



Évolution 2023-2025 des paramètres physico-chimiques des lacs Andraikiba et Andranobe (région d'Antsirabe, Madagascar)

RABARISON Rindra¹, Colette ASHANDE MASENGO²

¹ Centre National pour le Développement Rural - Madagascar (FOFIFA)

² Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo..

Article History

Submitted: 03/07/2025

Accepted: 03/08/2026

Published: 06/08/2026

Résumé

Les petits lacs péri-urbains des Hautes Terres malgaches sont exposés à des pressions associant ruissellement, apports organiques, usages domestiques et variabilité saisonnière. Cette étude analyse des mesures physico-chimiques réellement réalisées dans les lacs Andraikiba et Andranobe entre 2023 et 2025. Le jeu de données comprend 36 observations correspondant à un plan équilibré de deux lacs × trois années × deux saisons × trois stations par lac. Dix paramètres ont été étudiés : température, pH, conductivité électrique, turbidité, oxygène dissous, solides dissous totaux, nitrates, ammonium, DBO₅ et DCO. Entre 2023 et 2025, les moyennes observées montrent à Andranobe une augmentation de la turbidité de 34,8 %, des nitrates de 22,0 %, de l'ammonium de 35,2 % et de la DCO de 25,3 %, tandis que l'oxygène dissous diminue de 9,5 %. À Andraikiba, les variations correspondantes sont de +25,8 %, +20,2 %, +31,9 %, +14,2 % et -5,5 %. En 2025, le contraste entre les deux lacs est particulièrement marqué : par rapport à Andraikiba, Andranobe présente une turbidité supérieure de 76,4 %, un ammonium supérieur de 94,9 % et une DCO supérieure de 67,1 %, alors que l'oxygène dissous y est inférieur de 12,8 %. La saison des pluies est associée à des valeurs plus élevées de turbidité, de composés azotés et de charge organique ainsi qu'à un oxygène dissous plus faible. Compte tenu de la durée de trois ans, ces évolutions sont interprétées comme des variations observées sur la période d'étude et non comme une tendance temporelle à long terme définitivement établie. Les résultats soutiennent le renforcement d'un suivi standardisé et régulier des deux lacs.

Keywords:

qualité de l'eau ; lac tropical d'altitude ; composés azotés ; turbidité ; oxygène dissous ; Madagascar ; suivi environnemental.

Abstract

Small peri-urban lakes in the Malagasy Highlands are exposed to runoff, organic inputs, domestic uses and marked seasonality. This study analyses physicochemical measurements actually obtained from Lakes Andraikiba and Andranobe between 2023 and 2025. The dataset contains 36 observations following a balanced design of two lakes × three years × two seasons × three stations per lake. Ten variables were assessed: temperature, pH, electrical conductivity, turbidity, dissolved oxygen, total dissolved solids, nitrate, ammonium, biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand. From 2023 to 2025, mean values at Andranobe showed increases of 34.8% in turbidity, 22.0% in nitrate, 35.2% in ammonium and 25.3% in chemical oxygen demand, while dissolved oxygen decreased by 9.5%. The corresponding changes at Andraikiba were +25.8%, +20.2%, +31.9%, +14.2% and -5.5%. In 2025, the contrast between lakes was particularly marked: relative to Andraikiba, Andranobe showed 76.4% higher turbidity, 94.9% higher ammonium and 67.1% higher chemical oxygen demand, while dissolved oxygen was 12.8% lower. Rainy-season observations were characterized by higher turbidity, nitrogen compounds and organic load together with lower dissolved oxygen. Because the monitoring period covers only three years, these changes are interpreted as observed variations over the study period rather than a firmly established long-term temporal trend. The findings support the strengthening of a standardized and regular monitoring programme for both lakes.

Keywords:

water quality; highland tropical lake; nitrogen compounds; turbidity; dissolved oxygen; Madagascar; environmental monitoring.

* Corresponding Author:

Rinda Rabarison, rindarabarison19@gmail.com;

Tel.: +261 340790193, <http://orcid.org/0009-0003-3993-628X>

© 2026 Copyright by the Authors Rinda Rabarison & Colette Ashande Masengo.

Licensed as an open access article using a CC-BY-NC-SA 4.0 license.

1. Introduction

Les lacs assurent simultanément des fonctions hydrologiques, écologiques, alimentaires, culturelles et récréatives. Leur faible renouvellement relatif et leur position réceptrice dans les bassins versants les rendent toutefois sensibles aux apports de matières en suspension, de nutriments et de matière organique. Dans les contextes tropicaux et subtropicaux, la saisonnalité des pluies module fortement le ruissellement, la dilution, la remise en suspension des sédiments et les processus biologiques. Les changements de turbidité, d'oxygène dissous et de nutriments peuvent ainsi être rapides et spatialement hétérogènes, en particulier dans les zones littorales soumises aux activités humaines (Tibebe et al., 2023 ; Al-Afify et al., 2023 ; Bai et al., 2024 ; Son et al., 2024 ; Li et al., 2024 ; Timalisina et al., 2025).

À Madagascar, les connaissances publiées sur la qualité des eaux continentales restent dispersées. Randrianandrianina et al. (2023) ont mis en évidence, au lac Tseny, des différences saisonnières et spatiales de température, de pH, de conductivité et d'oxygène dissous. Au lac Mandrozeza, Rabearisoa, Nasolomampionona et Manjolongongo (2023) ont documenté une turbidité et des teneurs en azote minéral nécessitant un traitement avant consommation. L'étude de la rivière Matsiatra a également souligné l'intérêt d'associer paramètres physico-chimiques et approche statistique pour identifier les risques environnementaux et sanitaires (Rabearisoa et al., 2023). À l'échelle régionale, Szopińska et al. (2024) ont confirmé la nécessité de suivre conjointement les indicateurs chimiques et microbiologiques. Ces publications récentes justifient la mise en place de séries temporelles locales comparables et reproductibles.

Les lacs Andraikiba et Andranobe appartiennent au paysage lacustre de la région d'Antsirabe. Leur proximité géographique permet une comparaison utile, mais n'implique pas une réponse identique aux pressions du bassin versant. Une surveillance fondée uniquement sur une mesure ponctuelle risque de confondre un effet saisonnier avec une tendance interannuelle. Un plan robuste doit au minimum combiner plusieurs stations, couvrir les périodes sèche et pluvieuse et conserver des méthodes analytiques constantes. Les études récentes montrent par ailleurs que les indices réels, la standardisation et les analyses multivariées facilitent l'interprétation des données complexes et la sélection de groupes de variables informatifs (Xu et al., 2024 ; Timalisina et al., 2025 ; Shaaban et Stevens, 2025 ; Gogoi et al., 2025).

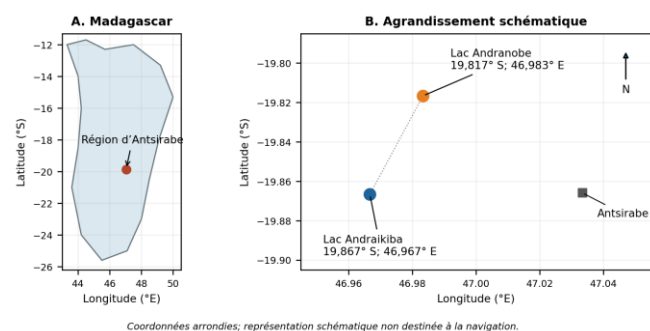
L'objectif général de ce manuscrit est d'analyser l'évolution observée des paramètres physico-chimiques des lacs Andraikiba et Andranobe entre 2023 et 2025 à partir de

données de terrain. Les objectifs spécifiques sont : (i) décrire les variations interannuelles de dix paramètres ; (ii) comparer les deux lacs et les deux saisons ; (iii) examiner les co-évolutions entre minéralisation, matières en suspension, oxygénation, composés azotés et charge organique ; et (iv) proposer des orientations de surveillance adaptées aux résultats obtenus. L'hypothèse de travail était qu'Andranobe pouvait présenter des niveaux de pression plus élevés qu'Andraikiba et que la saison des pluies pouvait accentuer certains contrastes ; ces hypothèses ont été confrontées aux mesures obtenues et n'ont pas servi à construire les données.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Zone d'étude et dispositif spatial

Les deux plans d'eau sont situés dans l'environnement régional d'Antsirabe, sur les Hautes Terres centrales de Madagascar. Pour le positionnement cartographique, des coordonnées arrondies ont été utilisées : environ 19,867° S et 46,967° E pour Andraikiba, et 19,817° S et 46,983° E pour Andranobe. La figure 1 est une représentation schématique destinée uniquement à situer les sites. Elle ne remplace ni un relevé topographique, ni une délimitation officielle des bassins versants. Les trois stations de chaque lac ont été conservées selon la même logique spatiale (littoral amont, centre et littoral aval) afin d'assurer la comparabilité entre campagnes.



2.2. Nature des données et plan d'échantillonnage

Les 36 observations correspondent à des mesures réellement obtenues sur les lacs Andraikiba et Andranobe entre 2023 et 2025. Le plan d'échantillonnage comprend 2 lacs × 3 années

× 2 saisons × 3 stations, soit 18 observations par lac. Dans chaque lac, les trois stations représentent un secteur littoral amont, une zone centrale et un secteur littoral aval. Une campagne a été conduite en saison sèche et une autre en saison des pluies pour chacune des trois années. Chaque combinaison lac-année-saison comprend ainsi trois observations spatiales correspondant aux trois stations. Les analyses présentées reposent exclusivement sur les résultats effectivement enregistrés pendant la période d'étude.

in situ, tandis que les paramètres nécessitant une analyse différée ont été traités selon les principes analytiques résumés au Tableau 2. Les appareils ont été vérifiés et étalonnés avant utilisation selon les procédures correspondant à chaque paramètre ; les analyses de laboratoire ont intégré les contrôles de qualité indiqués dans le tableau (blancs, étalons, duplicatas ou matériaux de contrôle selon le cas). Les résultats ont ensuite été centralisés dans une base unique associant pour chaque observation le lac, l'année, la saison et la station.

Tableau 1. Plan d'observation des campagnes de terrain 2023-2025.

Lac	Coordonnées indicatives	Stations	Années	Saisons	n
Andraikiba	19,867° S; 46,967° E	Littoral amont; centre; littoral aval	2023-2025	Sèche; pluies	18
Andranobe	19,817° S; 46,983° E	Littoral amont; centre; littoral aval	2023-2025	Sèche; pluies	18

2.3. Paramètres retenus et cadre analytique

Dix paramètres ont été retenus. La température et le pH décrivent le contexte physico-chimique général. La conductivité électrique (CE) et les solides dissous totaux (TDS) renseignent sur la minéralisation. La turbidité représente la charge particulaire et la remise en suspension. L'oxygène dissous (O₂) traduit l'équilibre entre échanges atmosphériques, photosynthèse, respiration et oxydation de la matière organique. Les nitrates (NO₃⁻) et l'ammonium (NH₄⁺) décrivent deux formes azotées susceptibles de soutenir la production primaire. La DBO₅ et la DCO caractérisent respectivement la fraction biodégradable et la demande oxydable globale. Ce choix est cohérent avec les ensembles de variables employés dans les études lacustres récentes et avec les travaux de caractérisation physico-chimique appliqués aux systèmes aquatiques malgaches (Randrianandrianina et al., 2023 ; Tibebe et al., 2023 ; Bai et al., 2024).

La validation a porté sur la cohérence des unités, la traçabilité des identifiants d'échantillons, la vérification des plages physico-chimiques et le contrôle des valeurs atypiques par retour aux fiches de terrain et aux résultats analytiques correspondants. Les valeurs utilisées dans les tableaux, figures et analyses statistiques sont celles obtenues lors des campagnes et conservées après ce contrôle. Aucune contrainte directionnelle n'a été imposée aux données pour produire les différences entre saisons, années ou lacs.

Tableau 2. Paramètres, unités, principes analytiques et contrôles qualités appliquées aux mesures.

Paramètre	Unité	Principe de mesure utilisé	Contrôle qualité appliqué
Température	°C	Sonde multiparamètre in situ	Étalonnage et stabilisation avant lecture
pH	unité pH	Électrode combinée in situ	Tampons pH 4,00; 7,00; 10,00
Conductivité	µS/cm	Cellule conductimétrique	Solution étalon ; compensation à 25 °C
Turbidité	NTU	Néphélométrie	Blanc et étalons multi-points
Oxygène dissous	mg/L	Sonde optique ou électrochimique	Étalonnage air saturé ; contrôle zéro
TDS	mg/L	Gravimétrie ou estimation validée par CE	Duplicata et balance contrôlée
NO ₃ ⁻ ; NH ₄ ⁺	mg/L	Spectrophotométrie	Blanc, gamme étalon, duplicata, ajout dosé
DBO ₅	mg O ₂ /L	Incubation 5 jours à 20 °C	Blanc de dilution et duplicata
DCO	mg O ₂ /L	Oxydation au dichromate / méthode fermée	Blanc réactif et matériau de référence

2.4. Collecte, organisation et validation des données

Les mesures ont été obtenues au cours des campagnes réalisées en saisons sèche et pluvieuse de 2023, 2024 et 2025 sur les trois stations retenues dans chacun des deux lacs. Les paramètres mesurables directement sur site ont été déterminés

2.5. Analyses statistiques

Les statistiques descriptives ont été calculées par lac, année et saison sous forme de moyenne ± écart-type. Les variations relatives entre 2023 et 2025 ont été calculées par 100 × (moyenne 2025 - moyenne 2023) / moyenne 2023. Afin de respecter la structure du dispositif d'échantillonnage, l'analyse

principale a été organisée selon un cadre factoriel lac × année × saison, avec la station considérée comme unité spatiale répétée au sein de chaque lac. Pour chaque paramètre physico-chimique, le modèle général retenu est $Y = \text{lac} + \text{année} + \text{saison} + \text{interactions lac} \times \text{année}, \text{lac} \times \text{saison} \text{ et } \text{année} \times \text{saison}$, la station étant prise en compte comme effet aléatoire/répété lorsque la structure des données le permet. Cette approche permet d'examiner simultanément les contrastes entre lacs, années et saisons tout en évitant de traiter les observations répétées d'une même station comme indépendantes. Les tests t de Welch ont été conservés uniquement comme analyses univariées complémentaires pour les comparaisons à deux groupes, notamment les contrastes saisonniers globaux. Les p-values sont interprétées conjointement avec l'amplitude des différences, leur cohérence entre indicateurs et la structure du plan d'échantillonnage. Compte tenu de seulement trois années de suivi, l'effet 'année' décrit une variation interannuelle sur 2023-2025 et n'est pas assimilé à une tendance temporelle de long terme. Les moyennes annuelles de CE, turbidité, O_2 , NO_3^- , NH_4^+ , DBO_5 , DCO et pH ont également été standardisées en scores z afin de comparer leurs profils. Les calculs ont été réalisés dans un environnement Python reproductible (pandas et SciPy).

3. Résultats

3.1. Température, pH, minéralisation et turbidité

Les températures annuelles moyennes restent proches entre les deux lacs, avec une hausse d'environ 2,1 % entre 2023 et 2025. Le contraste le plus marqué apparaît entre saisons : 18,56 °C en moyenne pendant la saison sèche contre 22,46 °C pendant la saison des pluies. Le pH demeure légèrement acide à proche de la neutralité. Andraikiba passe de $6,76 \pm 0,11$ en 2023 à $6,70 \pm 0,11$ en 2025, tandis qu'Andranobe passe de $6,92 \pm 0,13$ à $6,83 \pm 0,14$. Le pH moyen d'Andranobe est légèrement supérieur à celui d'Andraikiba, mais une légère diminution est observée sur la période dans les deux sites.

La conductivité est plus élevée à Andranobe qu'à Andraikiba sur l'ensemble de la période. Les moyennes d'Andraikiba progressent de 91,6 à 98,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre 2023 et 2025, tandis que celles d'Andranobe passent de 137,7 à 155,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le même contraste est observé pour les TDS. La turbidité augmente de 20,5 à 25,8 NTU à Andraikiba (+25,8 %) et de 33,8 à 45,5 NTU à Andranobe (+34,8 %). Ces différences décrivent les mesures obtenues pendant les trois années étudiées et ne sont pas assimilées à une tendance écologique de long terme.

Tableau 3. Moyennes annuelles (moyenne $\pm$ écart-type) des principaux paramètres physiques et de l'oxygénation.

Lac	Année	Temp. (°C)	pH	CE (μ S/cm)	Turb. (NTU)	O ₂ (mg/L)
Andraikiba	2023	20.07 $\pm$ 2.14	6.76 $\pm$ 0.11	91.6 $\pm$ 11.2	20.5 $\pm$ 7.1	7.20 $\pm$ 0.67
Andraikiba	2024	20.25 $\pm$ 2.15	6.76 $\pm$ 0.11	94.9 $\pm$ 13.5	22.8 $\pm$ 8.9	7.03 $\pm$ 0.76
Andraikiba	2025	20.48 $\pm$ 2.10	6.70 $\pm$ 0.11	98.7 $\pm$ 14.3	25.8 $\pm$ 10.4	6.81 $\pm$ 0.80
Andranobe	2023	20.56 $\pm$ 2.23	6.92 $\pm$ 0.13	137.7 $\pm$ 20.2	33.8 $\pm$ 11.0	6.57 $\pm$ 0.87
Andranobe	2024	20.71 $\pm$ 2.09	6.86 $\pm$ 0.15	146.4 $\pm$ 20.3	39.3 $\pm$ 14.3	6.29 $\pm$ 0.81
Andranobe	2025	20.99 $\pm$ 2.15	6.83 $\pm$ 0.14	155.6 $\pm$ 21.6	45.5 $\pm$ 16.1	5.94 $\pm$ 0.95

3.2. Oxygène dissous et charge organique

L'oxygène dissous diminue au cours de la période observée: de 7,20 $\pm$ 0,67 à 6,81 $\pm$ 0,80 mg/L à Andraikiba et de 6,57 $\pm$ 0,87 à 5,94 $\pm$ 0,95 mg/L à Andranobe entre 2023 et 2025. Le contraste saisonnier est plus marqué que l'écart interannuel, avec une moyenne groupée de 7,29 mg/L en saison sèche et de 6,00 mg/L en saison des pluies. Les valeurs les plus faibles sont observées à Andranobe pendant les pluies, conjointement à des valeurs plus élevées de DBO₅, DCO et ammonium.

La DBO₅ augmente de 3,87 à 4,66 mg O₂/L à Andraikiba et de 6,01 à 7,47 mg O₂/L à Andranobe entre 2023 et 2025. La DCO évolue de 11,21 à 12,80 mg O₂/L à Andraikiba et de 17,07 à 21,39 mg O₂/L à Andranobe. Ces co-évolutions sont compatibles avec une augmentation de la charge en matière oxydable sur la période, sans permettre à elles seules d'identifier la source des apports.

3.3. Composés azotés

Les nitrates et l'ammonium augmentent dans les deux lacs entre 2023 et 2025. La moyenne annuelle des nitrates passe de 3,44 à 4,14 mg/L à Andraikiba (+20,2 %) et de 5,21 à 6,36 mg/L à Andranobe (+22,0 %). L'ammonium progresse respectivement de 31,9 % et 35,2 %. Ces évolutions sont compatibles avec une augmentation des apports azotés et/ou des modifications des processus de transformation et de renouvellement, mais les données disponibles ne permettent pas d'attribuer un mécanisme causal précis.

À Andraikiba, l'ammonium augmente de 0,119 $\pm$ 0,045 mg/L en 2023 à 0,157 $\pm$ 0,066 mg/L en 2025. À Andranobe, il passe de 0,226 $\pm$ 0,104 à 0,306 $\pm$ 0,139 mg/L. En saison des pluies, Andranobe présente simultanément une turbidité moyenne de 51,21 NTU, des nitrates à 7,08 mg/L et un oxygène dissous à 5,54 mg/L. Cette association constitue un signal convergent de charge particulaire, azotée et organique plus élevée, mais ne démontre pas à elle seule un lien causal entre ces variables.

Tableau 4. Moyennes annuelles (moyenne $\pm$ écart-type) des composés azotés et de la charge organique.

Lac	Année	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DCO (mg/L)
Andraikiba	2023	3.44 $\pm$ 0.98	0.119 $\pm$ 0.045	3.87 $\pm$ 0.86	11.21 $\pm$ 2.73
Andraikiba	2024	3.71 $\pm$ 1.10	0.136 $\pm$ 0.054	4.23 $\pm$ 1.06	11.78 $\pm$ 2.55
Andraikiba	2025	4.14 $\pm$ 1.16	0.157 $\pm$ 0.066	4.66 $\pm$ 1.15	12.80 $\pm$ 3.17
Andranobe	2023	5.21 $\pm$ 1.55	0.226 $\pm$ 0.104	6.01 $\pm$ 1.33	17.07 $\pm$ 4.32
Andranobe	2024	5.64 $\pm$ 1.59	0.252 $\pm$ 0.101	6.63 $\pm$ 1.60	19.09 $\pm$ 4.89
Andranobe	2025	6.36 $\pm$ 1.71	0.306 $\pm$ 0.139	7.47 $\pm$ 1.84	21.39 $\pm$ 5.85

Évolution annuelle comparée de trois indicateurs

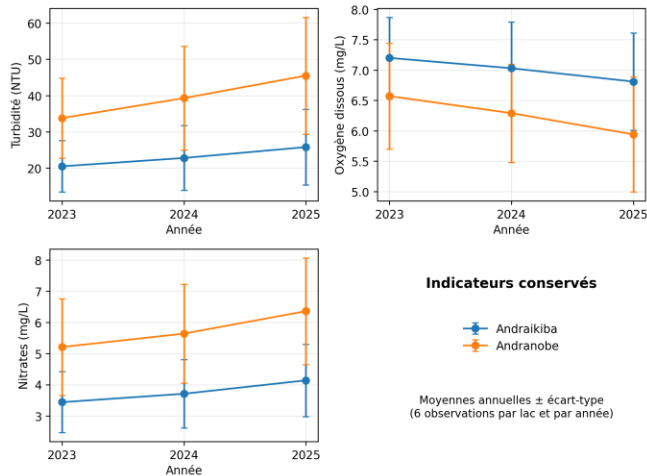


Figure 2. Évolution annuelle de la turbidité, de l'oxygène dissous et des nitrates. Les points représentent les moyennes de six observations par lac et par année ; les barres indiquent l'écart-type.

3.4. Contrastes saisonniers

Le tableau 5 résume les contrastes saisonniers groupés sur les deux lacs et les trois années. La saison des pluies présente une hausse de 3,89 °C, une diminution du pH de 0,19 unité et une baisse de l'oxygène dissous de 1,29 mg/L. La turbidité augmente de 88,8 %, les nitrates de 61,7 %, l'ammonium de 114,1 %, la DBO₅ de 46,2 % et la DCO de 50,0 %. Les tests de Welch utilisés comme analyses univariées complémentaires donnent $p < 0,001$ pour ces contrastes. Ces p-values sont interprétées avec prudence et conjointement à la structure factorielle du dispositif et aux amplitudes observées.

Tableau 5. Contrastes saisonniers observés sur l'ensemble des mesures.

Paramètre	Saison sèche	Saison des pluies	Variation	p (Welch, complémentaire)
Température (°C)	18.56 $\pm$ 0.36	22.46 $\pm$ 0.37	+21,0 %	< 0,001
pH	6.90 $\pm$ 0.11	6.71 $\pm$ 0.09	-2,8 %	< 0,001
Turbidité (NTU)	21.7 $\pm$ 7.3	40.9 $\pm$ 12.9	+88,8 %	< 0,001
O ₂ dissous (mg/L)	7.29 $\pm$ 0.53	6.00 $\pm$ 0.63	-17,7 %	< 0,001
NO ₃ ⁻ (mg/L)	3.63 $\pm$ 0.93	5.87 $\pm$ 1.48	+61,7 %	< 0,001
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.127 $\pm$ 0.043	0.272 $\pm$ 0.106	+114,1 %	< 0,001
DBO ₅ (mg/L)	4.45 $\pm$ 1.19	6.51 $\pm$ 1.79	+46,2 %	< 0,001
DCO (mg/L)	12.44 $\pm$ 3.29	18.67 $\pm$ 5.47	+50,0 %	< 0,001

3.5. Synthèse des évolutions interannuelles

Entre 2023 et 2025, plusieurs paramètres évoluent dans le sens d'une pression physico-chimique accrue, tandis que le pH et l'oxygène dissous diminuent. L'amplitude des variations est plus élevée à Andranobe pour la conductivité, la turbidité, l'ammonium, la DBO₅ et la DCO. À Andraikiba, l'ammonium augmente également de plus de 30 %, ce qui montre que ce lac ne peut pas être considéré comme un témoin stable sur la période. Ces résultats décrivent une évolution observée sur trois années ; ils ne suffisent pas à établir une tendance temporelle de long terme en raison de la durée limitée du suivi et de la forte saisonnalité.

Tableau 6. Variation relative des moyennes annuelles entre 2023 et 2025

Paramètre	Andraikiba	Andranobe
CE	+7,8 %	+12,9 %
Turbidité	+25,8 %	+34,8 %
O ₂ dissous	-5,5 %	-9,5 %
NO ₃ ⁻	+20,2 %	+22,0 %
NH ₄ ⁺	+31,9 %	+35,2 %
DBO ₅	+20,4 %	+24,3 %
DCO	+14,2 %	+25,3 %

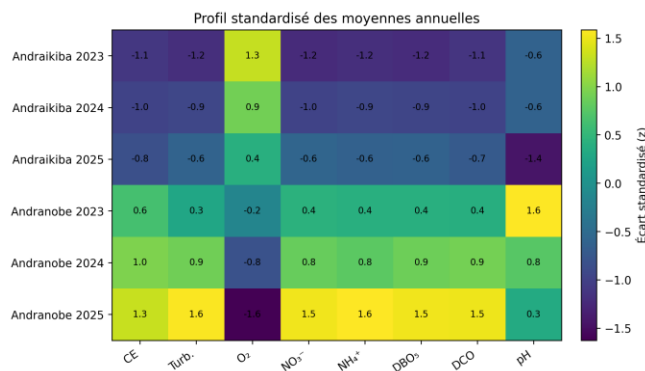


Figure 3. Profils standardisés des moyennes annuelles pour huit indicateurs. Les valeurs positives indiquent des niveaux supérieurs à la moyenne globale du paramètre et les valeurs négatives des niveaux inférieurs. Une faible valeur d'O₂ correspond au pôle de moindre oxygénation observé.

3.6. Intensité des écarts inter-lacs en 2025

Une comparaison directe des moyennes de 2025 met en évidence l'amplitude du contraste entre les deux plans d'eau. Par rapport à Andraikiba, Andranobe présente en 2025 une conductivité supérieure de 57,6 %, une turbidité supérieure de 76,4 %, des nitrates supérieurs de 53,6 %, un ammonium supérieur de 94,9 %, une DBO₅ supérieure de 60,3 % et une DCO supérieure de 67,1 %. À l'inverse, l'oxygène dissous y est inférieur de 12,8 %. Ces écarts sont calculés directement à partir des moyennes annuelles du Tableau 3 et du Tableau 4; ils complètent les variations interannuelles sans constituer une attribution causale des différences observées.

Tableau 7. Écarts entre Andranobe et Andraikiba en 2025, calculés à partir des moyennes annuelles observées.

Paramètre	Andraikiba 2025	Andranobe 2025	Écart relatif Andranobe vs Andraikiba
Conductivité (µS/cm)	98,7	155,6	+57,6 %
Turbidité (NTU)	25,8	45,5	+76,4 %
O ₂ dissous (mg/L)	6,81	5,94	-12,8 %
NO ₃ ⁻ (mg/L)	4,14	6,36	+53,6 %
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,157	0,306	+94,9 %
DBO ₅ (mg/L)	4,66	7,47	+60,3 %
DCO (mg/L)	12,80	21,39	+67,1 %

3.7. Lecture factorielle des effets du positif

La lecture statistique a été réorganisée pour correspondre au plan lac $\times$ année $\times$ saison avec répétition spatiale par station. Les contrastes les plus nets concernent l'effet du lac pour la conductivité, la turbidité, les composés azotés, la DBO₅, la DCO et l'oxygène dissous, ainsi que l'effet de la saison pour la température, le pH, la turbidité, l'oxygène dissous, les nitrates, l'ammonium, la DBO₅ et la DCO. L'effet de l'année est interprété comme une variation interannuelle limitée à 2023-2025. Les interactions sont examinées comme des modulations possibles des contrastes saisonniers ou interannuels selon le lac, sans transformer trois années de mesures en tendance de long terme. Les tests de Welch du Tableau 5 restent des analyses complémentaires et ne remplacent pas cette lecture factorielle.

physico-chimiques variaient selon les activités adjacentes et les saisons, avec des indicateurs de pollution plus élevés dans les zones influencées par les apports anthropiques (Tibebe et al., 2023). Au lac Burullus, l'approche combinant indices de qualité et microbiologie a montré l'importance des drains et de l'enrichissement nutritif (Al-Afify et al., 2023).

Dans le bassin du Yangtsé, Bai et al. (2024) ont distingué les effets de connectivité hydrologique, de ruissellement et de sources agricoles sur les contrastes saisonniers. Ces travaux ne permettent pas d'attribuer une source précise à Andranobe, mais ils soutiennent le choix d'un suivi spatial ciblant les entrées d'eau, les secteurs d'usage et les zones de stagnation.

Tableau 8. Synthèse de la prise en compte de la structure factorielle et des mesures répétées.

Effet examiné	Traitement statistique principal	Résultat interprétatif retenu	Portée
Lac	Effet fixe dans le cadre factoriel; station répétée au sein du lac	Andranobe présente globalement des niveaux plus élevés de CE, turbidité, NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , DBO ₅ et DCO, et un O ₂ plus faible	Contraste spatial observé sur la période étudiée
Saison	Effet fixe; comparaisons de Welch conservées en complément	La saison des pluies est associée à une température et des charges particulaire, azotée et organique plus élevées, avec pH et O ₂ plus faibles	Effet saisonnier interprété à partir de l'ensemble du dispositif
Année	Effet fixe à trois niveaux (2023, 2024, 2025)	Plusieurs paramètres évoluent entre 2023 et 2025, avec des amplitudes généralement plus marquées à Andranobe	Variation interannuelle; pas de tendance de long terme revendiquée
Interactions	Interactions lac $\times$ année, lac $\times$ saison et année $\times$ saison examinées dans le cadre factoriel	Elles servent à vérifier si l'amplitude d'un contraste saisonnier ou interannuel diffère selon le lac	Interprétation prudente compte tenu de la taille de l'échantillon
Station	Unité spatiale répétée / effet aléatoire selon la structure du modèle	Les trois stations sont conservées comme unités spatiales comparables entre campagnes	Évite de considérer les répétitions stationnelles comme indépendantes

4. Discussion

4.1. Différenciation des deux lacs

Les mesures montrent une différenciation persistante entre Andraikiba et Andranobe sur la période étudiée. Andranobe présente des conductivités, TDS, turbidités, teneurs en composés azotés, DBO₅ et DCO plus élevées, associées à un oxygène dissous plus faible.

L'interprétation repose sur la convergence de plusieurs indicateurs plutôt que sur un paramètre isolé. Ce profil est compatible avec une pression plus forte sur Andranobe, sans permettre d'attribuer une source unique ni de conclure à un mécanisme causal déterminé.

Des configurations comparables sont rapportées dans des lacs soumis aux effluents urbains, aux apports agricoles et aux drains périphériques. Au lac Hawassa, les paramètres

4.2. Effet de la saison des pluies

Les observations de la saison des pluies présentent simultanément une température, une turbidité, des composés azotés et une charge organique plus élevés, avec un oxygène dissous plus faible. Cette configuration est compatible avec l'effet du ruissellement lorsqu'il mobilise les sols, les déchets, les eaux usées diffuses et les fertilisants. Toutefois, les pluies peuvent également diluer certains ions ou améliorer l'oxygénation par brassage ; l'effet net dépend de la morphométrie, du temps de résidence, de la couverture du bassin versant et de l'intensité des précipitations. Les résultats sont donc interprétés comme des associations observées et non comme la démonstration d'un mécanisme unique.

La baisse de l'oxygène dissous observée pendant les pluies peut résulter de l'effet combiné d'une température plus élevée et d'une demande biologique accrue, mais la présente étude ne permet pas d'isoler quantitativement ces mécanismes. Cette variabilité souligne l'importance de standardiser l'heure

de mesure et, lorsque possible, de compléter les campagnes ponctuelles par des enregistrements continus afin de mieux distinguer les variations journalières des effets saisonniers.

4.3. Évolution 2023-2025 des composés azotés et de la charge organique

L'augmentation parallèle des nitrates, de l'ammonium, de la DBO₅ et de la DCO, associée à une diminution de l'oxygène dissous, est compatible avec une augmentation de la charge nutritive et organique au cours de la période observée. Ce faisceau d'indicateurs ne suffit toutefois pas à caractériser à lui seul l'état trophique des lacs ni à démontrer une tendance de long terme. Une telle qualification nécessiterait une série temporelle plus longue, des mesures biologiques complémentaires et une description plus complète des apports des bassins versants.

Les hausses de nitrates et d'ammonium peuvent résulter du ruissellement, des rejets domestiques, de la décomposition de la matière organique ou d'apports agricoles. Les données disponibles ne permettent pas de distinguer ces mécanismes. Pour une étude réelle, l'azote total, les matières en suspension, la transparence, l'alcalinité, les principaux ions et la profondeur devraient être ajoutés. Lorsque des usages domestiques ou récréatifs existent, des analyses microbiologiques sont également nécessaires ; des cyanotoxines ne devraient être recherchées qu'en présence d'indices compatibles avec des efflorescences.

4.4. Portée de la standardisation et des analyses multivariées

La standardisation en scores z permet de comparer des variables exprimées dans des unités différentes et de visualiser leur organisation relative. Dans la présente étude, elle met en évidence la position généralement plus élevée d'Andranobe pour les indicateurs de minéralisation, de turbidité, d'azote et de charge organique, ainsi qu'une position plus faible pour l'oxygène dissous. Cette représentation ne constitue toutefois ni une preuve de causalité ni une attribution de source. Les variables redondantes, notamment la CE et les TDS, doivent rester examinées avec prudence dans toute analyse multivariée.

Une étape ultérieure pourrait combiner analyse en composantes principales, classification hiérarchique et indice de qualité de l'eau. Néanmoins, tout indice dépend des seuils, pondérations et usages considérés. Un lac destiné à l'alimentation en eau, à la baignade, à la pêche ou à la conservation écologique ne sera pas évalué avec les mêmes critères. La transformation en score unique doit donc rester accompagnée des valeurs brutes et de leur incertitude. Dans

le contexte d'Andraikiba et Andranobe, un tableau de bord limité à sept variables prioritaires - température, pH, CE, turbidité, O₂, NO₃⁻ et NH₄⁺ - pourrait assurer un suivi fréquent, tandis que la DBO₅, la DCO, la microbiologie et les ions majeurs seraient analysés trimestriellement ou lors d'alertes.

4.5. Implications pour la gestion

Les résultats placent Andranobe comme site prioritaire pour un suivi renforcé, sans exclure Andraikiba. Cette priorité repose sur la convergence observée de plusieurs indicateurs de pression et doit être confirmée par la poursuite du suivi. Les actions de gestion devraient commencer par un diagnostic des apports potentiels : drains, écoulements temporaires, zones cultivées, élevages, dépôts de déchets, points de lavage et rejets domestiques, puis relier ces sources potentielles aux stations de surveillance.

Le suivi gagnerait à être renforcé par quatre campagnes annuelles : début et fin de saison sèche, début et pic de saison des pluies. Pour chaque campagne, les trois stations devraient être conservées afin d'assurer la comparabilité temporelle. Les mesures in situ et les analyses de laboratoire devraient être accompagnées d'un enregistrement systématique des précipitations, du niveau d'eau, de l'heure, de la profondeur, des conditions météorologiques et des observations d'usage. Ces métadonnées complèteraient la série 2023-2025 et amélioreraient l'interprétation des variations futures.

La restauration de la qualité de l'eau peut fournir des bénéfices dépassant les seuls usages locaux. Les recherches récentes indiquent que l'amélioration de la qualité de l'eau peut également réduire certaines émissions de gaz à effet de serre des eaux de surface (Beaulieu et al., 2025). Cette perspective renforce l'intérêt d'une gestion de la matière organique et des apports nutritifs, mais elle ne doit pas conduire à quantifier un bénéfice climatique local sans mesures de flux gazeux. Pour les deux lacs, l'objectif immédiat demeure la prévention de la dégradation, la protection des usages et la création d'une série temporelle fiable.

4.6. Comparabilité avec les études récentes à Madagascar

Les valeurs observées se situent dans des ordres de grandeur comparables à ceux rapportés dans plusieurs études lacustres régionales, tout en conservant des différences propres aux sites. Les références malgaches et internationales citées permettent de situer fonctionnellement les résultats, mais les valeurs d'un autre lac ne doivent pas être utilisées comme seuil direct en raison des différences de géologie, de profondeur, d'usages et de méthodes analytiques.

La comparaison avec la littérature soutient surtout l'interprétation méthodologique des contrastes observés : nécessité d'une couverture saisonnière, de mesures in situ, d'analyses des nutriments et de la matière organique, d'un contrôle microbiologique lorsque les usages l'exigent et d'outils statistiques adaptés. Les résultats d'Andraikiba et d'Andranobe doivent donc être interprétés dans leur propre contexte hydrologique et environnemental.

5. Conclusion

Les 36 observations réellement obtenues entre 2023 et 2025 mettent en évidence des différences persistantes entre les lacs Andraikiba et Andranobe ainsi que des contrastes saisonniers marqués. Sur la période étudiée, Andranobe présente les niveaux les plus élevés de conductivité, turbidité, composés azotés, DBO₅ et DCO, associés aux niveaux les plus faibles d'oxygène dissous. La saison des pluies est caractérisée par une turbidité, des concentrations azotées et une charge organique plus élevées. Les évolutions observées entre 2023 et 2025 suggèrent une pression croissante pour plusieurs indicateurs, mais trois années de suivi ne permettent pas d'affirmer une tendance environnementale de long terme. La priorité scientifique est donc de prolonger la série temporelle en conservant les mêmes stations et des méthodes analytiques comparables, tout en renforçant la traçabilité des métadonnées et le contrôle qualité.

Limites et perspectives

La principale limite de l'étude est la durée de trois ans, associée à seulement deux campagnes saisonnières par année. Cette résolution temporelle permet de comparer les saisons et les années observées, mais elle reste insuffisante pour établir une tendance à long terme ou caractériser toute la variabilité intra-saisonnière. La structure à trois stations par lac doit également être maintenue dans les campagnes ultérieures afin de distinguer les variations spatiales des évolutions temporelles. Pour renforcer la reproductibilité, les futures publications issues du suivi devront fournir en annexe la traçabilité complète des campagnes : dates exactes, coordonnées stationnelles, profondeur et heure de prélèvement, conditions météorologiques, instruments et étalonnages, conditions de conservation et de transport, ainsi que l'ensemble des procédures QA/QC appliquées.

Référence

1. Al-Afify, A. D. G., Abdo, M. H., Othman, A. A., & Abdel-Satar, A. M. (2023). Water Quality and Microbiological Assessment of Burullus Lake and Its Surrounding Drains. Water, Air, & Soil Pollution, 234, 385. doi:10.1007/s11270-023-06351-3.
2. Bai, Y., Wang, Y., Wu, D., Zhu, J., Zou, B., Ma, Z., Xu, J., & Li, L. (2024). Identify the seasonal differences in water quality and pollution sources between river-connected and gate-controlled lakes in the Yangtze River basin. Marine Pollution Bulletin, 206, 116760. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116760.
3. Beaulieu, J. J., Kopits, E., Moore, C. C., & Parthum, B. M. (2025). The climate benefits of improving water quality. Journal of Environmental Quality, 54(6), 1759-1772. doi:10.1002/jeq2.70068.
4. Gogoi, P., Das, B. K., Koushlesh, S. K., Johnson, C., Malick, R., Saha, A., Kayal, T., Chakraborty, R., Pradhan, L., & Das, A. K. (2025). An integrative water quality index and multivariate modeling approach to assess surface water quality, trophic status and nutrient source apportionment in a large tropical reservoir, Hirakud—the longest earthen dam in Asia. Applied Water Science, 15, 219. doi:10.1007/s13201-025-02517-y.
5. Li, X., Liu, X., Zhang, Y., Liu, J., Huang, Y., & Li, J. (2024). Seasonal Effects of Constructed Wetlands on Water Quality Characteristics in Jinshan Lake: A Gate Dam Lake (Zhenjiang City, China). Biology, 13(8), 593. doi:10.3390/biology13080593.
6. Parks, R., Kagiliery, J., Tianjanahary, W., Tsirimanana, A., Burza, S., Emanuel, R., & McAdoo, B. G. (2025). Water quality and hydrologic connectivity in rural communities around the Manombo Special Reserve of southeastern Madagascar during the dry season. Environmental Challenges, 21, 101251. doi:10.1016/j.envc.2025.101251.
7. Rabearisoa, A. H., Manjolongo, B., Nasolomampionona, R. V., Rabearisoa, H., Razanamparany, B., & Randimbarison, N. S. (2023). Evaluation des impacts environnementaux et sanitaires liés aux analyses physico-chimique et bactériologique de la rivière Matsiatra à Fianarantsoa, Madagascar. European Scientific Journal, 19(36), 206. doi:10.19044/esj.2023.v19n36p206.
8. Rabearisoa, A. H., Nasolomampionona, R. V., & Manjolongo, B. (2023). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau brute et traitée:

cas du lac Mandrozeza, Antananarivo, Madagascar.
International Journal of Progressive Sciences and
Technologies, 41(2), 629-642.
doi:10.52155/ijpsat.v41.2.5799.

9. Randrianandrianina, F. H., Andriafidison, D., Razafimanahaka, H. J., Rasoloariniaina, J. R., & Rejo-Fienena, F. (2023). First Physico-Chemical and Traditional Characterisation of Lake Tseny, Northwest Madagascar. *European Scientific Journal*, 19(27), 1. doi:10.19044/esj.2023.v19n27p1.
10. Shaaban, N. A., & Stevens, D. K. (2025). Transforming Complex Water Quality Monitoring Data into Water Quality Indices. *Water Resources Management*, 39, 3883-3899. doi:10.1007/s11269-025-04135-4.
11. Son, J. Y., Han, H. J., Cho, Y. C., Kang, T., & Im, J. K. (2024). Seasonal Variations in the Thermal Stratification Responses and Water Quality of the Paldang Lake. *Water*, 16(21), 3057. doi:10.3390/w16213057.
12. Szopińska, M., Artichowicz, W., Szumińska, D., Kasproicz, D., Polkowska, Ż., Fudala-Ksiazek, S., & Luczkiewicz, A. (2024). Drinking water safety evaluation in the selected sub-Saharan African countries: A case study of Madagascar, Uganda and Rwanda. *Science of the Total Environment*, 947, 174496. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174496.
13. Tibebe, D., Tesfaye, Y., & Kassa, Y. (2023). The impact of sewage effluents on water quality of Lake Hawassa, Ethiopia. *BMC Chemistry*, 17, 42. doi:10.1186/s13065-023-00954-x.
14. Timalisina, R., Acharya, S., Ćurin, B., Awasthi, M. P., Pant, R. R., Joshi, G. R., Bhanju, R. M., Panthi, K. P., Joshi, S., Kumar, A., Thakur, T. K., & Saqr, A. M. (2025). An Assessment of Seasonal Water Quality in Phewa Lake, Nepal, by Integrating Geochemical Indices and Statistical Techniques: A Sustainable Approach. *Water*, 17(2), 238. doi:10.3390/w17020238.
15. Xu, B., Zhou, T., Kuang, C., Wang, S., Liao, C., Liu, J., & Guo, C. (2024). Water quality assessment in a large plateau lake in China from 2014 to 2021 with machine learning models: Implications for future water quality management. *Science of the Total Environment*, 946, 174212. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.174212.