

ÉVALUATION DE LA CONTAMINATION DE L'EAU DE SOURCE PAR DES POLLUANTS ENVIRONNEMENTAUX : CAS D'AMBOHIDRAMASY, QUARTIER AMBATO HARANANA, MADAGASCAR



ASSESSMENT OF CONTAMINATION OF SPRING WATER BY ENVIRONMENTAL POLLUTANTS: THE CASE OF AMBOHIDRAMASY, AMBATO HARANANA DISTRICT, MADAGASCAR

| Andry Harinaina, Rabearisoa ^{1*} | Nalinirina Tantely, Rabemiafara ¹ | Bertrand, Manjolongo ¹ | Sarobidy Placide, Randriamanantena ¹ | Viviane, Harinandrasana ¹ | Ravo Victoire, Nasolomampionona ¹ | Hajdrainy, Rabearisoa ¹ | Mbolanirina Mamisoa, Rabemiafara ¹ | Bruno, Razanamparany ² | Nasolo Sedravola, Randimbarison ³ | et | Lazanirina Henintsoa, Rabemiafara ⁴ |

¹ Université de Fianarantsoa | Ecole Normale Supérieure : Sciences et technologies | Fianarantsoa | Madagascar

² Université d'Antananarivo | Ingénierie en Sciences et Techniques de l'eau | laboratoire de Chimie de la faculté des sciences | Antananarivo | Madagascar |

³ Université de Fianarantsoa | Faculté des Lettres et Sciences Humaines | Fianarantsoa | Madagascar |

⁴ Rédacteur et consultant SEO expert en marketing digital | Tamatave | Madagascar |

| DOI: 10.5281/zenodo.10030574 | Received September 17, 2023 | Accepted October 20, 2023 | Published October 22, 2023 | ID Article | Satognon-Ref4-4-17ajiras181023 |

RESUME

Introduction : L'eau de source est une ressource naturelle en eau dont la source est considérée comme de l'eau douce, provenant bien entendu des eaux souterraines non contaminées. De plus, compte tenu du défi majeur que représente l'accès à l'eau potable pour la majorité des pays en développement, l'eau de source est considérée comme une aubaine en raison de son accès facile et de son faible besoin d'investissement. **Objectifs** : Des études ont été menées pour analyser les pollutions potentielles provenant de l'environnement et liées aux caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de l'eau de source en surface. À cette fin, vingt échantillons d'eau de source ont été collectés dans des bouteilles en plastique polyéthylène et transportés au laboratoire dans une glacière à une température de 6°C. **Méthodes** : Les échantillons collectés ont été analysés dans les laboratoires de chimie de la faculté des sciences et du Centre National de Recherches sur l'Environnement. Les paramètres tels que la température et le pH ont été mesurés in situ, tandis que d'autres paramètres tels que la conductivité électrique, les solides totaux dissous (TDS), la turbidité, la DBO5, les chlorures, les coliformes totaux (CT), ainsi que les streptocoques fécaux (SF), ont été évalués. Une analyse en composantes principales a également été réalisée à l'aide du logiciel SPSS version 23 dans le but de rechercher d'éventuelles corrélations. **Résultats** : Les résultats de l'analyse ont révélé que les eaux de source sont effectivement polluées par l'environnement. Elles présentent une acidité (pH = 5,3) due à l'acidité du sol résultant de la production de dioxyde de carbone lors de la décomposition des matières végétales. La turbidité (4,27 NTU), la DBO (1,02 mg/L) et la teneur en chlorure (67,93 mg/L) témoignent de la pollution chimique de l'eau, tandis que les niveaux de coliformes totaux (4ufc/100mL) et de streptocoques fécaux (8ufc/100mL) indiquent une pollution d'origine microbienne. **Conclusion** : Les eaux de source se révèlent polluées en raison des activités humaines telles que l'utilisation d'engrais chimiques dans les champs de culture, ainsi que des phénomènes naturels survenant lors de la période pluvieuse, notamment l'érosion des sols.

Mots-clés : Eau de source, pollution environnementale, physico-chimique, microbiologie, analyse multivariée.

ABSTRACT

Introduction: Springwater is a natural freshwater resource originating from uncontaminated underground sources. Moreover, given the significant challenge of accessing clean water in most developing countries, springwater is considered a blessing due to its easy accessibility and minimal investment requirements. **Objectives**: Studies have been conducted to analyze potential environmental pollutions related to the physico-chemical and bacteriological characteristics of surface springwater. To achieve this, twenty samples of springwater were collected in polyethylene plastic bottles and transported to the laboratory in a cooler at a temperature of 6°C. **Methods**: The collected samples were analyzed in the chemistry laboratories of the Faculty of Sciences and the National Center for Environmental Research. Parameters such as temperature and pH were measured in situ, while other parameters such as electrical conductivity, total dissolved solids (TDS), turbidity, BOD5, chlorides, total coliforms (TC), as well as fecal streptococci (FS), were assessed. Principal component analysis was also performed using SPSS version 23 to explore possible correlations. **Results**: The analysis results revealed that springwaters are indeed contaminated by the environment. They exhibit acidity (pH = 5.3) due to soil acidity resulting from the production of carbon dioxide during the decomposition of plant materials. Turbidity (4.27 NTU), BOD (1.02 mg/L), and chloride content (67.93 mg/L) indicate chemical pollution of the water, while levels of total coliforms (4 CFU/100mL) and fecal streptococci (8 CFU/100mL) indicate microbial pollution. **Conclusion**: Springwaters are found to be polluted due to human activities such as the use of chemical fertilizers in agricultural fields, as well as natural phenomena occurring during the rainy season, notably soil erosion.

Keywords : Source water, environmental pollution, physicochemical, microbiology, multivariate analysis.

1. INTRODUCTION

L'eau de source est une précieuse ressource naturelle, catégorisée comme de l'eau douce [1], dont l'origine est incontestablement une nappe d'eau souterraine non contaminée. L'accès à des sources d'eau douce, telles que l'eau de source, revêt une importance cruciale pour la survie humaine et constitue le fondement de toute forme de vie. Bien que certains organismes élémentaires puissent survivre sans air, aucun d'entre eux ne peut prospérer sans eau.

À Madagascar, l'accès à l'eau potable demeure un défi majeur pour le gouvernement, avec une situation particulièrement préoccupante. En moyenne, seulement 41 % de la population a accès à l'eau potable, à des services d'assainissement, et à des conditions d'hygiène adéquates [2]. En 2019, seuls 23 % de la population Malagasy auraient eu accès à cette ressource vitale [3]. Le manque d'accès à des sources d'eau potable contraint les habitants d'Ambohidramasy à consommer de l'eau de source souterraine située à proximité du Fokontany.

Cependant, cette ressource naturelle, localisée à proximité de zones de culture telles que les plantations de bananes et les rizières, est souvent exposée à une pollution provenant de déchets agricoles [4], tels que des débris animaux et des débris végétaux. Ces contaminants chimiques et organiques sont susceptibles de contaminer l'eau de source en raison des caractéristiques des sols à travers lesquels ils se propagent. Cette forme de pollution se manifeste généralement par la présence de micro-organismes et de substances chimiques.

Ces substances polluantes s'infiltrent dans le sol jusqu'à atteindre la nappe phréatique [5] ou sont accidentellement rejetées dans celle-ci. De plus, pendant la saison des pluies, les eaux de ruissellement traversent les sols et emportent avec elles des déchets jusqu'aux sources d'eau. Par conséquent, ces déchets, ainsi que les composants caractéristiques des sols entraînés dans l'eau, rendraient cette dernière impropre à la consommation humaine.

L'objectif de cette étude est d'analyser les pollutions environnementales de l'eau de source dans le cas d'Ambatoharanana. Cette analyse repose sur des analyses approfondies des paramètres physico-chimiques et microbiologiques des échantillons d'eau, ainsi que sur les paramètres de pH, de conductivité électrique, et de texture des échantillons de sol. L'analyse en composantes principales fait également partie des méthodes utilisées dans le cadre de cette recherche, dans le but d'analyser les diverses formes de pollution, qu'elles soient d'origine chimique, biologique, ou atmosphérique, et susceptibles d'affecter la qualité de l'eau.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Présentation des sites de prélèvement

Le Fokontany d'Ambatoharanana est localisé dans le district de Fianarantsoa I, dans la région de Haute Matsiatra, et dans la province de Fianarantsoa à Madagascar. Conformément à la Figure 1, les sites de prélèvement dans ce Fokontany se situent entre les longitudes Est 47.101 et 47.102, ainsi qu'à la latitude Sud -21.264. Ces emplacements sont à proximité de divers champs cultivés tels que la riziculture, les champs de bambou, les champs de patates douces et les champs de bananes (cf. Figure 2). Ces points d'eau provenant de sources sont habituellement exploités dans le Fokontany à des fins de consommation et d'irrigation agricole.

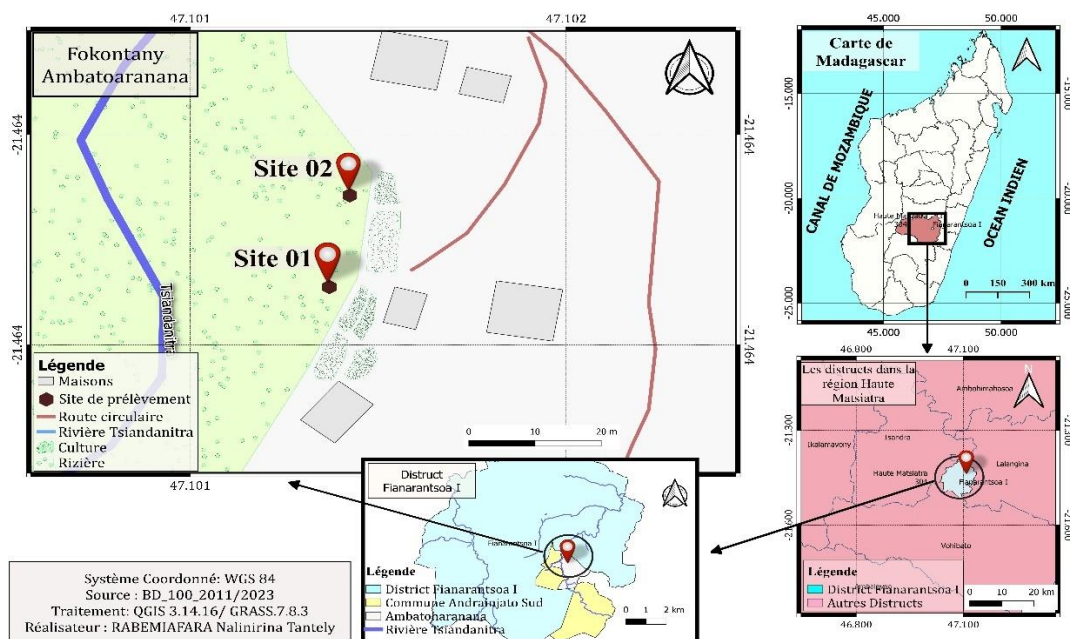


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des sites de prélèvement



Figure 2 : Présentation des sites de prélèvement

2.2 Echantillonnage

Vingt échantillons d'eau de source ont été prélevés à Ambatoharanana en utilisant des coordonnées géographiques précises. Au cours de cette campagne, les échantillons d'eau ont été collectés à deux sites, S1 et S2, puis placés dans des bouteilles en plastique polyéthylène d'une capacité de 1 litre. Préalablement, ces bouteilles ont été soigneusement nettoyées avec du nickel, suivi d'un rinçage à l'eau du robinet, subissant trois à quatre rinçages avant le prélèvement. Les échantillons ont été recueillis en plaçant les flacons sous la surface de l'eau, veillant à les remplir avec précaution jusqu'au bord. Ensuite, ils ont été transportés au laboratoire dans une glacière maintenue à une température de 6°C. Avant l'analyse, les échantillons ont été conservés dans un réfrigérateur à 4°C.

Quant aux échantillons de sol, ils ont été prélevés manuellement à l'aide de gants en polyéthylène, depuis le fond de l'eau. Par la suite, ils ont été déposés dans des bocaux en verre hermétiques afin d'éviter toute interaction avec l'atmosphère. Ces échantillons ont été transportés dans une glacière sans glace, séchés à l'abri du soleil pendant 48 heures, puis préservés dans des sachets plastiques hermétiques au laboratoire.

2.2 Analyses physico-chimiques

Lors des prélèvements, les paramètres physiques de l'eau, tels que le pH et la température, ont été mesurés in situ. Les instruments de terrain utilisés comprennent un thermomètre numérique de type JR-1 et un pH-mètre de type CE, avec une plage de mesure de 0,00 à 14,00 pH. Les paramètres physico-chimiques, tels que la conductivité électrique (CE), les solides totaux dissous (TDS), la turbidité, les chlorures et la DBO5, ont été analysés au laboratoire de chimie de la faculté des sciences et au Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE) à Antananarivo.

Les instruments utilisés pour ces analyses comprennent un TDS&EC-mètre de marque E-1, un turbidimètre de type Palintest® et un oxymètre multiparamètre WTW 340i, utilisés respectivement pour mesurer la CE, les TDS, la turbidité et la DBO5. La DBO5 a été déterminée par incubation à l'aide d'un incubateur de type HACH. Les chlorures ont été dosés selon la méthode de Morh [6], utilisant les nitrates d'argent (AgNO_3) de concentration $C_{\text{AgNO}_3} = 2,09 \text{ g/L}$, en présence de Chromate de potassium (2KCrO_4) à 10%.

$$\text{Expression : } [\text{NaCl}](\text{mg/L}) = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times [\text{AgNO}_3] \times M_{\text{NaCl}} \times 1000}{M_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{ech}}} \quad (1)$$

$$[\text{Cl}^-](\text{mg/L}) = [\text{NaCl}] \times \frac{35,5}{58,5} \quad (2)$$

V_{AgNO_3} [mL] : volume équivalent de la solution titrante d' AgNO_3 ;

$[\text{AgNO}_3]$ [g/L] : concentration initiale de la solution titrante d' AgNO_3 ;

M_{NaCl} [g/mol] : masse molaire de NaCl ($M_{\text{NaCl}} = 58,5 \text{ g/mol}$) ;

V_{ech} [mL] : volume de l'échantillon d'eau dans le bécher.

2.3 Analyse de sol

Dans le cadre de l'analyse du sol, notre objectif premier est de comprendre sa structure, sa capacité à retenir des éléments nutritifs, son niveau d'acidité, et sa teneur en sels minéraux, des aspects cruciaux pour l'évaluation des diverses pollutions environnementales. Afin d'atteindre ces objectifs, les paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, et la texture du sol ont été rigoureusement analysés au laboratoire des radio-isotopes à Antananarivo, en utilisant des équipements spécialisés tels que le pH-mètre et le conductimètre.

En ce qui concerne l'analyse du pH, 5g de sol ont été minutieusement mélangés avec 12,5mL d'eau distillée, suivi d'une agitation du mélange à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 30 minutes avant la mesure. De manière similaire, la conductivité a été mesurée en utilisant un rapport de 10g de sol dans 50mL d'eau distillée.

S'agissant de l'évaluation de la texture du sol, elle révèle la proportion relative des particules en suspension de différentes tailles, notamment le sable, le limon, et l'argile. Il est pertinent de noter que la classification a été effectuée en utilisant le triangle de texture [7]. À cette fin, 200mL d'échantillon de sol ont été déposés dans un bocal à couvercle. Après l'ajout d'eau, le mélange a été vigoureusement agité deux fois pendant 3 minutes, suivi d'une période de repos de 30 minutes, avant d'être transvasé dans un bécher gradué afin de permettre une sédimentation correcte. Après une période de 4 jours, la hauteur de chaque composante a été mesurée avec une grande précision.

$$\text{Expression de résultat : } \% \text{composante} = \frac{\text{hauteur de la couche}}{\text{hauteur total}} \times 100 \quad (3)$$

2.4 Analyses bactériologiques

Les analyses bactériologiques ont été conduites pour l'identification et le dénombrement des streptocoques fécaux (SF) et des coliformes totaux (CT) présents dans l'eau de source, conformément aux normes ISO 9308-1:2000 pour les CT et ISO 7899-2:2000 pour les SF. La détection de ces bactéries a été réalisée par filtration de 100 mL d'eau à travers une membrane de porosité de 0,45 μm , suivie du dépôt sur des boîtes de Pétri stériles contenant un milieu de culture spécifique à chaque groupe de micro-organismes. Les boîtes de Pétri ont été incubées pendant 24 heures à une température de 37°C.

Les milieux de culture utilisés comprennent le milieu Slanetz and Barthy pour les CT et la gélose lactosée au TTC pour les SF. Ces choix de milieux sont conformes aux recommandations standardisées pour assurer une identification précise et un développement adéquat des bactéries ciblées dans le processus analytique.

2.5 Traitements de données multivariées

L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour identifier les corrélations entre les paramètres étudiés. Cette méthode statistique a été choisie pour maximiser la variance des données, afin d'évaluer l'évolution de la qualité de l'eau et d'évaluer les risques de contamination. Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel IBM SPSS Statistics 23 pour les paramètres physico-chimiques et bactériologiques.

3. RESULTATS

3.1 Qualité physico-chimique et bactériologiques

Les résultats des analyses physiques, chimiques, et bactériologiques, présentés dans le tableau 1, révèlent que la température de l'eau varie de 18,4°C à 23,5°C, avec une moyenne de 21,24°C. Ces valeurs respectent les normes de l'OMS, qui recommandent des températures inférieures à 25°C.

Le pH de l'eau oscille entre 5,06 et 5,48, avec une moyenne d'environ 5,3. Cependant, ces valeurs ne sont pas conformes aux normes de l'Organisation mondiale de la santé, indiquant une tendance acide de l'eau de source.

Les valeurs de conductivité électrique varient entre 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 75,45 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquant une faible minéralisation et restant en conformité avec les normes de l'OMS. En ce qui concerne le TDS, il varie de 24 ppm à 65 ppm, indiquant une faible concentration de solides dissous dans l'eau.

L'eau de source présente une légère turbidité, avec une moyenne de 4,27 NTU et un minimum de 0,01 NTU. Cependant, la valeur maximale (10,50 NTU) dépasse les normes de l'OMS (>5 NTU).

La faible salinité est confirmée par les faibles niveaux de chlorure, variant entre 43,68 mg/L et 131,04 mg/L, avec une moyenne de 67,92 mg/L, toutes en dessous des valeurs recommandées par l'OMS.

La DBO5 de l'eau varie de 0 à 3,56 mg/L d'oxygène, avec une moyenne de 1,018 mg/L d'oxygène, respectant les normes de l'OMS.

En ce qui concerne les coliformes totaux (CT), les valeurs ne satisfont pas aux critères de l'OMS, avec des variations entre 0 et 15 ufc/100 mL, et une moyenne de 4 ufc/100 mL. Les streptocoques fécaux (SF) varient entre 0 et 28 ufc/100 mL, avec une moyenne de 8 ufc/100 mL.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de l'eau de source

	Minimum	Maximum	Moyenne	OMS
T°(°C)	18,4	23,5	21,240	25
PH	5,06	5,48	5,295	6,5-8,5
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	130	75,450	3000
TDS (ppm)	24	65	39,525	-
Turbidité (NTU)	0,01	10,50	4,274	5
Cl ⁻ (mg/L)	43,68	131,04	67,926	250
DBO5(mg/Ld'O2)	0	3,56	1,018	3
CT (ufc/100mL)	0	15	4	0
SF (ufc/100mL)	0	28	8	0

3.2 Qualité physique des sols et ses structures

Le tableau 3 présente les propriétés physiques du sol. Le pH du sol varie de 5,02 à 5,6, ce qui lui confère un caractère acide. La conductivité du sol varie entre 35 μ S/cm et 90 μ S/cm, indiquant la présence d'éléments minéraux.

Tableau 3 : Caractéristiques physiques du sol

	Minimum	Maximum	Moyenne
PH1/2.5(m/v)	5.02	5.60	5.2772
CE1/5(m/v)	35	90	51.35

Le tableau 4 consigne la texture du sol des sites 01 et 02. Selon le triangle de classification de la texture, ces sites sont classifiés comme sol limon argilo-sableux.

Tableau 4 : Présentation de la texture du sol.

Sites	Argile (0-2 μ m) %	Limon fin (2-20 μ m) %	Limon grossier (20-50 μ m) %	Sable fin (50-200 μ m) %	Sable grossier (0,2-2mm) %
Site 01	18,57	7,41	3,82	17,65	52,55
Site 02	18,11	7,76	3,36	18,23	52,53

3.3 Analyse statistique des paramètres physico-chimiques, bactériologiques de l'eau et caractéristiques physiques du sol

L'analyse statistique a permis d'établir des corrélations entre les paramètres étudiés. La matrice de corrélation (Tableau 5) ainsi que les matrices des coefficients des composantes (Tableau 6 et Figure 3) des différents paramètres étudiés ont révélé que la première composante principale C1 est corrélée avec la DBO5 (R = 0,886), les CT (R = 0,882), les SF (R = 0,859), le pH1/2.5 (R = 0,815), le pH (R = 0,803), et la température (R = 0,745). En d'autres termes, ces paramètres présentent des corrélations entre eux, notamment la température qui est positivement corrélée avec le pH (R = 0,736), la DBO5 (R = 0,577), les CT (R = 0,548), les SF (R = 0,513), et le pH1/2.5 (R = 0,630).

Le pH est également corrélé avec la DBO5 (R = 0,592), les CT (R = 0,539), les SF (R = 0,510), et le pH1/2.5 (R = 0,794). La corrélation entre la DBO5 et les CT (R = 0,973), les SF (R = 0,977), et le pH1/2.5 (R = 0,561) est également observée dans la matrice de corrélation. En outre, le pH1/2.5 est corrélé avec les SF (R = 0,551).

Quant à la deuxième composante principale C2, elle est corrélée avec la CE (R = 0,828), les TDS (R = 0,740), et la CE1/5 (R = 0,661). De plus, une forte corrélation est observée entre la CE et les TDS (R = 0,939).

Tableau 5 : Matrice de corrélation.

	T°	PH	CE	TDS	Turb	Cl ⁻	DBO5	CT	SF	PH1/2.5	CE1/5
T°(°C)	1,00										
Ph	0,736	1,00									
CE (μS/cm)	0,123	0,269	1,00								
TDS (ppm)	0,202	0,340	0,939	1,00							
Turbidité (NTU)	0,279	0,343	0,127	0,181	1,00						
Cl⁻(mg/L)	-0,162	-0,296	-0,229	-0,269	-0,143	1,00					
DBO5(mg/Ld'O)	0,577	0,592	0,332	0,240	0,296	-0,228	1,00				
CT (ufc/100mL)	0,548	0,539	0,360	0,244	0,267	-0,238	0,973	1,00			
SF (ufc/100mL)	0,513	0,510	0,354	0,228	0,254	-0,221	0,977	0,995	1,00		
PH1/2.5(m/v)	0,630	0,794	0,210	0,277	0,385	-0,426	0,561	0,596	0,551	1,00	
CE1/5(m/v)	-0,467	-0,208	0,239	0,101	-0,239	0,232	-0,118	-0,092	-0,053	-0,430	1,00

Tableau 6 : Matrice des coefficients des composantes

	Composante	
	1	2
DBO5(mg/Ld'O2)	0,886	-0,002
CT (ufc/100mL)	0,882	0,029
SF (ufc/100mL)	0,859	0,048
Ph1/2.5(m/v)	0,815	-0,251
Ph	0,803	-0,130
T°(°C)	0,745	-0,343
Turbidité (NTU)	0,441	-0,147
Cl⁻(mg/L)	-0,412	-0,034
CE (μS/cm)	0,473	0,828
TDS (ppm)	0,465	0,740
CE1/5(m/v)	-0,281	0,661

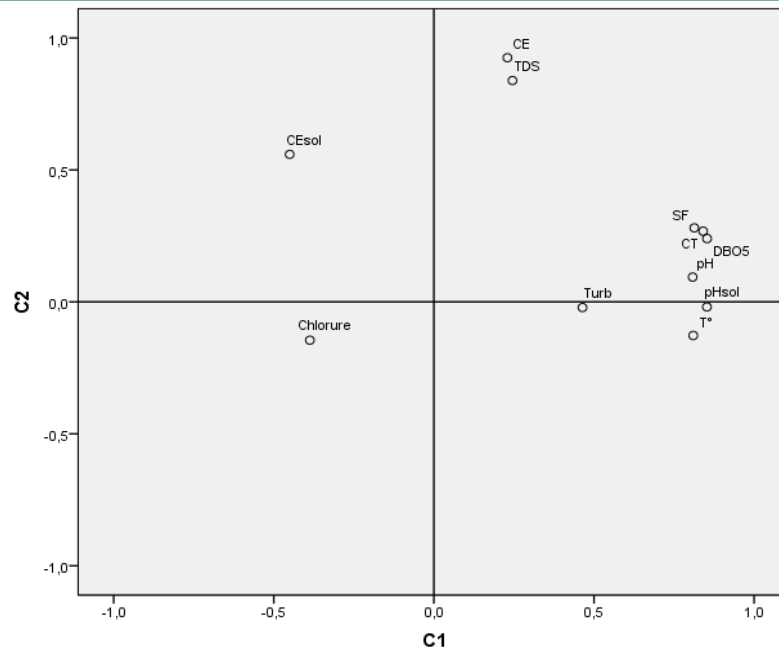


Figure 3 : Corrélation des paramètres étudiés avec les composantes principales.

4. DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les pollutions environnementales liées à la qualité de l'eau de source à Ambatoharanana, quartier d'Ambohidramasy. Cette analyse repose sur les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de la ressource en eau, ainsi que sur les caractéristiques physiques du sol et sa texture.

La qualité physico-chimique de l'eau de source est caractérisée par plusieurs paramètres, notamment la température, le pH, la conductivité électrique, le TDS, la concentration en chlorures, la turbidité et le niveau de DBO. La température joue un rôle crucial dans la solubilité des gaz et des sels minéraux dans l'eau [8,6]. Les analyses ont révélé que la température varie entre 18,4°C et 23,5°C, restant en dessous de la limite tolérée par l'OMS (<25°C) et classée dans la catégorie des eaux d'émergence, selon l'étude menée par Taybi (2019) sur les eaux thermales de la source "Ain Hamra" [9]. Ces valeurs conditionnent le développement des micro-organismes, faisant de la température un indicateur de pollution, qu'elle soit chimique ou biologique, comme l'indiquent Jaofara et al., (2022) et Rabearisoa et al., (2023) [10, 11].

Le pH mesure le caractère acide ou basique de l'eau, en fonction de la teneur en éléments chimiques acides ou basiques. Selon l'OMS (2005), le pH de l'eau potable doit se situer entre 6,5 et 9,5 [12]. Cependant, les analyses révèlent que les eaux de source sont acides, avec un pH variant entre 5,05 et 5,48, ne respectant pas les normes recommandées. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues dans d'autres études, telles que celle de El Kory et al., (2011) sur l'eau de la ville de Tijkja (pH de l'ordre de 6,19) [8]. D'autres auteurs étudiant les sources des montagnes de l'ouest de la Côte d'Ivoire ont rapporté un pH moyen de 5,34 [5], similaire à ces résultats.

Plusieurs facteurs sont liés à l'acidité de l'eau de source. Selon Taybi et al., (2019) et Ernest et al., (2013), l'acidité de l'eau est étroitement liée à la production de dioxyde de carbone (CO₂) issu de la décomposition de la matière organique végétale dans la première couche du sol [9,5]. Ces éléments s'hydrolysent dans l'eau pour former des ions bicarbonate HCO₃²⁻. Les analyses statistiques montrent des corrélations entre le pH et la température, indiquant que le changement de pH influence la température, ce qui peut résulter de la pollution environnementale due à l'érosion du sol. Pendant les périodes pluviales, les eaux de ruissellement érodent les sols des terrains de culture contenant ces déchets dans les eaux de source.

En outre, l'acidité de l'eau peut être liée à l'acidité du sol et cette hypothèse est vérifiée par la corrélation entre le pH de l'eau et celui du sol (R = 0,794). Généralement, les sols acides peuvent rendre l'eau de source acide, c'est pourquoi Fatma et al. (2020) ont montré dans leur article que l'eau et les roches s'interagissent entre eux [13]. Le pH acide est essentiellement lié à la présence d'acide carbonique, résultant de la dissolution du gaz carbonique produit par les racines et les micro-organismes des sols. Cela peut être dû à l'épuisement progressif du calcium et du magnésium dans le sol en raison du dépôt d'acides tels que l'acide sulfurique ou nitrique et du boisement. La conductivité électrique (CE) permet d'apprécier la minéralisation de l'eau [14]. Les analyses révèlent que les eaux de source contiennent peu

d'éléments minéraux, avec des valeurs allant de 50 μ S/cm à 130 μ S/cm, respectant ainsi les normes de l'OMS (<3000 μ S/cm). Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées par études [18-13-1-9,8] à l'exception de ceux de Ahoussi et al., (2013) [5]. Selon ces auteurs, le niveau élevé de la conductivité électrique est causé par deux facteurs : la présence des sels évaporites et de bicarbonates, ou la nature des couches géologiques de la nappe, notamment la présence de grès et calcaires.

Selon notre recherche, le faible niveau de la conductivité électrique est lié à la faible composition chimique de la couche géologique du sol, qui est pauvre en éléments minéraux. La faible minéralisation du sol, avec une conductivité électrique comprise entre 35 et 90 μ S/cm et une moyenne de 51,35 μ S/cm, corrobore l'hypothèse de Rajonson (1992) selon laquelle les eaux naturelles de Madagascar sont généralement pauvres en minéraux [15].

Une analyse en composante principale a révélé une forte corrélation entre la conductivité électrique et les solides totaux dissous (TDS) ($R = 0,939$). Cela suggère que la dissolution des minéraux dans l'eau a un impact significatif sur sa minéralisation. Le TDS de l'eau de source est compris entre 24ppm et 65ppm avec une moyenne de 40ppm qui est en dessous de la norme recommandée par l'OMS. La conductivité et le TDS peuvent refléter tous deux la présence de polluants chimiques nuisibles tels que le fer, le manganèse, le sulfate et l'arsenic [16]. Les engrais biochimiques utilisés pourraient se retrouver dans l'eau sous forme d'éléments inorganiques.

La teneur en chlorures (Cl⁻) dans l'eau peut également contribuer à la variation de la conductivité électrique, car les chlorures font partie des sels minéraux. Les niveaux de chlorure varient entre 43,68mg/L et 131,04mg/L, avec une valeur moyenne de 67,93mg/L. Les valeurs mesurées sont inférieures à la norme de l'OMS. Mohamed EL Kory et al. (2011) ont obtenu des résultats similaires pour la ville de Tjikja, où la teneur moyenne en chlorures est de 100 mg/L [8]. Les chlorures sont présents dans toutes les eaux, mais leur concentration peut varier considérablement. Les études de Fatma et al., (2020) et Naima et al., (2012) ont montré que les eaux souterraines peuvent avoir une teneur élevée en chlorures [13-18]. Dans notre étude, nous avons observé une valeur maximale de 131,04mg/L. Cette valeur élevée suggère que l'eau peut être contaminée par des polluants chimiques, tels que ceux provenant des activités agricoles ou de l'érosion du sol.

La turbidité mesure la propriété optique de l'eau en absorbant ou en diffusant la lumière [9] due à la présence des particules inorganiques (limon, argile et composés chimiques naturels tels que le carbonate de calcium). La turbidité de l'eau a été mesurée entre 0,01 et 10,5 NTU, avec une moyenne de 4,27 NTU. Pour certains échantillons (>5 NTU), cette valeur dépasse la norme de potabilité de l'OMS, mais elle est inférieure à celle trouvée par Taybi et al., (2019) (moyenne de 18 NTU) et proche de celle d'Ahoussi et al., (2013) [5] (moyenne de 4,08 NTU). La présence des matières en suspension dans l'eau augmente le risque de contamination microbiologique, car ces matières offrent un abri favorable aux bactéries.

La demande biologique en oxygène (DBO₅) est un indicateur de la pollution organique par l'oxydation des matières organiques en présence de micro-organismes [6]. Les valeurs de DBO₅ fluctuent entre 0 et 3,56 mg/L d'oxygène, respectant ainsi les normes de l'OMS, classant l'eau comme très bonne selon le tableau de classification de Jean Roddier (2009) [6]. Contrairement aux prévisions d'Ahoussi et al., (2013) [5] sur la pollution organique des eaux de source d'Ambohindramasy, nos résultats montrent une faible pollution par des micro-organismes. Jean Rodier (2009) a souligné que la DBO₅ est influencée par la température, le pH, la salinité, et les processus naturels de décomposition des matières organiques, établissant ainsi des corrélations avec ces paramètres. Ces corrélations avec la température ($R = 0,577$) et le pH ($R = 0,592$) confirment que la DBO augmente avec le pH et la température, soulignant la pollution environnementale liée à l'érosion du sol et à l'utilisation d'engrais biochimiques dans l'agriculture. Les fortes corrélations entre DBO₅/CT ($R = 0,973$) et DBO₅/SF ($R = 0,977$) pourraient signaler une pollution microbiologique provenant des excréments animaux.

L'analyse microbiologique est cruciale pour évaluer la qualité microbiologique de l'eau. Les coliformes totaux (CT) et les streptocoques fécaux (SF) sont des indicateurs de contamination fécale. Les valeurs des CT varient entre 0ufc/100mL et 15ufc/100mL, avec une moyenne de 4ufc/100mL, tandis que les SF varient entre 0ufc/100mL et 28ufc/100mL, avec une moyenne de 8ufc/100mL. Ces valeurs dépassent les normes de potabilité de l'OMS et sont supérieures à celles trouvées par Taybi et al., (2019) pour la source « Ain Hamra » [9]. Contrairement à l'affirmation de Saâdia (2007) sur la vulnérabilité des nappes phréatiques, nos résultats soulignent une vulnérabilité accrue due aux rejets d'élevage du bétail et à l'utilisation du fumier comme engrais, contribuant à la pollution des eaux de source [17].

En résumé, les eaux de source à Ambatoharana sont sujettes à des pollutions organiques et microbiologiques, résultant de diverses sources potentielles telles que l'érosion du sol, les rejets d'élevage du bétail, l'utilisation du fumier comme fertilisant, et d'autres activités humaines. La mise en place de mesures de protection et de traitement de l'eau est essentielle pour garantir sa qualité et sa sécurité pour la consommation humaine.

4. CONCLUSION

Les investigations menées à Ambohindramasy ont permis d'évaluer les pollutions environnementales liées aux caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de l'eau. Cette étude démontre que, dans la zone d'étude, les eaux de source sont contaminées en raison des activités humaines, notamment l'utilisation d'engrais chimiques dans les champs de culture, ainsi que des phénomènes naturels tels que l'érosion du sol pendant la période pluviale. Leurs caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques révèlent une acidité, avec un pH de 5,3, attribuable à la décomposition de la matière végétale. De plus, les niveaux de DBO5 (1 mg/L d'O₂), de turbidité (4,27 NTU), de Cl- (63,93 mg/L), de CT (4 ufc/100 mL), et de SF (8 ufc/100 mL) indiquent des pollutions chimiques et biologiques. En termes de perspectives, il est crucial de noter que les eaux de source présentent des risques pour la santé humaine en raison de leur acidité. Des mesures de préservation et de traitement de l'eau doivent être envisagées pour garantir la sécurité de la population.

Remerciements : Les auteurs de cette recherche remercient le Laboratoire de la faculté des sciences Fianarantsoa ainsi que les laboratoires de chimie de Radio Isotope et le Centre Nationale de Recherche sur l'Environnement (CNRE) à Antananarivo pour leur soutien dans les analyses des échantillons.

5. REFERENCES

- [1] Otchoumou F. K., Yapo O. B., Dibi B., Bonny A. C. Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de Bingerville. *International Journal of Biological and Chemical sciences*. 2017;11(5): 2495-2509. doi: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.43>
- [2] Unicef. Résultats du MICS 6 (2018) Madagascar: Enquête nationale sur la situation socio-démographique des ménages (MICS). 2018 ; Unicef, Antananarivo. Consulté le Octobre 02, 2023, sur <https://www.unicef.org/madagascar/mics2018>
- [3] JICA. Projet d'Elaboration du Schéma Directeur pour le Développement de l'axe Economique TaToM, Madagascar: Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Habitat et des Travaux Publics (MAHTP) Gouvernement de la République de Madagascar, 2019. Consulté le juillet 2023, sur https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12340758_01.pdf
- [4] Bouhafs F., Laraba A., & Touati M. Caractéristiques hydrochimiques des eaux de sources de Taoura, Souk-Ahras (Nord est Algérien). *Rev. Sci. Technol.* 2020 ; 26(11) : 31-38. Consulté le 10 08, 2023, sur <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/215851/203564>
- [5] Ernest A. K., Blaise K. Y., Michel K. A., Gbombélé S., & BIEMI. Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman). *Journal of Applied Biosciences*. 2013 ; 63 : 4703 – 4719. Disponible sur doi:10.4314/jab.v63i1.87245
- [6] Jean R., Bernard L., Nicole M. et Coll. L'Analyse de l'eau, vol. 09, Dunod Paris, 2009.
- [7] Ballot C. S., Mawussi G., Atakpama W., Moita-Nassy M., Yangakola T. M., Zinga I., Silla S., Kpérkouma W., Dercon G., Komlan B. et Koffi A. Caractérisation physico-chimique des sols en vue de l'amélioration de la productivité du manioc (Manihot esculenta Crantz) dans la région de Damara au centre-sud de Centrafrique. *Revue Agronomie Africaine*. 2017 ; 28(11) : 9-23. Consulté le octobre 06, 2013, sur <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/164135/153658>
- [8] Mohamed EL Kory, O. C., & Kacem, E. K. Caractérisation physico-chimique des eaux d'alimentation de la ville de Tijkja (Mauritanie). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 2011; 5(5): 2133-2139. doi: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v5i5.33>
- [9] Taybi H., Bargach K., Boulfia M., & Lamchouri F. Etude géologique et qualités physico-chimique et bactériologique des eaux thermales de la source "Ain Hamra" de la Province de Taza (Rif Oriental -Maroc). *Journal of Water Sciences & Environment Technologies*. 2019 ; 04(01) : 443-451.
- [10] Jaofara, Bisoa Victor, Razafitsiferana Théophile et Lehimena Clément. Analyses qualitatives des eaux de puits dans la commune urbaine de Bealanana, région Sofia, Madagascar. *American Journal of Innovative Research and Applied Science*. Am. J. innov. res. appl. sci. 2022; 14(5): 239-252. Available on: [ur https://www.american-jiras.com/Jaofara-Ref08-ajira070522.pdf](http://www.american-jiras.com/Jaofara-Ref08-ajira070522.pdf)
- [11] Rabearisoa A.H., Nasolomampionona R.V., Manjolongo B., Razanamparany B., Randimbarison N.S., Jibo M.H., Fidiarilanto T.S., et Rabearisoa H. Évaluation des risques sanitaires liés à la qualité de l'eau de pluie stockée dans une citerne en béton : étude de cas à Ivory Avaratra, Fianarantsoa, Madagascar. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2023; 17(14): 233-240. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8416718>
- [12] OMS. Combattre les maladies véhiculées par l'eau à la maison. Genève: Suisse: Organisation Mondiale de la Santé ;2005.
- [13] Fatma B., Abdelaziz L., & Mounira T. Caractéristiques hydrochimiques des eaux de sources de Taoura, Souk-Ahras (Nord est Algérien). *Revue des Sciences et de la Technologie*. 2020 ; 26(11): 31-38. Consulté le Octobre 10, 2023. Available on: <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/215851/203564>
- [14] Frantzy Orelie. Etude de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable (Anse-a-Veau). Belgique: Université de Liège ; 2017. pp. 1-85. Consulté le 08 03, 2023. Available on: <http://hdl.handle.net/2268.2/324>
- [15] Rajonson J., Rasolofonirina N., Ratoaveloson J., & Ravaonindriana N. Madagascar : Récupéré sur Institut de Recherche pour le Développement (IRD). (1992, 11). Available on: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/carton01/40360.pdf
- [16] Maoudo H., Ibrahima D., Momar N., Birame N., Cheikh Tidiane D., Dame C., & Abdoulaye D. Etude comparative de la qualité physico-chimique des eaux de puits et de forage consommées dans la commune de Sinthiou Maléme dans la région de Tambacounda (Sénégal). *International Formulae Group*. 2020; 14(9): 3400-3412. doi: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v14i9.34>

- [17] Saâdia B., Khadija O., Saïd O., Nourredine E. H., & Benaïssa A. Etude de la qualité physicochimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique SCIENCE*. 2007 ; 03(13) : 391 - 404.
- [18] Naima H.El H., Mohamed S., Brahim L., & MAHJOUR L. E. Évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'utilisation dans l'eau potable et l'agriculture : plaine de Tadla, Maroc. *Afrique SCIENCE*. 2012 ; 08(01) : 54-66.



How to cite this article: **Andry Harinaina, Rabearisoa, Nalinirina Tantely, Rabemiafara, Bertrand, Manjolongo, Sarobidy Placide, Randriamanantena, Viviane, Harinandrasana, Ravo Victoire, Nasolomampionona, Hajandrainy, Rabearisoa, Mbolanirina Mamisoa, Rabemiafara, Bruno, Razanamparany, Nasolo Sedravola, Randimbiarison, et Lazanirina Henintsoa, Rabemiafara.** ANALYSE DE LA POLLUTION ENVIRONNEMENTALE LIE A LA QUALITE DE L'EAU DE SOURCE : CAS D'AMBOHIDRAMASY QUARTIER AMBATOHARANANA-MADAGASCAR. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2023; 17(4): 294-303. DOI: 10.5281/zenodo.10030574

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/>