



Université d'Antananarivo
Domaine : Sciences et Technologies
Mention : Chimie



Parcours : Master d'Ingénierie en Sciences et Techniques de l'Eau



Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Master 2

Intitulé :

**Etude de vulnérabilité et du risque de
pollution de l'eau souterraine (puits) de
la ville d'Antananarivo par la méthode
DRASTIC**

Présenté le 22 Février 2019 par :
Landrisoa Melanie HIAJARIVOLA

Devant le Jury composée de :

Président : **Monsieur Mihasina RABESIAKA**, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo

Encadrant : **Monsieur Rado RASOLOMAMPIANINA**, Directeur de Recherches Associés au Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE)

Examineur : **Monsieur Bruno RAZANAMPARANY**, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier notre Dieu qui m'a donné la permission de réaliser cette étude, avec son aide, j'ai toujours eu la force, le courage et la santé.

Je tiens également à remercier :

-**Monsieur Dimby RALAMBOMANANA**, Maître de Conférences, Responsable de la mention Chimie à l'Université d'Antananarivo.

-Tous les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce travail :

* **Monsieur Mihasina RABESIAKA**, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo ; d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

* **Monsieur Rado RASOLOMAMPIANINA**, Directeur de Recherches Associés et Chef du Laboratoire de Microbiologie de l'Environnement du Centre National de Recherches sur l'Environnement ; pour avoir accepté d'être rapporteur de mon mémoire. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

***Monsieur Bruno RAZANAMPARANY**, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo ; d'avoir accepté d'examiner ce travail.

- Mes remerciements vont également à la population dans les zones d'étude de m'avoir autorisé à utiliser leurs puits pour les analyses au cours de cette étude.

-Tout le personnel enseignant dans le parcours ISTE ;

-Tout le corps administratif de LHAE ;

-Tout le personnel administratif de la formation ISTE ;

-Mes chers parents et toute ma famille, pour leurs soutiens moralement et matériellement durant mes années d'études et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire ;

A tous ceux qui ne se retrouvent pas dans les lignes précédentes et qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire, je dis pardon et merci pour ce que vous avez fait pour ce travail.

Du fond du cœur, merci à tous et que Dieu vous bénisse.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	I
LISTE DES ABREVIATIONS	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES ET PHOTO	VI
GLOSSAIRE.....	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
I. Cycle de l'eau	3
II. Nappes souterraines	4
1. Nappe montre l'accumulation d'eau liquide,	4
2. Différents types des nappes d'eau souterraine.....	4
III. Pollution de l'eau	5
1. Diverses origines de la pollution :	5
2. Principaux polluants.....	6
3. Conséquences.....	7
IV. Risque sanitaire liées aux pollutions bactériologiques et aux contaminations chimiques de l'eau.....	7
1. Pollutions bactériologiques	7
2. Contamination chimiques	9
V. Etude bibliographique récente	9
Chapitre II : MATERIELS ET METHODES	13
I. Contextualisation de la zone d'étude.....	13
a. Localisation de la zone d'étude	13
b. Contexte physique	14
c. Contexte géologique	16
d. Contexte hydrogéologique.....	17
e. Contexte sociale.....	19
II. Collecte des données ; analyses des paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau.....	19
A. Collecte des échantillons	19
B. Paramètres physico-chimiques de l'eau	23
1. Paramètres physiques	23
1.1. Paramètres organoleptiques de l'eau	23
a. Couleur	23
b. Odeur	23
1.2. Paramètres physiques à étudier.....	23

a.	pH	23
b.	Turbidité	24
c.	Conductivité.....	24
2.	Paramètres chimiques de l'eau.....	24
a.	Salinité	25
b.	Matière organique.....	25
c.	Alcalinité	25
d.	Oxygène dissous	26
e.	Nitrate	26
f.	Nitrite.....	26
g.	Ammonium.....	27
h.	Chlorure	27
i.	Dureté totale	27
j.	Phosphore total	28
k.	La demande chimique en oxygène (DCO)	28
l.	Demande biochimique en oxygène(DBO)	29
C.	Paramètres microbiologiques de l'eau.....	29
a.	CT et <i>E. coli</i>	29
b.	Entérocoques intestinaux.....	29
c.	ASR	30
III.	Analyses statistiques des données hydro-chimiques (statistique descriptive)	30
IV.	Etude de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine de la zone d'étude	30
a.	Présentation de la différente méthode pour l'évaluation de vulnérabilité	30
b.	Présentation des paramètres et de la note de vulnérabilité de la méthode DRASTIC	31
c.	Cartographie de la vulnérabilité	36
Chapitre III : RESULTATS		37
I.	Résultats des paramètres physico-chimiques et microbiologiques.....	38
A.	Caractères physico-chimiques de l'eau souterraine	38
a.	Couleur.....	39
b.	pH.....	40
c.	Conductivité.....	40
d.	Turbidité	41
e.	Matières en suspension.....	41
f.	Salinité	42

g.	Anions et cations	43
h.	Azote minéral des eaux (Ammonium, Nitrate, Nitrite)	43
i.	Dureté totale, Matière organiques	43
j.	Oxygène dissous, DCO et DBO	43
B.	Paramètres microbiologiques de l'eau étudiés	43
C.	Examen de la matrice de corrélation, nous a permis d'établir quelques corrélations entre les différents éléments.....	45
II.	Etude de la vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine de la ville d'Antananarivo	46
1.	Profondeur de la nappe (D).....	46
2.	Recharge efficace (R)	48
3.	Lithologie de l'aquifère (A)	49
4.	Type de sol (S).....	50
5.	Topographie (T).....	51
6.	Lithologie de la zone vadose (I).....	51
7.	Conductivité hydraulique (C)	52
8.	Indice de vulnérabilité de la nappe souterraine.....	53
	DISCUSSION	54
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	58
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	60
	REFERENCES WEBOGRAPHIQUES :	62
	ANNEXES.....	i

LISTE DES ABREVIATIONS

µs : Micro Siemens

µg : Micro gramme

°C : Degré Celsius

°F : Degré français

% : Pourcentage

ASR : Anaérobies sulfito-réducteurs

CT : coliformes totaux

E. coli : *Escherichia coli*

EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétra acétique

ENTERO : Entérocoques intestinaux

GPS : Global Position System

IPM : Institut Pasteur de Madagascar

JIRAMA : Jiro sy Rano Malagasy

LHAE : Laboratoire d'Hygiène des Aliments et de l'Environnement

MDDEP : Ministère du Développement Durable, Environnement et Parcs du Québec

mg. L⁻¹ : Milligramme par litre

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

RN : Route Nationale

pH : potentiel Hydrogène

SIG : Système d'Information Géographique

TH : Titre Hydrotimétrie

UNICEF : United Nations International Children's Emergency Fund

UFC : Unité Formatrice des Colonies

USEPA : United States Environmental Protection Agency

UV : Ultra-Violet

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Maladies diarrhéiques les plus courantes liées à l'eau

Tableau 2 : Données hydrogéologiques de la plaine d'Antananarivo

Tableau 3 : Localisation des zones d'études

Tableau 4 : Classification des valeurs pour la dureté d'une eau

Tableau 5 : Différentes méthodes pour l'estimation de la vulnérabilité

Tableau 6 : Poids de chaque paramètre

Tableau 7 : Notes accordées aux paramètres DRASTIC

Tableau 8 : Relation entre indice et degré de vulnérabilité

Tableau 9 : Résultats des analyses physico-chimiques

Tableau 10 : Résultats des analyses microbiologiques

Tableau 11 : Matrice de corrélation

Tableau 12 : Profondeur de la nappe d'eau souterraine

Tableau 13 : Recharge efficace

Tableau 14 : Lithologie de l'aquifère

Tableau 15 : Nature du sol

Tableau 16 : Topographie

Tableau 17 : Lithologie de la zone vadose

Tableau 18 : Conductivité hydraulique

Tableau 19 : Quatre classes de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine d'Antananarivo

LISTE DES FIGURES ET PHOTO

Figure 1 : Cycle de l'eau

Figure 2 : Schéma comparatif d'une nappe libre et d'une nappe captive

Figure 3 : Carte de vulnérabilité de la Chaffar

Figure 4 : Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale du bas Cheliff

Figure 5 : Localisation de la zone d'étude

Figure 6 : Diagramme-courbe ombrothermique

Figure 7 : Carte géologique de la zone d'Antananarivo

Figure 8 : Maladies diarrhéiques et respiratoires dans les sites A, B et C

Figure 9 : Quinze points d'échantillonnages

Figure 10 : Sept paramètres DRASTIC

Figure 11 : Variation de la moyenne de couleur entre les sites A, B et C

Figure 12 : Variation de la moyenne de pH entre les sites A, B et C

Figure 13 : Variation de la moyenne de conductivité entre les sites A, B et C

Figure 14 : Variation de la moyenne de turbidité entre les sites A, B et C

Figure 15 : Variation de la moyenne de MES entre les sites A, B et C

Figure 16 : Variation de la moyenne de salinité entre les sites A, B et C

Figure 17 : Profondeur de la nappe (D)

Figure 18 : Recharge efficace (R)

Figure 19 : Coupe lithologique types des sondages à Antananarivo

Figure 20 : Lithologie de la nappe aquifère (A)

Figure 21 : Nature du sol (S)

Figure 22 : Classe de pente topographique (T)

Figure 23 : Nature de la zone non saturée (I)

Figure 24 : Conductivité hydraulique (C)

Figure 25 : Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de la ville d'Antananarivo

Photo 1 : Quinze puits échantillonnés

GLOSSAIRE

Eau de surface : Les eaux de surfaces sont constituées par les eaux de récupérations provenant de la pluie ou de la neige, mais également par les lacs, océans et rivières.

Eau souterraine : C'est l'ensemble des nappes phréatiques et des aquifères souterrains. Généralement les eaux sont stockées dans les pores des sédiments ou des roches.

Eau ultra pure : L'eau ultra pure est évaporée et ainsi débarrassée de toutes les particules dissoutes et divers polluants. Elle est utilisée dans de nombreux processus industriels, en chimie, et peut également être utilisée dans l'alimentation.

Eutrophisation : L'eutrophisation est enrichie en substances nutritives (nitrates et phosphates) d'un milieu aquatique pour entraîner l'accroissement des végétaux aquatiques (fleurs d'eau). Ces végétaux aquatiques nécessitent une très forte quantité d'oxygène pour leur décomposition voire asphyxier les autres formes de vie aquatique.

Méthode AVI : Cette méthode consiste à évaluer le temps de transport d'éventuels contaminants en fonction de l'épaisseur de la zone non saturée.

Méthode DRASTIC : C'est la mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency), afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères.

Méthode GOD : C'est la présentation de la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale des polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification du type de nappe, type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques et la profondeur de la nappe.

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource naturelle précieuse et très importante pour ses plusieurs types d'usages : domestiques, industriels et agricoles. Sa qualité est un facteur pouvant influencer la vie des êtres vivants (Kazi, 2019).

En 2010, l'Assemblée Générale des Nations Unies officialise la classification du droit à l'eau potable et à l'assainissement comme étant un droit de l'homme. Chacun a donc le droit à l'eau dans tous ses besoins (OMS, 2018).

L'UNICEF affirma en 2013 que plus de la moitié de la population malgache, plus précisément 52% sont exposées au problème d'accès à l'eau potable car les infrastructures d'assainissement adéquates ne sont accessibles que par 14% du peuple. Tels sont aux alentours de la Ville d'Antananarivo, où la plupart des habitants exploitent directement les eaux souterraines dans tout leur besoin en eau.

Par ailleurs, l'eau souterraine est de meilleure qualité que l'eau de surface (rivière, lac, ruisseau) grâce à la capacité filtrante du sol pouvant être vulnérable à la contamination (Gouvernement du Québec, 2018). La consommation d'eau contaminée sans assainissement favorise la transmission des maladies comme le choléra, la diarrhée, la dysenterie, l'hépatite A, la typhoïde et la poliomyélite (OMS, 2018). Toutefois, ce risque s'avère évitable. Des précautions doivent donc être prises pour assurer en tout temps un approvisionnement en eau de bonne qualité. Ce phénomène constitue des impacts environnementaux tenant une place importante sur les grands problèmes socio-écologiques. Cela représente une menace pour la santé publique et surtout pour l'environnement.

Toutefois, la population en milieu rural exploite les eaux souterraines comme ressource en eau potable. Cependant, la contamination microbiologique est encore plus grave, notamment lorsqu'elle est liée aux excréments humains.

Dans les zones d'étude, objet de notre étude, pour la plupart de ménages, l'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau. L'insuffisance de l'infrastructure est la principale cause de la difficulté de l'accès en eau potable à la zone d'étude concernée.

Bien que la situation des eaux souterraines soit moins préoccupante que celle des eaux de surface, la pollution commence à inquiéter les utilisateurs. La fragilité d'une nappe s'explique par la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution issue du sol. Considérant les activités anthropiques et le milieu physique du terrain : caractéristiques hydrogéologiques et occupation du sol, la faiblesse d'une telle nappe d'eau souterraine ne peut être ignorée. Il

en résulte dans ce cas que cette ressource en eau soit contaminée. Le système d'assainissement collectif est presque inexistant car les eaux pluviales et les eaux usées sont recueillis dans des fossés et canaux avant de s'écouler vers les points bas et ruisseaux naturels.

Les bacs à ordures, canaux d'évacuation d'eau, WC publics et bornes fontaines sont insuffisants à Antananarivo. En conséquence, divers déchets et des matières fécales se trouvent entassés partout. Des zones basses, près du canal, sont victimes d'inondations faisant remonter le niveau de la nappe après chaque passage de pluie. Par ailleurs, des puits se trouvent non loin des zones insalubres ou des latrines familiales. Ils sont mal protégés et reçoivent des impuretés de toutes sortes. L'usage de cette eau impropre à la consommation est une source des maladies. Ce qui peut causer de nombreux problèmes de la nappe d'eau souterraine en cas de facteur l'influençant de la qualité d'eau.

L'État et toutes les zones d'étude n'ont pas pu, dans un contexte de crise financière, assurer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement pour tous. Il est donc nécessaire d'étudier et de comprendre les facteurs qui sont à l'origine de la pollution des ressources en eau dans cette ville. L'étude a pour objet, d'une part, de connaître le niveau de contamination de l'eau de puits de cette zone à la pollution. D'autre part, il s'agit d'évaluer les facteurs de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine et la gestion des sources de contamination fécale de la nappe.

Pour mener à bien l'étude, le présent document est divisé en trois grands chapitres : le premier rapporte la synthèse bibliographique relative aux thèmes traités. Le second décrit les matériels et méthodes, et le dernier représente les résultats.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Cycle de l'eau

L'eau est la source principale et originelle de toute vie. Elle se présente, dans la nature, sous trois états : solide (sous forme neige et glace), liquide (eau chimiquement pure ou chargée en solutés) et gazeux (à différents degrés de pression et de saturation).

Les mécanismes des mouvements de l'eau dans la nature sont déterminés par l'énergie thermique solaire, la gravité, l'attraction solaire, l'attraction lunaire, la pression atmosphérique, les forces intermoléculaires, les réactions chimiques, les nucléaires et les activités biologiques, et enfin les activités humaines. Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau s'évapore à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère et devient de la vapeur d'eau qui formera les nuages. Une partie de la pluie peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. La pluie peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eaux (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle. La figure 1 montre le cycle de l'eau.



Figure 1 : Cycle de l'eau Source : USGS

II. Nappes souterraines

1. Nappe montre l'accumulation d'eau liquide,

Quand il s'agit d'eau accumulée dans une formation poreuse on l'appelle nappe d'eau souterraine. L'ensemble du milieu solide et de l'eau contenue, permettant l'écoulement d'une nappe et le captage d'eau, est appelé aquifère. Pratiquement, le terme nappe phréatique désigne une nappe généralement libre à surface peu profonde.

2. Différents types des nappes d'eau souterraine

Elle peut obtenir différents qualificatifs relatif :

- à son gisement d'une nappe alluviale dans les zones alluvionnaires ...,
- à ses conditions hydrodynamiques comme nappe captive ou libre, nappe perchée, nappe artésienne (Mezzar, 2015).

- Nappe libre

Une nappe libre affleure à la surface du sol, comprise dans un aquifère comportant une zone non saturée de caractéristiques différentes à celles de la zone saturée, et donc non surmontée d'une imperméabilité.

- Nappe captive

Elle est une nappe ou partie de nappe sans surface libre, recouverte entre deux couches imperméables, où l'eau est habituellement sous pression. La figure 2 représente schéma comparatif d'une nappe libre et d'une nappe captive

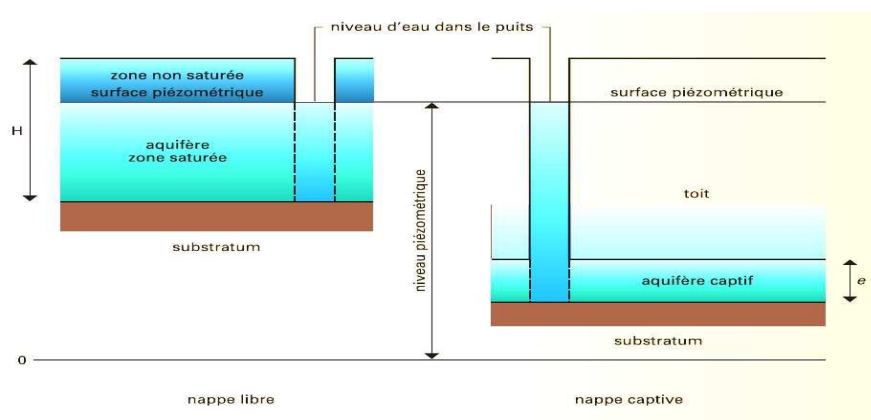


Figure 2 : Schéma comparatif d'une nappe libre et d'une nappe captive

(ANDRIAMANAMPISOANILAINA, 2011)

- Nappe alluviale

Elle contenue dans le grand épandage de sables, graviers et galets des fleuves et des rivières.

Une nappe alluviale est le lieu favorable des échanges avec les cours d'eau et les zones humides. Il peut être approvisionné par les crues et libérera à l'inverse de l'eau dans les cours d'eau en période sèche.

- Nappe perchée

C'est une nappe libre, permanente ou temporaire, formée au-dessus d'une zone non saturée et en tout temps à une côté supérieure à celle de la surface d'un cours d'eau.

III. Pollution de l'eau

La pollution de l'eau est devenue d'un caractère gênant ou nuisible pour l'usage humain. Lesquelles de la faune ou de la flore tout est responsable du changement de caractéristique de l'eau ? Au cours de son utilisation, l'eau s'appauvrit ou s'enrichit de substances de toutes sortes, ou change de température. Les pollutions qui en résultent se trouvent dans les milieux naturels aquatiques (les mers, océans, les rivières, les lacs et réserves d'eau douces souterraines) (Panorama, 2007-2008).

1. Diverses origines de la pollution :

- Les rejets urbains :

A la manière de ruissellement des eaux pluviales la collecte et le traitement des eaux usées des ménages, des activités domestiques, artisanales et tertiaires résultants les rejets urbains dans les zones urbaines (Panorama, 2007-2008).

- Les rejets agricoles :

Ils provoquent les effets de la percolation des eaux de pluie dans les sols et de son ruissellement, de l'épandage de produits chimiques sur le sol (activités maraîchères et des élevages) (Panorama, 2007-2008).

- Les rejets industriels :

Au niveau national, la part relative aux différents secteurs est évaluée à 50% pour l'agriculture, 35% les rejets urbains et 15% pour l'industrie.

Ces taux varient selon les types de pollutions, la part d'origine industrielle étant par exemple plus importante que pour certains polluants toxiques (Panorama, 2007-2008).

2. Principaux polluants

- La pollution organique

A l'origine d'une consommation de l'oxygène présent dans le milieu récepteur et peuvent s'ils sont trop abondants, entraîner la mortalité des poissons par asphyxie. La pollution organique présente également un impact sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (Panorama, 2007-2008).

- La pollution par les matières en suspension

Par leur effet obscurcissant, les matières en suspension présentes dans les eaux réduisent la photosynthèse qui contribue à l'aération de l'eau donc les organismes vivants subissent un manque d'oxygène.

Par ailleurs, les matières en suspension dans les rivières peuvent gêner les poissons ou entraîner leur mortalité par bouchage des branchies.

Enfin, elles sont à l'origine des envasements posant ainsi un problème d'entretien des cours d'eau et le colmatage des frayères qui perturbe la reproduction des poissons, par extension les mollusques et les crustacés (Panorama, 2007-2008).

- La pollution toxique

Presque les substances présentes dans les rejets industriels peuvent, même à dose infinitésimale, être dangereuses pour le milieu aquatique et pour l'homme de la baignade ou d'ingestion.

Les origines des pollutions toxiques sont classées en deux groupes suivant :

- les produits d'origine minérale tels que les métaux ou métalloïdes (mercure, cadmium, plomb, arsenic...)
- les produits d'origine toxique (produits de synthèse, dérivés nitrés...)

- La pollution azotée et phosphorée

Généralement, c'est une croissance excessive des algues et plantes dans le milieu récepteur et une consommation supplémentaire de l'oxygène dissous, d'où une dégradation du milieu aquatique (phénomène d'eutrophisation) qui augmente la pollution azotée. Elle a également

un impact sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Le phosphore est lui aussi l'un des facteurs de la prolifération d'algues (Panorama, 2007-2008).

- La pollution microbiologique

Elle correspond à la présence dans l'eau de germes pathogènes pour l'homme ou pour la faune aquatique. Elle provient en général de rejets directs d'effluents contaminés non traités : eaux usées domestiques, ou déjections animales (lisier par exemple). Pour les zones les plus sensibles (notamment zones de ramassage de coquillages), un traitement spécifique des effluents est nécessaire.

Ces différentes pollutions peuvent être liées : une pollution azotée ou phosphorée pouvant entraîner une pollution organique par eutrophisation, ce qui génère des particules organiques et peut être toxique (Panorama, 2007-2008).

3. Conséquences

La pollution de l'eau douce est due aux pesticides utilisés dans l'agriculture pour traiter les champs, mais aussi au déversement des eaux usées directement dans les rivières sans passer par des usines de traitement de pollution. L'eau de pluie ruisselle sur le sol qui l'entraînera dans les rivières. Ces produits s'infiltrent également dans le sol et polluent les nappes phréatiques.

La majorité des victimes se situent en Afrique et en Asie car les eaux usées domestiques et les déchets industriels sont directement rejetés dans les rivières, sans aucun traitement : Dysenteries, choléra, diarrhées aiguës... sont les principales épidémies. Même dans les pays industrialisés, le problème se pose : les nappes phréatiques qui alimentent les eaux potables, sont de plus en plus polluées (pollutions agricoles, animales...) Elles provoquent des diarrhées, des gastro-entérites (Brisou, 1968).

IV. Risques sanitaires liés aux pollutions bactériologiques et aux contaminations chimiques de l'eau

1. Pollutions bactériologiques

L'eau peut porter atteinte à la vie humaine, elle peut renfermer des microorganismes pathogènes et agents d'infections (bactéries, virus, champignons, protozoaires, algues). Ils se transmettent dans l'environnement aquatique par l'intermédiaire de souillure fécale humaine ou animale. Les 3 principaux types de microorganismes qu'on peut retrouver dans l'eau

potable sont des bactéries, virus et des protozoaires. Ils existent à l'état naturel et devient de la contamination par des matières fécales d'origine humaine ou animale. Les maladies infectieuses provoquées par les bactéries représentent une risque sanitaire relative à l'eau, la boisson la plus courante et la plus répandue. La charge de morbidité dépend de la sévérité et de l'incidence des maladies associées aux agents pathogènes, de leur infectiosité et de la population exposée. Dans de nombreux cas, l'issue des maladies s'avère beaucoup plus grave dans des sous-populations vulnérables (OMS, 2017).

Les effets sur la santé de l'exposition à des pathogènes dans l'eau, se manifeste par la survenance d'une maladie d'origine hydrique :

- Troubles gastro-intestinaux (nausée, vomissement, diarrhée) de courte durée.
- Chez les personnes sensibles à effets chroniques voire mortels.

Certains microorganismes impliquent encore des causes importantes de maladies transmises par l'eau lors de défaillances plus ou moins fortes du traitement. On rapporte des foyers dus à *Giardia*, *E.coli*, *Salmonella*, *Shigella*, aux virus des hépatites A, aux virus de *Norwalk*, aux *rotavirus*.

Le tableau 1 correspond à la liste des maladies diarrhéiques liées à l'eau le plus fréquente dans le monde, notamment dans le pays en développement.

Tableau 1 : Maladies diarrhéiques les plus courantes liées à l'eau

Type	Maladies	Agents pathogènes
Bactéries	Dysenterie bacillaire	<i>Shigella</i>
	Fièvre typhoïde, paratyphoïde	<i>Salmonella typhi</i> , <i>Salmonella paratyphie A et B</i>
	Choléra	<i>Vibrio cholerae</i>
	Gastroentérite aigue	<i>E. coli</i>
Virus	Hépatite infectieuse	<i>Hepatite A et B</i>
	Poliomyélite	<i>Polio</i>
	Gastroentérite aigue et diarrhées	<i>Rotavirus, Astrovirus</i>
Protozoaires	Dysenterie amibienne	<i>Entamoeba hystolitica</i>
	Giariase	<i>Giardia spp.</i>
	Gastroentérite	<i>Cryptosporidium</i>

2. Contamination chimiques

a. Bases toxicologies

La présence de substances chimiques dans l'eau peut provoquer des éventuelles troubles de santé, et il convient de rappeler qu'à l'opposé du risque microbiologique qui s'exerce à court terme, le risque chimique est essentiellement à moyen et long terme. Après étude et observation l'OMS a distingué deux types de substance :

- les composés cancérigènes et génotoxiques pour lesquels l'inexistence de risque est improbable voir exclue
- les autres composés pour lesquels aucun effet n'est observé (Payment, 1998).

b. Nitrates

La présence de nitrates dans les eaux et son éventuel effet sur la santé a conduit à une littérature extrêmement abondante...proportionnelle aux enjeux économiques liés à cette pollution. Elle est liée à une pollution croissante par les engrais azotés (épandage de lisiers et azote minéral) et les rejets d'origine humaine (Payment, 1998).

V. Etude bibliographique récente

Ce présent chapitre résumera les résultats des recherches réalisées par divers auteurs. Elles sont effectivement relatives à notre thème de recherche.

a. Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax, Tunisie)

Selon Habib, (2010) dans son étude concernant : «Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un système d'information géographique ». Au niveau de la ville sud de Sfax, la problématique de risque de la pollution est une combinaison de plusieurs facteurs hydrogéologiques et anthropiques en présence des sources de contamination.

Ce travail a pour objectif de déterminer la vulnérabilité de la nappe phréatique de Chaffar. La zone d'étude est située dans la zone côtière au sud de la ville Sfax. Sa superficie est de 470 km² ; caractérisée par un climat semi-aride avec une température annuelle moyenne de 20°C et une précipitation annuelle moyenne de 200 mm. Elle est caractérisée par des activités

économiques importantes, essentiellement agricoles. La région Chaffar a la nappe aquifère multicouche avec deux à trois niveaux réservoirs qui correspondent aux anciens lits des oueds. Sa géologie est caractérisée par : l'extension horizontale formée par des lentilles de sables, de gravier et de sable argileux et verticale limitée. Dans la zone côtière, la profondeur de la nappe est située entre 6 m et 14 m.

Résultats

La carte de vulnérabilité DRASTIC (figure 3) est obtenue par la superposition des sept cartes pondérée. La méthode montre que l'indice DRASTIC calculé varie entre 84 et 172.

Trois degrés de vulnérabilité à la pollution sont étudiés : la vulnérabilité faible, la vulnérabilité moyenne et la vulnérabilité forte.

- la vulnérabilité faible : elle montre que 48% de la zone cartographiée,
- la vulnérabilité moyenne : cette classe occupe presque la moitié de la zone cartographiée soit 48%,
- la vulnérabilité forte : elle ne représente que 4% de la zone cartographiée.

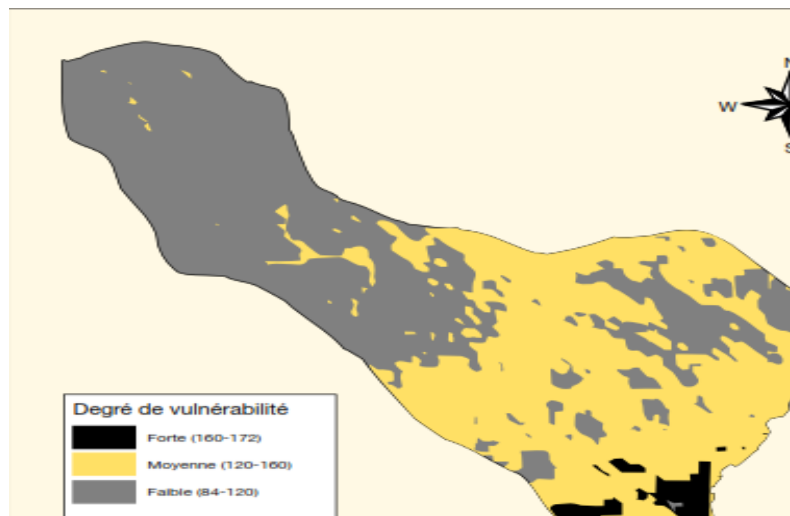


Figure 3 : Carte de vulnérabilité de la Chaffar (Habib, 2010)

b. Cartographie de vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du Bas Cheliff : Application de la méthode DRASTIC

D'après Miguel, (2015) dans son étude concernant « la cartographie de vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du Bas Cheliff (Algérie) ». La qualité de l'eau dans la nappe alluviale du Bas Cheliff est affectée par la pollution de nature anthropique. Or, la majorité de la population se tourne vers cette ressource pour l'approvisionnement en eau potable. Ainsi, la détermination de la vulnérabilité était très importante pour la gestion de cette ressource. L'étude de l'auteur avait pour but de réaliser des cartes de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'eau souterraine.

La zone d'étude est située au Nord-Ouest de l'Algérie, dans la plaine du Bas Cheliff s'étalant sur une superficie d'environ 40 000 ha. La géologie est caractérisée : au nord par des collines composées de marnes et de limons argileux qui changent vers l'ouest en sables et des conglomérats plus grossiers, au sud par des collines comprenant de schistes et de marnes salés, et à l'est par des collines composées de limons calcaires intercalés de sables.

Résultats et interprétations

La carte de vulnérabilité a été élaborée à partir des indices DRASTIC qui variaient de 65 à 166. Trois classes de vulnérabilité ont été donc mises en évidence sur cette carte (figure 6) :

- Classe faible : occupant un petit pourcentage sur la superficie de la carte. Ce degré de vulnérabilité peut s'expliquer par le fait que : la profondeur du plan d'eau est supérieure à 30 m (les contaminants prennent beaucoup de temps pour atteindre la nappe), le sol est de types limoneux et argilo-limoneux (favorisant l'absorption des éléments), et la zone vadose est constituée des limons et argiles (retardant l'infiltration des polluants).
- Classe moyenne : représentant presque la totalité de la plaine. Cette classe peut s'expliquer par le fait de la forte recharge, permettant au contaminant de mieux se solubiliser et atteindre la nappe en plus grande quantité.
- Classe élevée : correspondant à une petite région sur la plaine. La zone vadose constituée des Sables et Gravier, la faible profondeur du plan d'eau, et la forte recharge (plus de 250 m) permettent la migration rapide de contaminant vers la nappe.

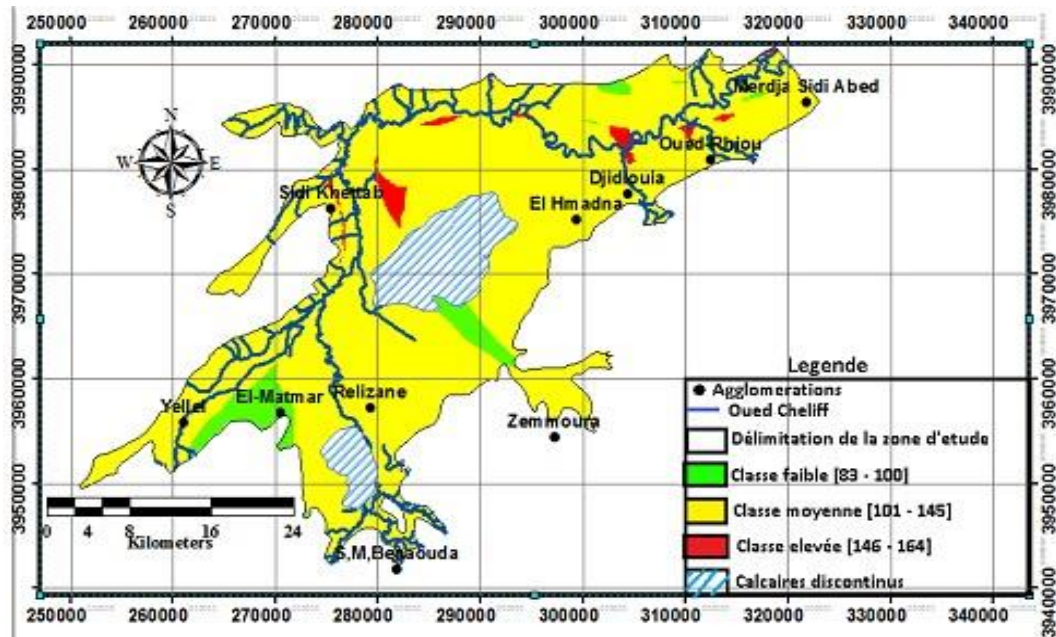


Figure 4 : Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale du bas Cheliff (Miguel, 2015)

MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

I. Contextualisation de la zone d'étude

a. Localisation de la zone d'étude

Les zones d'étude sont composées de trois districts de la région Analamanga : District Antananarivo Renivohitra, IV^{ème} Arrondissement ; District Antananarivo Avaradrano, Commune urbaine Ambohimangakely ; et District Ambohidratrimo, Commune Urbaine Ambohidratrimo (figure 5).

- IV^{ème} Arrondissement

Situé entre 18°54' de latitude Sud et 47° 32' de longitude Est, la commune urbaine est délimitée au Nord par le 1^{er} Arrondissement, au Sud par la commune de Tanjombato, à l'Ouest par la commune Rurale Anosizato, Commune Rurale Bemasoandro et à l'Est par la 2^{ème} Arrondissement. Sa superficie est de 13 Km² contenant 32 Fokontany avec une densité de la population de 16403 habitants. Km⁻² (Monographie du IV^{ème} Arrondissement, 2018).

- La commune Ambohimangakely

Située entre 18°54' de latitude Sud et 47° 36' de longitude Est, la commune Urbaine Ambohimangakely se trouve sur les hautes terres, à la périphérie immédiate de la Capitale, vers l'Est, sur la Route Nationale N°2 dans le District d'Avaradrano avec une distance par rapport à Antananarivo Renivohitra de 8 Km². La commune Rurale Ambohimangakely est délimitée au Nord par la commune Fieferana –Ilafy, au Sud par la commune Antananarivo Renivohitra Ambohimambola, à l'Ouest par la commune Antananarivo Renivohitra et à l'Est par la commune Ambohimalaza. Sa superficie totale est de 53 Km² contenant 17 Fokontany avec une densité de la population de 1314 habitants. Km⁻² (Vololonirina, 2018).

- La commune Urbaine Ambohidratrimo

La commune Urbaine Ambohidratrimo est repérée par les coordonnées suivant : 18°48' de latitude Sud et 47°27' de longitude Est, elle est délimitée au Nord par la commune Rurale Ivato, au Sud par la commune Rurale d'Iarinarivo, à l'Ouest par la commune Rurale D'Anosiala et à l'Est par la commune Rurale de Talatamaty, se situant à 14 Km de la capitale (Antananarivo) suivant la Route Nationale N° 4. Sa superficie totale est de 29 Km² renfermant 9 Fokontany avec une densité de la population de 737 habitants. Km² (Monographie de la commune Ambohidratrimo, 2018).

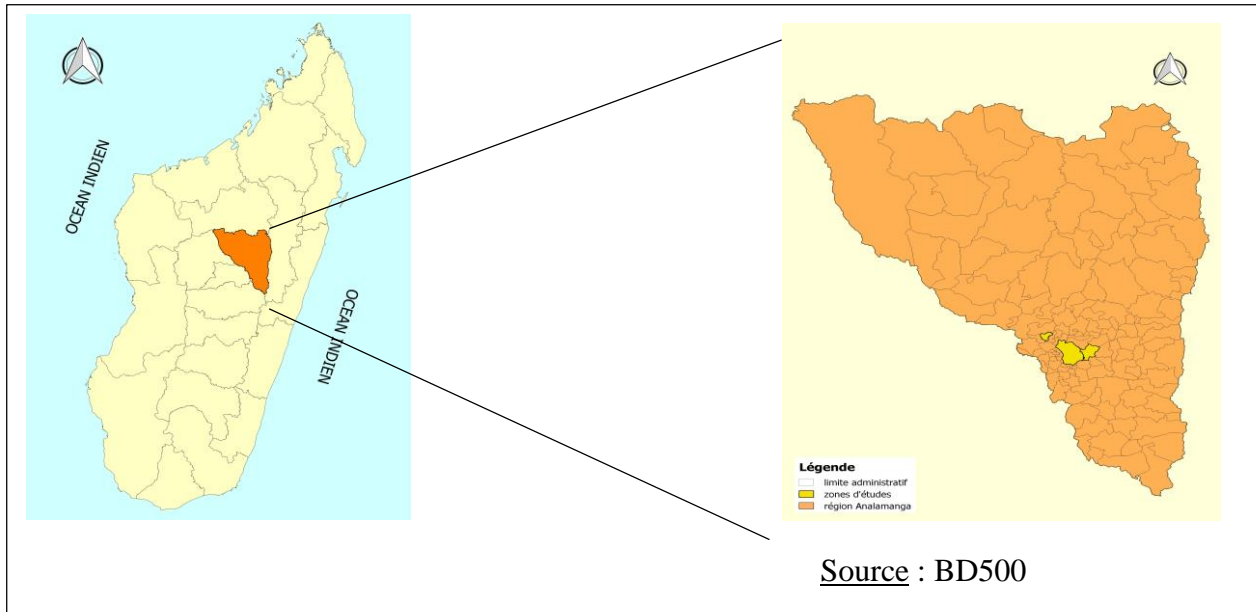


Figure 5 : Localisation de la zone d'étude dans la région Analamanga

b. Contexte physique

- Relief

Antananarivo est caractérisé par sa localisation dans la région des Hauts-plateaux de Madagascar. Son principal trait géomorphologique est l'existence d'une zone en relief composé des collines latéritiques et de zones basses constituées essentiellement par des plaines alluviales, lieux général d'écoulement des rivières, de temps en temps avec des marécages.

Le Centre se caractérise par l'escarpement de faille de l'Angavo et le paysage de colline de l'Imerina Est. A l'Ouest, il y a les plaines d'Antananarivo, dont l'aménagement commençait au temps de la royauté Merina.

Au Nord-est et à l'est, il y a le bassin de Mamba et la rive droite de l'amont de l'Ikopa. Au niveau de cette dernière, le relief est représenté par les plateaux d'Ambohimambola, la pente sud de la colline de Mahatsinjo et les massifs d'Ambohitrimanjaka (1507m) et d'Ambotrakanga (1422 m) dans la commune d'Ambohimangakely.

Les Hauts Plateaux situés au Nord et à l'Ouest dépassent l'altitude de 1 500 m, ils sont séparés par des vastes vallées drainées par deux fleuves, le Betsiboka et l'Ikopa.

Le Sud constitue l'altitude la plus élevée. Ambatolampy est une région volcanique comprenant plusieurs bassins aménagés (Artelia, 2014 ; Miandra, 2015).

- Climat

Antananarivo est une région située au cœur des Hautes Terres, il en résulte que son climat présente des caractères y afférents, mais avec deux saisons bien distinctes. La saison sèche, de Mai à Septembre et la saison humide, d'Octobre à Avril. La saison cyclonique coïncide avec la saison humide (Artelia, 2014).

En saison sèche les températures sont moindres aussi bien l'amplitude diurne. Des pluies fines se présentent parfois. En revanche, durant la saison humide les températures accroissent avec des fortes pluies et une amplitude diurne forte. Le régime hydrologique d'Antananarivo dont la plupart des régions trouve son ressource en eau à la rivière Ikopa et ses affluents semble très influencé par ce contexte.

En période sèche, les cours d'eau sont permanents et en période de pluies, leur débit s'accroît.

Le climat de la zone d'étude se divise en 2 parties comme suit :

- IV^{ème} Arrondissement et Ambohimangakely : noté A et B

La température moyenne annuelle est de 19,58°C. La pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle est de 1400,56 mm avec un nombre de jours de pluie par année de 104,2 jours.

- Ambohidratrimo : noté C

La température moyenne annuelle est de 19,36°C. La pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle est de 1281,38 mm avec un nombre de jours de pluie par année de 100,2 jours.

La figure 7 montre un diagramme-courbe ombrothermique en fonction de la précipitation et la température de la zone d'étude.

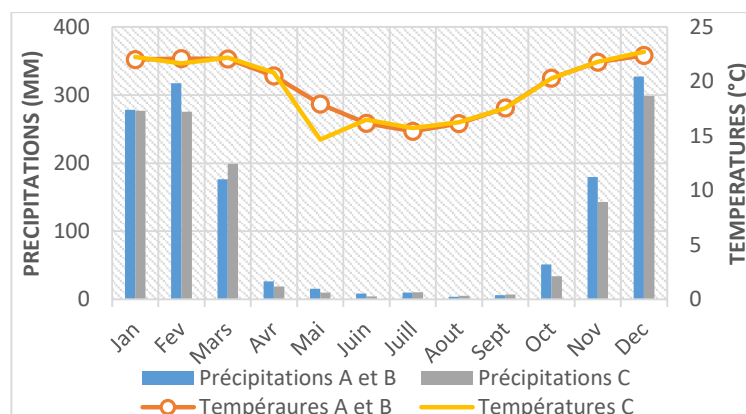


Figure 6 : Diagramme-courbe ombrothermique Source : Station météorologique Ampandrianomby Antananarivo

- Hydrographie

Concernant l'hydrographie, les rivières et fleuves, les lacs et marais constituent les réseaux de surfaces du bassin.

Le réseau principal est constitué par la rivière Ikopa.

Les réseaux secondaires ou affluents sont formés par :

- la Sisaony qui prend sa source dans la falaise de l'Angavo ;
- l'Andromba apparaît dans le massif d'Ankaratra ;
- la Katsaoka en rive gauche de l'Ikopa ;
- la Mamba draine la partie Nord d'Antananarivo en rive droite de l'Ikopa ;
- la rivière Andakana et la Renihirano à Mahitsy dans la partie nord du Bassin Versant.

Il y a trois rivières qui entrent dans la plaine de Tananarive : Varahina-Ikopa, Mamba, Sisaony, qui reçoivent les eaux d'une autre rivière, l'Andromba et son affluent la Katsaoka pour former l'Ikopa à l'aval de la plaine, et qui doivent sortir à un seul endroit au seuil de Bevomanga (Artelia, 2014).

- Pédologie

En matière de pédologie, la Région est marquée par la dominance des deux types de sols suivants :

- La zone colline constituée de sols ferralitiques couvrant une grande partie des régions. Ils sont d'évolutions très diverses, allant des argiles latéritiques, relativement fertiles, jusqu'aux cuirasses des Tampoketsa, imperméables, dépouillées d'éléments utiles, crevassées de « lavaka ». Dans l'ensemble ces sols sont compacts, fragiles, difficiles à travailler. Néanmoins, convenablement amendés.
- la zone basse représentée par les sols hydromorphes et alluviaux, très favorable à l'agriculture, en particulier au riz et aux cultures maraichères et florales mais nécessitent des travaux hydrauliques et de protection contre l'ensablement (Delubag, 1962 ; Miandra, 2015).

c. Contexte géologique

La structure géologique joue un rôle dans la protection de l'eau souterraine. Les couches géologique confèrent à l'eau souterraine ses propriétés spécifiques, et la nature de cette dernière dépend principalement de la lithologie du sol et de l'aquifère qui la contient. Les formations géologiques rencontrées sont de 2 sortes dans la région :

-Les roches magmatiques et métamorphiques sont formées des granites, des gneiss et migmatites.

- Les alluvions de la plaine sont composées d'argile, de tourbes, puis d'argiles sableuses et des sables à la fois.

En zone tropicale les roches métamorphiques et magmatiques sont altérées et présentent toujours le profil-type suivant de haut en bas : latérite, argile latéritique, arène argileuse, arène grenue, socle sain.

La nappe alluviale de la plaine d'Antananarivo est une nappe captive par endroit, mais aussi semi-captive et forme un grand réservoir d'eau. Les altérations favorisent le transport des argiles qui alimentent les débits solides des rivières sous forme de limon (Miandra, 2015).

La carte géologique de la zone d'Antananarivo est donnée par la figure 7 :

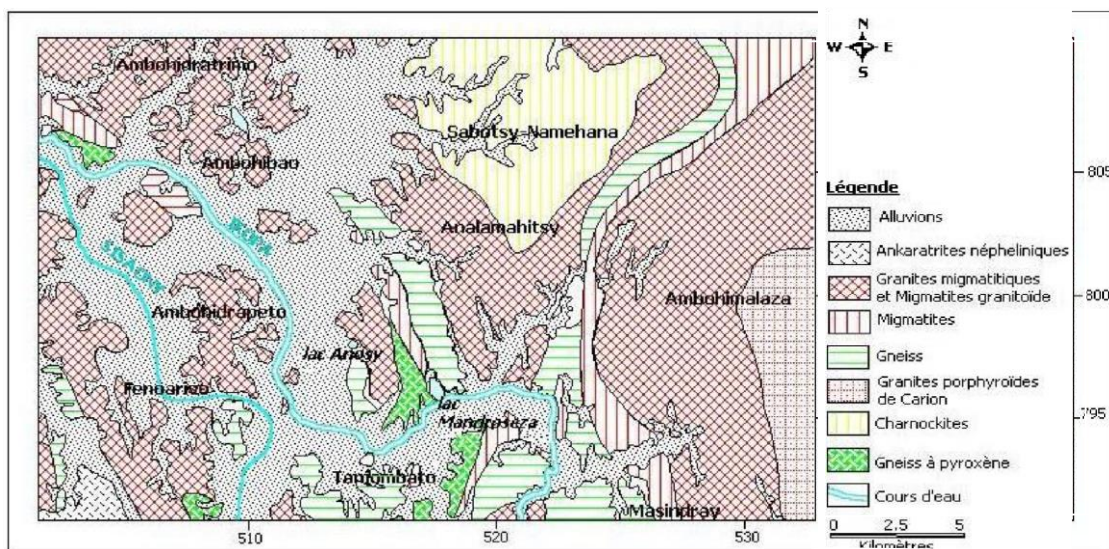


Figure 7 : Carte géologique de la zone d'Antananarivo (RAKOTOVAHOAKA, 2007)

d. Contexte hydrogéologique

L'hydrogéologie est la partie qui traite la circulation des eaux dans le sol et le sous-sol. La circulation d'eau en permanence dans l'atmosphère, sur et sous la terre entraînant un cycle sans fin, est l'origine des nappes d'eau souterraines.

Dans la région d'Antananarivo, les formations latérite et alluvionnaire un aquifère potentiel susceptible d'être exploité :

- Sous les collines latéritiques de haut en bas :
 - ✓ nappe des argiles sablo-kaoliniques, libre
 - ✓ nappes des arènes grenues ou arènes micacés, semi-captive

- Sous la plaine alluviale, on a de haut en bas :

- ✓ les nappes des sables lavés, déposés par la rivière, mais qui est captive ;
- ✓ les nappes des arènes grenues ou arènes micacées, captive.
- ✓ les nappes d'altérations sont dans des aquifères à tendance argileuse (argiles sablo-kaoliniques et arènes micacés).

Mais les plus intéressantes sont la nappe d'altération et la nappe alluviale.

La nappe d'altération joue un rôle de réservoir d'eau pour alimenter la réserve d'eau de la nappe alluviale donc il y a une grande quantité de réserve.

La nappe d'altération peut jouer un rôle important pour l'évacuation des eaux usées car elle a une porosité très élevée.

La nappe alluviale qui est plus ou moins captive contient une grande quantité de réserve d'eau pour l'adduction d'eau potable.

Etant une nappe captive, l'eau est protégée contre la pollution provenant de la surface (Artelia, 2014 ; Miandra, 2015).

Tableau 2 : Données hydrogéologiques de la plaine d'Antananarivo

Type de nappe	Paramètre
Nappes d'alluvions	Débit $Q = 3 \text{ à } 6 \text{ L. s}^{-1}$ par mètre de rabattement Hauteur d'eau : 10 m Profondeur faible Qualité : eau peu minéralisée riche en fer
Eaux superficielles	Débit Q : suffisant Qualité : peu minéralisée, pollution humaine, quelquefois riche en éléments argileux
Nappes d'arènes	Débit $Q = 0,4 \text{ L. s}^{-1}$ par mètre de rabattement Hauteur d'eau : quelques mètres Profondeur faible, Qualité : eau peu minéralisée

Source : Direction de l'Eau (2003).

e. Contexte sociale

- L'aspect sanitaire

Les données utilisées sont recueillies auprès de la Ministère de la Santé d'Antananarivo au Direction des Etudes et des publiques (DEP). Les données obtenues constituent les cas des maladies enregistrés de cinq dernières années (2013 à 2017). Les données statiques de maladie diarrhéique et respiratoire dans les sites A, B et C sont représentées par la figure 8.

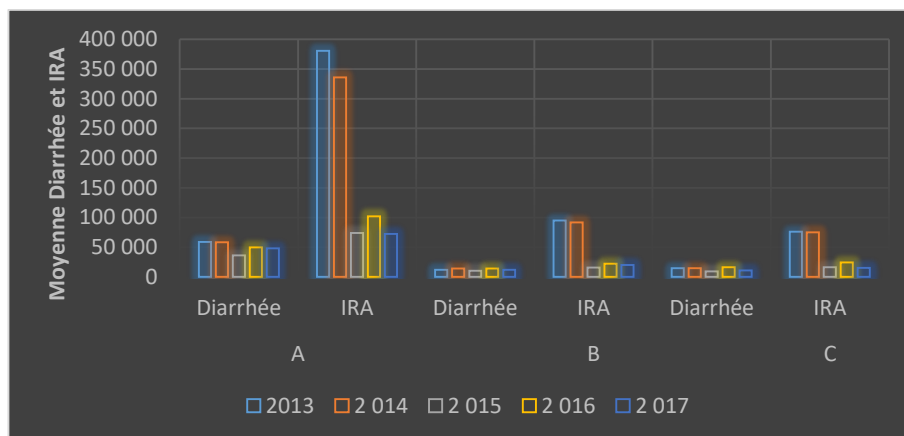


Figure 8 : Maladies diarrhéiques et respiratoires dans les sites A, B et C

D'après cette figure, la diarrhée est la maladie hydrique qui prend la seconde place par rapport au l'infection respiratoire. La diarrhée et l'infection respiratoire (IRA) sont liées à l'eau et à l'environnement. De plus, 90% de la diarrhée aiguë hydrique est habituellement due aux germes non invasifs tels *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, *rotavirus*, *Cryptosporidium parvum*, etc. *L'E.coli* est la cause commune de maladie diarrhéique dans les pays pauvres aussi bien chez l'enfant que chez l'adulte (OMS, 2009). Dans les trois districts étudiés, les enfants d'un à quatre ans sont très victimes des maladies diarrhéiques (les tableaux des maladies hydriques dans l'annexe 2).

II. Collecte des données ; analyses des paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau

A. Collecte des échantillons

La collecte des échantillons a été réalisée lors de la saison humide, plus précisément du mois de mars au mois de mai 2018.

Les échantillons ont été prélevés dans quinze (15) puits, avec géo-référence à l'aide d'un GPS (Tableau 3), répartis dans trois sites A, B et C ou quartiers (Figure 9) en fonction de l'état de leur environnement (en annexe 3), à raison de cinq (5) puits par zone ou quartier. Les puits ont été sélectionnés en tenant compte de leur répartition spatiale et de leur importance quant au nombre de la population utilisatrice ; Il s'est avéré qu'un point d'eau soit plus important que la quantité d'eau puisée étant destinée en tout premier lieu à l'alimentation humaine. Il est à noter que dans la majorité des cas, ces puits sont d'une profondeur variant entre deux et vingt-cinq mètres. Les échantillons d'eau de chaque puits ont été collectés dans des flacons stériles, conservés après à 4°C dans une glacière et transportés au laboratoire pour l'analyse. L'analyse des échantillons a été effectuée au près du Laboratoire d'Hygiène des Aliments et de l'Environnement (L.H.A.E) de l'Institut Pasteur de Madagascar (I.P.M).

Tableau 3 : Localisation des zones d'études

Zones d'études	Points d'eau étudiée (points d'échantillonnages)				
<u>Site A</u> IV ^{ème} Arrondissement 359 843 habitants	A_1 Position : S 18°56'15.2" E 047°31'14.7"	A_2 Position : S 18°56'19.2" E 047°31'10.1"	A_3 Position : S 18°56'25.7" E 047°31'15.4"	A_4 Position : S 18°56'04.2" E 047°31'10.3"	A_5 Position : S 18°56'20.2" E 047°31'01.0"
<u>Site B</u> Ambohimangakely 80712 habitants	B_1 Position : S 18°53'22.3" E 047°33'38.7"	B_2 Position : S 18°53'15.6" E 047°33'41.1"	B_3 Position : S 18°53'17.4" E 047°33'47.7"	B_4 Position : S 18°53'17.4" E 047°33'58.5"	B_5 Position : S 18°53'20.5" E 047°34'12.9"
<u>Site C</u> Ambohidratrimo 368 164 habitants	C_1 Position : S18°49'06.5" E047°25'58.4"	C_2 Position : S18°49'10.8" E047°25'50.1"	C_3 Position : S18°48'41.5" E047°26'25.1"	C_4 Position : S 18°48'35.3" E 047°26'34.5"	C_5 Position : S 18°48'35.7" E 047°26'37.7"



Photo 1 : Quinze puits échantillonnés

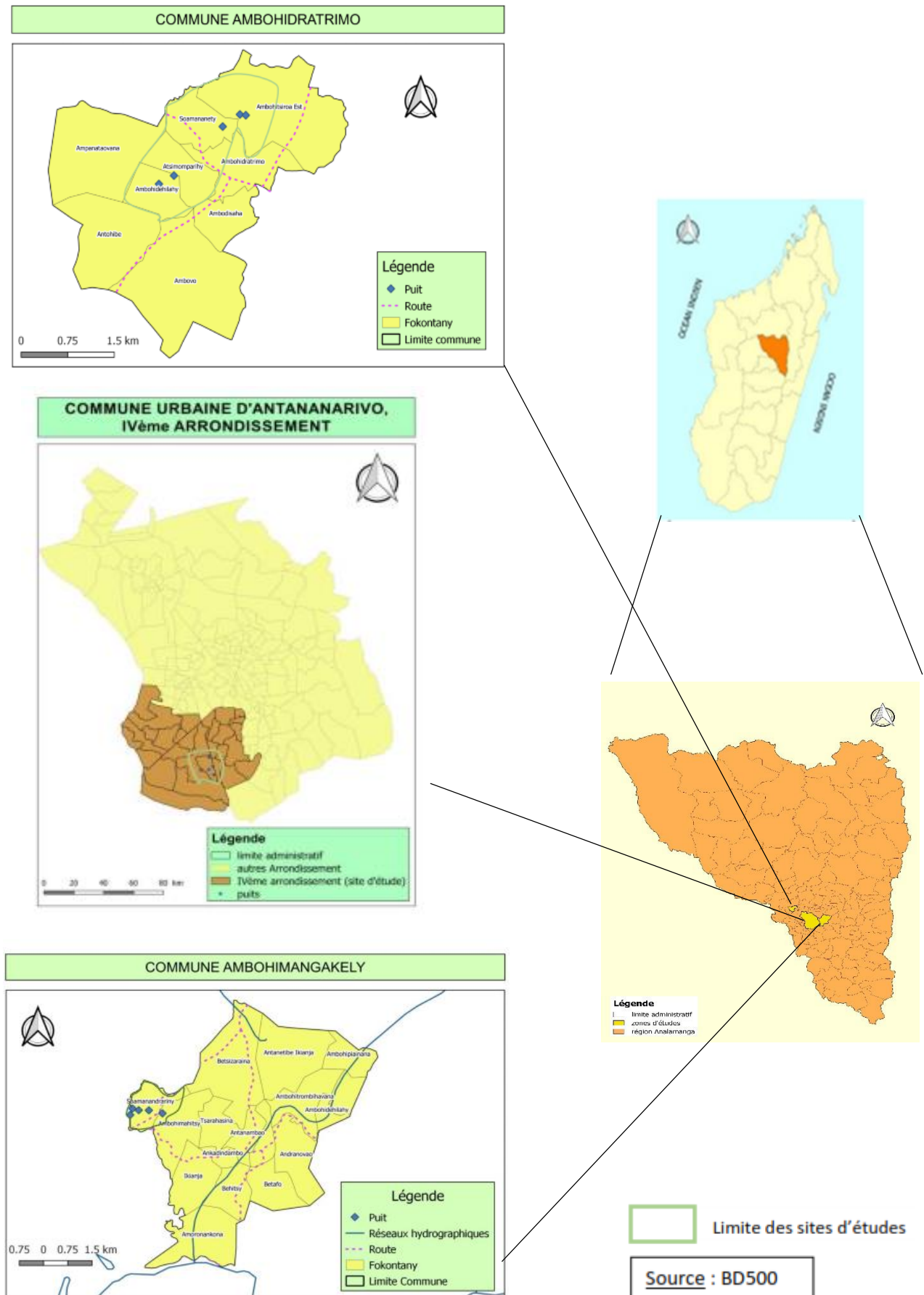


Figure 9 : Quinze points d'échantillonnage

B. Paramètres physico-chimiques de l'eau

1. Paramètres physiques

Les analyses physiques s'effectuent à l'aide d'un pH-mètre, d'un turbidimètre, et d'un conductimètre et d'une lecture directe des résultats. Avant de faire les analyses des paramètres physiques, on doit connaître les paramètres organoleptiques tels que : la couleur, et l'odeur. Ces analyses permettent de comparer les valeurs de chaque paramètre des eaux souterraines du site aux normes exigées par l'OMS pour l'eau potable.

1.1. Paramètres organoleptiques de l'eau

Il s'agit de la couleur et de l'odeur.

a. Couleur

La couleur de l'eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand l'eau est en présence des substances en suspension de leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité (Degremont, 1985). La couleur a été mesurée à l'aide de l'appareil comparateur NESSLER, les modes opératoires en annexe 5 doivent être effectués.

b. Odeur

Elle est l'ensemble des sensations aperçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles. Elle provient des matières organiques en décomposition, produits chimiques, organismes aquatiques présent dans l'eau (Degremont, 1985).

1.2. Paramètres physiques à étudier

a. pH

C'est le potentiel hydrogène contenu dans l'eau. Il mesure la concentration en H^+ d'une solution. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 1 et 14 étant le pH de neutralité. Sa valeur est entre 1 et 14, l'eau est acide si son pH est compris entre $[1 ; 7[$; à un $pH = 7$ elle est neutre et celle qui a un pH au-delà de cette valeur $]7 ; 14$ est dite basique. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteur multiple, dont l'origine de l'eau (RéFEA).

Le pH peut être calculé par la relation $pH = -\log [H_3O^+]$ mais on peut facilement le mesurer par un pH-mètre.

b. Turbidité

La turbidité est un paramètre mesurant le degré de limpidité d'une eau. Elle est due à la présence des particules en suspensions et des matières colloïdales dans l'eau (argile, débris organiques, microorganismes...) (Lanteigne, 2003).

Les différentes classes de turbidité sont :

- $NTU < 5$: eau claire
- $5 < NTU < 30$: eau légèrement trouble
- $NTU > 50$: eau trouble

La turbidité est mesurée par un appareil appelé turbidimètre accompagné d'un flacon. Son unité est le NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

c. Conductivité

La conductivité donne une idée de la minéralisation d'une eau et est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau (Hceflcd, 2006).

La conductivité est mesurée par un conductimètre. Il suffit d'allumer l'appareil et de plonger l'électrode dans l'eau, après quelque temps sa valeur est affichée sur l'écran.

La conductivité de l'eau résultent de plusieurs origines : la dissolution des sels minéraux due au lessivage des terrains, les effluents agricoles, et les eaux usées industriels et domestiques. Pour l'eau de source, sa valeur est souvent en micro siemens par centimètre ($\mu S.cm^{-1}$) mais pour l'eau usée, elle est dans la gamme de milli siemens par centimètre ($mS.cm^{-1}$).

d. MES

Les MES sont les matières organiques ou minérales en suspension c'est-à-dire les matières insolubles dans l'eau. Les MES dans l'eau proviennent de diverses origines : les précipitations, les déchets, la nature des rejets industriels et les régimes d'écoulement des eaux (Rodier, 1984). Les MES sont déterminées par filtration sur des membranes à $0,45 \mu m$ de diamètre de pore. La teneur en MES est déterminée par différence de poids du filtre avant et après filtration et séchage à l'étuve à $105^{\circ}C$ pendant 4 h.

Elles sont exprimées en milligramme par litre ($mg.L^{-1}$). Pour mesurer les MES les modes opératoires en annexe 5 doivent être effectués.

2. Paramètres chimiques de l'eau

Les principaux paramètres chimiques à analyser sont : salinité, matière organique, TA, TAC, oxygène dissous, nitrate, nitrite, ammonium, chlorure, dureté totale, phosphore totale, orthophosphate.

a. Salinité

La salinité représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Il est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans l'eau incluent le calcium, magnésium, potassium, et sodium sont tous des cations et des carbonates, nitrates, bicarbonate, chlorures, et les sulfates sont des anions (Barijaonarivelo 2013).

b. Matière organique

Les matières organiques constituent des combinaisons organiques provenant du métabolisme végétal et animal et des substances chimiques diluées dans l'eau suite à une décomposition incomplète des déchets végétaux (Barijaonarivelo 2013).

Elle mesurée en milieu alcalin la quantité d'oxygène enlevée au permanganate par les matières organiques d'origine animale ou végétale contenue dans l'eau. L'oxydabilité des matières organiques au permanganate est exprimée en mg. L^{-1} d'oxygène. La mesure de la matière organique est décrite en annexe 5.

c. Alcalinité

L'alcalinité est liée à la présence d'ions Carbonates (CO_3^{2-}), Hydroxydes (HO^-), et Hydrogénocarbonate (HCO_3^-). Le Titre Alcalimétrique (TA) et le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) traduisent l'alcalinité d'une eau. La connaissance de ces valeurs est essentielle pour l'étude de l'agressivité d'une eau puisqu'ils dépendent de l'équilibre calco-carbonique (Sciences physiques en BTS).

Les valeurs fixées de son titrages de l'échantillon à l'aide d'une solution acide étalonnée sont obtenues des points de virage de 8.3 à 4.5. Le point de virage pH 8.3 s'approche par approximation des concentrations équivalentes de carbonate et de dioxyde de carbone et représente le titrage d'environ tout l'hydroxyde et de la moitié du carbonate présent (alcalinité composite) et le point de virage pH 4.5 s'approche par approximation de point d'équivalence pour les ions hydrogènes et hydrogénocarbonate et permet la détermination de l'alcalinité totale.

Dans les eaux potables, la concentration en HO^- étant faible et donc négligeable, l'alcalinité de l'eau est constituée des seuls HCO_3^- ou d'un mélange CO_3^{2-} et HCO_3^- . La mesure de la TAC et TA est décrite en annexe 5.

d. Oxygène dissous

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que les pressions partielles d'oxygène dans le liquide et dans l'air soient en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique (donc de l'altitude), de la température, et de la minéralisation de l'eau : la saturation en O₂ diminue lorsque la température et altitude augmentent. La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de la photosynthèse (RéFEA).

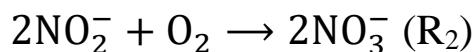
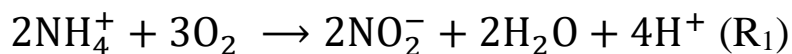
L'oxygène dissous est un paramètre utile dans le diagnostic biologique du milieu eau.

Il est mesuré par un oxymètre dans la salle de traitement avec température 20°C de son unité en milligramme par litre (mg. L⁻¹). Allumer l'appareil et plonger l'électrode dans l'eau. Après quelques temps sa valeur est affichée sur l'écran.

e. Nitrate

Les nitrates sont des sels très solubles dans l'eau. La pollution de provenance agricole comme les engrais, domestique comme excréta ou industrielle dans l'eau, marque la présence de nitrate (Bontoux, 1983). Cela signifie que l'eau est polluée en matière organique. Ils peuvent être dus par une réaction d'oxydation complète de l'ammonium en présence d'un catalyseur enzymatique relié à des bactéries dans les sols et dans l'eau. Le nitrate a été mesuré à l'aide de Palintest en annexe 5.

Selon la réaction chimique :



R : Réaction

f. Nitrite

Les nitrites constituent l'étape réalisant le passage des ions ammonium (NH₄⁺) en nitrates. Ils sont rencontrés dans la mesure où il existe un déséquilibre au niveau de l'oxygénation ou de la flore bactérienne.

Ils peuvent aussi se former à partir d'une réduction des nitrates ou à d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque (Bengoumi et al. 2004). La réaction des ions nitrites présents dans une prise d'essai à pH 1 à 9 avec le réactif amino-4 benzène sulfonamide en présence d'acide orthophosphorique pour former un sel diazoïque, qui forme un complexe de coloration rose avec le dichlorhydrique de N-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane. Le nitrite a été mesuré à l'aide de spectrophotomètre annexe 5.

g. Ammonium

L'ion ammonium de formule brute NH_4^+ est un ion polyatomique de charge électronique positive. L'ammonium provient de la réduction des nitrates, de la dégradation incomplète de la matière organique, de l'activité agricole, et des rejets urbains et industrielles (Gilliam et al, 1974).

En milieu alcalin et en présence de nitroprussiate, qui agit comme un catalyseur, les ions ammonium traités par un indicateur de phénolphthaléine donnent du bleu d'indophénol susceptible d'un dosage colorimétrique. L'Ammonium a été mesuré à l'aide de spectrophotomètre annexe 5.

h. Chlorure

Le chlorure compte parmi les ions classés comme ions majeurs contenus dans l'eau naturelle, leurs teneurs sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversée par l'eau. Une teneur élevée en chlorure de l'eau alimentaire entraîne une saveur désagréable surtout lorsqu'il s'agit de chlorure de sodium et provoque aussi une corrosion dans les canalisations et les réservoirs d'eau. Ils dosé par la méthode de titrimétrie de Mohr avec le Chromate de potassium et le Nitrate d'argent. L'origine du chlorure dans l'eau peut être naturelle : de la percolation à travers des terrains salés, infiltration des eaux marines dans les nappes phréatiques et profondes, effet de l'activité humaine, industries extractives et dérivées (soudières, salines, mines potasse, industries pétrolières...) (Achour et Guergazi, 2002). La mesure de la Chlorure est décrite en annexe 5.

i. Dureté totale

Titration molaire des ions calcium et de magnésium dans l'eau avec une solution d'EDTA à pH 10 en présence de noir ériochrome T. En fonction de leur dureté, définie par le titre hydrotimétrique (*TH*). Elle résulte principalement du contact des eaux souterraines avec les formations rocheuses : Le calcium dérive de l'attaque par le dioxyde de carbone dissout des

roches calcaires ou de la dissolution sous forme de sulfate dans le gypse. La dureté d'une eau naturelle dépend de la structure géologique des sols traversés (Berne et Donnier, 1991). La mesure de la Dureté totale est décrite en annexe 5. On peut la classer suivants les indicateur dans le tableau 4 suivant :

Tableau 4 : Classification de valeurs pour la dureté d'une eau

Dureté	0 à 6	6 à 15	15 à 30	supérieur à 30
Eau	très douce	Douce	moyennement dure	très dure

j. Phosphore total

Le phosphore total est la somme des espèces phosphoriques (phosphore organique, orthophosphate, polyphosphate) présent dans l'eau.

Les phosphates sont généralement responsables de l'accélération du phénomène d'eutrophisation dans les lacs ou les rivières. S'ils dépassent les normes, ceux-ci sont considérer comme indice de contamination fécale entrainant une prolifération des germes, goût et coloration. Ils proviennent de l'utilisation des engrais, des rejets industriels, et des rejets domestiques (déjections humaines, détergents, lessives).

Le phosphore total est déterminé par la minéralisation en milieu acide, en présence de persulfate de potassium ($K_2 S_2 O_8$) 100°C pendant trente minutes, le complexe phosphomolybdique qui se réduit par l'acide ascorbique en un complexe de coloration bleue dont l'intensité est déterminée par spectrophotométrie en annexe 5 (Achak, 2008).

k. La demande chimique en oxygène (DCO)

Elle a été déterminée par une ébullition à reflux d'un échantillon en milieu acide en présence de dichromate de potassium ($K_2 Cr_2 O_7$), d'acide sulfurique ($H_2 SO_4$) et sulfate d'argent ($Ag_2 SO_4$). L'excès de dichromate de potassium. La demande chimique en oxygène représente la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables chimiquement contenues dans l'eau. Elle est représentative de la majeure partie des composés organiques mais également des sels minéraux oxydables (sulfures, chlorures...etc) (Berrahou, 2011). La mesure de la DCO est décrite en annexe 5.

I. Demande biochimique en oxygène(DBO)

La demande biochimique en oxygène est la quantité d'oxygène dissous consommée par les micro-organismes, à l'obscurité à 20 °C pendant 5 jours, dans un flacon entièrement rempli et fermé. Pour déterminer la concentration en oxygène dissous avant et après incubation. Il permet l'évaluation des matières organiques biodégradables (Berrahou, 2011). Elle exprime en mg.L^{-1} d' O_2 consommé, les différentes classes de DBO sont :

- > 1 : Eau naturelle pure et vive
- $1 < c < 3$: Rivière légèrement polluée
- $20 < c < 40$: rejet station d'épuration efficace
- $100 < c < 400$: Egout

La mesure de la DBO est décrite en annexe 5.

C. Paramètres microbiologiques de l'eau

Les deux méthodes différentes utilisées pour les analyses microbiologiques sont : la méthode du nombre le plus probables (NPP) utilisée pour le coliformes totaux (CT), *l'Escherichia coli* (*E. coli*) et Entérocoques intestinaux (ENTERO) ; la méthode par filtration utilisée pour les microorganismes Anaérobies sulfite-réducteurs (ASR) et de *Salmonella*. Pour mesurer les paramètres microbiologiques, les modes opératoires en annexe 6.

a. CT et *E. coli*

Les CT et *E. coli* sont des bactéries lactose-positive et oxydase négative. Ce sont des bactéries pouvant former des colonies en aérobiose à $36 \pm 2^\circ\text{C}$ sur une gélose lactose sélective et différentielle avec une production d'acide dans les 21 ± 3 heures.

Les *E. coli* sont des coliformes capables de produire l'indole à partir de tryptophane dans les 21 ± 3 heures à $44 \pm 1^\circ\text{C}$.

b. Entérocoques intestinaux

Ce sont des bactéries capables de réduire le chlorure de 2, 3, 5-Triphényltétrazolium en Formazan et d'hydrolyser l'Esculine à 44°C sur des milieux spécifiés.

c. ASR

Ce sont des bacilles Gram positif anaérobies strict au genre *Clostridium* et à la famille de Bacillaceae. Ils forment des spores sulfito-réducteurs.

III. Analyses statistiques des données hydro-chimiques (statistique descriptive)

Les analyses statistiques des données hydro-chimiques sont basées sur la description quantitative (le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart – type et la matrice de corrélation) des paramètres.

Le minimum et le maximum représentent la plus grande et la plus petite valeur de concentration d'un paramètre dans l'échantillon.

La moyenne arithmétique d'une série quantitative est définie par la somme des valeurs observées, divisée par l'effectif total.

L'écart-type correspond à la racine carrée de la variance observée.

La matrice de corrélation est une matrice carrée caractérisée par un coefficient de corrélation qui peut être utilisé pour distinguer la relation entre deux paramètres (Zamiche, 2017). La méthode statistique en annexe 7.

IV. Etude de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine de la zone d'étude

L'étude de vulnérabilité à la pollution de l'eau souterraine est une méthode qui permet d'identifier les régions plus affectés à la contamination dans un aquifère donné.

a. Présentation de la différente méthode pour l'évaluation de vulnérabilité

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer cette vulnérabilité (tableau 5) : DRASTIC, GOD, et AVI...

Tableau 5 : Différentes méthodes pour l'estimation de la vulnérabilité

<div>Méthodes</div> <div>Paramètres</div>	DRASTIC (Aller 1987)	GOD (Foster 1987)	AVI (Stempvoot 1992)
Topographie	X		
Epaisseur	X	X	X
Recharge	X		
Zone non saturée	X	X	X
Profondeur de la nappe	X	X	
Zone saturée	X	X	
Conductivité hydraulique	X		X

Selon ces méthodes, la méthode DRASTIC a été utilisée pour évaluer la vulnérabilité à la pollution de la nappe d'eau souterraine de la ville d'Antananarivo. Cette méthode peut donner des résultats exacts en raison qu'elle tient compte le maximum de paramètre (7 paramètres), permet d'obtenir une information plus au niveau de la représentation de la vulnérabilité et considère le comportement du polluant depuis la surface du sol jusqu'à la zone saturée ainsi que l'infiltration d'une eau de précipitation (Miguel, 2015).

b. Présentation des paramètres et de la note de vulnérabilité de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été développée par Aller (1987), sous l'égide de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement USEPA. C'est une méthode paramétrique qui permet de :

- Evaluer la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères ;
- Déterminer le degré de vulnérabilité et le polluant potentiel des eaux souterraines en vue de les gérer ;
- Obtenir la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'eau souterraine.

Les paramètres utilisés dans la méthode DRASTIC sont :

- **Epaisseur de la zone non saturée (de la zone vadose) ou profondeur de la nappe (D) :** Il permet de prendre en compte l'impact de la zone non saturée (ZNS) et représente la distance verticale traversée par un contaminant à la surface du sol pour atteindre la nappe. La ZNS est une partie du sous-sol située entre la surface du sol et le toit de la nappe.
- **Recharge efficace (R) :** La recharge de l'aquifère est le principal vecteur des contaminants vers les eaux souterraines. Ce paramètre représente quantité d'eau de précipitation qui atteint l'aquifère. Le contaminant peut mieux se solubiliser, et atteindre la nappe en plus grande quantité quand la recharge est grande.
- **Les matériaux de l'aquifère (zone saturée (A)) :** Une nappe aquifère est une formation géologique, ou groupe de formations, contenant de l'eau libre. La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépend de la texture et de la lithologie des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, la perméabilité, et la lithologie des formations géologiques.
- **Le type de Sol (S) :** La nature du sol a un impact considérable sur la contamination de nappe d'eau souterraine par les polluants provenant de la surface. Ce paramètre peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.
- **La Topographie ou la Pente (T) :** La topographie est représentée par des valeurs de la pente en pourcentage. Ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe. Il indique si un polluant restera à la surface ou fuira pour s'infiltrer vers la nappe. Effectivement davantage la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et la contamination des eaux souterraines est faible.
- **L'impact de la zone vadose ou zone non saturée (I) :** La zone vadose est définie comme la fraction entre la nappe et la surface du sol où les pores sont partiellement saturés en eau. La perméabilité de cette zone contrôle la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe. La plupart des processus physico-chimiques qui ont lieu dans cette zone sont influencés par son épaisseur. L'infiltration et la dispersion des contaminants sont guidées par les caractéristiques lithologiques des couches qui contrôlent leurs chemins et leurs trajectoires en subsurface.
- **La perméabilité ou la Conductivité hydraulique de l'aquifère (C) :** La conductivité hydraulique désigne la capacité des formations géologiques de l'aquifère à transmettre de l'eau. Il s'agit d'une mesure de la vitesse de déplacement du polluant dans la zone saturée. Ainsi, les vitesses d'écoulement souterrain fortes sont caractérisées par une grande vulnérabilité.

La figure 10 résume les 7 paramètres DRASTIC.

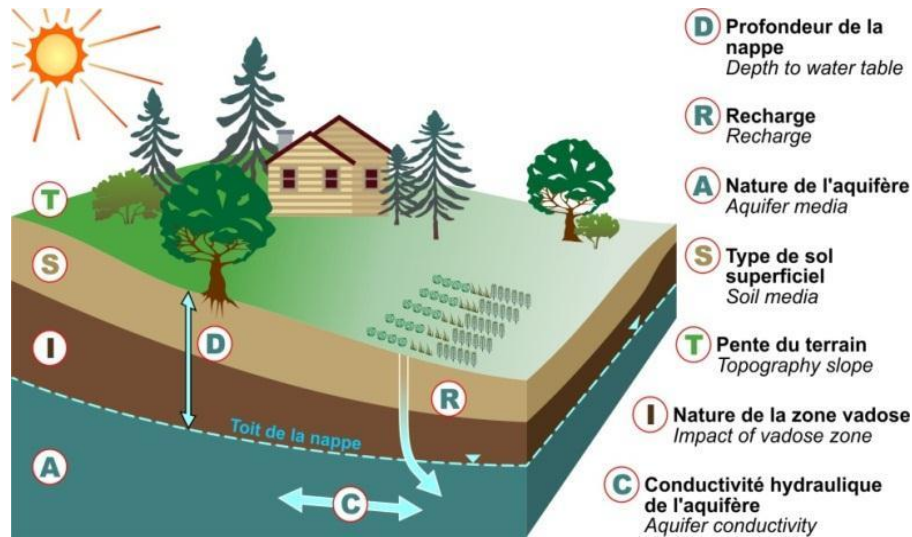


Figure 10 : Sept paramètres DRASTIC Source : GSC, 2009

L'indice de vulnérabilité est égal à la somme des produits (notes * poids) des sept paramètres DRASTIC selon l'équation :

$$ID = (n_D * P_D) + (n_R * P_R) + (n_A * P_A) + (n_S * P_S) + (n_T * P_T) + (n_I * P_I) + (n_C * P_C)$$

P: Poids (pondération) du paramètre.

n: Note ou coefficient des paramètres.

La note **n** comprise entre 1 à 10, elle parle l'importance de la vulnérabilité de la nappe à la pollution. Pour un paramètre donné, si la note faible implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et si la note forte montre que la nappe concernée est très vulnérable à la pollution.

Une valeur numérique appelée poids (**P**) paramétrique, varie entre 1 et 5, est attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence dans les processus de transport et d'atténuation des contaminants. Un paramètre prépondérant est affecté d'un poids égal à « 5 » alors qu'un paramètre ayant moins d'impact sur le devenir d'un contaminant se voit assigner un poids de « 1 ».

Le tableau 6 et le tableau 7 suivants représentent respectivement les poids et les classes notées pour chaque paramètre DRASTIC (Aller, 1987).

Tableau 6 : Poids de chaque paramètre

Symbole	Paramètres	Poids
D	Profondeur de la nappe	5
R	Recharge de la nappe	4
A	Nature lithologique de l'aquifère	3
S	Nature du Sol	2
T	Topographie	1
I	Impact de la zone non saturée	5
C	Conductivité hydraulique(Perméabilité)	3

Tableau 7 : Notes accordées aux paramètres DRASTIC

(D) : Profondeur de la nappe		(R) : Recharge efficace	
Classes en m	Notes	Classes	Notes
0 - 0,5	10	0 – 100	1
0,5 - 1,0	9	100 - 350	3
1,0 - 2,0	8	350 - 700	5
2,0 - 3,0	7	700 - 800	8
3,0 - 5,0	6	> 800	9
5,0 - 10	5		
10 – 23	3		

(A) : Nature de la zone saturé			(S) : Nature du sol	
Classes	Notes	notes typiques	Classes	Notes
Métamorphique	2 à 5	3	Gravier	10
Métamorphique (Altéré-grès)	2 à 5	6	Sols des minéraux bruts ou sableux	9
Sable limoneux	2 à 9	6	Sols hydromorphes	6
Calcaire massif	4 à 9	8	Limon sableux	6
Sable et grès	4 à 9	8	Sols gypseux	3
Basalte	2 à 10	9	Sols halomorphes	2
(I) : Lithologie de la couche vadose			(T) : Topographique (pente)	
Classes	Notes	notes typiques	Classes	notes
Silt et argile	2 à 6	3	0 à 2	10
Calcaire	2 à 5	3	2 à 5	9
Sables dunaires	4 à 8	6	5 à 10	5
Sable et gravier	4 à 10	8	10 à 20	3
Basalte	2 à 10	9	≥ 20	1
(C) : Conductivité hydraulique				
Classe ($m \cdot s^{-1}$)	Notes	Lithologie	Perméabilité ($m \cdot s^{-1}$)	
$1,5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$	1	Gravier	$10^{-2} - 10^{-4}$	
$5 \cdot 10^{-5} - 1,5 \cdot 10^{-4}$	2	Sable et grès	$10^{-7} - 10^{-4}$	
$1,5 \cdot 10^{-4} - 3,3 \cdot 10^{-4}$	4	Sable limoneux	$10^{-8} - 10^{-4}$	
$3,3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$	6			
$5 \cdot 10^{-4} - 9,5 \cdot 10^{-4}$	8			
$\geq 9,5 \cdot 10^{-4}$	10			

L'indice de vulnérabilité DRASTIC d'un aquifère peut varier entre « 23 et 226 », soit des degrés de vulnérabilité allant de très faible à très élevé, selon la classification proposée par le guide technique de captage d'eau souterraine pour des résidences isolées (MDDEP, 2008).

La relation entre l'indice et le degré de vulnérabilité est donnée par le tableau suivant :

Tableau 8 : Relation entre indice et degré de vulnérabilité

Indice DRASTIC	Degré de vulnérabilité
Moins de 90	Très faible
De 90 à 120	Faible
De 120 à 130	Moyen
De 130 à 140	Elevé
De 140 à 150	Plus élevé
Plus de 150	Très élevé

c. Cartographie de la vulnérabilité

L'élaboration de la carte de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine de la ville d'Antananarivo s'est effectuée par le calcul de l'indice de vulnérabilité **ID**, la réalisation par la méthode DRASTIC et à l'aide du logiciel Arc GIS. Ce logiciel permet d'intégrer et de répartir dans l'espace tous les scores pondérés et attribués aux sept paramètres. Plusieurs étapes ont été faites pour élaborer cette carte : la collecte des données, la numérisation des données, le calcul des scores, l'attribution des scores pondérés, le calcul de l'indice de vulnérabilité, l'élaboration de la carte indice de vulnérabilité, la classification ainsi que l'élaboration de la carte de vulnérabilité.

RESULTATS

CHAPITRE III : RESULTATS

Les eaux souterraines dans les formations de la nappe latérite et de la nappe alluvionnaire de la plaine d'Antananarivo sont exploitées à travers l'utilisation des puits. Ces eaux, non traitées, sont destinées à tous les usages. Quinze points d'eau, dans les trois quartiers populaires de la ville, ont fait l'objet de ce travail. Afin de gérer ces ressources en eau de façon durable, il est donc fondamental de connaître leur qualité physico-chimique et microbiologique. La qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines a été évaluée par rapport aux normes de potabilité exigées par l'OMS en annexe 4.

I. Environnement physique dans la zone de prélèvement

L'observation de l'environnement dans tous les quinze puits étudiés est polluée et mal protégés, vu les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques dans l'annexe 4, cette situation est due à l'exposition de leur eau à des sources de pollution importante qui implique la nature même du sol. Ils ont été réalisés, pour la plupart pour les infrastructures autour des puits sont vétustes et en manque. Les puits sont entourés par des canaux d'évacuation d'eau usée précaire. Les canaux ne sont pas faits en béton, alors que le sol est perméable et la recharge de la nappe se fait par infiltration. Dans ce cas, toutes les pollutions apportées par ces eaux usées, s'infiltrant dans les nappes et arrivent jusqu'au puits. Les puits sont entourés de zone du champ, alors tous les produits chimiques utilisés comme les engrais s'infiltrant dans le sol et arrivent dans les puits.

Une grande partie de la pollution de l'eau est attribuée à la mauvaise protection des puits pour la technique de puisage. Les seaux de puisage sont généralement déposés parois au sol, la corde à même le sol chez certains ; ailleurs le seau de puisage n'est pas unique. Dans la zone d'étude la partie du IVème Arrondissement les eaux des puits sont très polluées à cause de l'inondation surtout en période de pluie, et se trouve non loin du canal d'Andriantany.

Les sanitaires constitués de fosses septiques et de puisards à fond perdu, les ordures ménagères enfouis et éparpillés. Les eaux usées des ménages sont déversées soit directement dans la rue devant les maisons ou dans la cour même de la maison, pas très loin de la source d'eau. Des animaux domestiques en divagation sont observés dans la cour de certaines maisons. Chaque site de prélèvements caractérisés par la faible distance entre les latrines et les puits. Les

tableaux dans l'annexe 3 montrent quelques points d'eau étudiés et leur environnement respectifs et l'usage.

I. Résultats des paramètres physico-chimiques et microbiologiques

A. Caractères physico-chimiques de l'eau souterraine

Le tableau 9 montre les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines.

Tableau 9 : Résultats des analyses physico-chimiques

SITE		A			B			C		
Paramètres	Unité	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type
Couleur	mg.L ⁻¹ de Pt	10	120	51 \pm 42,24	5	10	6 \pm 2	5	25	9,8 \pm 7,76
pH	-	6,06	6,48	6,2 \pm 0,14	4,68	6,02	5,66 \pm 0,5	5,52	6,13	5,76 \pm 0,21
Cond	µs.cm ⁻¹	727	1572	1063,8 \pm 376,68	174,9	914	415,18 \pm 265,75	15,4	365	114,22 \pm 129,94
Turb	NTU	0,7	19,7	7,54 \pm 7,44	0,22	3,85	1,09 \pm 1,38	1,64	16,83	5,08 \pm 5,89
Salinité	mg. L ⁻¹	8,57	20	13,14 \pm 5,6	0	11,43	3,43 \pm 4,2	0	2,85	0,57 \pm 1,14
MO	mg. L ⁻¹	1,1	2,9	2,08 \pm 0,63	1	1,9	1,52 \pm 0,29	1,5	2,4	2,14 \pm 0,34
OD	mg. L ⁻¹	7,17	7,98	7,49 \pm 0,33	7,65	7,79	7,69 \pm 0,05	7,2	7,94	7,69 \pm 0,28
TA	°F	0	0	0 \pm 0	0	0	0 \pm 0	0	0	0 \pm 0
TAC	°F	17	76	34 \pm 21,28	2	10	6 \pm 3,3	1	3	2,2 \pm 0,75
Ammonium	mg. L ⁻¹	0,02	0,4	0,18 \pm 0,15	0,01	0,6	0,22 \pm 0,24	0	0,3	0,13 \pm 0,11
Chlorure	mg. L ⁻¹	109	195	143,08 \pm 29,69	16,7	86,9	45,32 \pm 24,68	3,5	35,8	11,76 \pm 12,28
TH	°F	4	7	5,76 \pm 0,99	8	20,2	13,84 \pm 4,94	0,8	17	6,44 \pm 6,58
Nitrate	mg. L ⁻¹	0,48	9,85	5,42 \pm 3,23	22,4	47,1	38,66 \pm 8,75	2,5	44	25,7 \pm 16,14
Nitrite	mg. L ⁻¹	0,03	0,16	0,07 \pm 0,05	0,01	0,41	0,13 \pm 0,15	0,04	0,08	0,05 \pm 0,01
Ortho	mg. L ⁻¹	0,03	0,12	0,06 \pm 0,03	0,018	0,074	0,04 \pm 0,02	0,011	0,1	0,04 \pm 0,03

Tableau 9 : Résultats des analyses physico-chimiques

SITE		A			B			C		
Paramètres	Unité	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type
PT	mg. L ⁻¹	0,02	0,17	0,06 \pm 0,06	0,01	0,36	0,1 \pm 0,13	0,031	0,095	0,05 \pm 0,02
MES	mg. L ⁻¹	10,2	28,5	18,44 \pm 6,11	1	1,9	1,52 \pm 0,29	1,8	47,9	11,94 \pm 18,01
DCO	mg. L ⁻¹	53	110	80,12 \pm 21,21	23	55	42,6 \pm 11,04	19	118	51 \pm 36,2
DBO5	mg. L ⁻¹	19,3	44,2	28,82 \pm 8,66	11,6	22,6	17,44 \pm 4,35	10	21,4	14,4 \pm 4,46

Cond : Conductivité ; **Turb** : Turbidité ; **OD** : Oxygène dissous ; **Ortho** : Orthophosphate ;
PT : Phosphore total **MO** : Matière organique

a. Couleur

Après le prélèvement, l'aspect des échantillons varie entre la couleur limpide à légèrement jaunâtre.

Dans le site A : les valeurs des eaux échantillonnées se trouve entre 10 mg. L⁻¹ et 120 mg. L⁻¹ (moyenne = 51 \pm 42,24). Les eaux de puits sont ainsi de couleur jaunâtre à l'exception du puits A₁ (Couleur=10 mg. L⁻¹).

Dans le site B : les valeurs des eaux échantillonnées se trouve entre 5 mg. L⁻¹ et 10 mg. L⁻¹ (moyenne = 6 \pm 2). Les valeurs des échantillons du site B ne dépassent pas la norme de l'OMS.

Dans le site C : les valeurs des eaux échantillons se trouve entre 5 mg. L⁻¹ et 25 mg. L⁻¹ (moyenne = 9,8 \pm 7,76). Seulement l'eau du puits C₅ est de couleur jaunâtre.

En comparant avec la norme de l'OMS (15 mg. L⁻¹), les couleurs figurants sur A₂, A₃, A₄, A₅ et C₅ ne s'accordent pas avec cette norme.

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 11.

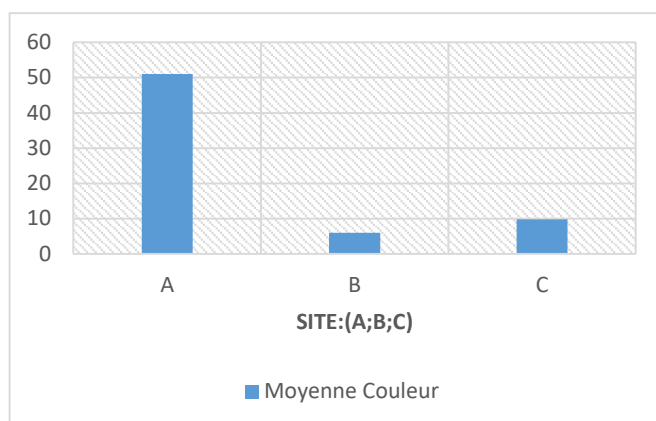


Figure 11 : Variation de la moyenne de couleur entre les sites A, B et C

b. pH

Les valeurs du pH des eaux échantillonnées se trouvent entre 6,06 et 6,48 (moyenne = $6,2 \pm 0,14$) pour le site A ; 4,68 et 6,02 (moyenne = $5,66 \pm 0,5$) pour le Site B ; 5,52 et 6,13 (moyenne = $5,76 \pm 0,21$) pour le site C (figure 12). Selon la norme de l'OMS (6,5-8,5), aucun pH ne s'accorde avec cette norme.

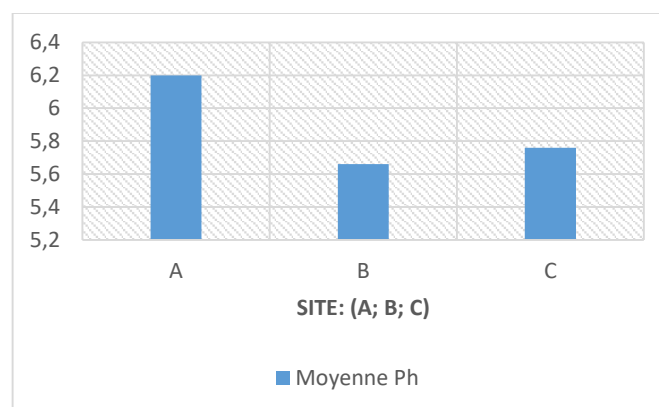


Figure 12 : Variation de la moyenne du pH entre les sites A, B et C

c. Conductivité

Les valeurs de la conductivité dans les eaux de puits dans les zones d'étude sont comprises entre $727 \mu\text{s. cm}^{-1}$ et $1572 \mu\text{s. cm}^{-1}$ (moyenne = $1063,8 \pm 376,68$) dans le site A ; $174,9 \mu\text{s. cm}^{-1}$ et $914 \mu\text{s. cm}^{-1}$ (moyenne = $415,18 \pm 265,75$) dans le site B ; $15,4 \mu\text{s. cm}^{-1}$ et $356 \mu\text{s. cm}^{-1}$ (moyenne = $114,22 \pm 129,94$) dans le site C (figure 13).

Toutefois, toutes les valeurs observées satisfont la norme (OMS = $2000 \mu\text{s. cm}^{-1}$).

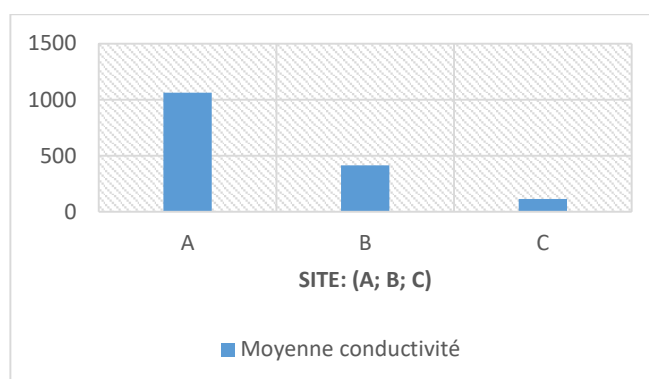


Figure 13 : Variation de la moyenne de conductivité entre les sites A, B et C

d. Turbidité

Pour les échantillons étudiés, les valeurs de la turbidité des puits échantillonnés satisfont la norme proposée par l'OMS sauf les eaux des puits A₂, A₃ et C₅ qui sont légèrement troublés, ce qui est caractérisé par les valeurs de turbidité supérieures aux normes requises pour une eau potable.

Sa valeur est comprise entre 0,7 NTU pour le minimum et 19,7 NTU pour le maximum (moyenne = $7,54 \pm 7,44$) suivant le site A ; 0,22 NTU pour le minimum et 3,85 NTU pour le maximum (moyenne = $1,09 \pm 1,38$) suivant le site B ; 1,64 NTU pour le minimum et 16,83 NTU pour le maximum (moyenne = $5,08 \pm 5,89$) suivant le site C (figure 14).

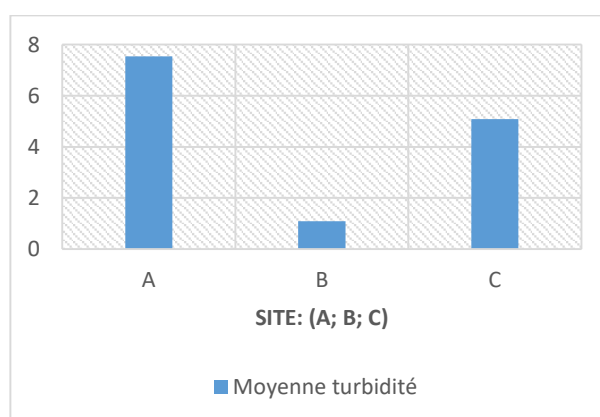


Figure 14 : Variation de la moyenne de turbidité entre les sites A, B et C

e. Matières en suspension

Les valeurs des matières en suspension contenue dans les eaux souterraines analysées sont comprises entre 10,2 mg. L⁻¹ pour le minimum et 28,5 mg. L⁻¹ pour le maximum (moyenne =

18,44 \pm 6,11) suivant le site A ; 1 mg.L⁻¹ pour le minimum et 1,9 mg. L⁻¹ pour le maximum (moyenne = 1,52 \pm 0,29) suivant le site B ; 1,8 mg. L⁻¹ pour le minimum et 47,9 mg. L⁻¹ pour le maximum (moyenne = 11,94 \pm 18,01) suivant le site C (figure 15).

Les valeurs des eaux échantillonnées sont supérieures à la norme OMS (MES = 0 mg. L⁻¹).

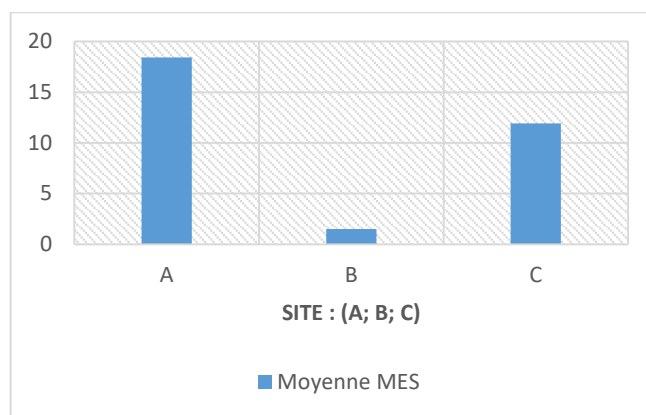


Figure 15 : Variation de la moyenne de MES entre les sites A, B et C

f. Salinité

Les valeurs de la salinité de la nappe d'eau souterraine étudiée sont inférieures à la norme OMS (1500 mg. L⁻¹). La valeur minimale de la salinité est de 8,57 mg. L⁻¹ et la teneur maximale est de 20 mg. L⁻¹ (moyenne = 13,14 \pm 5,6) pour le site A ; la valeur minimale de la salinité est de 0 mg. L⁻¹ et la teneur maximale est de 11,43 mg. L⁻¹ (moyenne = 3,43 \pm 4,2) pour le site B ; la valeur minimale de la salinité est de 0 mg. L⁻¹ et la teneur maximale est de 2,85 mg. L⁻¹ (moyenne = 0,57 \pm 1,14) pour le site C (figure16).

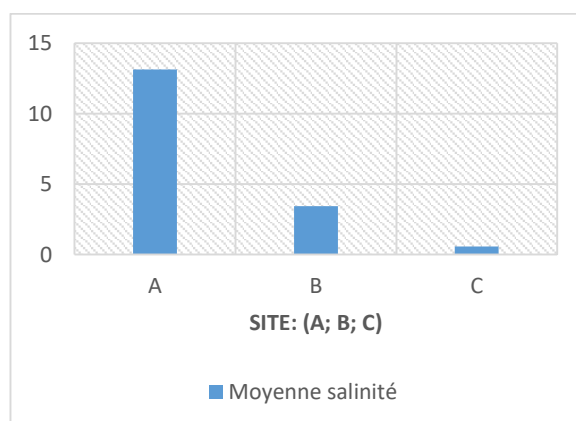


Figure 16 : Variation de la moyenne de salinité entre les sites A, B et C

g. Anions et cations

Les ions présents dans les eaux des puits étudiés sont plus faibles et inférieure aux normes OMS, en Chlorure, Phosphore Total, Orthophosphate.

Les valeurs de TA est de 0°F, cela signifie que les teneurs en ion hydroxyde et en ion carbonate sont très faibles. Et les valeurs de TAC varient entre 17°F à 76°F (moyenne = $34 \pm 21,28$) pour le site A ; 2°F à 10°F (moyenne = $6 \pm 3,3$) pour le site B ; et 1°F à 3°F (moyenne = $2,2 \pm 0,75$) pour le site C (tableau 9). Ces valeurs sont inférieures aux normes de l'OMS (100°F).

h. Azote minéral des eaux (Ammonium, Nitrate, Nitrite)

Les valeurs de l'Ammonium ne dépassent pas la norme de l'OMS ($0,5 \text{ mg.L}^{-1}$) sauf le puits B4 ($0,6 \text{ mg.L}^{-1}$) ; les valeurs du Nitrate des eaux échantillonnées sont inférieures à la norme de l'OMS (50 mg.L^{-1}) et pour le Nitrite, les puits A₁, B₃, B₄ sont supérieurs à la teneur suggérée par les normes internationales ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$), les valeurs des 3 puits respectivement de 0,16 ; 0,41 et 0,18.

i. Dureté totale, Matière organiques

La Dureté totale et la Matière organiques dans les eaux de puits échantillonnée est de valeur inférieur aux normes de l'OMS, (DT= 500°F) et (MO= $< 5 \text{ mg.L}^{-1}$) (Tableau 9).

j. Oxygène dissous, DCO et DBO

L'ensemble de ces paramètres permet d'estimer la quantité des matières organiques. Les eaux souterraines étudiées présentent des teneurs en oxygène dissous allant de 7,17 à 7,98 mg.L^{-1} (moyenne = $7,49 \pm 0,33$) dans le site A ; 7,65 à 7,79 (moyenne = $7,69 \pm 0,05$) dans le site B ; 7,2 à 7,94 mg.L^{-1} (moyenne = $7,69 \pm 0,28$) dans le Site C.

Les valeurs de DCO et DBO relatives à ce puits révèlent ses fortes charges organiques (Tableau 9).

B. Paramètres microbiologiques de l'eau étudiés

Les nombres des coliformes totaux rencontrés sont très chargés dans tous les zones étudiées. La variation de la moyenne du site A est de $2282,26 \pm 274,68$ (UFC. 100mL^{-1}) ; du site B est de $1770,42 \pm 555,32$ (UFC. 100mL^{-1}) et du site C est du $1757,34 \pm 822,57$ (UFC. 100mL^{-1}).

Le nombre d'*Escherichia coli* dans les puits échantillonnés est aussi très élevé dans le site A, leur moyenne est de $1982,86 \pm 873,48$. Dans le site B la valeur minimale est dans le puits B₁, 1UFC.100mL⁻¹ et la valeur maximale dans le puits B₃, 1986,3 UFC. 100mL⁻¹ (moyenne = $484,24 \pm 758,4$). La valeur retrouvée dans le site C est compris entre 6,3. 100mL⁻¹ le minimum dans le puits C₄ ; 172,2. 100mL⁻¹ le maximum dans le puits C₂ (moyenne = $44,68 \pm 63,99$).

La valeur moyenne d'entérocoques intestinaux dans le site A est de $1168,22 \pm 1038,24$ (UFC. 100mL⁻¹); dans le site B elle est de $391,06 \pm 674,01$ (UFC. 100mL⁻¹) et dans le site C, $51,68 \pm 45,27$ (UFC. 100mL⁻¹). Toutes les eaux échantillonnées représentent la forte contamination.

La moyenne d'anaérobie sulfito-réducteur dans le site A est comprise entre 15 UFC. 100mL⁻¹ pour le minimum et 100 UFC. 100mL⁻¹ pour le maximum (moyenne = $51,4 \pm 39,76$) ; dans le site B, comprise entre 0 UFC. 100mL⁻¹ pour le minimum et 20 UFC. 100mL⁻¹ pour le maximum (moyenne = $9,2 \pm 8,66$) ; dans le site C, comprise entre 1 UFC. 100mL⁻¹ pour le minimum et 100 UFC. 100mL⁻¹ pour le maximum. Les valeurs d'anaérobie sulfito-réducteur sont hors norme sauf pour les puits B₁, B₃ et C₁.

Les variations des paramètres microbiologiques sont résumées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Résultats des analyses microbiologiques

Paramètres	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type	Site
CT	1732,9	2419,6	$2282,26 \pm 274,68$	A
<i>E.coli</i>	235,9	2419,6	$1982,86 \pm 873,48$	
ENTERO	11,9	2419,6	$1168,22 \pm 1038,24$	
ASR	15	100	$51,4 \pm 39,76$	
Paramètres	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type	Site
CT	1046,2	2419,6	$1770,42 \pm 555,32$	B
<i>E.coli</i>	1	1986,3	$484,24 \pm 758,4$	
ENTERO	3	1732,9	$391,06 \pm 674,01$	
ASR	0	20	$9,2 \pm 8,66$	

Paramètres	Min	Max	Moy \pm Ecart – Type	Site
CT	547,5	2419,6	1757,34 \pm 822,57	C
<i>E.coli</i>	6,3	172,2	44,68 \pm 63,99	
ENTERO	6,3	111,2	51,68 \pm 45,27	
ASR	1	100	34,8 \pm 35,68	

C. Examen de la matrice de corrélation, nous a permis d'établir quelques corrélations entre les différents éléments

La force des associations entre les deux paramètres étudiées a été exposée par l'étude des corrélations linéaire de variance (Tableau 11).

La teneur en couleur du l'eau traduit la présence d'une forte corrélation positive avec la turbidité et moyennement avec la chlorure, MES et DCO. De ce fait, la concentration de salinité de l'eau est influencée positivement avec le chlorure et la conductivité.

Le pH du l'eau présente la valeur moyenne de la corrélation positive avec la conductivité, salinité et chlorure. En effet, plus la concentration du chlorure augmente, plus il y a la teneur en couleur, salinité et pH augmente.

Par contre le Nitrate présente un moyennement négatif avec le chlorure et DBO5 dans l'eau. Ainsi, plus la concentration de couleur, de salinité, du pH et la valeur de chlorure augmentent, plus la valeur de Nitrate diminue.

Le Nitrite est corrélé uniquement moyenne avec ammonium. L'orthophosphate de l'eau a donc des relations forte corrélation positive avec phosphore total et moyenne avec la teneur de MES.

La concentration de MES présente une forte corrélation positive avec la Turbidité et moyenne avec la couleur et l'Orthophosphate. En effet, le MES de l'eau est fortement liée positive avec la couleur, Turbidité et l'Orthophosphate.

Enfin, le DBO5 présente une forte corrélation positive avec la Conductivité, la Salinité, le chlorure et présente une forte corrélation négative avec Nitrate.

Tableaux 11 : Matrice de corrélation

Paramètres	Couleur	Ph	Cond	Turb	Salinité	MO	OD	TAC	Ammo	Chlorure	TH	Nitrate	Nitrite	Ortho	P T	MES	DCO
pH	0,396	1															
Cond	0,323	0,523	1														
Turb	0,739	0,36	0,072	1													
Salinité	0,301	0,545	0,992	0,054	1												
MO	0,25	0,494	0,193	0,378	0,257	1											
OD	-0,319	-0,18	-0,46	0,095	-0,464	-0,13	1										
TAC	-0,067	0,351	0,254	-0,22	0,246	0,12	-0,19	1									
Ammo	0,095	0,364	0,2	-0,08	0,218	0,154	-0,19	0,017	1								
Chlorure	0,575	0,576	-0,22	0,249	0,859	0,177	-0,38	0,221	0,29	1							
TH	-0,221	-0,24	-0,18	-0,24	-0,227	-0,1	0,086	0,104	-0,17	-0,234	1						
Nitrate	-0,478	-0,39	-0,44	-0,25	-0,472	-0,12	0,384	-0,12	0,335	-0,537	0,492	1					
Nitrite	-0,123	0,122	0,202	-0,1	0,204	-0,28	0,161	-0,03	0,525	0,176	-0	0,319	1				
Ortho	0,067	0,25	0,026	0,257	-0,024	-0,24	0,162	-0,14	-0,06	0,205	0,218	-0,037	0,056	1			
PT	-0,086	0,224	-0,09	0,058	-0,111	-0,22	0,431	-0,14	-0,18	0,115	0,098	-0,134	0,017	0,852	1		
MES	0,58	0,467	0,289	0,812	0,263	0,302	0,015	-0,1	-0,13	0,368	-0,22	-0,332	-0,09	0,522	0,377	1	
DCO	0,524	0,326	0,316	0,133	0,358	0,234	-0,26	0,141	0,264	0,48	-0,47	-0,394	-0,2	-0,3	-0,22	0,054	1
DBO5	0,254	0,393	0,706	0,021	0,73	0,244	-0,43	0,489	-0	0,742	-0,32	-0,634	-0,14	-0,12	-0,17	0,034	0,488

II. Etude de la vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine de la ville d'Antananarivo

Afin d'avoir des résultats sur cette étude de vulnérabilité, il est nécessaire de considérer et d'obtenir des données sur les sept paramètres DRASTIC. La carte de vulnérabilité est obtenue en superposant les cartes thématiques montrant ces paramètres (Saida, 2010).

1. Profondeur de la nappe (D)

Les profondeurs de la nappe ont été obtenues lors de la collecte du niveau statique relatif à chaque point de prélèvements. Ce niveau statique représente la distance verticale traversée par un polluant depuis la surface du sol pour atteindre l'aquifère.

Le tableau 12 représente les classes de profondeur de la nappe dans la zone d'étude et la figure 17 montre la cartographie de la profondeur de la nappe.

Tableau 12 : Profondeur de la nappe d'eau souterraine

Profondeur de la nappe (m)	Notes	Poids	Index	Points concernés	Superficie %
0-0,5	10	5	50	A ₁ , A ₂ , A ₄ , B ₂ , B ₃	16,2
0,5-1	9	5	45	A ₃ , A ₅	32,2
1-2	8	5	40	C ₃	
2-3	7	5	35	B ₄	
3-5	6	5	30		
5-10	5	5	25	B ₁ , B ₅ , C ₂ , C ₄ ,	51,6
10-23	3	5	15	C ₁ , C ₅	

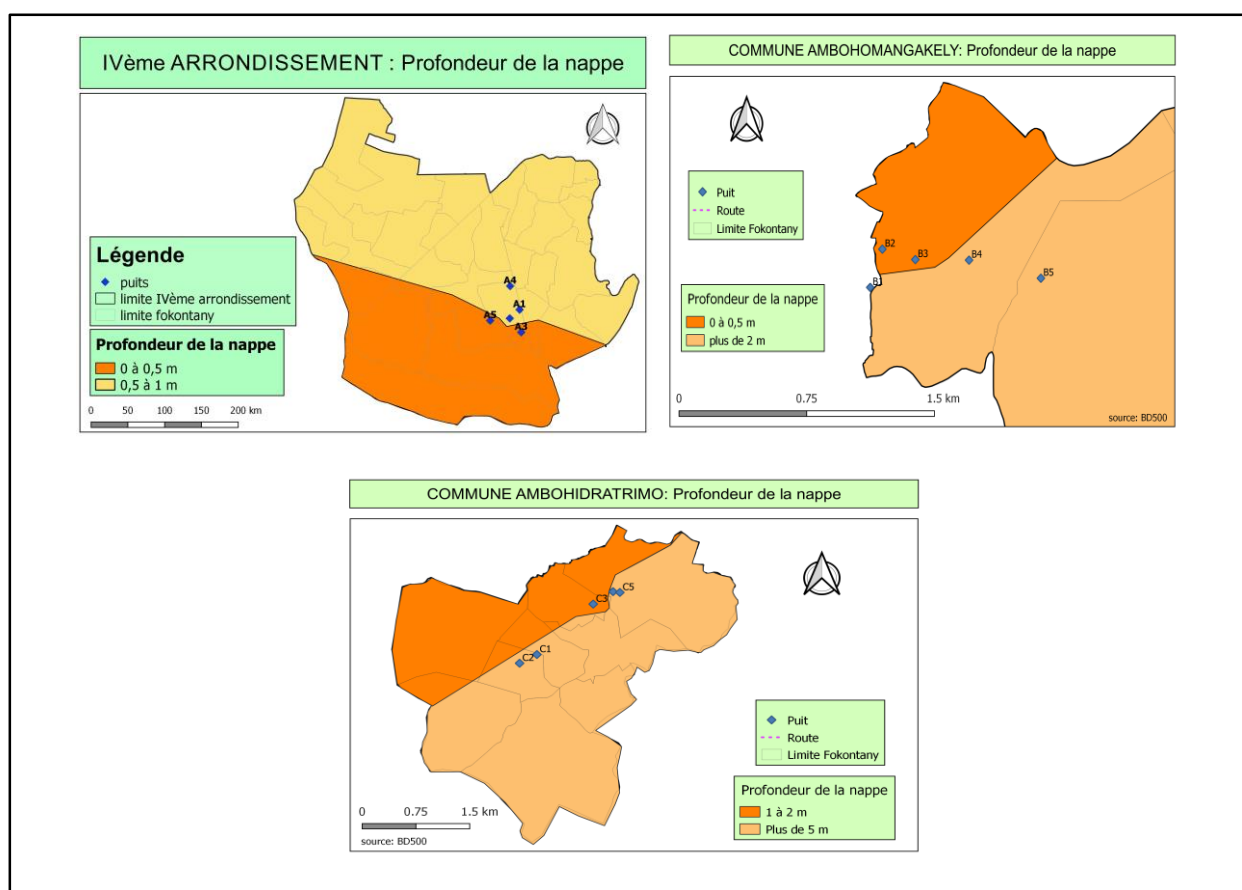


Figure 17 : Profondeur de la nappe (D)

2. Recharge efficace (R)

La pluviométrie moyenne annuelle dans la région d'Antananarivo se divise en 2 parties : dans la zone d'étude sur le IV^{ème} Arrondissement et Ambohimangakely (noté A et B) elle est de 1400,56 mm. Sur la commune Ambohidratrimo (noté C) elle est de 1281,38 mm (moyenne interannuelle 2013-2017), les nappes d'eau souterraine sont rechargées par infiltration des eaux de pluie. Les caractéristiques hydrogéologiques de la région d'Antananarivo sont homogènes car ses caractères physiques notamment la porosité, la perméabilité, et la granulométrie du sol restent invariante dans la totalité de la région étudiée. Et la nappe d'eau souterraine dans la zone d'étude réagit par deux classes de recharge ou filtration. Les valeurs obtenues après calcul sont $I_{A \text{ et } B} = 113,6 \text{ mm}$; $I_C = 72 \text{ mm}$ et les taux d'infiltration $T.I_{A \text{ et } B} = 8,11\%$; $T.I_C = 6\%$ (mode de calcul en Annexe 1). Le tableau 13 ci-contre représente les classes de recharge efficace, constituée par la note, le poids et l'index, dans la région d'Antananarivo est à la figure 18.

Tableau 13 : Recharge efficace

Classe	Site	Note	Poids	Index
Recharge efficace	A et B	3	4	12
Recharge efficace	C	1	4	4

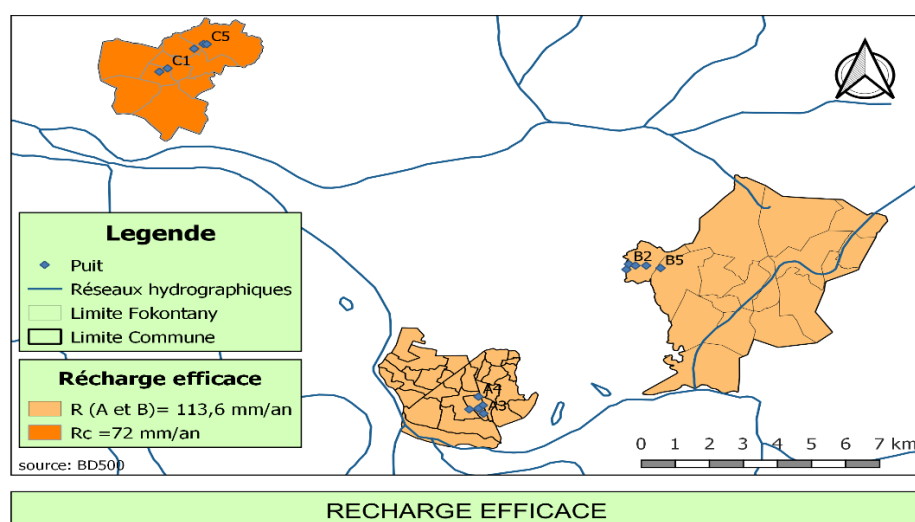


Figure 18 : Recharge efficace (R)

3. Lithologie de l'aquifère (A)

Ce paramètre est obtenue par la corrélation litho-stratigraphique des données collectées des forages et sondages réalisés dans la zone d'étude. Elles ont été utilisées pour décrire les matériaux constituant les zones saturées (Figure19). D'autre part la cartographie de ce profil lithologique est présentée dans la figure 20.

En effet, la zone d'étude dispose une classe de milieu : un milieu aquifère constitué par le métamorphique (tableau 14).

Tableau 14 : Lithologie de l'aquifère

Classe	Site	Notes	Poids	Index	Superficie %
métamorphique	A, B et C	6	3	18	100

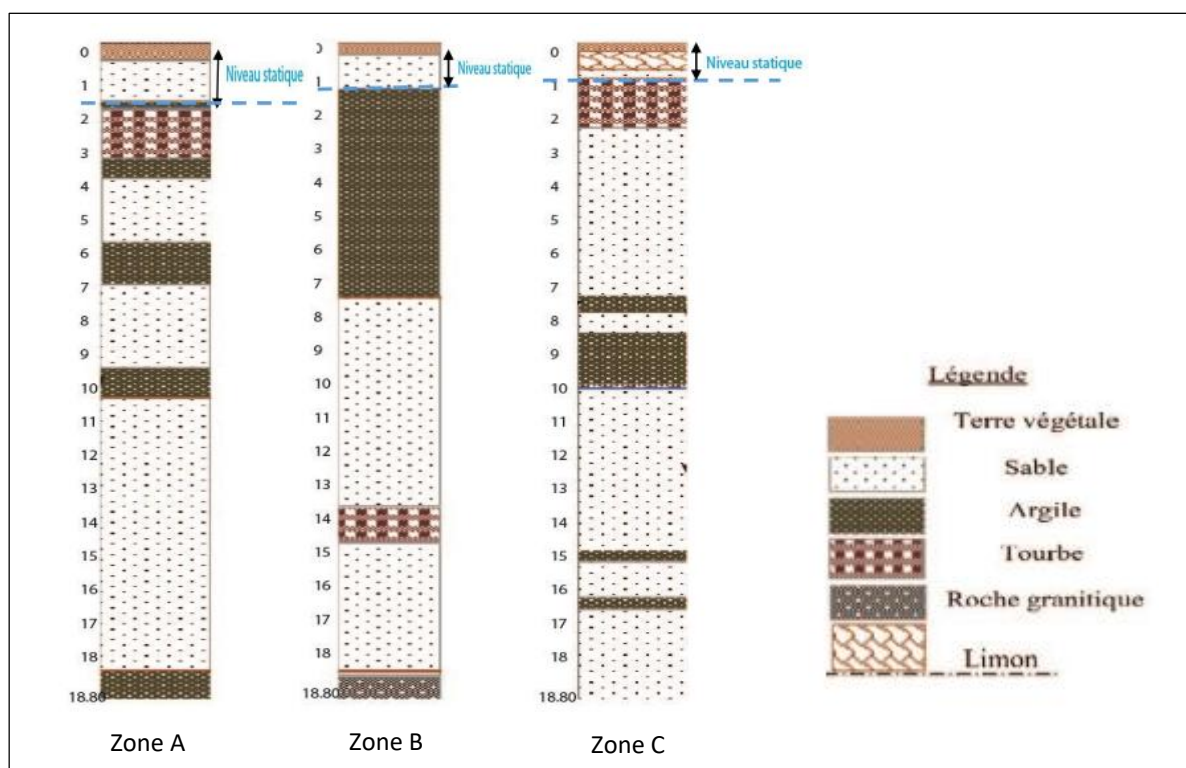


Figure 19 : Coupe lithologique types des sondages à Antananarivo (Miandra, 2015).

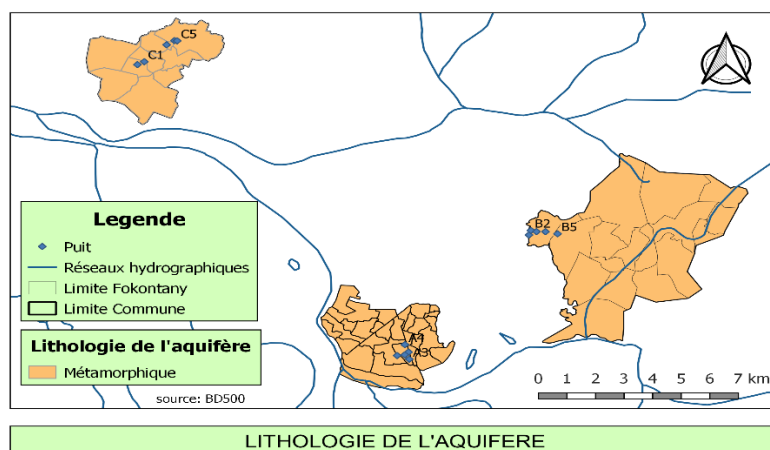


Figure 20 : Lithologie de la nappe aquifère (A)

4. Type de sol (S)

Les zones d'étude disposent deux types de sol : sols sableux et sols hydromorphes. La figure 21 montre la répartition spatiale de ces deux types de sol.

Tableau 15 : Nature du sol

Classe	Site	Notes	Poids	Index	Superficie %
Sols sableux	A, B et C	9	2	18	84,63
Sols hydromorphes	A, B et C	6	2	12	15,37

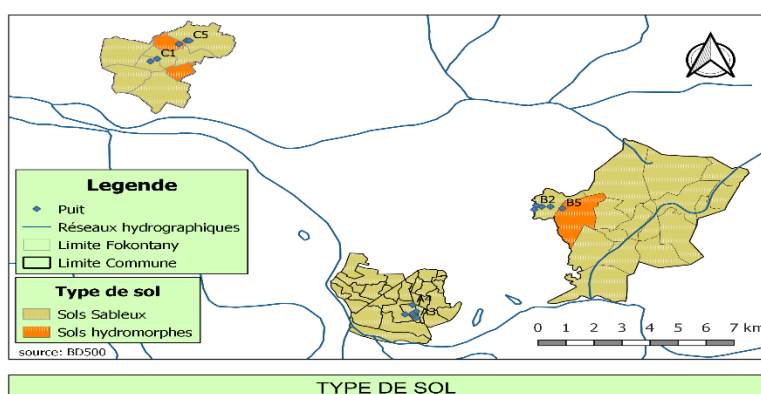


Figure 21 : Nature du sol (S)

5. Topographie (T)

Dans les zones d'étude, la dénivellation topographique est de valeur d'inclinaison différente comme suit : le site A est 3,5%, le site B est 5% le site C est 6%.

La plage de pente constituée par la note, le poids et l'index est présentée dans le tableau 16 suivante et la représentation de la pente est dans la cartographie de la figure 22.

Tableau 16 : Topographie

Plage de la pente en (%)	Site	Notes	Poids	Index	Superficie %
2-5	A et B	9	1	9	48,09
5-10	C	5	1	5	51,91

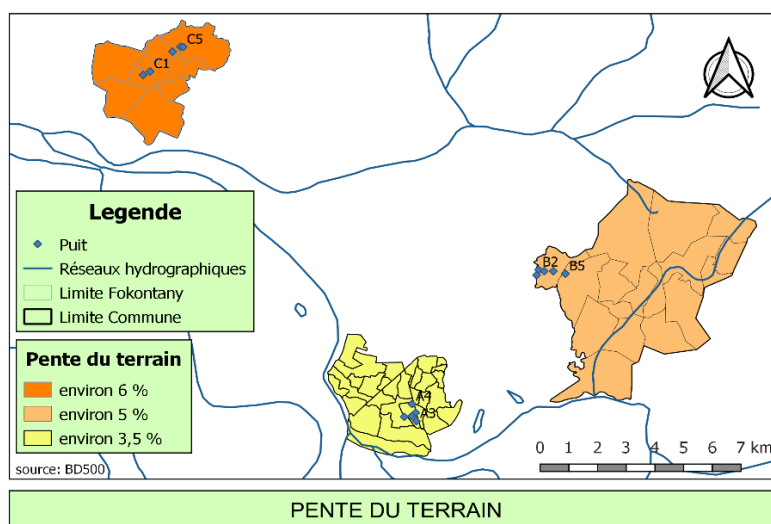


Figure 22 : Classe de pente topographique (T)

6. Lithologie de la zone vadose (I)

La zone vadose des zones d'étude est caractérisée par les sables et graviers.

Le tableau 17 indique la note, le poids, l'index et la superficie du sable et gravier tandis que la figure 23 représente la cartographie du sable et gravier de la ville d'Antananarivo.

Tableau 17 : Lithologie de la zone vadose

Nature zone vadose	Site	Notes	Poids	Index	Superficie%
Sable et gravier	A, B et C	8	5	40	100

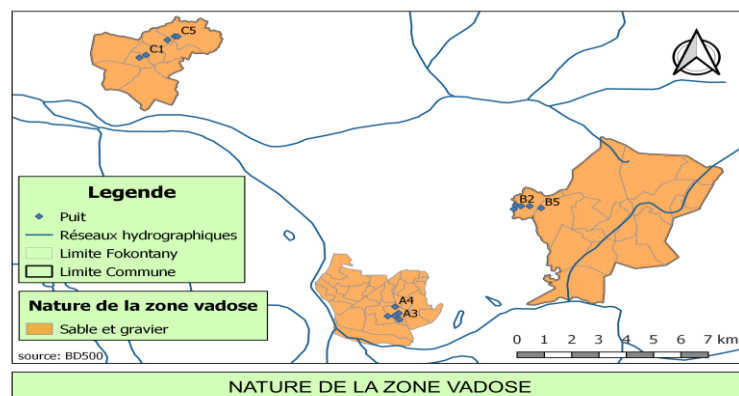


Figure 23 : Nature de la zone non saturée (I)

7. Conductivité hydraulique (C)

La zone d'étude représente des terrains à perméabilité d'interstice (sables et gravier). Ce type de perméabilité ou de conductivité K est uniforme dans toutes les directions de l'espace. La forte perméabilité du sol avec un coefficient de perméabilité $K = 4.10^{-5} \text{ms}^{-1}$ a été donc observée dans cette zone.

Le type de nappe constitué par sa conductivité, son note, son poids, et son index est donné par le tableau 18 et la figure 24 représente la cartographie de la conductivité hydraulique.

Tableau 18 : Conductivité hydraulique

Type de nappe	Site	Note	Poids	Index	Superficie %
$10^{-4} < K < 10^{-2}$	A, B et C	1	3	3	100

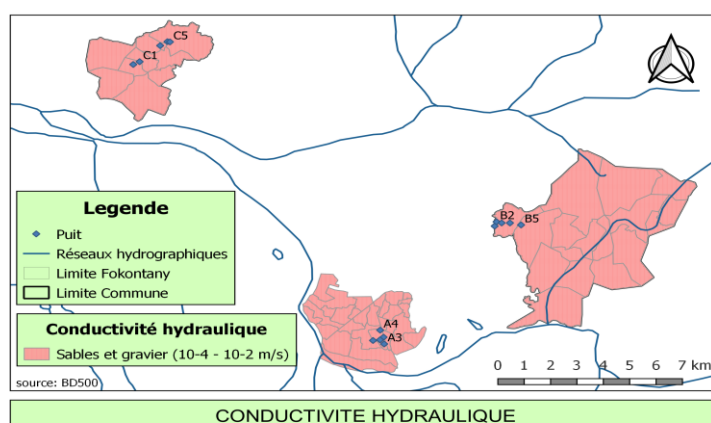


Figure 24 : Conductivité hydraulique (C)

8. Indice de vulnérabilité de la nappe souterraine

La valeur des indices DRASTIC calculés se situe entre 98 et 150 (mode de calcul en Annexe 1). Quatre classes de vulnérabilité sont donc mises en évidence sur la carte (Tableau 19):

- Classe faible : elle représente 41,7% de la superficie de la zone cartographiée.
- La classe moyenne : cette classe représente 21,01% de la superficie de la zone cartographiée. Quelques points d'eau tels que B₁, B₅ et C₃ sont concernées dans ce classement.
- La classe élevée : cette classe se rencontre 8,60% de la superficie de la zone cartographiée.
- La classe plus élevée : cette classe occupe 28,69% de la superficie de la zone cartographiée.

Tableau 19 : Quatre classes de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine d'Antananarivo

Indice DRASTIC	Degré de vulnérabilité	Superficie en %	Localité
90 à 120	Faible	41,7	Ambohidratrimo
120 à 130	Moyen	21,01	Ambohimangakely et Ambohidratrimo
130 à 140	Elevé	8,60	Ambohimangakely
140 à 150	Plus élevé	28,69	IV ^{em} Arrondissement et Ambohimangakely

La figure 25 représente la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'eau souterraine de la ville d'Antananarivo.

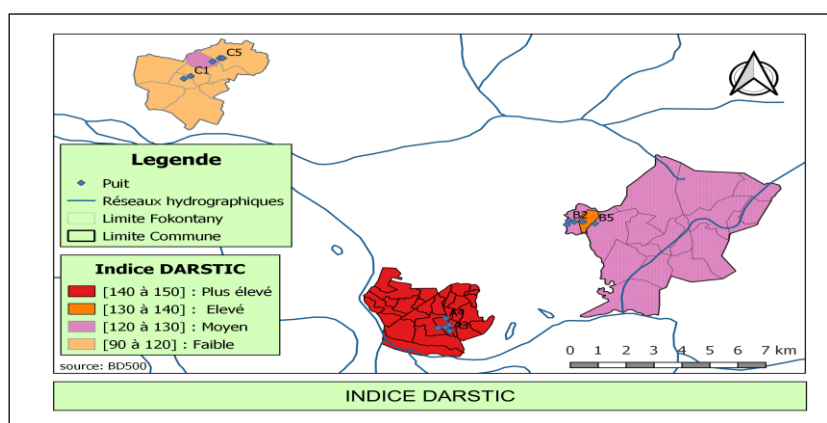


Figure 25 : Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de la ville d'Antananarivo

DISCUSSION

DISCUSSION

Les objectifs de ce travail sont de connaître le niveau de contamination de l'eau de puits de cette zone à la pollution et d'évaluer les facteurs de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine par l'application de la méthode DRASTIC.

Dans la première partie, elle s'est basée sur les analyses physico-chimiques tels que : couleur, pH, conductivité, turbidité, salinité, matières organiques, oxygène dissous, alcalinité, ammonium, chlorure, dureté totale, nitrate, nitrite, orthophosphate, phosphore total, MES, DCO et DBO5.

Tous les intensités de la couleur des eaux de puits étudiées sont élevées, cela montre que les quantités d'MES sont fortes, donc la couleur dépend d'MES. Les puits A₂, A₃, A₄, A₅ et C₅ sont victimes de cette valeur et sont aussi troublées, ce qui est caractérisé par les valeurs de turbidité supérieures aux normes OMS requise pour une eau potable. Cette zone renferme des matières en suspension provenant des particules d'origines organiques ou minérales.

Les valeurs des pH des eaux de puits dans la zone d'étude sont significativement acides. Elles sont donc très agressives pour l'estomac (Timoléon, 2013). Cette acidité est liée à la nature géologique des formations aquifères et aux terrains traversés (Boubakar, 2010).

Du point de vue géologie, la zone d'étude est constituée par la migmatite et des alluvions qui sont des roches siliceuses et pourraient être l'origine du caractère acide du pH. Les échantillons étudiés sont donc légèrement acides.

Les échantillons ont une conductivité faible et ne dépasse pas la norme. Cette conductivité provoque une augmentation dans le taux de la salinité des eaux (Guergazi et Achour, 2005). Les eaux des puits étudiées sont marquées par la faiblesse de la valeur de conductivité et la salinité. D'après le contexte géomorphologique, la profondeur des niveaux captés et la nature géologique des formations du sol sont autant de facteurs qui influencent les variations de la conductivité (Boubakar, 2010). Donc ces valeurs proviennent de la nature des couches géologiques de la nappe, soit la présence d'éléments minéraux indésirables dans les eaux de consommation résultant d'une pollution exogène.

Les chlorures, phosphores total et orthophosphates présentent des valeurs plus faibles et inférieures aux normes de l'OMS. Ces concentrations résultent généralement de la nature des terrains traversés ou de la pollution industrielles ou domestiques. Leur concentration dans l'eau dépend essentiellement de leur solubilité.

La dureté totale de l'eau montre que les eaux des puits sont très faibles inférieurs à la norme de 50°F. La dissolution du Ca^{2+} et du Mg^{2+} résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations rocheuses calcaires et dolomitiques. Cette dissolution est accrue par la présence dans l'eau de gaz carbonique provenant de l'atmosphère et des couches superficielles du sol (Tardat et Beaudry, 1984). La dureté totale possède des propriétés gênantes telles que formation de dépôts durs dans les canalisations du réseau, gêne dans les opérations de lavage etc..., vue la géologie dans la zone d'étude cette roche est insuffisante. Les valeurs du titre alcalimétrique dans les échantillons analysés sont tous nuls et leurs titres alcalimétriques complets sont inférieurs à la norme. Ce qui signifie que les eaux de puits analysés ne sont pas alcalins et la teneur en Hydroxyde de Calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Hydroxyde de Magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), Carbonate de Calcium (CaCO_3) et Carbonate de Magnésium (MgCO) semblent être faibles. D'où la teneur en calcium et magnésium dans ces eaux aussi pourrait être faible.

La présence des azotes dans les eaux de puits à étudier sont insuffisants et de valeurs inférieurs à la norme de l'OMS sauf pour les puits A₁, B₃, B₄ où la norme pour la Nitrite est supérieure. Ce qui réconforte l'hypothèse de la pollution de ces eaux par les rejets urbains.

Les zones d'études présentent un risque pour la population locale. Les effets nocifs des nitrates sont liés profondément à la transformation des nitrates en nitrites au niveau de la cavité buccale, puis éventuellement en nitrosamines au niveau du tube digestif et autres composés nitrosés au niveau de l'estomac. Chez l'homme, les nitrites se fixent sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène et provoquent des difficultés respiratoires. Cela explique la méthémoglobinémie observée principalement chez le nourrisson. Le risque lié à la formation de nitrosamines est le cancer (Timoléon, 2013).

Les valeurs d'oxygène dissous, DCO et DBO des puits analysés ont été de fortes charges organiques. Toutefois, l'écoulement d'une nappe superficielle dans ce puits et qui rejoint la nappe profonde, explique sa richesse en oxygène (El Moustafa, 2006). Ces valeurs élevées sont des indices de biodégradation de la matière organique et indique la présence de pollution organique ; ce qui confirme que les eaux des puits ciblés sont polluées.

D'après l'étude des corrélations, cela témoigne qu'ils sont étroitement liés entre eux et ont un impact sur la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de la ville d'Antananarivo.

Dans la deuxième partie, l'analyse microbiologique s'effectue dans l'état des coliformes totaux, *Escherichia coli*, entérocoques intestinaux, anaérobies sulfite-réducteurs et *Salmonella*. Les eaux des puits échantillonnées sont en présence des bactéries telles que coliformes totaux, *Escherichia coli*, entérocoques intestinaux, anaérobies sulfite-réducteurs.

Néanmoins, l'analyse confirme l'absence de *Salmonelles*. Les résultats microbiologiques dans le Site A sont très mauvais à cause du canal Andriantany étant très proche des puits échantillonnés et très contaminé de la pollution fécale par rapport aux sites B et C. Mais les eaux de canal sont très polluées et très dangereuses, tous les paramètres étudiés font la dilution un sur dixième ($CT = 204600 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$; $E. coli = 21600 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$; ENTERO = $3100 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$; ASR = supérieur $100 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$). La nappe d'eau souterraine de la ville d'Antananarivo abrite de forte densité en indicateur de la contamination fécale.

La variation des bactéries fécales dans l'eau des puits étudiés serait aussi due aux facteurs pédologiques et aux caractéristiques de la nappe phréatique comprenant entre autres, le caractère saturé ou insaturé du sol, sa porosité et la nature des substances chimiques présentes dans ces eaux (Bemmo, 1998 ; Nola, 2000). Donc les origines des bactéries des eaux souterraines proviennent du milieu de surface par transport lors de l'infiltration des eaux de surfaces vers les eaux souterraines. Toutes les valeurs des paramètres microbiologiques sont hors normes sauf l'anaérobies sulfite-réducteurs du puits B₁, B₃ et C₁ ; et cela témoigne sûrement la contamination fécale d'origine animale ou humaine (fausse septique, élevage de bétails, utilisation des déchets des animaux comme fertilisant pour les terres agricoles avoisinant les puits). Les groupes de germes coliformes et entérocoques intestinaux sont des hôtes du tube digestif, à la différence que les coliformes témoignent d'une contamination fécale récente alors que les entérocoques intestinaux, plus résistants dans l'environnement, témoignent d'une contamination fécale ancienne (Trevisan, 2002). En effet, elles dépassent les valeurs acceptables pour l'eau affectée à la consommation de $0 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$ pour coliformes totaux, *Escherichia coli* et entérocoques intestinaux inférieur à $2 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$. Ainsi, des risques des maladies gastroentériques sont permanents pour les propriétaires des puits échantillonnés. Le plus grand risque sanitaire lié à la présence de micro-organismes dans l'eau résulte de la consommation d'eau de boisson contaminée par des excréments humains ou animaux bien que d'autres sources et voies d'exposition significatives aient pu être identifiées (OMS 2017).

Et la troisième partie concerne l'évaluation des facteurs de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine par application de la méthode DRASTIC. D'après le calcul des indices DRASTIC dans l'annexe 1 qui intègre les sept paramètres, les valeurs se situent entre 98 et 150. Elles sont composées de quatre classes comme suit : classe faible, classe moyenne, classe élevée et classe plus élevée.

La classe faible se traduit par une vulnérabilité faible à la pollution. Ces zones se situent aux endroits où la profondeur de la nappe est supérieure à 5m, avec une pente environ de 6%. Notamment les points d'eau, C₁, C₅, C₂ et C₄.

La classe moyenne, concerne plus précisément les points d'eau tels que B₁, B₅ et C₃. La profondeur du plan d'eau dans ces zones est estimée de 1,5 à 9 m.

La classe élevée présente un degré de vulnérabilité qui peut s'expliquer par le fait que la profondeur de la nappe dans cette zone est de 3 m avec une pente environ de 5%. Le puits B₄ est le seul concerné.

La classe plus élevée comprend les points A₅, A₃, A₁, A₂, A₄, B₂ et B₃. Les valeurs plus élevées de l'indice DRASTIC pourraient s'expliquer par la forte faiblesse en profondeur de la nappe, 0,3 à 1, et la proximité des sources d'eau avec le canal d'Andriantany qui est en relation avec la nappe. En plus, la pente de ses sites est entre 3 et 5% favorisant l'infiltration de tout contaminant présent à la surface de sol. Et la recharge efficace de 113,6 mm par an associé à la pente faible entraîne aussi l'infiltration directe des polluants vers l'aquifère.

Ces résultats sont presque différents à ceux obtenus par Habib, en 2010 dans la ville du Chaffar et par Miguel, en 2015 dans la région du bas Cheliff en Algérie. La différence de leur zone d'étude est au niveau de la profondeur du plan d'eau. Le niveau statique de la nappe collecté étudié se situe entre 0,3 à 20 m tandis que les valeurs varient de 6 à 14 m dans la ville du Chaffar selon Habib, et de 4,5 à 29 m dans la région du Cheliff selon Miguel. La profondeur du plan d'eau a donc une conséquence significative sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères de la ville d'Antananarivo. Du fait que les paramètres sont sensiblement identiques. Les résultats montrent que la nappe d'eau souterraine dans la ville d'Antananarivo est en vulnérable moyenne à la pollution de surface.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'étude est consacrée aux analyses physico-chimiques et microbiologiques de l'eau de puits de la ville d'Antananarivo, à la connaissance du niveau de contamination de l'eau de puits de cette zone à la pollution, à l'évaluation des facteurs de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine et la gestion des sources de contamination fécale de la nappe.

Les résultats obtenus au cours de cette étude signent dans leur majorité une contamination chimique et bactériologique de la ville d'Antananarivo selon un processus d'infiltration dépendant de plusieurs facteurs environnementaux, pédologiques et climatiques.

Après les analyses, il a été prouvé que les eaux souterraines sont presque de l'eau claire, sans odeur et les taux de potentiel hydrogène de l'eau échantillonnés est inférieure à 7 ou plus précisément l'eau est acide. Les 20% du puits étudié sont contaminés par les Nitrites. Ils ont aussi de la forte charge matière en suspension et organique se traduit par des O₂, DCO et DBO₅.

Du point de vue bactériologique, dans la plupart des puits étudiés présentent des coliformes totaux, des *Escherichia coli*, des entérocoques intestinaux et des anaérobies sulfito-réducteurs de taux de concentrations hors normes et très élevé. Ces bactéries signalent la contamination d'origine fécale des eaux souterraines.

Les propriétés physico-chimiques et bactériologiques des eaux souterraines de la ville d'Antananarivo exposent la population concernée à des maladies, comme la maladie diarrhéique et la maladie respiratoire. Par conséquent, les valeurs des paramètres physico-chimiques et microbiologiques sont très importantes durant la période de prélèvement. Des corrélations entre les paramètres physico-chimiques ont été vérifiées lors de cette étude.

La cartographie de la vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC et à l'aide de logiciel ArcGis est une méthodologie devenue nécessaire pour assurer la gestion quantitative des ressources en eau en relation avec les diverses activités humaines. Ce type de carte montre que la nappe d'eau souterraine est menacée localement par l'infiltration des polluants à partir de la surface. Cette nappe est en vulnérable moyenne à la pollution. Pour mieux exploiter ce support carte de vulnérabilité, des études plus détaillées sur les conditions locales, dans cette région, sont nécessaires, pour les planificateurs et les décideurs, pour comprendre les mécanismes de contamination et de recharge de cette nappe.

Devant la situation actuelle et la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau souterraine usagée par la population d'Antananarivo, les techniques suivantes sont suggérées à la population, à la commune, et à l'état :

- Bouillir l'eau avant la consommation ou utiliser des purificateurs comme l'eau de javel.
- Protéger les sources contre les agents polluants surtout les excréments humains et animaux qui contiennent une grande variété de microorganismes pathogènes.
- Limiter et règlementer les activités récréatives.
- Renouveler les eaux souterraines afin d'obtenir un bon état des masses d'eau souterraine.
- Contrôler périodiquement la qualité de l'eau, pour assurer un approvisionnement en eau de bonne qualité.
- Conception du réseau d'assainissement pour l'évacuation des eaux usées
- Comprendre la situation par l'évaluation des risques infectieux dus aux agents pathogènes pour l'homme.
- Evaluer et gérer les risques relatifs à toutes les étapes de l'approvisionnement en eau, du captage au consommateur.

REFERNECES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1]-**Achak, M., Ouazzani, N., Yaacoubi, A. & Mandi, L.** (2008). Caractérisation des margines issues d'une huilerie moderne et essais de leur traitement par coagulation-floculation par la chaux et le sulfate d'aluminium.
- [2]-**Achour S., Guergazi S.** (2002). Incidence de la minéralisation des eaux algériennes sur la réactivité de composés organiques vis-à-vis du chlore.
- [3]-**Aller, Benett T, Lehr JH, Drastic.** (1987). A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association.
- [4]- **Artelia Madagascar.** (2014). Elaboration du Schéma Directeur d'Assainissement Urbain du Grand Tana.
- [5]- **Barijaonarivelo H.** (2013). Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux de quelques puits et détermination du toit de substratum d'aquifères dans la plaine de district Antananrivo-Atsimondrano.
- [6]-**Bemmo N, Njine T, Nola M, Ngamga D.** (1998). Techniques utilisées au niveau des quartiers périurbains de Yaoundé (Cameroun) pour l'évacuation des eaux usées et excréta humains ; propositions de systèmes appropriés.
- [7]-**Bengoumi M.** (2004). Qualité de l'eau en aviculture .Revue trimestrielle d'information scientifique et technique – Volume 3 – N°1, Maroc.
- [8]-**Berne F. et Cordonnier J.** (1991). Traitement des eaux.
- [9]-**Berrahou A., Clooster M., Makhoukh M., Sbaa M.** (2001). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux Superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental).
- [10]-**Bontoux J.** (1983). Introduction à l'étude des eaux douces, partie III.
- [11]- **Boubakar Hassane A.** (2010). Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER), Thèse de l'Univ. Abdou Moumouni de Niamey (Niger).
- [12]- **Brisou J.** (1968). La pollution microbienne, virale et parasitaire des eaux littorales et ses conséquences pour la santé publique.
- [13]- **Bourgeat (F).** (1968). Notice carte pédologique de Tananarivo 1/100.000°.
- [14]-**Delubac G.** (1962). Etude géologique et prospection des feuilles Tananarivo-Manjakandrina au 1/100000.
- [15]- **Degremont.** (1985). Mémento technique de l'eau, Tome I, Edition de cinquanteaire.

- [16]- **El Mostafa H., Abdelhamid B., Yahia K. & Driss H.** (2006). Effets des rejets liquides domestiques et industriels sur la qualité des eaux souterraines au nord de la ville de Settat (Maroc).
- [17]-**Gilliam J.W., Daniels R.B. and Lutz J.F.** (1974). Nitrogen content of shallow ground water in the North Carolina Coastal Plain. J Environ Qual.
- [18] **Gouvernement du Québec.** (2018). Règlement sur la qualité de l'eau potable.
- [19]- **Guergazi S. et Achour S.** (2005). Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration.
- [20]- **Habib Smida, Chokri Abdellaoui, Moncef Zairi, Hamed Ben Dhia.** (2010). Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax, Tunisie).
- [21]- **Vololonirina H., Ralalarisoa. T. H.** (2018). Monographie de la commune Ambohimangakely.
- [22]-**Hceflcd.** (2006). Etude sur la pisciculture au barrage Almassira, CRdar CHAFAAI, Cercle d'ELBROUGE, Province de Settat.
- [23] **Kazi T.G., Arain M. B., Jamali M.K., Jalbani N., Afridi H.I., Sarfraz R. A., Baig J.A., Shah A. Q.** (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques : A case study. Ecotoxicology and Environmental Safety.
- [24]-**Lanteigne J.** (2003). Encyclopédie de l'agora.
- [25]- **Mezzar L.** (2015). Etat de la qualité chimique et bactériologique de la nappe alluviale de Guerrara.
- [26]-**Miandra S.M.** (2015). Projet de réalisation d'ouvrage d'exploitation d'eaux souterraines de Betsimitatatra et planification d'utilisation des ressources en eaux en vue d'améliorer l'adduction d'eau potable de grand Antananarivo.
- [27]- **Miguel E.** (2015). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du Bas Cheliff : Application de la méthode DRASTIC, Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme de Master II en Sciences de la terre et de l'univers.
- [28]- **Monographie** du IVème Arrondissement. (2018).
- [29]- **Monographie** de la commune Ambohidratrimo. (2018).
- [30] **OMS.** (2009). La santé et les services d'approvisionnement en eau de boisson salubre et d'assainissement de base.
- [31]- **OMS.** (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson, quatrième édition.
- [32] –**OMS.** (2018). Eau, assainissement et hygiène.

- [33]- **Panorama.** (2007-2008). La pollution de l'eau d'origine industrielle.
- [34]- **Payment P. & Hartemann P.** (1998). Les contaminants de l'eau et leurs effets sur la santé.
- [35]- **Rodier J.** (1984). L'analyse de l'eau, eaux naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 7^e édition Dunod, Paris.
- [36]-**Rodier J.** (2005). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer. 8eme édition : Dunod, Paris.
- [37] **Saida. Sbargoud.** (2010). Validité de l'application de la méthode de vulnérabilité DRASTIC à l'étude de la pollution par les nitrates dans la Mitidja (Nord d'Algérie).
- [38]-**Sciences physiques en BTS.,** Titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet.
- [39]- **S.Zamiche, F.Hamaidi-Chergui, A.Demiai.** (2017). Pollution of the quaternary aquifer of mitidja (Algeria) by nitrates: origins and impacts on the quality of water for human consumption.
- [40]- **Trevisan D, Vansteelant JY, Dorioz JM.** (2002). Survival and leaching of faecal bacteria after slurry spreading on mountain hay meadows: consequences for the management of water contamination risk. Water Research.
- [41]- **Tardat H., Beaudry J.** (1984). Chimie des eaux, Ed Le Griffon d'argile INC, Québec.
- [42]- **Technique du RéFEA,** Analyse physico-chimique.
- [43] - **Timoléon Andzi Barhé et ulbert Bouaka.** (2013). Caractérisation Physicochimique et Chloration des Eaux de Puits Consommées dans la Ville de Brazzaville-Congo (Physicochemical Characterization and Chlorination of Well Water Consumed in Brazzaville-Congo).
- [44]- **Vololonirina H., Ralalarisoa. T. H.** (2018). Monographie de la commune Ambohimangakely.

REFERENCES WEBOGRAPHIQUES :

- [Wwwbretagne.dire.gouv.fr](http://www.bretagne.dire.gouv.fr)
- <http://www.jfas.info>
- <http://www.puits-madagascar.org/forage>, Puits/forage à Madagascar,
- [http:// nicole.cortial.net](http://nicole.cortial.net)

ANNEXES

Annexe 1 :

- Tableau des précipitations et températures moyennes 2013 – 2017 (IVème Arrondissement et Ambohimangakely)

Précipitation, température, nombre du jour moyen dans 5 ans : 2013 - 2017

	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Pluie	278,18	317,44	176,42	26,46	15,74	8,52	9,92	3,84	6,18	51,1	179,66	327,1
Température	22	22,1	22,05	20,5	17,91	16,17	15,42	16,12	17,56	20,3	21,77	22,38
Nb jours	16,4	18,4	11,4	4	3,4	5,2	4,6	3,6	2,4	5	13	16,8

Source : Station météorologique Ampandrianomby Antananarivo

Pluviométrie total annuelle : 1400,56 mm

Température moyenne annuelle : 19,44°C

Nombre total des jours de précipitation annuelle : 104,2 jours

- Tableau des précipitations et températures moyennes 2013 – 2017 (Ambohidratrimo)

Précipitation, température, nombre du jour moyen dans 5 ans : 2013 - 2017

	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Pluie	276,84	275,42	198,68	18,86	9,64	4,44	10,24	5	7,2	33,9	142,7	298,46
Température	22,25	21,65	22,19	20,8	14,66	16,49	15,71	16,25	17,54	20,28	21,81	22,71
Nb jours	19,6	17,2	12	2,8	2,4	3,2	2,8	3,4	2	5,2	12,8	16,8

Source : Station météorologique Ampandrianomby Antananarivo

Pluviométrie total annuelle : 1281,38 mm

Température moyenne annuelle : 19,36°C

Nombre total des jours de précipitation annuelle : 100,2 jours

- Mode de calcul
 - Calcul de la recharge efficace

En appliquant la formule relative au bilan hydrique, on peut évaluer la recharge de la nappe :

P = E + I + R où P : précipitation ; E : évapotranspiration ; R : ruissellement ; I : infiltration.

Avec **D = P - R = E + I** où D : déficit de l'écoulement.

P_{A et B} = 1400,56 mm e ; P_C = 1281,38 mm et ETP_{A et B} = 575 mm ; ETP_C = 558 mm

La formule de Turc s'écrit :
$$D(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{(0,9 + \frac{11646521}{3598229})}}$$

En appliquant cette formule on a $D_A \text{ et } B = 688 \text{ mm}$

$$D_C = 630 \text{ mm}$$

Comme $I = D - E$, alors la valeur est $I_{A \text{ et } B} = 113,6 \text{ mm}$

$$I_C = 72 \text{ mm}$$

Le taux d'infiltration est défini par : $T.I = \frac{I}{P} \times 100$

$$T.I_{A \text{ et } B} = 8,11\%$$

$$T.I_C = 6\%$$

- Calcul des indices DRASTIC

$$ID = (n_D * P_D) + (n_R * P_R) + (n_A * P_A) + (n_S * P_S) + (n_T * P_T) + (n_I * P_I) + (n_C * P_C)$$

Où **P** : Poids (pondération) du paramètre et **n** : Note ou coefficient des paramètres.

Sites	$n_D * P_D$	$n_R * P_R$	$n_A * P_A$	$n_S * P_S$	$n_I * P_I$	$n_C * P_C$	ID	Degré de vulnérabilité
C1	3*5	1*4	6*3	9*2	8*5	1*3	98	Faible
C5	3*5	1*4	6*3	9*2	8*5	1*3	98	
C2	5*5	1*4	6*3	9*2	8*5	1*3	113	
C4	5*5	1*4	6*3	9*2	8*5	1*3	113	
B1	5*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	125	Moyen
B5	5*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	125	
C3	8*5	1*4	6*3	9*2	8*5	1*3	128	
B4	7*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	135	Elevé
A5	9*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	145	Plus élevé
A3	9*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	145	
A1	10*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	150	
A2	10*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	150	
A4	10*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	150	
B2	10*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	150	
B3	10*5	3*4	6*3	9*2	8*5	1*3	150	

Annexe 2 : Tableau des maladies hydriques

District	Maladies diarrhéiques 2013 (01-2013 à 12-2013)						
	0 - 28j	29j - 11moi	1 - 4 ans	5 - 14 ans	15 - 24 ans	25 ans et plus	Total
Antananarivo Renivohitra	480	8 460	16 860	7 991	6 212	18 891	58 882
Antananarivo Avaradrano	38	1 636	3 745	2 051	1 422	3 143	12 035
Ambohidratrimo	28	2 006	4 518	2 139	1 493	4 269	14 438
2014 (01 - 2014 à 12 - 2014)							
Antananarivo Renivohitra	495	8 768	17 062	7 794	5 854	18 282	58 255
Antananarivo Avaradrano	36	2 099	4 430	2 288	1 538	3 651	14 042
Ambohidratrimo	32	2 066	4 103	2 166	1 698	4 725	14 790
2015 (01 - 2015 à 12 - 2015)							
Antananarivo Renivohitra	357	5 051	10 019	4 628	3 811	12 388	36 254
Antananarivo Avaradrano	54	1 510	3 565	1 685	1 098	2 551	10 463
Ambohidratrimo	23	1 523	2 790	1 149	921	2 544	8 950
2016 (01 - 2016 à 12 - 2016)							
Antananarivo Renivohitra	584	5 916	12 702	6 896	5 985	17 769	49 852
Antananarivo Avaradrano	97	2 161	4 746	2 345	1 521	3 111	13 981
Ambohidratrimo	45	1 935	4 318	1 881	1 695	6 207	16 081
2017 (01 - 2017 à 12 - 2017)							
Antananarivo Renivohitra	281_	5 959	13 086	6 215	6 690	15 824	47 774
Antananarivo Avaradrano	89	1 996	3 905	1 691	1 359	2 816	11 856
Ambohidratrimo	70	1 553	3 126	1 288	1 208	3 767	11 012

District	Maladies IRA 2013(01-2013 à 12-2013)						
	0 - 28j	29j - 11moi	1 - 4 ans	5 - 14 ans	15 - 24 ans	25 ans et plus	Total
Antananarivo Renivohitra	2 541	39 320	80 544	66 165	44 896	147 650	380 898
Antananarivo Avaradrano	442	9 686	20 719	21 961	12 426	29 622	94 856
Ambohidratrimo	303	8 665	16 131	16 655	9 739	24 765	76 257
2014 (01 - 2014 à 12 - 2014)							
Antananarivo Renivohitra	2 327	35 110	68 513	53 968	40 334	135 617	335 869
Antananarivo Avaradrano	489	10 635	19 386	19 362	12 830	28 796	91 498
Ambohidratrimo	382	9 034	15 474	13 476	9 972	26 589	74 855
2015 (01 - 2015 à 12 - 2015)							
Antananarivo Renivohitra	198	5 234	9 841	11 927	10 470	36 429	74 099
Antananarivo Avaradrano	56	1 098	2 491	3 807	3 064	5 045	15 561
Ambohidratrimo	59	1 108	2 530	3 212	2 787	6 395	16 091
2016 (01 - 2016 à 12 - 2016)							
Antananarivo Renivohitra	320	5 682	12 754	18 569	16 380	47 989	101 694
Antananarivo Avaradrano	129	1 959	3 659	4 972	4 462	6 717	21 898
Ambohidratrimo	116	1 521	3 852	5 004	4 011	9 602	24 106
2017 (01 - 2017 à 12 - 2017)							
Antananarivo Renivohitra	454	5 467	10 292	12 868	12 903	30 007	71 991
Antananarivo Avaradrano	137	1 781	3 416	4 129	4 067	6 386	19 916
Ambohidratrimo	61	989	2 750	3 037	2 886	5 579	15 302

Annexe 3 : Milieu environnant les sites d'études et l'usage.

SITE A				
A₁	A₂	A₃	A₄	A₅
Puits Profondeur d'environ 0,3 m Eau de lessive Près du canal d'Andriantany à 10 m Présence d'eau stagnante Situé environ 11 m du latrine Puits non protégée Couleur : jaune claire Puits collectif	Puits Profondeur d'environ 0,5 m Eau de lessive Situé environ 10m du latrine Couleur : jaunâtre Puits collectif	Puits Profondeur d'environ 1 m Eau de lessive Près du canal d'Andriantany à 9 m Situé environ 14m du latrine Puits non protégée Couleur : jaunâtre Puits collectif	Puits Profondeur d'environ 0,3 m Eau de lessive Près du canal d'Andriantany à 10 m Situé environ 15m du latrine Puits non protégée Couleur : jaunâtre Puits collectif	Puits Profondeur d'environ 1m Eau de lessive Près de la zone marécageuse Situé environ 13m du latrine Couleur : jaunâtre Puits collectif
SITE B				
B₁	B₂	B₃	B₄	B₅
Puits Profondeur d'environ 6 m Eau de consommation et lessive Situé environ 15 m du latrine Couleur : claire Puits individuel	Puits Profondeur d'environ 0,5 m Eau de consommation et lessive Situé environ 13 m du latrine Entouré des plantations Couleur : claire Puits individuel	Puits Profondeur d'environ 0,5m Eau de consommation et lessive Situé environ 9 m du latrine et 3 m du champ de culture Puits non protégée Couleur : claire Puits collectif	Puits Profondeur d'environ 3 m Eau lessive Présence d'eau stagnante Situé environ 5 m du latrine, 5 m de bac ordure et 6m d'élevage Puits non protégée Couleur : jaune poussin Puits collectif	Puits Profondeur d'environ 9 m Eau de consommation et lessive Situé environ 20 m du latrine Couleur : claire Puits individuel

SITE C				
C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Puits Profondeur d'environ 10,5 m Eau de consommation et lessive Situé environ 20m du champ de culture et 16 m du latrine Couleur : claire Puits individuel	Puits Profondeur d'environ 6m Eau de consommation et lessive Situé environ 1m des plantations et 17m du latrine Couleur : claire Puits collectif	Puits Profondeur d'environ 1,5m Eau de consommation et lessive Situé environ 3m du champ de culture et 17m du latrine Couleur : claire Puits individuel	Puits Profondeur d'environ 9 m Eau de consommation et lessive Situé environ 20m du latrine Couleur : claire Puits individuel	Puits Profondeur d'environ 13 m Eau de consommation et lessive Situé au bord d'une route Couleur : jaunâtre Puits individuel

Annexe 4 : Résultats physico-chimique et microbiologique

- Résultats des analyses physico-chimiques

Quartier IV ^{ème} Arrondissement: SITE « A »						NORME		UNITE	*Remarque
Site Paramètre	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	OMS 2008	JIRA-MA		
Couleur	10	80	120	20	25	15	Incolore	mg.L ⁻¹	A ₂ , A ₃ , A ₄ , A ₅
Odeur	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	-	
pH	6,06	6,17	6,15	6,14	6,48	6,5 – 8,5	6,5 – 9,5		A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , A ₅
Cond	760	727	786	1572	1474	< 2000	< 3000	µs.cm ⁻¹	
Turbidité	1,92	19,7	12,72	2,64	0,70	< 5	< 5	NTU	A ₂ , A ₃
Salinité	8,57	8,57	8,57	20	20	1500	1500	mg.L ⁻¹	
Matière organique	1,1	2,6	1,8	2	2,9	< 5	< 5	mg.L ⁻¹	
OD	7,98	7,80	7,2	7,32	7,17			mg.L ⁻¹	
TAC	17	25	27	25	76	100		°F	
Ammonium	0,1	0,06	0,3	0,02	0,4	0,5	0,5	mg.L ⁻¹	
Chlorure	137,2	123,4	151	108,5	195,3	250		mg.L ⁻¹	
TH	7	6	4	5,6	6,2	50	50	°F	
Nitrate	7,3	9,85	0,48	3,38	6,11	< 50	< 50	mg.L ⁻¹	
Nitrite	0,16	0,06	0,06	0,03	0,04	< 0,1	< 0,1	mg.L ⁻¹	A ₁
Ortho	0,12	0,035	0,053	0,027	0,042	5		mg.L ⁻¹	
Phosphore Total	0,17	0,016	0,043	0,016	0,034	5	< 5	mg.L ⁻¹	
MES	15,9	21,1	28,5	16,5	10,2	0		mg.L ⁻¹	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , A ₅
DCO	53	79,2	110	61,6	96,8	-		mg.L ⁻¹	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , A ₅
DBO5	22,7	31,2	19,3	26,7	44,2	-		mg.L ⁻¹	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , A ₅

* Echantillon présentant des valeurs supérieures aux valeurs guide de l'OMS ou de la norme Malgache.

Quartier Ambohimangakely: SITE « B »						NORME		UNITE	*Remarque
Site Paramètre	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	OMS 2008	JIRA-MA		
Couleur	5	5	5	10	5	15	Inco-Lore	mg.L ⁻¹	
Odeur	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	-	
Ph	4,68	5,72	5,92	6,02	5,98	6,5 – 8,5	6,5 – 9,5		B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₅
Cond	412	174,9	914	371	204	< 2000	< 3000	µs.cm ⁻¹	
Turbidité	0,55	0,22	0,31	3,85	0,54	< 5	< 5	NTU	
Salinité	2,85	0	11,43	2,85	0	1500	1500	mg.L ⁻¹	
Matière organique	1	1,9	1,6	1,6	1,5	< 5	< 5	mg.L ⁻¹	
OD	7,65	7,67	7,67	7,66	7,79			mg.L ⁻¹	
TAC	2	4	5	10	9	100		°F	
Ammonium	0,01	0,03	0,4	0,6	0,05	0,5	0,5	mg.L ⁻¹	B ₄
Chlorure	46,8	16,7	86,9	52,1	24,1	250		mg.L ⁻¹	
TH	20,2	8	19,4	10,6	11	50	50	°F	
Nitrate	37,2	44,4	42,2	47,1	22,4	< 50	< 50	mg.L ⁻¹	
Nitrite	0,04	0,03	0,41	0,18	0,01	< 0,1	< 0,1	mg.L ⁻¹	B ₃ , B ₄
Ortho	0,03 3	0,074	0,018	0,06	0,029	5		mg.L ⁻¹	
Phosphore Total	0,01	0,068	0,01	0,031	0,36	5	< 5	mg.L ⁻¹	
MES	1	1,9	1,6	1,6	1,5	0		mg.L ⁻¹	B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₅
DCO	51	23	42	42	55	-		mg.L ⁻¹	B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₅
DBO ₅	21,6	11,6	18	13,4	22,6	-		mg.L ⁻¹	B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₅

* Echantillon présentant des valeurs supérieures aux valeurs guide de l'OMS ou de la norme Malgache.

Quartier Ambohidratrimo: SITE « C »						NORME		UNITE	*Remarque
Site Paramètre	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	OMS 2008	JIRA-MA		
Couleur	5	5	5	5	25	15	Inco-Lore	mg.L ⁻¹	C ₅
Odeur	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	-	
pH	5,6	5,52	5,81	5,74	6,13	6,5 – 8,5	6,5 – 9,5		C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅
Cond	15,4	112	22,8	55,9	365	< 2000	< 3000	µs.cm ⁻¹	
Turbidité	2,46	1,68	1,64	2,80	16,8 3	< 5	< 5	NTU	C ₅
Salinité	0	0	0	0	2,85	1500	1500	mg.L ⁻¹	
Matière organique	2,1	2,4	2,3	1,5	2,4	< 5	< 5	mg.L ⁻¹	
OD	7,86	7,54	7,94	7,20	7,90			mg.L ⁻¹	
TAC	2	1	2	3	3	100		°F	
Ammonium	0	0,2	0,3	0,06	0,1	0,5	0,5	mg.L ⁻¹	
Chlorure	4,6	10,6	3,5	4,3	35,8	250		mg.L ⁻¹	
TH	1,6	17	0,8	1,4	11,4	500	50	°F	
Nitrate	2,5	37,62	44	10,73	33,6 6	< 50	< 50	mg.L ⁻¹	
Nitrite	0,04	0,05	0,04	0,05	0,08	< 0,1	< 0,1	mg.L ⁻¹	
Ortho	0,01 1	0,028	0,013	0,056	0,1	5		mg.L ⁻¹	
Phosphore Total	0,04 2	0,038	0,033	0,031	0,09 5	5	< 5	mg.L ⁻¹	
MES	3,3	1,8	2,1	4,6	47,9	0		mg.L ⁻¹	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅
DCO	47	19	118	52	19	-		mg.L ⁻¹	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅
DBO5	17,7	10	12,6	21,4	10,3	-		mg.L ⁻¹	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅

* Echantillon présentant des valeurs supérieures aux valeurs guide de l'OMS ou de la norme Malgache.

- Résultats des analyses microbiologiques

Paramètres Puits	ASR /100mL	CT /100mL	ENTERO /100mL	<i>E.coli</i> /100mL	<i>SALMONELA</i> /1L
A ₁	1 5	>2419.6	579.4	>2419.6	Abs
A ₂	>100	>2419.6	410.6	>2419.6	Abs
A ₃	>100	>2419.6	>2419.6	>2419.6	Abs
A ₄	23	>2419.6	11.9	>2419.6	Abs
A ₅	19	1732.9	1299.7	235.9	Abs
B ₁	0	1413.6	32.1	1	Abs
B ₂	19	1553.1	3	75.9	Abs
B ₃	1	>2419.6	1732.9	1986.3	Abs
B ₄	20	1046.2	8.4	307.6	Abs
B ₅	6	>2419.6	178.9	50.4	Abs
C ₁	1	547.5	6.3	14.6	Abs
C ₂	100	>2419.6	111.2	172.2	Abs
C ₃	31	>2419.6	102.2	21.8	Abs
C ₄	38	980.4	18.1	6.3	Abs
C ₅	4	>2419.6	20.6	8.5	Abs
Norme OMS 2008	< 2	0	0	0	Abs

Annexe 5 : Méthode des analyses des paramètres physico-chimique des eaux

Mesure de la couleur

La mode opératoire consiste à rechercher la valeur :

- verser l'eau ultra-pure dans un tube d'observation de NESSLER jusqu'au trait du tube,
- Verser l'échantillon dans un autre tube d'observation de NESSLER jusqu'au trait du tube,
- Essuyer les tubes avant de le mettre dans l'appareil comparateur de couleur,
- placer un disque d'étalonnage dans l'appareil (les disques étalonnages sont de couleur **0** à **70mg. L⁻¹** de Platine),
- brancher et allumer l'appareil pendant le choix si la couleur dans le disque correspond à celle de l'échantillon,
- si la couleur de l'échantillon ne rentre pas dans la couleur, on fait une dilution.

Expression des résultats avec dilution :

- si la différence entre le pH avant et après dilution est inférieure à 1 mesure pH, on donne l'équation suivante :

$$A_0(\text{mg. L}^{-1}) = \frac{V_1(\text{ml})}{V_0(\text{ml})} \times C_1(\text{mg. L}^{-1})$$

Avec :

A₀ = La valeur de la couleur d'échantillon

V₁ = Volumede l'échantillon après dilution

V₀ = volume de l'échantillon avant dilution

C₁ = valeur de la couleur estimée de l'échantillon dilué

- si la différence entre le pH avant et après dilution est supérieur à 1, la couleur **A₀** est donc supérieur à **70mg. L⁻¹**.

Mesure de la turbidité :

- verser l'eau à analyser jusqu'au trait du flacon,
- essuyer le flacon avant de le mettre dans l'appareil,
- brancher et d'allumer l'appareil,
- appuyer sur RANG puis sur READ
- lire directement sur l'écran la valeur de la turbidité de l'eau en **NTU**

Mesure de l'MES :

- laisser l'échantillon en équilibrer à température ambiante,
- prélever le filtre en filtrant environ 150 ml d'eau ultra pure (EUP),
- sécher le filtre pendant une heure au moins à l'étuve à 105°C,
- laisser l'eau s'équilibrer à température, peser et prendre note comme m_1 la masse avant trouvée,
- placer le filtre sur le fritté du système de filtration,
- filtrer les 100ml d'échantillon sur le papier filtrant,
- rincer l'éprouvette avec 20ml d'EUP et filtrer également cette eau de rinçage pour laver le filtre,
- rincer les parois internes de l'entonnoir avec 20mL d'EUP,
- retirer le filtre et placer dans une boîte de pétri en verre et l'introduire dans l'étuve à 105°C pendant une heure minimum et 16 heure maximum,
- retirer la boîte de pétri dans l'étuve et laisser refroidir dans un dessiccateur,
- peser le filtre et noter m_2 la masse après trouvée.

Expression des résultats :

$$\text{MES}(\text{mg. L}^{-1}) = [m_2(\text{mg}) - m_1(\text{mg})] \frac{1000}{V_{\text{éch}}(\text{mL})}$$

Avec :

m_2 : Le poids du filtre après filtration

m_1 : Le poids du filtre avant la filtration

$V_{\text{éch}}$: Le volume d'échantillon filtré

Mesure de la matière organique :

- prélever 25ml d'échantillon,
- ajouter 5ml de ($H_2SO_4 + KMNO_4$) à 2 mol. L^{-1} , porter à l'ébullition dans le bain d'eau bouillante (entre 96°C et 98°C) pendant 10mn,
- ajouter 5ml de $KMNO_4$ à 2 mmol. L^{-1} , après 10mn ajouter 5ml d'oxalate de sodium à 5 mmol. L^{-1} et attendre que la solution se décolore
- titrer avec $KMNO_4$ jusqu'à une coloration rose pâle persistante pendant environ 30s,
- noter le volume V_1 de solution de $KMNO_4$ consommé.

Expression des résultats

$$I_{Mn} = [V_1 (\text{mL}) - V_0(\text{mL})] \times \frac{f (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})}{V_2(\text{mL})}$$

Avec :

V_0 = volume de la solution de permanganate consommé du dosage du blanc (même mode opératoire que l'échantillon).

V_1 = volume de la solution de permanganate consommé du dosage de la prise d'échantillon.

V_2 = volume de la solution de permanganate consommé pour l'étalonnage.

f = le facteur est utilisé pour recalculer l'oxygène et pour tenir compte du volume d'échantillon utilisé :

f est calculé comme suit :

$$f = V_4(\text{mL}) \times C(\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4)(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}) \times M_0(\text{mg} \cdot \text{mmol}^{-1}) \times \frac{1000}{1000 \times V_5(\text{mL})}$$

Ou,

V_4 = le volume de la solution étalon d'oxalate de sodium consommé par la détermination du volume V_2 de solution de permanganate consommé (en général =5).

$C(\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4)$ = la concentration de quantité de matière de la solution étalon d'oxalate de sodium (en général =5).

M_0 = la masse molaire pour recalculer l'oxygène (dans le cas présent =16).

1000 (numérateur) = le facteur utilisé pour calculer $C(\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4)$ de $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, en $\text{mmol} \cdot \text{mL}^{-1}$, en $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$.

1000 (dénominateur) = le facteur utilisé pour recalculer la valeur mesurée à 11 du volume d'échantillon en $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$.

V_5 = le volume d'échantillon utilisé (dans le cas présent =25)

Mesure de la TA et TAC :

- prélever 100ml de l'échantillon,
- ajouter 0,1mL de l'indicateur de phénolphthaléine pour vérifier le changement de couleur de la solution, (si la solution obtenue se colore rose : titrer la solution avec l'acide chlorhydrique jusqu'à la disparition de la couleur rose : le volume de HCl consommé est noté V_1),
- ajouter 0,1 mL de l'indicateur de vert de bromocrésol-rouge de méthyle à la solution précédente,

- titrer avec de l'acide HCl jusqu'au changement de couleur, de vert bleu à gris (le volume totale de HCl consommé est noté V_2).

Expressions des résultats

-Alcalinité composite titrable à pH 8.3 alcalinité (phénolphtaléine) : A_P

$$A_P = C(HCl)(\text{mol. } L^{-1}) \times V_1(mL) \times \frac{1000}{V_0(mL)}$$

-Alcalinité totale : A_T

$$A_T = C(HCl)((\text{mol. } L^{-1}) \times V_2(mL) \times \frac{1000}{V_0(mL)}$$

Avec :

$C(HCl)$ = la concentration réelle de la solution de HCl utilisée

V_0 = volume de la prise d'essai

V_1 = volume de HCl pour atteindre un pH de 8.3

V_2 = volume de HCl pour atteindre un pH de 4.5

Mesure de la Nitrate :

Remplir le tube Nitrat est avec l'échantillon jusqu'au trait 20mL. Ajouter une cuillère de « Poudre Nitrat est » et une « Pastille Nitrat est ». Ne pas écraser la pastille. Fermer le tube avec le capuchon et agiter pendant une minute. Attendre une autre minute puis remuer le tube trois ou quatre fois pour permettre la floculation. Attendre encore deux minutes ou jusqu'à l'obtention d'une solution claire. Enlever le capuchon et nettoyer le haut du tube avec un papier propre. Transférer le contenu de cette solution claire dans une éprouvette ronde jusqu'au trait 10mL. Ajouter une « Pastille Nitricol », écraser et remuer pour dissoudre. Attendre 10 minutes, jusqu'au développement complet de la couleur. Sélectionner « Phot 23 » sur le palintest pour mesurer la concentration en mgL^{-1} de Nitrate. Mettre l'échantillon dans la chambre d'analyse et presser « lire » après quelque seconde sa valeur affichée sur l'écran.

Expression des résultats

La concentration de Nitrate, exprimée en mgL^{-1} est donnée par la formule :

$$[NO_3^-] (mgL^{-1}) = \rho (mgL^{-1}) \times 4,4$$

ρ : Concentration de la Nitrate affiché sur l'écran

$$4,4 = \frac{\text{masse molaire atomique d'azote, exprimée en } g.mol^{-1}}{\text{masse molaire atomique de Nitrate, exprimée en } g.mol^{-1}} = \frac{M_N}{M_{NO_3}}$$

Mesure de la Nitrite :

- Prélaver 40 mL d'échantillon,
- ajouter 1 mL du réactif coloré et compléter à 50 mL avec de l'eau ultra pure,
- laisser reposer au moins 20mn,
- lire l'absorbance à 540nm au spectrophotomètre.

Expression des résultats :

Absorbance corrigé A_r de la solution d'essai :

Avec l'équation de : $A_r = A_s - A_b$

Si l'on a procédé à une correction pour la couleur :

Avec l'équation de : $A_r = A_s - A_b - A_c$

Où :

A_s : L'absorbance mesurée de l'échantillon

A_b : L'absorbance de l'essai blanc

A_c : L'absorbance de la solution préparée pour la correction de la couleur

La concentration de Nitrite, exprimée en mgL^{-1} est donnée par la formule :

$$[NO_2^-](mg.L^{-1}) = \frac{m_N(\mu g)}{V(mL)} \times 3,29$$

m_N : La masse de nitrite correspondant à l'absorbance corrigée A_r .

V : Le volume de la prise d'essai.

$$3,29 = \frac{\text{masse molaire atomique d'azote, exprimée en } g.mol^{-1}}{\text{masse molaire atomique de Nitrite, exprimée en } g.mol^{-1}} = \frac{M_N}{M_{NO_2}}$$

Mesure de l'Ammonium :

- prélever 20 mL d'échantillon,
- ajouter 1 mL de l'indicateur de phénolphtaléine,
- ajouter 1 mL de solution alcaline complexant et colorée
- agiter pendant 6 heures à l'agitateur,
- lire l'absorbance à 630 nm au spectrophotomètre.

Expression des résultats :

Absorbance corrigé A_r de la solution d'essai :

$$\text{Avec l'équation de : } A_r = A_s - A_b$$

A_s : L'absorbance mesurée de l'échantillon

A_b : L'absorbance de l'essai blanc

$$[NH_{4+}] (mg.L^{-1}) = \frac{A_r - \text{ordonnée à l'origine d'étalonnage}}{\text{Pente de la courbe d'étalonnage}}$$

Mesure de la Chlorure :

- prélever 100 mL d'échantillon
- 1 mL d'indicateur de chromate de potassium
- titrer la solution par le nitrate d'argent jusqu'à obtention d'une couleur brun-rougeâtre,

Expression des résultats :

La concentration de chlorure en $mg.L^{-1}$ est donnée par l'équation :

$$[Cl](mg.L^{-1}) = \frac{[V_s(mL) - V_b(mL)] \times C (mol.l^{-1}) \times f (mg.L^{-1})}{V_a(mL)}$$

V_s : Volume de la solution de nitrate d'argent utilisée pour le titrage de l'échantillon.

V_b : Volume de la solution de nitrate d'argent utilisée pour le titrage du blanc.

V_a : Volume de la prise d'essai

C : La concentration réelle de la nitrate d'argent ($AgNO_3$) à $\approx 0,02$

f : Le facteur de conversion $f = 35453 mg.L^{-1}$

Mesure de la dureté totale :

- introduire 50 mL de l'échantillon,
- ajouter 4 mL de la solution tampon pH 10,
- ajouter 3 gouttes de l'indicateur au noir ériochrome T
- doser la solution avec la solution d'EDTA jusqu'à ce que la couleur de la solution commence à virer du violet au bleu.

Expression des résultats :

$$C(Ca^{2+} + Mg^{2+}) (mmol.L^{-1}) = \frac{1000 \times C (mol.l^{-1}) \times V_1(mL)}{V_2(mL)}$$

$C(Ca^{2+} + Mg^{2+})$: concentration de la dureté totale

V_1 : Volume de l'échantillon.

V_2 : Volume de la solution d'EDTA versé.

C : La concentration réelle de l'EDTA à $\approx 0,01 \text{ mol.L}^{-1}$.

Avec : $1 \text{ mmol.L}^{-1} = 10^\circ\text{F}$

Mesure du phosphore total et orthophosphate :

- introduire 40 mL d'échantillon,
- ajouter 4 mL de solution de persulfate de potassium et minéraliser pendant 30 mn à l'étuve à 100°C
- laisser refroidir et ajuster le pH entre 3 et 10 avec une solution d'acide sulfurique pour réduire le pH si le pH > 10 et hydroxyde de sodium pour augmenter le pH si le pH < 3
- ajouter 1 mL d'acide ascorbique et 2 mL d'acide molybdate acide II
- compléter à 50 mL de l'eau ultra pure
- laisser reposer pendant 10 à 30 mn
- mesurer l'absorbance à 880 nm au spectrophotomètre.

- L'orthophosphate a la même mode opératoire mais il ne passe pas par la minéralisation.

Expression de résultats

$$P = \frac{(A - A_0) \times V (\text{mL})}{f \times V_s (\text{mL})}$$

A : Absorbance de l'échantillon

A_0 : Absorbance de l'essai à blanc

V : Volume de la solution à compléter (50 mL)

f : Pente de la courbe d'étalonnage

V_s : Volume de la prise d'essai

Mesure de la DCO :

- prendre 10mL d'échantillon, 5mL de la solution dichromate de potassium, 15mL d'acide sulfurique-Sulfate d'argent
- les mélanger puis chauffer à reflux pendant 2h
- refroidir et ajuster à environ 75mL avec de l'eau U.P
- ajouter 3 gouttes de ferroïne
- titrer avec le sel de Mohr à $0,12 \text{ mol.L}^{-1}$ Jusqu'à ce que la couleur de la solution commence à virer du brun rouge.

Expression des résultats

$$DCO(mg.l^{-1}) = \frac{8000 \times C(mg.l^{-1}) \times [V_1(mL) - V_2(mL)]}{V_0(mL)}$$

C : est la concentration de la solution titrant déterminée par étalonnage du sel de Mohr

V_0 : est le volume de la prise d'essai (10 mL)

V_1 : est le volume de solution titrante nécessaire pour l'essai à blanc

V_2 : est le volume de solution titrante nécessaire pour le titrage de l'échantillon

Mesure de la DBO5 :

- Disposer les fioles jaugées de 500 ml
- Verser dans chacune d'elles un volume défini de l'échantillon traité
- Ajouter 0,2mL de solution tampon, de sulfite de magnésium, de chlorure de calcium, de chlorure de fer, de sulfite de sodium et 0,4 mL d'ATU (d'allyl thio-urée à 200mg.L⁻¹)
- Compléter chaque fiole avec l'eau de dilutionensemencée.
- Homogénéiser doucement afin d'éviter de piéger des bulles d'air
- Disposer les flacons d'incubation DBO
- Remplir chaque flacon avec le contenu d'une fiole en laissant légèrement déborder
- Mesurer la concentration en oxygène dissous dans chaque flacon
- Placer les flacons dans l'incubateur et laisser à l'obscurité pendant 5 jours \pm 4H
- Après incubation, mesurer la concentration en oxygène dissous dans chaque flacon.

Expression des résultats

$$DBO_5(mg.l^{-1}) = \left((C_{15}(mg.l^{-1}) - C_{16}(mg.l^{-1})) - \left(\frac{(V_{14}(mL) - V_{13}(mL))}{V_{14}(mL)} \right) \right) \times \left(\frac{V_{14}(mL)}{V_{13}(mL)} \right)$$

C_6 : est la concentration en oxygène dissous avant l'incubateur (temps 0) pour l'essai à blanc

C_7 : est la concentration en oxygène dissous après l'incubateur (temps 5 jours) pour l'essai à blanc

V_{13} : Volume de la prise d'essai

V_{14} : Volume total de l'échantillon (500ml)

C_{15} : est la concentration en oxygène dissous avant l'incubateur (temps 0) pour l'échantillon

C_{16} : est la concentration en oxygène dissous après l'incubateur (temps 5 jours) pour l'échantillon

Annexe 6 : Méthode des analyses des paramètres microbiologies

Mesure de la CT et EC :

- allumer la scelleuse Quanti-tray 15 minute avant l'utilisation,
- Choisir une plaque quanti-tray 2000 avec de 49 grandes puits et 48 petits puits,
- dans des conditions aseptiques, transférer 100 *mL* d'échantillon dans le flacon à usage unique.
- ajouter un sachet de milieu déshydraté colilert-18,
- fermer le récipient et agiter doucement jusqu'à dissolution complète,
- verser soigneusement le mélange dans la plaque quanti-tray,
- introduire la plaque dans la scelleuse pour l'étanchéifier,
- incuber les plaques à $36^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 18 à 22 heures,
- compter les nombres grand puits et les petits puits de couleur jaune en se servant du comparative, les considérer comme des bactéries coliformes,
- placer la plaque dans la chambre UV (365nm), considérer comme positifs à EC tous les nombres grande puits et les petits puits jaunes présentant une fluorescence.

Expression de résultat

Ce tableau est à double entrée : le nombre des grand puits positif (colonne) et de petit puits positifs (ligne). La valeur NPP/ 100 *mL* est lue à l'intersection.

Mesure de l'Entérocoques intestinaux :

- allumer la scelleuse Quanti-tray 15 minute avant son utilisation,
- Choisir une plaque quanti-tray 2000 avec de 49 grands puits et 48 petits puits,
- dans des conditions aseptiques transférer 100 *mL* d'échantillon dans le flacon à usage unique
- ajouter un sachet de milieu déshydraté entérolert DW,
- fermer le récipient et agiter doucement jusqu'à dissolution complète,
- verser soigneusement le mélange dans la plaque quanti-tray,
- introduire la plaque dans la scelleuse pour l'étanchéifier,
- incuber les plaques à $41^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pendant 24 heures,
- compter les nombres grands puits et les petits puits de couleur vert, les considérer comme des entérocoques intestinaux.

Expression de résultat

Ce tableau est à double entrée : le nombre de grande puits positif (colonne) et de petit puits positifs (ligne). La valeur NPP/ 100 *mL* est lue à l'intersection.

Mesure de l'ASR :

- 100mL d'échantillon est chauffé dans un bain marie réglé à 79°C pendant 15 minutes,
- l'échantillon est immédiatement placé dans un bain d'eau froide,
- filtrer avec une membrane de porosité 0,2 µm. La membrane est placée (la face supérieure vers le bas) à l'aide d'une pince stérile dans le fond d'une boîte de Pétri,
- après avoir ajouté 20 *mL* de gélose tryptose sulfite à la D-cyclosérine (TSC) sur la membrane, l'ensemble est incubé à $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ en condition d'anaérobiose pendant 20 ± 4 heures suivie d'une seconde lecture à 44 ± 4 heures. Lorsque le témoin d'anaérobiose a bien fonctionné (virage de couleur), toutes les colonies noires après incubation pendant 20 ± 4 heures et 44 ± 4 heures sont considérées comme ASR.

Annexe 7 : Méthode statistique**Corrélation**

Elle mesure la force ou l'intensité de lien entre la variable dépendante (ou variable à expliquer) noté y et la variable indépendante (ou variable explicative) noté x .

On dit qu'il existe une relation entre x et y si les valeurs de y dépendent de x . Autrement dit, pour un x donné, l'attribution de la valeur de y ne se fait pas au hasard. La corrélation est obtenue à l'aide de la formule ci-après :

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Ou x_i = variable explicative ; \bar{x} = moyenne de x

Ou y_i = variable dépendante ; \bar{y} = moyenne de y

L'interprétation de $r_{x,y}$ est comme suit :

Si $r_{x,y}$ est proche de 0, alors il n'y a pas de relation linéaire entre x et y

Si $r_{x,y}$ est proche de -1, alors il y a une forte relation linéaire négative entre x et y

Si $r_{x,y}$ est proche de +1, alors il y a une forte relation linéaire positive entre x et y

Annexe 8 : Quelques appareils et matériels des analyses



Oxymètre



Spectrophotomètre



comparateur de couleur



GPS



Palintest



Turbidimètre



Ph mètre

conductimètre



Filtre



Plaque quanti-tray 2000



scelleuse Quanti-tray

HIAJARIVOLA

Landrisoa Melanie

Tél : +261 326 741 122 / +261 346 084 320

E.mail : landrisoamelanie@gmail.com

TITRE : « Etude de vulnérabilité et du risque de pollution de l'eau souterraine (puits) de la ville d'Antananarivo par la méthode DRASTIC »

Résumé :

La présente étude porte sur l'évaluation des facteurs de vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine et la gestion des sources de contamination fécale de la nappe retrouvée dans l'eau souterraine (puits) prélevé dans 15 puits de 3 zones de la ville d'Antananarivo. Ces zones sont en effet habitées qui se sont multipliés dans la ville en dehors de toute mesure de protection de l'environnement.

Les résultats ont montrés que le puits est caractérisé par des pH acide (4,68-6,48). Les puits étudiés étaient tous contaminés et non conforme aux normes OMS lors des analyses physico-chimiques (33,33% pour la couleur, 20% pour la turbidité, 6,66% pour l'MO, 6,66 pour l'ammonium, 20% pour le nitrite et 100% pour l'MES, DCO et DBO5). Par ailleurs, tous les puits sont contaminés par des coliformes totaux, *Escherichia coli*, entérocoques intestinaux et 93,33% par anaérobies sulfito-réducteur. En revanche, on remarque l'absence de *salmonella*.

Par combinaison de la méthode DRASTIC et de logiciel ArcGis, on a obtenu la carte de vulnérabilité de la ville d'Antananarivo qui constitue un outil efficace pour contribuer à la protection des ressources en eau contre une éventuelle pollution. Elles sont précieuses pour toute décision future.

Mots clés : Vulnérabilité, puits, Antananarivo, DRASTIC, contamination

Abstract :

The present study focuses on the assessment of groundwater slop vulnerability factors and the management of fecal contamination sources of slop found in groundwater (wells) collected from 15 wells in 3 zones of Antananarivo City. These areas are indeed inhabited, which have multiplied in the city without any measure of environment protection.

The results showed that the well is characterized by acidic pH (4.68-6.48). The wells studied were all contaminated and not in accordance with WHO (World Health Organization) standards during physico-chemical analyzes (33.33% for the color, 20% for turbidity, 6.66% for MO, 6.66 for ammonium, 20% for nitrite and 100% for MES, DCO and DBO5). In addition, all wells are contaminated with total coliforms, *Escherichia coli*, intestinal enterococci and 93.33% by sulphito-reductive anaerobes. On the other hand, we notice the absence of *salmonella*.

By combination of the DRASTIC method and ArcGis software, we got vulnerability map of Antananarivo City which constitute an effective tool to help protecting water resources against possible pollution. They are precious for any future decision.

Keywords: Vulnerability, wells, Antananarivo, DRASTIC, contamination

Monsieur Rado RASOLOMAMPIANINA Directeur de Recherches Associés au Centre
National de Recherches sur l'Environnement (CNRE)