

## **Suivi et évaluation de la qualité de l'eau du lac Mandrozeza à travers les paramètres de contrôle de premier niveau : vers la promotion des PGSSE**

**Hery Nirina Charles RALAIVELO<sup>1,2\*</sup>, Jean Jacques RAHOBISOA<sup>1</sup>, Rindra ANDRIATAFIKA<sup>2</sup>  
et Raymond RAKOTONDRAZAFY<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Mention Sciences de la Terre et de l'Environnement, Laboratoire d'hydrogéologie Ambohitsaina, BP 906 Antananarivo 101, Madagascar*

<sup>2</sup> *Société Jiro sy Rano Malagasy, Département Gestion Qualité Eau, Laboratoire d'analyse d'eau à Mandrozeza, BP 200 Antananarivo 101, Madagascar*

<sup>3</sup> *Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Mention Géologie Appliquée au Développement et Environnement*

(Reçu le 04 Novembre 2025 ; Accepté le 15 Janvier 2026)

---

\* Correspondance, courriel : [herynirinaralavelo@gmail.com](mailto:herynirinaralavelo@gmail.com)

### **Résumé**

Le lac Mandrozeza constitue une source stratégique pour l'alimentation en eau de la ville d'Antananarivo et ses environs. Cependant, la pression anthropique et les apports extérieurs augmentent les risques de dégradation de la qualité de l'eau de ce lac. L'objectif de cette étude est d'évaluer la qualité de l'eau du lac à travers un suivi régulier de la qualité de l'eau afin de comprendre l'évolution des paramètres de contrôle qualité de premier niveau, dans la perspective de promouvoir les Plans de Gestion de la Sécurité Sanitaire de l'Eau dans la ville d'Antananarivo. Des échantillons d'eau ont été prélevés chaque semaine en trois points différents du lac. L'analyse des 5 paramètres dont pH, turbidité, minéralisation, conductivité et température sont directement réalisés au laboratoire juste après de prélèvement. Depuis 2021 jusqu'en 2023, 1533 échantillons ont été prélevés et analysés. Les analyses montrent que la plupart des paramètres se situent aux alentours des valeurs acceptables sauf la turbidité avec un pic élevé atteignant jusqu'à 1045 NTU et une diminution de pH allant de 6,02 ont été observées en saison pluvieuse. Comme la zone est située dans une zone cristalline, le pH de l'eau tend à devenir encore plus agressif chaque année et la turbidité présente une augmentation annuelle de sa valeur extrême positive. Les résultats obtenus partagent des informations sur les tendances évolutives de la qualité de l'eau du lac pour la concrétisation progressive du PGSSE.

**Mots-clés :** *suivi, évaluation, qualité, eau, PGSSE.*

### **Abstract**

**Monitoring and evaluation of the water quality of Lake Mandrozeza through primary control parameters to promote WSP (Water Safety Plan)**

Lake Mandrozeza is a strategic source for the drinking water supply of the city of Antananarivo and its surrounding areas. However, anthropogenic pressure and external inputs increase the risk of water quality degradation in this lake. The objective of this study is to assess the water quality of the lake through regular

monitoring in order to understand the evolution of first-level water quality control parameters, with the aim of promoting Water Safety Plans in the city of Antananarivo. Water samples were collected weekly at three different points in the lake. Analyses of five parameters—pH, turbidity, mineralization, conductivity, and temperature—were carried out directly in the laboratory immediately after sampling. From 2021 to 2023, a total of 1,533 samples were collected and analyzed. The results show that most parameters remain close to acceptable values, except for turbidity, which exhibited a high peak reaching up to 1,045 NTU, and a decrease in pH to as low as 6.02, observed during the rainy season. As the area is located in a crystalline geological zone, the water pH tends to become increasingly aggressive each year, while turbidity shows an annual increase in its positive extreme values. The results provide insights into the evolving trends of the lake's water quality, contributing to the progressive implementation of the Water Safety Plan.

**Keywords :** *monitoring, evaluation, quality, water, WSP.*

## 1. Introduction

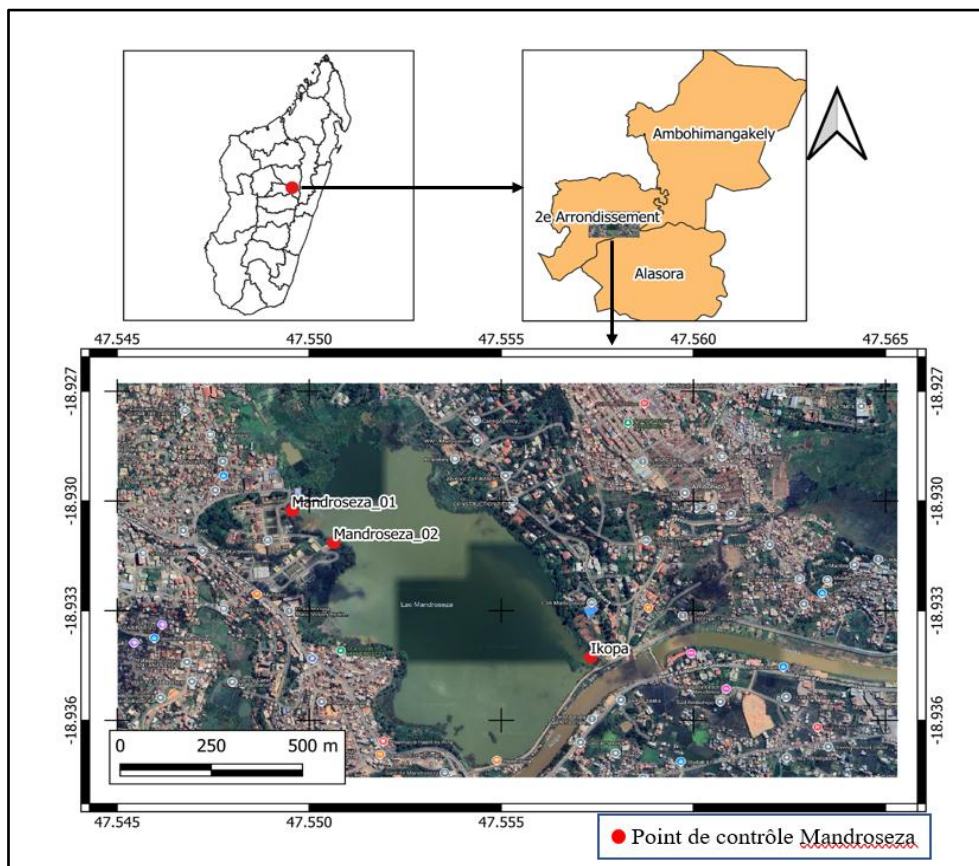
L'accès à une eau potable de qualité constitue un défi mondial majeur, en particulier dans les pays en développement [1, 2] pour l'atteinte de l'Objectif du Développement Durable. Dans le monde, 1,8 milliard de personnes utilisent une source d'eau potable contaminée par des matières fécales [3], augmentant ainsi les risques de maladies hydriques et de mortalité prématurée. Cette situation est exacerbée par la croissance démographique et l'urbanisation rapide exerçant une pression considérable sur les ressources en eau disponibles [4]. En Afrique, 13 pays sont confrontés à une insécurité hydrique sévère [5] y compris Madagascar. À l'échelle mondiale, l'expansion des zones urbaines et les activités anthropiques sont identifiées comme des facteurs de dégradation de la qualité de l'eau [6 - 8]. Une analyse de 625 études menées dans 63 pays a partagé que cette urbanisation entraîne une augmentation des polluants tels que les nitrates, les phosphates et les métaux lourds dans les cours d'eau [9]. Madagascar, bien que riche en ressources naturelles, fait face à des défis significatifs en matière de gestion en eau. Selon un rapport de la Banque mondiale et du MEAH en 2024, seulement 54,4 % de la population a accès à des services d'eau de base, et seulement 12,3 % dispose de services d'assainissement de base. Ces chiffres reflètent des inégalités profondes et une qualité de service insuffisante, notamment dans les zones urbaines. À Antananarivo, la capitale, la situation est préoccupante. Une étude a révélé que les concentrations de coliformes totaux, d'*Escherichia coli* et d'Entérocoques intestinaux dépassaient fréquemment les normes de potabilité, en particulier pendant la saison des pluies [10]. Cette contamination est attribuée à des infrastructures vieillissantes [11], à un urbanisme non planifié et à des pratiques d'assainissement inadéquates. Le lac Mandrozeza, situé au cœur d'Antananarivo, joue un rôle fondamental dans l'approvisionnement en eau potable de la ville. Cependant, il est soumis à des pressions anthropiques croissantes, notamment les rejets domestiques, les activités agricoles [12] et l'urbanisation non régulée. Les lacs peu profonds y compris Mandrozeza, sont sujets à une détérioration de la qualité de l'eau et sont difficiles à gérer [13]. Ces facteurs contribuent à la dégradation de la qualité de l'eau du lac, menaçant ainsi la santé publique et la sécurité de l'approvisionnement en eau de la ville ainsi que l'écosystème aquatique [14]. Face à ces enjeux, il est impératif d'évaluer régulièrement la qualité chimique de l'eau du lac Mandrozeza. Un suivi rigoureux des paramètres de contrôle de premier niveau permettra de comprendre l'évolution de la qualité de l'eau et de mettre en place des stratégies de gestion adaptées comme la promotion des PGSSE pour assurer la sécurité sanitaire de l'approvisionnement en eau potable d'Antananarivo. Le PGSSE, prôné par l'Organisation Mondiale de la Santé, est essentielle vers la gestion des risques afin de garantir en permanence la sécurité sanitaire de l'eau de boisson [15]. L'une des étapes majeures de cette approche est la réalisation de surveillances opérationnelles, impliquant des mesures et des observations rapides et simples effectuées sur

une base fréquente et régulière, telles que les tests quotidiens de la qualité de l'eau basés sur des paramètres indicateurs simples. Ainsi, cinq paramètres ont été choisis dans cette étude afin d'évaluer rapidement la qualité de l'eau et de proposer des plans d'amélioration convenables pour la potabilisation. Ce choix, basé sur une méthode d'évaluation rapide et efficace de la qualité de l'eau peut ainsi aider le service de gestion à comprendre la qualité de l'environnement aquatique et à déterminer les points clés du contrôle de la pollution [16]. Dans l'ensemble, cette étude vise à comprendre les tendances évolutives de la qualité de l'eau du lac à Mandroseza à partir des contrôles journaliers de premier niveau afin de concrétiser progressivement les PGSSE.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Présentation de la zone d'étude

Le lac Mandroseza est situé au sud-ouest de la ville d'Antananarivo, dans la Région Analamanga. C'est l'un des plus grands lacs du centre de la capitale de Madagascar s'étendant sur une superficie de 47 ha (2,5 km<sup>2</sup>) avec un volume estimé à 1,5 million de mètre cube (m<sup>3</sup>). Le lac est alimenté principalement par la rivière Ikopa via un barrage de prélèvement équipé de pompes de surface. Il sert de bassin de décantation, et joue un rôle primordial dans le traitement de l'eau avant sa distribution à la population Tananarivienne. Le lac est entouré de collines très urbanisées dont l'expansion urbaine rapide tout autour entraîne une pression accrue sur les ressources en eau et sur les infrastructures de traitement. Le climat de la zone d'étude est de type tropical marqué par deux saisons distinctes : une saison sèche et fraîche, comprise entre les mois d'avril et d'octobre, et une saison chaude et pluvieuse, s'étendant de novembre à mars. Cette variation saisonnière influe le comportement qualitatif de l'eau du lac.



**Figure 1 :** Carte localisation du lac avec les infrastructures environnantes

## 2-2. Identification et choix des points de contrôles

Dans le cadre de l'étude du comportement qualitatif du lac Mandroseza, le souci de garantir une bonne représentativité des résultats a été prise en compte. En effet, selon la carte de localisation du lac (*Figure 1*), trois points fixes ont été choisis dont le premier point se trouve à l'entrée de l'eau pompée en provenance de la rivière Ikopa (01 : Ikopa) et les deux autres se situent au niveau du lac Mandroseza (02 : Mandroseza\_01 et 03 : Mandroseza\_02), au niveau des deux points de captage d'eau de la JIRAMA.

## 2-3. Échantillonnage et analyse des eaux

Au cours du suivi réalisé de janvier en décembre entre 2021 et 2023, trois prélèvements hebdomadaires ont été, en moyenne, effectués. Les échantillons d'eau d'un volume de 250 ml ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène, puis transportés au laboratoire d'analyse de la société JIRAMA pour être analysés. Les cinq paramètres de contrôle qualité de premier niveau étudiés sont : la turbidité, le pH, la conductivité, la minéralisation et la température. En raison de leur importance dans le cadre des essais de traitement pour la potabilisation, ces paramètres ont été absolument pris comme paramètres de base. Comme le laboratoire d'analyse de la société JIRAMA se trouve à proximité du lac, les analyses ont été réalisées dans un délai maximal d'une heure après le prélèvement. Dans l'ensemble, 1533 échantillons d'eau ont été prélevés pour étudier l'évolution spatio-temporelle de la qualité de l'eau du lac Mandroseza pendant ces trois années.

**Tableau 1 : Matériels utilisés pour la mesure des cinq paramètres**

Paramètres	Matériel d'analyse
Turbidité	Turbidimètre HACH 2100Q (Précision $\pm 2\%$ )
pH	pH mètre Seven compact METTLER TOLEDO (Précision $\pm 0.002$ )
Minéralisation	WTW Conductimètre de laboratoire inoLab Cond 7110 (Précision conductivité $\pm 0.5\%$ et Température $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )
Conductivité	
Température	

## 2-4. Analyses des données

### 2-4-1. Microsoft Access

Etant donné la quantité des résultats disponibles chaque jour, les résultats ont été d'abord enregistrés dans un registre physique avant d'être numérisés sur Microsoft Access via un masque de saisie spécifique contenant plusieurs formatages de données. Le masque facilite la saisie et la correction des erreurs de saisie afin de rendre les données directement exploitables pour le suivi du comportement qualitatif de la qualité de l'eau. Des requêtes ont été lancées dans Microsoft Access pour présenter et/ou restituer les résultats en fonction des besoins.

### 2-4-2. XLSTAT

Le programme Excel, avec son extension XLSTAT 2021, a été utilisé pour le traitement statistique des données. Les statistiques multivariées sont des outils permettant d'examiner simultanément les relations entre plusieurs variables. L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique d'analyse multivariée non supervisée qui simplifie la complexité des données en les transformant en quelques dimensions mettant en évidence leurs tendances et leurs corrélations [17, 18]. Des analyses descriptives ont été réalisées en présentant les boîtes à moustaches ou Boxplot pour suivre l'évolution des valeurs extrêmes maximales et minimales, ainsi que les moyennes. La boîte à moustaches est une représentation schématique de la distribution d'une variable. Le diagramme en boîte est un outil de visualisation puissant pour les ensembles de données continues échantillonnées en raison de la richesse des informations qu'il fournit, de sa taille compacte et de son expression visuelle efficace [19, 20].

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Évolution des paramètres

Le **Tableau 2** nous montre la comparaison entre la période de pluie et la période d'étiage. Ainsi la moyenne des 5 paramètres (pH, Turbidité, Minéralisation, Conductivité et Température) pendant les trois années de suivi au niveau des trois points de contrôles dont Ikopa, Mandroseza\_01 et Mandroseza\_02 y sont présentés.

**Tableau 2 : Moyenne de chaque paramètre par point de prélèvement pendant les deux saisons de l'année de 2021 - 2023**

Id_Point	pH		Turbidité		Minéralisation		Conductivité		Température	
	Pluie	Etiage	Pluie	Etiage	Pluie	Etiage	Pluie	Etiage	Pluie	Etiage
01	6,95	7,14	117,76	41,24	22,56	22,43	24,80	24,46	25,07	20,75
02	6,82	7,01	19,63	9,12	35,70	32,49	39,26	35,29	23,16	18,98
03	6,83	7,00	23,51	9,32	37,97	33,74	41,41	36,49	22,92	18,91

Le **Tableau 3** illustre, l'évolution des valeurs moyennes et des valeurs extrêmes maximales et minimales des 5 paramètres au niveau des trois points de contrôles choisi de 2021 jusqu'en 2023.

**Tableau 3 : Valeurs minimale (Min), moyenne (Moy) et maximale (Max) annuelle des 5 paramètres au niveau des trois points de prélèvement**

Point	Année	pH			Turbidité			Minéralisation			Conductivité			Température		
		Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
01	2021	6,09	7,34	8,86	11,30	58,30	466,00	8,00	24,59	57,00	8,23	27,08	63,70	15,00	22,18	28,80
	2022	6,05	7,00	8,95	16,00	88,96	890,00	12,00	20,15	48,00	12,70	22,13	51,50	14,00	21,93	31,30
	2023	6,02	6,97	8,38	8,45	57,24	1 045,00	12,00	23,67	66,00	13,40	25,67	71,30	15,40	23,06	32,40
02	2021	6,29	7,21	8,55	6,00	12,33	60,00	9,00	34,97	130,00	10,00	38,16	143,40	14,70	20,96	27,10
	2022	6,23	6,89	8,05	5,11	13,31	97,80	19,00	32,21	108,00	21,50	35,18	119,30	14,10	19,89	26,10
	2023	6,25	6,81	7,77	5,88	13,43	121,00	19,00	34,56	55,00	20,80	37,71	75,00	15,40	21,08	27,00
03	2021	6,51	7,23	8,40	6,02	13,27	81,00	8,00	43,19	177,00	9,23	47,06	180,70	14,60	20,89	28,00
	2022	6,07	6,87	7,89	5,09	15,75	136,00	17,00	31,89	135,00	19,00	34,67	152,20	14,20	19,69	26,00
	2023	6,00	6,81	7,59	6,39	14,51	112,00	15,00	33,84	65,00	21,70	36,52	59,20	15,20	20,97	27,10

Le **Tableau 4** permet d'observer l'évolution des valeurs moyennes mensuelles pour montrer l'influence de la variabilité climatique sur les 5 paramètres de contrôle qualité de premier niveau.

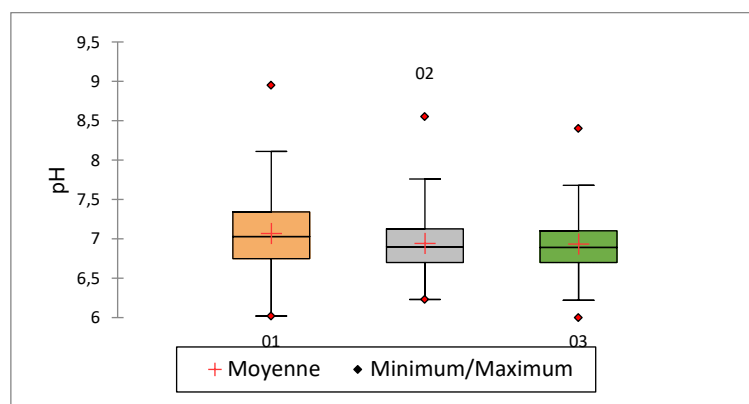
**Tableau 4 : Évolution mensuelle de la valeur moyenne de chaque paramètre de 2021 - 2023**

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
pH	6,73	6,84	6,92	6,91	7,02	7,07	7,12	7,12	7,17	6,94	6,91	6,91
Turbidité	101,05	53,20	55,94	33,85	21,93	15,45	15,33	16,44	16,03	21,13	21,89	50,11
Minéralisation	36,58	36,12	37,78	33,95	31,23	33,90	33,03	28,91	25,35	21,80	24,98	28,77
Conductivité	39,95	40,06	40,92	36,89	33,93	37,02	35,38	31,30	27,67	23,74	27,09	31,99
Température	23,48	23,64	23,47	22,56	20,72	17,78	16,86	18,10	18,59	22,38	23,92	23,95

#### 3-1-1. Le pH de la ressource

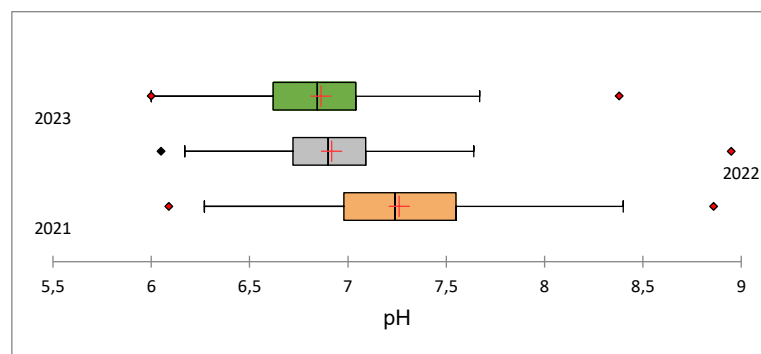
Pendant ces trois années d'études dans le **Tableau 2**, le pH des eaux varie de 6,02 à 8,95 avec une moyenne de 7,07 pour Ikopa et 6,94 pour les deux autres points dont Mandroseza\_01 et Mandroseza\_02. La variation saisonnière a des influences sur les valeurs de ce paramètre au niveau de chaque point de contrôle. Dans le

**Tableau 2** pour Ikopa, la moyenne est de 6,95 pendant la saison de pluie contre 7,14 en étiage. Mandroseza\_01 a une valeur moyenne de 6,82 pendant la saison de pluie contre 7,01 pendant l'étiage. Mandroseza\_02 est très proche de Mandroseza\_01 avec une valeur moyenne de 6,83 pendant la période de pluie et 7,00 pendant l'étiage. En comparant l'évolution mensuelle de ce paramètre pendant les 12 mois de l'année dans le **Tableau 4**, la valeur moyenne la plus faible est rencontrée pendant le mois de Janvier et la valeur moyenne la plus forte pendant le mois de Septembre où commence à apparaître l'extrême étiage à Madagascar. Entre le premier point de contrôle situé à l'entrée du lac Mandroseza et des deux points de captage (Mandroseza\_01 et Mandroseza\_02), une différence de valeur de 0,13 a été observé dont le pH est devenu plus acide à l'approche des deux points de captages. Cet écart à l'échelle de 0,13 est presque conservé que ce soit pendant la période d'étiage ou pendant la période de pluie. D'après la **Figure 2**, les pH des trois points de contrôle montrent des valeurs supérieures extrêmes et uniquement au niveau Mandroseza\_2 que des valeurs extrêmes inférieures a été observée. Au niveau de l'Ikopa, la valeur du pH est plus ou moins dispersée par rapport aux deux autres points.



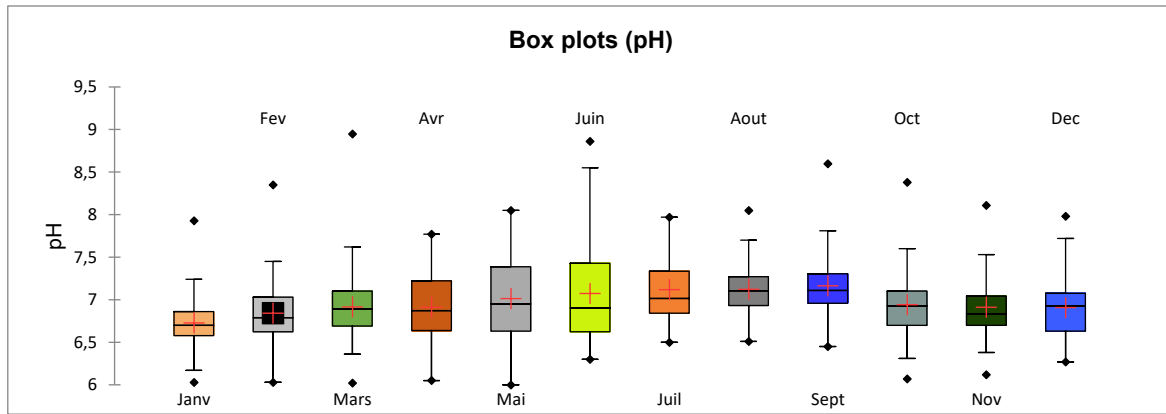
**Figure 2 : Box plot pH des trois points de contrôles à Mandroseza**

La **Figure 3** présente aussi une diminution annuelle de la valeur minimale et de la valeur moyenne du pH de 2021 jusqu'en 2023. Comme nous avons vu sur l'image, la partie inférieure de la boîte à moustache pour l'année 2021 se retrouve plus à gauche par rapport aux deux autres années.



**Figure 3 : Box plot pH de 2021 jusqu'en 2023**

La **Figure 4** nous montre le comportement du pH pendant les 12 mois de l'année. La moyenne de la valeur du pH est plus faible du mois de Novembre jusqu'au mois de Mars et une petite augmentation entre le mois d'Avril et le mois d'Octobre.

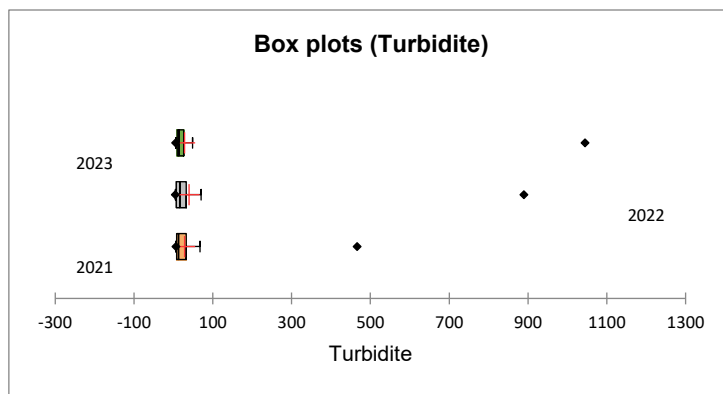


**Figure 4 : Box plot pH pendant les 12 mois de l'année**

Le pH de l'eau est l'un des indicateurs le plus important des changements chimiques et biologiques dans les systèmes lacustres. Ce paramètre a une influence majeure sur les eaux intérieures et les écosystèmes qui y sont associés [21]. Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux du lac Mandroseza et de la rivière Ikopa montrent que les eaux sont acides, signifiant que ces eaux sont agressives. Durant la période de suivi, dans son ensemble, l'acidité de ces eaux serait probablement en relation avec les sols acides traversés par les eaux de la rivière Ikopa avant leur entrée dans le lac Mandroseza, également reposant sur des formations géologiques acides et sol acide. Ce paramètre physique est influencé par les processus biologiques et géologiques se produisant dans un plan d'eau et par la nature des terrains traversés [22]. Des résultats d'analyses d'eau dans des puits aux alentours de Mandroseza en 2022 montrent des pH acides [23]. Ces sols acides sont en rapport avec la lithologie des terrains qui sont constitués par les formations gneissiques, migmatitiques et granitiques. Par ailleurs, l'acidité de ces eaux proviendrait de la quantité élevée de CO<sub>2</sub> libre dans le sol. Les infiltrations des eaux de ruissellement pendant l'été dans la nappe phréatique qui est légèrement acide en raison de sa teneur en CO<sub>2</sub> dissous peuvent entraîner cette acidité. En effet, la dissolution du CO<sub>2</sub> génèrera de l'acide carbonique dissous. Celui-ci se dissocie et libère ainsi des protons qui modifient le pH de l'eau naturelle en la rendant acide [24]. La diminution du pH au niveau du lac par rapport à celui de l'Ikopa peut provenir aussi de la décomposition des matières organiques végétales, avec les premières couches du sol [25]. Les boues et la présence du débris végétal en plein décomposition en grande quantité lors de la campagne du sondage dans le lac en 2024 confirment l'influence des processus biologique et pédologique conduisant à l'acidité des échantillons dans le lac.

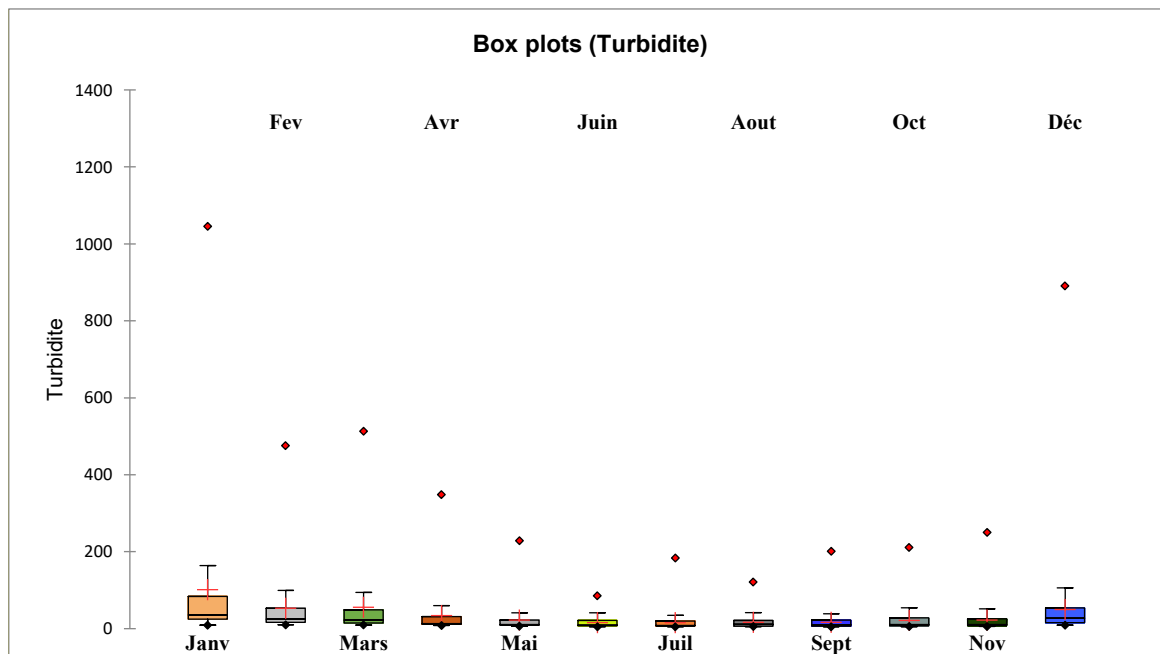
**3-1-2. Turbidité de la ressource**

La turbidité des eaux pendant ces trois années d'études dans le **Tableau 3** varie de 6,00 à 1 045 NTU avec une moyenne de 70,29 pour Ikopa, 13,11 pour Mandroseza\_01 et 14,71 pour Mandroseza\_02. Au cours de ces trois années de suivi, le **Tableau 3** nous montre la valeur maximale observée de la turbidité pour Ikopa, Mandroseza\_1 et Mandroseza\_2 est de 1045 NTU, 121 NTU, et 136NTU. Tandis que la valeur minimale observée, correspond à 8,4 NTU pour Ikopa, 5,11 NTU pour Mandroseza\_1 et 5,09 NTU pour Mandroseza\_2. Entre Ikopa et les deux points de captage d'eau à Mandroseza, le pourcentage de la réduction de la turbidité atteint jusqu'à 80 % pendant cette période de suivi, ce qui représente une réduction 5 fois moins de ce paramètre de l'Ikopa vers Mandroseza. Sous l'influence de la variation saisonnière, la turbidité moyenne de l'Ikopa passe de 117,76 NTU pendant la période de pluie, jusqu'à 41,24 NTU en étiage. Pour Mandroseza\_01, ce paramètre passe de 19,63 NTU en période de pluie jusqu'à 9,12 NTU pendant la période d'étiage. Mandroseza\_03 est de 23,51 NTU pendant la période de pluie et 9,32 pendant l'étiage. La **Figure 5** montre une augmentation annuelle de la valeur extrême supérieure de la turbidité de l'eau. Cette évolution passe de 466 NTU en 2021, 890 NTU en 2022 et 1 045 NTU en 2023.



**Figure 5 :** Box plot de l'évolution annuelle de la turbidité

La **Figure 6** montre l'évolution mensuelle de la turbidité de l'eau. Le mois le plus touché par le maximum de turbidité est le mois de Janvier et Décembre. A raison de la grande influence de la variation saisonnière sur la turbidité, la valeur de ce paramètre est fortement dispersée pendant la période de pluies contrairement à celle que nous avons observé pendant la période d'étiage.



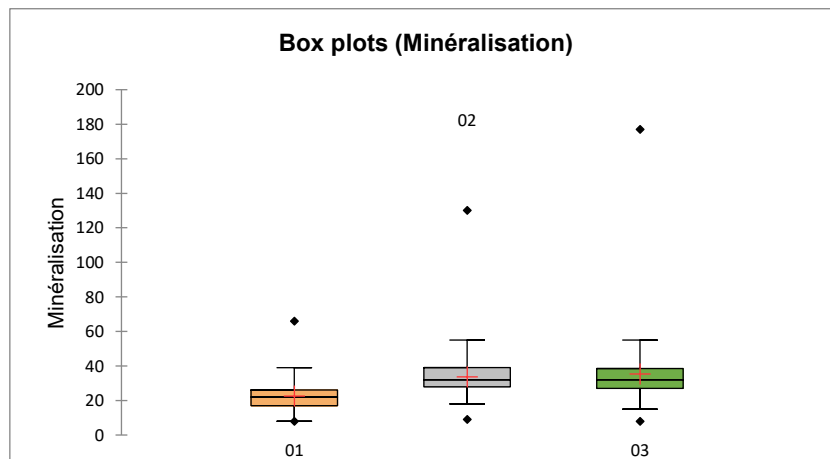
**Figure 6 :** Boxplot des moyennes mensuelles de la turbidité

La turbidité est une des marqueurs de particules dissoutes dans l'eau [26] ou indice de la présence de particules minérales et organiques en suspension dans l'eau ainsi que de certains matériaux en solution [27]. Elle est couramment utilisée pour estimer la qualité de l'eau et les conditions environnementales [11, 28]. L'augmentation annuelle de la valeur maximale extrême de la turbidité pourrait être due aux influences de la vulnérabilité physique accrue par l'érosion hydrique du bassin de l'lkopa et celui du lac Mandroseza, ce qui pourrait contribuer à la dégradation de la qualité de l'eau, avec des valeurs atteignant jusqu'à 1045 NTU pendant le maximum de pluie. Le déversement excessif des eaux usées domestiques et industrielles dans le lac pendant une forte pluie favorise aussi l'augmentation brusque de la turbidité. L'occupation du sol constitue le paramètre déterminant dans l'explication des variations de la turbidité [27]. Avec la disparition progressive de la couverture végétale le long de la rivière lkopa et l'insuffisance du réseau d'assainissement pluviale des

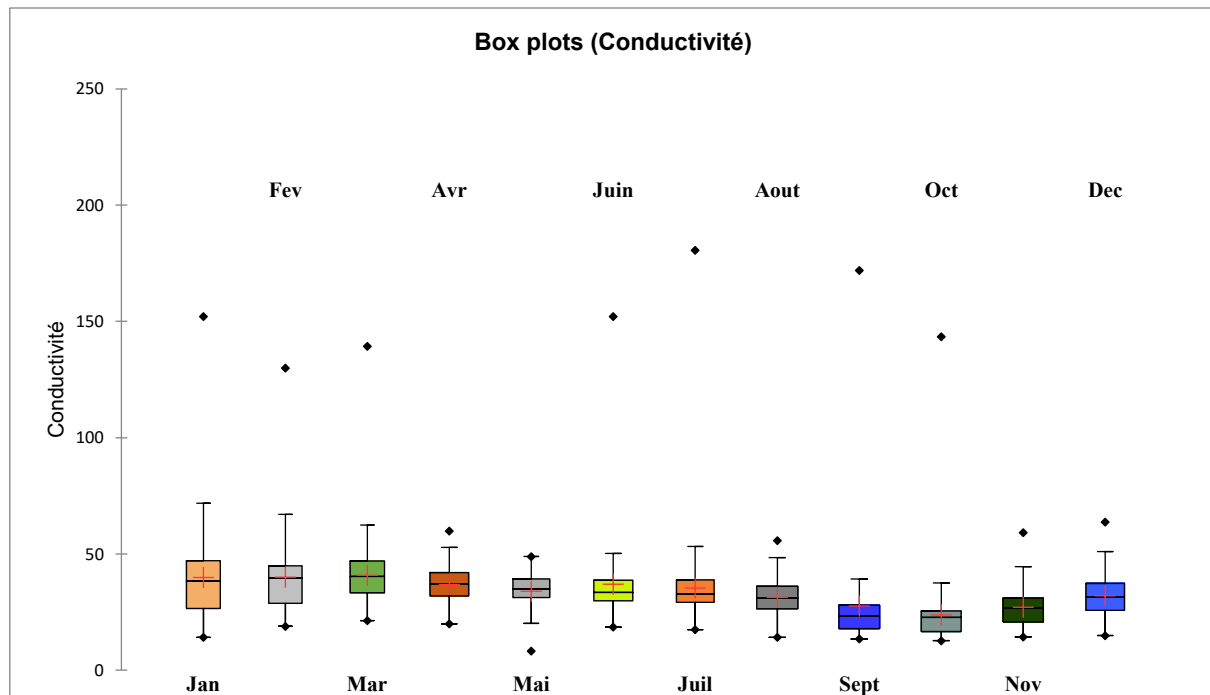
quartiers non aménagés aux environs, le lac Mandroseza est exposé à l'érosion qui conduit au drainage direct des eaux de ruissellement vers le lac provoquant ensuite une hausse annuelle de la turbidité de l'eau. Et l'influence de la saisonnalité climatique vient à doubler ce phénomène. La différence dans la gamme de turbidité peut être principalement influencée par les précipitations [13]. Malgré cette situation, le rôle joué par le lac en tant que décanteur naturel favorise une amélioration de la turbidité pour diminuer jusqu'en moyenne 80 % à son arrivée au niveau des deux points de captage d'eau de la JIRAMA à Mandroseza.

**3-1-3. Minéralisation et conductivité électrique**

Pendant ces trois ans d'études la minéralisation moyenne des trois points de contrôle est de 22,80 mg/l pour Ikopa, 33,1 mg/l pour Mandroseza\_1 et 36,31 mg/l pour Mandroseza\_2. D'après le **Tableau 4**, La minéralisation varie aussi en fonction de la saison pendant la période d'étiage la valeur moyenne est de 22,43 pour Ikopa, 32,49 pour Mandroseza\_1 et 33,74 pour Mandroseza\_2. Ces valeurs augmentent pendant la période de pluie dont 22.56 pour Ikopa, 35,70 pour Mandroseza\_1 et 37,97 pour Mandroseza\_2. La **Figure 8** montre précisément l'évolution mensuelle de la moyenne des conductivités. De l'Ikopa vers Mandroseza, une augmentation de la minéralisation s'est observée dans la **Figure 7**, dont la valeur moyenne de 24,48 mg/L s'est élevée jusqu'à 33,71 mg/L à l'arrivée à Mandroseza\_01 et 35,34 mg/L à l'arrivée à Mandroseza\_02.



**Figure 7 :** Box plot de la minéralisation des trois points de contrôles

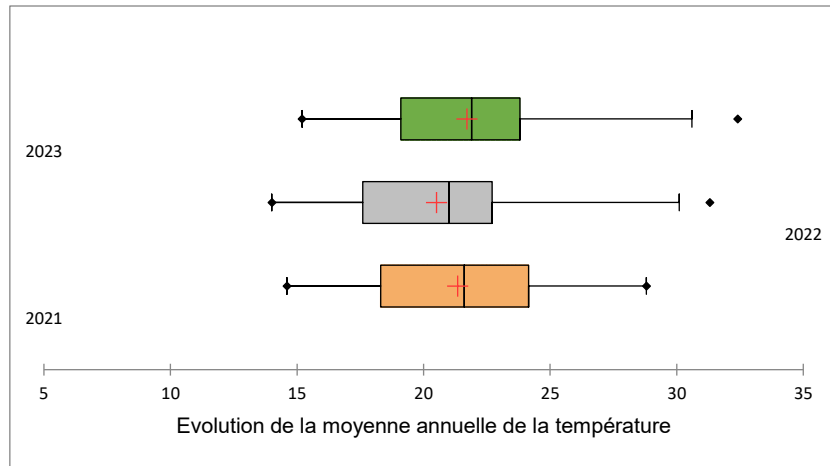


**Figure 8 :** *Boxplot de la minéralisation mensuelle de 2021 - 2023*

Selon les valeurs moyennes des trois points de contrôle, la conductivité électrique dans notre zone d'étude est faible, synonyme d'une faible minéralisation [29, 30]. En comparant la minéralisation et/ou la conductivité électrique des deux zones de contrôle à savoir la rivière Ikopa et le lac Mandroseza ; ce dernier est fortement exposé aux déversements des eaux usées domestiques et industrielles. Tous les réseaux d'effluents en provenance des bassins versants aux alentours (versant d'Ambohipo, Ambohimandra, Ankatso, Tsiadana et d'Andohanimandroseza) se déversent directement dans le lac pour favoriser des apports riches en sels dissous comme le nitrate, chlorures, sulfates, sodium, potassium, etc. La hausse de la conductivité des eaux usées domestiques et industrielles influencent la conductivité de l'eau du lac y compris le rejet des eaux usées de lavage de la part même de la JIRAMA. Ainsi, l'augmentation pendant la période de pluie peut s'expliquer principalement par les apports de matières dissoutes et en suspension par les eaux de ruissellement et les cours d'eau, ainsi qu'à la dissolution de minéraux dans le sol et les roches autour du bassin versant [31]. Les pluies fortes provoquent des turbulences et des brassages du lac favorisant la libération des ions accumulés au fond du lac. Ainsi, la remobilisation de sels piégés dans le fond du lac pourrait aussi être à l'origine de la hausse de la conductivité électrique. Cette remobilisation est le reflet du changement de la nature du fond qui est liée probablement aux sédiments de composition et/ou de granulométrie différente de celles des sédiments en place. Ce processus est dû à l'érosion de sédiments de surface qui met à nu les sédiments sous-jacents de nature différente. Cette modification est donc issue des pressions qui modifient les apports terrigènes.

### **3-1-4. Température**

La température moyenne des trois points de contrôle est de 22,39 °C à Ikopa, 20,57°C à Mandroseza\_01 et 20,44°C à Mandroseza\_02. Ces valeurs montrent une différence aux alentours de 2,2°C de température en passant de l'Ikopa vers les deux points de captage d'eau de la JIRAMA à Mandroseza. La température de l'eau change aussi avec la variation saisonnière. La température moyenne de l'Ikopa en saison d'été est de 20,35°C contre 24,75°C en période de pluie. Pourtant, la température moyenne de Mandroseza\_1 en saison d'été est de 18,56 contre 23,13°C en période de pluie et celle de Mandroseza\_2 la période d'été est de 18,47°C contre 22,92°C pendant la période de pluie. D'après la **Figure 9**, la valeur extrême de ce paramètre ne cesse d'augmenter progressivement avec une valeur moyenne de 28,8°C en 2021, 31,30°C en 2022 et 32,40 en 2023.

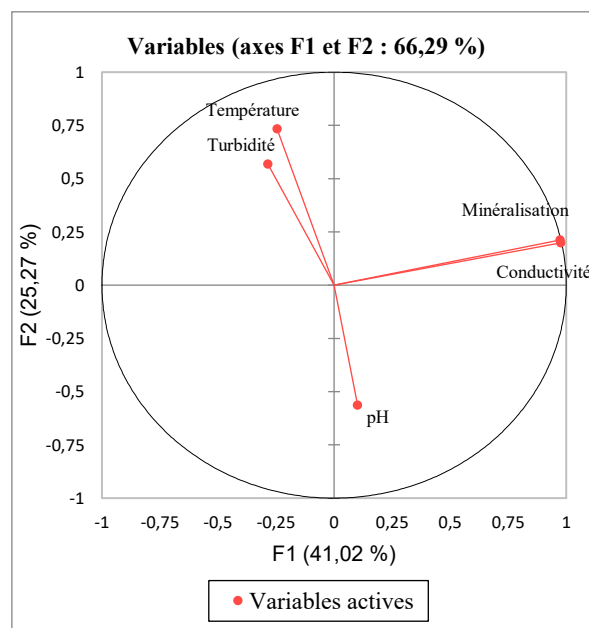


**Figure 9 :** *Boxplot de la température annuelle de 2021 jusqu'en 2023*

La température de l'eau est soumise aux influences atmosphériques et particulièrement aux changements de la température de l'air [26]. C'est-à-dire que les valeurs élevées de la température peuvent être expliquées par l'effet de la variation saisonnière [32]. Concernant les lacs, la température de l'eau dans ces réservoirs est régulée par l'échange d'énergie (chaleur) entre la surface du lac et l'atmosphère qui le recouvre [33]. Pendant la saison de pluie où la température de l'air est en hausse parallèlement avec la température de l'eau contrairement à la situation en saison d'étiage.

### 3-2. Analyse ACP (Analyse en Composante Principale) et corrélation de Pearson

La présence d'une somme importante de données quantitative favorise l'implication sur l'ACP pour la synthèse des informations et la corrélation de Pearson pour établir les relations entre deux variables. Cette analyse ACP est arrêtée aux deux premiers facteurs en exprimant 66.29 % (Figure 10) de la variance totale.



**Figure 10 :** *Analyse ACP (Analyse en Composantes Principales)*

**Tableau 5 : Corrélation de Pearson des 5 paramètres**

	pH	Turbidité	Minéralisation	Conductivité	Température
pH	1				
Turbidité	-0,18	1			
Minéralisation	-0,48	-0,37	1		
Conductivité	-0,49	-0,36	0,99	1	
Température	-0,58	0,51	-0,17	-0,15	1

Les valeurs de corrélation ayant une valeur supérieure à 0,4 ou inférieure à -0,4 sont en gras. Une Corrélation négative entre la température et le pH avec une valeur de -0,58 s'explique par le fait que plus la température augmente plus le pH diminue. La corrélation positive entre la température et la turbidité avec une valeur aux alentours de 0,51 indique que ces deux paramètres évoluent ensemble dans le même sens. Cette corrélation positive entre la turbidité et la température peut s'expliquer aussi par l'influence de la température sur la fréquence des collisions de particules due aux forces d'inertie [34]. La corrélation négative entre pH et conductivité – minéralisation nous permet de dire que les processus favorisant l'augmentation de la minéralisation tendent à abaisser le pH. Ces corrélations nous montrent l'impact de la saisonnalité climatique sur la qualité de l'eau du lac de notre zone d'étude. Ces corrélations réapparaissent aussi dans l'ACP (*Figure 10*). La turbidité qui est fortement influencée par la variation saisonnière. De ce fait, les eaux de ruissellement en période de pluies favorisent l'action érosive pour transporter des matières en suspension et/ou polluants dans les ressources. De plus le déversement des eaux usées domestiques est accentué pendant cette période. Alors que, la saison à Madagascar est subdivisée en deux dont la saison de pluie et la saison sèche. La période de pluie qui correspond à l'augmentation de la température de novembre en avril et la période d'étiage de Mai en octobre est accompagnée par une baisse de la température. D'où la corrélation positive entre la température et la turbidité. Lesdits paramètres (température et turbidité) en corrélation positive sont corrélés négativement avec le pH. Pendant l'augmentation de la turbidité et la température de l'eau, le pH est en baisse.

#### 4. Conclusion

Cette étude a permis de comprendre l'évolution de la qualité de l'eau du lac à partir des paramètres de contrôles qualité de premier niveau. Il ressort de cette étude que les eaux de ces réservoirs ont tendance à devenir très acides en passant d'une moyenne de 7,26 en 2021 et 6,86 en 2023. Ces eaux sont faiblement minéralisées dans l'ensemble, avec une conductivité moyenne de 33,247  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La valeur maximale extrême de la turbidité augmente annuellement avec une valeur de 1 045 ntu en 2023. L'ACP et le coefficient de corrélation de Pearson démontrent l'influence de la variabilité climatique et l'impact des activités anthropiques sur la qualité générale de l'eau du lac Mandroseza. Les résultats de cette étude fournissent des données et ou informations sur les tendances évolutives de la qualité de l'eau afin de prévoir les stratégies de traitement à adopter pour y face. Une gestion attentive pour préserver sa qualité et sa fonctionnalité est nécessaire. D'où l'importance de la promotion des Plans de Gestion de la Sécurité Sanitaire de l'Eau pour garantir en permanence la salubrité de l'eau pour Grand Tana.

## Références

- [1] - P. SERVAIS, G. BILLEN, T. GARCIA-ARMISEN, I. GEORGE, A. GONCALVEZ et S. THIBERT, « La contamination microbienne dans le bassin de la Seine ». Agence de l'Eau Seine Normandie, (2009) 50 p.
- [2] - M. L. SHFERAW, M. LEWEYHUB and S. AFEWORK, "Assessment of the potability and carcinogenic and non-carcinogenic health risks of drinking water in rural areas of the Amhara region, Ethiopia", *Journal of Water and Health*, 22 (10) (2024) 1988 - 2014 p.
- [3] - Z. ASHURO, M. E. AREGU, G. G. KANNO, B. NEGASSA, N. E. SOBOKSA, A. ALEMBO, E. ARARSA, F. BADECHA and S. TASSEW, « Bacteriological quality of drinking water and associated factors at the internally displaced people Sites, Gedeo zone, southerne Ethiopia", *Environmental Health Insights*, Vol. 15, (2021)
- [4] - T. WU, S. WANG, B. SU, H. WU and G. WANG, "Understanding the water quality change of the Yilong Lake based on comprehensive assessment methods". *Ecological Indicators*, 126 (2021) 107714
- [5] - C. MACALISTER, G. BAGGIO, D. PERERA, M. QADIR, L. TAING and V. SMAKHTIN, "Global Water Security 2023 Assessment. United Nations University Institute for Water", *Environment and Health (UNU INWEH)*, (2023) 128 p.
- [6] - Y. A. TWUMASI, E. C. MEREM, Z. H. NING, H. B. YEBOAH, J. D. OSEI, P. M. LOH, D. T. GYAN, E. DADZIE, V. FERCHAUD, M. ANOKYE, R. N. D. ARMAH, J. E. MJEMA and L. A. KANGWANA, " Assessing the Impact of Population Growth in Louisiana on Diminishing Water Quantity and Quality within the State", *Journal of Water Resource and Protection*, 16 (2024) 730 - 756
- [7] - B. M. MUSTAFA and N. E. HASSAN, "Water contamination and its effects on human health", *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, Vol. 28, Issue 1 (2024) 38 - 49 p.
- [8] - P. A. ELLIS and M. O. RIVETT, "Assessing the impact of Voc-Contaminated groundwater on surface water at the city scale", *Journal of Contaminant Hydrology*, 91 (2007) 107 - 127
- [9] - X. SHI, D. MAO, K. SONG, H. XIANG, S. LI and Z. WANG, «Effects of landscape changes on water quality : A global meta-analysis", *Water research*, Vol. 260, (2024)
- [10] - A. BASTARAUD, « Facteurs environnementaux et qualité microbiologique de l'eau potable dans les villes à faibles revenu, cas de Madagascar ». Thèse de doctorat Hydrologie, Université Paris Saclay, (2019) 192 p.
- [11] - S. NDULI, M. TEKERE, V. MASINDI and S. FOTEINIS, "Assessment of the water quality and microbial regrowth in drinking water treatment plants and the distribution network ", *Water Resources and Industry*, 33 (2025)
- [12] - A. H. RABEARISOA, R. V. NASOLOMAMPIONONA et B. MANJOLONGO, « Etude de la qualité physico chimique et bactériologique de l'eau brute et traitée : Cas du lac Mandroseza Antananarivo à Madagascar », *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, 41 (2) (2023)
- [13] - X. LIU, J. XIA, J. ZU, Z. ZENG, Y. LI, J. LI, Q. WANG, Z. LIU and W. CAI, "Spatiotemporal variations and gradient functions of water turbidity in shallow lakes", *Ecological Indicators*, 147 (2023)
- [14] - M. ABBAS, M. ADIL, S. EHTISHAM-UL-HAQUE, B. MUNIR, M. YAMEEN and A. GHAFAR, "Fischeri bioluminescence inhibition assay for ecotoxicity assessment". *Science of The Total Environment*, 626 (2018) 1295 - 1309
- [15] - J. BARTRAM, L. CORRALES, A. DAVISON, D. DEERE, D. DRURY, B. GORDON, G. HOWARD, A. RINEHOLD and M. STEVENS, « Manuel de gestion des risques par étapes à l'intention des distributeurs d'eau de boisson ». Organisation mondiale de la Santé. Genève, (2009) 108 p.
- [16] - Q. LIU, Y. TIAN, Y. LIU, D. XU, J. LI and Y. JIANG, "Characteristics of two comprehensive assessment methods for water quality based on different evaluation criteria and their applications in aquatic environment management", *Acta Ecologica Sinica*, Vol. 39, Issue 20 (2019) 7538 - 7546 p.

- [17] - N. P. VIDAL, C. F. MANFUL, T. H. PHAMA, P. STEWART, D. KEOUGH and R. H. THOMAS, "The use of XLSTAT in conducting principal component analysis (PCA) when evaluating the relationships between sensory and quality attributes in grilled foods", *Elsevier Methode X*, Vol. 7, (2020)
- [18] - Z. WANG, D. JIA, S. SONG and J. SUN, Assessments of Surface Water Quality through the Use of Multivariate Statistical Techniques : A Case Study for the Watershed of the Yuqiao Reservoir, China, *Frontier in Environmental Science*, Vol. 11, (2023) 1107591
- [19] - H. WICKHAM and L. STRYJEWSKI, "40 years of boxplots", (2011) 17 p.
- [20] - K. HU, "Become Competent within One Day in Generating Boxplots and Violin Plots for a Novice without Prior R Experience", *Methods Protocols*, 3 (64) (2020)
- [21] - P. HOU, F. CHANG, L. DUAN, Y. ZHANG and H. ZHANG, "Seasonal variation and spatial heterogeneity of water quality parameters in lake Chenghai in Southwestern China", *Water*, 14 (10) (2022) 1640
- [22] - T. A. SORO, K. D. SILUÉ, Z. M. GOGBÉ, L. COULIBALY and G. GOORÉ BI, « Paramètres physico-chimiques des eaux du bassin du Haut-Bandama Côte d'Ivoire », *Rev. Sci. Technol.*, 27 (1) (2021) 33 - 48 p.
- [23] - V. B. RAZANADRASOA, J. RASOARAHONA, R. RASOLOMAMPIANINA, N. RATIARIMANANJATOVO, S. R. RABEARISOA, MUHAMMAD RIDWAN, K. T. N. NGBOLUA and B. ROBIJAONA RAHELIVOLOLONIAINA, "Evaluation of the Physico-Chemical Quality of Well Water in the Analamanga Region (Antananarivo), Madagascar", *Budapest International Research in Exact Sciences*, 4 (2) (2022)
- [24] - P. HUMEZ, « Traçage des intrusions de CO<sub>2</sub> dans les aquifères d'eau douce par les méthodes multi isotopiques ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, (2012) 336 p.
- [25] - L. MATINI, J. M. MOUTOU et M. S. KONGO-MANTONO, « Evaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo », *Afrique Science*, 05 (1) (2009) 82 - 98
- [26] - E. ODJOHOU, M. AMANI, G. SORO et S. MONDE, « Caractérisation physico-chimique des eaux d'un système lacustre du cordon littoral ivoirien », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14 (5) (2020) 1878 - 1892
- [27] - E. ROBERT, « Turbidité et risques dans le bassin versant de la Doubégué (Burkina Faso) », *Bulletin de l'association de géographes français*, 91 (3) (2014) 355 - 372
- [28] - X. SUN, J. LIU B, J. WANG, L. TIAN A, Q. ZHOU and J. LI, "Integrated monitoring of lakes' turbidity in Wuhan, China during the COVID-19 epidemic using multi-sensor satellite observations", *International journal of digital earth*, Vol. 14, N° 4 (2021) 443 - 463 p.
- [29] - M. A. AMADOU ABDOU, Z. GARBA et A. ABDURHAMANE TOURE, « Dynamique de la conductivité dans les eaux de surface et souterraines du sud-ouest du Niger : cas du lac et puits de Yaboni », *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 34 (2019) 389 - 404
- [30] - S. BUHUNGU, E. MONTCHOWUI, E. BARAKANIRA, C. SIBOMANA, G. NTAKIMAZI et C. A. BONOU, « Caractérisation spatio temporelle de la qualité de l'eau de la rivière Kinyankonge, affluent du Lac Tanganyika, Burundi », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 19 (1) (2025)
- [31] - A. B. MOUSSA, A. CHAHLAOUI et E. H. ROUR, « Evaluation de la pollution physico chimique des eaux de l'Ouest Khomane », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (6) (2021) 7096 - 7111
- [32] - N. M. FASSINO, F. M. GOUISSI, S. O. GOURA, W. B. YESSOUFOU, T. S. BIAOU, K. H. KAKPO, H. H. AKODOGBO et D. D. TOFFA, "Qualité physico-chimique des eaux de surface de l'Ouémé Supérieur Au Bénin", *European Scientific Journal*, 13 (2023)
- [33] - G. TAU, Y. ENZEL, H. MCGOWAN, V. LYAKHOVSKY and N. G. LENSKY, "Lake-water-temperature regulation under diurnal and annual cycles of environmental forcing, Agamon Hula, Israel", *Journal of Hydrology*, Vol. 658, (2025)
- [34] - W. ILLANGASINGHE, J. MANATUNGE, N. RATNAYAKE and N. JAYASURIYA, "Effects of influent temperature variation on floc blanket behavior and effluent water quality". *Water supply*, 20 (26) (2020)