

ORIGINAL ARTICLE

ANALYSE QUALITATIVES DES EAUX DE PUIITS : CAS DE QUARTIER LAZARET NORD ET AMBALAVOLA, ANTSIRANANA MADAGASCAR



Qualitative Analysis of Well Water: A Case Study of Lazaret Nord and Ambalavola Neighborhoods, Antsiranana Madagascar

| Robert Tombosoa ^{1*} | Joël Basck Jao ² | Clement Lehimena ¹ | and | Julio Hervé Andriamadio ¹ |

¹ Université d'Antsiranana | Ecole Doctorale Nature, Structure de la Matière et Métrologie Nucléaire (NSMMN) | BP :0 Antsiranana 201 | Madagascar |

² Université d'Antsiranana | Faculté des Sciences | Mention Sciences Chimiques | BP :0 Antsiranana 201 | Madagascar |

| DOI: 10.5281/zenodo.15578397 | | Received May 19, 2025 | | Accepted May 24, 2025 | | Published June 02, 2025 | | ID Article | Robert-Ref12-5-20ajiras190525 |

RESUME

Introduction ou Contexte : La planète terre est un endroit où règne la prédominance de l'eau. On trouve quatre sources d'eaux brutes : les eaux de pluie, les eaux de surface, les eaux souterraines, et les eaux de mer. L'Organisation mondiale de la santé estime en effet que 80% des maladies qui affectent la population mondiale sont directement associées à l'eau. On estime par ailleurs que les eaux polluées sont responsables de 50% des cas de mortalité infantile. **Objectifs :** Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'étude de la potabilité des eaux souterraines d'Antsiranana, en particulier les puits de Lazaret Nord et d'Ambalavola. Elle vise aussi à apporter des recommandations de traitement si nécessaire. **Méthodes :** Après l'étude d'aspect général, les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux brutes des puits de Lazaret Nord et d'Ambalavola, nous avons comparé avec les Normes Malagasy de la potabilité de l'eau de consommation humaine selon le décret n° 2004-635 du 15/06/04. **Résultats :** Les résultats des paramètres physico-chimiques obtenus selon des mesures et des analyses effectuées sur ces deux eaux brutes ont montré que la forte concentration en matières organiques, la hausse valeur de la température de deux eaux et celle de la turbidité de l'eau de puits 2 (puits d'Ambalavola) peuvent s'impacter sur la qualité de ces eaux. Ainsi, par rapport à la norme Malgache de l'eau potable, les autres paramètres gardent la valeur préférable. Les deux eaux constituent une forte contamination microbiologique d'origine fécale. Cela implique que la plupart des paramètres présentent un taux très élevé dans les deux eaux. De plus, il y a certains paramètres qui ont des valeurs ne peuvent pas être comptées (très élevées) telles que les coliformes totaux et Entérocoques intestinaux dans les eaux de puits 2. Bien que les paramètres bactériologiques ne respectent pas la norme malgache de l'eau potable, néanmoins les eaux traitées confirment une bonne qualité. **Conclusions :** On a remarqué que, le taux de substance organique dépasse celui des normes de potabilité des eaux. En se référant aux paramètres physico-chimiques des normes Malagasy et l'Organisation Mondiale de la Santé de la qualité de l'eau potable à la consommation humaine, la qualité de ces eaux sont acceptables. Mais le taux des substances organiques et les paramètres bactériologiques dépasse les normes de la potabilité, ceci peut être l'effet à des substances organiques enfuies antérieurement en profondeur, ou l'insalubrité autour du puits. Nous recommandons le nettoyage de ces puits de 15 à 20 m autour des puits et des traitements bactériologiques avant d'utiliser ces eaux à la consommation humaine et à l'assainissement.

Mots-clés: Eaux de puits, Organoleptique, Physicochimiques, Bactériologiques, Antsiranana.

ABSTRACT

Introduction: Planet Earth is a place where water predominates. There are four sources of raw water: rainwater, surface water, groundwater and sea water. **Background:** The World Health Organisation estimates that 80% of the diseases affecting the world's population are directly linked to water. It is also estimated that polluted water is responsible for 50% of infant mortality. **Objective:** This research is part of a study into the potability or otherwise of groundwater in Antsiranana, in particular the Lazaret Nord well and the Ambalavola well. It also aims to provide treatment recommendations if necessary. **Methods:** After studying the general appearance and physico-chemical parameters of raw water from wells at Lazaret Nord and Ambalavola, we compared it with Malagasy standards for the potability of water for human consumption in accordance with decree no. 2004-635 of 15/06/04. **Results :** The results of the physico-chemical parameters obtained according to measurements and analyses carried out on these two raw waters showed that the high concentration of organic matter, the increase in the temperature of two waters and that of the turbidity of the water of well 2 (well of Ambalavola) can impact on the quality of these waters. Thus, compared to the Malagasy standard of drinking water, the other parameters keep the preferable value. Both waters have a strong microbiological contamination of fecal origin. This implies that most of the parameters present a very high rate in both waters. In addition, there are some parameters that have values that cannot be counted (very abundant) such as total coliforms and intestinal Enterococci next to well 2. Although the bacteriological parameters do not meet the Malagasy drinking water standard. Nevertheless, the treated waters therefore confirm a good quality. **Conclusion:** It has been noted that the level of organic substance exceeds that of the water drinking water standards. Referring to the physico-chemical parameters of Malagasy and World Health Organization standards from the quality of drinking water to human consumption, the quality of these waters is acceptable. But the level of organic substances and bacteriological parameters exceeds the standards of drinkability; this may be the effect of organic substances previously leaked deep down, or the unsanitary conditions around the well. We recommend the cleaning of these wells of 15 to 20 m around the wells and bacteriological treatments before using this water for human consumption and sanitation.

Key words: waters of wells, organoleptic, physico-chemistry, bacteriology, treatment, Antsiranana.

1. INTRODUCTION

L'eau constitue un élément vital pour l'ensemble des écosystèmes terrestres, représentant 60 à 70% de la masse corporelle chez l'adulte humain et atteignant des proportions variables chez les autres organismes vivants selon leur physiologie (Popkin et al. 2010) [1]. La qualité de l'eau potable demeure un enjeu majeur de santé publique à l'échelle mondiale. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les maladies d'origine hydrique affectent annuellement des millions de personnes, particulièrement dans les régions où l'accès à l'eau potable et à l'assainissement reste limité OMS (2019) [2].

Les contaminants présents dans les ressources hydriques peuvent être de nature microbiologique (bactéries, virus, parasites), chimique (métaux lourds, pesticides, composés organiques) ou physique (turbidité, particules en suspension) (Shannon et al. 2008) [3]. Ces polluants représentent des risques sanitaires différenciés selon leurs concentrations et leurs interactions, nécessitant des approches de traitement adaptées. Les technologies actuelles de traitement de l'eau offrent un large éventail de solutions, allant des procédés conventionnels (coagulation-floculation, filtration, désinfection) aux technologies avancées (osmose inverse, adsorption sur charbon actif, procédés d'oxydation avancée) (Gheraout et Elboughdiri, 2020) [4]. Cependant, l'efficacité de ces traitements dépend étroitement de la caractérisation préalable de la qualité de l'eau brute et de l'optimisation des paramètres opérationnels.

2. MATERIELS AND METHODES

2.1 Zone d'études

La zone d'étude concerne la ville d'Antsiranana (Diego-Suarez), située à l'extrême nord de Madagascar. Cette agglomération portuaire constitue le troisième port de la Grande Île et représente une capitale régionale stratégique ouverte sur l'océan Indien. Antsiranana se distingue par son caractère cosmopolite, avec 90% de sa population composée d'immigrés, ce qui en fait l'une des villes les plus diversifiées de Madagascar. La province présente une dualité socio-économique, amalgamant des populations traditionnelles et d'autres orientées vers l'économie de marché. Cette localisation géographique privilégiée sur Madagascar, quatrième île mondiale par sa superficie de 587 000 km², fait d'Antsiranana un site d'étude pertinent pour l'analyse qualitative des eaux de puits, particulièrement dans les quartiers de Lazaret Nord et Ambalavola.



Figure 1 : Carte de la zone d'étude – ville d'Antsiranana (Diego-Suarez).

2.2 Instrumentation et réactifs

L'analyse physicochimique a été réalisée à l'aide d'un ensemble d'équipements de laboratoire comprenant un colorimètre, un pH-mètre et un conductimètre pour les mesures instrumentales, complétés par un agitateur magnétique équipé de barreaux magnétiques et d'une résistance chauffante. La verrerie utilisée comprenait des béchers de 200 mL, des pipettes graduées de 10 mL et des flacons de prélèvement stérilisés.

Les réactifs employés pour les analyses chimiques incluaient les solutions titrantes suivantes : nitrate d'argent 0,1 N, sel de Mohr à 5 g/L, permanganate de potassium N/80, et EDTA N/50. Les réactifs colorimétriques comprenaient le bichromate de potassium, le dithionite, la diméthyl dioxine, le cyanurate d'ammonium et le salicylate d'ammonium. Les indicateurs et solutions tampons utilisés étaient l'hélianthine, la phénolphthaléine, le NET (Noir Ériochrome T), le Patton Reeder et une solution tampon pour la dureté totale (TH).

2.3 Sites d'échantillonnage et caractéristiques des ouvrages

Les échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans deux puits distincts situés dans la ville d'Antsiranana : le puits n°1, d'une profondeur de 15 mètres, localisé dans le quartier Lazaret-Nord, et le puits n°2, d'une profondeur de 6 mètres, implanté dans le quartier Ambalavola. Les prélèvements ont été effectués en saison des pluies, respectivement à 05h50 et 06h35, afin de caractériser la qualité de l'eau souterraine brute dans ces secteurs urbains.

2.4 Protocole de prélèvement

Le protocole de prélèvement a été standardisé selon les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé pour l'échantillonnage des eaux souterraines. Les contenants en polyéthylène de 1,5 L ont été préalablement rincés trois fois avec l'eau à analyser afin d'éliminer toute contamination résiduelle. Le prélèvement a été réalisé à l'aide d'un seau stérilisé relié à une corde en matière plastique, permettant d'atteindre la colonne d'eau sans contamination croisée. Les échantillons ont été conditionnés en remplissant complètement les flacons sans espace de tête, puis hermétiquement fermés pour prévenir les échanges gazeux et les modifications de composition chimique durant le transport vers le laboratoire.

2.5 Étude colorimétrique

Méthode colorimétrique	Réactifs	Détecteur
Ammonium	Salicylate et cyanurate d'ammonium	Colorimètre
Nitrite	Gélule de nitrite phénol ammoniac	Colorimètre
Nitrate	NaOH; H ₂ SO ₄ ; Salicylate de sodium	Colorimètre

2.1. Analyses physicochimiques

Les mesures doivent être relatives au principe du pont Wheatstone ; l'appareil de mesure est le conductimètre (SALAMI ISSOUF 2017) [5]. Mesure de la température, conductivité et minéralisation globale. Rincer avec l'eau distillée la verrerie d'une façon strictement propre avant de l'utiliser, rincer la cellule du conductimètre avec l'eau distillée avant de la plonger dans le récipient contenant l'échantillon d'eau. Après 1 ou 2 minutes environ, la conductivité en (μS/cm), la minéralisation globale en mg/L) et la température en (°C) s'affichent sur l'écran.

2.1.1. Mesure du pH : La méthode potentiométrique utilise un pH-mètre qui comprend une électrode de mesure du pH, une électrode de référence (électrode en verre), un voltmètre à haute précision et un appareil de compensation de la température <http://WWW.Guidelines/canadien/drinking/water/quality//technical/document/ph/fra.pdf> (Consulté 28/02/2019) [6]. On étalonne l'appareil avec des solutions tampons pH=4 ou pH=7 et pH=9 en rinçant l'électrode en verre après l'étalonnage. On prélève 100 ml d'eau brute à analyser dans un bécher, puis on agite lentement. On porte l'échantillon au pH-mètre puis on compare sa couleur avec celle de l'appareil.

2.1.2. Mesure de la turbidité : La turbidité est mesurée par néphélométrie mesurant dispersion de la lumière par les particules en suspension de l'échantillon par rapport à l'intensité de la lumière dispersée dans les mêmes conditions par des particules en suspension standard de formazine (ou effet de Tyndall) (HEBERT,S.et S. LEGARE, 2000) [7]. On étalonne le turbidimètre avec l'eau distillée. On verse l'échantillon d'eau brute à étudier dans un récipient bien propre et on le met dans le turbidimètre. La valeur en NTU de la turbidité s'affiche.

2.1.3. Mesure de la TH : La dureté de l'eau est mesurée en calculant la quantité des ions solubles dans cette dernière, les cations (Ca²⁺) et (Mg²⁺) étant les plus abondants. Ils sont compris entre 12 et 15°F. Pour la consommation humaine le TH de l'eau doit avoir 15°F Une eau est dite entartrant quand son TH est supérieur à 15°F. La détermination de TH et TH Ca est effectuée par une méthode de dosage volumétrique d'une solution.

Prélevons 100 ml d'eau à analyser, versons 2 ml d'une solution tampon. Ajoutons 7 gouttes de NET et titrons la solution avec l'EDTA N/50 en agitant avec le barreau magnétique jusqu'au virage légèrement bleu. La dureté totale (TH) est égale à V en ml d'EDTA neutralisé pendant le dosage volumétrique exprimée en degré français (°F).

2.1.4. Résultats du TH Ca : Prélevons 100 ml d'eau à analyser versons 2 ml d'hydroxyde de sodium (NaOH) ; puis ajoutons du Patton Reeder. Titrons la solution obtenue avec l'EDTA en agitant avec le barreau magnétique jusqu'au virage en bleu intense. La dureté calcique TH Ca est égale à V en ml d'EDTA neutralisé pendant le dosage volumétrique exprimée en degré français (°F). La dureté magnésienne est égale à TH – TH Ca.

2.1.5 Résultats du fer total : Le test des traces de fer dans un échantillon d'eau est fait avec des réactifs tels que dithionite, diméthyle dioxine et ammoniac sous forme d'une solution tampon. Le phénomène est vérifié par l'apparition de coloration violette (ou rouge claire). Prélever 100 ml d'eau à analyser, verser le dithionite de sodium, ajouter 2 ml de diméthyle dioxine 2 ml d'ammoniac, Le résultat est exprimé en mg/L. La plaquette de fer est un instrument de lecture de concentration en comparant la couleur. Aucune trace de fer.

2.1.6 Dosage d'ammonium : On utilise les salicylates et cyanurates d'ammonium dans un milieu alcalin comme catalyseur. La présence d'ions ammonium (NH_4^+) est exprimé mg/L sous l'action de d'hypochlorite de calcium et de phénol entraînant l'apparition de coloration bleue du dosage colorimétrique. Prélever 20 ml d'eau à analyser ; ajouter un sachet de salicylate et cyanurates d'ammonium à chacun ; laisser se reposer pendant 10 min environ la solution, ensuite ajouter 3 ml de solution d'hypochlorite de calcium. Laisser se reposer pendant 10 min, la concentration d'ammonium exprimée en mg/L est indiquée par un colorimètre.

2.1.7 Dosage de chlorure

En milieu neutre, les ions chlorures (Cl^-) sont dosés par une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) titrée en présence de chromate de potassium (K_2CrO_4) et du sel de Mohr. La réaction se termine par l'obtention de couleur de teinte rougeâtre qui indique l'existence de chromate d'argent. Préparer 100 ml d'eau à analyser ; ajouter 4 gouttes de K_2CrO_4 de concentration 0,1N puis agiter en permanence la solution par un barreau magnétique. Verser une solution de AgNO_3 jusqu'à l'obtention de teinte rougeâtre, qui s'éternise pendant 2 à 3 min.

2.1.8 Dosage des matières organiques

Le dosage de matières organiques doit se faire en milieu acide. En effet, la réduction du permanganate de potassium (KMnO_4) par diverses matières organiques en minéraux qui sont contenues dans l'eau se fait en présence d'oxygène. On chauffe l'échantillon à une température plus ou moins élevée pour démarrer la réaction.

Préparer 100 ml d'échantillon d'eau ; verser 5 ml de bichromate de sodium. Chauffer la solution sur une résistance pendant environ 10 min ; après ajouter 10 ml de permanganate de potassium et on refroidit la solution pendant environ 10 min. Verser 5 ml d'acide sulfurique, puis on refroidit la solution pendant environ 6 min. Verser 10 ml de sel de Mohr ; enfin, titrer la solution avec du permanganate de potassium jusqu'au virage rose clair

2.1.9 Dosage de nitrites

Les ions nitrites (NO_2^-) se présentent comme un complexe jaune sous l'influence de phénol et d'ion ammonium en milieu acide (acide chlorhydrique). La méthode colorimétrique sert à mesurer le complexe jaune par un spectrophotomètre. Préparer 50 ml d'échantillon d'eau ; verser 2 ml de phénol, puis 2 ml d'ammoniac. Laisse la solution pendant environ 12 min ; lire sur un spectrophotomètre la concentration de NO_2^- en mg/L avec le code Ni 16.

2.1.10 Dosage de nitrate : Le dosage de nitrates dans l'eau a été réalisé par usage du salicylate de sodium, les ions nitrates forment le paranitro-salicylate de sodium à teinte jaunâtre. Ensuite, on utilise le spectrophotomètre pour avoir le résultat de dosage colorimétrique. Prélever 10 ml d'eau à analyser ; verser 1 ml de salicylate de sodium et quelques gouttes de soude. Chauffer à 100 °C la solution puis laisser refroidir et ajouter 2 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4). Au bout de 10 min, ajouter 12 ml d'eau distillée. Lire le résultat avec le spectrophotomètre, suivant le code Ni 16 exprimé en mg/L.

2.1.11 Mesure d'alcalinité de l'eau : L'alcalinité de l'eau a été déterminée par titrimétrie acido-basique à l'aide de deux indicateurs colorés, conformément aux méthodes standards d'analyse physico-chimique de l'eau. Elle permet de quantifier les espèces basiques dissoutes, principalement les ions hydroxydes (OH^-), carbonates (CO_3^{2-}) et hydrogénocarbonates (HCO_3^-).

Deux paramètres ont été évalués :

- *Alcalinité à la phénolphthaléine (TA) :* elle correspond à la concentration en ions hydroxydes (OH^-) et carbonates (CO_3^{2-}).
- *Alcalinité totale (TAC) :* elle représente la somme des concentrations en OH^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- .

La méthode repose sur la neutralisation des bases par un acide fort, ici l'acide sulfurique (H_2SO_4) de concentration connue, jusqu'à un changement de couleur de l'indicateur correspondant au point d'équivalence.

Dosage du TA (Alcalinité à la phénolphtaléine) :

- Prélever 100 mL d'échantillon d'eau à analyser.
- Ajouter 4 gouttes de phénolphtaléine (ou de rouge de phénol) en tant qu'indicateur.
- Titrer avec une solution d'acide sulfurique standardisée (généralement 0,02 N), en agitant continuellement, jusqu'à disparition complète de la teinte rosée (solution devenue incolore). Le volume d'acide utilisé correspond au TA.

Dosage du TAC (Alcalinité totale) :

- À un autre échantillon de 100 mL d'eau, ajouter 3 gouttes d'hélianthine (methyl orange).
- Poursuivre le titrage avec la même solution d'acide sulfurique, en agitant jusqu'à apparition d'une coloration rosée. Le volume total d'acide utilisé depuis le début du titrage jusqu'à ce second point d'équivalence correspond au TAC.

Les volumes d'acide sulfurique consommés (en mL), notés V_{TA} et V_{TAC} , permettent de calculer l'alcalinité exprimée en degrés français ($^{\circ}\text{F}$), selon la relation :

$$\text{Alcalinité } (^{\circ}\text{F}) = V \times f (^{\circ}\text{F}) \quad (1)$$

où

f est un facteur de conversion en fonction de la normalité de l'acide utilisé (1 mL d' H_2SO_4 0,02 N $\approx$ 1 $^{\circ}\text{F}$ pour 100 mL d'échantillon).

2.2. Analyses bactériologiques

Après la stérilisation du matériel et des flacons de recherche, prélevons 100 ml d'eau contenant de thiosulfate ; ajoutons le contenu d'un sachet de réactif fourni. Fermons le flacon et ajoutons la solution jusqu'à la dissolution des réactifs. Gardons le flacon à 37°C pendant 24h à 48h, et à 44°C pendant 24h à 28h et à 28°C pendant 96 heures. Ce travail de recherche se focalise sur les paramètres tels que : entérocoques intestinaux en utilisant la gélose Sanetz Bartley (ISO7899-2, Août 2000), coliformes totaux, coliformes fécaux, germes totaux, Clostridium sulfito-réducteurs.

Pour le dénombrement d'entérocoques intestinaux, on stérilise l'entonnoir gradué en acier inoxydable ainsi que la membrane poreuse. Refroidir immédiatement avec l'eau à analyser. Déposer ensuite aseptiquement 100 ml d'eau à analyser, et placer la membrane filtrante sur gélose Sanetz et Bartley préalablement préparée. Cette dernière sera incubée couvercle en bas à 37°C pendant 48 h.

2.2.1 Dénombrement des bactéries coliformes totaux : Pour la recherche des coliformes totaux, la technique est la méthode par filtration sur une membrane dont le milieu utilisé est le M-endo selon (NF 08-060).

Mettre soigneusement un carton absorbant dans une boîte de Pétri, et mettre 1,8 ml de milieu de culture sur le carton absorbant et recouvrir la plaque. Placer le filtre à membrane dans le porte-filtre avec la pince précédemment flambée et refroidie, et ajouter le flacon contenant l'échantillon au moins 25 fois. Déboucher et flamber le goulot de la bouteille, verser soigneusement 100 ml d'échantillon dans la porte filtre en évitant que l'eau n'éclabousse les bords supérieurs.

Allumer la pompe à vide et aspirer, laver trois fois les parois de l'entonnoir avec de l'eau de dilution stérile à hauteur de 20 ml à chaque fois en appliquant le vide. Enlever le vide et retirer l'entonnoir du support, retirer le porte-filtre du support et le mettre dans une boîte de Pétri préparée au préalable, avec le coté quadrillé vers le haut à l'aide d'une pince flambée et refroidie. Fermer la bouteille de Pétri et l'incuber à 37 °C pendant 24 heures. Après la période d'incubation, on a examiné le filtre et effectuer le comptage des colonies.

2.2.2 Recherche et dénombrement des bactéries coliformes fécaux : Nous utilisons la méthode par filtration sur une membrane qui est fait en deux tests : le test présomptif sur gélose TTC-Tertigol et le test confirmatif sur gélose TSA selon (ISO 9308-1, Septembre 2000).

Pour ce faire, stérilisons d'abord l'entonnoir gradué en acier inoxydable ainsi que la membrane poreuse à l'aide d'un bec bunsen. Les refroidir tout de suite après, avec l'eau à analyser ; mettre en place de façon aseptique une membrane de porosité de 0,45 μ entre la membrane poreuse et l'entonnoir à l'aide d'une pincette stérilisée.

Déposer ensuite aseptiquement 100 ml d'eau à analyser et placer la membrane filtrante sur gélose TTC-Tertigol préalablement préparée. Cette dernière sera incubée couvercle en bas à 44°C pendant 24 heures.

2.2.3 Recherche et dénombrement de germes totaux (milieu Nutrient Agar) : Ce dénombrement a été effectué avec la méthode par filtration sur membranes. L'échantion d'eau est filtré sur une membrane stérile qui sera ensuite déposée sur la gélose spécifique à cette détermination. L'opération commence par le prélèvement de 10 ml d'eaux et les filtrer sur des membranes de porosité 0,45 µm ; les filtres sont ensuite déposées dans les boîtes de pétri contenant le milieu Nutrient Agar. Les boîtes sont incubées à 28°C pour une durée de 96 heures ; après 4 jours d'incubation, on dénombre toutes les colonies présentes dans la boîte de Pétri.

2.2.4 Dénombrement des Clostridiiums sulfito-réducteurs : Pour le dénombrement des sulfito-réducteurs (ASR) s'effectue en utilisant la méthode par incorporation en gélose viande foie (VF) selon (NF 90-415). L'opération commence par chauffage et refroidissement immédiat de flacon d'analyse, sous l'eau de robinet. Répartir ensuite le contenu de ces tubes, dans quatre tubes stérilisés différents à raison de 5 ml par tube. Ajouter environ 18 à 20 ml de gélose viande foie, fondue puis refroidie à 45 °C additionnée de leurs additifs spécifiques. Mélanger doucement le milieu et l'inoculum en évitant d'introduire des bulles d'air et d'oxygène. Laisser se solidifier sur paillasse pendant 30 minutes environ, puis incuber à 37°C pendant 24 heures.

3. RÉSULTATS

3.1. Analyses physicochimiques

Tableau 1 : Résultats récapitulatifs des analyses physico-chimiques des 2 eaux de puits.

Paramètres	Puits 1	Puits 2	Norme par l'OMS
Organoleptiques	Couleur	Incolore	Incolore
	Aspect	Claire	Limpide
	Odeur	Absente	Absent
Physiques	Température (°C)	27,1	25
	Conductivité (µS/cm)	454	<3000
	Minéralisation globale (mg/L)	344,379	465,746
	Turbidité (UTN)	1	<5
	TH (°F)	7,2	<50
	TH Ca (°F)	8,7	4,8
	Ph	7	6,5-9
Chimiques	Fer total (mg/L)	-	<0,5
	Ammonium (mg/L)	0,08	<0,5
	Chlorure (mg/L)	74,55	<250
	Matières organiques (mg/L)	6	<1
	Nitrites (mg/L)	00	<2
	Nitrates (mg/L)	2	<50

1°f de TA= 4,5 mg/L de carbonate 1°f de TAC = 12,2 mg/L de bicarbonate.

• Caractéristiques organoleptiques

Les deux échantillons présentent des propriétés organoleptiques conformes aux standards de potabilité. Aucune coloration n'a été détectée, les deux eaux étant parfaitement incolores. L'aspect visuel révèle une eau claire pour les deux puits, répondant à l'exigence de limpidité. L'absence totale d'odeur caractéristique confirme l'absence de contamination organoleptique apparente.

• Paramètres physiques

La température mesurée in situ montre des valeurs légèrement supérieures à la norme recommandée de 25°C, avec 27,1°C pour le Puits 1 et 27,5°C pour le Puits 2, reflétant probablement les conditions climatiques locales.

La conductivité électrique révèle une différence notable entre les deux sources : 454 µS/cm pour le Puits 1 contre 614 µS/cm pour le Puits 2. Cette variation de 35% indique une minéralisation plus importante du Puits 2, confirmée par les valeurs de minéralisation globale (344,379 mg/L vs 465,746 mg/L respectivement). Néanmoins, les deux valeurs restent largement inférieures au seuil maximal de 3000 µS/cm.

La turbidité présente une disparité significative : le Puits 1 affiche une excellente clarté avec 1 UTN, tandis que le Puits 2 montre 9 UTN, dépassant légèrement la norme OMS de 5 UTN, suggérant une possible présence de particules en suspension.

• Dureté et équilibre calco-carbonique

L'analyse de la dureté totale (TH) révèle des eaux relativement douces : 7,2°F pour le Puits 1 et 4,1°F pour le Puits 2, bien en deçà du seuil de 50°F. La dureté calcique (TH Ca) suit la même tendance avec 8,7°F et 4,8°F respectivement, indiquant une prédominance des ions calcium dans la composition minérale. Le pH présente des valeurs légèrement différentes : 7,0 (neutre) pour le Puits 1 et 6,6 (légèrement acide) pour le Puits 2, toutes deux conformes à la fourchette recommandée de 6,5 à 9,0.

• **Composition chimique**

L'analyse des chlorures montre une concentration de 74,55 mg/L pour le Puits 1 et 124,25 mg/L pour le Puits 2, soit une augmentation de 67%. Malgré cette différence, les deux valeurs restent conformes à la limite de 250 mg/L.

La teneur en matières organiques est préoccupante pour les deux sources (6,0 et 6,1 mg/L), dépassant significativement la norme de 1 mg/L, suggérant une possible contamination organique d'origine anthropique ou naturelle.

L'ammonium présente des concentrations identiques et acceptables (0,08 mg/L) pour les deux puits. Les nitrites sont absents du Puits 1 et faiblement détectés dans le Puits 2 (0,063 mg/L). Les nitrates restent à des niveaux très bas (2,0 et 2,7 mg/L) comparés à la limite de 50 mg/L.

• **Analyses bactériologiques**

Tableau 2 : Résultat récapitulatifs d'analyse bactériologique des eaux de puits.

	Paramètres	Puits 1	Puits 2	Norme par l'OMS
Organoleptiques	Couleur	Incolore	Incolore	Incolore
	Aspect	Clair	Clair	Limpide
	Odeur	Absente	Absente	Absente
Bactériologiques	Entérocoques intestinaux	150	Incomptable	0
	Coliformes totaux (ufc/ml)	37	Incomptable	0
	Coliformes fécaux (ufc/ml)	9	22	0
	Germes totaux	219	Incomptable	
	Clostridium sulfito-réducteurs (ufc/ml)	2>	2>	<2

OMS : Organisation mondiale de la santé.

On a remarqué que les qualités physico-chimiques de ces deux eaux souterraines sont acceptables car les paramètres physico-chimiques respectent les normes Malagasy et l'OMS. Le taux de substances organiques et les paramètres bactériologiques dépassent les normes de potabilité, ceci peut être causé par des substances organiques enfuies antérieurement en profondeur ou l'insalubrité autour du puits.

• **Résultats de traitements bactériologiques de deux eaux de puits**

Après les analyses physicochimiques et bactériologique on a conclu que le traitement bactériologique est incontournable sur les deux eaux avant de les utiliser à la consommation humaine et à l'assainissement. Voici donc les résultats de traitement de deux eaux de puits avec de sûr eau (ou solution d'hypochlorite de sodium).

Tableau 3 : Résultats récapitulatifs de traitements bactériologiques d'eaux des puits.

Recherche et dénombrement	Puits 1	Puits 2	Norme par l'OMS
Entérocoques intestinaux (UFC/100 ml)	0	2	0
Coliformes totaux (UFC/100 ml)	0	1	0
Coliformes fécaux (UFC/100 ml)	0	0	0
Germes totaux (UFC/100 ml)	0	1	0
Clostridium sulfito-réducteurs (UFC/20 ml)	<1	<1	<2

Suivant le décret n° 2004 – 635 MEM du 15- 06- 2004 relatif à la norme nationale d'eau potable, et la norme OMS, on peut utiliser les deux eaux de puits à la consommation humaine et l'assainissement après traitement bactériologique.

L'eau est un élément indispensable à la vie des êtres humains. On estime que 80% des maladies qui affectent la population mondiale sont d'origine hydrique. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux qualités physico-chimiques de ces deux eaux de puits. Les résultats montrent que la plupart des paramètres enregistrés ont une concentration normale, malgré le dépassement de certaines valeurs. D'autre part, on a des éléments chimiques presque absents comme, le fer, les nitrites, pour Lazaret Nord et l'ammonium également. Mais le taux de substances organiques et les paramètres bactériologiques dépassent les normes de potabilité, ceci peut être causé par des substances organiques enfuies antérieurement en profondeur, ou la saleté autour du puits. Nous recommandons le nettoyage de la saleté sur 15 à 20 m autour des puits et les traitements bactériologiques avant d'utiliser ces eaux à la consommation

humaine et à l'assainissement.

4. DISCUSSION

• *Qualité physico-chimique des eaux souterraines*

Les analyses physico-chimiques révèlent une qualité globalement acceptable des deux sources d'eau souterraine étudiées, avec toutefois des variations significatives entre les puits. La conductivité électrique du Puits 2 (614 $\mu\text{S}/\text{cm}$) comparée à celle du Puits 1 (454 $\mu\text{S}/\text{cm}$) suggère une différence notable de minéralisation, probablement liée à la géologie locale et aux interactions eau-roche spécifiques à chaque aquifère (Appelo & Postma, 2005) [8]. Cette variabilité spatiale de la minéralisation dans les eaux souterraines est fréquemment observée dans les systèmes aquifères hétérogènes (Freeze & Cherry, 1979) [9].

La turbidité élevée du Puits 2 (9 UTN) par rapport au Puits 1 (1 UTN) constitue un indicateur critique de la qualité de l'eau. Selon l'OMS, une turbidité supérieure à 5 UTN peut masquer l'efficacité de la désinfection et favoriser la croissance microbienne (WHO, 2017) [10]. Cette différence pourrait résulter d'une infiltration de particules fines ou d'une connexion hydraulique avec des zones moins consolidées de l'aquifère (Domenico & Schwartz, 1998) [11]. Les températures mesurées (27,1°C et 27,5°C) dépassent légèrement la recommandation de 25°C, ce qui est cohérent avec les conditions climatiques tropicales de Madagascar. Ces températures élevées peuvent influencer la solubilité des gaz dissous et favoriser le développement microbien (Tchobanoglous et al., 2003) [12].

• *Contamination organique et implications sanitaires*

La concentration en matières organiques (6,0-6,1 mg/L) dépasse significativement la norme OMS de 1 mg/L dans les deux puits. Cette contamination organique peut provenir de sources multiples : infiltration d'eaux de surface, lessivage de sols riches en matière organique, ou contamination anthropique (Rivett et al., 2002) [13]. Les matières organiques constituent un substrat nutritif pour les micro-organismes et peuvent générer des sous-produits de désinfection lors du traitement au chlore (Richardson et al., 2007) [14].

L'absence de nitrites dans le Puits 1 et leur faible concentration dans le Puits 2 (0,063 mg/L), associées aux faibles teneurs en nitrates (2,0-2,7 mg/L), suggèrent une contamination azotée limitée. Cette situation contraste avec de nombreuses études sur les eaux souterraines en zone périurbaine où les nitrates constituent souvent le principal polluant (Spalding & Exner, 1993) [15].

• *Contamination bactériologique : enjeux et origines*

Les résultats bactériologiques révèlent une contamination fécale sévère des deux sources, avec des concentrations d'entérocoques intestinaux, de coliformes totaux et fécaux largement supérieures aux normes de potabilité. Cette contamination est particulièrement critique pour le Puits 2, présentant des concentrations "incomptables" pour plusieurs paramètres microbiens. La présence simultanée d'entérocoques intestinaux et de coliformes fécaux confirme une contamination d'origine fécale récente (Leclerc et al., 2001) [16]. Les entérocoques, reconnus comme indicateurs plus persistants que les coliformes dans l'environnement, suggèrent une contamination chronique (Figueras & Borrego, 2010) [17]. La détection de *Clostridium sulfito-réducteurs*, spores résistantes pouvant persister plusieurs mois dans l'environnement, indique une contamination fécale ancienne (Bisson & Cabelli, 1980) [18].

Cette contamination microbienne massive peut résulter de plusieurs facteurs : défaillances du système d'assainissement local, infiltration d'eaux de ruissellement contaminées, ou contamination croisée due à une protection insuffisante des têtes de puits (Ground Water Foundation, 2007) [19]. L'urbanisation croissante et l'augmentation de la densité démographique autour des points d'eau constituent des facteurs aggravants bien documentés (Howard et al., 2003) [20].

• *Efficacité du traitement par hypochlorite de sodium*

Le traitement par hypochlorite de sodium s'est révélé efficace pour réduire significativement la charge microbienne des deux eaux. La quasi-élimination des indicateurs bactériens après traitement (Tableau 3) confirme l'efficacité de cette méthode de désinfection, largement documentée dans la littérature (LeChevallier & Au, 2004) [21]. Cependant, la persistance résiduelle de quelques micro-organismes dans le Puits 2 après traitement pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs : charge microbienne initiale très élevée, interférence des matières organiques avec l'action du chlore, ou formation de biofilms protecteurs (LeChevallier et al., 1988) [22]. L'optimisation du dosage et du temps de contact pourrait améliorer l'efficacité du traitement.

• *Implications pour la gestion des ressources en eau*

Les résultats soulignent la vulnérabilité des eaux souterraines périurbaines à Madagascar face aux pressions

anthropiques. La coexistence d'une qualité physico-chimique acceptable et d'une contamination microbienne sévère illustre la complexité de la gestion de la qualité de l'eau dans les contextes de développement urbain rapide (Cronin et al., 2006) [23]. Les recommandations d'établir un périmètre de protection de 15-20 mètres autour des puits s'alignent avec les pratiques internationales de protection des captages (EPA, 1991) [24]. Cependant, l'efficacité de ces mesures dépendra de leur mise en œuvre effective et de la surveillance continue de la qualité de l'eau.

Limites de l'étude et perspectives

Cette étude présente certaines limitations : absence de données sur la variabilité temporelle de la qualité de l'eau, caractérisation limitée des sources de contamination, et évaluation restreinte de l'efficacité du traitement. Des études complémentaires incluant un suivi saisonnier, une caractérisation hydrogéologique détaillée, et une évaluation économique des solutions de traitement seraient nécessaires pour optimiser la gestion de ces ressources hydriques.

5. CONCLUSION

Cette étude comparative de la qualité des eaux de deux puits périurbains de Madagascar révèle une situation contrastée caractéristique des ressources hydriques souterraines en contexte de développement urbain rapide. Les analyses physico-chimiques démontrent une qualité globalement conforme aux normes internationales, avec des paramètres de minéralisation, de pH et de composition chimique majoritairement acceptables pour la consommation humaine. Cependant, l'analyse bactériologique révèle une contamination microbienne massive et généralisée, avec des concentrations d'indicateurs fécaux largement supérieures aux seuils de potabilité. Cette contamination, particulièrement critique pour le Puits 2, témoigne d'une vulnérabilité importante des aquifères face aux pressions anthropiques locales et souligne les défis sanitaires associés à l'approvisionnement en eau potable dans les zones périurbaines. L'efficacité démontrée du traitement par hypochlorite de sodium offre une solution technique viable pour la désinfection de ces eaux, permettant d'atteindre les standards de potabilité requis. Néanmoins, cette approche curative doit impérativement être complétée par des mesures préventives de protection des captages et d'amélioration de l'assainissement local.

Les résultats soulignent l'urgence d'une approche intégrée de gestion des ressources en eau combinant : (i) la mise en place de périmètres de protection autour des captages, (ii) l'amélioration des systèmes d'assainissement, (iii) la surveillance continue de la qualité de l'eau, et (iv) la sensibilisation des populations aux bonnes pratiques d'hygiène. Cette étude contribue à la compréhension des enjeux de qualité des eaux souterraines en contexte tropical et périurbain, et fournit des éléments techniques pour l'élaboration de stratégies de gestion durable des ressources hydriques locales. Les méthodologies d'analyse et de traitement développées peuvent être transposées à d'autres contextes similaires dans la région de l'Océan Indien occidental.

Des recherches complémentaires intégrant une approche hydrogéologique détaillée, un suivi temporel de la qualité de l'eau, et une évaluation socio-économique des solutions de traitement permettraient d'optimiser les stratégies de gestion et de protection de ces ressources hydriques essentielles.

Recommandation : Suivant les résultats obtenus, les deux eaux de puits ne sont pas potables. Des traitements sont incontournables pour avoir l'eau de bonne qualité. Face à ces problèmes, nous proposons des solutions techniques simples mais efficaces :

- Il faut sensibiliser les bénéficiaires des eaux des deux puits dans les quartiers sur l'insalubrité d'eaux de leurs puits ;
- Il faut les traiter avant d'utiliser en employant des désinfectants ;
- Ebullition : fait bouillir l'eau de puits 15 à 20mn jusqu'à l'ébullition pour éliminer les germes bactériennes.
- Utilisation de sûr eau (ou solution d'hypochlorite de sodium) : Une dose réglementaire de cette solution élimine les germes bactériens ;
- Utilisation des rayons solaires : mettre l'eau dans une bouteille ou verre plastique transparent à la lumière solaire pendant 6 heures environ. Les rayons ultra-violets venant du soleil éliminent les germes pathogènes vivant dans les eaux.
- Finalement, il faut sensibiliser également les bénéficiaires des puits à nettoyer les alentours des puits et réduire l'activité humaines (construction de WC ou latrine) 15 à 20 mètres autour du puits.

6. REFERENCES

- [1] Popkin, B. M., D'Anci, K. E., & Rosenberg, I. H. (2010). Water, hydration, and health. *Nutrition Reviews*, 68(8), 439-458.
- [2] World Health Organization. (2019). *Water, sanitation, hygiene and health: a primer for health professionals*. Geneva: World Health Organization.
- [3] Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310.
- [4] Ghernaout, D., & Elboughdiri, N. (2020). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: Facts and future trends. *Open Access Library Journal*, 7(3), 1-37.
- [5] SALAMI ISSOUF. (2017) Livre de memoire de la fin d'étude en vue d'obtention du Diplôme Masters en Génie de Procédés et Chimie Appliquée Université d'Antsiana pages 57
- [6] <http://WWW.Guidelines/canadien/drinking/water/quality/technicol/document/ph/fra.pdf> (Consulté le 28/02/2019)

- [7] HEBERT, S. et S. LEGARE, 2000. Suivi de la qualité des rivières et petit cours d'eau
- [8] Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC Press.
- [9] Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- [10] WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. World Health Organization.
- [11] Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons.
- [12] Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGraw-Hill.
- [13] Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W., & Bemment, C. D. (2002). Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes. *Water Research*, 36(16), 4159-4169.
- [14] Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research. *Mutation Research*, 636(1-3), 178-242.
- [15] Spalding, R. F., & Exner, M. E. (1993). Occurrence of nitrate in groundwater—a review. *Journal of Environmental Quality*, 22(3), 392-402.
- [16] Leclerc, H., Mossel, D. A., Edberg, S. C., & Struijk, C. B. (2001). Advances in the bacteriology of the coliform group: their suitability as markers of microbial water safety. *Annual Review of Microbiology*, 55(1), 201-234.
- [17] Figueras, M. J., & Borrego, J. J. (2010). New perspectives in monitoring drinking water microbial quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(12), 4179-4202.
- [18] Bisson, J. W., & Cabelli, V. J. (1980). Clostridium perfringens as a water pollution indicator. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 52(2), 241-248.
- [19] Ground Water Foundation. (2007). *Wellhead protection*. The Groundwater Foundation.
- [20] Howard, G., Pedley, S., Barrett, M., Nalubega, M., & Johal, K. (2003). Risk factors contributing to microbiological
- [21] LeChevallier, M. W., & Au, K. K. (2004). *Water treatment and pathogen control: process efficiency in achieving safe drinking water*. IWA Publishing.
- [22] LeChevallier, M. W., Cawthon, C. D., & Lee, R. G. (1988). Factors promoting survival of bacteria in chlorinated water supplies. *Applied and Environmental Microbiology*, 54(3), 649-654.
- [23] Cronin, A. A., Breslin, N., Gibson, J., & Pedley, S. (2006). Monitoring source and domestic water quality in parallel with sanitary risk identification in Northern Mozambique to prioritise protection interventions. *Journal of Water and Health*, 4(3), 333-345.
- [24] EPA. (1991). *Wellhead protection: A guide for small communities*. United States Environmental Protection Agency.



How to cite this article: **Robert Tombosoa, Joël Basck Jao, Clement Lehimena, et Julio Hervé Andriamadio.** ANALYSES QUALITATIVES DES EAUX DE PUIITS : CAS DES QUARTIERS LAZARET NORD et AMBALAVOLA, ANTSIRANANA MADAGASCAR. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025; 25(6):16-26. DOI: 10.5281/zenodo.15578397

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>