

TABLE DES MATIERES

GLOSSAIRE.....	i
LISTE DES ABREVIATIONS.....	ii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES PHOTOS.....	vi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
I.1.RESSOURCES NATURELLES.....	3
I.1.1. Eau de surface	3
I.1.2. Eaux souterraines	3
I.1.3. Eau de mer et océans.....	3
I.2. DIFFERENTS TYPES D'AQUIFERES ET DE NAPPES.....	3
I.2.1. Aquifères	3
I.2.2. Nappes.....	4
I.3. MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES	5
I.4. DETERIORATION DE LA QUALITE DE L'EAU	6
I.4.1. Vulnérabilité des nappes à la pollution	6
I.4.2. Principaux types de pollution	6
I.4.2.1. Pollution temporaire et pollution chronique.....	6
I.4.2.2. Pollution linéaire	7
I.4.2.3. Pollution historique	7
I.4.2.4. Pollution ponctuelle et pollution diffuse	7
I.5. PARAMETRES DE QUALITE.....	7
I.5.1. Principaux paramètres de potabilité	7
I.5.1.1. Paramètres physiques	7
I.5.1.2. Paramètres chimiques.....	8
I.5.1.3. Paramètres bactériologiques.....	10
I.5.2. Effets de la pollution sur la santé humaine.	11
I.5.2.1. Magnésium et Calcium	11
I.5.2.2. Sodium et Potassium.....	11
I.5.2.3. Les sulfates.....	11
I.5.2.4. Les chlorures	11
I.5.2.5. Les nitrates	11
I.5.2.6. L'ammonium.....	12
I.6.REVUES SCIENTIFIQUES	12

PARTIE II. MATERIELS ET METHODES	15
II.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	15
II.1.1. Situation géographique	15
II.1.1.1. Localisation.....	15
II.1.1.1. Points de prélèvements et caractéristiques.....	16
II.1.2. Contextes socio-économiques.....	18
II.1.2.1. Population	18
II.1.2.2. Agriculture	18
II.1.2.3. Elevage	19
II.1.2.4. Approvisionnement en eau	19
II.1.3. Contexte physique.....	20
II.1.3.1. Contexte climatique	20
II.1.3.2. Sols et végétation	21
II.1.3.3. Réseau hydrographique.....	22
II.1.3.4. Contexte hydrogéologie	23
II.2. ANALYSES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES ..	24
II.2.1. Analyses physico-chimiques.....	24
II.2.1.1. Paramètres physiques.....	24
II.2.1.2. Paramètres chimiques	26
II.2.1.2.1. Analyse volumétrique	26
II.2.1.2.2. Analyse colorimétrique.....	27
II.2.2. Analyse bactériologique	29
II.3. LE LOGICIEL AQUACHEM	31
II.3.1. Origine du logiciel	31
II.3.2. Objectifs du logiciel et points forts	31
II.3.3. Structure du logiciel.....	31
II.3.3.1.la fenêtre << Record List >>.....	32
II.3.3.2.la fenêtre << Input Window >>	33
II.3.3.3.la fenêtre << Text Window >>	34
II.3.3.4.la fenêtre << Graphic Window >	34
PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	38
III.1. CARACTERISTIQUES HYDRO-CHIMIQUES DES EAUX.....	38
III.1.1. Caractéristiques physiques des eaux.....	38
III.1.1.1. Température.....	38
III.1.1.2. Turbidité	39
III.1.1.3. pH des eaux	39
III.1.1.4. Conductivité électrique et la minéralisation	39

III.1.1.5. La Dureté de l'eau	40
III.1.1.6. Alcalinité de l'eau.....	40
III.1.1.7. La matière organique.....	40
III.1.2. Paramètres chimiques de l'eau	41
III.1.2.1. Calcium	41
III.1.2.2. Magnésium	42
III.1.2.3. Les Bicarbonates	42
III.1.2.4. Sulfates	42
III.1.2.5. Chlorures	43
III.1.2.6. Sodium.....	43
III.2. FACIES CHIMIQUES DES EAUX	44
III.2.1. Représentation graphique sous AQUACHEM.....	44
III.2.1.1. Le diagramme de Schoeller	44
III.2.1.2. Le diagramme de Piper.....	45
III.2.1.3. Le diagramme de Durov	46
III.2.2. Classification des eaux.	47
III.2.2.1. Classification des eaux à TDS < à 300 mg/l.....	48
III.2.2.2. Classification des eaux à 300 mg/l <TDS < 1000 mg/l.....	49
III.2.2.3. Classification des eaux à TDS >1000 mg/l	50
III.3. RAPPORTS IONIQUES	52
III.4. ORIGINE DE SALINITE	53
III.5. QUALITE CHIMIQUE DES EAUX	55
III.5.1. Teneurs en Fer	55
III.5.2. Teneurs en nitrates.....	56
III.5.3. Teneurs en nitrites	57
III.5.4. Teneurs en ammonium	58
III.6. QUALITES BACTERIOLOGIQUES DES EAUX	59
III .7. ETUDE COMPARATIVE DES EAUX SOUTERRAINES D'AMBOASARY-SUD ET MAHAJANGA.....	60
CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES	63
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65
ANNEXE	vii
Annexe I : Mode operatoire des parametres physicochimiques	vii
Annexe II :Norme de potabilisation selon le décret n°2004-635 du 15/06/04 république de Madagascar.....	xi

GLOSSAIRE

- Hydrochimie** : Une science qui étudie le chimisme de l'eau que ce soit de l'eau de surface et que ce soit de l'eau souterraine.
- AQUACHEM** : Un logiciel pour la chimie de l'eau souterraine unique en son genre. Ce logiciel contient une base des données physico-chimiques personnalisable 100 %. Il a une palette exhaustive d'outils d'analyse, de calcul, de modélisation et de représentation graphique.
- Aquifère** : La formation géologique souterraine. C'est un corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable.
- Nappe** : Ensemble de l'eau contenue dans une fraction perméable de la croûte terrestre totalement imbibée, conséquence de l'infiltration de l'eau dans les moindres interstices du sous sol et de son accumulation au-dessus d'une couche imperméable.
- Forage** : Une technique pour creuser un trou dans le sol. Il permet notamment de creuser un puits jusqu'à des profondeurs importantes. Il peut être réalisé par plusieurs techniques différentes : le rotary, le havage, le forage par battage et le tubage à l'avancement.
- Pollution** : Une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes.

LISTE DES ABREVIATIONS

2GE	: Génie de l'Eau et Génie de l'Environnement
JICA	: Agence Japonaise de Coopération Internationale
JIRAMA	: Jiro sy Rano Malagasy
PAEAR	: Programme d'Alimentation Eau potable et Assainissement en milieu Rural
SPSM	: Société de Plantation de Sisals de Madagascar
INSTAT	: Institut National de la Statistique
AQUACHEM	: Aqueous Analysis Chemical
AEP	: Alimentation en Eau Potable
CE	: Conductivité Electrique
TDS	: Total Disolved Solids ou Teneurs en Sels Dissous
E.coli	: <i>Escherichia coli</i>
ASR	: Anaérobies Sulfito-Réducteurs
NTU	: Néphénotométrique Tuyaumétrique Unit
TA	: Titrage Alcalimétrique
TAC	: Titrage Alcalimétrique Complet
TH	: Titre Hydrotométrique
TH_{Ca}	: Titre Hydrotométrique calcique
FTM	: Foibe Taontsaritanin'i Madagasikara
GWW	: Ground Water for Windows
RN	: Route Nationale
WHI	: Waterloo Hydrogeologic Inc
T	: Température
°f	: Degré français
°C	: Degré Celsius
T Max	: Température maximale
T Min	: Température minimale
MO	: Matière organique
Ar	: Ariary
Fe	: Fer
NaCl	: Chlorure de sodium

KCl	: Chlorure de potassium
AgNO₃	: Nitrate d'argent
AgCl	: Chlorure d'argent
BaCl₂	: Chlorure de baryum
CO₂	: Dioxyde de carbone
km²	: kilomètre carrée
m³/h	: Mètre cube par heure
m	: Mètre
cm	: Centimètre
µS/cm	: Microséismes par centimètre
mg/l	: Milligramme par litre
méq%	: Milliéquivalent pourcent
méq/l	: Milliéquivalent par litre

LISTE DES TABLEAUX

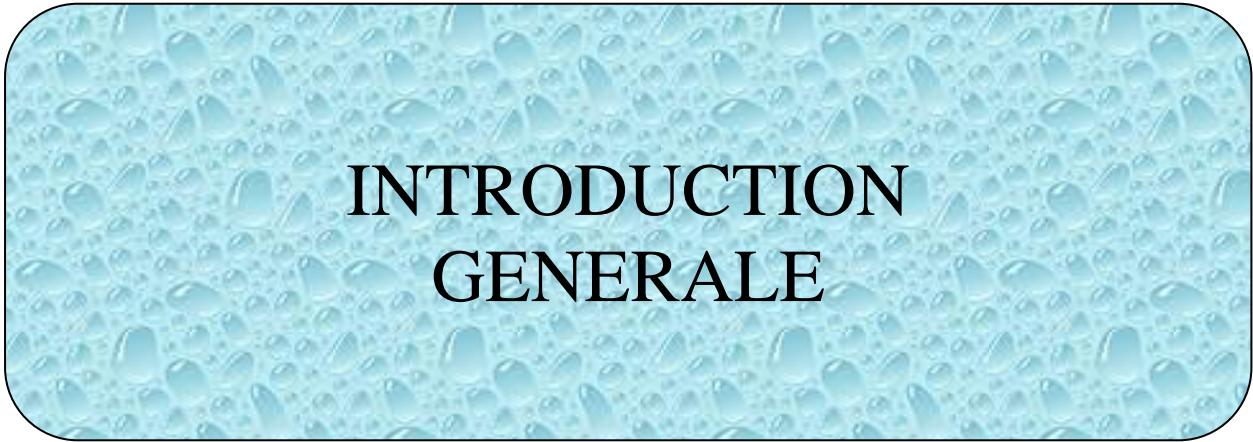
Tableau 1: Répartition de la population par fokontany de la ville d'Amboasary-Sud-----	18
Tableau 2: Température annuelle 2016-----	20
Tableau 3: Précipitation annuelle 2016-----	20
Tableau 4: Relation entre la conductivité et la minéralisation -----	25
Tableau 5 : Classification des eaux souterraines par rapport à la dureté -----	26
Tableau 6 : Classification des eaux souterraines par rapport au chlorure -----	27
Tableau 7 : Tableau de lecture microbienne -----	29
Tableau 8 : Milieu de culture et condition d'incubation des bactéries -----	30
Tableau 9: Résultats des analyses physiques. -----	38
Tableau 10 : Résultats des analyses chimiques. -----	41
Tableau 11 : Rapports caractéristiques des eaux souterraines-----	52
Tableau 12 : Résultats des analyses bactériologiques. -----	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : L'aquifère karstique	4
Figure 2 : Localisation de la zone d'étude	15
Figure 3: Carte hydrographie de la zone d'étude	22
Figure 4 :Carte hydrogéologique de la zone d'étude	23
Figure 5: Fenêtre parent dans l'AQUACHEM	32
Figure 6 :la fenêtre <<Record List>>.....	33
Figure 7: la fenêtre <<Input Window>>	34
Figure 8: Diagramme de Piper avec facies chimiques des eaux	35
Figure 9: Diagramme de schoeller	36
Figure 10 : Diagramme de Durov	37
Figure 11: Diagramme de Shoëller de tous les échantillons	45
Figure 12: Diagramme de Piper de tous les échantillons	46
Figure 13: Diagramme de Durov de tous les échantillons	47
Figure 14: Diagramme de Piper des eaux à TDS < à 300 mg/l.....	48
Figure 15 : Diagramme de Schoeller des eaux à TDS < à 300 mg/l	48
Figure 16: Diagramme de Piper des eaux à 300mg/l< TDS < 1000 mg/l.....	49
Figure 17 : Diagramme de Schoeller des eaux 300 mg/l<TDS < 1000 mg/l	50
Figure 18: Diagramme de Piper des eaux à TDS >1000 mg/l	50
Figure 19: Diagramme de Schoeller des eaux à TDS >1000 mg/l.....	51
Figure 20: Na^+ en fonction Cl^-	53
Figure 21: Ca^{2+} en fonction Cl^-	54
Figure 22: Mg^{2+} en fonction Cl^-	54
Figure 23: Profil de la teneur en Fer.....	55
Figure 24 : Profil de la teneur en nitrate.....	56
Figure 25: Profil de la teneur en nitrite.	57
Figure 26: Profil de la teneur en ammonium.....	58
Figure 27 : Diagramme de Piper tous les échantillons d'eau des forages à Mahajanga	60
Figure 28 : Diagramme de Piper tous les échantillons d'eau souterraine à Amboasary-Sud ..	61
Figure 29 : Diagramme de Schoeller tous les échantillons d'eau des forages à Mahajanga....	61
Figure 30 : Diagramme de Schoeller tous les échantillons d'eau souterraine à Amboasary-Sud	62

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Forage F6	16
Photo 2 : Forage F7	16
Photo 3: Puits drain (captage directe de la JICA)	17
Photo 4: Fleuve Mandrare	17
Photo 5: Approvisionnement en eau potable dans le fleuve de Mandrare	19
Photo 6: Plantation de sisals.....	21
Photo 7: Cactus nains et Atafana.....	22
Photo 8 : Turbidimètre	24
Photo 9 : Conductimètre.....	25
Photo 10 : pH-mètre	26
Photo 11 : Comparateur hydrocure	27
Photo 12 : Spectrophotomètre	28



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, un élément indispensable pour la vie de l'humanité, se présente sous différentes formes (eau de surface, eau souterraine, etc.). Elle est la base de toutes activités humaines : agriculture, industrie, élevage, tourisme. Chaque utilisation a leur exigence quantitative et qualitative. Il convient donc d'étudier non seulement sa quantité mais aussi sa qualité.

La qualité de l'eau souterraine dépend de l'origine de l'eau et de son temps de séjour dans les couches aquifères. On peut affirmer que la composition des eaux souterraines en un lieu donné et à un moment donné dépend des apports extérieurs comme les dépôts atmosphériques, excédent des précipitations, infiltration des eaux de surface, de la nature des zones non saturée et saturée, du chemin parcouru par l'eau, du temps de séjour et de la vitesse d'écoulement [1].

Des études des ressources en eau souterraines en vue de l'alimentation en eau potable dans le bassin de Mandrare de la région Sud Madagascar ont montré l'existence de la potentialité en eau dans cette region [2] [3]. Cependant, la plupart de ces travaux n'ont pas tenu compte du bassin versant comme zone d'étude alors que la gestion intégrée des ressources en eau doit être faite par rapport au bassin versant qui est le système naturel de gestion.

Actuellement, l'Etat Malgache réalise un projet d'adduction d'eaux potables pour la population locale dans les deux communes : Amboasary-Sud et Ambovombe Androy. Le projet consiste à construire de forages dans le bassin de Mandrare afin de pouvoir alimenter en eau potable des localités du district d 'Amboasary-Sud. Le problème réside sur la qualité physico-chimique des eaux. On y rencontre des eaux dures, des eaux saumâtres à salés et des eaux douces. Ce problème résulte de la présence des éléments chimiques fondamentaux et ou caractéristiques dissous dans l'eau. Il est donc nécessaire de mener des études hydro-chimiques ou hydrogéochimiques. Pour se faire, une acquisition et un stockage des données sous support informatique doivent être réalisés afin de pouvoir les interpréter

Vu l'évolution de la technologie actuelle, des travaux et études dans tous les domaines suite à l'évolution rapide de l'informatique, sont basés sur des programmes ou logiciels compatibles pour traiter et interpréter automatiquement les données et informations existantes, comme le PLUVIOM et l'HYDROM pour l'hydrologie, le GWW et le MODFLOW pour l'hydrogéologie et l'AQUACHEM pour l'hydrochimie.

Dans ce travail, on a utilisé le logiciel AQUACHEM sur les données hydrochimiques des eaux dans le district d'Amboasary-Sud qui souffre de la rareté d'eau douce de qualité. Pour cette raison, on a choisi ce mémoire intitulé :« **Contribution à l'étude hydrochimique et aux qualités physico-chimiques et microbiologiques des eaux souterraines dans le bassin de Mandrare (Commune Urbaine d'Amboasary-Sud)** ».

L'objectif principal de cette étude est d'approfondir l'étude hydrochimique et l'étude qualitative des eaux souterraines dans le bassin de Mandrare. Pour cela, il est nécessaire de :

- Comprendre les phénomènes chimiques des eaux, l'origine, faciès chimiques de l'eau et les mécanismes des différentes pollutions.
- Evaluer le respect des exigences normatives de Ministère de l'eau Malagache par rapport au décret n°2004-635 du 15/06/04 concernant la norme de potabilité Malgache.

Ce mémoire comporte trois parties : la première partie présente la synthèse bibliographique, la deuxième partie est consacrée aux matériels et méthodes décrivant les méthodologies d'analyse et le logiciel AQUACHEM. Avant de conclure, la troisième partie consiste en la présentation des résultats de l'application de ce logiciel et à l'interprétation des résultats obtenus.



PREMIERE PARTIE :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

PARTIE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.RESSOURCES NATURELLES

I.1.1. Eau de surface

Les eaux de surface comprennent les eaux courantes et les eaux stagnantes ou planes. Elles englobent toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents : rivières, lacs, étangs, barrages.... La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants.

I.1.2. Eaux souterraines

L'eau souterraine est l'origine de l'eau de surface et est omniprésente dans les sous-sols. Contrairement aux eaux de surface confinées à quelques canaux (les cours d'eau) et dépressions (les lacs), l'eau souterraine est généralement filtrée par l'action du sol. Elle y remplit les interstices entre les particules de sol ou encore les crevasses et les fissures du roc.

I.1.3. Eau de mer et océans

Les mers et les océans sont d'énormes réservoirs d'eau, elles représentent près de 97,4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète. L'eau de mer présente une grande concentration de sels dissous. Sa salinité varie à la surface du globe terrestre, en fonction de la latitude, de l'ouverture des mers vers les océans, de leurs dimensions, des apports terrestres, des courants...

I.2. DIFFERENTS TYPES D'AQUIFERES ET DE NAPPES

I.2.1. Aquifères

Du point de vue hydrogéologique, on peut distinguer différents types d'aquifères : les aquifères en domaine de socle, les aquifères karstiques, les aquifères alluviaux.

- Les aquifères en domaine de socle

Les aquifères en domaine de socle correspondent aux roches cristallines ou cristallophylliennes comme les granites, gneiss et les roches métamorphismes. A l'état sain les roches cristallines sont dépourvues de porosité. Elles ne constituent des aquifères importants qu'à la suite de phénomènes secondaires de fracturation et d'altération. Les réseaux aquifères dans les formations cristallines sont : les zones fracturées et broyées et les horizons d'altérations. Les fractures jouent le rôle de drains et les couches altérées celui de réservoir.

- Les aquifères karstiques

Les aquifères karstiques sont des terrains calcaires que l'eau a progressivement creusés, formant diverses cavités telles que l'avens, les failles et les galeries. Dans ces conduits, les eaux peuvent cheminer rapidement et constituer des cours d'eau souterraine.

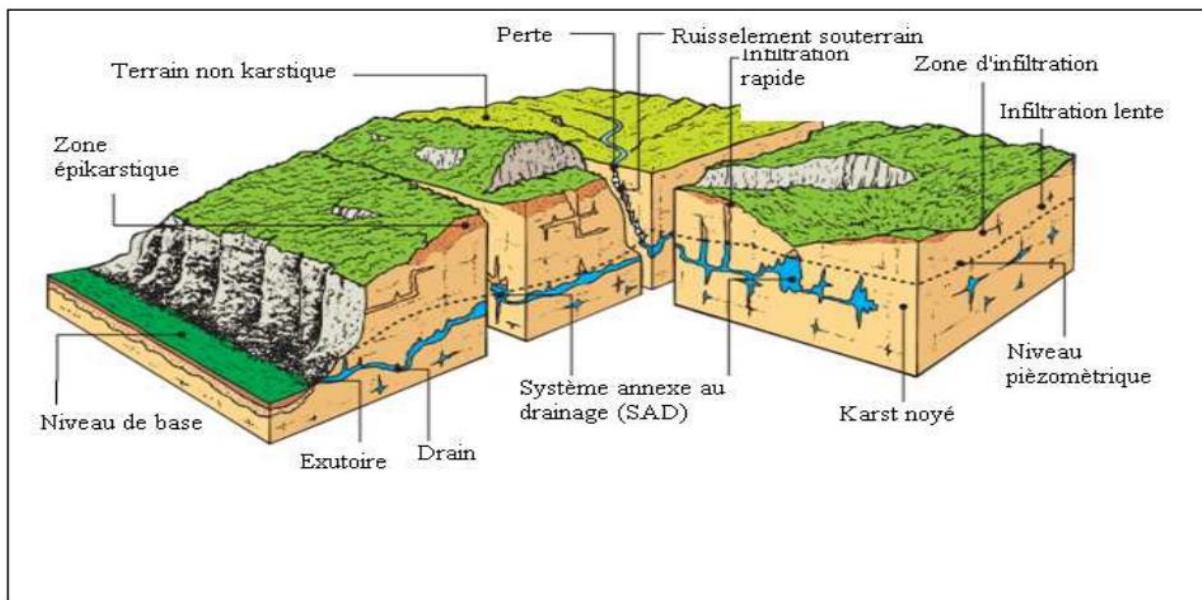


Figure 1 : L'aquifère karstique

(Source : Razainombana)

- Les aquifères alluviaux

Les aquifères alluviaux sont constitués de limons fins déposés par les cours d'eau lors des inondations ou crues, intercalées avec des sables et des graviers.

I.2.2. Nappes

-La nappe libre est une nappe d'eau souterraine circulant sous un sol perméable, peu profond. Les nappes libres sont alimentées directement par précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau. Dans ces conditions, le niveau hydrostatique se trouve soit au niveau du toit de la nappe ou plus bas.

-La nappe phréatique est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les puits et les sources en eau potable.

-Une nappe alluviale est un cas particulier de nappe libre, c'est le plus souvent la nappe d'accompagnement d'un cours d'eau qui circule dans les sédiments des rivières, c'est une masse d'eau se trouvant dans des terrains alluvionnaires. Elle se trouve à faible profondeur, est donc relativement faciles d'accès pour des prélèvements d'eau.

-Une nappe captive est une nappe généralement plus profonde et située entre deux couches de terrains imperméables. L'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures. En conditionnant, le niveau hydrostatique s'élève au-dessus du toit de la nappe.

I.3. MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES

Dans un système écologique, il est essentiel de prendre en compte la totalité de l'eau répartie dans les divers compartiments ou réservoirs, naturellement reliés par le cycle hydrologique : l'eau atmosphérique, les eaux de surface, l'eau du sol et les eaux souterraines. L'eau de pluie est légèrement acide du fait de sa teneur en CO₂ dissout. Au cours de son infiltration dans le sous-sol et le sol, elle se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent l'eau de la nappe.

Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction [4] :

- De la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés ou de l'infiltration
- Du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau
- Du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.

On voit l'importance des minéraux provenant des roches et de la perméabilité de l'aquifère qui jouent un rôle important dans la minéralisation de l'eau [4].

- En bordure de mer, les aquifères peuvent être en contact avec l'eau de mer, il y a alors échange au niveau du biseau salé, entraînant l'infiltration d'embruns salés et l'eau de la nappe devient alors plus ou moins saumâtre. L'invasion de la nappe d'eau douce par l'eau salée est accélérée par les pompages et le rabattement de la nappe.
- Au contact du gypse, l'eau se charge en sulfate de calcium et devient dure et impropre à la consommation.
- Dans les terrains cristallins, sableux et gréseux c'est-à-dire riche en minéraux siliceux et silicatés, les eaux sont douces, elles sont peu minéralisées mais acides et agressives pour les conduites.
- Dans les réservoirs calcaires, les eaux sont dures, moyennement à fortement minéralisées et par conséquent riches en sels de calcium et de magnésium ; elles entartrent les conduites.
- Dans l'aquifère s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des roches : l'eau prend une minéralisation qui demeure stable dans le temps et sert à caractériser un faciès hydro-chimique.
- L'eau des nappes alluviales a une qualité qui dépend de celle de la nappe qui l'approvisionne et de celle de la rivière.

I.4. DETERIORATION DE LA QUALITE DE L'EAU

La détérioration de la qualité de l'eau est appréciée par la mesure des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. La qualité naturelle des eaux souterraines peut être altérée par l'activité humaine. L'eau des nappes n'est donc pas à l'abri de la pollution et l'autoépuration naturelle n'est pas complète dans toutes les nappes vis-à-vis de certaines substances [5].

I.4.1. Vulnérabilité des nappes à la pollution

La vulnérabilité des nappes à la pollution est leur sensibilité aux différents facteurs physiques stables déterminant la mesure où elles sont, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Elle étudie les possibilités de propagation dans l'espace souterraine.

Les facteurs de vulnérabilité sont imposés par les recherches dont [6] :

- L'état et caractéristiques physiques et chimiques du sol et du sous-sol
- La profondeur de la surface piézométrique
- Les paramètres d'écoulement de l'eau souterraine : perméabilité, transitivité, direction et vitesse.
- La condition d'alimentation et d'écoulement

La vulnérabilité dépend du type de nappe libre ou captive et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables : les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique ; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à rincer les particules de la zone non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées. Les nappes captives en revanche sont mieux protégées par les couches imperméables qui les surmontent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, donc plus aisée à protéger. Leur pollution apparaît lorsque le niveau protecteur imperméable est percé par un ouvrage : ancien forage, fouille profonde....

I.4.2. Principaux types de pollution [4] [6]

I.4.2.1. Pollution temporaire et pollution chronique

L'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident comme une mauvaise manœuvre en usine, accident de la circulation..., peut entraîner un transfert à la nappe et sa pollution dont la durée dépend de son pouvoir d'auto-épuration et de sa vitesse de percolation. Les pollutions chroniques sont plus insidieuses et dommageables; moins spectaculaires, elles peuvent passer inaperçues la pollution agricole par les nitrates; contaminations par les hydrocarbures à partir de sols pollués.

I.4.2.2. Pollution linéaire

Elle accompagne le trajet des routes et auto routes, des canaux, des cours d'eau, des voies ferrées.

I.4.2.3. Pollution historique

De nombreuses zones polluées ont été à une époque où les préoccupations environnementales étaient inconnues ou sommaires: pollution par les terrils de mines, les décharges non contrôlées.

I.4.2.4. Pollution ponctuelle et pollution diffuse

Le polluant émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés. Selon la densité et la solubilité du polluant, la zone polluée sera circonscrite ou diffuse, à la surface ou à l'intérieur de la nappe. L'épandage de produits polluants sur une grande surface en revanche affecte l'ensemble de la nappe; elles sont de plus souvent chroniques et déclasse l'ensemble de la nappe pour la production d'eau potable, à moins de traitements adaptés: cas des pollutions agricoles par pesticides.

I.5. PARAMETRES DE QUALITE

I.5.1. Principaux paramètres de potabilité

I.5.1.1. Paramètres physiques

I.5.1.1.1. Le potentiel hydrogène

Le pH de l'eau renseigne sur son acidité et son alcalinité, c'est la concentration en ion d'hydrogène $[H^+]$ présent dans l'eau ou les solutions. Le potentiel hydrogène est en relation avec la nature de la roche du réservoir et représente une notion très importante pour la détermination de l'agressivité de l'eau.

I.5.1.1.2. Turbidité

La turbidité présente la transparence d'une eau. La connaissance de la turbidité donne une idée sur la teneur en matières en suspension et la teneur en matières colloïdales d'origine minérale ou organique. La turbidité est un paramètre important dans l'évaluation de l'efficacité d'un traitement.

I.5.1.1.3. Conductivité électrique

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation. La conductivité varie également en fonction de la température, elle est plus importante lorsque la température de l'eau augmente. La plupart du temps, la conductivité a

une origine naturelle due au lessivage des terrains lorsqu'il pleut. Ce lessivage entraîne la dissolution d'un certain nombre de sels minéraux. La connaissance de la CE donne une idée sur la salinité de l'eau [7].

1.5.1.1.5. Minéralisation ou Teneurs en Sels Dissous

La minéralisation est une relation entre la teneur en sels dissous d'une eau et sa conductivité. Une forte minéralisation résulte de la contamination ou de l'évaporation répétée ou de l'interaction de l'eau avec des roches comme des argiles, des marnes ou aussi de la relation directe de l'eau des soles salées ou tannes [7].

1.5.1.1.6. Température

La connaissance de la température de l'eau est primordiale car elle joue un rôle très important dans la solubilité des sels et la détermination du pH. La température constitue aussi un facteur physiologique agissant sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivants dans l'eau. Les variations de la température de l'eau d'un milieu sont liées à la géologie, à la climatologie et aux activités humaines. Dans l'eaux souterraines profondes ou en zone homothermique, la température varie avec la profondeur suivant le gradient géothermique. La thermalité de l'eau dépend de sa température. La mesure régulière de la température indique l'origine et l'écoulement de l'eau [8].

I.5.1.2. Paramètres chimiques

1.5.1.2.1. Calcium

Les ions calcium d'une eau déterminent sa dureté. En général, le calcium est un élément dominant des eaux potables et sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés (terrain calcaire ou gypseux) [9].

1.5.1.2.2. Magnésium

Le Magnésium est un élément présent en grande quantité dans l'eau. Sa présence peut entraîner un goût désagréable à l'eau consommable. Il ne provoque pas de phénomène toxique mais les sels de magnésium ont un effet laxatif qui diminue avec l'accoutumance. La teneur en magnésium dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Il provient de l'attaque par l'acide carbonique de roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et de bicarbonates [9].

1.5.1.2.3. Chlorures

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de sels de potassium(KCl). Les teneurs en chlorure sont relativement élevées dans les eaux souterraines.

L'origine pourrait être naturelle [10]:

- 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...

1.5.1.2.4. Matières organiques

La matière organique est présente dans l'eau sous forme particulière solide et dissoute. Elle est principalement composée d'atomes de carbone, auxquels sont associés des atomes d'hydrogène, d'oxygène et d'azote [11]. Les matières organiques présentent dans l'eau peuvent provenir de plusieurs sources : décomposition des végétaux, des microorganismes, pollution domestique, pollution agricole, etc....

La présence de matières organiques dans les eaux alimentaires pose principalement deux types de problèmes [11].

-Elle réagit avec les produits utilisés pour la désinfection de l'eau et forme des sous-produits indésirable visés par la réglementation ou à l'origine du mauvais goût de l'eau.

-Elle permet également initier des problèmes de prolifération bactérienne.

1.5.1.2.5. Fer

Le fer est un élément des métaux les plus abondants de la croûte terrestre. Il est présent dans l'eau sous trois formes : le fer ferreux, le fer ferrique et le fer complexé à des matières organiques et minérales [12]. Dans les eaux souterraines, au contraire, l'absence d'oxygène fait que le fer reste en solution. La présence du fer dans l'eau provient principalement du lessivage des sols avec une dissolution des roches et minéraux, des rejets industriels, de la corrosion des canalisations métalliques et de l'utilisation de sels ferriques comme coagulants. La présence du fer dans l'eau n'a aucun inconvénient au point de vue physiologique.

1.5.1.2.6. Sulfate

Les sulfates sont sous forme de soufre dissous la plus répandue dans les eaux naturelles, ont essentiellement des eaux d'origines : géochimique et atmosphérique [13]. L'oxydation des sulfures ainsi que la dégradation de la biomasse dans le sol constituent d'autres sources possibles. Les activités humaines et naturelles peuvent générer des apports de sulfates dans l'eau souterraine : application d'engrais sulfatés, précipitations chargées en dioxyde de soufre, etc....La présence de sulfate dans l'eau souterraine est liée à la nature de l'aquifère. Sa consommation par les hommes peut entraîner des troubles gastro-intestinaux.

I.5.1.2.7. Azote ammoniacal

Une eau pauvre en ammoniaque indique donc qu'elle a subi une filtration et une épuration efficaces dans le sol [14]. L'origine de l'ammonium est la dégradation incomplète des matières organiques végétales, animales ou humaines dans l'eau.

I.5.1.2.8. Nitrites

Les nitrites peuvent être rencontrés dans les eaux, mais généralement à des doses faibles. Une eau contenant des nitrites est suspecte car cette présence est souvent liée à une détérioration de la qualité microbiologique. Les nitrites peuvent se former à partir d'une réduction des nitrates ou à partir d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque [14].

I.5.1.2.9. Nitrates

Les nitrates sont les principales formes d'azote dans les eaux. Ils peuvent être utilisés comme indicateurs de pollution chimiques des eaux. Plusieurs auteurs relient la présence des nitrates dans les eaux en plus du cycle normal de l'azote, à différentes sources à savoir : les engrains chimiques, les pesticides et les herbicides, les installations des animaux, les effluents domestiques et industriels [15].

I.5.1.2.10. Sodium

Le sodium est un élément dit conservatif. Les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine. Les teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres [14].

I.5.1.3. Paramètres bactériologiques

I.5.1.3.1. Coliformes totaux

Les bactéries coliformes existent dans les matières fécales mais se développent également dans certains milieux naturels (sol, végétation, eau naturelles). L'absence de coliformes totaux ne signifie pas nécessairement que l'eau ne présente pas de risque pathogène [18]. Ce germe se multiplie facilement à une température de 37°C, avec pH optimal de 7 et se retrouve dans les matières fécales. Elles entraînent des toxi-infections alimentaires telles que : les diarrhées et les vomissements.

*I.5.1.3.2. Coliformes fécaux (*Escherichia coli*)*

L'*Escherichia coli* est le seul membre du groupe des coliformes totaux que l'on trouve exclusivement dans les intestins des mammifères, et les humains. La présence d'*Escherichia coli* dans de l'eau indique une contamination récente par des matières fécales, et peut indiquer la présence possible de pathogènes responsables de maladies, comme des bactéries, des virus et des parasites.

I.5.1.3.3. Streptocoques fécaux

Les streptocoques fécaux sont des bactéries en chaînette. Ce sont des flores normales des matières fécales humaines et animales. Les streptocoques fécaux possèdent un métabolisme fermentatif. Ce germe se développe à une température de 37°C et qui indique une contamination fécale.

I.5.1.3.4. Anaérobies sulfito-réducteurs

Ces bactéries se développent sans oxygène et elles ont la possibilité de se transformer sous une forme de spore résistante aux conditions défavorables. Ce sont des indicateurs de contamination de pénétration des eaux de ruissellements dans les ouvrages de captages.

I.5.2. Effets de la pollution sur la santé humaine [4] [6].

Dans ce paragraphe on va exposer les différents risques que présentent quelques éléments sur la santé humaine.

I.5.2.1. Magnésium et Calcium

La présence de ces éléments à des taux élevés est à la base des maladies néphretiques. Dépassant un certain seuil le magnésium provoque des troubles digestifs chez l'adulte. Néanmoins, ces deux éléments présentent des avantages pour la santé, le calcium fortifie les os et le magnésium favorise les réactions métaboliques.

I.5.2.2. Sodium et Potassium

Le sodium peut causer des crises d'hypertension et de cardiopathies, quand il est présent en concentrations importantes. Le potassium a un effet laxatif, mais il donne un léger goût. Généralement il ne présente pas d'inconvénients.

I.5.2.3. Les sulfates

Les fortes concentrations d'ion sulfate provoquent des irritations gastro -intestinales.

I.5.2.4. Les chlorures

Les eaux riches en chlorures sont agressives et de mauvais goût. Elles sont nocives pour les plantes.

I.5.2.5. Les nitrates

La concentration des eaux ayant des teneurs élevées de nitrate provoque l'irritation des muqueuses. L'ingestion de quantité plus élevée entraîne des nausées, des vomissements et des selles sanguinolentes.

I.5.2.6. L'ammonium

Il s'agit d'un produit intermédiaire entre l'urée et les protéines. Son identification indique la pollution. Cet élément se transforme en ammonium toxique. L'ammonium dans certaines réactions, en présence d'hypochlorite donne la monochloramine qui est cancérigène.

I.6.REVUES SCIENTIFIQUES

Plusieurs recherches ont été déjà effectuées sur l'étude hydrochimique et la qualité des eaux souterraines. Les recherches sont basées sur le traitement des données sous AQUACHEM.

DJENBA et al, 2015 ont été réalisé “Approche hydrochimique de l'aquifère superficiel de Ain Djacer Algérie”. La région de Ain Djacer est le siège d'un aquifère superficiel qui se trouve dans les alluvions du Mio-Plio-Quaternaire. Cette nappe qui a pour substratum les argiles et les marnes gypseuses du Miocène, est entourée par les calcaires du Crétacé qui constituent une limite à potentiel imposé. Il s'agit d'un synclinal comblé par les sédiments du Mio-Plio-Quaternaire où tous les écoulements convergent vers le centre de la plaine. L'exploitation intensive des ressources en eaux souterraines de la région a largement influencé le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique de cette nappe. Ceci a induit une baisse du niveau statique et une minéralisation des eaux souterraines. Afin de mettre en évidence l'effet de cette situation sur la qualité des eaux souterraines, une étude hydrogéochimique a été menée. Cette étude a montré que le faciès est bicarbonaté calcique près des calcaires et chloré sodique au centre de la plaine en liaison avec la lithologie. L'analyse thermodynamiques a montré que les principaux phénomènes géochimiques intervenant dans l'acquisition de la charge saline sont liés à l'interaction eau-roche (dissolution des minéraux carbonatés et évaporitiques), à l'échange cationique et à la concentration le long de l'écoulement.

DORICE et al, 2013 ont été réalisé “Apport de l'hydrochimie et de l'isotope de l'environnement à la connaissance des ressources en eaux souterraines de Yaoundé, Cameroun”. L'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable de la population de la région de Yaoundé. Cependant, le manque de suivi de l'évolution de la qualité de cette eau et la méconnaissance des caractéristiques hydrochimiques est à noter. Cette étude se propose d'améliorer les connaissances sur ces ressources en eaux les plus exploitées. Il est question de déterminer l'origine de la minéralisation des eaux souterraines et le mécanisme de recharge de la nappe à partir d'une combinaison des méthodes hydrochimiques et isotopiques. Les travaux ont nécessité des campagnes d'échantillonnages, des mesures in situ, des dosages des éléments chimiques et

isotopiques et enfin des analyses statistiques. Les résultats montrent que les eaux sont acides ($\text{pH} = 4,9 \pm 0,2$) et faiblement minéralisées. Le faciès chimique est chloruré sodique et potassique. Les principaux ions à l'origine de la minéralisation des eaux seraient issus de l'hydrolyse des minéraux silicatés, du phénomène d'échange de base et de la pollution anthropique. Les fortes teneurs en CO_2 dissous dans les eaux souterraines témoignent qu'elles circulent en système ouvert par rapport au CO_2 gazeux du sol. Les teneurs moyennes s'établissent pour l'oxygène -18 à $-2,57 \pm 0,23\text{\textperthousand}$ et pour le deutérium à $-10,93 \pm 5,6\text{\textperthousand}$ avec un excès en deutérium de $8,64 \pm 5,2\text{\textperthousand}$. La recharge de la nappe est récente et se fait directement par infiltration des précipitations sans aucune modification notable due à l'évaporation. Cet apport récent d'eau est confirmé par les faibles valeurs du bicarbonate. Les fortes teneurs en nitrate dans les eaux souterraines montrent que celles-ci sont chimiquement non appropriées à la consommation humaine et nécessite un traitement préalable.

RAZAINOMBANA, 2012 a été réalisé « Etude hydrogéochimique de la nappe d'un aquifère karstique, cas des stations depompage de la JIRAMA à Mahajanga et Mitsinjo »

L'aquifère karstique de Mahajanga localisé dans le bassin sédimentaire de Mahajanga a une grande importance dans l'alimentation en eau potable de la ville depuis des années. Alors les ouvrages d'exploitation de ces ressources nécessitent des travaux d'entretien pour assurer leur longévité. L'analyse des eaux souterraines de cette aquifère karstique a permis de définir les différents types d'eaux et les lithologies associés. Dans les stations de pompage de Mahajanga, les eaux sont à faciès hyper bicarbonatées calciques (Mahavelona et Andranotakatra), bicarbonatées calciques et magnésiens (Ampombonavony) et bicarbonatées calciques avec une tendance magnésienne pour F3 Ambondrona. La minéralisation de ces eaux est dominée par le bicarbonate due à la dissolution des calcaires. L'eau est dure mais conforme à la norme de potabilité. L'eau de Mitsinjo est le seul à faciès chloré sodique et potassique. La dominance nette de SO_4^{2-} sur la minéralisation indique l'interaction de l'eau avec le gypse présent dans le bassin. L'excès en Na^+ et Cl^- montre sa relation avec l'eau de mer. Cette eau n'est pas conforme à l'alimentation humaine.

SADEK, 2011 a été réalisé “Hydrochimie et faciès géochimiques des eaux souterraines: Plaine de Bekaa”. L'étude géochimique des eaux souterraines dans la Plaine de la Bekaa montre un faciès calco-magnésien, bicarbonaté, à saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite, à faible minéralisation et de faible conductivité. Les formations carbonatées (calcite et dolomite) constituent les roches encaissantes des eaux souterraines dans la Plaine de la Bekaa. La recharge des nappes souterraines est à haute altitude et a comme origine les eaux des précipitations qui tombent sur les hautes montagnes qui encadrent la Bekaa à l'est et à

l'ouest. Une dissolution des formations gypseuses existe. La minéralisation se fait en système ouvert. Par conséquent le CO₂ d'origine biogénique joue un rôle important dans la minéralisation.

Le paragraphe suivant décrit l'étude expérimentale qu'on a effectuée.



DEUXIEME PARTIE :

MATERIELS ET METHODES

PARTIE II. MATERIELS ET METHODES

II.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1.1. Situation géographique

II.1.1.1. Localisation

La zone d'étude concerne le bassin de Mandrare dans la ville d'Amboasary-Sud. La ville est située dans une vallée, en rive gauche du fleuve Mandrare. L'altitude moyenne de la ville est de l'ordre de 15m [2]. La Commune Urbaine d'Amboasary-Sud s'étend sur une superficie de 463 km².

Administrativement, elle appartient dans le district d'Amboasary-Sud à la région d'Anosy et est limitée : -Au Nord, par la Commune Rurale de Behara

-À l'Est par le District Tolagnaro

-À l'Ouest par le District d'Ambovombe Androy

-Au Sud et au Sud-ouest, par les Communes Rurales de Tanandava-Sud et

Sampona

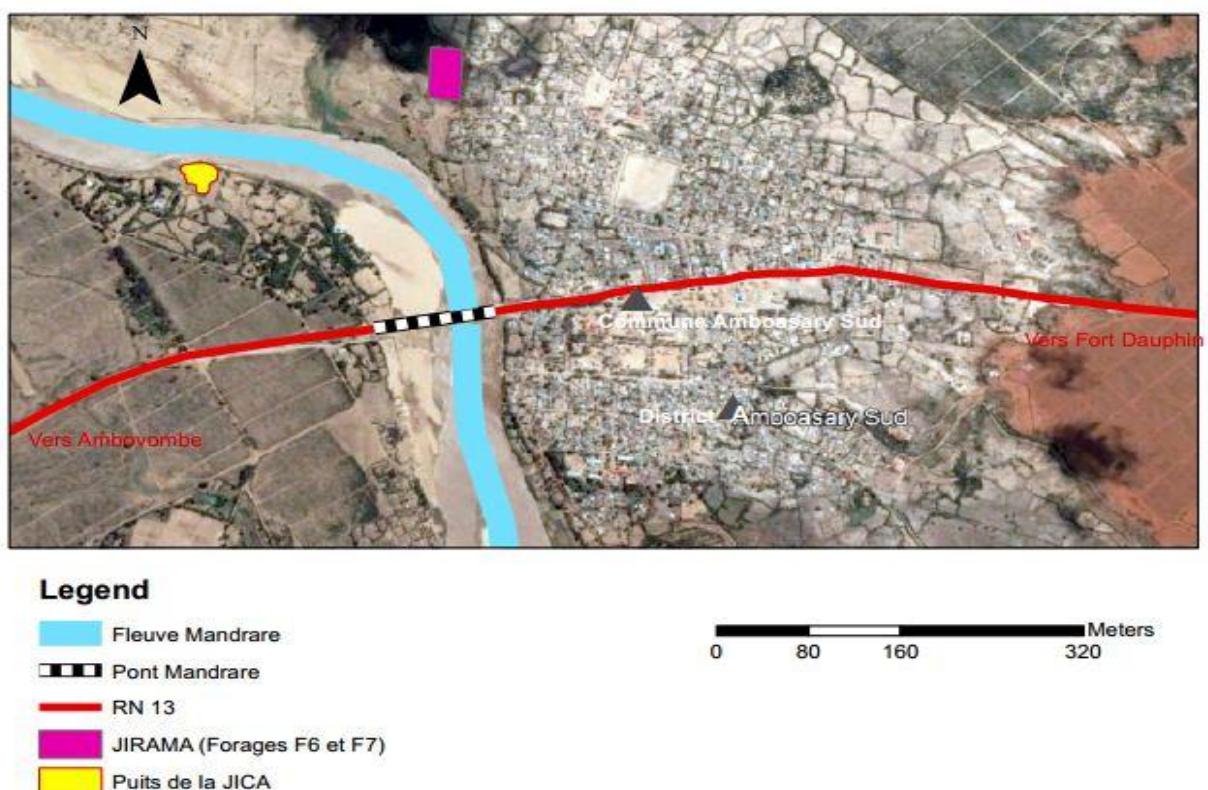


Figure 2 : Localisation de la zone d'étude

(Source: Google Earth, 2017, Modifiée ArcGIS)

II.1.1.1. Points de prélèvements et caractéristiques.

❖ P1: Forage F6

Les deux forages F6 et F7 sont situées à 200m environ du fleuve de Mandrare. La distance entre les deux forages F6 et F7 est de 46m. Le forage F6 est situé à la rive gauche du fleuve de Mandrare, sa profondeur est de 14,5m avec un niveau statique de 5,62m et un débit de l'ordre de 18,4 m³/h [2].



Photo 1: Forage F6

(Source: Auteur)

❖ P2: Forage F7

Le forage F7 se trouve à 46m du F6, sa profondeur est de 14,5m avec un niveau statique de 5,65m et un débit de 18m³/h [2].



Photo 2 : Forage F7

(Source: Auteur)

❖ **P3 : Le puits drain (captage directe de la JICA)**

Le puits drain se situe à la rive droite du Fleuve Mandrare, son diamètre est de 2,80m, il a une profondeur de 8,6m environ avec un niveau statique de 4,63 m [2].



Photo 3: Puits drain (captage directe de la JICA)

(Source: Auteur)

❖ **P4: Puits particulier**

Le puits particulier est situé à 20m de rive gauche de fleuve Mandrare. Ce puits a une profondeur de 6m et un niveau statique de 4,5m.

❖ **P5: Fleuve Mandrare**

En période d'étiage, le débit de l'eau du fleuve est de l'ordre de $7,3\text{m}^3/\text{s}$ ou $26\ 280\text{m}^3/\text{h}$ tandis qu'en période de crue, ce débit s'élève à $213,5\text{m}^3/\text{s}$ soit $768\ 600\text{m}^3/\text{h}$ [2].



Photo 4: Fleuve Mandrare

(Source: Auteur)

II.1.2. Contextes socio-économiques

II.1.2.1. Population

❖ Démographie

La population de la Commune d'Amboasary Sud est constitué de Fokontany concernés par le projet. On dénombre 13024 habitants dans le Fokontany de Tanambe, Morafeno, Tanambao avec un taux d'accroissement de 2,6%, la population en 2023 sera de 19140 habitants [2].

Le tableau suivant nous donne le nombre de population par fokontany de la Commune d'Amboasary Sud.

Tableau 1: Répartition de la population par fokontany de la ville d'Amboasary-Sud

Fokontany	Population 2008	Population 2023
Tanambe	4880	7172
Tanambao	3612	5308
Morafeno	4532	6660
TOTAL	13024	19140

(Source : Ministère de l'eau (projet PAEAR))

❖ Les activités économiques de la population

La majorité de la population travaille comme ouvriers dans la plantation de sisals gérée par la SPSM. La concession de sisals gérée par la SPSM constitue l'une des activités les plus importantes dans la ville d'Amboasary Sud. Le reste de la population s'adonne aux cultures vivrières (riz manioc, maïs), aux cultures fruitières (raketa, mangue et tamarin) et aux cultures industrielles (arachide, canne à sucre, sisal...), elle pratique aussi la vente de charbons, de bois des chauffes, l'hôtellerie et le commerce [21].

II.1.2.2. Agriculture

Dans le district d'Amboasary-Sud produit principalement du sisal, le sisal est cultivé exclusivement sur le sol alluvionnaire de la vallée du bas-Mandrare, les plantations s'étendant sur la rive droite de Mandrare entre la mer et Amboasary Sud et en amont sur sa rive gauche, jusqu'à Ifotaka et produit les autres cultures comme le riz, manioc, arachide, maïs, canne à sucre [21]. Toutes ces cultures se pratiquent seulement pendant la saison de pluie car elles dépendent énormément de la précipitation. Du fait de la pluviométrie toujours déficitaire dans le sud et des techniques culturales traditionnelles donc les rendements sont faibles et les produits sont de mauvaise qualité.

II.1.2.3. Elevage

Dans ce district, il y a 5 types d'élevage : bovin, porcin, caprin, ovin et volailles. La ville d'Amboasary-Sud et les autres communes voisines se caractérisent par l'importance de l'élevage d'ovin, de caprin et bovin. Cet élevage est extensif de pratique traditionnelle. Il n'utilise pas des techniques modernes de culture de pâturage [21].

II.1.2.4. Approvisionnement en eau

Dans notre zone d'étude, l'accès en eau des habitants est un problème majeur, tant sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif. L'eau consommée dans la commune concernée provient de deux sources d'approvisionnement : l'eau de la JIRAMA et le fleuve Mandrare. La population est confrontée quotidiennement à de très importantes contraintes pour satisfaire ses besoins en eau. La population locale utilise en parallèle l'eau du fleuve de Mandrare pour tous ses besoins quotidiens (lessive, bain et autres utilisations : passage et abreuvement de bétails). La qualité de l'eau du fleuve Mandrare provoquerait des maladies diarrhéiques et des vomissements surtout pendant la période de pluie. De ce fait, malgré la mauvaise qualité de l'eau et le prix d'un seau d'eau du fleuve Mandrare plus élevé 200Ar que l'eau de la JIRAMA qui vaut 100Ar le seau de 20l, la population préfère utiliser l'eau du fleuve Mandrare directement ou auprès des revendeurs en charrettes.



Photo 5: Approvisionnement en eau potable dans le fleuve de Mandrare

(Source: Auteur)

II.1.3. Contexte physique

II.1.3.1. Contexte climatique

Ce contexte permet de savoir la répartition des précipitations et d'estimer le taux de recharge des nappes aquifères du bassin versant hydrogéologique. Une précipitation peut engendrer la diminution de la concentration en éléments dissous dans la nappe d'eau par phénomène de dilution. Par contre, l'évaporation peut augmenter la concentration.

❖ Température

Dans la zone d'étude, la température annuelle moyenne enregistrée dans la station météorologie Taolagnaro se situe entre 22,57 °C et 27,51°C. La température moyenne maxima est de 27,51°C tandis que le minima est de 22,57 °C. La saison froide de la région se situe du mois de mai au mois de septembre avec une température moyenne minimale qui peut descendre jusqu'à 18,57°C et la saison chaude du mois d'octobre au mois d'avril avec une température moyenne maximale de 29,4°C.

Tableau 2: Température annuelle 2016

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc.
T Max	30,5	30,5	30,2	28,1	25,1	24	24,1	24,6	26,5	27,7	28,1	30,8
T Min	24,1	24,2	24,1	22,1	19,0	18,0	18,4	18,1	19,2	20,3	21,7	23,7

(Source : Direction Météorologie et hydrologie Ampadrianomby,2016)

❖ Pluviométrie

Le district d'Amboasary Sud a un climat humide, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 93,10cm de pluie. La saison sèche dure cinq mois tandis que la saison de pluie s'étend du mois de Novembre au mois de Mai. La pluviosité maximale se trouve au mois de Mai et le minimum de pluie est enregistré au mois de septembre.

Tableau 3: Précipitation annuelle 2016

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Nombre de pluie	14	15	12	10	18	14	13	8	5	12	14	7
Pluies	64,7	92,5	128,9	42,9	222,2	169,8	127,9	22,1	12,7	93,8	108,5	31,4

(Source : Direction Météorologie et hydrologie Ampadrianomby,2016)

II.1.3.2. Sols et végétation

❖ Sols

Dans la zone d'étude, la partie Sud des zones montagneuses, les sols ferralitiques jaunes rouges sont prédominants et le long du fleuve Mandrare il y a une présence de sols alluvionnaires plus ou moins hydromorphes. Les sols des zones côtières sont constitués de sable à faible teneur en matière organique mais de forte capacité de rétention d'eau. Les caractéristiques des sols varient selon les secteurs.

❖ Végétation

La ville d'Amboasary Sud est connue par la présence de la plantation de sisals qui s'étale sur 55% de la superficie totale de la ville. Les sisals sont cultivés et exploités par la SPSM. On note également la prédominance de la variété de cactus nains et des espèces d'*Alluaudia procera* ou Fantsiolotra, des espèces de *Moringa oleifera* ou Ananambo, des Atafana, des quinines s'espèces *Eucalyptus robusta* et des arbres résineux appelés Fengoka. Dans la partie Est de la ville, on trouve aussi les forêts naturelles d'Akondinda qui possèdent les caractéristiques des forêts de transition entre les forêts humides et les forêts sèches et épineuses [2].



Photo 6: Plantation de sisals

(Source: Auteur)



Photo 7: Cactus nains et Atafana

(Source: Auteur)

II.1.3.3. Réseau hydrographique

La zone d'étude appartient au bassin versant du Mandrare. Du point de vue hydrographique, ce bassin et les affluents prennent des sources sur les hauteurs des massifs d'Ivakoana et des montagnes anosyennes. Le fleuve de Mandrare prend source dans les monts Beampingatra. Ses affluents, dont les plus importants sont l'Andratina, le Tsivory, le Manambolo, la Mananara et ils naissent tous dans les hauteurs du massif de l'Ivakoana et des versants ouest des chaines anosyennes.

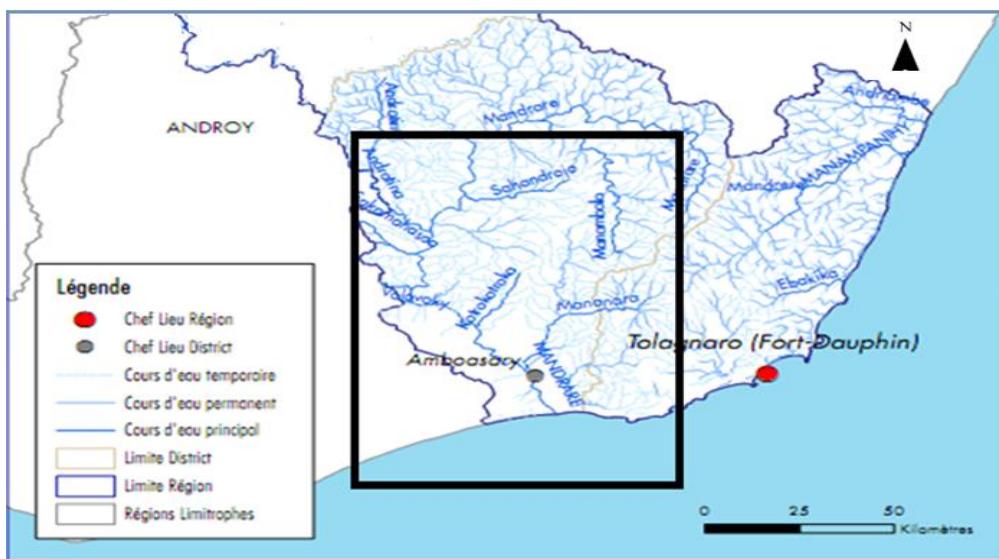


Figure 3: Carte hydrographie de la zone d'étude

(Source: FTM et INSTAT,2014)

II.1.3.4. Contexte hydrogéologie

L'hydrogéologie est la science qui étudie de l'eau souterraine, sa distribution et sa circulation dans le sol et les roches, en tenant compte de ses interactions avec les conditions géologiques et l'eau de surface. Dans le secteur étudié, la partie Est de la ville est bâtie sur les formations géologiques du Néogène constituées principalement de grès calcaire et de limon caillouteux. La partie occidentale s'est développée sur les terrasses alluviales de Mandrare.

La zone étudiée est caractérisée par la présence de deux types d'aquifères [2] :

- Aquifère de surface, associé aux alluviaux
- Aquifère semi-profond porté par les grès calcaires

Le long du fleuve de Mandrare, ce sont des nappes libres des aquifères alluviaux qui sont les plus fréquents. Elles ont été formées par le dépôt des alluvions du fleuve. Les nappes alluviales sont plutôt constituées de galets, de sables, de graviers.

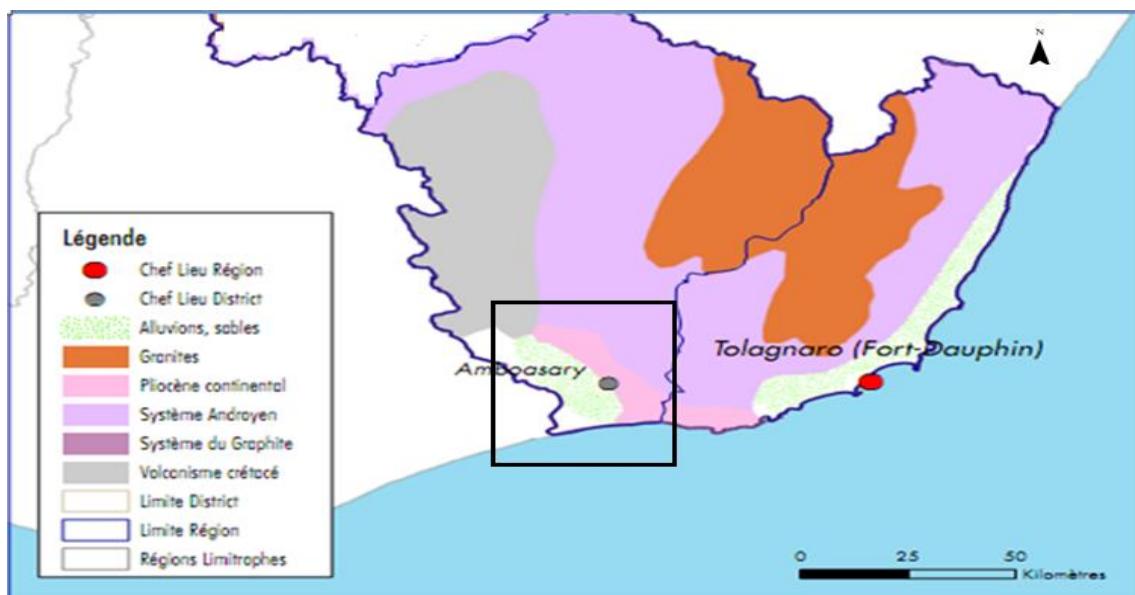


Figure 4 :Carte hydrogéologique de la zone d'étude

(Source: FTM et INSTAT,2014)

II.2. ANALYSES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES

II.2.1. Analyses physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques concernent le pH, la turbidité, la conductivité électrique, la température, la minéralisation, les matières organiques, la dureté Totale, le titre alcalimétrie, le calcium, le magnésium, le fer, l'ammonium, le nitrite, le nitrate, le sulfate, le chlorure ainsi que le sodium.

II.2.1.1. Paramètres physiques

II.2.1.1.1. Turbidité

La mesure de la turbidité consiste en mesurant la réflexion de la lumière dans l'eau. Le faisceau lumineux traverse horizontalement la cuve contenant l'échantillon, une partie de cette lumière est diffusée grâce aux particules en suspension. On utilise un turbidimètre pour la mesure de la turbidité. Elle est exprimée en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).



Photo 8 : Turbidimètre

(Source: Auteur)

II.2.1.1.2. Conductivité électrique

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. La conductivité varie également en fonction de la température, elle est plus importante lorsque la température de l'eau augmente.

La conductivité électrique d'une eau s'exprime généralement en micron siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Tableau 4: Relation entre la conductivité et la minéralisation

CE<100 μ S /cm	Minéralisation faible
100 μ S /cm<CE<333 μ S /cm	Minéralisation moyenne
333 μ S /cm<CE<666 μ S /cm	Minéralisation moyenne accentuée
666 μ S /cm<CE<1000 μ S /cm	Minéralisation importante
CE>1000 μ S /cm	Minéralisation élevée

(Source : mémento technique de l'eau)



Photo 9 : Conductimètre

(Source: Auteur)

II.2.1.1.3. Minéralisation

La minéralisation est une relation entre la teneur en sels dissous d'une eau et sa conductivité. On mesure la minéralisation de l'eau à l'aide d'un appareil appelé conductimètre. Elle est exprimée en milligramme par litre.

II.2.1.1.4. Température

La connaissance de la température de l'eau est primordiale car elle joue un rôle très important dans la solubilité des sels et la détermination du pH. La mesure de la température est incorporée dans le Conductimètre. Elle est exprimée en degré Celsius.

II.2.1.1.5. Potentiel hydrogène

Le pH mesure la concentration en ions H_3O^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité.

On mesure le pH de l'eau à l'aide d'un appareil appelé pH-mètre.



Photo 10 : pH-mètre

(Source: Auteur)

II.2.1.2. Paramètres chimiques

La composition chimique de l'eau est ainsi complètement liée aux caractéristiques du bassin versant dans lequel elle opère son cycle (la nature du sol et du sous-sol, les espèces végétales et animales, mais également les activités humaines). Les paramètres chimiques ont été mesurés par deux méthodes d'analyses : analyse volumétrique et analyse colorimétrique.

II.2.1.2.1. Analyse volumétrique

Il s'agit d'une analyse par titrage moyennant d'une solution titrant et une solution à titrer. Elle est utilisée pour :

- La détermination de la dureté totale et titre hydrotimétrique calcique
- Le titrage alcalimétrique (TA) et le titrage alcalimétrique complet (TAC) à partir duquel on peut calculer la concentration en ion bicarbonate et carbonate
- Le dosage du chlore
- Le dosage des matières organiques

❖ Titre Hydrotimétrique(TH) et Titre Hydrotimétrique calcique (TH_{Ca})

Cette manipulation détermine la teneur globale en ions calcium et magnésium. Nous avons utilisé la méthode complexométrique en utilisant l'acide Ethylène Diamino Tétra Acétique (EDTA). En effet, en présence de cet agent complexant, les ions métalliques forment des complexes stables en milieu basique (pH>8). La TH permet de déterminer la dureté de l'eau. L'unité utilisée pour la dureté de l'eau est le degré français (°f).

Tableau 5 : Classification des eaux souterraines par rapport à la dureté

TH (°f)	1 à 7	7 à 15	15 à 20	20 à 25	<25
Eau	Douce, bonne	Faiblement salée	Assez salée	Limite de salinité	Dure

(Source: RAKOTONDRAEBE)

❖ Le titrage alcalimétrique (TA) et le titrage alcalimétrique complet (TAC)

Le titre alcalimétrique ou TA mesure la teneur des espèces basiques présentes dans l'eau comme l'ion hydroxyde, l'ion carbonate et l'ion bicarbonate. Les mesures sont réalisées en neutralisant un certain volume d'eau par de l'acide sulfurique ou de l'acide chlorhydrique de normalité, en présence de phénolphtaléine pour le TA et en présence d'hélianthine pour le TAC.

❖ Le dosage du chlore

La méthode la plus utilisée est celle de Mohr. La réaction des ions chlorures avec le nitrate d'argent donne un précipité de chlorures d'argent en présence de chromate. Les ions du chromate réagissent avec le nitrate d'argent pour donner un précipité rouge brique.

Tableau 6 : Classification des eaux souterraines par rapport au chlorure

Qualité des eaux souterraines	Douce, bonne	Faiblement salée	Assez salée	Limite de la salinité	Limite de la salinité pour le bétail
Chlorure en mg /l	<150	150 à 500	500 à 700	700 à 1000	1000 à 2500

(Source: RAKOTONDRAIBE)

❖ Le dosage des matières organiques

L'analyse consiste à mesurer en milieu alcalin, la quantité d'oxygène enlevée au permanganate de potassium par les matières organiques d'origine animale ou végétale contenues dans un échantillon d'eau.

II.2.1.2.2. Analyse colorimétrique

II.2.1.2.2.1. Méthode par hydrocure :

Cette méthode utilise un comparateur standard constitué d'un boîtier plastique et d'une plaquette amovible portant une série d'écran étalonné à boîtier peut être glissé dans le comparateur. Elle donne le résultat par comparaison avec la couleur de l'échantillon.



Photo 11 : Comparateur hydrocure

(Source: Auteur)

❖ Dosage du Fer total

En milieu ammoniacal, le réactif dithionite de sodium avec le diméthylglyoxime donne en présence du fer Fe^{2+} , un complexe de coloration rose dont l'intensité est fonction croissante de la concentration.

II.2.1.2.2.2. Méthode par spectrophotométrie :

Cette méthode utilise du spectrophotomètre. C'est un matériel électrique qui est constitué d'une petite cuvette, des boutons de commande et un écran. L'écran permet la lecture des résultats.



Photo 12 : Spectrophotomètre

(Source: Auteur)

❖ Dosage du sulfate

Les ions sulfates sont précipités et passés à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de « TWEEN 20 » ou de polyvinyl-pyrolidine.

❖ Dosage de l'azote ammoniacal

En milieu alcalin et en présence de nitroprussiate qui agit comme un catalyseur, les ions ammonium traités par une solution d'hypochlorite de sodium et de phénol donnent du bleu d'indophénol d'un dosage colorimétrique.

❖ Dosage des nitrites

Les nitrites réagissent avec le Sulfanilamide pour former un composé diazoïque qui après copulation avec le N - 1Naphthyléthylènediaminedichloride donne naissance à une coloration.

❖ Dosage des nitrates

Le principe est d'utiliser la méthode au Salicylate de sodium en milieu basique. En présence d'hydroxyde de sodium (NaOH) et en présence de salicylate de sodium, le nitrate donne une coloration jaune susceptible de dosage colorimétrique.

❖ Détermination du sodium

Le sodium est déterminé par calcul sur ordinateur. Le principe de ce calcul est basé sur la méthode d'équilibre ionique.

II.2.2. Analyse bactériologique

Les paramètres bactériologiques de l'eau analysée à la JIRAMA sont les suivants : les coliformes totaux, coliformes fécaux, streptocoques fécaux, anaérobies sulfito-réducteurs. Ce sont des indicateurs de contaminations fécales ou germes témoins.

II.2.2.1. Méthode d'analyse

On étudie les bactéries en les cultivant en milieu liquide ou solide. Ces milieux contiennent tous les nutriments dont les bactéries ont besoin pour se développer.

-L'analyse bactériologique peut s'effectuer selon deux méthodes :

- ❖ Méthode par membranes filtrantes

La première méthode consiste à utiliser des membranes filtrantes.

- ❖ Méthodes par tube multiples

La deuxième méthode consiste à utiliser des tubes multiples et est basée sur des résultats statistiques. La manipulation se fait dans une condition d'asepsie rigoureuse, c'est-à-dire que tous les matériels sont stérilisés pour que les conditions de qualité soient respectées.

-La lecture

C'est une manière d'interpréter l'aspect des bactéries après la culture. La lecture se fait à l'œil nu, le tableau ci-dessous montre la différenciation de chaque bactérie.

Tableau 7 : Tableau de lecture microbienne

Bactéries	Observations
Coliforme totaux	Présence de colonie jaune ou un Amas de couleur jaune
Coliformes fécaux	Présence de colonie jaune
Streptocoques fécaux	Présence de colonie rouge violacée
Anaérobies sulfito-réducteurs	Présence de colonie noire

(Source : Auteur)

II.2.2.2. Matériels utilisés

- Appareil de filtration sur membrane ou rampe de filtration: appareil pour filtrer l'échantillon d'eau sur la membrane filtrante
- Membrane filtrante stérile de porosité 0,45 µm, diamètre 5 cm.
- Boite de pétri
- Bec Bunsen

- Milieu de culture
- Etuve 37°C et 44°C

II.2.2.3. Mode opératoire

- Mode opératoire: Pour les coliformes totaux, coliformes fécaux, streptocoques fécaux
- Prélever 100mL d'échantillon
- Filtrer l'eau à analyser sur la membrane de porosité 45µm
- Enlever la membrane sur l'appareil de filtration
- La mettre dans une boite de pétri contenant le milieu de culture spécifique (Tableau 8)
- Laisser incuber dans l'étuve suivant la température et la durée préconisée dans le
- Dénombrer les colonies sur la membrane (cf)

Tableau 8 : Milieu de culture et condition d'incubation des bactéries

Bactéries	Milieu de culture spécifique	Température d'incubation (°C)	Durée d'incubation (heure)
Coliformes totaux	Gélose lactosée au TTC et Tergitol	37	20 à 24
Coliformes fécaux (<i>Escherichia Coli</i>)	Gélose lactosée au TTC et Tergitol	44	20 à 24
Streptocoques	Slanetz et Bartley	37	20 à 48

(Source : Auteur)

- Mode opératoire: Pour l'ASR, la méthode de dénombrement se fait par incorporation en milieu solide.
- Prendre 5 à 10mL d'eau à analyser dans un tube stérile
- Mettre dans un bain marie à 80°C pendant 10mn pour détruire les formes végétatives
- Refroidir à 55°C
- Verser l'eau à analyser dans un tube contenant le milieu Gélosé viande-foie préalablement fondu à 80°C
- Bien homogénéiser l'ensemble mélanger et Incuber à 37°C pendant 24h puis 48h
- La présence d'une spore de bactérie anaérobiose sulfito-réductrice (ASR) est confirmée par des colonies noires entourées d'un halo noir.

II.3. LE LOGICIEL AQUACHEM

La caractérisation hydrochimique des eaux souterraines est habituellement basée sur la disponibilité d'une grande quantité de données physico-chimiques. Dans cette étude, l'examen physique, hydrogéologique et physico-chimique des eaux souterraines dans le bassin de Mandrare dans la ville d'Amboasary Sud sont traitées par le logiciel AQUACHEM.

II.3.1. Origine du logiciel

AquaChem est un logiciel de représentation graphique et numérique spécialement destiné à analyser et modéliser des données sur la qualité des eaux et des données aqueuses géochimiques. C'est le fruit de la coopération de *<<Lukas Calmbach>>* et *<<Waterloo Hydrogeologic Inc>>*. Il est protégé à la fois par *<<Canadian copyright Law>>* et *<<international treaty provisions>>* [22].

II.3.2. Objectifs du logiciel et points forts

C'est un logiciel purement hydrochimique qui traite des données d'eaux souterraines comportant une base de données entièrement caractérisée par des paramètres physico-chimiques.

Il a une palette exhaustive d'outils d'analyse, de calcul, de modélisation et de représentation graphique des données.

L'analyse AquaChem : les outils couvrent un éventail de fonctions et de calculs utilisés pour analyser, interpréter et comparer des données de la qualité de l'eau. Ce logiciel peut effectuer des conversions d'unités, des équilibres de charges (balance ionique), le mélange des échantillons, des études statiques avec des fonctions très complexes telles que des matrices de corrélation et des calculs geothermométriques.

II.3.3. Structure du logiciel

Après avoir bien installé le logiciel, on peut le lancer en cliquant sur AquaChem, une boîte de dialogue s'ouvre. AquaChem possède cinq types de fenêtres : « *Parent Window, Record List Window, Input Window, Graph Window, Text Window* » qui peuvent être ouverts simultanément [23].

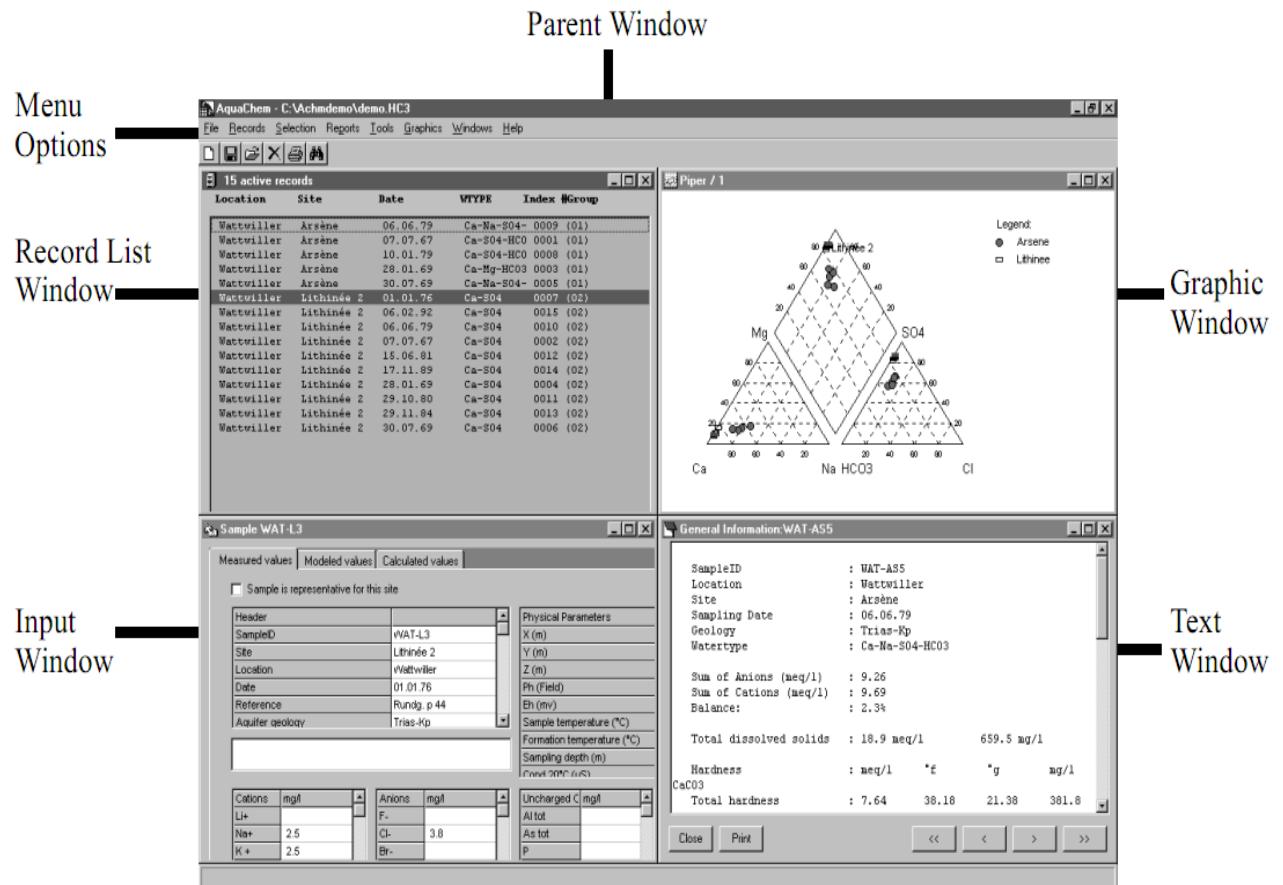


Figure 5: Fenêtre parent dans l'AQUACHEM

(Source : Manuel AQUACHEM)

II.3.3.1. la fenêtre << Record List >>

<<The record List window>> est la première fenêtre qui apparaît quand on ouvre un fichier de base des données AQUACHEM. Cette fenêtre est la base de tous travaux sous AQUACHEM. Elle se présente sous forme de tableau comme dans EXCEL [24]. Ce tableau renferme les paramètres généraux dont la référence de l'échantillon, le site, les dates de prise d'échantillon, la géologie, le projet, les éléments importants dissous dans l'eau, l'index et le numéro de l'échantillon. Chaque ligne représente tous les échantillons bien définis.

Figure 6 :la fenêtre <<Record List>>

(Source : Manuel AQUACHEM)

II.3.3.2. la fenêtre << Input Window >>

Un double clic dans la fenêtre <<Record List>> fait apparaître une nouvelle fenêtre d'entrée ou <<Input Window >>.

La fenêtre d'entrée présente la banque de données pour AquaChem. Elle affiche les détails des informations résultantes des analyses au laboratoire ou mesure sur terrain. Les résultats des analyses sont saisis et enregistrés dans la base de données.

Elle comprend trois sous-menus avec des paramètres respectifs qui sont :

-Valeurs mesurées<<Measured>> : résultat des analyses mesurées sur terrain ou des analyses au laboratoire.

-Valeurs calculées<<Calculated>> : résultat des calculs et traitements avec AquaChem.

-Valeurs modélisées<<Modeled>> : index et activité de saturation.

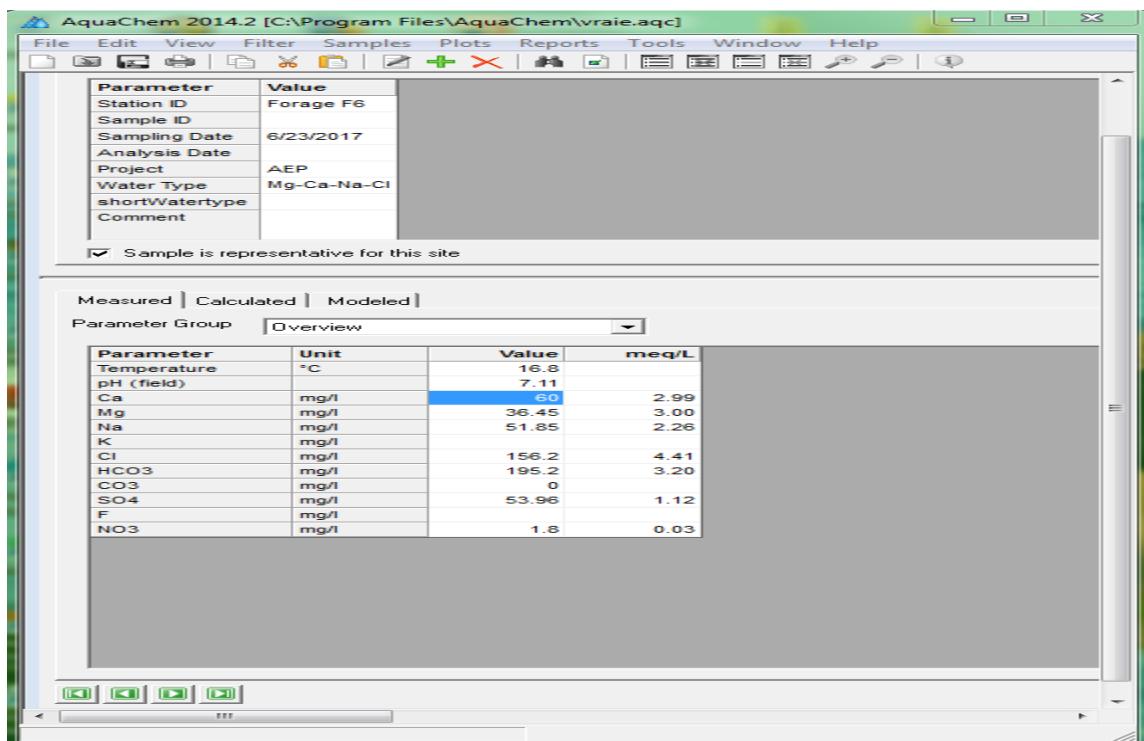


Figure 7: la fenêtre <<Input Window>>

(Source : AQUACHEM)

II.3.3.3. la fenêtre << Text Window >>

La fenêtre Texte de l’AquaChem fournit un rapport et/ou une information calculée pour un échantillon ou groupe d’échantillons dans la base de données.

Il y a des différents types des rapports :

- Rapport général
- Rapport matrice de corrélation
- Rapport statistique
- Rapport géothermomètre
- Rapport de mélange d’échantillons
- Rapport de comparaison
- Rapport de données
- Rapport de normes en eau de consommation

II.3.3.4. la fenêtre << Graphic Window >>

Dans cette fenêtre graphique, AquaChem offre différents types de diagrammes techniques utilisés pour l’interprétation des données hydro-chimiques. Chacun de ces diagrammes présente des informations pour tous les échantillons ou pour un seul échantillon selon le type d’échantillon choisi.

Ces différents types de diagramme sont : le diagramme de Piper, le diagramme de Schoeller, le diagramme de Durov, le diagramme de Scatter, Histogramme, Radial, Ternaire, etc....

Dans ce mémoire, nous avons choisi trois diagrammes que nous avons supposé fondamentaux pour le traitement et l'interprétation des données physico-chimiques des eaux du bassin de Mandrare dans la ville d'Amboasary Sud.

❖ Le Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper utilise les éléments majeurs qui sont très utiles pour représenter et classifier les différents faciès chimiques des eaux. L'AquaChem fait la conversion des unités et le traçage automatiquement. Il trace les ions en milliéquivalent % (mEq%) dans deux triangles de bases. Pour avoir une neutralité électrique, la somme des anions (mEq/l) et des cations (mEq/l) doit être égale 100% (somme des concentrations en anions = somme des concentrations en cations) (Figure 8).

Il comporte deux triangles et un losange :

- à gauche, le triangle des cations avec trois pôles,
- à droite, le triangle des anions avec les trois pôles,
- en haut, un losange de projection avec les quatre pôles

Répartition synthétique des ions majeurs

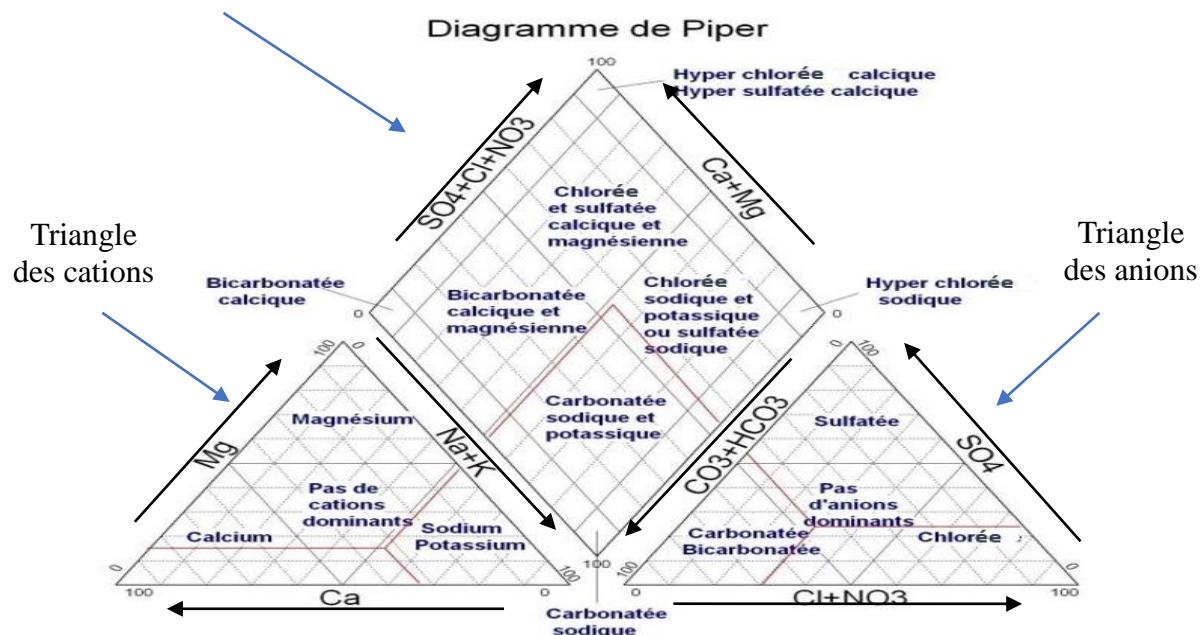


Figure 8: Diagramme de Piper avec faciès chimiques des eaux

(Source : AQUACHEM)

Les points obtenus sont projetés dans le losange. L'emplacement des points sur ce dernier révèle la classe d'appartenance de l'eau de chaque échantillon. L'analyse chimique de l'eau met en jeu les ions majeurs suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ ou $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ et HCO_3^- , SO_4^- , Cl^- . Des changements de paramètres et des autres options peuvent apparaître dans le menu « options » de cette fenêtre du diagramme de Piper.

❖ Le Diagramme de Schoeller

C'est un diagramme semi-logarithmique pour représenter les ions majeurs en méq/l et qui permet la comparaison des échantillons dans le but de démontrer l'existence des diverses types faciès ou classes chimiques des eaux et la détermination de la minéralisation des eaux suivant l'allure des courbes. Les concentrations sont portées automatiquement en ordonnée semi-logarithmique et les éléments chimiques en abscisse linéaire (Figure 9). L'axe des abscisses peut inclure jusqu'à six paramètres ou éléments chimiques différents. Le type d'eau est défini généralement par les deux pics maxima dont l'un correspond à un cation et l'autre à un anion [25].

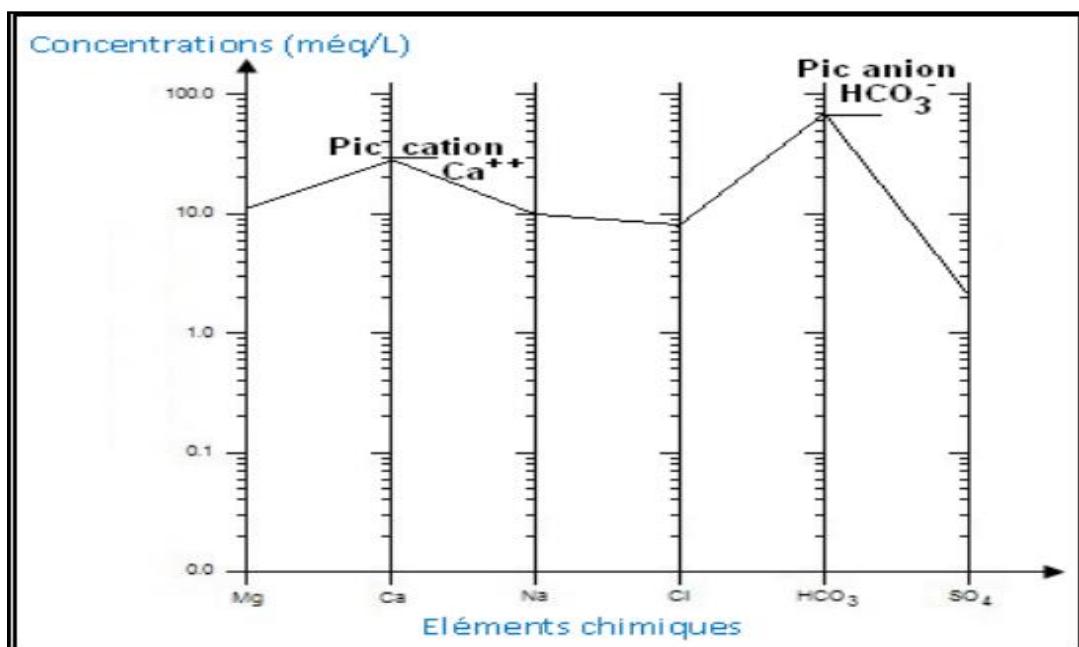


Figure 9: Diagramme de schoeller

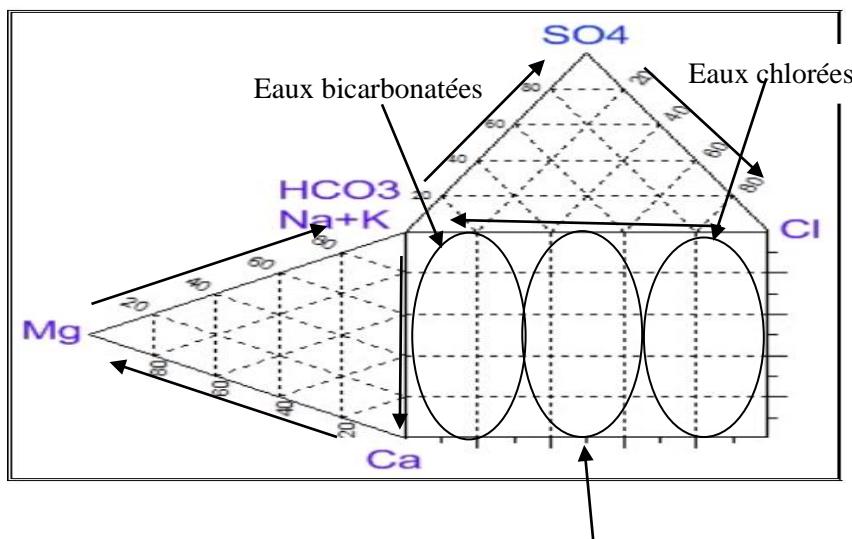
(Source: AQUACHEM)

❖ Le diagramme de Durov

Ce diagramme de Durov (Figure 10) est une alternative du diagramme de Piper qui indique les rapports et les propriétés utiles à la caractérisation des échantillons, il permet d'identifier les échantillons de compositions semblables.

Il est constitué de deux triangles et d'un carré de projection :

- Le triangle des cations à gauche du carré de projection avec les pôles,
- Le triangle des anions en haut du carré avec les pôles,
- Les points des deux triangles sont projetés sur le carré.



Conclusion

Le paragraphe précédent a montré l'expérience effectuée durant ce travail de recherche. Les résultats obtenus sont détaillés dans la partie suivante.



TROISIEME PARTIE:

RESULTATS ET DISCUSSIONS

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. CARACTERISTIQUES HYDRO-CHIMIQUES DES EAUX

III.1.1. Caractéristiques physiques des eaux

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 9: Résultats des analyses physiques.

Paramètres	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Norme	Unité
Température	16,8	16,8	16,8	16,9	16,9	< 25	°C
Turbidité	17	36	3,32	4,3	14,7	<5	NTU
pH	7,11	7,09	7,96	7,2	7,43	6,5 à 9	
Conductivité	798	2830	261	292	243	<3000	µS/cm
Minéralisation	684	2621	242	270	226		mg/l
Dureté totale	30	106	13,4	14,4	12,2	<50	°f
Dureté Calcique	15	59	8	9	7,8		°f
Titre Alcalimétrique	0	0	0	0	0		°f
Titre Alcalimétrique Complet	16	38	12	14	10,2	<40	°f
Matières organiques	2,5	2,6	1,3	1,5	1,1	<2	mg/l

(Source: Auteur)

Ces résultats nous permettent d'observer et d'interpréter des paramètres physiques des eaux des cinq échantillons.

III.1.1.1. Température

La température varie entre 16,8 °C et 16,9°C dans les cinq échantillons. Après en comparant ces résultats avec la norme Malagasy, l'eau est conforme à la norme car la température est inférieure à 25°C. Le changement de température observé est lié à la variation saisonnière.

Dans un aquifère alluvial, la température de l'eau souterraine varie suivant la température extérieure. Cette variation saisonnière de température nous permet d'envisager que ces nappes sont rechargées rapidement par l'eau superficielle grâce à la perméabilité de l'aquifère alluviale.

III.1.1.2. Turbidité

La turbidité varie entre 3,31 NTU à 36 NTU. Les eaux ayant une turbidité supérieure à la norme sont troubles comme les eaux de points de prélèvements P1, P2, P5. La turbidité de l'eau de P1 et P2 pourrait être liée à la perméabilité des fissures et fractures de l'aquifère et l'échantillon P5 dans le fleuve Mandrare dépend du terrain traversé par l'eau et la contamination des activités humaines. La turbidité n'a pas de relation dose/effet mais elle constitue un gène pour l'efficacité de traitement de désinfection. Leur mesure est donc très utile pour le contrôle de traitement.

III.1.1.3. pH des eaux

Le pH détermine l'acidité, l'alcalinité et la neutralité des solutions, il est lié à la nature du terrain. En général, la modification du pH dans l'eau est liée à la perte du gaz carbonique. Il convient aussi de signaler que la valeur du pH est fonction de la matière organique thermostable dissoute ou non dans l'eau. Généralement, les valeurs de pH diminuent pendant les périodes pluvieuses, cette diminution peut être attribuée au gaz carbonique qui charge les eaux d'infiltration à travers les différentes couches du sol. Les minéraux rencontrés seront dissous sous l'influence du pH [26].

Le pH de quoi varie généralement entre 7,09 et 7,96, toutes ces eaux sont conformes à la norme car les valeurs sont comprises entre 6,5 à 9. Un pH est neutre à légèrement basique qui caractérise des eaux exploitées dans un aquifère sous l'effet de l'interaction eau-roche qui l'enrichit en ion bicarbonate.

III.1.1.4. Conductivité électrique et la minéralisation

La conductivité électrique définit la quantité des sels minéraux ou des matières solides en solution contenues dans l'eau. Cette matière solide solution ou résidu sec filtrable, obtenu par l'évaporation et la dessiccation à 105 °C, correspond à la minéralisation d'une eau TDS. Par conséquent, la mesure de la conductivité électrique permet d'évaluer la minéralisation globale d'une eau.

L'augmentation de la conductivité électrique de l'eau dans le point de prelevements P1 et P2 a une relation avec sa localisation géographique et géologique, c'est à dire les P1 et P2 sont situées dans l'aquifère semi-profond porté par les grès calcaires et conduisent à une invasion marine. Les CE permettent de vérifier la minéralisation de l'eau. L'eau ayant une conductivité entre 100 µS/cm à 333 µS/cm est classée comme une eau à minéralisation moyenne comme les échantillons P3, P4 et P5.

III.1.1.5. La Dureté de l'eau

Le titre hydrométrique des eaux potables de bonne qualité est inférieure 15°F. Selon la valeur de TH nos échantillons sont classés comme suit :

- L'eau du forage F7(P₂) est classée très dure
- L'eau du forage F6 (P₁) est classée dure
- L'eau de puits drain de captage de la JICA(P₃), le puits particulier(P₄) et le fleuve Mandrare(P₅) est classée faiblement salée

La dureté s'acquiert au cours de l'interaction de l'eau avec la roche, car l'eau souterraine est le produit de l'infiltration de l'eau de pluie et de l'eau de surface. Alors, il se charge en CO₂ produit par la désintégration de la matière organique dans le sol qui entraîne l'altération des minéraux et accroît la dureté de l'eau.

III.1.1.6. Alcalinité de l'eau

Les résultats d'analyses physico chimiques des eaux montrent que le titre alcalimétrique (TA) est nul. Ce qui traduit l'absence d'ions CO₃²⁻ dans les eaux. Le TAC exprime la teneur en carbonate et bicarbonate de l'eau. Les ions bicarbonates sont les ions dominants dans le système carbonique y compris notre zone d'étude. La diminution de TAC est due à une réduction de la teneur en bicarbonate dans l'eau car le contact avec l'air pendant le développement à air-lift abaisse la dissolution de la roche. Les ions bicarbonates sont libérés à partir de la dissolution des roches carbonatées par l'attaque du gaz carbonique.

III.1.1.7. La matière organique

Elle conditionne la potabilité d'une eau car elle permet de quantifier leur degré de pollution. La concentration en matière organique des eaux de forages F6(P1) et F7(P2) est supérieure à 2mg/l, les deux sources n'utilisent pas la société JIRAMA pendant les quatre dernières années à cause de la salinité. La MO facilite aussi le développement des germes, algues et champignons dans l'eau et pourraient induire un mauvais goût. La teneur en matière organique est faible dans les points de prélèvements P3, P4, P5, les eaux sont conformes à la norme de potabilité.

III.1.2. Paramètres chimiques de l'eau

Le résultat ci-dessous montre les paramètres chimiques de l'eau des forages.

Tableau 10 : Résultats des analyses chimiques.

Paramètres chimiques	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Norme	Unité
Ammonium	0,06	0,04	0,01	0,01	0,04	<0,5	mg/l
Fer Total	0	0	0	0	0,01	<0,5	mg/l
Sodium	51,85	223,62	20,91	21,38	12,8		mg/l
Calcium	60	236	32	36	31,2	<200	mg/l
Magnésium	36,45	114,21	13,12	13,21	10,69	<50	mg/l
Chlorures	156,2	731,3	39,53	40,43	29,11	<250	mg/l
Sulfates	53,96	173,25	39,53	21,33	19,93	<250	mg/l
Bicarbonates	195,2	463,6	146,4	170,8	124,44		mg/l
Carbonates	0	0	0	0	0		mg/l
Nitrates	1,8	0,8	0,3	0,4	1,4	<50	mg/l
Nitrites	0,21	0,12	0,06	0,06	0,07	<0,1	mg/l

(Source: Auteur)

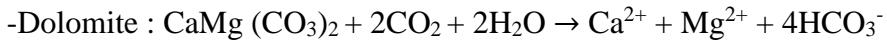
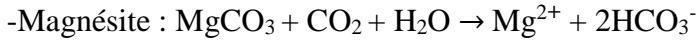
III.1.2.1. Calcium

Le calcium est un élément principal de la dureté de l'eau, c'est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates (CaCO_3). Dans les roches sédimentaires, il se présente sous forme de carbonates (calcite, dolomite et aragonite) [10]. Le calcium fait partie de quelques minéraux évaporitiques à savoir le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite et aussi dans les minéraux argileux sous forme de Ca-montmorillonite [14].

Les concentrations en calcium varient entre 31,2mg/l et 236mg/l. La teneur en calcium est plus élevée dans le point de prélèvement P2, Cette forte concentration peut être exploitée dans les aquifères semi-profonds grès -calcaires. Tandis que les faibles teneurs sont observées dans les points de prélèvements P1, P3, P4, P5. La valeur maximale admissible pour une eau potable est de 200 mg/l. La présence de cet élément à des taux élevés est à la base de maladie néphrétique. Néanmoins, le calcium présente un avantage pour la santé, il fortifie les os.

III.1.2.2. Magnésium

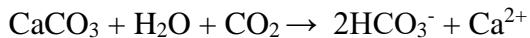
Le magnésium est un élément très répandu dans la nature de l'écorce terrestre, c'est un élément principal pour la détermination de la dureté de l'eau. Dans les roches sédimentaires son origines est comparable à celui du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium comme la magnésite et la dolomite [10].



La teneur en magnésium dans nos échantillons varie entre 10,69mg/l et 114,21mg/l. La teneur la plus élevée est observée au niveau de point de prélèvement P2. Cette forte concentration peut être attribuée au contact direct de ces eaux avec les argiles gypseuses et les formations carbonatées et dolomitiques limitrophes. Les échantillons P1, P3, P4, P5 sont potables, bien que la teneur acceptable soit inférieure à 50 mg/l. Pour la santé, le magnésium favorise les réactions métaboliques.

III.1.2.3. Les Bicarbonates

Les bicarbonates proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO₂). Selon l'équation suivante [14] :



Les concentrations en bicarbonates dans les différents échantillons analysés varient entre 124,44 mg/L et 463,6mg/L. Ces fortes teneurs sont dues probablement à la dissolution des calcaires.

III.1.2.4. Sulfates

Les sulfates proviennent essentiellement de la dissolution du gypse (CaSO₄, 2H₂O), le gypse se dissout très rapidement en contact avec l'eau. Une autre source de sulfates peut être attribuée à l'infiltration de sulfure utilisé comme le fertilisant ou le pesticide.

La réaction de dissolution de gypse est représentée par l'équation suivante [20] :



Les concentrations en sulfate varient entre 17,76mg/l et 173,25mg/l, toutefois tous les échantillons sont conformes à la norme de potabilité. Sa consommation par les hommes peut entraîner des troubles gastro-intestinaux. La valeur maximale admissible pour une eau potable est de 250 mg/l.

III.1.2.5. Chlorures

L'origine de ces chlorures pose un problème car la corrélation entre les ions, la géologie, le contexte géographique et climatique nous amène à considérer différentes sources. En général, le chlorure est sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂), les ions chlorures (Cl⁻), la grande partie se trouve dans les océans, et constituent environ 0,05 % de la lithosphère. De façon générale, l'ion chlorure est présent dans toutes les eaux à des concentrations différentes.

Dans le secteur étudié, la teneur en chlorure varie entre un minimum de 29,11 mg/l enregistré au niveau du point P5 (Fleuve Mandrare) et un maximum de 731,3 mg/l enregistré au niveau du forage F7 de point P2. Les concentrations de chlorure dans les points des prélèvements P3, P4, P5 sont classées de bonne qualité et le forage F6 de point de prélèvement P1 est faiblement salé. Il peut atteindre une concentration élevée jusqu'à 731,3 mg/l dans le forage F7, cette eau est classée à la limite de salinité. Dans les eaux souterraines, les teneurs en ions chlorures peuvent atteindre quelques grammes par litre au contact de certaines formations géologiques. La localisation géographique du forage nous aide à comprendre que cette abondance en chlorure est due à l'infiltration de l'eau de mer dans la nappe. L'aquifère s'enrichit aussi en chlorure de sodium par les embruns marins. Les eaux riches en chlorure sont agressives et de mauvais goût. La valeur maximale admissible pour une eau potable est de 250 mg/l.

III.1.2.6. Sodium

Le principal minéral contenant le sodium est le sel gemme (chlorures de sodium). Des teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage ou de la percolation de terrains salés ainsi que de l'effet de la salinité marine. Au niveau de la zone d'étude les teneurs en sodium varient entre 12,8 mg/l et 223,62 mg/l. Ces teneurs sont attribuées probablement à des mécanismes chimiques différents liés à l'échange de base qui est influencé par le pompage et le sens d'écoulement. Ensuite, l'évaporation intense dans la région côtière favorise le phénomène d'embrun marin. Enfin, la profondeur du forage nous amène à penser à une recharge ascendante par de nappes à forte minéralisation. Pour la santé, Le sodium peut causer des crises d'hypertension et de cardiopathies, quand il est présent en concentrations importantes.

III.2. FACIES CHIMIQUES DES EAUX

III.2.1. Représentation graphique sous AQUACHEM.

La représentation des résultats d'analyse a été faite sous forme de diagrammes: ce sont les diagrammes de Piper, de Schoeller et de Durov. Ces diagrammes sont établis par le logiciel Aquachem. La caractérisation d'une ressource en eau minérale requiert l'obtention des données hydrochimiques diverses obtenues à partir des analyses des échantillons prélevés. Elles induisent l'utilisation d'une représentation graphique.

L'objectif principal de la représentation graphique est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique.

Nous allons établir le diagramme de Schoeller, le diagramme de Piper et le diagramme de Durov pour les échantillons d'eau dans les figures représentatives suivantes.

III.2.1.1. Le diagramme de Schoeller

La représentation graphique avec le diagramme de Schoëller permet de savoir le faciès, le degré de minéralisation et l'origine des eaux, en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques.

La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. Chaque ligne est reliée à tous les points figurant les différents éléments chimiques. Le faciès des eaux est obtenu avec les pics de concentrations d'anion et de cation les plus élevés. Par cette méthode de classification, on peut regrouper les eaux suivant leur faciès.

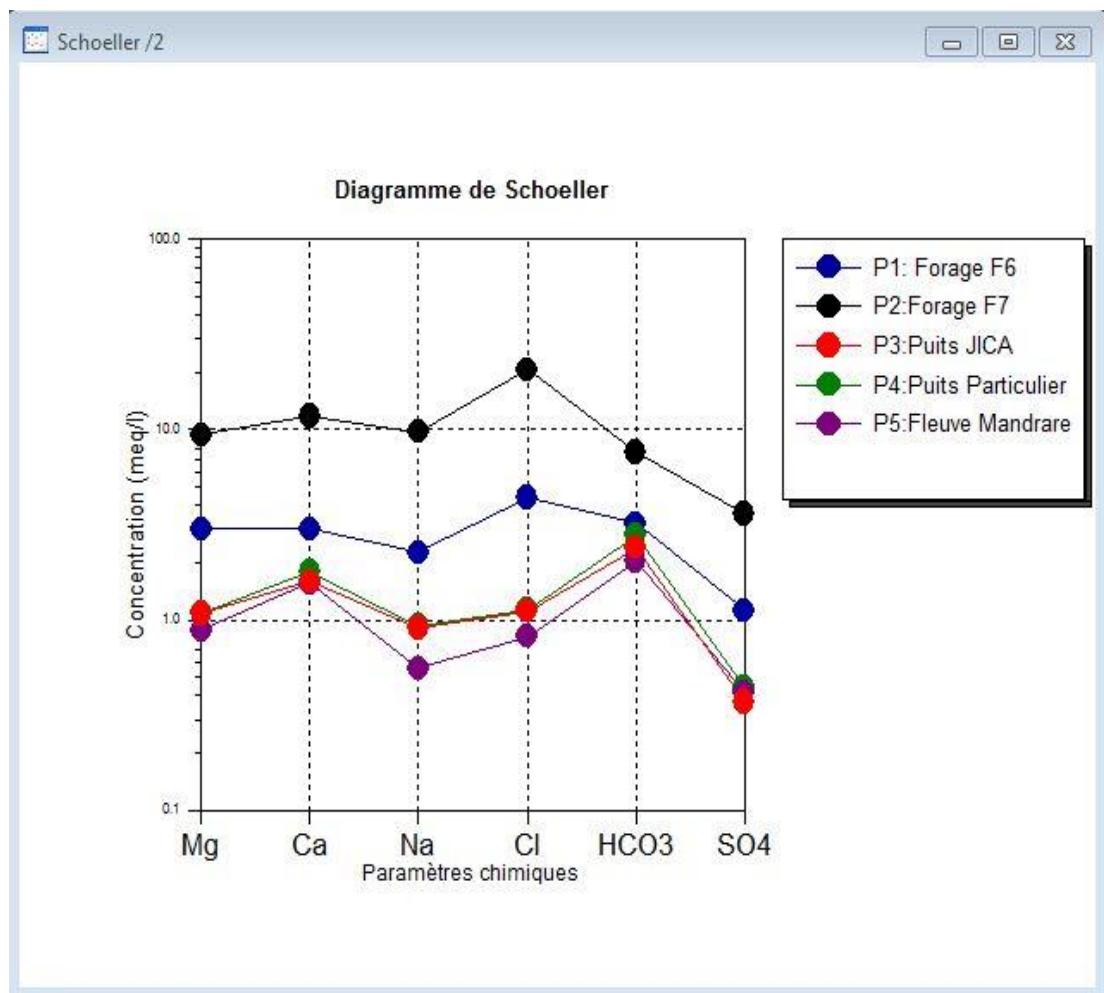


Figure 11: Diagramme de Shoëller de tous les échantillons

(Source: AQUACHEM)

III.2.1.2. Le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper confirme les différentes classes ou faciès des eaux identifiées avec le diagramme de Schoëller en utilisant les éléments majeurs. Il permet également de voir l'évolution de l'eau passant d'un faciès à un autre, grâce à des analyses espacées dans le temps ou des analyses d'échantillons prises à des endroits différents. Le diagramme de Piper est très utile pour représenter toutes autres sortes de groupes d'analyses. Il est composé de deux triangles et un losange. Les deux triangles (un triangle portant les cations et un autre les anions) sont d'abord remplis puis on trace le losange. Les valeurs utilisées sont exprimées en meq/l.

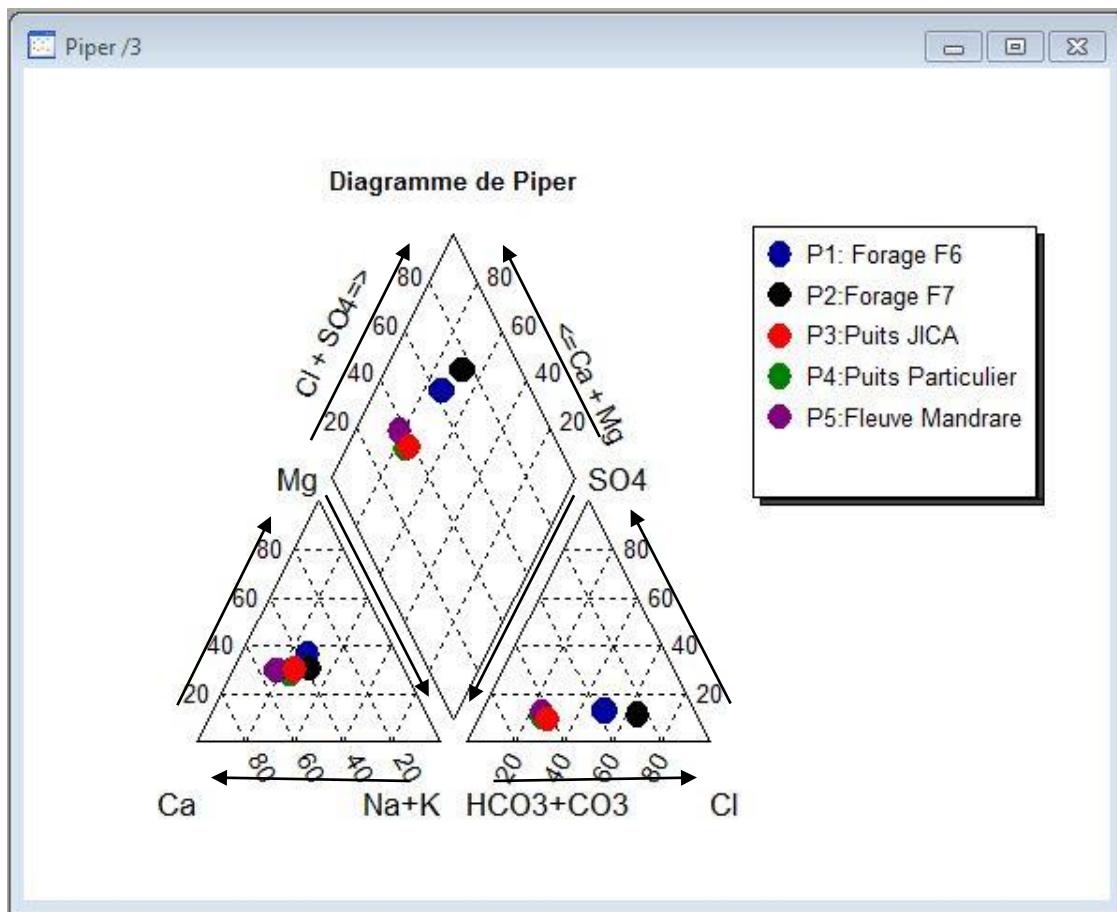


Figure 12: Diagramme de Piper de tous les échantillons

(Source: AQUACHEM)

III.2.1.3. Le diagramme de Durov

Le diagramme de Durov confirme l'existence des faciès d'eau déjà identifiés avec le diagramme de Schoëller et le diagramme de Piper. Il indique les rapports et les propriétés utiles à la caractérisation des échantillons. Ce type de diagramme permet d'identifier les échantillons de compositions semblables.

Ces trois faciès sont:

- Le faciès bicarbonate
- Le faciès sulfaté
- Le faciès chloré

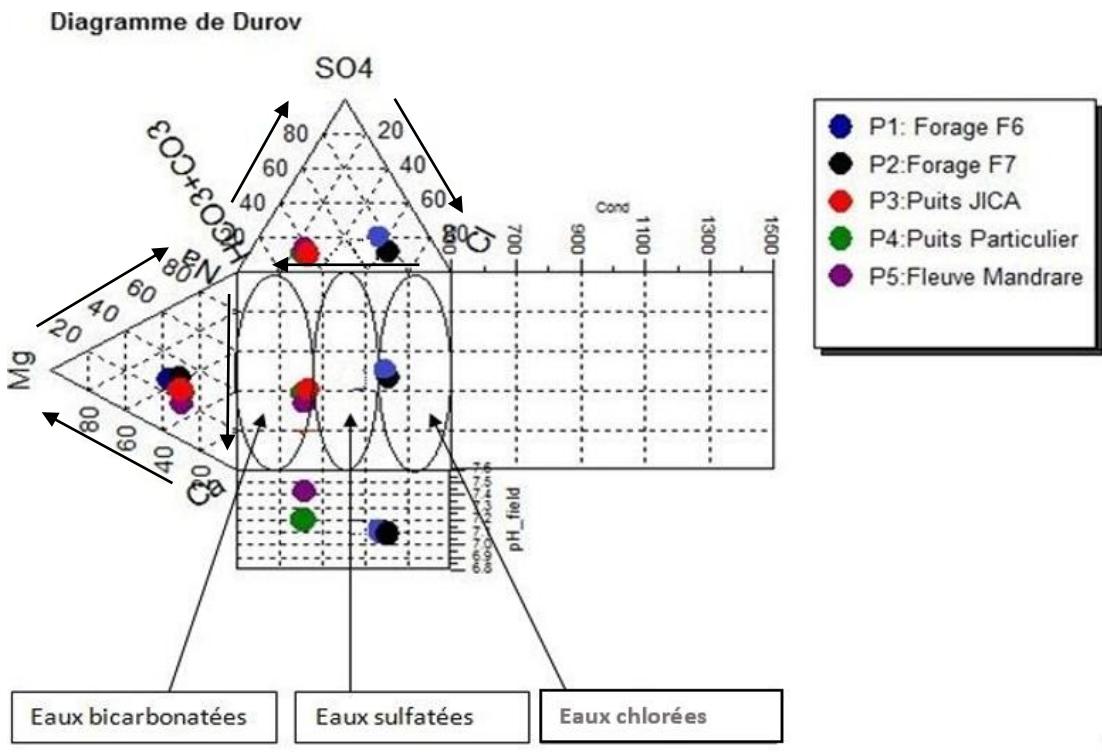


Figure 13: Diagramme de Durov de tous les échantillons
(Source: AQUACHEM)

III.2.2. Classification des eaux.

Les eaux souterraines de notre zone d'étude sont classées de deux manières différentes :

Premièrement, selon leur TDS en mg/l. Nous avons opté pour la classification [29]. Cette classification est choisie parmi tant d'autre sous prétexte qu'elle est compatible avec les TDS que nous disposons. Nous avons obtenu trois classes:

- La classe des eaux peu minéralisées à $TDS < 300 \text{ mg/l}$. Les ions prédominants sont HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Le goût est bon. Cette classe est représentée par les points de prélèvements P₃, P₄ et P₅.
- La classe des eaux minéralisées à $300 \text{ mg/l} < TDS < 1000 \text{ mg/l}$. Les ions prédominants sont HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Le goût est moins bon. Cette classe est représentée par le forage F6 de point de prélèvement P1.
- La classe des eaux très minéralisées à $TDS > 1000 \text{ mg/l}$. Les ions prédominants sont Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ et Ca^{2+} . Le goût est mauvais. Cette classe est représentée par le forage F7 de point de prélèvement P2.

Deuxièmement, selon leurs facies chimiques. Cette classification sera basée sur l'interprétation des diagrammes de Piper et de Schoeller.

III.2.2.1. Classification des eaux à TDS < à 300 mg/l

- ❖ Selon le diagramme de Piper

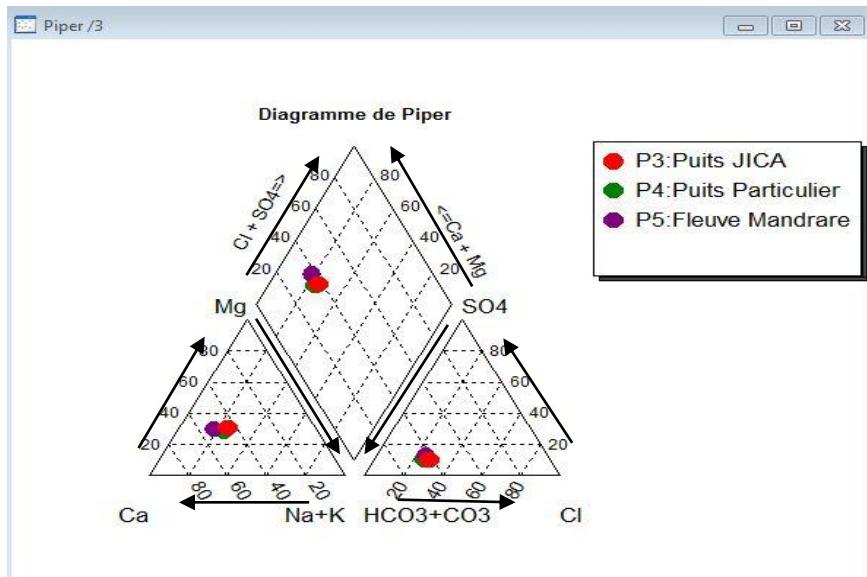


Figure 14: Diagramme de Piper des eaux à TDS < à 300 mg/l

(Source: AQUACHEM)

Interprétation

La projection dans le losange se trouve dans la classe de l'eau bicarbonatée calcique et magnésienne pour l'eau analysée dans le point de prélèvement P3, P4 et P5.

- ❖ Selon le diagramme de Schoeller

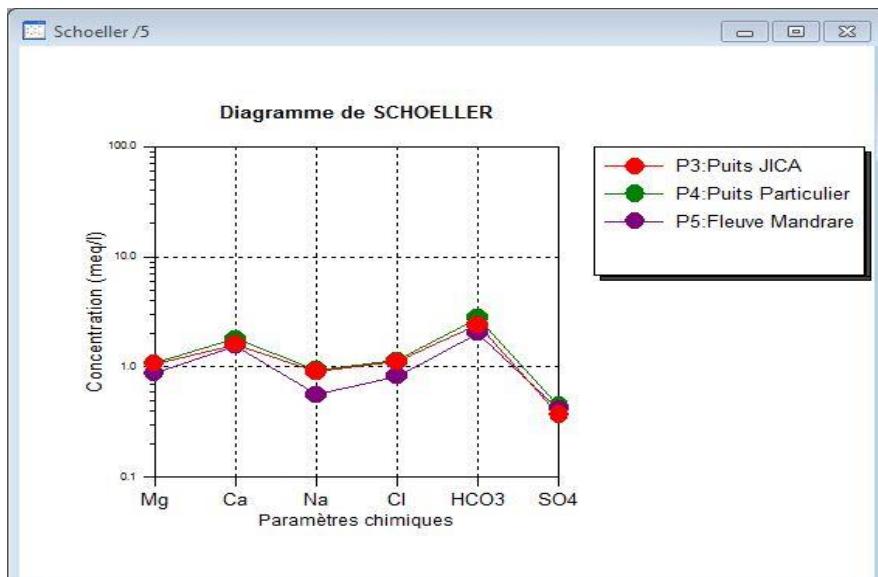


Figure 15 : Diagramme de Schoeller des eaux à TDS < à 300 mg/l

(Source: AQUACHEM)

Interprétation

Le diagramme de Schoeller met en évidence que cette courbe présente deux pics maximaux au niveau du Ca^{2+} et au niveau du HCO_3^- .

Ainsi, compte tenu de ces résultats on peut dire que la répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès type d'eau bicarbonatée calcique.

III.2.2.2. Classification des eaux à 300 mg/l < TDS < 1000 mg/l

- ❖ Selon le diagramme de Piper

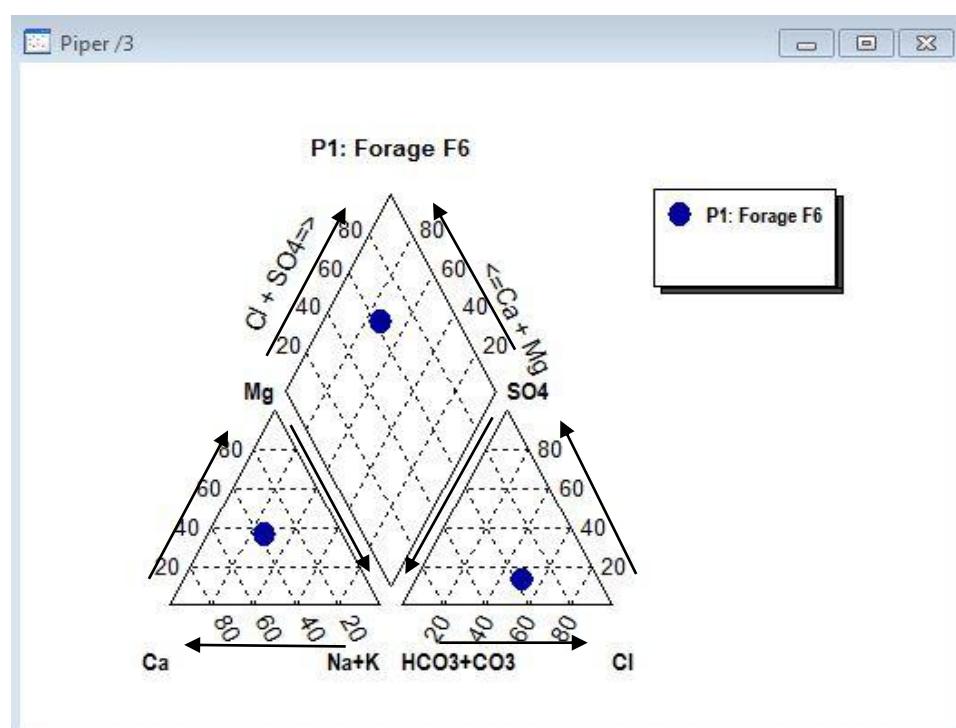


Figure 16: Diagramme de Piper des eaux à 300mg/l < TDS < 1000 mg/l

(Source: AQUACHEM)

Interprétation

D'après ce diagramme, on conclut que la classe de l'eau du Forage F6 est chlorée, sulfatée calcique et magnésienne.

❖ Selon le diagramme de Schoeller

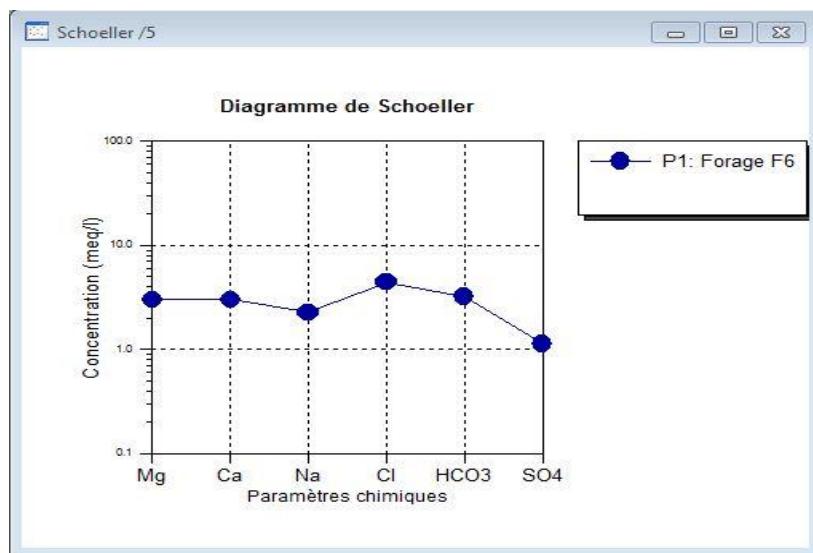


Figure 17 : Diagramme de Schoeller des eaux 300 mg/l < TDS < 1000 mg/l

(Source: AQUACHEM)

Interprétation

On a les mêmes pics pour les taux de Mg²⁺ et de Ca²⁺ dans la partie des cations et dans la partie des anions le pic maximal est au niveau de Cl⁻.

La répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès type d'eau chlorée calcique et magnésienne.

III.2.2.3. Classification des eaux à TDS >1000 mg/l

Selon le diagramme de Piper

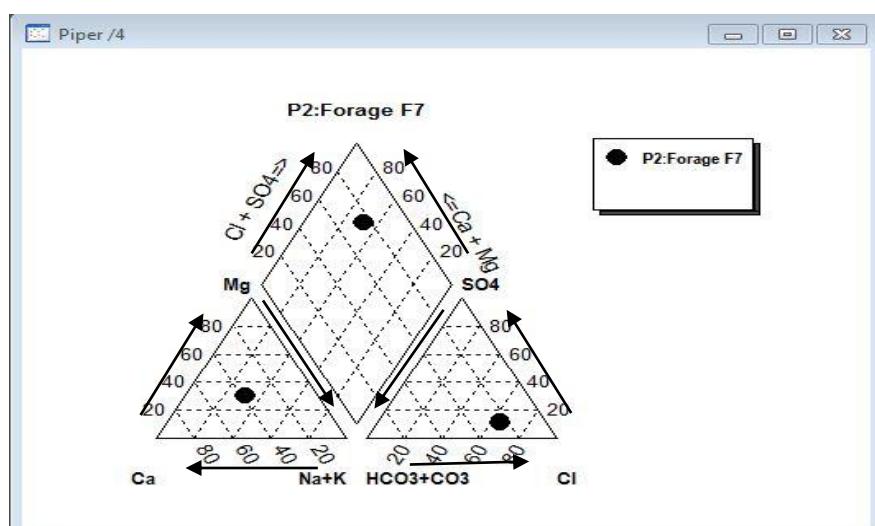


Figure 18: Diagramme de Piper des eaux à TDS >1000 mg/l

(Source: AQUACHEM)

Interprétation

D'après ce diagramme, on trouve que la projection est dans la classe chlorée, sulfatée calcique et magnésienne.

- ❖ Selon le diagramme de Schoeller

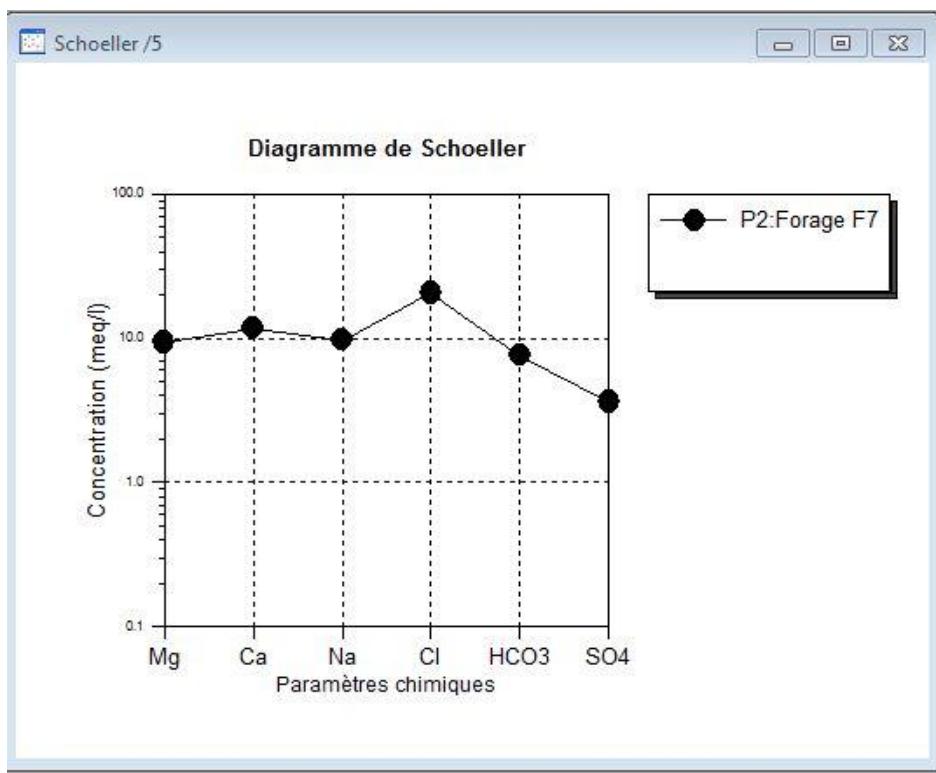


Figure 19: Diagramme de Schoeller des eaux à TDS >1000 mg/l

(Source: AQUACHEM)

Interprétation

Avec le diagramme de Schoeller, il a été constaté que le taux en chlore de l'eau est maximal par rapport aux autres éléments, et cette eau a aussi une faible quantité de sulfate, les taux en Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ sont moyens.

La répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès type d'eau chlorée calcique et magnésienne et sodique.

III.3. RAPPORTS IONIQUES

L'examen des rapports caractéristiques permet d'apporter d'éventuelles informations sur les échanges entre les ions, ces rapports caractéristiques sont [18] : $\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}}$, $\frac{SO_4^{--}}{Cl^-}$, $\frac{Na^+}{Cl^-}$, $\frac{HCO_3^-}{Cl^-}$

- $\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}} = 1$, Cela peut impliquer une circulation des eaux dans les dolomies.
- $\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}} < 1$, Ce qui indique la prédominance de l'ion Calcium; traduit que sa minéralisation est obtenue dans les calcaires ou les gypses.
- $\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}} > 1$, La teneur élevée en ion Mg^{2+} est l'indice d'une circulation des eaux dans les dolomies calcaires; ou contamination par l'eau de mer.
- $\frac{SO_4^{--}}{Cl^-} > 1$, Ce rapport indique un séjour prolongé des eaux au contact des marnes
- $\frac{SO_4^{--}}{Cl^-} < 1$, C'est le Cl^- qui l'emporte sur le SO_4^{--} , ce qui indique le lessivage des engrangements chimiques (NaCl, KCl) ou une pollution d'origine humaine ou animale. Certains auteurs ont montré que pour des valeurs de ce rapport < 0.05 dans les nappes côtières, il y a une forte probabilité de l'intrusion marine.
- $\frac{Na^+}{Cl^-} = 1$, Ce qui pourrait indiquer la mise en solution des sels tels que Na Cl.
- $\frac{HCO_3^-}{Cl^-}$, Certains auteurs ont montré que pour des valeurs de ce rapport < 0.2 dans les nappes côtières, il y a une forte probabilité de l'intrusion marine.

Tableau 11 : Rapports caractéristiques des eaux souterraines

Points d'eaux	Rapports			
	$\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}}$	$\frac{Na^+}{Cl^-}$	$\frac{SO_4^{--}}{Cl^-}$	$\frac{HCO_3^-}{Cl^-}$
P1	0,60	0,33	0,34	1,24
P2	0,48	0,30	0,23	0,63
P3	0,41	0,50	0,44	3,70
P4	0,36	0,52	0,52	4,22
P5	0,34	0,43	0,68	4,27

(Source: Auteur)

Le rapport ionique $\frac{\text{Mg}^{++}}{\text{Ca}^{++}}$ de l'échantillon est inférieur 1, il indique la prédominance de l'ion calcium par rapport au magnésium. Il montre que l'eau a obtenu sa minéralisation dans les calcaires (CaCO_3) ou les gypses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). C'est le cas de la majorité des points d'eau (P1, P2, P3, P4, P5). Le rapport $\frac{\text{SO}_4^{--}}{\text{Cl}^-} < 1$, c'est le Cl^- qui l'emporte sur le SO_4^{--} , ce qui indique le lessivage des engrains chimiques (NaCl , KCl) ou une pollution d'origine humaine ou animale. C'est le cas des point d'eau (P1, P2, P3, P4, P5).

III.4. ORIGINE DE SALINITE

Le chlorure est un élément qui caractérise l'origine de la salinité des eaux. La représentation graphique des éléments majeurs en fonction des chlorures est un moyen permettent de comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines. Le Cl^- est un élément conservé et qui ne participe pas à l'interaction eau-roche donc c'est un traceur de mélange. Alors le processus de mélange est déterminé par la disposition des points d'eau par rapport à la courbe de mélange eau-douce eau salée.

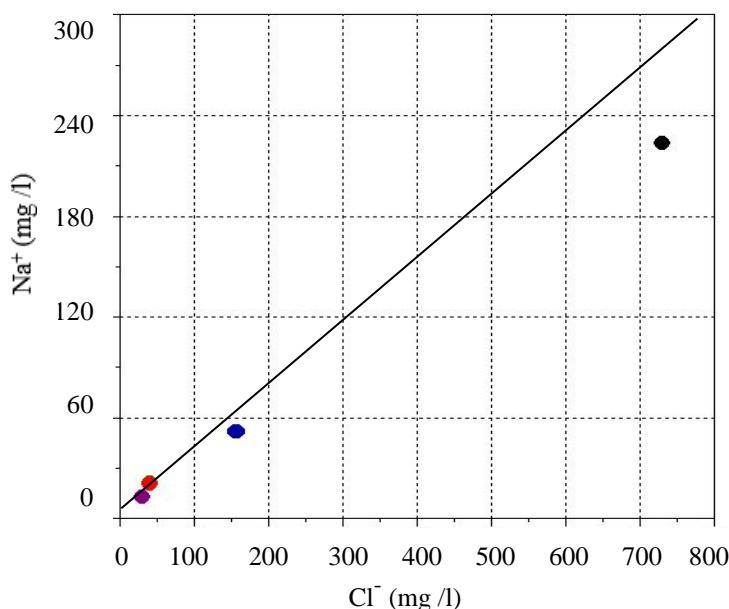


Figure 20: Na^+ en fonction Cl^-

(Source: Auteur)

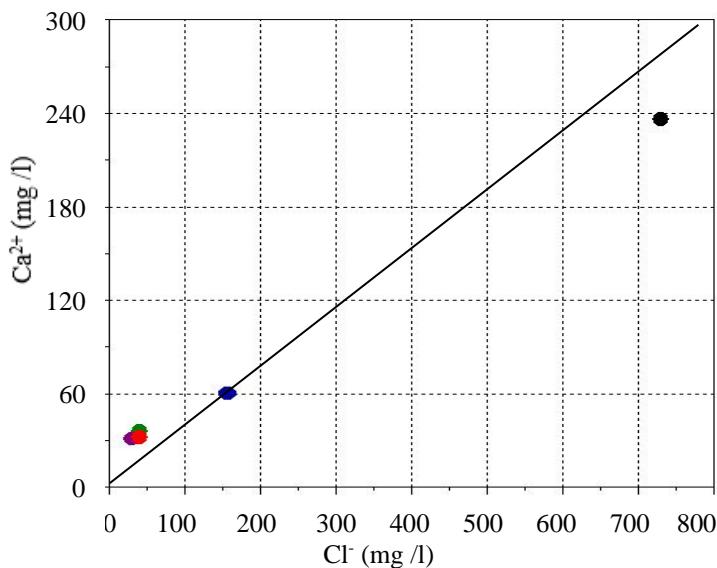


Figure 21:Ca²⁺ en fonction Cl⁻

(Source: Auteur)

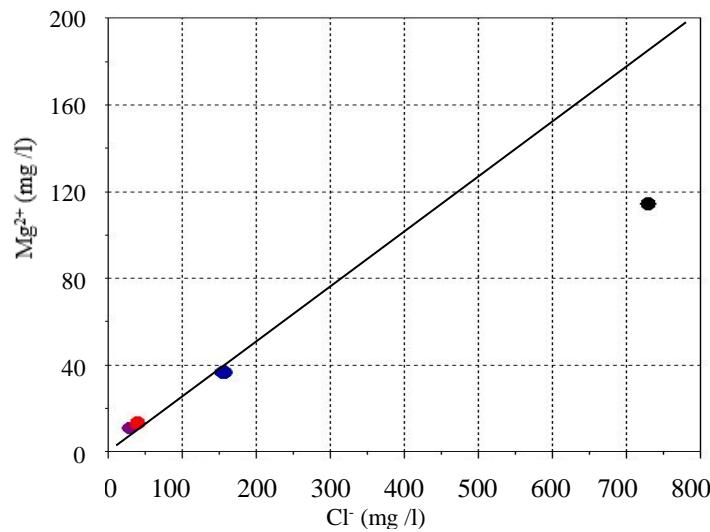


Figure 22: Mg²⁺ en fonction Cl⁻

(Source: Auteur)

La teneur moyenne et élevée en ion Ca²⁺ et Mg²⁺ dans ces eaux est dues à l'échange Ca²⁺ - Mg²⁺ de l'interaction eau-roche comme la dissolution et la précipitation de calcaire et le gypse. Le graphe Na⁺ en fonction de Cl⁻ montre que tous les points se trouvent au dessous de la droite de mélange. Etant donné que la teneur en Na⁺ devrait équilibrer la teneur en Cl⁻. Le déficit en ion Na⁺ est une conséquence du phénomène d'échange de base entre l'eau et l'aquifère, manifesté par l'adsorption de Na⁺ et la libération de Ca²⁺. Le graphe Ca²⁺-Cl⁻ illustre ceci en montrant que tous les points se trouvent au-dessous de la droite et à la base de la droite de mélange eau douce eau salée. La relation entre le Mg²⁺ et le Cl⁻ indique que la majorité des points se trouve à la base de la droite de mélange traduisant un appauvrissement en ces ions.

III.5. QUALITE CHIMIQUE DES EAUX

III.5.1. Teneurs en Fer

Le fer total est en solution dans les eaux privées d'oxygène où il existe sous forme de complexes organiques ou minéraux. Au contact de l'air, il s'oxyde et se précipite, devenant alors insoluble dans l'eau.

La présence de fer dans l'eau souterraine est le résultat de différents phénomènes comme :

-Le lessivage des terrains avec dissolution des roches et des minéraux contenus dans le sous-sol

-Rejets industriels (pollutions minières, métallurgiques, sidérurgiques, ...)

-La corrosion des canalisations métalliques, existence de dépôts antérieurs ou conduites défectueuses.

Dans le secteur étudié, le fer est absent dans certains échantillons mais il existe à l'état de trace dans le Fleuve Mandrare. Sa présence n'a aucun inconvénient au point de vue physiologique. Il est un élément indispensable au fonctionnement du corps humain surtout pour la synthèse d'hémoglobine du sang. Mais à forte concentration, il donne une coloration rouge à l'eau et parfois d'odeur de rouille. La présence de fer dans l'eau de consommation de l'ordre de 0,1 à 0,5 mg/l entraîne des problèmes ménagers pour les utilisateurs.

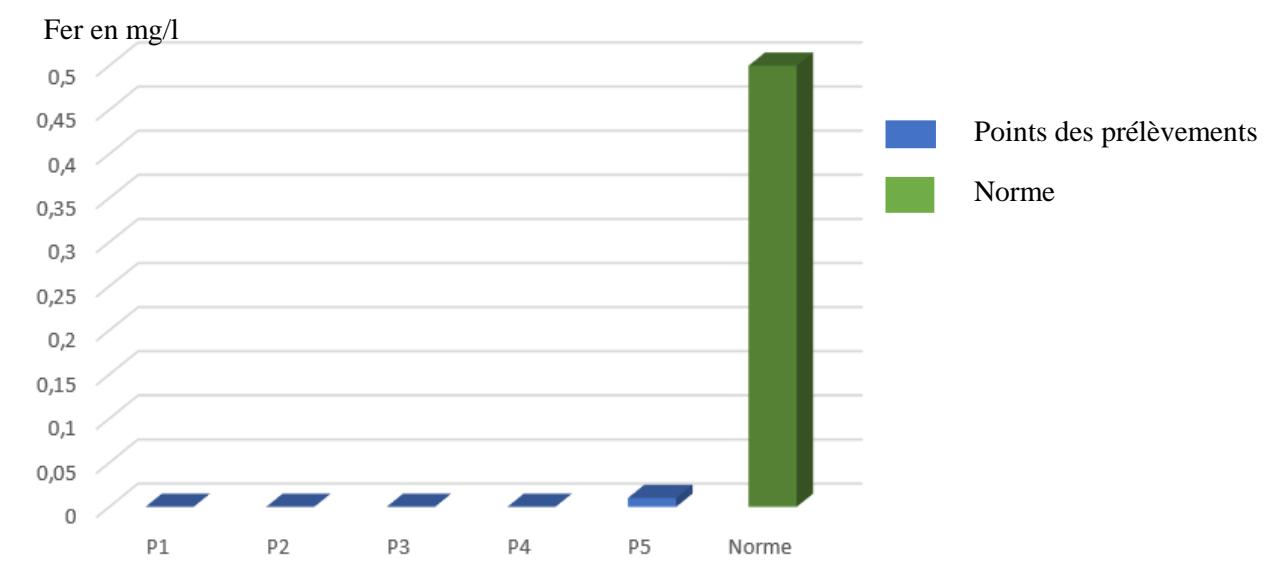


Figure 23: Profil de la teneur en Fer

(Source: Auteur)

III.5.2. Teneurs en nitrates

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrains chimiques.

Les analyses montrent que les eaux souterraines dans la zone d'étude renferment des teneurs très faibles. Les teneurs varient entre 0,3mg/l et 1,8mg/l. Pour la santé. La concentration des eaux ayant des teneurs élevées en nitrate provoque l'irritation des muqueuses. L'ingestion de quantité plus élevée entraîne des nausées, des vomissements et des selles sanguinolentes.

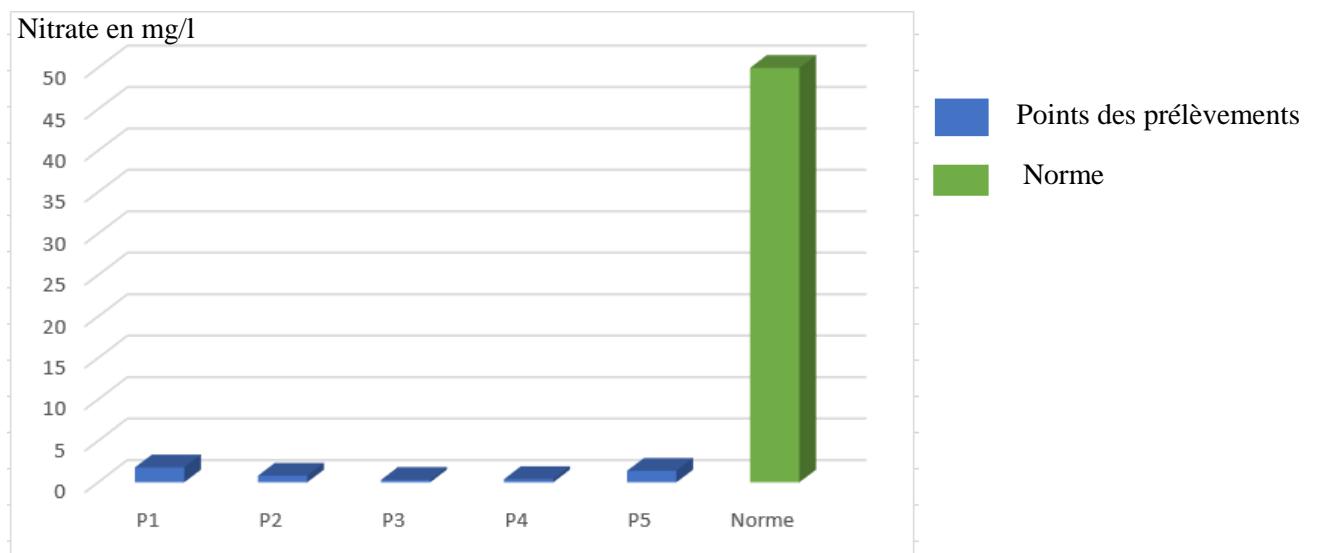


Figure 24 : Profil de la teneur en nitrate.

(Source: Auteur)

III.5.3. Teneurs en nitrites

Les nitrites ou azote nitreux représentent la forme la moins oxygénée et la moins stable de l'azote, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme毒. Elle est due à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium.

Les teneurs en nitrites varient entre 0,06 mg/l et 0,21 mg/l. Les fortes teneurs sont enregistrées au niveau des forages F6(P1) et F7(P2) avec des teneurs de 0,21 mg/l et 0,12 mg/l. Ces fortes concentrations peuvent être attribuées à l'augmentation de matières en organiques car les deux sources en eau potables dans la ville sont reposées dans les quatre dernières années à cause de salinité. Les faibles teneurs sont enregistrées au niveau de points de prélèvements P3, P4 et P5.

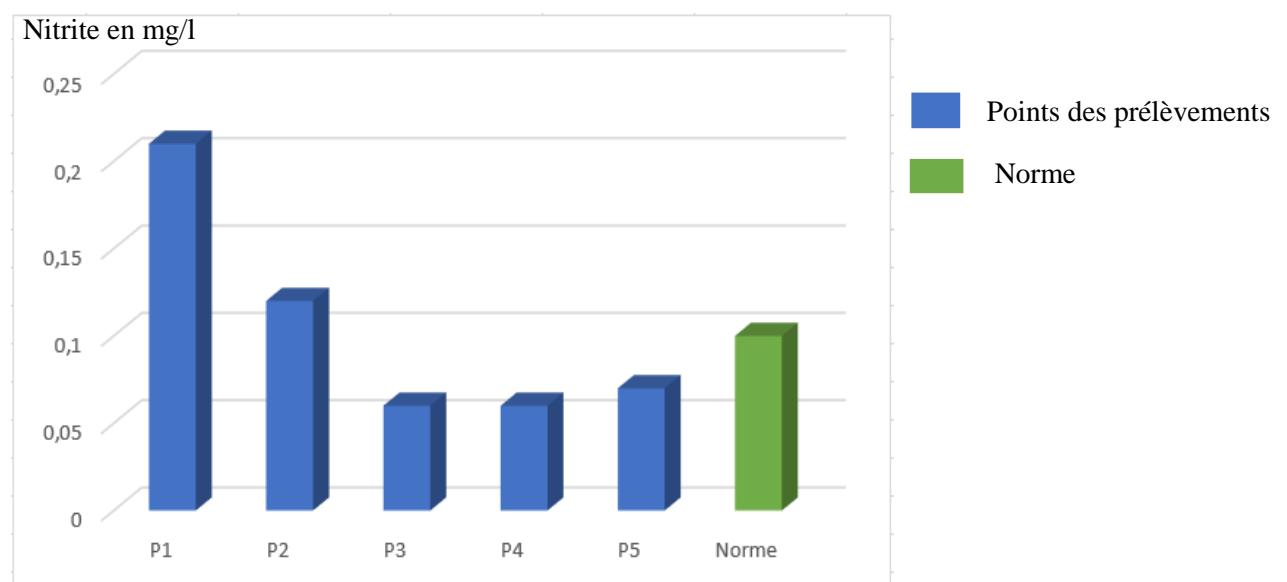


Figure 25: Profil de la teneur en nitrite.

(Source: Auteur)

III.5.4. Teneurs en ammonium

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence dans l'eau est liée soit aux rejets urbains soit aux rejets industriels. Cet élément se transforme en ammonium toxique. L'ammonium dans certaines réactions, en présence d'hypochlorite donne la monochloramine qui est cancérogène. Les concentrations observées dans la zone d'étude sont inférieures à la norme de potabilité Malagasy et varient entre 0,01mg/l à 0,06 mg/l.

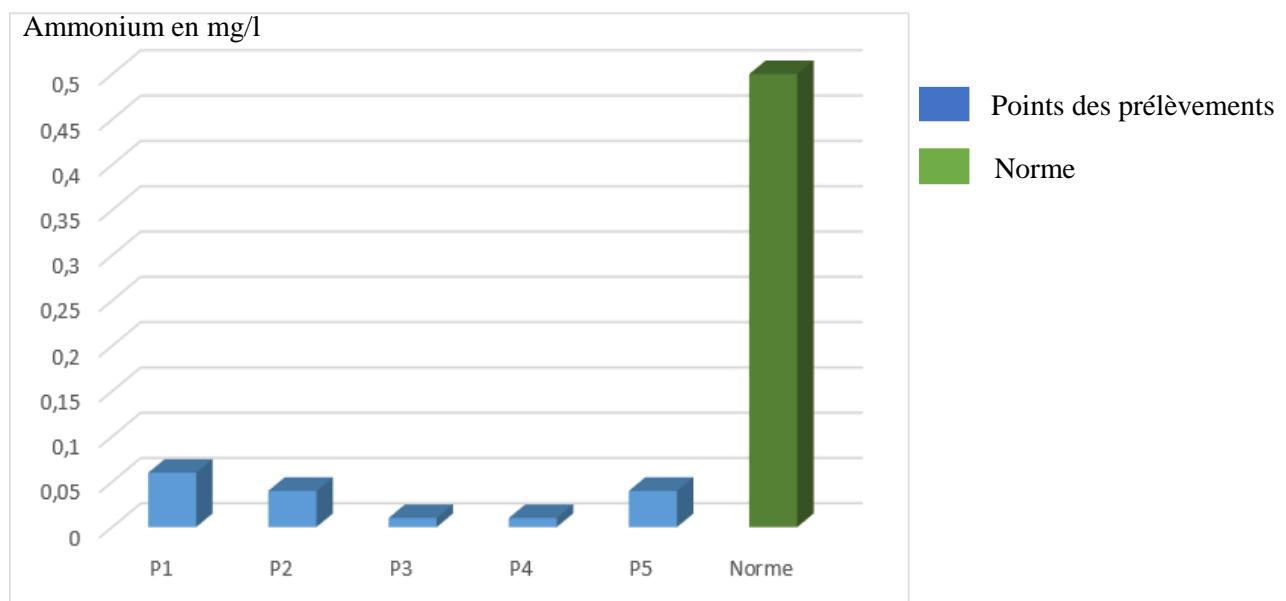


Figure 26: Profil de la teneur en ammonium

(Source: Auteur)

III.6. QUALITES BACTERIOLOGIQUES DES EAUX

Après la phase de culture bactérienne la lecture des résultats doit être faite à un temps précis c'est-à-dire environ 18 à 24 h après l'incubation.

La présence des colonies rouges violacées témoigne de l'existence des bactéries streptocoques fécaux. Tandis que les colonies jaune ou jaune orangé montrent la présence de coliformes fécaux et les bactéries Coliformes totaux. En fin les colonies noires témoignent de la présence des bactéries anaérobies sulfito-réducteurs.

Tableau 12 : Résultats des analyses bactériologiques.

Paramètres	P1	P2	P3	P4	P5
Coliformes totaux	3	2	$1.6 \ 10^3$	$1.4 \ 10^3$	$1.5 \ 10^3$
Coliformes fécaux	9	7	$6 \ 10^2$	$5 \ 10^2$	$6 \ 10^2$
Streptocoques fécaux	<1	<1	$1.6 \ 10^4$	$1.2 \ 10^4$	$1.6 \ 10^4$
ASR	<1	<1	indénombrable	indénombrable	indénombrable

(Source: Auteur)

D'après le tableau des résultats bactériologiques, ces eaux ne sont pas potables et non conformes à la norme de potabilité pour l'eau de boisson. En général, nos échantillons contiennent des bactéries coliformes. D'après plusieurs recherches, l'origine de la mauvaise qualité de l'eau souterraine est due soit à l'effet anthropique due à la pollution domestique, soit à l'intensification agricole et plantation de sisal dans la zone de recharge.

Pour améliorer la qualité de l'eau, on doit créer une zone de protection et le reboisement de la zone de recharge. La pratique de l'information éducation et communication est aussi nécessaire pour sensibiliser la population à la protection de l'environnement et surtout la préservation de la ressource en eau.

III .7. ETUDE COMPARATIVE DES EAUX SOUTERRAINES D'AMBOASARY-SUD ET MAHAJANGA

Cette étude se propose de mettre en comparaison les faciès hydrochimiques par l'utilisation des diagrammes hydrochimiques.

Pour Mahajanga, la grande ville de la côte ouest, presque entourée par la mer, entre la baie de Bombetoka au sud, le canal de Mozambique à l'ouest et la Baie de Narinda au nord, les seules ressources importantes en eaux douces disponibles sont les eaux souterraines contenues dans un aquifère calcaire.

❖ Selon le diagramme de Piper

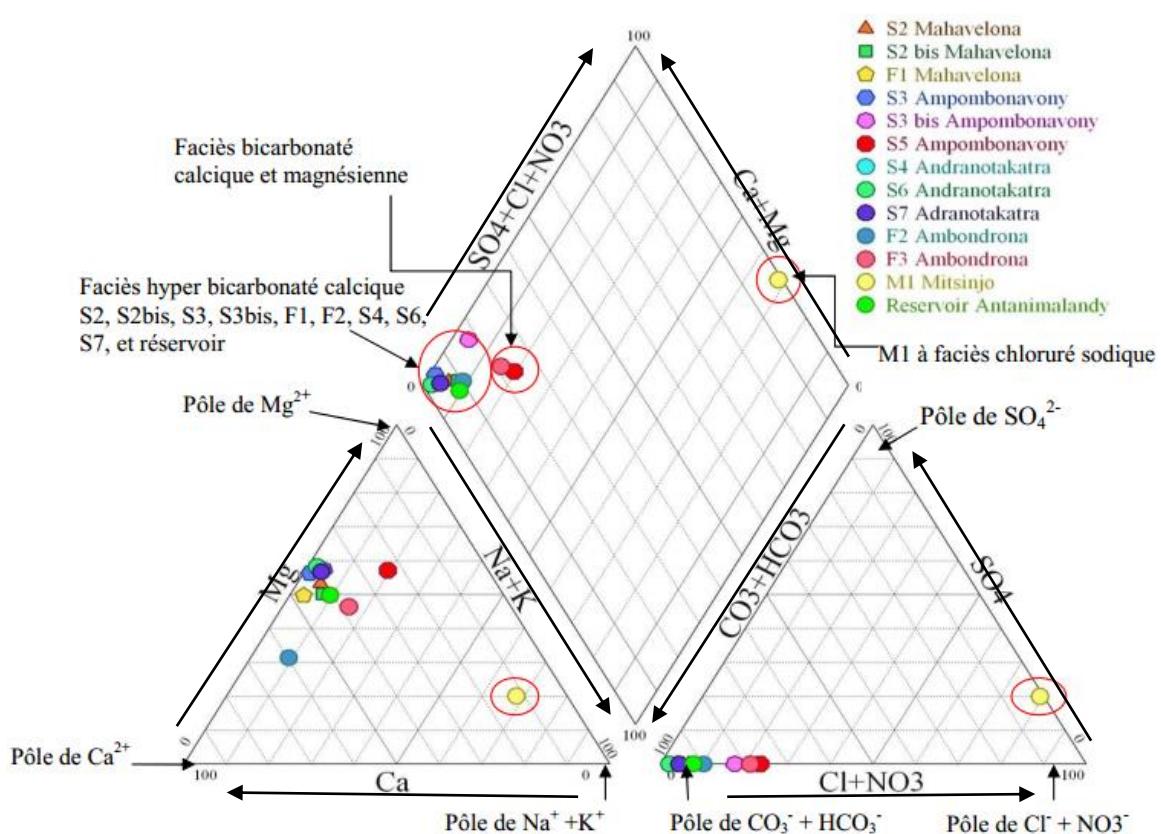
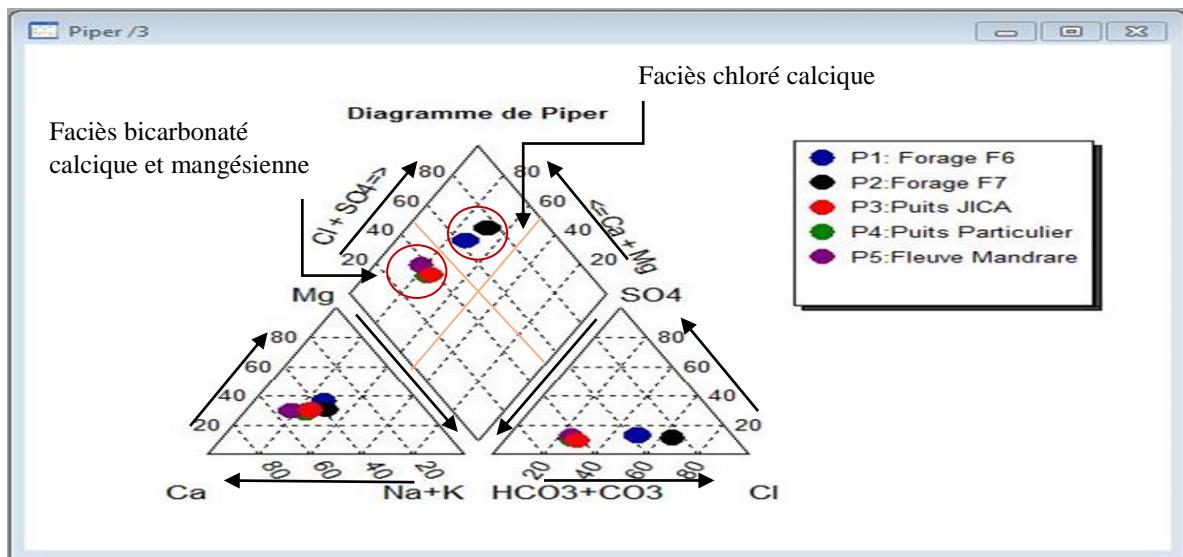


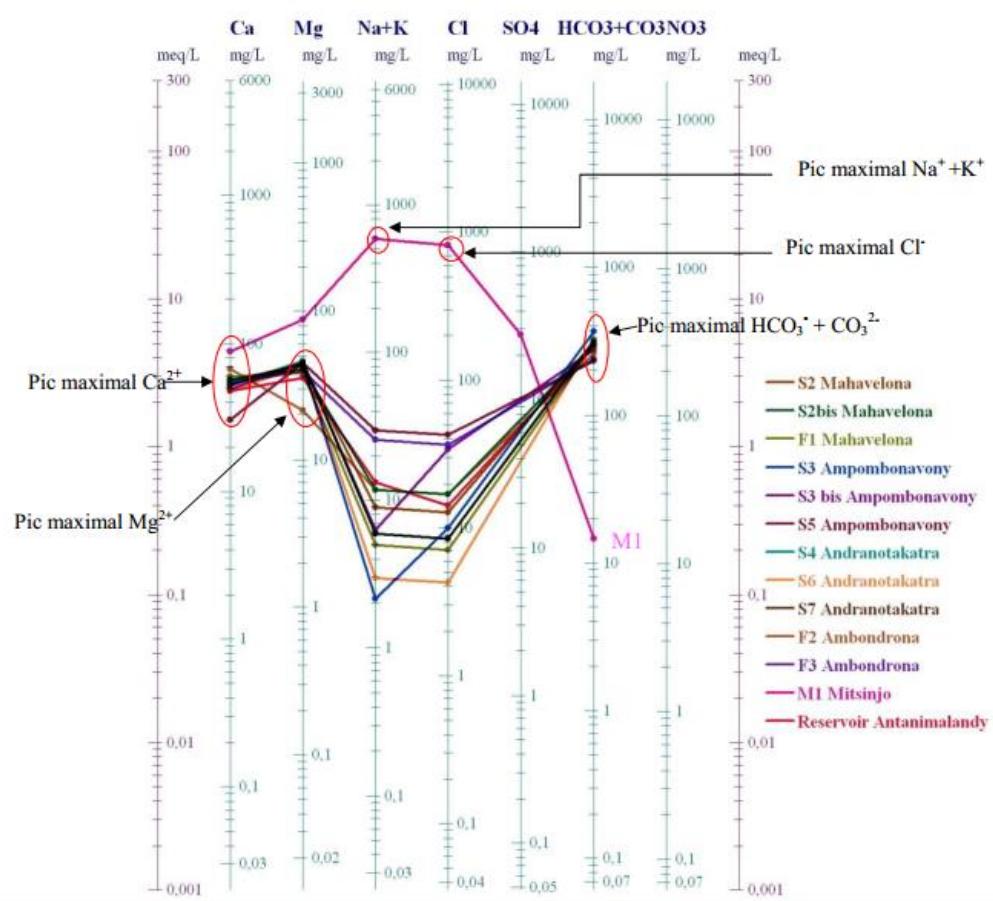
Figure 27 : Diagramme de Piper tous les échantillons d'eau des forages à Mahajanga

(Source : Razainombana)



**Figure 28 : Diagramme de Piper tous les échantillons d'eau souterraine à Amboasary-Sud
(Source: Auteur)**

❖ Selon le diagramme de Schoeller



**Figure 29 : Diagramme de Schoeller tous les échantillons d'eau des forages à Mahajanga
(Source : Razainombana)**

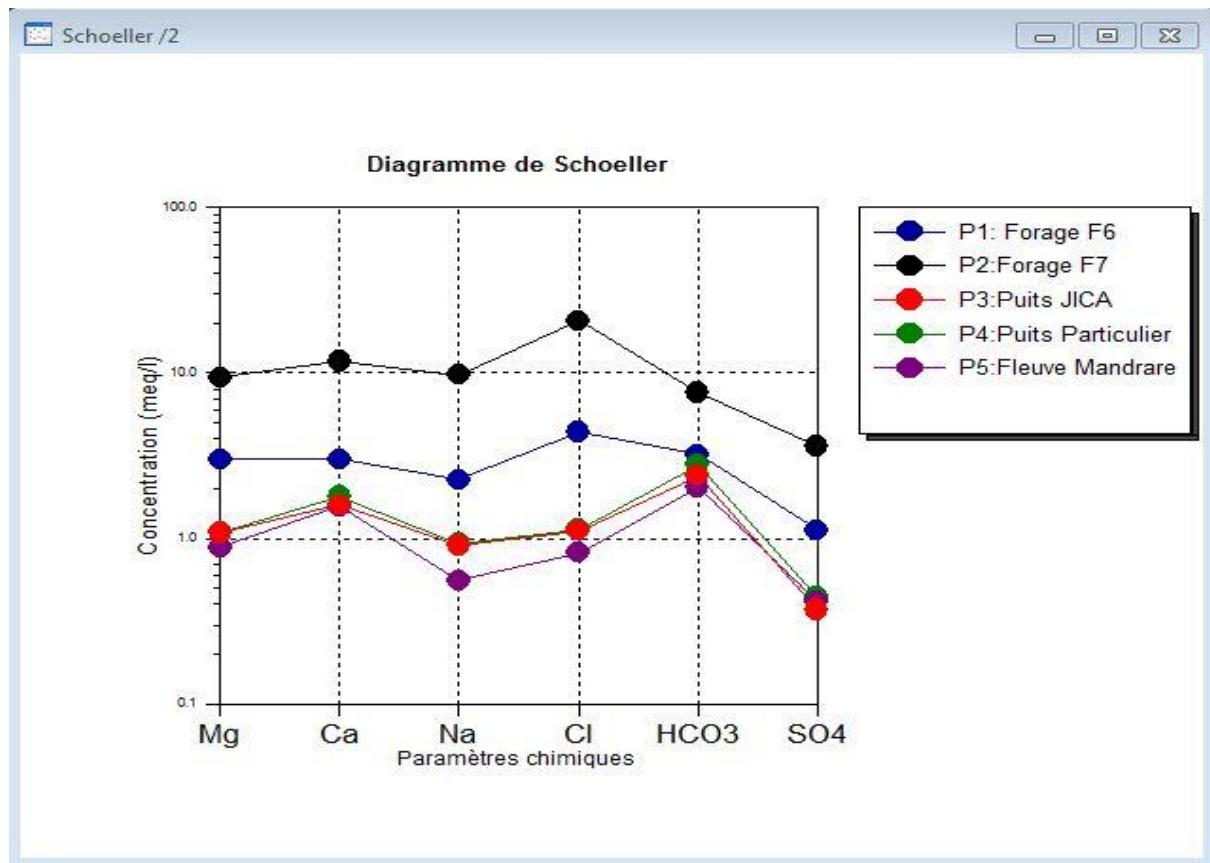


Figure 30 : Diagramme de Schoeller tous les échantillons d'eau souterraine à Amboasary-Sud

(Source: Auteur)

Les faciès type d'eau qu'on trouve à Amboasary-Sud sont faciès bicarbonaté calcique et magnésienne et faciès chloré calcique et sodique tandis qu'à Mahajanga sont faciès hyper bicarbonaté calcique et magnésienne et faciès chloré sodique. On a une faible minéralisation pour les faciès bicarbonatées et une forte minéralisation pour les faciès chlorés.



CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES

Les communes urbaines Amboasary-Sud et Ambovobe Androy connaissent d'importants problèmes de ressource en eau. Cette situation se traduit pour de nombreux habitants de la zone d'étude par la consommation d'eau de très mauvaise qualité tant sur le plan physico-chimique, que sur le plan bactériologique. Par conséquent, ces milieux sont soumis à l'ensemble des maladies liées à l'insalubrité et au manque d'hygiène (maladies d'origine hydrique). Les analyses physico-chimiques et microbiologiques sont effectués dans le laboratoire d'analyse de la JIRAMA à Mandroseza.

D'une part, l'étude hydrochimique a permis d'assurer une meilleure gestion des ressources en eaux surtout en termes de qualité dans le temps et dans l'espace. Elle a permis d'apporter une contribution à la connaissance du fonctionnement hydro-chimique de l'aquifère et de nouvelles interprétations sur les données hydro-chimiques dans le bassin Mandrare de la nappe alluvionnaire. L'utilisation de l'AquaChem pour étudier la chimie des eaux de la zone Mandrare contribue à la modélisation des données hydrochimiques et à la classification de ses eaux. Ce logiciel a permis de représenter chaque échantillon d'eau sur les diagrammes de Piper, de Schoëller et de Durov afin de tirer des conclusions sur la qualité physico-chimique des eaux.

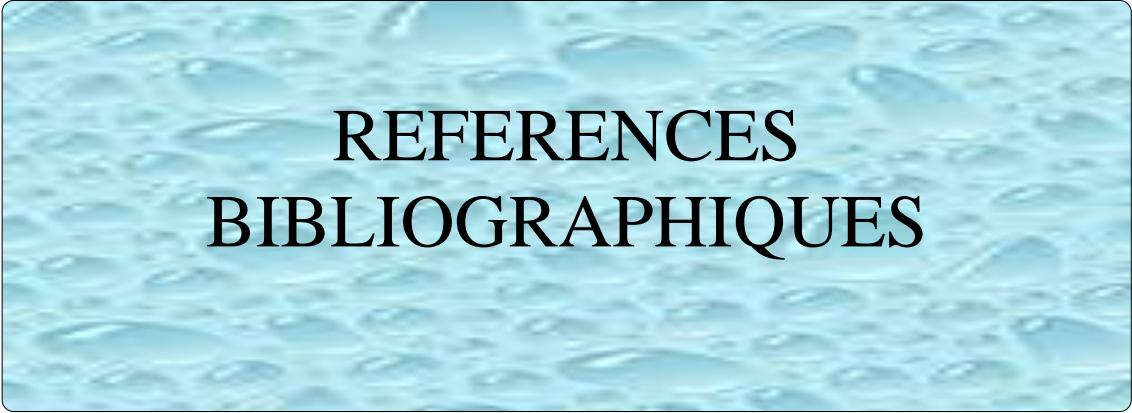
A partir des diagrammes, on a constaté aussi que les cinq échantillons d'eau issus de différents types de points d'eau (puits et forages) n'appartiennent pas au même faciès chimique d'eaux. Les eaux de puits sont de faible minéralisation, ils ont des faciès bicarbonatés calciques, magnésiens au niveau des alluvions sableuses et les eaux de forages ont des faciès chlorés calciques et sodiques dans un système aquifère semi-profond formé de grès-calcaires. Plusieurs processus sont susceptibles de contrôler l'hydrochimie de cet aquifère. Il s'agit notamment de l'échange de cations, de dissolution et de précipitation. L'eau de forages F6 et F7 est très dure. Sa localisation, l'excès en chlore et la profondeur du forage nous permettent de penser que la salinité de l'eau de ce forage pourrait être due soit à une recharge latérale de l'eau de mer, soit à une recharge ascendante d'une nappe profonde à forte minéralisation ou à une recharge descendante d'eau salée par l'embrun marin. Cette eau est agressive et non potable à la consommation humaine, elle pourra être utilisée à d'autres fins ou bien elle devra subir un traitement approprié pour retrouver sa potabilité.

D'autre part, l'étude microbiologique de tous les points d'eau analysés a montré que les eaux souterraines de cette zone étude sont bactériologiquement potable bien que certains sites soient restés vulnérables à une éventuelle contamination par les matières fécales.

Une étude beaucoup plus approfondie effectuée dans l'ensemble de haut bassin Mandrare donnera des confirmations précises sur la salinité des eaux. Les résultats isotopiques seraient un atout majeur dans cette étude. En effet, les isotopes tels que le Deutérium, Tritium et l'oxygène ^{18}O utilisés comme des traceurs naturels en hydrogéologie nous aideraient à mieux comprendre l'origine de la salinité des eaux.

Afin d'aboutir à une meilleure connaissance du système aquifère de la zone étudiée, on propose les recommandations suivantes :

- Contrôle de l'exploitation des forages à proximité de la zone littorale, pour lutter contre le biseau salé ; l'exploitation de la nappe intensive fait baisser le niveau piézométrique ce qui menace l'équilibre de cette dernière, c'est pour cette raison il est impératif de limiter le volume d'eau à prélever par l'interdiction de réalisation de nouveau forage par exemple.
- Arrêter l'exploitation dans les secteurs vulnérables à l'intrusion.
- Améliorer les infrastructures et systèmes des ouvrages alimentation en eau potable dans ce district
- Faire l'entretien et créer un nouveau captage direct dans le fleuve Mandrare comme le puits drain de la JICA
- Mettre en place un système de traitement adapté



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **CECILE POTOT, (2011).** Etude hydrochimique du système aquifère de la basse vallée du var, apport des éléments traces et des isotopes. Thèse, Université de Nice Sophia Antipolis - UFR sciences école doctorale sciences fondamentales et appliquées.
- [2] **MINISTERE DE L'EAU PROJET PAEAR, (2010).** Evaluation et cahier de charges environnementales du projet AEP des deux Communes d'Ambovombe Androy et d'Amboasary Sud, (Version finale Antananarivo – Mai 2010).
- [3] **ANDRIANARISOA, (2005).** Etude de gestion intégrée des ressources en eau des hauts bassins du Mandrare. Mémoire de maîtrise, MSTGA, Université d'Antananarivo.
- [4] **JACQUES BEAUCHAMP, (2003).** Qualité et pollution des eaux souterraines. Université de Picardie Jules Verne
- [5] **MONIER Thierry, (1983).** Simulation des écoulements souterrains dans un aquifère alluvial : Contribution à l'étude de la nappe de l'Isère dans la Combe de Savoie (France), Thèse de Doctorat -université scientifique et médicale de Grenoble France.
- [6] **CHEKROUD HASSINA, (2007).** Etude de la pollution des eaux de la plaine de TELEZZA due aux activités agricoles et commerciales. Faculté des sciences et sciences de l'ingénieratdépartement des sciences fondamentales spécialité : chimie, option : pollution chimique et environnement (Université Skikda Algérie).
- [7] **SALAH NOFAL, (2014).** Etude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale d'AVIGNON, impact de l'usage du sol sur les mécanismes de recharge, UNIVERSITE D'AVIGNON et des pays de Vaucluse pour obtenir le Diplôme de Doctorat Spécialité : Hydrogéologie, Ecole Doctorale 536 « Agro-sciences et Sciences ».
- [8] **MARC HENRI DERRON, (2000).** Géochimie des eaux de sources et interaction eau-roche dans les alpes résume du cours donné dans le cadre du module "altération et minéralogie industrielle", Universités de LAUSANNE ET GENEVE.
- [9] **NORDINE NOUAYTI et al, (2015).** Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du jurassique du haut bassin de ZIZ (Haut Atlas Central, Maroc).
- [10] **TAHA-HOCINE DEBIECHE, (2002).** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse doctorat, Université de Franche-Comté.
- [11] **EMMAMUEL JESTIN.** La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires.

- [12] **MEMENTO TECHNIQUE DE L'EAU**. Edition (1972)
- [13] **OMBELINE GHESQUIERE, (2015)**. Caractérisation de la géochimie des eaux souterraines et des facteurs la contrôlant dans les régions de Charlevoix et de la haute-côte-nord. Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de la terre.
- [14] **KHEDIDJA ABDELHAMID, (2016)**, Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de TADJNANT –CHELGHOUUM LAID et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines. Thèse doctorat, Université BATNA, faculté de technologie département d'hydraulique.
- [15] **DORICE KUITCHA et al, (2013)**. Hydrochimie et l'isotope de l'environnement à la connaissance des ressources en eaux souterraines de YAOUNDE.
- [16] **RAKOTONDRAINIBE, (1985)**. Les 8 zones hydrogéologiques et les principales nappes aquifères de Madagascar (mise à jour en 2005).
- [17] **DJENBA et al, (2015)**. Approche hydrochimique de l'aquifère superficiel de AIN DJACER.EST ALGERIEN.Larhyss journal, ISSN 1112-3680, n°24, décembre 2015, pp. 281-299© 2015 all rights reserved, Legal Deposit 1266-2002.
- [18] **BOUCHEK FAIZA et IKHLEF AMINA, (2015)**. Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale du bas ISSER (BOUMERDES). Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un diplôme de master spécialité : hydraulique agricole Université de DJILALI BOUNAAMA DE KHEMIS MILIANA.
- [19] **SADEK AWAD, (2011)**. Hydrochimie et faciès géochimiques des eaux souterraines: Plaine de Bekaa.
- [20] **RAZAINOMBANA Harinjara, (2012)**, Etude hydrogéochimique de la nappe d'un aquifère karstique, cas des stations de pompage de la JIRAMA à Mahajanga et Mitsinjo » Mémoire de DEA, Département des sciences de la terre, option Hydrogéologie, Université d'Antananarivo.
- [21] **MONOGRAPHIE DE LA REGION ANOSY, (2014)**, Centre de Recherches, d'Études et d'appui à l'Analyse Economique à Madagascar, Source INSTAT.
- [22] **RAKOTONDRABE, (2010)**. Apport de l'hydrochimie dans l'étude de vulnérabilité des ressources en eau de la plaine d'Antananarivo. Mémoire de Maîtrise, MSTGA, Université d'Antananarivo.
- [23] **TUTORIAL DE AQUACHEM 3.70, (2006)**, CO-DEVELOPED BY LUKAS CALMBACH AND WATERLOO HYDROGEOLOGIC, INC. COPYRIGHT 1998-1999, WATERLOO HYDROGEOLOGIC, INC.

- [24] RANDRIANILAINA, (2009), Modélisation des données hydro-chimiques de la Région Menabe avec AQUACHEM, Mémoire de DEA, ESPA, Université d'Antananarivo
- [25] IHANTAMALALA hanitriniaina, (2010), Modélisation hydrochimique du haut bassin versant de la Menarandra, Région Androy, Sud de Madagascar. Mémoire de maîtrise, MSTGA, Université d'Antananarivo.
- [26] BOUDERBALA et al, (2014). Hydrogeological characterization of the Nador Plio-Quaternary aquifer, Tipaza (Algeria).
- [27] HAOUA AMADOU et al, (2014). Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la région de TAHOUA(NIGER), Journal of Applied Biosciences 80 :7161 – 7172.
- [28] EBLIN SAMPAH GEORGES et al, (2014). Hydrochimie des eaux de surface de la région D'ADIAKE, COTE D'IVOIRE, journal of applied biosciences 75 :6259– 6271, ISSN 1997–5902.
- [29] MAZOR, (2004). Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. 3ème édition.
- [30] HAOUA AMADOU et al, (2014). Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la région de TAHOUA(NIGER), Journal of Applied Biosciences 80 :7161 – 7172.
- [31] ZINE et al, (2001). Origine de la salinité de la nappe alluviale de GUELTA ZERGUA
- [32] LAHCEN ZOUHRI et al, (2010). Salinité des ressources en eau : intrusion marine et interaction eaux–roches (Marococcidental), hydrologiques sciences journal.
- [33] GOUAIDIA et al, (2013). Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : Cas de la plaine de MESKIANA, NORD-EST ALGERIEN.

REFERENCES WEBOGRAPHIES

- <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclefrench.html>
- www.Jacques.beauchampu-picardie.fr
- www.Sagascience@cnrs-dir.fr
- <http://www-sst.unil.ch/cam/>
- <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v8i1.6>
- http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/fiches/FichesPACES_charlevoix.pdf



ANNEXES

ANNEXE

Annexe I : Mode opératoire des paramètres physico-chimiques

I-Paramètres physiques

Potentiel hydrogène (pH)

- Rincer plusieurs fois la cellule à l'eau distillée.
- Plonger cette cellule dans le bêcher contenant l'eau à analyser.
- Lire la valeur affichée.

Turbidité

- Rincer la cuve turbidimétrique à l'eau à analyser
- Puis la remplir avec précaution pour éviter la formation de la bulle d'air
- Essuyer la cuve pour effacer toutes traces de doigt
- Effectuer la mesure

Conductivité électrique (CE)

- Rincer avec l'eau distillée le récipient en verre avant à utiliser
- Rincer plusieurs fois la cellule de conductivité, d'abord à l'eau distillée.
- Puis plonger la cellule dans le récipient contenant l'eau à examiner.
- Lire la valeur affichée.

Minéralisation ou Total Dissolved Solids (TDS)

On mesure la minéralisation de l'eau à l'aide d'un appareil appelé conductimètre. Elle s'exprime en milligramme par litre.

Température

La mesure de la température est incorporée dans le Conductimètre. Elle s'exprime en degré Celsius.

II-Paramètres chimique

Dureté Total ou Titre Hydrotimétrique (TH) et Titre Hydrotimétrique calcique (TH_{Ca})

➤ Dureté Total ou Titre Hydrotimétrique (TH)

- Mettre dans le bêcher 100ml d'échantillon d'eau.
- Verser quelques gouttes d'indicateur coloré (NET : Noir Eriochrome T).
- Ajouter environ 2ml de la solution tampon

-Ajuster le réactif (EDTA : Ethylène Diamino Tétra Acétique) jusqu'à la graduation 0 de la burette

-Sous l'action de l'agitateur magnétique, titrer goutte à goutte jusqu'à la zone de virage.

Expression du résultat

$$TH = V_R \text{ en } ^\circ\text{f}$$

Avec V_R : volume du réactif EDTA versé

➤ Titre Hydrotimétrique calcique (TH_{Ca})

- Mettre dans le bécher 100ml d'échantillon d'eau.
- Ajouter quelques gouttes d'indicateur de patton.
- Verser 2ml de NaOH 3N
- Ajuster le réactif(EDTA) jusqu' à la graduation 0 de la burette
- Sous l'action de l'agitateur magnétique, titrer goutte à goutte jusqu' au virage au bleu.

Expression du résultat

$$TH_{Ca} = V_R \text{ en } ^\circ\text{f}$$

Avec V_R : volume du réactif EDTA versé en ml

Calcul de la concentration Ca^{2+}

Sachant que $1^\circ\text{f} = 4\text{mg/l}$ de Ca^{2+}

$$Ca^{2+} = 4V_R \text{ en mg/l}$$

➤ Détermination titre hydrotimétrique magnésien TH_{Mg}

La différence entre la dureté totale et la dureté calcique donne le TH magnésien.

On sait que $TH = TH_{Ca} + TH_{Mg}$

$$TH_{Mg} = TH - TH_{Ca} \text{ (} ^\circ\text{f) }$$

Sachant que $1^\circ\text{f} = 2,43 \text{ mg/l}$ de Mg^{2+}

$$Mg^{2+} = TH_{Mg} \cdot 2,43 \text{ en mg/l}$$

➤ Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC)

-Prélever 100ml d'eau à analyser dans un bécher

-Ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphthaleine à 1%

-Titrer avec $H_2SO_4 N/50$ en agitant constamment jusqu'à la décoloration.

-Noter V_1 le volume de H_2SO_4 versé

-Ajouter 2 à 3 gouttes d'hélianthine à 1%

-Continuer le titrage avec le H_2SO_4

soit V_2 le volume total versé jusqu'au virage du jaune ou jaune orangé.

Expression des résultats : $1^\circ f$ en TAC = 12,2mg/l en HCO_3^-

$$TA = V_1 \text{ en } ^\circ f$$

$$TAC = V_2 \text{ en } ^\circ f$$

Détermination des chlorures Cl^-

-Prélever 100ml d'eau à analyser.

-Ajouter 3 à 5 gouttes de bichromate de potassium.

-Titrer l'échantillon d'eau avec le nitrate d'argent jusqu'au virage du jaune au rouge brique.

Expression de résultat

$$Cl^- = V \times 35,5 \text{ en mg/l}$$

Avec V est le volume du nitrate d'argent versé

Détermination des matières organiques MO

-Prélever 100ml d'eau à analyser

-Ajouter 5ml de N_aHCO_3 saturée

-Porter à ébullition

-Ajouter 10ml de KM_nO_4 N/80 et porter à ébullition pendant 10mn

-Refroidir et ajouter encore 5ml de l'acide sulfurique avec 10 de sel de Mohr $Fe(NH_4)_2(SO_4)$

-Ajouter 10ml de KM_nO_4 jusqu'à l'apparition de la couleur rose persistante

-Soit V_1 le volume de KM_nO_4 versé

-Recommencer les mêmes opérations avec l'eau distillée .soit V_2 le volume de KM_nO_4 versé

Expression des résultats

La quantité de matières organiques est obtenue en faisant la différence entre V_1 et V_2

$$MO = (V_1 - V_2) \text{ mg/l}$$

 Dosage du Fer total.

- Mettre dans le bécher 100ml d'eau échantillon d'eau à analyser
- Ajouter une pincée de Dithionite(poudre). Agiter jusqu'à dissolution du réactif
- Ajouter 2ml de diméthylglyoxime et 2ml d'ammoniaque à 10% NH₃
- comparer la couleur de cette solution avec celle des plaquettes étalons. Lire la teneur en fer correspondante en mg/L.

 Dosage du sulfate (SO₄²⁻)

- Mettre 20ml d'échantillon d'eau dans le bécher
- Ajouter 0,5ml HCl 1/10N et 2,5ml de BaCl₂
- Agiter fortement et laisser reposer 15mn
- Agiter de nouveau et faire les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde 650nm

 Dosage de l'azote ammoniacal (NH₄⁺).

- Mettre 25 ml de l'échantillon d'eau dans le bécher
- Ajouter 1ml de phénol et 1ml nitroprussiate, puis 2,5 de la solution oxydante à base d'hypochlorite de sodium et citrate de sodium
- Agiter énergiquement et laisser reposer 1heure
- Faire les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde 650nm

 Dosage des nitrites (NO₂⁻)

- Mettre dans le bécher 50ml d'échantillon d'eau
- Ajouter 2ml de Zambelli et 2ml d'ammoniaque 28%
- Laisser reposer 15mn
- Faire les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde 540nm

 Dosage des nitrates (NO₃⁻)

- Mettre 10ml d'échantillon d'eau dans le bécher
- Ajouter une goutte de NaOH et 1ml de salicylate de sodium
- Mettre dans l'étuve à 90° jusqu'à évaporation complète de l'eau
- Récupérer les résidus secs et laisser refroidir
- Ajouter respectivement 2ml de H₂SO₄ et 15 ml salicylate et 15ml eau distillée
- Faire les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde 540nm

 Détermination du sodium (Na⁺)

Le sodium est déterminé par calcul sur ordinateur. Le principe de ce calcul est basé sur la méthode d'équilibre ionique.

Annexe II : Norme de potabilisation selon le décret n°2004-635 du 15/06/04 république de Madagascar

PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES	NORME
ODEUR	ABSENCE
COULEUR	INCOLORE
SAVEUR DESAGREABLE	ABSENCE

PARAMETRES PHYSIQUES	UNITE	NORME
TEMPERATURE	°C	<25
TURBIDITE	NTU	<5
CONDUCTIVITE	µS/cm	<3000
pH	6,5 - 9,0	

NORME	PARAMETRES CHIMIQUES	UNITE
MINIMA	MAXIMA	
ADMISSIBLE		

ELEMENTS NORMAUX

CALCIUM	mg/l	200
MAGNESIUM	mg/l	50
CHLORURE	mg/l	250
SULFATE	mg/l	250
OXYGENE DISSOUS % de saturation	%	75
DURETE TH	mg/l en CaCO ₃	500

ELEMENTS INDESIRABLES

MATIERES ORGANIQUES	mg/l	2 (milieu Alcalin)
5 (milieu Acide)		
AMMONIUM	mg/l	0,5
NITRITE	mg/l	0,1
AZOTE TOTAL	mg/l	2
MANGANESE	mg/l	0,05
FER TOTAL	mg/l	0,5

PHOSPHORE	mg/l	5
ZINC	mg/l	5
ARGENT	mg/l	0,01
CUIVRE	mg/l	1
ALUMINIUM	mg/l	0,2
NITRATE	mg/l	50
FLUORE	mg/l	1,5
BARYUM	mg/l	1

ELEMENTS TOXIQUES

ARSENIC	mg/l	0,05
CHROME TOTAL	mg/l	0,05
CYANURE	mg/l	0,05
PLOMB	mg/l	0,05
NICKEL	mg/l	0,05
POLYCHLORO-BIPHENYL PCB	mg/l	0
CADMIUM	mg/l	0,005
MERCURE	mg/l	0,001

ELEMENTS BACTERIOLOGIQUES

PARAMETRES	NORMES	UNITES
<i>Coliformes totaux à 37°C/100mL</i>	500	UFC/mL
<i>Streptocoques fécaux /100mL</i>	100	UFC/mL
<i>Coliformes fécaux/100mL</i>	100	UFC/mL

Source : décret n°2004-635 du 15/06/04, République de Madagascar

Titre : « Contribution à l'étude hydrochimique et aux qualités physico-chimiques et microbiologiques des eaux souterraines dans le bassin de Mandrare (Commune Urbaine d'Amboasary-Sud) »

Nom : RANDRIAMITSIRY

Prénoms : Tojonarindra Rémi

E-mail : tojonarems03@gmail.com

Tél : 034 76 503 85

Nombre des pages : 67

Nombre des figures : 30

Nombre des graphes : 12

Nombre des tableaux : 12



RESUME

L'eau est le principal constituant des êtres vivants, qui doivent en consommer tous les jours. Sa qualité est délicate et doit répondre primordialement à une exigence de santé. L'étude des paramètres physico-chimiques, bactériologiques de l'eau permet de déterminer sa nature et sa qualité. L'étude microbiologique des eaux souterraines du bassin de Mandrare a confirmé une pureté bactériologique car elles ne contiennent pas des bactéries d'origine fécale. L'approche hydrochimique a été réalisée à l'aide du logiciel AquaChem, est basée sur la modélisation graphique et l'interprétation des données physico-chimiques d'échantillons d'eaux recueillis au niveau de différentes points d'eau dans la nappe souterraine du bassin de Mandrare et a permis de déterminer : l'origine, le type, le faciès et le degré de minéralisation de ces eaux. Les cations majeurs : les teneurs en calcium oscillant entre 31,2mg/l et 236mg/l, les teneurs en magnésium obtenues varient de 10,69mg/l et 114,21mg/l et pour le sodium entre 12,8 mg/l et 223,62 mg/l. Les anions majeurs : les bicarbonates affichent des teneurs comprises entre 124,44 mg/l et 463,6mg/l, les taux de chlorures enregistrés varient de 29,11 mg/l et 731,3 mg/l et les teneurs en sulfates entre 17,76mg/l et 173,25mg/l. Les résultats de traitement ont montré comme principaux faciès ou classes des eaux : bicarbonatées calciques, magnésiennes et chlorées calciques, sodiques. L'étude comparative des eaux souterraines d'Amboasary-Sud et de Mahajanga a été réalisée par le diagramme de Piper et Schoeller, et les résultats obtenus s'avèrent identiques.

Mots clés : *AquaChem, eau souterraine, anion, cation, faciès, hydrochimie, interaction eau-roche*

ABSTRACT

Water is the main constituent of living beings, which must consume them every day. Its quality is delicate and must respond to a health requirement. The study of the physico-chemical, bacteriological parameters of water makes it possible to determine its nature and quality. The microbiological study of the underground waters of the basin Mandrare confirmed a bacteriological purity because they don't contain bacteria of fecal origin. The hydrochemical approach has been carried out using the AquaChem software and is based on the graphical modeling and interpretation of physicochemical data from water samples collected at different water points in the groundwater of the Basin Mandrare and identified : determined the origin, type, facies and degree of mineralization of these waters. The major cations: the calcium contents oscillating between 31,2mg/l and 236mg/l, the magnesium contents obtained vary from 10,69mg/l and 114,21mg/l and for the sodium between 12,8 mg/l and 223,62 mg/l. The major anions: the bicarbonates have contents ranging between 124,44 mg/l and 463,6 mg/l, the chloride levels recorded vary from 29,11 mg/l to 731,3 mg/l and the sulphate contents between 17,76mg/l and 173,25mg/l. The results of treatment have shown as main facies or classes of waters : bicarbonate calcic, magnesian and chlorinated calcic, sodique. The comparative study of the groundwaters of South Amboasary and Mahajanga was carried out by the diagram Piper and Schoeller, and the results obtained prove to be identical.

Key words: *AquaChem, Groundwater, anion, cation, facies, hydrochimy, interaction water-rock.*

ENCADREUR : Monsieur Mahandrimanana ANDRIANAINARIVELO, Maitre de Conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo