et D. Belghity, «Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec Oued Fes,» *Algerian Scientific Journal Platform*, n° 18, pp. 101-112, 2010.
- [21] A. Amel, K. Nouha, B. Chahinez, A. Adel et B. Mourad, «Caracterisation physico-chimique des eaux bu barrage Foum El-

Khanga (region de Souk-Ahras, Algerie),» *European Scientific Journal*, vol. 13, n° 112, pp. 258-275, 2017.

- [22] H. Mihoubi et K. Souad, Evaluation de la qualité des eaux des barrages de l'ouest Algérien, Algérie: Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi Bordj Bou-Arreidj, 2020.
- [23] C. Safiatou, K. N. Vincent et B. A. Célestin, «Etude comparative de la qualite des eaux des etangs et du barrage d'une ferme piscicole en etang au Sud-Est de la Côte d'Ivoire,» *European Scientific Journal*, vol. 15, n° 124, pp. 42-58, 2019.
- [24] C. Ouahchia, F. Hamaidi-Chergui, M. S. Hmaidi et F. Saidi, «Qualité bactériologique de l'eau potable des différents réservoirs et chez les consommateurs de la commune de Tipaza alimentés par la station de Sidi Amar à partir de l'eau de surface du Lac-Barrage de Boukourdane,» *Larhyss Journal*, Vols. 1 sur 2ISSN 1112-3680, n° 123, pp. 139-154, 2015.
- [25] H. Derfoufi, B. Chaouki, L. Mounir et B. Legssyer, «Suivi de la qualité bactériologique des eaux de surface du Maroc Oriental,» *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 33, n° 13, pp. 275-288, 2019.