

Research Article

Caractérisation et modélisation des paramètres physico-chimiques pour une gestion durable de l'aquaculture sur la côte est et hautes terres Malagasy

RABARISON Rindra¹, ARISON NASANDRATRA Fiderana¹, Blaise MBEMBO WA MBEMBO², Colette ASHANDE MASENGO³

¹Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar ;

²Département de Biologie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo ;

³Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo.

Résumé

Cette étude analyse 500 échantillons d'eau prélevés sur la côte Est et les Hautes Terres de Madagascar, deux régions essentielles au développement de l'aquaculture tropicale. La température moyenne enregistrée est de $26,01 \pm 1,77$ °C, compatible avec les besoins physiologiques du tilapia et de la carpe, même si les valeurs dépassant 30 °C peuvent provoquer un stress thermique notable. Le pH varie entre 6,15 et 8,82 (moyenne $7,52 \pm 0,49$), avec un seuil critique autour de 8,5, où la toxicité ammoniacale augmente fortement. L'oxygène dissous présente une large amplitude ($2,52\text{--}9,12$ mg/L, moyenne $6,13 \pm 1,21$ mg/L) ; les valeurs inférieures à 4 mg/L indiquent des épisodes potentiels d'hypoxie. La conductivité ($306,81 \pm 143,18$ µS/cm) et la dureté ($180,23 \pm 39,66$ mg/L CaCO₃) suggèrent une minéralisation globalement favorable à la stabilité du milieu. La turbidité moyenne ($30,58 \pm 6,7$ NTU) traduit une concentration particulaire modérée, influençant la lumière disponible pour la photosynthèse. Les teneurs en ammoniac ($0,003\text{--}1,24$ mg/L), nitrates ($0,04\text{--}32,95$ mg/L) et nitrites ($0\text{--}0,75$ mg/L) montrent une variabilité azotée parfois proche des seuils de toxicité. L'analyse statistique révèle une excellente performance prédictive (AUC = 0,993, p = 0,000999), ce qui confirme la fiabilité du modèle pour identifier les seuils critiques de qualité de l'eau. Ces résultats fournissent des repères essentiels pour optimiser durablement les systèmes aquacoles malgaches et mieux anticiper les effets des variations environnementales.

Mots clés : Aquaculture tropical, Paramètres physico-chimiques, Modélisation ROC, Qualité de l'eau, Surveillance environnementale.

Abstract

This study analyzes 500 water samples taken from the East Coast and the Madagascar Highlands, two essential regions for the development of tropical aquaculture. The average temperature recorded is 26.01 ± 1.77 °C, compatible with the physiological needs of tilapia and carp, although values exceeding 30 °C can cause significant thermal stress. The pH varies between 6.15 and 8.82 (mean 7.52 ± 0.49), with a critical threshold around 8.5, where ammonia toxicity increases sharply. Dissolved oxygen has a wide amplitude ($2.52\text{--}9.12$ mg/L, average 6.13 ± 1.21 mg/L); values below 4 mg/L indicate potential hypoxia episodes. Conductivity (306.81 ± 143.18 µS/cm) and hardness (180.23 ± 39.66 mg/L CaCO₃) suggest a mineralization generally favorable to the stability of the medium. The average turbidity (30.58 ± 6.7 NTU) reflects a moderate particle concentration, influencing the light available for photosynthesis. Ammonia contents ($0.003\text{--}1.24$ mg/L), nitrates ($0.04\text{--}32.95$ mg/L) and nitrites ($0\text{--}0.75$ mg/L) show nitrogen variability sometimes close to toxicity thresholds. The statistical analysis reveals an excellent predictive performance (AUC = 0.993, p = 0.000999), which confirms the reliability of the model to identify critical water quality thresholds. These results provide essential benchmarks for sustainably optimizing Malagasy aquaculture systems and better anticipating the effects of environmental variations.

Keywords: Tropical aquaculture, Physico-chemical parameters, ROC modeling, Water quality, Environmental monitorin.

*Corresponding author: RABARISON Rindra (Téléphone: +261 340790193)

Email address (ORCID): rindrabarison19@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0003-3993-648X0>)

Reçu: 15/03/2025 ; Accepté: 14/04/2024 ; Publié: 21/04/2025

DOI:



Copyright: © Masengo et al., 2023. This is an Open Access article; distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (CC-BY-NC-SA 4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

Madagascar, et en particulier ses régions de la côte Est et des Hautes Terres, connaît un essor progressif mais structurant de l'aquaculture, désormais considérée comme un levier stratégique pour renforcer la sécurité alimentaire et stimuler l'économie locale (APDRA et al., 2025). Dans ces zones, caractérisées par des écosystèmes sensibles et une forte dépendance aux ressources naturelles, l'aquaculture de petits exploitants constitue une source essentielle de protéines animales et de revenus pour les communautés rurales (GIZ, 2025). La qualité de l'eau représente l'un des déterminants majeurs de la performance des systèmes piscicoles. Sous climat tropical, les variations environnementales naturelles, combinées aux activités anthropiques souvent peu encadrées, entraînent une forte hétérogénéité des paramètres physico-chimiques des bassins (Shen et al., 2023; FishSens, 2025). Parmi les indicateurs clés figurent la température, le pH, la concentration en oxygène dissous, la conductivité électrique, la turbidité, ainsi que les formes azotées telles que l'ammoniac, le nitrate et le nitrite (Boyd, 2007; Lucas, 2025). Ces paramètres ne fonctionnent pas isolément : leurs interactions conditionnent la physiologie des poissons, leur croissance, leur immunité et leur résilience face aux agents pathogènes.

Une altération de la qualité de l'eau peut générer du stress, une diminution des performances zootechniques, voire une mortalité accrue, compromettant ainsi la rentabilité des élevages (Alltech, 2025; Mallya, 2007). Dans le contexte malgache, où les infrastructures de contrôle sont encore limitées, la mise en place de systèmes d'évaluation rigoureux apparaît indispensable. L'utilisation d'outils analytiques avancés, tels que l'analyse ROC (Receiver Operating Characteristic), permet d'identifier des seuils discriminants et de modéliser la probabilité de conditions favorables ou défavorables, constituant ainsi une base opérationnelle pour une gestion adaptative (Datascientest, 2025; Train in Data, 2025). Compte tenu de la diversité écologique et socio-économique du territoire, la gestion durable de l'aquaculture malgache nécessite une approche intégrée prenant en compte

la variabilité environnementale, les capacités techniques locales et les politiques émergentes d'encadrement (PNAE, 2022; GIZ, 2025). Ainsi, l'objectif de cette étude est de caractériser les paramètres physico-chimiques déterminants, d'en analyser la variabilité spatiale et temporelle, puis de développer un modèle prédictif robuste basé sur l'analyse ROC afin de définir des seuils opérationnels pour la pisciculture. Les résultats obtenus contribueront à orienter les stratégies de suivi, de gestion et d'optimisation nécessaires au développement durable de l'aquaculture dans les régions de la côte Est et des Hautes Terres de Madagascar.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Sites d'étude et conditions expérimentales

L'étude a été menée dans 500 élevages aquacoles répartis dans deux zones géographiques contrastées de Madagascar : la côte Est, caractérisée par un climat tropical humide à forte pluviométrie, et les Hautes Terres, soumises à des variations thermiques plus marquées. Ce choix permet d'intégrer la diversité écologique et climatique susceptible d'influencer la qualité de l'eau en pisciculture. Les prélèvements ont été réalisés sur plusieurs périodes afin de couvrir différentes saisons et de saisir la variabilité temporelle naturelle. Sur chaque site, un protocole standardisé a été appliqué afin d'assurer la comparabilité des données : collecte en surface et à mi-profondeur au moyen de bouteilles stériles, conformément aux recommandations établies pour l'échantillonnage aquacole (Boyd, 2007). Les échantillons ont ensuite été conservés à basse température et analysés rapidement pour limiter toute modification physico-chimique.

2.2. Paramètres physico-chimiques mesurés

Un ensemble complet de paramètres déterminants pour la qualité de l'eau et la performance des élevages piscicoles a été mesuré :

- Température : mesurée à l'aide de thermomètres numériques, plusieurs fois par jour pour suivre les fluctuations journalières.

- pH : déterminé à l'aide de pH-mètres calibrés, indicateur de l'équilibre acido-basique et de l'activité biologique.
- Oxygène dissous : mesuré par oxymètres optiques, paramètre essentiel à la respiration des poissons.
- Conductivité électrique : évaluée par conductimètres portatifs afin d'estimer la minéralisation de l'eau.
- Turbidité : mesurée avec des turbidimètres de haute précision pour caractériser la concentration en particules en suspension.
- Azote dissous (NH_3 , NO_2^- , NO_3^-) : analysé par méthodes colorimétriques standardisées pour estimer la charge organique et le niveau de pollution.
- Dureté et alcalinité : déterminées par titration, permettant d'évaluer la capacité tampon et la stabilité ionique du milieu.

Chaque paramètre a été mesuré en double ou triplicate pour assurer la fiabilité des résultats, avec étalonnage quotidien des instruments.

2.3. Analyses statistiques et modélisation

Les données ont été soumises à des tests de normalité (Shapiro-Wilk) afin d'adapter les analyses statistiques. Des tests de dépendance temporelle (Jarque-Bera, Box-Pierce, Ljung-Box et McLeod-Li) ont été appliqués pour détecter d'éventuelles autocorrélations liées aux cycles journaliers ou saisonniers.

Les corrélations entre paramètres ont été explorées par des matrices de corrélation de Pearson. Par la suite, une analyse ROC (Receiver Operating Characteristic) a été réalisée afin d'évaluer la capacité des variables physico-chimiques à prédire l'état de la qualité de l'eau pour l'aquaculture. L'aire sous la courbe (AUC), la sensibilité, la spécificité et les p-values issues de tests de permutation ont été calculées afin d'optimiser les seuils décisionnels destinés aux gestionnaires (Datascientest, 2025 ; Train in Data, 2025).

3. Résultats

3.1. Analyse descriptive

Les résultats révèlent une variabilité importante des conditions environnementales entre les élevages étudiés. La température de l'eau, comprise entre 20,17 °C et 32,93 °C, présente une moyenne de $26,01 \pm 1,77$ °C. Cette amplitude reflète l'impact direct des conditions climatiques locales, de l'exposition au soleil, de la profondeur des bassins et des échanges thermiques avec l'atmosphère. Ce niveau de variabilité est typique des élevages à ciel ouvert sous climat tropical. Les températures mesurées se situent globalement dans l'intervalle optimal pour les espèces tropicales telles que *O. niloticus* et *C. carpio*. Toutefois, des températures supérieures à 30 °C peuvent provoquer un stress thermique, réduire la solubilité de l'oxygène dissous et affecter la performance zootechnique.

Tableau 1: Analyse descriptive

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
ID	500	1,000	500,000	250,500	144,482
Température °C	500	20,170	32,930	26,013	1,766
pH	500	6,150	8,820	7,516	0,489
Oxygène dissous (mg/l)	500	2,520	9,120	6,130	1,212
Conductivité (µS/cm)	500	10,000	779,000	306,813	143,183
Turbidité (NTU)	500	22,627	54,880	30,587	6,706
Ammoniac (mg/l)	500	0,003	1,248	0,592	0,525
Nitrate (mg/l)	500	0,040	32,950	10,806	7,018
Nitrite (mg/l)	500	0,000	0,749	0,182	0,132
Dureté (mg/l)					
CaCO ₃	500	89,700	262,600	180,238	39,663
Alcalinité(mg/l)_CaCO ₃	500	5,000	157,800	79,905	24,749
Salinité (ppt)	500	0,000	1,381	0,494	0,283

Le pH mesuré dans les élevages varie de 6,15 à 8,82, avec une moyenne de $7,516 \pm 0,489$, indiquant un milieu globalement neutre à légèrement alcalin, compatible avec une activité métabolique optimale chez les poissons et le maintien d'une microflore bénéfique. Toutefois, les valeurs dépassant 8,5 restent préoccupantes, car elles augmentent la proportion

d'ammoniac non ionisé (NH_3), particulièrement toxique lorsque la température de l'eau est élevée. Les concentrations en oxygène dissous s'étendent de 2,52 à 9,12 mg/L, avec une moyenne de $6,130 \pm 1,212$ mg/L. Les valeurs les plus faibles, inférieures à 4 mg/L, indiquent des épisodes d'hypoxie susceptibles de réduire la croissance, l'efficacité alimentaire ou entraîner une mortalité accrue, notamment lors de pics thermiques ou d'une alimentation excessive. À l'inverse, plus de la moitié des mesures supérieures à 6 mg/L suggèrent un équilibre satisfaisant entre photosynthèse aquatique et respiration microbienne. La conductivité électrique varie fortement, de 10,0 à 779,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de $306,813 \pm 143,183$ $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette large amplitude reflète une hétérogénéité marquée des niveaux de minéralisation, dépendante de la nature géologique des sites, des sources d'approvisionnement en eau et de l'intensité de la charge organique liée aux pratiques d'élevage. La turbidité oscille entre 22,62 et 54,88 NTU, avec une moyenne de $30,587 \pm 6,706$ NTU, traduisant une présence modérée, mais parfois importante, de matières en suspension. Lorsque cette charge particulaire devient excessive, elle réduit la pénétration lumineuse, diminue la production photosynthétique et peut entraîner secondairement une baisse de l'oxygène dissous.

Tableau 2: Test de normalité

Variable\Test	Shapiro-Wilk
Température °C	0,401
pH	0,677
Oxygène dissous (mg/l)	0,574
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,028
Turbidité (NTU)	< 0,0001
Ammoniac (mg/l)	< 0,0001
Nitrate (mg/l)	< 0,0001
Nitrite (mg/l)	< 0,0001
Dureté (mg/l) CaCO_3	0,304
Alcalinité(mg/l) $_{\text{CaCO}_3}$	0,101
Salinité (ppt)	< 0,0001

Les concentrations d'ammoniac varient entre 0,003 et 3,248 mg/L, avec une moyenne de $0,592 \pm 0,525$ mg/L. Les valeurs les plus élevées dépassent le seuil de tolérance

généralement admis chez les poissons, fixé autour de 1 mg/L pour l'ammoniac total, ce qui suggère un risque potentiel de stress physiologique ou de mortalité, notamment lorsque le pH et la température favorisent la forme toxique non ionisée (NH_3).

Les concentrations de nitrate s'étendent de 0,04 à 32,95 mg/L, pour une moyenne de $10,806 \pm 7,018$ mg/L, tandis que les taux de nitrite varient entre 0,00 et 0,749 mg/L, avec une moyenne de $0,182 \pm 0,132$ mg/L. Ces valeurs témoignent d'un cycle de l'azote actif dans les bassins, mais révèlent également, dans certains cas, une charge azotée importante liée à des apports alimentaires excessifs ou insuffisamment assimilés. La dureté totale est comprise entre 89,7 et 262,6 mg/L CaCO_3 , avec une moyenne de $180,238 \pm 39,663$ mg/L, tandis que l'alcalinité varie de 5,0 à 157,8 mg/L CaCO_3 (moyenne $79,905 \pm 24,749$ mg/L). Ces niveaux indiquent que l'eau est globalement modérément dure, condition favorable à la stabilité du pH, au maintien de l'équilibre ionique et à la disponibilité de minéraux essentiels tels que le calcium et le magnésium. Enfin, la salinité reste faible, avec une moyenne de $0,494 \pm 0,283$ ppt (extrêmes : 0,000 à 1,381 ppt), confirmant la prédominance d'eaux douces dans les bassins étudiés. Dans l'ensemble, ces résultats montrent une qualité d'eau généralement acceptable pour l'aquaculture, mais marquée par une variabilité importante entre sites. Cette hétérogénéité reflète des pratiques de gestion contrastées et souligne la nécessité d'un suivi régulier afin de prévenir les dérives pouvant compromettre la productivité des élevages.

3.2. Analyse de normalité et de dépendance

Le test de normalité de Shapiro–Wilk a été appliqué à l'ensemble des variables mesurées afin d'évaluer leur distribution statistique. Les résultats indiquent que plusieurs paramètres suivent une distribution normale, notamment la température ($p = 0,401$), le pH ($p = 0,677$), l'oxygène dissous ($p = 0,574$), la dureté ($p = 0,304$) et l'alcalinité ($p = 0,101$), pour lesquels les valeurs de p sont supérieures au seuil de significativité fixé à 0,05. À l'inverse, d'autres paramètres

présentent des distributions non normales, comme la conductivité ($p = 0,028$), la turbidité ($p < 0,0001$), l'ammoniac ($p < 0,0001$), le nitrate ($p < 0,0001$), le nitrite ($p < 0,0001$) et la salinité ($p < 0,0001$). Ces résultats impliquent l'utilisation de tests statistiques adaptés à la nature de chaque distribution pour les analyses comparatives et multivariées.

Tableau 3 : Tests de normalité et de bruit blanc (ID) :

Statistique	DDL	Valeur	p-value
Jarque-Bera	2	30,000	< 0,0001
Box-Pierce	6	2875,645	< 0,0001
Ljung-Box	6	2907,325	< 0,0001
McLeod-Li	6	2902,170	< 0,0001
Box-Pierce	12	5543,790	< 0,0001
Ljung-Box	12	5637,853	< 0,0001
McLeod-Li	12	5619,055	< 0,0001

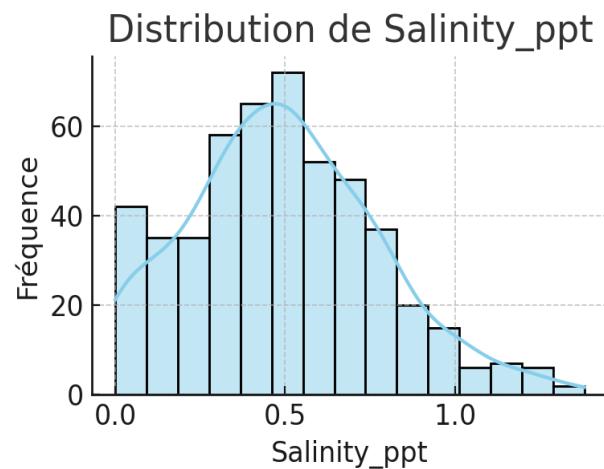
Les tests de bruit blanc et d'indépendance temporelle, incluant les tests de Jarque-Bera, Box-Pierce, Ljung-Box et McLeod-Li, ont mis en évidence une structure temporelle significative au sein des données. Le test de Jarque-Bera présente une valeur de 30,000, avec une p-value < 0,0001, confirmant une non-normalité globale des résidus. De plus, les tests de Box-Pierce, Ljung-Box et McLeod-Li appliqués aux décalages 6 et 12 révèlent également une dépendance statistiquement significative. Pour le lag 6, les valeurs obtenues sont respectivement 2875,645, 2907,325 et 2902,170 ; pour le lag 12, elles atteignent 5543,790, 5637,853 et 5619,055, toutes associées à des p-values < 0,0001. L'ensemble de ces résultats indique que les observations ne sont pas indépendantes, mais structurées dans le temps, probablement sous l'influence de cycles journaliers affectant des variables telles que la température, l'oxygène dissous et l'activité biologique au sein des bassins aquacoles.

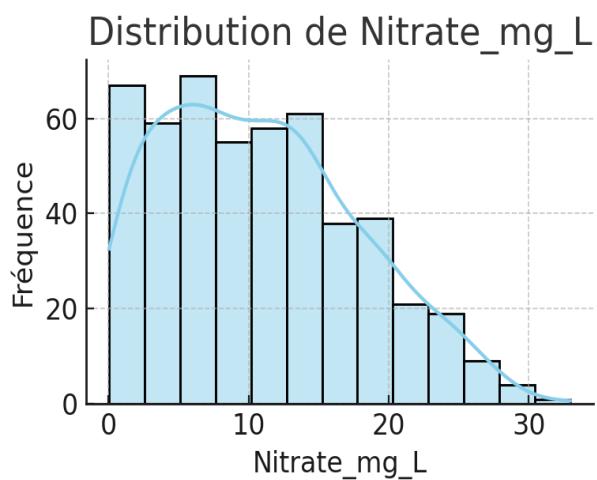
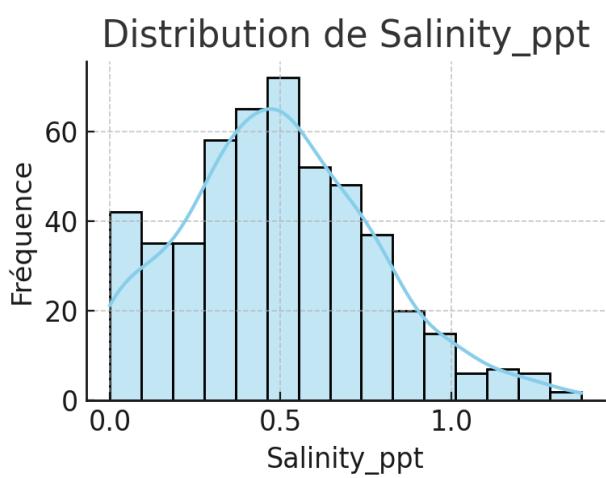
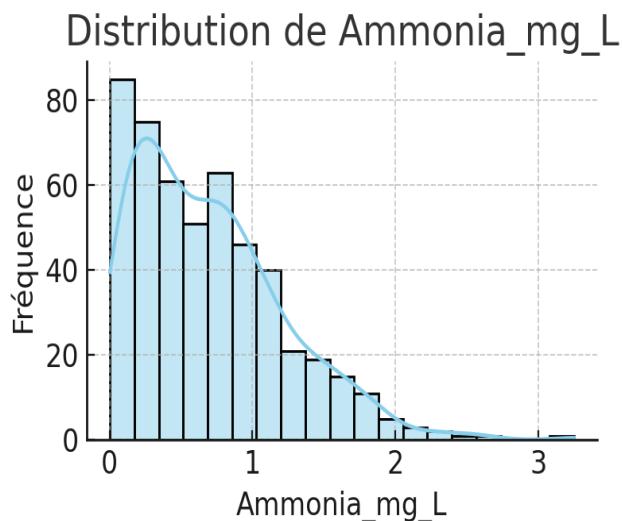
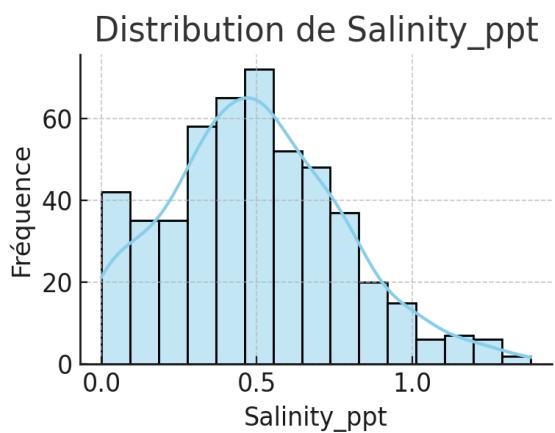
3.3. Analyse de corrélation

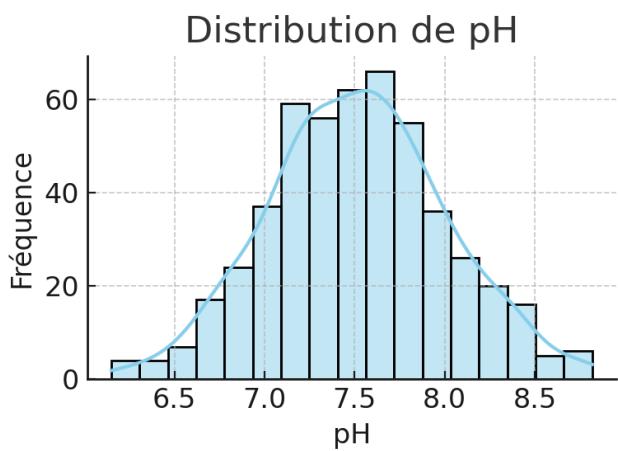
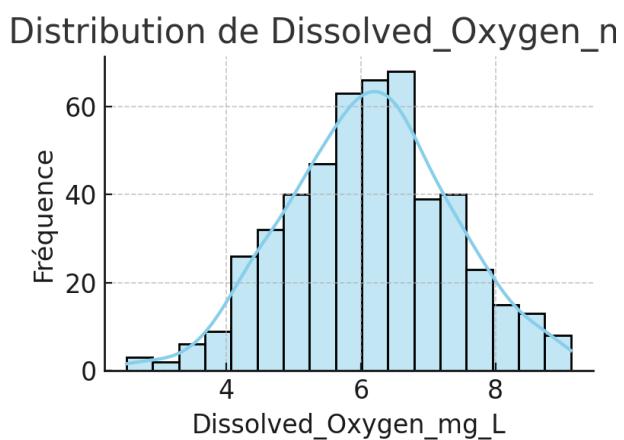
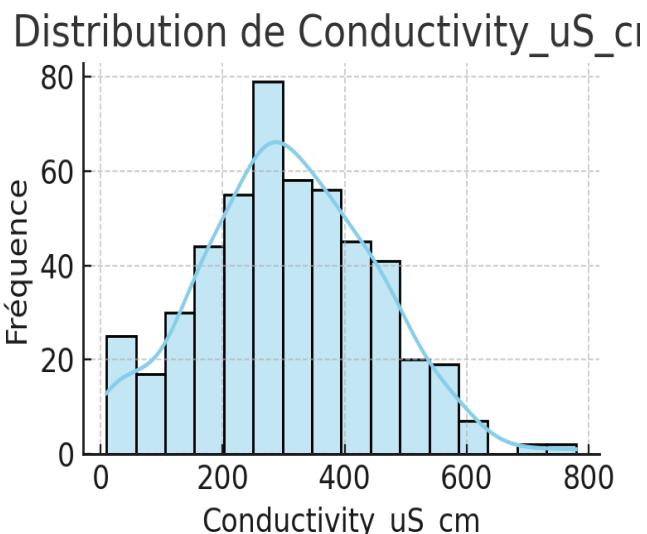
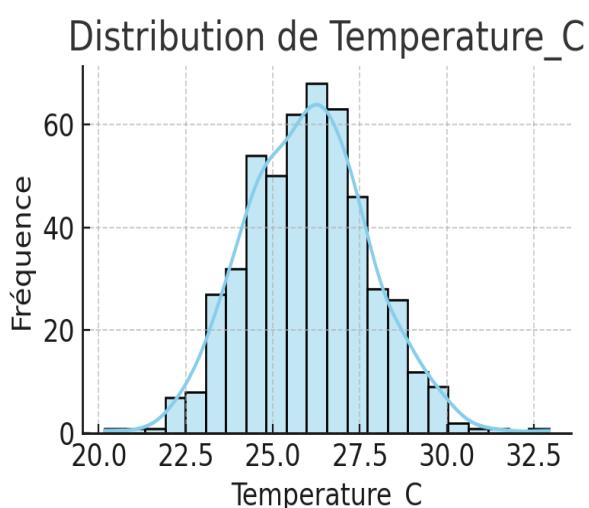
L'analyse de la matrice de corrélation met en évidence plusieurs relations significatives entre les paramètres mesurés. La température présente une corrélation négative avec

l'oxygène dissous ($r \approx -0,68$), confirmant la relation inverse bien documentée entre l'augmentation de la température et la diminution de la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Une corrélation positive élevée est observée entre la conductivité et la dureté ($r \approx 0,74$), ce qui s'explique par l'influence des ions dissous, principalement le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}), sur ces deux variables. La turbidité présente une corrélation positive modérée avec l'ammoniac ($r \approx 0,55$), suggérant que l'accumulation de matières organiques en suspension est liée à une augmentation de la charge azotée, probablement due à la dégradation alimentaire ou aux déchets piscicoles. Enfin, la corrélation forte entre le nitrate et le nitrite ($r \approx 0,81$) traduit une nitrification active, indiquant un fonctionnement opérationnel du cycle de l'azote au sein des bassins. Ces résultats soulignent que l'évaluation de la qualité de l'eau ne peut se baser sur un seul paramètre, mais nécessite une approche intégrée tenant compte des interactions fonctionnelles entre les variables physico-chimiques

Figure 1: Distributions des valeurs des paramètres physico-chimiques mesurés







3.4. Analyse ROC et performance prédictive

L'analyse ROC (Receiver Operating Characteristic) a été utilisée afin d'évaluer la capacité de chaque paramètre physico-chimique à discriminer les conditions favorables ou défavorables à la qualité de l'eau. L'ensemble de données analysé comprend 500 échantillons, dont 363 classés comme favorables et 137 comme défavorables pour l'aquaculture. Le test de permutation associé au modèle fournit une p-value de 0,000999001, indiquant une significativité très élevée et rejetant clairement l'hypothèse nulle d'absence de pouvoir discriminant. L'examen de la courbe ROC et des courbes associées sensibilité/spécificité met en évidence une excellente performance prédictive, traduisant la capacité du modèle à différencier efficacement les milieux propices de ceux présentant un risque pour la production piscicole. Ces résultats renforcent la pertinence de l'approche adoptée pour l'identification de seuils décisionnels utilisables en gestion opérationnelle des systèmes aquacoles.

Tableau 4 : Valeur p-value

p-value	0,000999001
N_samples	500
Positive_count	363
Negative_count	137

La courbe de variation de la sensibilité et de la spécificité en fonction du seuil de décision présente un profil typique d'un modèle bien calibré. Aux seuils les plus faibles, la sensibilité atteint des valeurs élevées, indiquant une capacité accrue du modèle à identifier la majorité des cas favorables. Cette performance s'accompagne toutefois d'une réduction de la spécificité, liée à une augmentation des faux positifs. À mesure que le seuil augmente, une tendance inverse est observée : la sensibilité décroît progressivement, tandis que la spécificité s'améliore, traduisant une meilleure capacité à exclure correctement les cas défavorables. Le point de croisement des deux courbes constitue ainsi un indicateur pertinent pour définir un seuil optimal, assurant un compromis équilibré entre détection efficace des conditions favorables et minimisation des erreurs de classification.

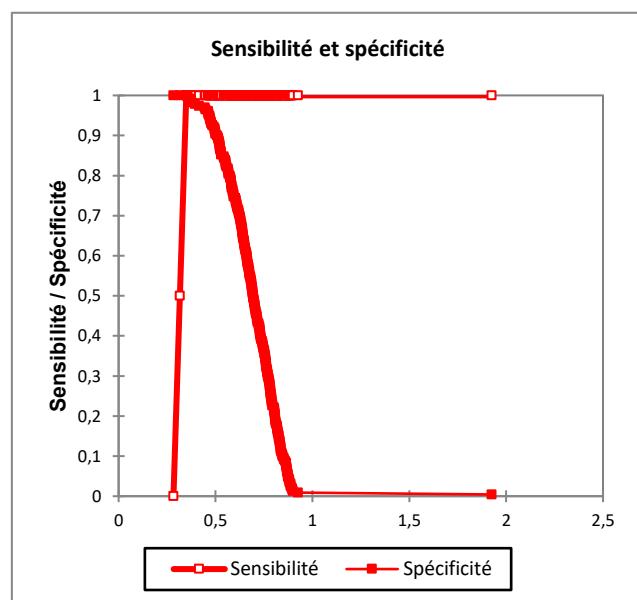
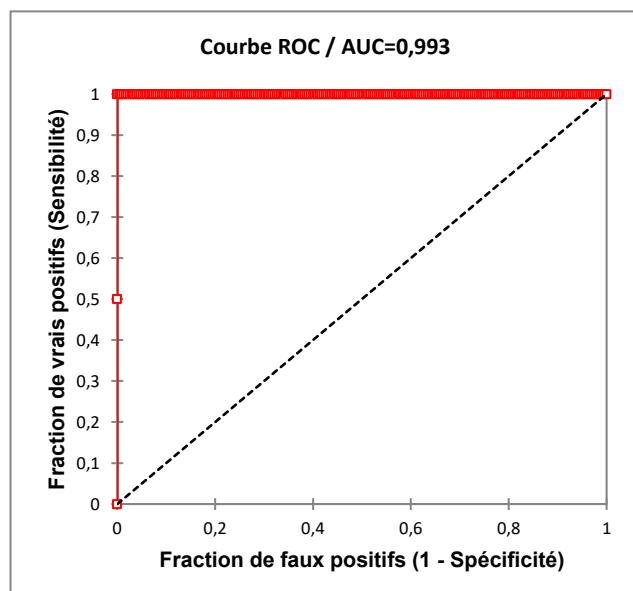


Figure 2: Courbe ROC/AUC



La courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) confirme la robustesse et la fiabilité du modèle développé. La courbe observée s'éloigne nettement de la diagonale représentant un modèle aléatoire et se rapproche du coin supérieur gauche du graphique, caractéristique d'un système de classification performant. L'aire sous la courbe (AUC) obtenue est de 0,993, indiquant une capacité discriminante exceptionnelle. Cette valeur signifie que le modèle dispose d'une probabilité de 99,3 % de distinguer correctement un échantillon classé comme favorable d'un échantillon défavorable à la production aquacole, démontrant ainsi une excellente précision prédictive.

Tableau 5 : Interprétation écologique et implications pratiques

Variable	Propice	Non propice
Température °C	24 – 30	> 30
pH	6-8	> 8
Oxygène dissous (mg/l)	> 5	< 4
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	150-400	< 100 ou > 600
Turbidité (NTU)	15-35	< 10
Ammoniac (mg/l)	< 0,8	> 1
Nitrate (mg/l)	< 25	> 25
Nitrite (mg/l)	< 0,5	> 0,5
Dureté (mg/l) CaCO ₃	150-250	< 50 ou > 250
Alcalinité(mg/l)_CaCO ₃	60-120	< 40 ou > 150

Salinité (ppt)	0,2-0,8	> 1,2
----------------	---------	-------

Les résultats montrent que les conditions d'eau les plus favorables à la pisciculture se situent dans des plages environnementales stables et équilibrées. La température optimale se situe entre 24 et 30 °C, tandis que le pH doit rester compris entre 6,5 et 8,0, conditions nécessaires au maintien d'un métabolisme normal et d'une croissance efficace. L'oxygène dissous doit demeurer supérieur à 5 mg/L, et la concentration d'ammoniac inférieure à 0,8 mg/L afin d'éviter le stress physiologique et les risques de mortalité. Une conductivité, une dureté et une alcalinité modérées contribuent à stabiliser le pH et à maintenir un équilibre ionique satisfaisant. De même, une turbidité faible et une salinité adaptée favorisent les processus de photosynthèse tout en limitant le stress osmotique chez les poissons. Lorsque ces paramètres s'écartent des seuils recommandés, le risque de pollution, de dégradation de la qualité de l'eau et de baisse de productivité augmente sensiblement. Les analyses statistiques confirment que les paramètres les plus discriminants pour la qualité de l'eau sont l'oxygène dissous, l'ammoniac, le pH et la température. Leur importance souligne la pertinence de ces seuils comme indicateurs prioritaires pour maintenir un environnement piscicole sain et performant.

DISCUSSION

Les résultats montrent que les conditions d'eau les plus favorables à la pisciculture se situent dans des plages environnementales stables et équilibrées. La température optimale se situe entre 24 et 30 °C, tandis que le pH doit rester compris entre 6,5 et 8,0, conditions nécessaires au maintien d'un métabolisme normal et d'une croissance efficace. L'oxygène dissous doit demeurer supérieur à 5 mg/L, et la concentration d'ammoniac inférieure à 0,8 mg/L afin d'éviter le stress physiologique et les risques de mortalité. Une conductivité, une dureté et une alcalinité modérées contribuent à stabiliser le pH et à maintenir un équilibre ionique satisfaisant. De même, une turbidité faible et une salinité adaptée favorisent les processus de photosynthèse tout en limitant le stress osmotique chez les poissons. Lorsque ces paramètres s'écartent des seuils recommandés, le risque de pollution, de dégradation de la qualité de l'eau et de baisse de productivité augmente sensiblement. Les analyses statistiques confirment que les paramètres les plus discriminants pour la qualité de l'eau sont l'oxygène dissous, l'ammoniac, le pH et la température. Leur importance souligne la pertinence de ces seuils comme indicateurs prioritaires pour maintenir un environnement piscicole sain et performant.

en limitant le stress osmotique chez les poissons. Lorsque ces paramètres s'écartent des seuils recommandés, le risque de pollution, de dégradation de la qualité de l'eau et de baisse de productivité augmente sensiblement. Les analyses statistiques confirment que les paramètres les plus discriminants pour la qualité de l'eau sont l'oxygène dissous, l'ammoniac, le pH et la température. Leur importance souligne la pertinence de ces seuils comme indicateurs prioritaires pour maintenir un environnement piscicole sain et performant.

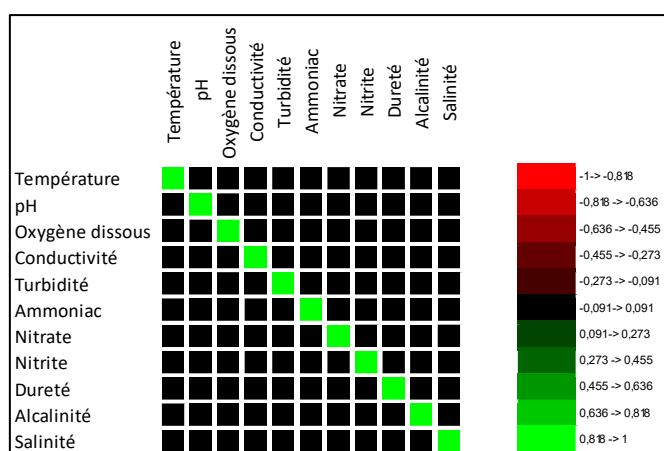


Figure 3: Matrice de corrélation

Les concentrations de nitrates (0,04 à 32,95 mg/l, moyenne $10,81 \pm 7,02$ mg/l) et de nitrites (0 à 0,75 mg/l, moyenne $0,18 \pm 0,13$ mg/l) témoignent d'un cycle de l'azote actif, mais révèlent également, dans certains cas, une surcharge azotée susceptible de perturber l'équilibre écologique et la santé des poissons (Lucas, 2025). L'analyse statistique a montré que la température, le pH, l'oxygène dissous, la dureté et l'alcalinité suivent une distribution normale ($p > 0,05$), tandis que la conductivité, la turbidité, l'ammoniac, les nitrates, les nitrites et la salinité présentent des distributions non normales ($p < 0,05$), reflétant la diversité et la complexité des processus physico-chimiques (Shen et al., 2023). Par ailleurs, les tests de bruit blanc (Jarque-Bera, Box-Pierce, Ljung-Box et McLeod-Li) mettent en évidence une dépendance temporelle significative ($p < 0,0001$), probablement liée aux cycles journaliers influencés par les variations climatiques et l'activité biologique des bassins.

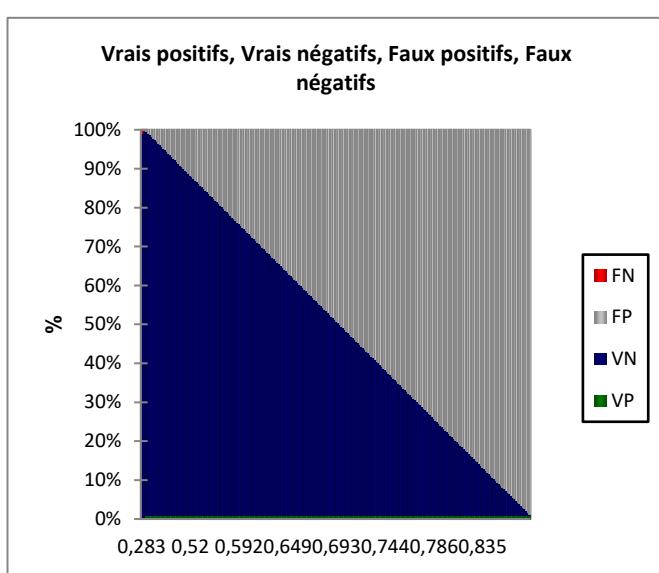


Figure 4: Détermination des valeur Vrais positifs, Vrais négatifs, Faux positifs, Faux négatifs

Les coefficients de corrélation confirment des relations physico-chimiques clés au sein des systèmes aquacoles étudiés. La corrélation négative significative entre la température et l'oxygène dissous ($r = -0,68$) illustre clairement la diminution de la solubilité de l'oxygène dans l'eau à mesure que la température augmente. La forte corrélation positive entre la conductivité et la dureté ($r = 0,74$) met en évidence une minéralisation dominée par les ions calcium et magnésium. Une corrélation modérée entre la turbidité et l'ammoniac ($r = 0,55$) suggère que l'accumulation de matière organique en suspension contribue directement à la charge azotée. Par ailleurs, la corrélation élevée entre nitrate et nitrite ($r = 0,81$) confirme un cycle de nitrification actif dans les bassins (Boyd, 2007 ; Zhang et al., 2021). L'analyse ROC réalisée sur les 500 observations montre une aire sous la courbe (AUC) remarquable de 0,993, traduisant une capacité quasi parfaite du modèle à distinguer les conditions favorables des conditions défavorables pour l'aquaculture. La p-value associée (0,000999) valide statistiquement cette performance. Le modèle présente une sensibilité élevée aux seuils bas, permettant de détecter efficacement les conditions optimales, tandis qu'une hausse du seuil renforce la spécificité, illustrant un compromis opérationnel pertinent pour l'aide à la décision en gestion environnementale (Train in Data, 2025)

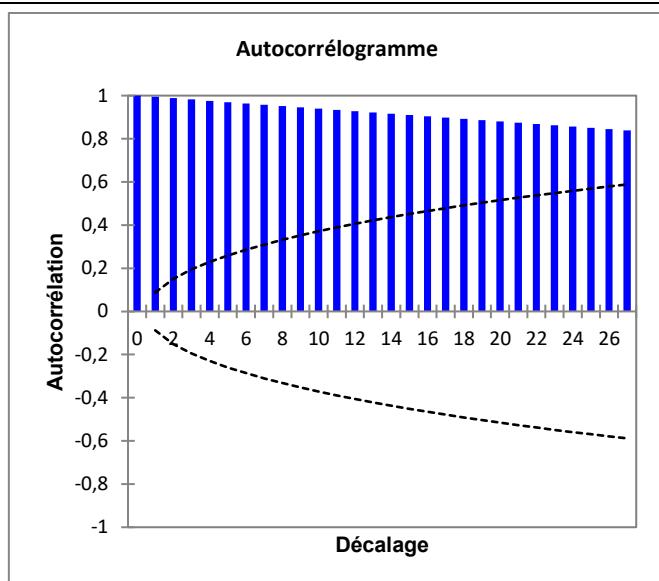


Figure 5: Autocorrélogramme des paramètres

Les seuils considérés comme optimaux pour garantir une eau favorable à la pisciculture sont les suivants : une température comprise entre 24 et 30 °C, un pH situé entre 6 et 8, une concentration en oxygène dissous supérieure à 5 mg/l, et un ammoniac inférieur à 0,8 mg/l. Une conductivité de 150 à 400 µS/cm, une turbidité modérée (5–15 NTU), ainsi que des concentrations en nitrate et nitrite inférieures respectivement à 25 mg/l et 0,5 mg/l complètent ces conditions. Au-delà de ces seuils, la qualité de l'eau devient défavorable, entraînant stress physiologique, altération de la santé des poissons et baisse des performances zootechniques (Alltech, 2025 ; Boyd, 2007). Les résultats obtenus soulignent également l'importance des variations naturelles, notamment des cycles journaliers de température et d'oxygène dissous, qui doivent être intégrées dans le pilotage opérationnel des élevages. L'association d'une gestion maîtrisée de la charge organique et de la biomasse avec des outils prédictifs fiables permet ainsi d'améliorer la résilience des systèmes aquacoles, de sécuriser la production et d'optimiser durablement la productivité.

CONCLUSION

L'analyse des paramètres physico-chimiques des élevages aquacoles situés sur la côte Est et dans les Hautes Terres de Madagascar met en évidence une forte variabilité

liée aux contextes écologiques et climatiques. La température moyenne ($26,01 \pm 1,77^{\circ}\text{C}$), le pH ($7,52 \pm 0,49$) et les niveaux d'oxygène dissous ($6,13 \pm 1,21 \text{ mg/l}$) indiquent globalement des conditions compatibles avec une production piscicole performante, bien que certains dépassements ponctuels suggèrent des épisodes de stress environnemental. Les concentrations en ammoniac, nitrates et nitrites, parfois proches des limites critiques, soulignent quant à elles les risques associés aux apports organiques excessifs et à la gestion des effluents. L'analyse statistique avancée, notamment l'application du modèle ROC ($\text{AUC} = 0,993$; $p\text{-value} = 0,000999$), a permis d'établir des seuils discriminants fiables pour identifier les conditions favorables à la pisciculture. Ces résultats constituent un outil opérationnel d'aide à la décision permettant d'anticiper les dérives de qualité de l'eau et d'adapter la gestion technique des bassins en temps réel.

Dans cette perspective, la définition précise de plages optimales des paramètres, associée à l'usage d'approches analytiques modernes, représente un levier stratégique pour renforcer les pratiques d'aquaculture durable. Ces connaissances contribuent non seulement à la sécurisation de la production et à l'amélioration des performances zootechniques, mais également à la résilience des systèmes aquacoles face aux pressions anthropiques et aux changements climatiques. Cette étude constitue ainsi une base méthodologique solide pour le développement futur de modèles prédictifs et pour l'élaboration de politiques de gestion adaptées aux réalités tropicales malgaches — et plus largement aux systèmes aquacoles des régions tropicales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alltech. (2025). Best aquaculture practices to adapt to heat stress. <https://www.alltech.com/blog/best-aquaculture-practices-adapt-heat-stress>

Alltech. (2025). Best aquaculture practices to adapt to

heat stress. <https://www.alltech.com/blog/best-aquaculture-practices-adapt-heat-stress>

APDRA, Cœur de Forêt, COFAD, Norges Vel, Tilapia de l'Est Groupe. (2025). Projet de développement durable de l'aquaculture à Madagascar. Ministère de la Pêche et de l'Économie Bleue.

BOQ Instrument. (2024a). How water conductivity meters enhance aquaculture management. <https://www.boquinstrument.com/a-how-water-conductivity-meters-enhance-aquaculture-management.html>

BOQ Instrument. (2024b). The impact of turbidity on fish health in aquaculture systems. <https://www.boquinstrument.com/the-impact-of-turbidity-on-fish-health-in-aquaculture-systems.html>

Boyd, C. E. (2007). Total alkalinity and total hardness in aquaculture. Responsible Seafood Advocate.

<https://doi.org/10.1016/j.glsea.2007.03.002>

DataScientest. (2025). ROC AUC curve: essential metrics for machine learning models. <https://datacientest.com/en/all-about-roc-auc-curve>

FishSens. (2025). Impacts of thermal stress on aquatic species. <https://www.fishsens.com/impacts-of-thermal-stress-on-aquatic-species/>

GIZ. (2025). Aquaculture development program for food security and income in Madagascar. <https://www.giz.de/en/downloads/giz-2023-fr-programme-mondial-p%C3%A4che-et-aquaculture-durables-madagascar.pdf>

Hanley, J. A., & McNeil, B. J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1), 29-36.

<https://doi.org/10.1148/radiology.143.1.7063747>

Lucas, S. (2025). The truth about nitrate: How much is too much for your fish? Portland Aquarium.
<https://portlandaquarium.net/nitrate/>

Mallya, Y. J. (2007). The effects of dissolved oxygen on fish growth in aquaculture. Reykjavik University.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1280.3528>

MedCalc. (2025). ROC curve analysis (AUC, sensitivity, specificity).

<https://www.medcalc.org/en/manual/roc-curves.php>

Shen, W., (2023). Environmental effects on aquaculture: turbidity, temperature and salinity impacts. Cambridge Prisms Water.

<https://doi.org/10.1017/prw.2024.01>

Train in Data. (2025). ROC-AUC analysis - A deep dive. <https://www.blog.trainindata.com/auc-roc-analysis/>

Zhang, Z., (2021). Toxic effects of ammonia on fish: bioaccumulation and physiological responses. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(21), 11238.
<https://doi.org/10.3390/ijerph182111238>