

TABLE DES MATIERES

<i>REMERCIEMENTS</i>	ii
<i>LISTE DES FIGURES</i>	vii
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	viii
<i>LISTE DES ABBREVIATIONS</i>	ix
<i>INTRODUCTION</i>	1
I- Généralités sur l'eau	3
I.1. Origine :	3
I.2. Propriétés de l'eau :	3
I.2.1. Propriétés chimiques :	3
I.2.2. Propriétés physiques :	4
I.3. Réserve d'eau :	4
I.3.1. Eau de mer :	4
I.3.2. Eau douce :	5
I.4. Cycle de l'eau :	6
I.5. Pollution de l'eau :	7
I.5.1. Type et origine de la pollution :	7
I.5.2. Conséquence de la pollution :	7
I.5.3. Solution pour la pollution :	7
II-Géochimie des eaux	8
II.1. Définition :	8
II.2. Solutés des eaux souterraines :	8
II.3. Système géochimique des eaux souterraines :	9
II.3.1. Ions majeurs :	10
II.3.2. Importances des ions majeurs :	13
II.4. Balance ionique :	15
II.4.1. Définition :	15
II.4.2. Origine de déséquilibre ionique :	15
II.4.3. Les paramètres physiques :	16
III- Réglementation sur la qualité des eaux.....	21
III.1. Potabilité de l'eau :	21
III.2. Normes de potabilité de l'eau à Madagascar :	21
III.2.1. Paramètres organoleptiques :	21
III.2.2. Paramètres physiques :	22

III.2.3. Paramètres chimiques :.....	22
IV- Analyse de l'eau	24
IV.1. Analyse par chromatographie ionique :	24
IV.1.1. Définition de la chromatographie ionique :.....	24
IV.1.2. Principe et théorie de la chromatographie ionique :.....	24
IV.1.3. Avantage de la méthode de chromatographie ionique :.....	26
IV.2. Chromatographie ionique :.....	26
IV.2.1. Appareillage :.....	26
V- Description de la zone d'étude.....	29
V.1. Localisation géographique :.....	29
V.2. Caractéristiques géologiques :.....	29
V.3. Environnement :.....	31
V.3.1. Climat :.....	31
VI- Méthodologie.....	34
VI.1. Echantillonnage :.....	34
VI.1.1 Préparation des matériels et de la campagne d'échantillonnage :	34
VI.1.2. Points d'échantillonnage :.....	35
VI.1.3. Condition et stockage de l'échantillon :	36
VI.1.4. Précaution pour l'échantillonnage :.....	36
VI.1.5. Mesure in situ :.....	36
VI.1.6. Mesure au laboratoire :.....	37
VII- Résultats et interprétations	39
VII.1. Présentation et exploitation des résultats :.....	39
VII.1.1. Validation des résultats :.....	39
VII.1.2. Résultats des mesures des paramètres physiques et des analyses chimiques :.....	40
VII.2. Interprétation des paramètres physiques :.....	46
VII.3 Interprétation des paramètres chimiques :	48
VII.3.1. Etude de la minéralisation	48
VII.3.2. Corrélation entre ions majeurs et CE :	53
<i>CONCLUSION</i>	61
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	63
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	63
<i>ANNEXES</i>	65

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Représentation de la molécule d'eau.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 2 : Représentation schématique du cycle naturel de l'eau [1].....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 3 : Système géochimique [10]</i>	<i>9</i>
<i>Figure 4 : Interaction eau roche [10].....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5 : Faciès hydrochimie selon le diagramme de Piper [11].....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 6: Schéma du principe d'un système de chromatographie ionique.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 7: Caractéristique géologique de la zone d'étude (source : BD500 (FTM) modifié) ..</i>	<i>30</i>
<i>Figure 8 : Distribution mensuelle moyenne des températures des années 2014,2015 et 2016</i>	<i>32</i>
<i>Figure 9 : Distribution mensuelle des précipitations des années 2014, 2015et 2016</i>	<i>33</i>
<i>Figure 10 : Kits du multimètre HACH HQ 40d</i>	<i>34</i>
<i>Figure 11: Localisation géographique de la zone d'étude Source : Google earth et BD500 (FTM) modifie</i>	<i>35</i>
<i>Figure 12 : Système de chromatographie ionique DIONEX ICS 1100.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 13: Variation de la température des échantillons d'eau de puits prélevés dans la zone d'étude.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 14: Variation du pH des échantillons d'eau de puits prélevés dans zone d'étude</i>	<i>40</i>
<i>Figure 15: Variation du d'Eh des échantillons d'eau de puits prélevés dans zone d'étude</i>	<i>41</i>
<i>Figure 16: Variation de la CE des échantillons d'eau de puits prélevés dans la zone d'étude</i>	<i>41</i>
<i>Figure 17: Variation de l'OD des échantillons d'eau de puits prélevés dans la zone d'étude</i>	<i>42</i>
<i>Figure 18: Diagramme de Piper des échantillons d'eaux prélevées dans la zone d'étude (Source : Logiciel Diagramme).....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 19: Diagramme de Schoëller des échantillons d'eaux pour le puits A1</i>	<i>50</i>
<i>Figure 20: Diagramme de shoëller pour le puits A2</i>	<i>51</i>
<i>Figure 21: Diagramme de Schoëller pour le puits B.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 22: Diagramme de shoëller pour les Sources</i>	<i>52</i>
<i>Figure 23: Diagramme de shoëller pour les bornes fontaines</i>	<i>52</i>
<i>Figure 24: Corrélation entre ions majeurs et ce pour le puits A1</i>	<i>53</i>
<i>Figure 25: Corrélation entre ions majeurs et ce pour le puits A2.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 26: Corrélation entre ions majeurs et CE pour le puits B</i>	<i>55</i>
<i>Figure 27: Relation entre les ions majeurs pour les eaux du puits A1</i>	<i>57</i>
<i>Figure 28: Relation entre les ions HCO₃ et Mg pour les eaux du puits A2</i>	<i>57</i>
<i>Figure 29: Relation entre les ions Ca et Mg pour les eaux du puits A2</i>	<i>58</i>
<i>Figure 30: Relation entre les ions HCO₃, Na,K et Ca pour les eaux du puits B.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 31: Corrélation entre les ions Na, Cl et NO₃ dans les puits A1</i>	<i>60</i>
<i>Figure 32: Corrélation entre les ions Na, K et NO₃ dans les puits A2</i>	<i>60</i>
<i>Figure 33: Relation entre Niveau piézométrique et NO₃</i>	<i>60</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Volume d'eau douce sur la terre</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 2 : Classification des types d'ions selon leurs concentrations.</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 3: Type d'eau selon le SDT.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 4: Propriétés des indicateurs colorés</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 5: Relation entre conductivité et minéralisation.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 6: Normes sur les paramètres physiques de l'eau (Décret n° 2004 – 635 du 15/06/2004)</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 7 : Normes sur la teneur en éléments normaux (Décret n° 2004 – 635 du 15/06/2004)</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 8 : Normes sur la teneur en éléments anormaux (Décret n° 2004 – 635 du 15/06/2004)</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 9 : Distribution mensuelle des températures (°C) – Année 2014.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 10 : Distribution mensuelle des températures (°C) – Année 2015.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 11 : Distribution mensuelle des températures (°C) – Année 2016.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 12 : Distribution mensuelle des précipitations des années 2014,2015 et 2016.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 13 : Caractéristiques des composantes spécifiques du système DIONEX ICS-1100 pour l'analyse cationique et anionique</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 14 : Conditions expérimentales pour l'analyse cationique et anionique.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 15 : Balance ionique des échantillons prélevés dans la zone d'Anjomakely.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 16: Paramètres physiques pour les sources.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 17: Paramètres physiques pour les bornes fontaines</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 18: Teneurs des anions majeurs des eaux de puits en mg.L⁻¹</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 19: Teneurs des anions majeurs des eaux de sources en mg.L⁻¹</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 20: Teneurs des anions majeurs des bornes fontaines en mg.L⁻¹.....</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 21: Teneurs des cations majeurs des eaux de puits en mg.L⁻¹</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 22: Teneurs des cations majeurs des eaux de sources en mg.L⁻¹.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 23: Teneurs des cations majeurs des eaux de bornes fontaines en mg.L⁻¹</i>	<i>46</i>

LISTE DES ABBREVIATIONS

✓ Liste des acronymes :

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique
BI : Balance ionique
CE : Conductivité électrique
CI : Chromatographie ionique
CGL : Chromatographie gaz-liquide
CGS : Chromatographie gaz-solide
CLL : Chromatographie liquide-liquide
CLS : Chromatographie liquide-solide
CPG : Chromatographie en phase gazeuse
CPL : Chromatographie en phase liquide
DGM : Direction Générale de la Météorologie
INSTN : Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires
NUT : Nephelometric Turbidity Units
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
RN7 : Route Nationale numéro 7
TAC : Titre Alcalimétrique Complet

✓ Abréviations des unités et quelques paramètres physiques :

Bq.L⁻¹ : becquerel par litre
CE : conductivité électrique
Eh : potentiel d'oxydoréduction
mg/L : milligramme par litre
meq/L : milliéquivalent par litre
OD : oxygène dissous
pH : potentiel d'hydrogène
SDT : solides totaux dissous
T (°C) : température en degré Celsius
μS/cm : micro siemens par centimètre

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'eau est un élément indispensable pour tout être humain et ses conditions d'existence, elle est aussi l'élément primordial de l'ensemble de l'écosystème de la planète et leur milieu. Environ quatre-vingt-dix-sept pourcent (97,14%) de l'eau de la planète est formée par l'eau de mer qui reste inconsommable, alors que l'eau douce ne représente que trois pourcent (2,86%) qui est consommable, soit 40106240 km³. Soixante pourcent (59,84%) de cette eau douce est en partie indisponible car elle se trouve sous forme solide [1]. On compte actuellement environ 6,5 milliards d'êtres humains sur la planète terre et d'après une estimation, ce chiffre va atteindre 10 à 12 milliards d'ici quarante-quatre ans (en 2050) [1].

Le volume d'eau consommé à l'échelle mondiale est de 2 958 976 milliards de litre le 06 Août 2014 et de 4 378 965 milliards de litre en novembre 2014, (d'après ONU, UNESCO, FAO Novembre 2008). En l'espace de trois mois, environ 1 420 000 milliards de litres ont été consommés à l'échelle mondiale. Donc nos besoins en eau ne cessent d'augmenter en quantité [2].

La qualité de l'eau dans le monde a connu depuis quelques années une vaste détérioration à cause des différentes sortes de pollution. Cette ressource se faisant de plus en plus rare et soumise à un risque croissant de pollution. Ces pollutions résultent principalement des activités humaines, telles que les rejets industriels non contrôlés, l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau. Ces activités peuvent produire des modifications dans la composition chimique de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités, y compris la consommation humaine. A cause de ces différentes sortes de pollution qui affectent l'eau et qui entravent sa qualité, des études particulières sont effectuées sur cette eau.

A Madagascar, 90% de la population vit dans les régions rurales dont les ressources en eau utilisées dans la vie quotidienne sont principalement d'origine différente, ce sont des « sources naturelles" soit des puits traditionnels. Pour cela, l'Etat malgache a adopté depuis quelques années une politique d'approvisionnement et d'adduction d'eau potable pour la population, surtout pour les zones rurales qui n'ont pas accès à l'eau de la JIRAMA (Jiro sy Rano Malagasy). Le taux d'accès en eau potable ne représente que 27,7 % selon le PNUD en 2011.

La majorité de la population préfère les eaux de puits traditionnels que celles fournies par la société nationale JIRAMA et cela pour des raisons économiques [3]. Pourtant la qualité des eaux de ce type d'ouvrage n'est pas à l'abri de la pollution. Par exemple, des études menées sur la nappe phréatique de la ville de Mahitsy, région Analamanga ont révélé des teneurs relativement élevées en nitrate, de l'ordre de 1,5 mg. L⁻¹ à 580 mg. L⁻¹. Les données recueillies indiquent des teneurs plus élevées en saison sèche (409 mg. L⁻¹ en moyenne) qu'en saison pluvieuse (371 mg. L⁻¹ en moyenne) [4].

A environ 19 km de la ville d'Antananarivo en suivant la route nationale 7(RN7) vers le Sud, se trouve la commune de Bongatsara. Dans cette zone comme dans ses environs, l'accès à l'eau de la JIRAMA considérée comme « potable » n'est pas disponible. La totalité de la population se tourne vers les eaux souterraines pour subvenir aux besoins quotidiens en eau, que ce soit pour la consommation ou pour les activités domestiques. Or, la qualité de ces eaux n'est pas contrôlée, les ouvrages de captage d'eau (forages et puits traditionnels) eux-mêmes sont mal protégés et surtout mal équipés, augmentant les risques de contamination de l'eau.

La présente étude a pour objectif d'évaluer la qualité de l'eau, de vérifier si l'eau est polluée et de déterminer les mécanismes responsables de la minéralisation de l'eau. Pour ce faire, la qualité physico-chimique des eaux a été évaluée en utilisant des méthodes hydrochimiques et statistiques. Le travail est divisé en deux parties, à savoir la partie théorique et la partie pratique.

La partie théorique comprend :

- l'étude de l'eau ;
- la géochimie des eaux ;
- la réglementation sur la qualité des eaux ;
- l'analyse de l'eau.

La partie pratique comporte :

- la description de la zone d'étude ;
- la méthodologie ;
- les résultats et discussions ;

La conclusion termine ce travail.

PARTIE THEORIQUE

I- GENERALITES SUR L'EAU

I- Généralités sur l'eau

I.1. Origine

L'eau est un constituant essentiel des êtres vivants. Elle représente 60 à 95% de la masse des cellules et des tissus. Le rôle prépondérant de l'eau en biologie est dû à ses propriétés physiques et chimiques

L'eau est un corps dont l'unité de base est la molécule d'eau. Cette molécule est formée d'un atome d'oxygène relié à deux atomes d'hydrogène (H_2O). Ces deux atomes sont liés par des forces appelées "forces électrostatiques" qui assure la propriété physique de l'eau. Cette liaison est dite 'liaison covalente (O-H). [5]

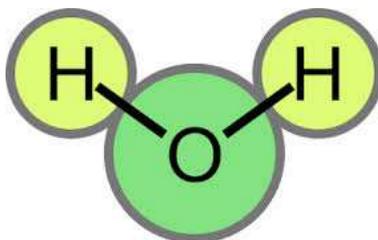


Figure 1: Représentation de la molécule d'eau

Mais naturellement l'eau n'est pas pure. Elle est constituée par d'autres éléments qui peuvent être indispensable ou toxique pour l'organisme. C'est pour cette raison qu'on effectue des études approfondies sur l'eau.

I.2. Propriétés de l'eau [6]

I.2.1. Propriétés chimiques

L'eau joue un rôle très important dans toutes les réactions chimiques qui impliquent des matières chargées électriquement. Les liaisons hydrogènes sont à l'origine des propriétés chimiques et physiques particulières de l'eau.

L'eau est une substance qui a une forte capacité de dissoudre d'autres éléments. Elle peut aussi dissoudre des gaz présents dans l'air comme le gaz carbonique (CO_2) ou l'oxygène (oxygène dissous). Par exemple, l'eau contenue dans le corps humain sert de support à la multitude de réactions et d'échanges qui sont nécessaires à la vie.

Outre ses qualités chimiques propres, l'eau est un excellent véhicule, notamment pour les agents agressifs comme les acides ou le gaz carbonique. Le gaz carbonique dans l'eau se transforme en un acide faible qui par la suite dissout entre autres les calcaires. Cependant, une élévation de température ou une aération de l'eau précipite le calcaire sous forme de tartre. De la même façon, l'eau des océans régule la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère.

I.2.2. Propriétés physiques

L'eau est le seul composé naturel qui existe sous les 3 états (solide, liquide et gazeux) dans les conditions rencontrées à la surface de la terre. L'état liquide étant le plus fréquent.

Le changement d'état se fait en rompant des liaisons hydrogène.

I.2.2.1. État solide

Si l'on diminue la température de l'eau liquide, l'agitation thermique des molécules d'eau diminue progressivement et les liaisons d'hydrogène, qui pouvaient aisément se déformer dans le liquide, se raidissent progressivement pour devenir pratiquement rectilignes (droites). Les molécules d'eau forment alors une structure rigide très organisée : l'eau s'est transformée en glace.

Dans la glace, l'agitation thermique des molécules d'eau est réduite au minimum : les molécules ne peuvent plus changer de position, elles ne peuvent que vibrer autour de cette position.

I.2.2.2. État liquide

Si l'on refroidit la vapeur d'eau, l'agitation thermique des molécules d'eau diminue.

Lorsque leur énergie d'agitation n'est plus suffisante pour les en empêcher, les molécules commencent à se lier les unes aux autres. Elles se rassemblent en paquets pour finalement former, au sein de la vapeur d'eau, des gouttes d'eau liquide qui tombent sous l'action de leur poids au fond du récipient. La vapeur se transforme ainsi progressivement en eau liquide.

L'eau est le seul liquide apte à développer un aussi grand nombre des liaisons d'hydrogène qui jouent un rôle extrêmement important en lui conférant des propriétés très particulières.

I.2.2.3. État gazeux

Au sein de la vapeur d'eau, l'agitation thermique des molécules d'eau est grande. Elles se déplacent en tous sens, séparément les unes des autres et de façon apparemment désordonnée, défiant les lois de la pesanteur car l'énergie thermique qui les habite est suffisamment importante pour les empêcher de s'associer et de tomber sous l'action de leur poids.

Comme pour tous les gaz, il est possible de comprimer la vapeur d'eau.

I.3. Réserve d'eau

I.3.1. Eau de mer

Au total le volume de l'eau d'océan est environ 1 360 000 000 km³ c'est-à-dire 97,14% du volume total de l'eau de l'hydrosphère. Cette eau occupe les 70% de la surface du globe terrestre. La majorité de l'eau qui existe dans notre planète est donc salée.

I.3.2. Eau douce

Les eaux douces sont essentiellement placées dans les inlandsis, glaciers continentaux, glaces polaires, les lacs, les rivières et les eaux souterraines. On montre dans le tableau suivant le volume d'eau douce à la surface de la Terre (données UNESCO). [7]

Tableau 1: Volume d'eau douce sur la terre

GRANDS RESERVOIRES	Km ³	%
Glaciers	24 000 000	59,84
Eaux souterraines	16 000 000	39,89
Eaux continentales :		
• Lacs et grands réservoirs	90 000	0,224
• Cours d'eau	2 120	0,005
• Atmosphère	13 000	0,032
• Eau biologique	1 120	0,003
Total :	40 106 240	100%

Le volume total de l'eau du globe terrestre est environ 1 400 000 000 km³ alors que l'eau douce ne représente que les 2,86 % de l'eau du globe.

Les glaces sont constituées essentiellement des calottes glaciaires polaires auxquelles s'ajoutent les glaciers de montagne et les neiges éternelles. Les eaux souterraines sont stockées dans les fissures et les interstices de roches réservoirs, poreuses et perméables, appelées aquifères. Avec les eaux continentales de surface, elles constituent les stocks utilisables pour la consommation humaine. Les principales techniques de prélèvement de cette eau sont les barrages, les lacs artificiels, les forages et les captages de sources pour les eaux souterraines, et la canalisation pour les eaux de surface. Des réservoirs d'eau artificiels sont utilisés pour régulariser l'alimentation en eau des collectivités humaines. Si les volumes indiqués dans le tableau 1 paraissent, au premier abord, importants, il est aussi utile d'envisager les problèmes de qualité de l'eau stockée et de durée de renouvellement des ressources.

I.4. Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces changements accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. [1]

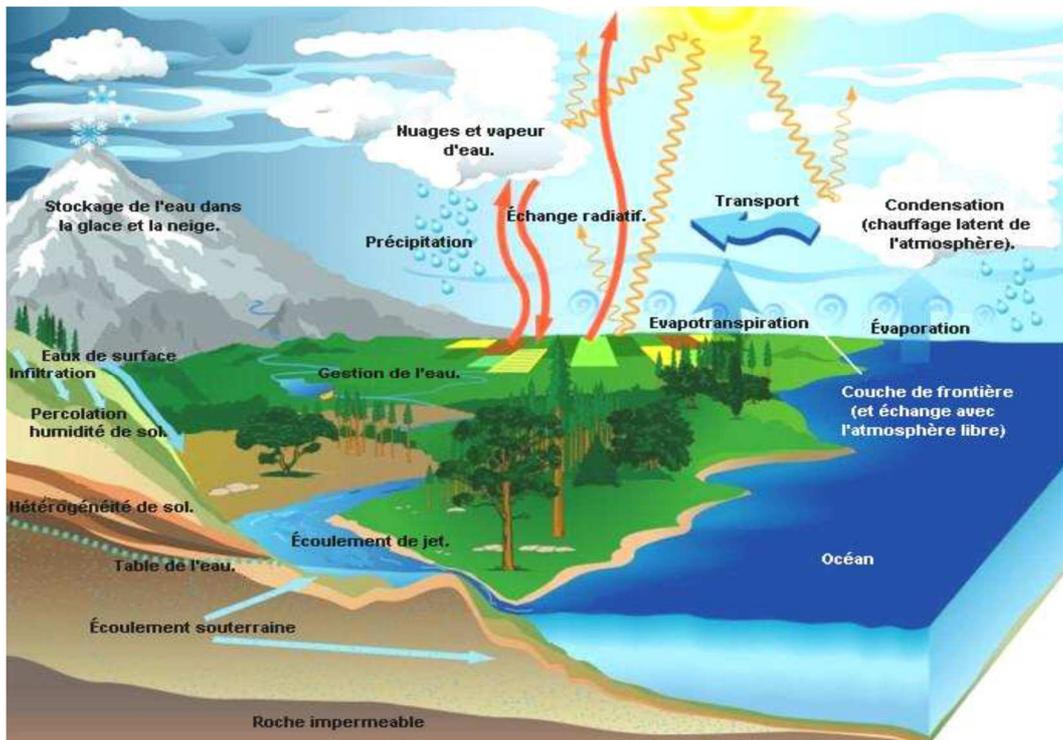


Figure 2 : Représentation schématique du cycle naturel de l'eau [1]

En moyenne sur l'année et sur l'ensemble du globe terrestre, 65% des précipitations qui parviennent sur le continent s'évaporent, 24% ruissellent et 11% s'infiltrent. [8]

Entre les quatre grands réservoirs d'eau de l'hydrosphère que sont les mers et les océans, les eaux continentales (superficielles et souterraines), l'atmosphère, et la biosphère, l'échange d'eau est permanent et forme ce que l'on appelle le cycle externe de l'eau. Le soleil et la pesanteur sont le moteur de ce cycle.

Ce cycle se divise en deux parties intimement liées :

- Une partie atmosphérique qui concerne la circulation de l'eau dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau essentiellement.
- Une partie terrestre qui concerne l'écoulement de l'eau sur les continents, qu'il soit superficiel ou souterrain.

Des échanges d'eau se produisent également entre l'hydrosphère et le manteau terrestre. Par ailleurs, dans la haute atmosphère, des molécules d'eau sont constamment décomposées par les rayons ultraviolets solaires.

L'hydrogène ainsi créé, trop léger pour être retenu par la gravité, s'échappe dans l'univers. Cependant, il semblerait que ces phénomènes restent suffisamment négligeables pour que globalement la quantité totale d'eau dans l'hydrosphère reste constante. L'analyse des sédiments marins a en particulier révélé que le volume des eaux océaniques avait très peu varié depuis un milliard d'années. On peut donc considérer que le cycle de l'eau est stationnaire c'est à dire que toute perte d'eau par l'une ou l'autre de ses parties, atmosphérique ou terrestre, est compensée par un gain d'eau par l'autre partie.

I.5. Pollution de l'eau

I.5.1. Type et origine de la pollution

L'eau douce peut être polluée par plusieurs types d'éléments dont leurs origines sont différentes, telles que les activités domestiques, agricoles, urbaine, industrielles, minières et les activités pétrolières. On peut classer cinq grands types de pollution [5] :

- Pollution par les matières organiques ;
- Pollution par les pesticides ;
- Pollution chimique ;
- Pollution thermique ;
- Pollution radioactive.

I.5.2. Conséquence de la pollution

Les conséquences de la pollution de l'eau ne sont pas nécessairement directes et immédiates. Pourtant, il faut les prévenir puisqu'elles peuvent être graves et difficiles à remédier. Les conséquences de la pollution sont multiples, elle peut avoir des effets sur la santé et sur la nature

I.5.3. Solution pour la pollution

La pollution est évitable par plusieurs moyens, premièrement la sensibilisation des gens pour qu'ils sont conscients de ne pas polluer l'eau dans différents usages : consommation, irrigation, navigation, baignade, pêche. Deuxièmement la mise en œuvre d'une réglementation et de moyens préventifs, ces objectifs doivent être respectés par tous, collectivités et particuliers. Et troisièmement la dépollution de l'eau. C'est-à-dire traitement de l'eau pour le rendre réutilisable. En outre, avant de prendre des mesures face à la pollution, il faut d'abord analysé l'eau par des experts au laboratoire pour mieux connaître le type de polluant. [5]

II- GEOCHIMIE DES EAUX

II-Géochimie des eaux

II.1. Définition

La géochimie applique les outils et concepts de la chimie à l'étude de la Terre et des sédiments. Dans une certaine mesure, des échantillons sont accessibles à l'investigation chimique. Elle étudie la répartition des éléments chimiques dans les roches, les minéraux et les gaz terrestres, de leur nature, de leur origine et de leur comportement au cours des phénomènes géologiques. Donc c'est une étude des interactions chimiques entre l'eau, les solides, et les gaz dans le système sous-terrain, afin de comprendre les processus géochimiques et leurs applications dans les systèmes des eaux souterraines. [9]

La géochimie des eaux contribue de manière significative dans les études sur les ressources en eau en vue de leur gestion rationnelle et durable. Elle permet de caractériser le système naturel, de comprendre la migration des contaminants et de définir des mesures d'assainissement. La négligence des caractéristiques géochimiques des eaux souterraines pourrait conduire à une simplification du système étudié, résultant à des conclusions erronées sur l'impact de la contamination sur l'environnement.

Pour cela on s'intéresse particulièrement à la géochimie des eaux se rapportant aux interactions eau-roche dans la zone non saturée et la zone saturée.

II.2. Solutés des eaux souterraines

L'eau souterraine est une solution aqueuse composée d'eau comme solvant et de constituants organiques et inorganiques dissous comme solutés. Etant donné le pouvoir de dissolution élevé de l'eau, les solutés qui y sont dissous ont différentes concentrations, celles qui permettent de les classer en ions majeurs, en ions mineurs et en éléments en trace.

Tableau 2 : Classification des types d'ions selon leurs concentrations. [9]

	Ions majeurs		Ions mineurs		Eléments en trace
Concentration	>1 (mg.L ⁻¹)		10 ⁻¹ (mg.L ⁻¹) - 10 ¹ (mg.L ⁻¹)		10 ⁻⁴ (mg.L ⁻¹) - 10 ⁻¹ (mg.L ⁻¹)
Types	Cations	Anions	Cations	Anions	
	<ul style="list-style-type: none"> • K⁺ • Na⁺ • Mg²⁺ • Ca²⁺ 	<ul style="list-style-type: none"> • Cl⁻ • NO₃⁻ • SO₄²⁻ • HCO₃⁻ 	<ul style="list-style-type: none"> • NH₄⁺ • Fe²⁺ • Mn²⁺ • Al³⁺ • Sr²⁺ 	<ul style="list-style-type: none"> • F⁻ • SiO₃²⁻ • BO₄³⁻ • Br⁻ 	<ul style="list-style-type: none"> • Métaux lourds : Zn, Cr, Cu, Ni, Ar, Hg, Cd, Pb • Hydrocarbures en trace

II.3. Système géochimique des eaux souterraines [10]

Le milieu souterrain peut être considéré comme un système géochimique dynamique comprenant :

- Phase solide (minerais, solides amorphes, et composés organiques).
- Phase gazeuse.
- Solution de phase aqueuse (eau et ses constituants dissous).

Chaque phase est une entité physique distincte ayant chacune une composition chimique plus ou moins uniforme. Un système est l'assemblage de ces phases sous les conditions de température et de pression du site.

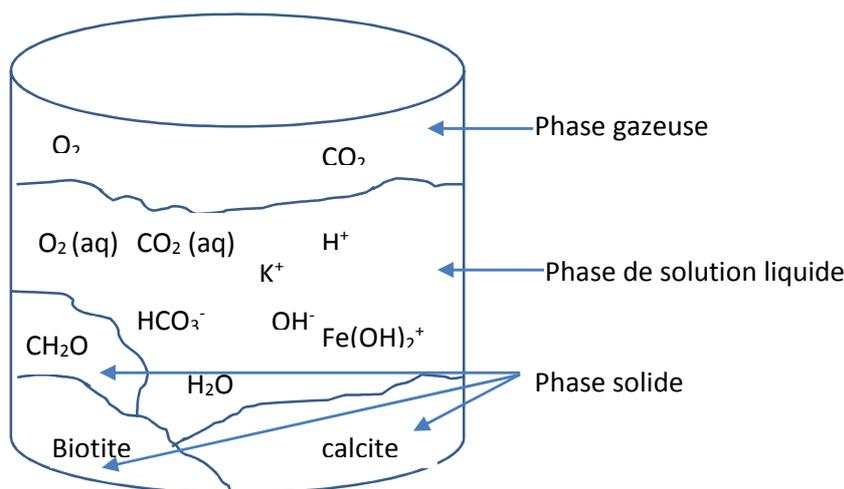


Figure 3 : Système géochimique [10]

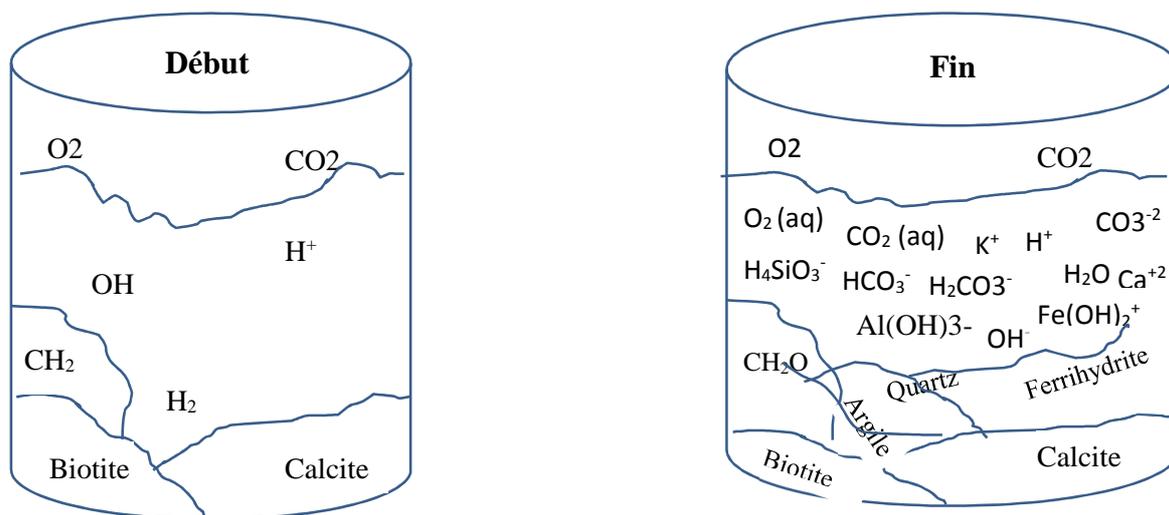


Figure 4 : *Interaction eau roche* [10]

Les eaux souterraines acquièrent les mêmes caractéristiques que celles du milieu dans lequel elles se trouvent. Les eaux de pluie qui s'infiltrent à travers le sol et la zone non saturée réagissent chimiquement avec les gaz, les minéraux, et les composés organiques présents naturellement dans le milieu sous-terrain. Ces réactions se poursuivent le long de l'écoulement des eaux souterraines à travers l'aquifère, ce qui changeraient les caractéristiques et les compositions des eaux en réponse aux types de phases solide et gazeuses en contact avec les eaux, ainsi que les réactions géochimiques entre ces phases.

La phase de solution liquide est le milieu d'échange et de transport.

II.3.1. Ions majeurs et mineurs

L'eau pourrait contenir des éléments dissous. Les ions majeurs et mineurs sont le calcium Ca^{2+} , le magnésium Mg^{2+} , le sodium Na^+ , l'ammonium NH_4^+ , le potassium K^+ , le strontium Sr^{2+} , le manganèse $\text{Mn}^{1+,2+,4+}$, le fer $\text{Fe}^{2+,3+}$ et l'ion H^+ pour les cations, pour les anions, les ions bicarbonate HCO_3^- , carbonate CO_3^{2-} , sulfate SO_4^{2-} , chlorure Cl^- , brome Br^- , nitrate NO_3^- , nitrite NO_2^- et l'hydroxyde OH^- . L'eau peut aussi contenir des éléments non chargés tels que le gaz carbonique CO_2 , le dioxygène O_2 , l'azote N_2 ou le dihydrogène H_2 .

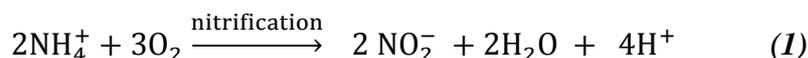
- **ANIONS MAJEURS :**

La majorité des anions qui se trouvent dans les eaux souterraines sont les ions nitrate NO_3^- , bicarbonate HCO_3^- , carbonate CO_3^{2-} , sulfate SO_4^{2-} , chlorure Cl^- .

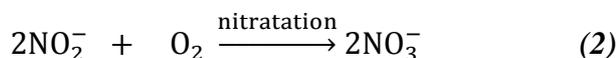
✓ *Origine de l'ion nitrate NO_3^- [11]*

- Les nitrates sont obtenus au stade final de l'oxydation de l'azote organique qui est très répandu dans les eaux.

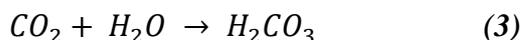
D'abord, il y a la transformation de l'ammonium en nitrite au cours du cycle de l'azote selon la réaction (1) :



Après, les bactéries nitrifiantes transforment les ions nitrites en nitrates dans les eaux ou les sols selon la réaction (2) :

✓ *Formation de l'ion bicarbonate HCO_3^- [12]*

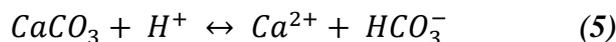
- L'eau de pluie se combine avec le gaz carbonique pour donner de l'acide carbonique selon la réaction (3) suivante :



Puis en milieu acide, l'acide carbonique se transforme en bicarbonate d'après la réaction (d) ci-dessous :



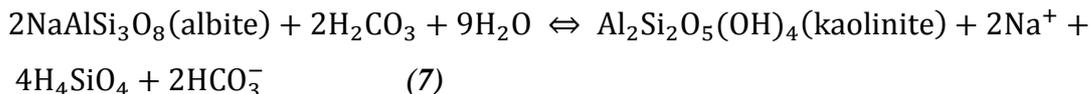
- La formation de l'ion bicarbonate peut être aussi obtenue à partir de la réaction de dissolution de la calcite. La réaction qui se produit est la suivante :



- Lorsque le pH de l'eau est inférieur à 6,5 et le milieu est acide. Par conséquent, la décomposition de la matière organique de la zone d'étude est très favorable. En présence de l'oxygène, il y a dégagement de gaz carbonique qui se dissout dans l'eau pour former de l'acide carbonique :

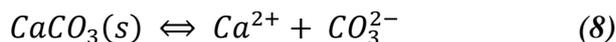


- Altération des silicates (de l'albite en kaolinite) :



- ✓ *Formation de l'ion carbonate CO_3^{2-}*

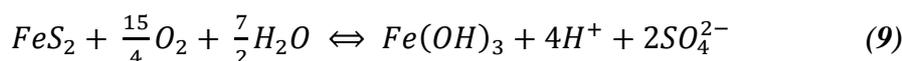
La dissolution de la calcite par la précipitation permet la formation de l'ion carbonate, selon la réaction (8) ci-dessous :



- ✓ *Origine de l'ion sulfate SO_4^{2-} [13]*

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle ou biologique. Les minéraux sont constitués naturellement par des sulfates. Pourtant, la concentration en ion sulfate dans les eaux souterraines est faible. Par contre, l'élévation du taux de sulfate dans les eaux souterraines peut être due :

- à la présence de sulfate de magnésium (MgSO_4) ou de sulfate alcalin (K_2SO_4 - Na_2SO_4) ;
- à la présence du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) par l'évaluation de la liaison entre l'ion sulfate et l'ion calcium ;
- à la présence de l'anhydrite (CaSO_4) ;
- à la pollution domestique ou industrielle ;
- à l'oxydation des pyrites avec formation d'acide sulfurique.
- à l'oxydation du sulfure de fer (pyrite) suivant la réaction (9) :

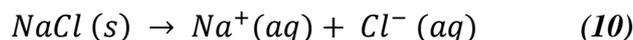


- ✓ *Origines de l'ion chlorure Cl^- [14]*

L'ion chlorure est un sel non toxique se trouvant dans la nature sous forme de chlorure de sodium (NaCl), de chlorure de potassium (KCl) et de chlorure de calcium (CaCl_2). Cependant, l'origine de l'ion chlorure dans l'eau peut être naturelle ou anthropique :

→ Origines naturelles :

- Origine atmosphérique : précipitation ;
- Infiltration d'eau marine ;
- Apport par les affluents ;
- Dissolution du chlorure de sodium dans l'eau par la réaction (10) ci-dessous :



→ Origines anthropiques :

- Rejets de déchets ou de certains produits par l'homme : dégradation des produits métalliques déposés sur le lieu (Ngeugang et al. 2008),
- Déchets industriels.

- *CATIONS MAJEURS*

Les cations les plus abondants dans les eaux souterraines sont les ions sodium Na^+ , potassium K^+ , calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} .

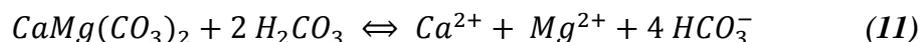
- ✓ *Formation de l'ion potassium K^+ [11]*

La présence de l'ion potassium dans les eaux souterraines est minime. Il est d'origine naturelle et se trouve essentiellement dans les végétaux, il se fixe dans le sol. L'ion potassium représente 2,8% de la masse totale de la partie supérieure de la lithosphère. Il est difficile à précipiter dans une solution aqueuse.

L'ion potassium est utilisé comme un puissant réducteur dans de nombreuses réactions en chimie et en pharmacie.

- ✓ *Formation des ions calcium et magnésium (Ca^{2+} et Mg^{2+}) [13]*

Ces ions se forment à partir de l'hydrolyse des minéraux silicatés présents dans le sol. La formation de l'ion calcium est obtenue à partir de la dissolution de la calcite selon l'équation (5) précédente. En ce qui concerne la formation de l'ion magnésium, elle est obtenue à partir de la dissolution du carbonate de calcium et de magnésium (dolomite) suivant la réaction (11) :



II.3.2. Importances des ions majeurs

Les ions majeurs permettent de :

- Connaître les caractéristiques et la minéralisation des eaux souterraines.
- Faire des analyses chimiques et de déterminer la dominance anionique ou cationique dans une zone d'étude.

- Grouper les eaux selon leurs dominances cationiques et anioniques (diagramme de Stiff). Le diagramme de Stiff consiste à construire un diagramme sous forme de polygone pour chaque échantillon à analyser qui prend une forme géométrique selon la teneur des éléments chimiques considérés. La forme géométrique obtenue pour un échantillon permet de donner une idée sur les espèces dominantes.
- Estimer le faciès chimique des eaux en utilisant le diagramme de Piper [11]. Il est composé de deux triangles qui permettent de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange permettant la synthèse du faciès global d'un échantillon d'eau ou d'un groupe de solutions. La figure 5 ci-dessous permet de faire une approche descriptive du faciès des échantillons analysés et faire aussi une comparaison entre eu

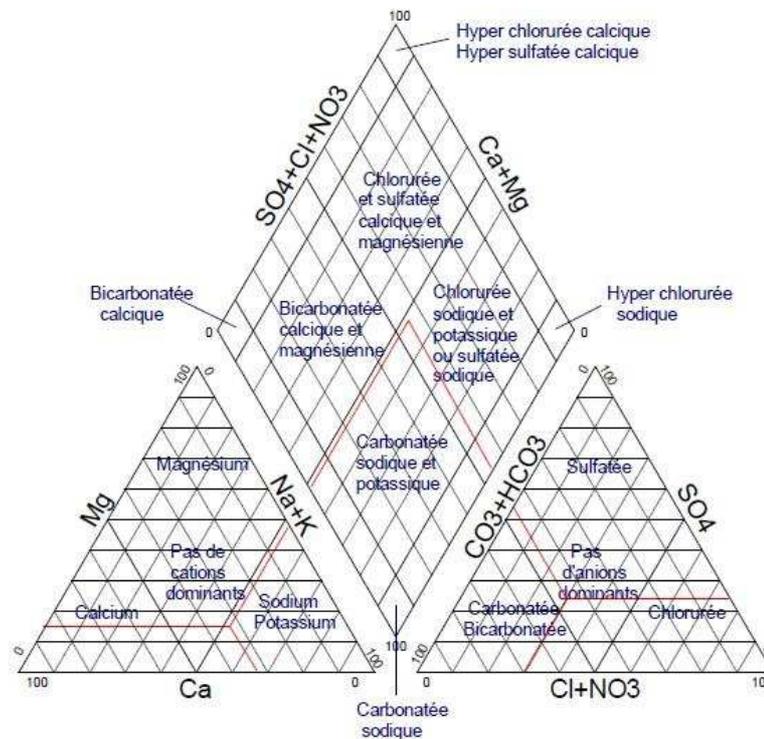


Figure 5 : Faciès hydrochimie selon le diagramme de Piper [11]

Le quadrant supérieur représente les eaux de sulfate de calcium (dissolution du gypse). Le quadrant gauche représente les eaux de bicarbonate de calcium (eau souterraine fraîche superficielle). Le quadrant droit représente les eaux de chlorure de sodium (marine et eaux souterraines anciennes profondes), et le quadrant inférieur représente les eaux de bicarbonate de sodium (eau souterraine profonde influencé par échange d'ions).

II.4. Balance ionique

II.4.1. Définition

Pour contrôler la qualité des analyses effectuées sur les ions majeurs, la méthode des balances ioniques est utilisée. Cette démarche de validation est un préalable indispensable à la présentation des résultats d'analyse et à leur interprétation.

Le calcul des balances ioniques se fait à partir des concentrations des cations et anions majeurs de chaque échantillon d'eau, exprimées en $meq.L^{-1}$. Ce calcul se fonde sur la relation suivante :

$$BI \equiv \frac{\sum cations(meq.L^{-1}) - \sum anions(meq.L^{-1})}{\sum cations(meq.L^{-1}) + \sum anions(meq.L^{-1})} * 100\%$$

La balance ionique est l'expression d'une différence entre les charges positives et négatives (cations et anions) dans un échantillon d'eau. Comme la théorie physique suppose la neutralité des charges au sein des échantillons d'eau, la balance ionique de tout échantillon d'eau doit donc nécessairement être proche de 0%.

→ *L'analyse est fiable si la balance ionique est de $\pm 5\%$ [15].*

II.4.2. Origine de déséquilibre ionique

Le déséquilibre ionique peut être issu de la négligence d'autres espèces dissous ou de l'erreur analytique. Il peut aussi arriver lors de l'utilisation d'échantillon non filtré contenant des matières en suspension dissous après addition d'acide en but de préserver l'échantillon. Ce déséquilibre ionique est dû principalement à la diminution ou disparition des constituants d'un minéral dans l'échantillon suite à la précipitation du minéral dans la bouteille d'échantillonnage.

Des études ont également montré que les échantillons ayant une faible valeur de STD (solides totaux dissous) donnent des valeurs de balances ioniques ne se trouvant pas dans l'intervalle acceptable car des faibles erreurs sont plus prononcées quand le dénominateur (de la formule de la balance ionique) est faible.

Afin de minimiser les erreurs analytiques au laboratoire, un protocole d'échantillonnage et sur des mesures de l'alcalinité doit être suivi à la lettre.

Les paramètres analysés sont des constituants dissous seulement. Les eaux souterraines peuvent contenir des matières en suspension, qui, peuvent être dissous dans l'eau après addition d'acide pour la préservation de l'échantillon.

II.4.3. Les paramètres physiques [16]

Une molécule d'eau est constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. A l'état naturel, l'eau peut se transformer en trois phases : solide (glace, neige) ; liquide (eau liquide) et gazeux (vapeur d'eau). L'écoulement de l'eau dépend du type de sol, de sa porosité et son infiltration. Quant à sa qualité, il faut faire des analyses pour connaître ses paramètres physiques.

✓ *Température*

La température est une grandeur physique nécessaire pour le diagnostic hydrogéologique, elle est exprimée en degré Celsius (°C). Elle permet de déterminer les équilibres chimiques. Elle joue un rôle important pour la dissolution de l'oxygène et l'accélération de la vitesse des réactions. La température gère presque la totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques dans un milieu. Elle permet aussi de déduire des informations sur l'écoulement des eaux souterraines, et sur le temps de résidence dans l'aquifère.

La variation de la température dépend de :

- L'altitude et du climat d'une région donnée.
- La profondeur et de la durée de l'écoulement.
- La manière dont les sources se dégagent.

✓ *pH*

Le pH est par définition $\text{pH} = -\log_{10} \text{H}^+$ (12). Il est obtenu à partir de la réaction de dissociation de l'eau : $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ (12)

Le pH permet de connaître la concentration en ion H^+ ou OH^- , il est nécessaire pour savoir si l'eau est acide, neutre ou basique. La valeur du pH varie de 0 à 14 et elle dépend de la température, de la force ionique et du potentiel redox.

- $\text{pH} = 7$: solution neutre (à 25°C)
- $\text{pH} = 5,6$: correspond à l'eau de pluie
- $6,5 < \text{pH} < 8,5$: caractéristique des eaux naturelles (eau douce)

✓ *Oxygène dissous OD*

L'oxygène dissous est la mesure de la concentration en dioxygène O_2 dissout dans l'eau, exprimée en mg/L ou en pourcentage de saturation ; elle est due à la dissolution de l'oxygène de l'air à la surface de l'eau.

La saturation est la solubilité maximale de l'oxygène qui dépend de la pression atmosphérique, de la pression de vapeur saturante, de la température de l'eau et de la salinité. Cependant, l'OD dépend des facteurs physiques, chimiques et biologiques. La teneur en OD diminue en fonction de la salinité et de la température. Plus la température est basse, plus le taux en OD est élevé.

La mesure de l'OD permet de connaître des informations sur la dégradation des substances organiques, la provenance de l'eau, et la mobilisation potentielle de certains métaux.

✓ *Potentiel d'oxydoréduction Eh*

Le potentiel d'oxydoréduction est la capacité d'un système chimique à perdre ou à gagner des électrons. Il permet de caractériser le transfert d'électrons d'un réducteur (espèce chimique à potentiel redox négatif) vers un oxydant (espèce chimique à potentiel redox positif). La valeur du potentiel redox dépend de la force de l'oxydant et du réducteur.

Plus l'oxydant d'un couple est puissant, plus son potentiel redox est élevé. Par contre, la force d'un réducteur augmente quand son potentiel diminue.

- Les couples ayant un potentiel standard E° positif (élevé) impliquent des oxydants forts.
- Les couples ayant un potentiel standard E° négatif (bas) impliquent des réducteurs forts.

✓ *Solides Dissous Totaux SDT [17]*

• *Définition*

Le SDT est la valeur totale de la teneur en sel dissous dans les eaux souterraines. C'est le paramètre caractéristique de la minéralisation de l'eau. Sa valeur est définie par :

$$SDT \approx \sum \text{cations majeurs} + \sum \text{anions majeurs} \quad (13)$$

• *Classification des eaux selon la valeur du SDT*

Si on veut connaître le degré de minéralisation de l'eau, on peut comparer les valeurs mesurées pour des échantillons avec la valeur du SDT selon le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 3: Type d'eau selon le SDT [17]

Type	SDT (mg.L ⁻¹)
Eau fraîche	0 - 1000
Eau saumâtre	1000 – 10.000
Eau salée	10.000 – 100.000
Eau très salée	> 100.000

✓ Alcalinité

• *Définition*

L'alcalinité d'une eau est sa capacité à neutraliser les acides forts. L'alcalinité correspond à la présence d'espèces basiques telles que : l'ion hydroxyde (OH⁻), l'ion bicarbonate HCO₃⁻, l'ion carbonate CO₃²⁻, et l'ion phosphate PO₄³⁻. L'équation (14) permet de calculer l'alcalinité de l'eau.

$$\text{Alcalinité} = \text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-} + \text{OH}^- \quad (14)$$

• *Principe*

L'alcalinité est obtenue à partir d'un titrage avec un acide fort. Au fur et à mesure du titrage, il y a diminution de la valeur du pH. Lorsque l'échantillon contient des carbonates, un changement de couleur de l'échantillon peut être observé aux environs d'un pH 8,3. Ce point correspond à la transformation des ions carbonates en bicarbonates. Ensuite, un deuxième point d'équivalence peut être identifié correspondant à la transformation du bicarbonate en acide carbonique. Ce point correspond à un pH avoisinant 4,3. Les zones de virage des indicateurs colorés sont représentées dans le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4: Propriétés des indicateurs colorés [17]

	Forme acide	Zone de virage	Forme basique
Phénolphtaléine	incolore	8,2 < pH < 10	rose
Vert de bromocrésol	jaune	3,8 < pH < 5,4	bleu

- *Utilisation de l'alcalinité*

Elle est utilisée pour déterminer la concentration des ions dominants : bicarbonate HCO_3^- et carbonate CO_3^{2-} dans des eaux souterraines. L'alcalinité peut être diminuée par la nitrification et la précipitation de carbonate de calcium et peut être aussi augmentée par la dissolution de carbonate de calcium.

- ✓ *Conductivité électrique CE [12]*

Elle mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Sa variation permet de suivre l'évolution d'une pollution chimique. La conductivité permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau dans la mesure où la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La conductivité varie proportionnellement avec les fluctuations de la température. Ce paramètre renseigne aussi sur les zones de mélange ou d'infiltration. Elle s'exprime en Us/cm . La classification des eaux en fonction de la conductivité se présente de la manière suivante :

- Conductivité égale à 0.05 : eau déminéralisée,
- Conductivité de 10 à 80 : eau de pluie,
- Conductivité de 80 à 100 : eau peu minéralisée,
- Conductivité de 300 à 500 : eau moyennement minéralisée,
- Conductivité de 1000 à 3000 : eau saline,
- Conductivité supérieure à 3000 : eau de mer.

Le tableau 5 ci-dessous montre la relation entre la CE et la caractéristique de la minéralisation.

Tableau 5: Relation entre conductivité et minéralisation [12]

Conductivité électrique ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Minéralisation
< 100	très faible
100 à 200	faible
200 à 400	peu accentuée
400 à 600	moyenne
600 à 1000	importante
> 1000	excessive

III- REGLEMENTATION SUR LA QUALITE DES EAUX

III- Réglementation sur la qualité des eaux

La dégradation de l'eau dans la nature est généralement due à la pollution d'origine domestique, agricole, urbaine, industrielle, pétrolière et radioactive. Cette situation la rend inapte à la consommation humaine. Les eaux naturelles (souterraines ou de surface) destinées à la consommation doivent être conformes aux normes de potabilité en vigueur afin de mettre les consommateurs à l'abri des dangers éventuels.

III.1. Potabilité de l'eau

Une eau livrée à la consommation doit - être potable, elle ne doit jamais être susceptible de porter atteinte à la santé de ceux qui la consomment.

Selon l'article 38 de la loi n°98 – 029 du 20 Janvier 1999 portant le code de l'eau à MADAGASCAR, une eau potable est définie comme une eau destinée à la consommation humaine qui, par traitement ou naturellement, répond à des normes organoleptiques, physico-chimiques, bactériologiques et biologiques fixées par décret.

III.2. Normes de potabilité de l'eau à Madagascar

A Madagascar, selon le Décret n° 2004 – 635 du 15 Juin 2004, une eau potable doit présenter les caractères suivants :

III.2.1. Paramètres organoleptiques

Les paramètres organoleptiques concernent l'odeur, la couleur et la saveur. Cependant ces critères n'ont pas de valeur sanitaire directe. Ainsi, l'eau doit – être si possible :

- Sans odeur ;
- Sans couleur (incolore) ;
- Sans saveur désagréable.

III.2.2. Paramètres physiques

Les normes sur les paramètres physiques de l'eau potable sont décrites dans le tableau 6 :

Tableau 6: Normes sur les paramètres physiques de l'eau (Décret n° 2004 – 635 du 15/06/2004) [18]

	Norme
Température	< 25 ° C
Turbidité	< 5 NTU
Conductivité	< 3000 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C
pH	6,5 < pH < 9

III.2.3. Paramètres chimiques

L'eau doit contenir en quantité admissible un certain nombre d'éléments chimiques (dits éléments normaux).

Elle doit par contre être dépourvue :

- D'indices de pollution chimique (dits éléments anormaux).
- De substances toxiques (dits éléments toxiques).

Les teneurs en éléments normaux, anormaux sont présentés dans les tableaux 7 et 8.

Tableau 7: Normes sur la teneur en éléments normaux (Décret n° 2004 – 635 du 15/06/2004)

[18]

	Minima	Maxima admissible (mg.L ⁻¹)
Calcium		200
Magnésium		50
Chlorure		250
Sulfate		250
O ₂ dissous (% de saturation)	75%	
Dureté		500 mg.L ⁻¹ exprimée en CaCO ₃

Tableau 8 : Normes sur la teneur en éléments anormaux (Décret n° 2004 – 635 du 15/06/2004)

[18]

	Maxima (mg.L ⁻¹)
Matières organiques	2 (milieu alcalin)
	5 (milieu acide)
Chlore libre	2
Ammonium	0.5
Nitrite	0, 1
Azote total	2
Manganèse	0,05
Fer total	0.5
Phosphore	5
Zinc	5
Argent	0,01
Cuivre	1
Aluminium	0,2
Nitrates	50
Fluor	1,5

IV- ANALYSE DE L'EAU

IV- Analyse de l'eau

IV.1. Analyse par chromatographie ionique [19]

IV.1.1. Définition de la chromatographie ionique

La chromatographie vient du mot *chroma* : couleur et *graphie* : écriture.

La chromatographie ionique ou chromatographie à échange d'ions (ou chromatographie à ions ou chromatographie échangeuse d'ions) est une technique qui permet la séparation des ions organiques et inorganiques suivie d'une détection conductimétrie et en fonction de leur affinité avec la phase stationnaire et la phase mobile.

Elle est adaptée à la séparation des ions minéraux et de toutes sortes de molécules organiques à la condition qu'elles soient polaires.

La phase mobile est constituée par un milieu aqueux ionique et la phase stationnaire par un solide qui se comporte comme un échangeur d'ions.

La technique de chromatographie est orientée vers la séparation des ions et des composés polaires. Pour cela on utilise des colonnes contenant des phases stationnaires comportant des sites ioniques pour qu'il se crée des interactions dipolaires avec les analytes à séparer

IV.1.2. Principe et théorie de la chromatographie ionique [20]

IV.1.2.1. Principe

La chromatographie ionique est une technique analytique qui permet la séparation des constituants ioniques d'un mélange en phase homogène liquide. Le principe repose sur l'équilibre de concentrations des composés présents entre deux phases en contact : la phase stationnaire (emprisonnée dans la colonne) et la phase mobile qui se déplace. La séparation est basée sur l'entraînement différentiel des constituants présents dans la colonne.

Les ions séparés se déplacent dans la colonne avec des temps proportionnels à leurs propriétés intrinsèques (taille, structure) ou à leur affinité avec la phase stationnaire (polarité). A leur arrivée en bout de colonne, le détecteur (conductimétrie ou ultra-violet) mesure en continu la quantité de chacune des espèces chimiques du mélange.

IV.1.2.2. Chaîne de mesure en chromatographie ionique

La chromatographie ionique est devenue depuis quelques années une des méthodes analytiques de références en analyse des eaux. Comme tout système de chromatographie, un chromatographe ionique comprend les éléments suivants :

- Un système d'injection, le plus souvent une vanne rhéodyne;
- Une pompe de circulation ;
- Une colonne de séparation, spécifique des éléments à analyser ;
- Un éluant qui assure le transport des espèces ;
- Un système de détection.

Cet ensemble de modules est relié entre eux par des tubes de faible diamètre. Ces tubes assurent la circulation et transport de l'échantillon à analyser.

Le détecteur et le micro-ordinateur sont reliés avec un câble et une interface appropriée. Cette interface est indispensable pour le transfert des données. Les données seront exploitées avec le micro-ordinateur pour les analyses quantitative et qualitative de l'échantillon.

La progression et la séparation des constituants de l'échantillon reposent sur des phénomènes d'échange ionique. On distingue deux situations :

- Si on cherche à séparer des espèces cationiques (type C^+), on choisit une colonne, appelée *cationique* dont la phase stationnaire comporte des sites aptes à échanger les cations.
- En revanche, si on cherche à séparer des anions (type A^-), on choisit une colonne dite *anionique*.

IV.1.2.3. Phase stationnaire

La séparation des composés est assurée, dans tout système chromatographique, par la phase stationnaire qui, dans le cas de la chromatographie ionique (CI), est une résine échangeuse d'ion. Cette phase stationnaire est un support solide comportant des groupes fonctionnels ionisés (positifs ou négatifs) permettant la rétention des espèces dont on désire obtenir la séparation.

IV.1.2.4. Phase mobile ou Eluant

L'éluant servant de phase mobile est une solution aqueuse chargée d'ion salins ou organiques et, si nécessaire, d'un peu de méthanol ou d'acétone pour faciliter la dissolution de certains échantillons. La force de l'éluant en chromatographie à ions est déterminée par jusqu'à quel point il est ionique.

Si l'ion d'intérêt (anion ou cation) pourra faire moins d'interactions avec la phase stationnaire, il sera moins retenu par la colonne d'où l'élution plus rapide. Pour cela, plus un éluant ne renferme des ions, plus d'ion d'intérêt va éluer rapidement.

Les ions de l'éluant sont apportés :

- ✓ Par des acides minéraux ou organiques (perchlorique, benzoïque, phtalique, méthane sulfonique...) pour *la colonne cationique*.
- ✓ Par des bases (hydroxyde de potassium ou de sodium, carbonates ou bicarbonates...) pour *la colonne anionique*.

Les parties au contact de la phase mobile doivent être en matériaux inerte compte tenu de l'agressivité des solutions aqueuses acides ou basiques qui servent d'éluant.

IV.1.3. Avantage de la méthode de chromatographie ionique

Parmi les méthodes d'analyse d'un échantillon aqueux les avantages de la méthode de chromatographie ionique sont les suivants :

- ✓ La détection est automatique,
- ✓ Un petit volume d'échantillon suffit pour une analyse (25µL),
- ✓ La préparation de l'échantillon n'est pas compliquée,
- ✓ Cette méthode peut être utilisée pour la détermination des ions mineurs et majeurs présents dans un échantillon.
- ✓ La durée d'analyse est courte.

IV.2. Chromatographie ionique

IV.2.1. Appareillage

Un appareil de CI comprend généralement les modules suivants : un ou plusieurs réservoirs de solvant, une pompe, un injecteur d'échantillon, une colonne, un détecteur et un système d'acquisition de données. Le système de CI est représenté par le schéma suivant :

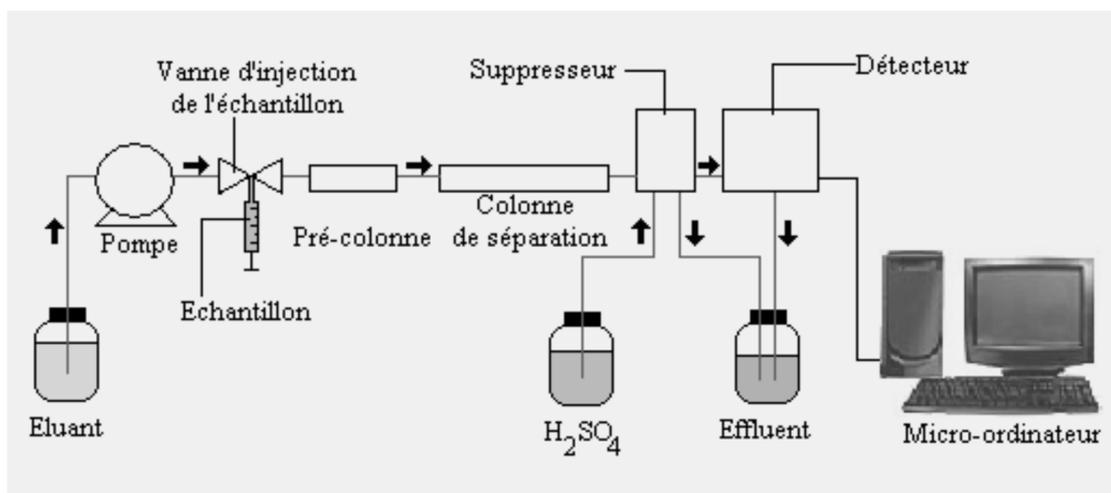


Figure 6: Schéma du principe d'un système de chromatographie ionique

Ces différents modules sont reliés par des canalisations courtes et de très faible diamètre interne (0,1 mm).

IV.2.1.1. Réservoir de solvant

Un appareil de CI peut être équipé d'un ou plusieurs réservoirs de solvant en verre, en plastique ou souvent en acier oxydable de contenance 1 litre ou plus, ce qui permet de réaliser un nombre important d'analyses sans interruption. Ces réservoirs sont étanches afin d'éviter l'évaporation des solvants ou leur contamination.

En CI, le solvant est appelé éluant, il constitue la phase mobile et déplace les composés dans la phase stationnaire jusqu'à ce qu'ils sortent de celle-ci.

IV.2.1.2. Pompe:

La pompe a pour rôle d'assurer l'écoulement de la phase mobile dans la colonne, elle assure le débit constant du solvant d'éluant dans tout le système de la chaîne de mesure. Celle-ci doit être très puissante car la viscosité de l'éluant et la granulométrie très fine des phases stationnaires entraînent des différences de pression ou des pertes de charges entre le sommet et l'extrémité des colonnes qui peuvent parfois être importantes.

IV.2.1.3. Injecteur

L'injecteur permet d'introduire en tête de colonne un volume d'échantillon précis et répétable (variables du microlitre au millilitre). Il est constitué d'une vanne haute pression à plusieurs voies appelée vanne à boucle d'injection. Ce type de vannes peut être utilisé soit manuellement soit commandé par un passeur automatique d'échantillons. Le fonctionnement des vannes se fait en deux étapes : l'introduction de l'échantillon à la pression atmosphérique dans la boucle (position chargement) puis la mise en communication de celui-ci par rotation de la vanne avec la phase mobile et la colonne.

IV.2.1.4. Colonne

C'est dans la colonne que la séparation des ions se déroule. En général, la colonne est un tube de 5 à 30 cm de longueur et de diamètre compris entre 1 à 5 mm Elle est remplie de phase stationnaire, maintenue entre deux disques poreux situés aux extrémités et dont la taille des particules varie de 3 à 5 μ m. La colonne de séparation est souvent précédée par une colonne de garde ou pré-colonne. Les pré-colonnes ont pour rôle d'augmenter la durée de vie de la colonne d'analyse en retenant tous les composés qui ne sont pas élués. Elle est plus courte (0,4 à 1 cm) et est remplie de la même phase stationnaire.

IV.2.1.5. Détecteur

En CI, le détecteur classique est un détecteur par conductimétrie (détecteur à conductivité). Ce détecteur est limité à la détection des espèces ionisées. Son principe repose sur la mesure, en sortie de colonne, de la conductance de la phase mobile riche en composé ionique.

Dans la majorité des systèmes de CI, un dispositif de neutralisation intercalé entre la colonne et le détecteur, appelé *suppresseur* est utilisé pour éliminer les ions de l'éluant. Il opère généralement par réaction acide-base. Ainsi, la détection des ions de l'échantillon a lieu dans une phase mobile rendue aussi peu conductrice que possible.

IV.2.1.6. Micro-ordinateur

Le détecteur transmet un signal au système de collection de données (terminal informatique équipé d'un logiciel approprié) qui identifie et quantifie les espèces ioniques par intégration des pics. Les résultats ainsi obtenus sont présentés sous forme de chromatogramme.

PARTIE PRATIQUE

V- DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

V- Description de la zone d'étude

V.1. Localisation géographique

Anjomakely se trouve dans la région Analamanga, district Antananarivo-Atsimondrano, commune Bongatsara en suivant la route nationale 7(RN7) à environ 19 kilomètres de la Capitale. Antananarivo. De part et d'autre de la route RN7 se trouve des zones d'habitations utilisant des bornes fontaines, des puits traditionnels et des sources d'eau naturelle. Les latitudes comprises entre 19°01'53'' S et 19°02'28'' S et les longitudes comprises entre 47°32'29'' E et 47°32'50'' E délimitent la zone. A l'Ouest de la zone d'étude s'écoule le fleuve Sisaony et à l'Est la rivière d'Ikopa.

V.2. Caractéristiques géologiques

Madagascar est constitué pour les deux tiers de sa superficie par des roches magmatiques et métamorphiques précambriennes qui constituent le socle cristallin (Hauts-Plateaux). Le tiers restant, est constitué par des roches sédimentaires que l'on retrouve dans les zones côtières. [21]

La zone d'étude est constituée principalement de roches métamorphiques sous l'action de la chaleur et de la pression, et des roches plutoniques obtenues à partir de l'activité volcanique qui se manifeste en profondeur. À l'Est tant qu'à l'Ouest, on a une formation de colline à basse altitude comprise entre 1400 et 1500 mètres. Dans la partie Nord-Est, la zone est constituée par des gneiss et des micaschistes. Ce sont des roches fossiles principalement composées de mica et de quartz, et des migmatites à graphite mélange de quartz et de feldspath. Dans le Sud-Ouest, il est constitué de roches granites migmatiques et migmatites granitoïdes [21].

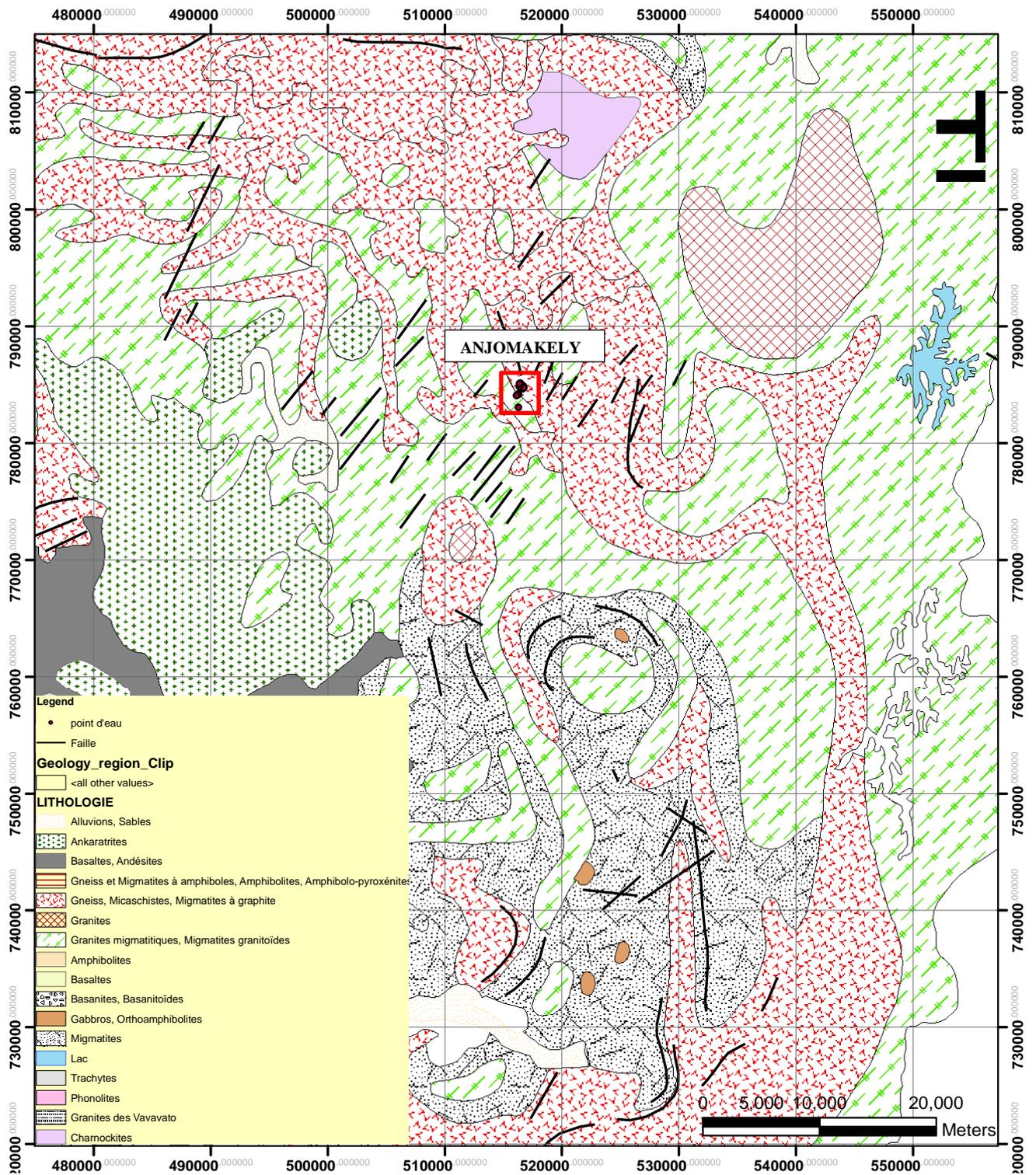


Figure 7: Caractéristique géologique de la zone d'étude (source : BD500 (FTM) modifié)

V.3. Environnement

V.3.1. Climat

Le climat de la zone d'étude suit la tendance du climat de la région Analamanga caractérisé par un climat tropical. Pendant l'année, on a alternance de saison chaude et pluvieuse du mois de Novembre jusqu'au mois de Mars et de saison sèche et fraîche du mois d'Avril au mois de Septembre. La valeur minimale de la température est observée au mois de Juillet durant la saison fraîche et sèche (environ 10°C). La valeur maximale, quant à elle, s'observe aux mois d'Octobre et Décembre (27°C – 28°C) pendant la saison chaude et pluvieuse. On constate une diminution de la température en 2015 par rapport à l'année 2014, cette variation se constate à partir du mois d'Août jusqu'au mois de Décembre selon la figure 9.

Tableau 9 : Distribution mensuelle des températures (°C) – Année 2014
Selon DGM Ampandrianomby [22]

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T° max	25,6	25	27,3	25,3	21,4	21,3	21,5	20,5	21,1	23,2	25,9	27,4
T° min	17,3	18,2	17	16,3	13	13	10,7	11,3	11,4	12,7	15	18,2
T° moy	21,45	21,6	22,15	20,8	17,2	17,15	16,1	15,9	16,25	17,95	20,45	22,8

Tableau 10 : Distribution mensuelle des températures (°C) – Année 2015
Selon DGM Ampandrianomby [22]

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T° max	25,8	26,2	26,1	25,1	23	20,9	19,3	22,1	23,6	28,1	27,7	27,4
T° min	17,8	17,6	16,9	15,2	13,3	11,6	11,5	11,4	12	15,4	16,6	17,7
T° moy	21,8	21,9	21,5	20,15	18,15	16,25	15,4	16,75	17,8	21,75	22,15	22,55

Tableau 11 : Distribution mensuelle des températures (°C) – Année 2016
Selon DGM Ampandrianomby [22]

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T° max	26,83	26,97	26,95	25,3	20,56	19,07	18,75	21,53	22,27	27,1	26,1	27,42
T° min	18,01	18,36	18,63	16,37	13,36	11,41	10,2	11,37	11,3	14,87	15,32	15,78
T° moy	22,42	22,67	22,79	20,84	16,96	15,24	14,48	16,45	16,79	20,99	20,71	21,6

La figure 8 montre la distribution mensuelle moyenne des températures des années 2014, 2015 et 2016.

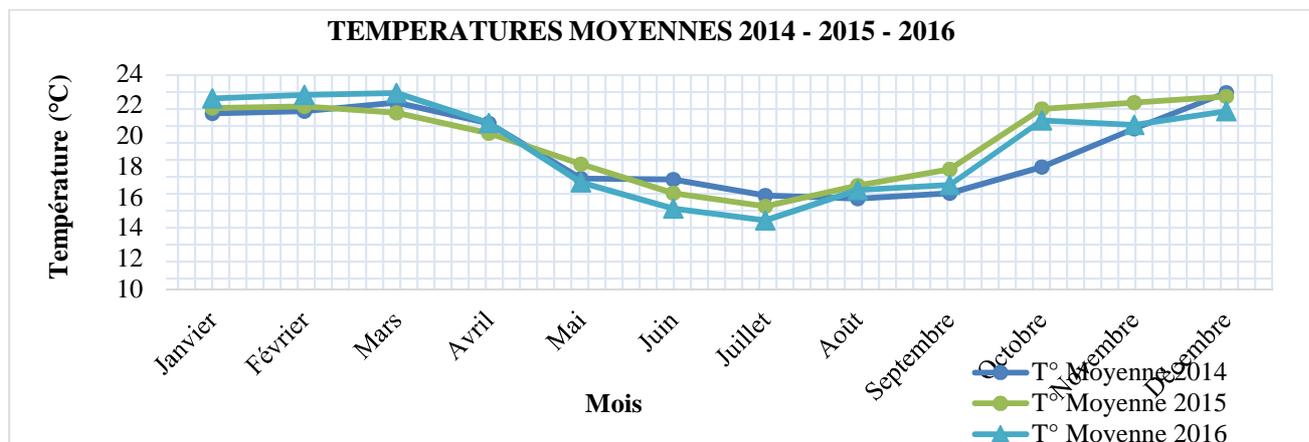


Figure 8 : Distribution mensuelle moyenne des températures des années 2014,2015 et 2016

5.3.2. Pluviométrie

La zone d'étude fait partie du régime tropical d'altitude, supérieure à 1200 m. Le climat est caractérisé par l'alternance annuelle d'une saison chaude et pluvieuse de Novembre à Mars et d'une saison fraîche et sèche de Mai à Septembre. Deux courtes intersaisons avec une durée d'environ un mois chacune séparent ces deux saisons [22].

Durant les années 2014, 2015 et 2016, les précipitations de la zone varient de 0,1 mm à 509,2 mm (Tableau 12). En 2015, les pluies sont plus abondantes qu'en 2014 et en 2016 présente un maximum de 509,2 mm au mois de février.

Tableau 12 : Distribution mensuelle et moyenne annuelle des précipitations des années 2014,2015 et 2016 Selon DGM Ampandrianomby [22]

Précipitation en millimètre												
Année	mois											
	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
2014	265,6	221,5	74,9	0,1	2,8	1,1	13	2,2	2,1	26,7	201,7	388,9
2015	308,9	509,2	212,8	0,4	14,2	2,4	2,7	2,7	11,4	1,4	56	389,9
2016	191,6	202,8	198,3	11,3	32,1	15	4,6	0,2	0,4	67,6	78,3	202,5
Moyenne annuelle												
2014	100,05											
2015	126											
2016	83,72											

La figure 9 montre la distribution mensuelle des précipitations des années 2014, 2015 et 2016.

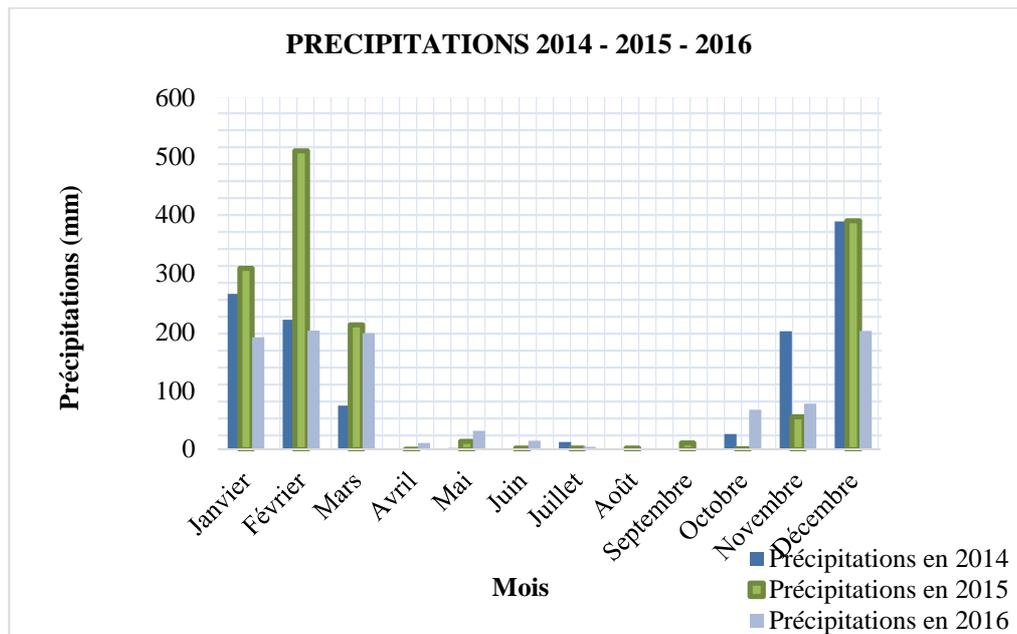


Figure 9 : Distribution mensuelle des précipitations des années 2014, 2015 et 2016
Source : DGM Ampandrianomby [22]

VI- METHODOLOGIE

VI- Méthodologie

VI.1. Echantillonnage

VI.1.1 Préparation des matériels et de la campagne d'échantillonnage

Avant d'effectuer le prélèvement d'eau, les matériels utilisés pour les mesures des paramètres physiques tels que la température (T) de l'eau, conductivité électrique (CE), le potentiel d'hydrogène (pH), l'oxygène dissous (OD), solides dissous totaux (SDT) et de l'alcalinité ont été calibré au le laboratoire. Il s'agit du multimètre HACH HQd/IntelliCAL.

Des investigations sur terrains avant la campagne d'échantillonnage ont été effectuées pour préciser les points de prélèvement d'eau et caractériser la nature de l'environnement d'échantillonnage.



Figure 10 : *Kits du multimètre HACH HQ 40d*

VI.1.2. Points d'échantillonnage

La localisation géographique est obtenue à l'aide d'un GPSmap 76CSx. Les points de prélèvements d'eau occupent la totalité de la zone d'étude. Les points de prélèvement sont de type puits traditionnel, source d'eau et borne fontaine. Dix-sept (17) échantillons issus des eaux de puits traditionnel, de deux (2) eaux de source et de deux (2) bornes fontaines ont été prélevés pendant la campagne d'échantillonnage se déroule toute la journée du 22 Décembre 2015. Les différents points d'échantillonnage sont représentés sur la figure 11.

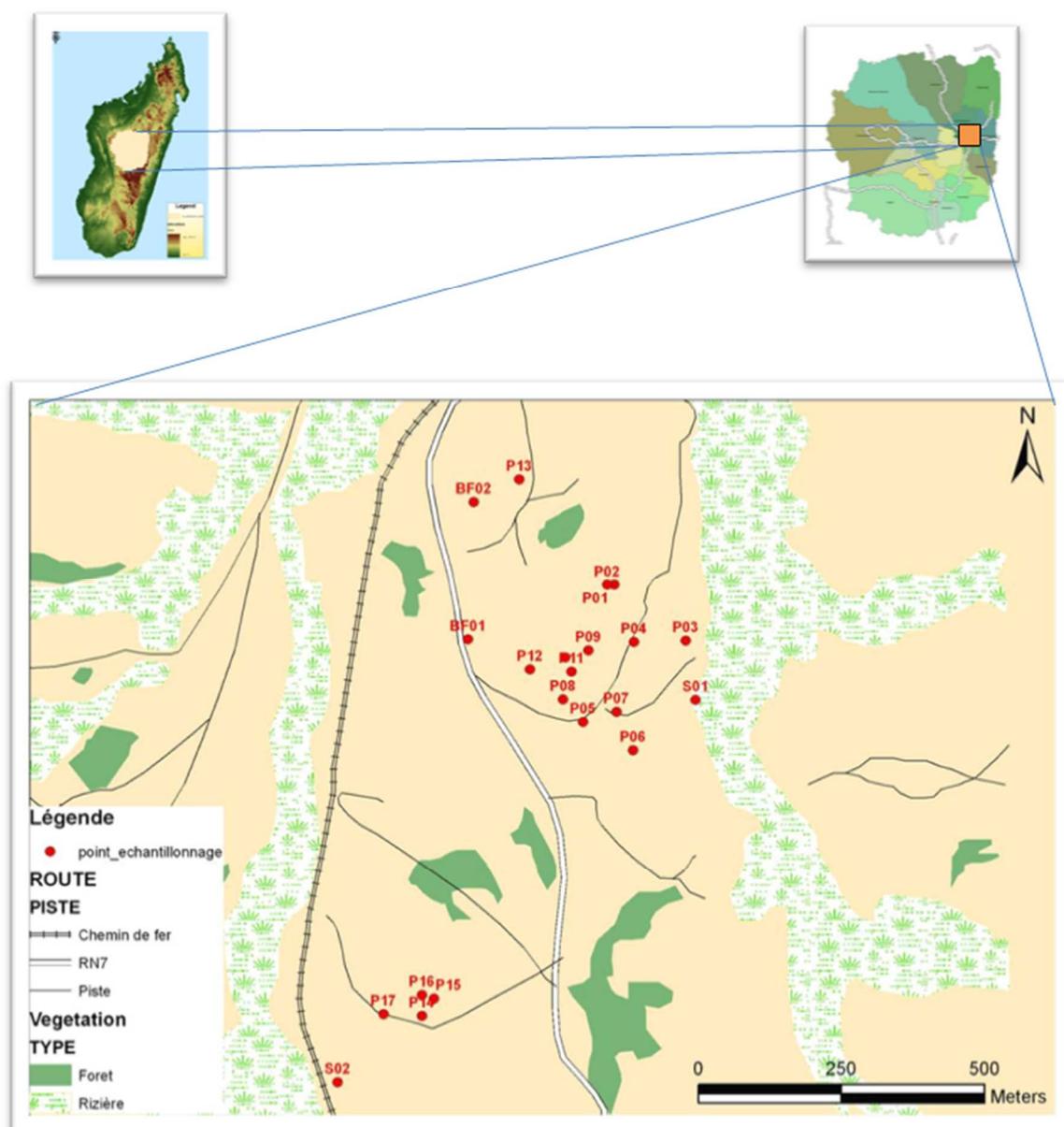


Figure 11: Localisation géographique de la zone d'étude Source : Google earth et BD500 (FTM) modifiée

VI.1.3. Condition et stockage de l'échantillon [23]

Les compositions des échantillons d'eau sont susceptibles de se modifier plus ou moins rapidement par suite des réactions physiques, chimiques ou biologiques qui peuvent avoir lieu dans le flacon dans le laps de temps qui sépare le prélèvement et l'analyse. Le conditionnement et le stockage de l'échantillon selon les bonnes pratiques permettent de mieux les conserver jusqu'au moment de l'analyse au laboratoire.

Avant de remplir les bouteilles d'échantillonnage, tous les échantillons sont filtrés à l'aide des filtres en cellulose de porosité de 0,45 µm, on a attendu quelques minutes pour qu'elles soient vraiment représentatives, Les échantillons ont été prélevés et stockés dans des flacons en polyéthylène de 50 ml et remplis à ras bord pour l'analyse chimique (anion et cation séparément). Un tel remplissage permet d'éviter toute perte par évaporation et diffusion, ou échange avec le milieu environnant [23]. Pour l'analyse cationique, trois gouttes d'acide nitrique concentré ont été ajoutées in-situ pour prévenir l'adsorption des cations sur la paroi des flacons [23]. Chaque flacon est clairement identifié à l'aide d'étiquettes adhésives indiquant la date, le nom du point de prélèvement, le code de l'échantillon et la nature de l'analyse pour laquelle l'échantillon est destiné.

Le stockage des échantillons est la dernière étape de l'échantillonnage. Les échantillons sont maintenus au frais pour qu'il n'y a pas réaction physique. Ils sont préservés totalement contre la lumière, les poussières et les salissures. La température de conservation de l'échantillon sur le terrain est inférieure à 15°C et entre 3 et 5°C au laboratoire.

VI.1.4. Précaution pour l'échantillonnage

Les flacons sont rincés avec l'eau à échantillonner. Ils sont remplis à ras bord afin d'éliminer les bulles d'air, d'empêcher des éventuelles réactions post prélèvement par oxydation par l'air et d'éviter une quelconque contamination.

VI.1.5. Mesure in situ

La mesure des paramètres physiques de l'eau s'effectue sur le terrain parce que les conditions physiques et chimiques des échantillons durant le transport peuvent changer. Ainsi, la température (T), la conductivité électrique (CE), l'oxygène dissous (OD), le potentiel d'hydrogène (pH), le potentiel redox (Eh), les teneurs en solides totaux dissous (STD) et l'alcalinité ont été mesurés in situ.

Le multimètre HACH HQd/IntelliCAL est utilisé pour mesurer la température, la conductivité électrique(CE), l'oxygène dissous(OD), le potentiel en hydrogène (pH), le potentiel redox(Eh) et les solides dissous totaux(STD) des échantillons prélevés.

L'alcalinité est mesurée par la méthode de titration. Cette méthode se base sur l'utilisation d'indicateurs colorés tels que la phénolphtaléine et le vert de bromocrésol dans 100 ml d'échantillon d'eau. Comme l'alcalinité représente la quantité des ions de carbonates inorganiques présents dans la solution, la concentration d'ions bicarbonate (HCO_3^-) est déterminée à partir de celle-ci. L'alcalinité est exprimée en tant que concentration équivalente de carbonate de calcium (CaCO_3).

VI.1.6. Mesure au laboratoire

L'analyse des ions majeurs anions et cations tels que respectivement les ions nitrate NO_3^- , bicarbonate HCO_3^- , sulfate SO_4^{2-} , chlorure Cl^- et les ions sodium Na^+ , potassium K^+ , calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} a été effectuée en utilisant l'appareil DIONEX ICS-1100. Pour le contrôle qualité, cet appareil a été étalonné avec des solutions standards préparées à partir des solutions mères. Puis les échantillons ont été filtrés avec des filtres millipores de 0,2 μm avant d'être analysés.

VI.1.6.1. Appareillage [24]

Les principaux composants du système de chromatographie ionique DIONEX ICS-1100 sont :

- Les réservoirs en plastique d'éluant de capacité 2 litres (1)
- La pompe (2)
- L'injecteur d'échantillon (3)
- La pré-colonne (4)
- La colonne de séparation (5)
- Le supprimeur (6)
- Le détecteur de conductivité (7)
- Une terminale informatique incluant le logiciel de traitement CHROMELEON (8)



Figure 12 : Système de chromatographie ionique DIONEX ICS 1100

Certains composants du système DIONEX ICS-1100 sont propres à chaque type d'analyse (cationique ou anionique). L'utilisation des composants non appropriés pour une analyse endommagerait l'appareil. C'est dans ce sens qu'une vérification rigoureuse ainsi qu'un système de nettoyage complet du système sont indispensables avant d'inter changer les composants de l'appareil.

Les caractéristiques spécifiques de chaque composant sont reportées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13 : Caractéristiques des composantes spécifiques du système DIONEX ICS-1100 pour l'analyse cationique et anionique [24]

Composantes \ Analyse	Analyse cationique	Analyse anionique
Pré-colonne	IonPac™ CS12A	IonPac™ AS14A
Colonne de séparation	IonPac™ CS12A 4×250mm	IonPac™ AS14A 4×250 mm
Suppresseur	CSRS™ 300 4mm	ASRS™ 300 4mm

VI.1.6.2. Conditions expérimentales

Les conditions expérimentales de l'analyse cationique et anionique sont toutes aussi différentes l'une de l'autre. Ces différences concernent la nature de l'éluant, la température, l'intensité du courant et le volume d'injection.

Tableau 14 : Conditions expérimentales pour l'analyse cationique et anionique [24]

Conditions expérimentales \ Analyse	Analyse cationique	Analyse anionique
Eluant	15 mM H ₂ SO ₄ 98%	8 mM Na ₂ CO ₃
Débit	1 ml/min	
Température	ambiante	30 °C
Intensité du courant	99 mA	43 mA
Volume d'injection	25 µl	10µl

VII- RESULTATS ET INTERPRETATIONS

VII- Résultats et interprétations

VII.1. Présentation et exploitation des résultats

VII.1.1. Validation des résultats

Vingt et un (21) échantillons ont été prélevés à Anjomakely (Région Bongatsara). Les résultats obtenus pour chaque élément majeur dans les échantillons d'eau suivent la loi de l'électroneutralité c'est-à-dire la somme en milliéquivalents par litre (meq/L) des espèces chimiques négatives (anions) doit être égale à la somme en milliéquivalents par litre des espèces chimiques positives (cations), c'est la balance ionique.

Les valeurs des balances ioniques (BI (%)) des échantillons de la nappe phréatique d'Anjomakely sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 15 : Balance ionique des échantillons prélevés dans la zone d'Anjomakely

LIEU DE PRVMNT ET CODE	TYPE	LATITUDE	LONGITUDE	Σ Cations (meq.L ⁻¹)	Σ Anions (meq.L ⁻¹)	BI(%)
ANTSAHALAVA [P01]	PUITS	19°01'59.8" S	047°32'45.3" E	1,11	1,01	4,50
ANTSAHALAVA [P02]	PUITS	19°01'59.8" S	047°32'44.9" E	0,67	0,73	-4,17
ANTSAHALAVA [P03]	PUITS	19°02'03.0" S	047°32'49.6" E	1,08	0,99	4,14
ANTSAHALAVA [P04]	PUITS	19°02'03.1" S	047°32'46.5" E	1,57	1,74	-5,07
ANTSAHALAVA [P05]	PUITS	19°02'07.7" S	047°32'43.5" E	1,34	1,34	-0,01
ANTSAHALAVA [P06]	PUITS	19°02'09.3" S	047°32'46.5" E	0,21	0,23	-4,13
ANTSAHALAVA [P07]	PUITS	19°02'07.1" S	047°32'45.5" E	0,23	0,24	-2,15
ANTSAHALAVA [P08]	PUITS	19°02'06.4" S	047°32'42.3" E	0,70	0,64	4,50
ANTSAHALAVA [P09]	PUITS	19°02'03.6" S	047°32'43.8" E	0,54	0,50	4,16
ANTSAHALAVA [P10]	PUITS	19°02'04.0" S	047°32'42.4" E	0,40	0,41	-1,72
ANTSAHALAVA [P11]	PUITS	19°02'04.8" S	047°32'42.8" E	0,63	0,63	0,12
ANTSAHALAVA [P12]	PUITS	19°02'04.7" S	047°32'40.3" E	0,87	0,79	4,64
ANJOMAKELY(FJKM) [P13]	PUITS	19°01'53.8" S	047°32'39.6" E	2,23	2,07	3,74
MANELO [P14]	PUITS	19°02'24.6" S	047°32'34.0" E	0,41	0,43	-1,84
MANELO [P15]	PUITS	19°02'23.6" S	047°32'34.7" E	0,85	0,80	2,84
MANELO [P16]	PUITS	19°02'23.4" S	047°32'34.0" E	0,55	0,54	1,39
MANELO [P17]	PUITS	19°02'24.5" S	047°32'31.7" E	0,15	0,24	-22,70
ANTSAHALAVA [S01]	SOURCE	19°02'06.4" S	047°32'50.2" E	0,11	0,20	-31,80
MANELO [S02]	SOURCE	19°02'28.4" S	047°32'29.0" E	0,87	0,87	0,11
ANJOMAKELY (BF01)	BORNE FONTAINE	19°02'03.0" S	047°32'36.6" E	0,20	0,19	3,15
ANJOMAKELY(CSBI) [BF02]	BORNE FONTAINE	19°01'55.1" S	047°32'36.9" E	0,15	0,27	-28,20

La balance ionique se fait à partir des concentrations des cations majeurs et anions majeurs de chaque échantillon d'eau, exprimées en meq. L⁻¹. L'analyse est fiable si la balance ionique est au moins $\pm 5\%$ [15].

VII.1.2. Résultats des mesures des paramètres physiques et des analyses chimiques

VII.1.2.1. Paramètres physiques

Les résultats des paramètres physiques des échantillons prélevés dans les puits, les bornes fontaines et les sources sont les suivantes :

✓ Puits :

• Température :

La température est essentielle pour le processus physique et chimique. Elle varie de 21,5 °C à 23,8 °C pour une valeur moyenne de $22,5 \pm 0,5$ °C. Le minimum se trouve sur le point de prélèvement P02 et le maximum sur le point de prélèvement P12.

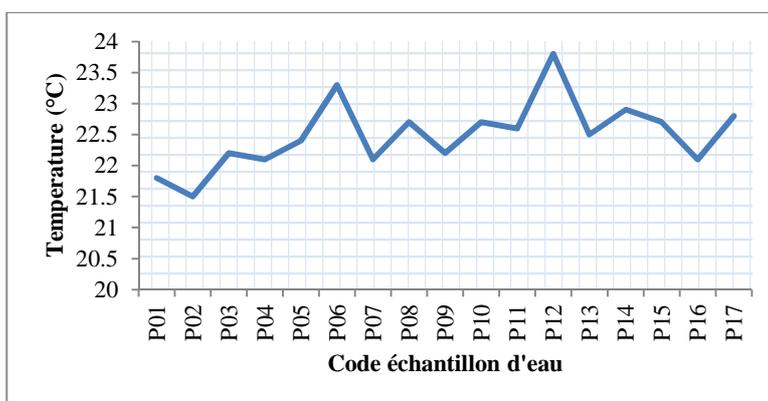


Figure 13: Variation de la température des échantillons d'eau de puits prélevés dans la zone d'étude

• Potentiel d'hydrogène pH :

Pour les eaux de puits traditionnels, le pH varie de 5,16 (point de prélèvement P09) à 7,73 (point de prélèvement P16), avec une valeur moyenne de $5,88 \pm 0,68$.

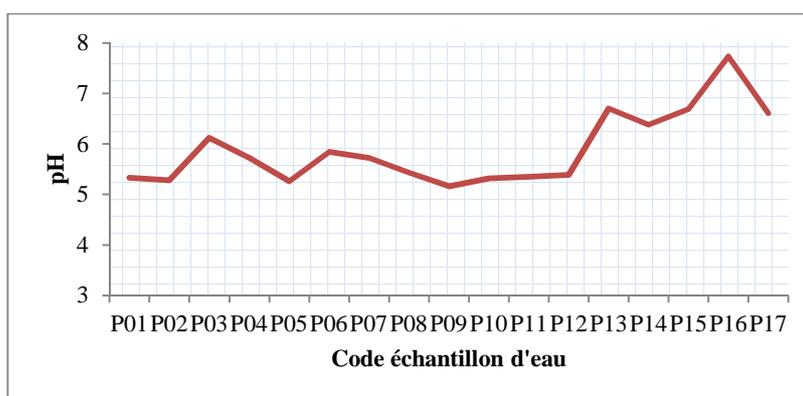


Figure 14: Variation du pH des échantillons d'eau de puits prélevés dans zone d'étude

- *Potentiel redox Eh:*

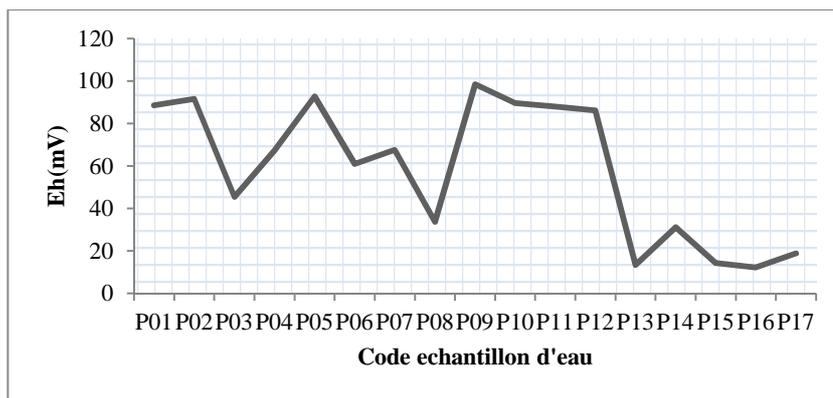


Figure 15: Variation du d'Eh des échantillons d'eau de puits prélevés dans zone d'étude

Pour les eaux de puits traditionnels la valeur d'Eh pour la zone d'étude est toute positive. Elle varie de 12,2mV (point de prélèvement P16) à 98,5mV (point de prélèvement P09), avec une moyenne de 58,85 mV.

- *Conductivité électrique (CE) :*

La valeur maximale est de 177,7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (point de prélèvement P13 de FJKM Anjomakely) tandis que la valeur minimale est de 10,91 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Point de prélèvement P17 à Manelo). La valeur moyenne de la conductivité électrique des eaux de puits est de $63,79 \pm 49 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

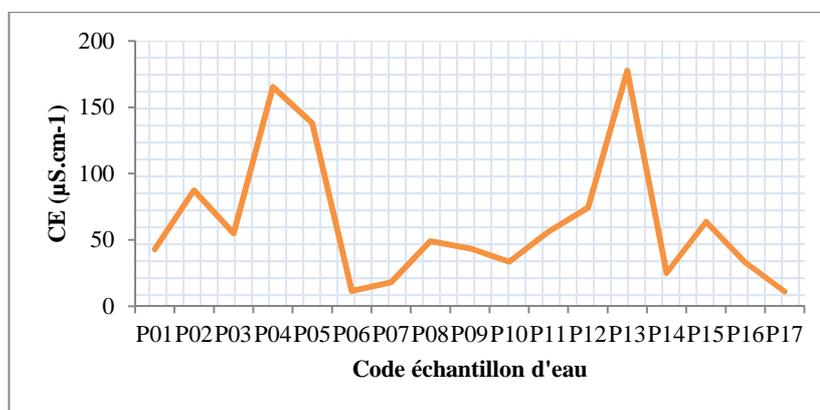


Figure 16: Variation de la CE des échantillons d'eau de puits prélevés dans la zone d'étude

- *Oxygène dissous (OD)*

La valeur maximale de l'OD est évaluée à 7,35 mg. L⁻¹ (point de prélèvement P13) et la valeur minimale 3,46 mg. L⁻¹ (point de prélèvement P03). La moyenne de l'OD pour les puits est de 5,98±2,2 mg. L⁻¹.

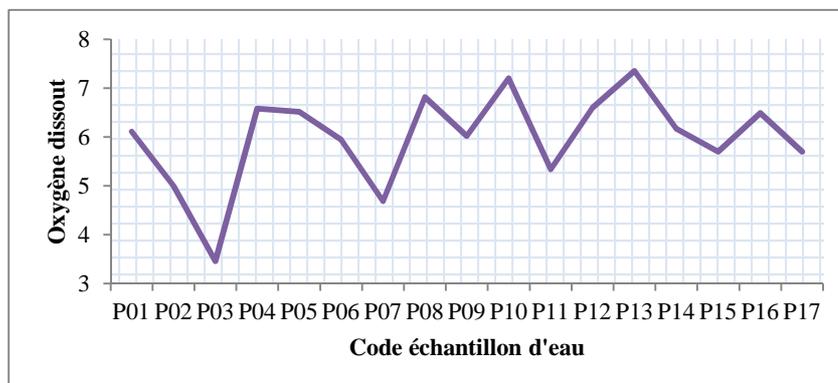


Figure 17: Variation de l'OD des échantillons d'eau de puits prélevés dans la zone d'étude

- ✓ **Sources**

Pour les sources, la température varie entre 22,3°C et 23,6 °C. La température minimale a été relevée à Manelo (S01) et celle maximale a été trouvée à Antsahalava (S02). Le pH varie de 6,04 (S01) à 6,59 (S02). Le potentiel redox varie de 20 mV(S02) à 49,7 mV(S01) mV pour les sources. La conductivité électrique maximale est de 59,2 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (S02) et celle minimale est de 11,65 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (S01). Les taux d'oxygène dissous pour les S01 est de 2,15 mg. L⁻¹, celle de la source S02 est de 5,78 mg. L⁻¹.

Tableau 16: Paramètres physiques pour les sources

	pH	Eh (mV)	CES ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	T° (°C)	OD (mg.L ⁻¹)
S01	6.04	49.7	11.65	22.3	2.15
S02	6.59	20	59.2	23.6	5.78

- ✓ **Bornes fontaines**

Pour les Bornes fontaines (BF), la température varie entre 25,2°C et 25,5 °C. La température minimale a été relevée BF02 et celle maximale a été trouvée BF01. Le pH varie de 6,47 (BF02) à 6,75 (BF01). Le potentiel redox varie de 11 mV(BF01) à 26,9 mV(BF02) mV. La conductivité électrique maximale est de 14,39 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (BF01) et celle minimale est de 12,87 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (BF02). Les taux d'oxygène dissous pour les BF01 est de 7,27 mg. L⁻¹ et celle de la source BF02 est de 7,14 mg/L.

Tableau 17: Paramètres physiques pour les bornes fontaines

	pH	Eh (mV)	CES ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	T° (°C)	OD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
BF01	6.75	11	14.39	25.5	7.27
BF02	6.47	26.9	12.87	25.2	7.14

VI.1.2.2. Résultats des paramètres chimiques :

La fiabilité des résultats des paramètres chimiques est basée sur le calcul de la balance ionique BI qui doit être compris entre -5 et 5 % [15]. Pour les échantillons P17, S01 et BF02 présentent un déséquilibre ionique, les erreurs sont -22,70%, -31,80% et -28,20%, respectivement d'après le tableau 15.

➤ **Anions majeurs**

Les anions majeurs sont les ions : HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} .

✓ **Puits**

Pour les puits, les concentrations en anions majeurs (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) sont détaillées dans le tableau suivant avec indication statistique de chaque paramètre :

Tableau 18: Teneurs des anions majeurs des eaux de puits en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

	HCO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cl^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SO_4^{2-} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
P01	7,70±0,01	20,14±0,07	30,86±0,11	0,79±0,00
P02	5,12±0,01	12,20±0,20	18,61±0,34	0,25±0,00
P03	30,38±0,01	2,72±0,04	7,08±0,25	0,61±0,02
P04	12,08±0,01	13,07±0,10	80,91±0,87	0,86±0,00
P05	7,56±0,01	13,03±0,00	52,17±0,53	0,48±0,00
P06	3,17±0,01	2,11±0,09	6,58±0,16	0,54±0,01
P07	6,22±0,01	1,53±0,00	4,99±0,06	0,52±0,01
P08	10,07±0,01	2,26±0,10	28,09±0,57	0,21±0,00
P09	1,83±0,01	7,75±0,34	15,16±0,68	0,25±0,01
P10	1,83±0,01	3,66±0,04	16,86±0,13	0,35±0,01
P11	2,93±0,01	8,82±0,50	17,27±0,81	0,19±0,00
P12	3,17±0,01	6,39±0,13	32,19±0,70	2,09±0,04
P13	23,91±0,01	44,19±0,20	52,31±0,80	0,72±0,00
P14	16,23±0,01	2,47±0,10	4,14±0,10	1,14±0,01
P15	35,14±0,01	2,23±0,01	9,08±0,05	0,90±0,01
P16	24,40±0,01	2,21±0,06	3,89±0,11	0,54±0,00
P17	6,34±0,01	2,56±0,53	3,23±0,44	0,71±0,09
Moyenne	11,65	8,67	22,55	0,66
Ecart-type	10,56	10,62	21,70	0,46
Médiane	7,56	3,66	16,86	0,54

- L'échantillon d'eau de puits P13 a une valeur maximum en Cl^- par rapport aux autres puits, avec une concentration de 44,19 mg. L⁻¹. Sa concentration en NO_3^- est de 52,31 mg. L⁻¹ et dépasse largement la valeur limite (50 mg. L⁻¹) selon OMS. Outre les eaux de puits P04 et celle de puits P05 ont aussi des teneurs en nitrates supérieures à la valeur limite. Elles sont de 80,91 mg. L⁻¹ et 52, 17 mg. L⁻¹ respectivement.
- Les concentrations en SO_4^{2-} pour la totalité des puits sont faibles et sont très inférieures à la valeur maximum admissible (250 mg. L⁻¹) [18].
- L'échantillon d'eau de puits P15 présente la valeur maximum en HCO_3^- , sa valeur est de 35,14 mg. L⁻¹. Pour le puits P12 présente la valeur maximum en SO_4^{2-} , sa valeur est de 2,09 mg. L⁻¹, mais ces concentrations restent inférieures aux valeurs maxima admissibles.

✓ Sources

Les concentrations en HCO_3^- pour les eaux de sources sont de 6,71 mg. L⁻¹ (S01) et 42,58 mg. L⁻¹ (S02). Les teneurs en ions Cl^- sont 1,73 mg. L⁻¹(S01) et 4,46 mg. L⁻¹(S02). Quant aux ions NO_3^- , les teneurs sont 2,57 mg. L⁻¹(S01) et 1,88 mg. L⁻¹(S02). Les teneurs en ions SO_4^{2-} sont 0, 22mg.L⁻¹(S01) et 0,77 mg. L⁻¹(S02).

Tableau 19: Teneurs des anions majeurs des eaux de sources en mg.L⁻¹

	HCO_3^- (mg.L ⁻¹)	Cl^- (mg.L ⁻¹)	NO_3^- (mg.L ⁻¹)	SO_4^{2-} (mg.L ⁻¹)
S01	6,71±0,01	1,73±0,04	2,57±0,03	0,22±0,00
S02	42,58±0,01	4,46±0,14	1,88±0,02	0,77±0,03

✓ Bornes fontaines

Les concentrations en HCO_3^- pour les eaux des Bornes fontaines sont de 10,61 mg. L⁻¹ (S01) et 14,64 mg. L⁻¹ (S02). Les teneurs en ions Cl^- sont 0,27 mg. L⁻¹(S01) et 0,28 mg. L⁻¹(S02). Quant aux ions NO_3^- , les teneurs sont 0,21 mg. L⁻¹(S01) et 0,57 mg. L⁻¹(S02). Les teneurs en ions SO_4^{2-} sont 0,1 mg. L⁻¹(S01) et 0,55 mg. L⁻¹(S02).

Tableau 20: Teneurs des anions majeurs des bornes fontaines en mg.L⁻¹

	HCO_3^- (mg.L ⁻¹)	Cl^- (mg.L ⁻¹)	NO_3^- (mg.L ⁻¹)	SO_4^{2-} (mg.L ⁻¹)
BF01	10,61±0,01	0,27±0,11	0,21±0,08	0,1±0,08
BF02	14,64±0,01	0,28±0,10	0,57±0,05	0,55±0,05

En général, les concentrations en anions majeurs des 3 types d'ouvrage sont inférieures aux valeurs maxima admissibles fixées par les normes de potabilité des eaux à Madagascar [18] à l'exception de P04, P05 et P13 qui ont des concentrations en NO_3^- élevées dépassant la valeur maximum.

➤ **Les cations majeurs**

Les cations majeurs sont les ions Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} .

✓ **Puits :**

Pour les puits, les concentrations en cations majeurs (en mg. L^{-1}) sont détaillées dans le tableau suivant avec indication statistique de chaque paramètre.

Tableau 21: Teneurs des cations majeurs des eaux de puits en mg.L^{-1}

	Na^+ (mg.L ⁻¹)	K^+ (mg.L ⁻¹)	Mg^{2+} (mg.L ⁻¹)	Ca^{2+} (mg.L ⁻¹)
P01	8,27±0,04	3,40±0,02	1,53±0,01	12,54±0,07
P02	8,23±0,01	2,48±0,00	2,83±0,00	0,46±0,04
P03	1,47±0,00	3,21±0,00	0,41±0,01	11,89±0,00
P04	15,19±0,03	7,41±0,00	5,33±0,01	5,71±0,01
P05	17,70±0,04	17,90±0,05	1,57±0,07	0,62±0,04
P06	2,02±0,01	2,26±0,01	0,31±0,00	0,82±0,00
P07	1,72±0,00	2,11±0,00	0,42±0,01	1,29±0,00
P08	5,39±0,00	4,93±0,03	2,21±0,02	1,53±0,00
P09	9,73±0,01	2,19±0,00	0,39±0,04	0,63±0,01
P10	6,98±0,01	1,65±0,00	0,32±0,00	0,55±0,02
P11	12,42±0,01	1,94±0,00	0,33±0,00	0,26±0,04
P12	7,76±0,03	3,58±0,01	2,10±0,01	5,45±0,02
P13	13,05±0,00	6,17±0,00	5,24±0,01	21,67±0,01
P14	1,46±0,00	2,28±0,01	2,64±0,01	1,48±0,00
P15	1,78±0,00	5,72±0,00	0,66±0,02	11,53±0,00
P16	1,48±0,00	3,81±0,05	0,32±0,00	7,30±0,00
P17	1,07±0,01	1,75±0,01	0,44±0,00	0,54±0,06
Moyenne	6,81	4,28	1,59	4,96
Ecart-type	5,41	3,90	1,65	6,16
Médiane	6,98	3,21	0,66	1,48

- On remarque une teneur élevée en Na^+ et en K^+ (17,70 mg. L^{-1} et 17,90 mg. L^{-1} , respectivement). Toutefois, ces concentrations sont inférieures aux valeurs limites acceptables, 250 mg. L^{-1} pour Na^+ , 50 mg. L^{-1} pour Mg^{2+} et 200 mg. L^{-1} pour Ca^{2+} [18].
- Les concentrations des cations majeurs de la totalité des puits sont toutes inférieures aux valeurs limites de potabilité des eaux à Madagascar [18].

✓ Sources

L'eau de source S01 à une concentration en Na^+ égale à $0,75 \text{ mg. L}^{-1}$ et celle de S02 est égale à $9,89 \text{ mg. L}^{-1}$. La concentration en K^+ de S01 est largement inférieure à celle de S02, elles sont $1,06 \text{ mg. L}^{-1}$ et $2,77 \text{ mg/L}$, respectivement. Les concentrations en Mg^{2+} de S01 et S02 sont $0,39 \text{ mg. L}^{-1}$ et $1,60 \text{ mg. L}^{-1}$, respectivement. Les teneurs en Ca^{2+} sont $0,29 \text{ mg. L}^{-1}$ et $4,83 \text{ mg. L}^{-1}$, respectivement.

Tableau 22: Teneurs des cations majeurs des eaux de sources en mg.L^{-1}

	$\text{Na}^+ (\text{mg.L}^{-1})$	$\text{K}^+ (\text{mg.L}^{-1})$	$\text{Mg}^{2+} (\text{mg.L}^{-1})$	$\text{Ca}^{2+} (\text{mg.L}^{-1})$
S01	$0,75 \pm 0,19$	$1,06 \pm 0,10$	$0,39 \pm 0,00$	$0,29 \pm 0,01$
S02	$9,89 \pm 0,01$	$2,77 \pm 0,00$	$1,60 \pm 0,01$	$4,83 \pm 0,00$

✓ Bornes fontaines

L'eau de Bornes fontaines BF01 à une concentration en Na^+ égale à $1,87 \text{ mg. L}^{-1}$ et celle de BF02 est égale à $1,53 \text{ mg. L}^{-1}$. La concentration en K^+ de BF01 est largement égale à celle de BF02, elles sont $1,20 \text{ mg. L}^{-1}$ et $1,21 \text{ mg/L}$, respectivement. Les concentrations en Mg^{2+} de BF01 et BF02 sont $0,31 \text{ mg. L}^{-1}$ et $0,21 \text{ mg. L}^{-1}$, respectivement. Les teneurs en Ca^{2+} sont $1,24 \text{ mg. L}^{-1}$ et $0,73 \text{ mg. L}^{-1}$, respectivement.

Tableau 23: Teneurs des cations majeurs des eaux de bornes fontaines en mg.L^{-1}

	$\text{Na}^+ (\text{mg.L}^{-1})$	$\text{K}^+ (\text{mg.L}^{-1})$	$\text{Mg}^{2+} (\text{mg.L}^{-1})$	$\text{Ca}^{2+} (\text{mg.L}^{-1})$
BF01	$1,87 \pm 0,01$	$1,20 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,00$	$1,24 \pm 0,01$
BF02	$1,53 \pm 0,00$	$1,21 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,01$	$0,73 \pm 0,00$

Les résultats obtenus précédemment montrent que les concentrations en cations majeurs des trois types d'ouvrage sont toutes inférieures aux valeurs maxima admissibles fixées par les normes de potabilité des eaux à Madagascar. [18]

VII.2. Interprétation des paramètres physiques

Les eaux souterraines présentent de manière générale de bonnes caractéristiques sur le plan organoleptique. C'est d'ailleurs sur cette base que les populations se fondent pour apprécier la bonne ou mauvaise qualité de l'eau. Pour cela, on se concentre sur les paramètres physiques, c'est-à-dire étude sur la température, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité électrique.

✓ *Température*

Les valeurs de la température des eaux souterraines ont une moyenne de 22,49°C et avec un écart type de 0,55. Les eaux de source ont pour leur part avec une moyenne de 22,95°C et un écart type de 0,92. Pour les bornes fontaines ont une moyenne de 25.35°C et un écart type de 0,21 vu leur caractéristique à ciel ouvert. Ce qui montre l'homogénéité des eaux souterraines présentes dans la zone d'études. Donc, les eaux souterraines prélevées pourraient être captées dans le même aquifère.

✓ *pH*

Les valeurs du potentiel hydrogène (pH) des échantillons d'eau de la zone d'étude varient entre 5,16 à 6,73. Ce qui montre que tous les échantillons d'eaux souterraines ont de pH acide. La valeur du pH acceptable dans les normes de potabilité des eaux varie entre 6,5 et 9 fixée par la norme de l'OMS. Pour cela, la majorité des échantillons ont la valeur de pH inférieure à la limite. En effet, l'acidité des eaux indique les échantillons d'eaux souterraines prélevées sont pollués dont leurs sources peuvent être l'infiltration des pluies acides ou bien d'autres facteurs comme l'utilisation des pesticides pour l'agriculture.

✓ *Oxygène dissous*

Les teneurs en oxygène dissous des échantillons reflètent la nature libre de la nappe souterraine de la zone. En effet, les nappes libres présentent généralement des teneurs en oxygène dissous de l'ordre de 5 à 10 mg/L à l'exception des zones humides [25]. En fait, la valeur minimale de l'oxygène dissous pour la potabilité de l'eau est de 2mg/L. Les eaux de P03, P07, P10 et S01 présentent un taux d'oxygène dissous assez faible ($OD < 5 \text{ mg. L}^{-1}$), celui-ci pouvant être consommé par l'oxydation de la matière organique par la présence d'une activité bactérienne.

✓ *Conductivité électrique*

Les conductivités électriques des échantillons varient entre 11 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ et 178 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. La conductivité électrique renvoie de manière générale à une minéralisation faible et moyenne ($CE < 200 \mu\text{S.cm}^{-1}$). Les valeurs du $CE > 100 \mu\text{S.cm}^{-1}$ aux puits P04, P05 et P13, pourraient s'expliquer par la dissolution de certains minéraux dans les ouvrages d'où sont issus les différents échantillons d'eau. La minéralisation de la zone d'étude est classée faible : la valeur de la conductivité électrique est inférieure à 200 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (tableau 5). La valeur maximale pour la conductivité est de 178 $\mu\text{S.cm}^{-1}$.

VII.3 Interprétation des paramètres chimiques

Le logiciel Diagramme (Roland SIMLER, 2015) et AquaChem version 2011.1.40 sont utilisés pour l'interprétation des données chimiques. Pour la méthodologie, pour que les résultats d'analyse soient acceptables, on fixe l'écart entre nombres de cations et anions dans l'intervalle de -5 et +5 %. Parmi les 17 puits, le puits P17 ne correspond pas dans l'intervalle cité précédemment ainsi que pour la source S01 et la borne fontaine BF02. Ils représentent respectivement un excès d'anion de : -22%, -31% et de - 28%. Le grand écart de la balance ionique peut être dû à une fausse manipulation sur le dosage de l'alcalinité sur terrain. Mais en général, le pourcentage des échantillons n'ayant pas de balance ionique comprise entre -5% à 5% est minime donc on peut accepter que la procédure d'analyse soit fiable.

Cependant, selon les paramètres physiques et la localisation ; on a divisé en 4 groupes les échantillons prélevés composé des puits A, des puits B, des sources et les bornes fontaines. Les puits A et puits B sont séparés par la localisation : les puits A se trouvent au Nord de la zone d'étude et les puits B se trouvent au sud de la zone d'étude c'est-à-dire la zone d'étude c'est le Fonkotany d'Anjomakely. Mais pour le puits A, il est divisé en puits A1 et en puits A2 à cause de différent valeur de la conductivité électrique. Pour les puits A1, la Conductivité Electrique est inférieure à $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et pour les puits A2, la Conductivité Electrique est supérieure à $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

VII.3.1. Etude de la minéralisation

VII.3.1.1. Diagramme de piper

Le diagramme de Piper est utilisé pour identifier les différents faciès chimiques des eaux prélevées dans la zone d'étude.

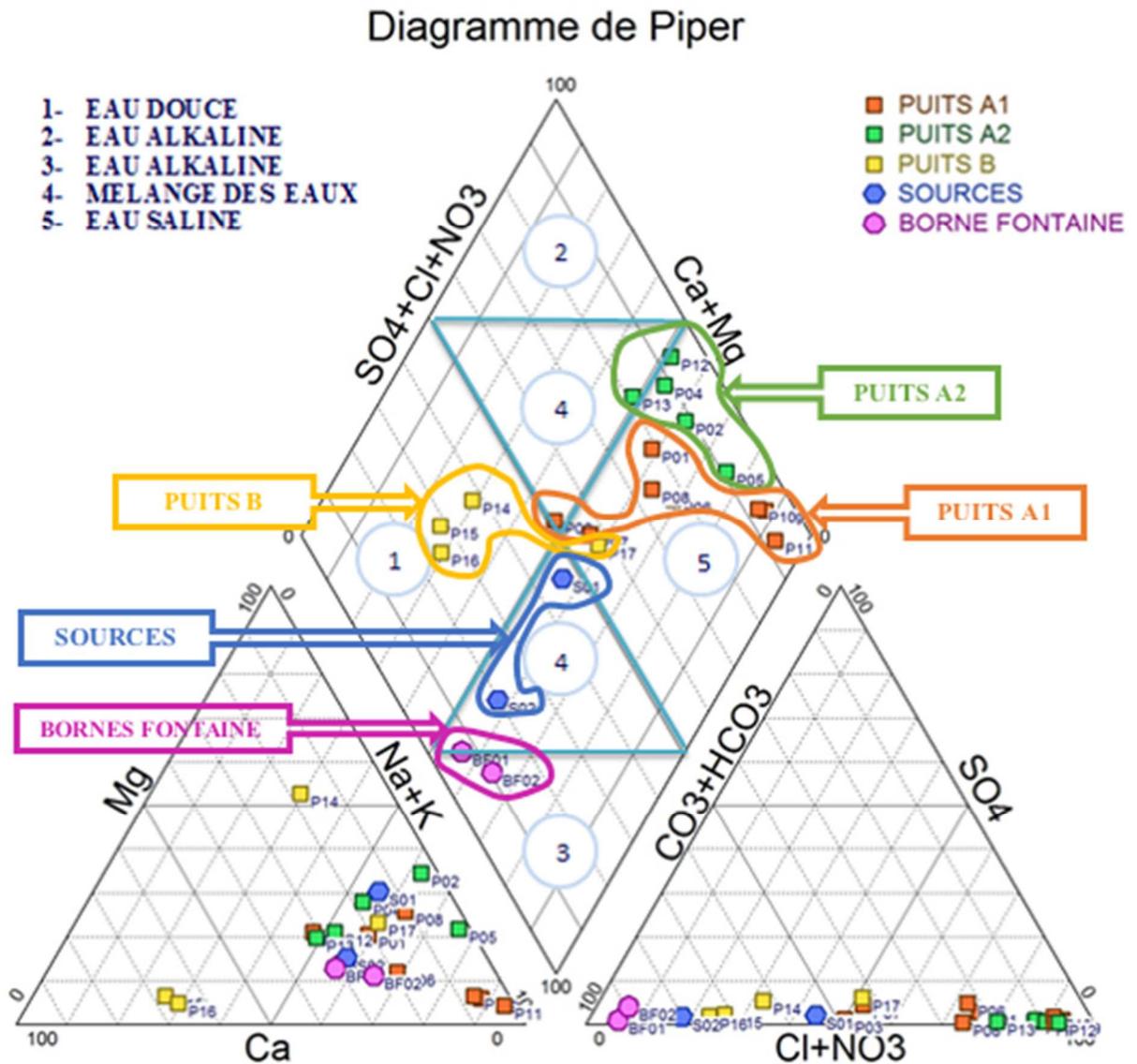


Figure 18: Diagramme de Piper des échantillons d'eaux prélevées dans la zone d'étude
 (Source : Logiciel Diagramme)

Les eaux de puits du groupe puits A1 ont un faciès chimique de type Na-Mg-NO₃-Cl. Les eaux de puits du groupe puits A2 ont un faciès chimique de type Na-NO₃-Cl avec un STD inférieur à 500mg.L⁻¹ (STD ≤ 500mg.L⁻¹)

Les eaux de puits du groupe puits B, le faciès chimique est de type Ca-HCO₃, Mg-HCO₃ et Na-K-HCO₃-Cl-NO₃. Elles sont donc classées « eaux avec un faible taux de minéralisation », par contre les eaux de type Na-K-HCO₃-Cl-NO₃ sont « matures » et plus minéralisées.

Les sources, ont un faciès chimique de type Na-Ca-HCO₃ correspondant à des eaux assez douces avec un taux de minéralisation moins élevé.

VII.3.1.2. Diagramme de Schoëller

Les concentrations en ions majeurs des 4 types d'ouvrage sont reportées sur des graphiques à échelle logarithmique. Les eaux de puits et de sources sont groupées puis réparties en 4 groupes suivant les valeurs de CE et le faciès chimique des eaux :

✓ Puits A1:

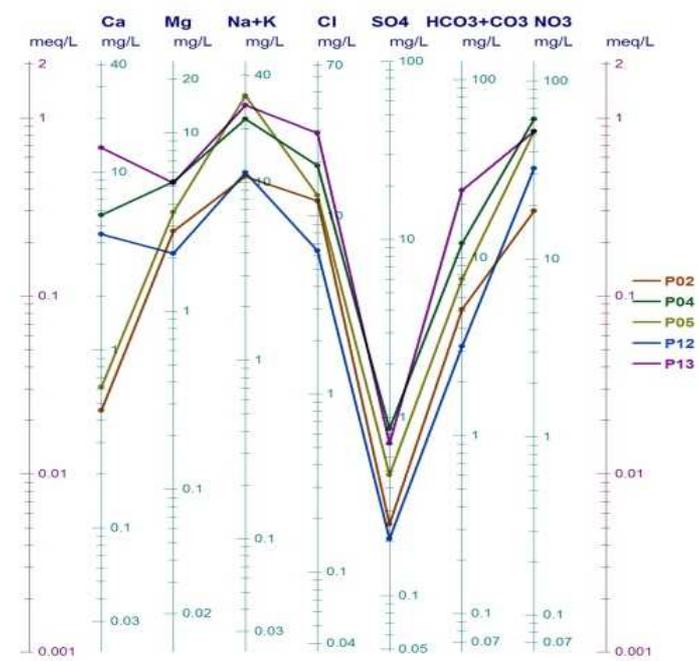


Figure 19: Diagramme de Schoëller des échantillons d'eaux pour le puits A1

Ces faciès chimiques montrent que le sodium est le cation dominant. Le chlorure et le nitrate sont les anions dominants qui sont produits par des activités anthropiques. Cela proviendrait de l'utilisation des latrines situées près du puits et des bétails. L'origine de l'ion sodium peut être expliquée par l'altération des substances minérales dissoutes tel que le mica feldspath et le quartz car le pH des eaux est légèrement inférieur à 6. Une autre suggestion pour l'origine de l'ion Na est le phénomène d'échange des cations étant donné que la formation géologique est composée d'argile, cette hypothèse pourra être justifiée dans le paragraphe suivant en utilisant le graphe de corrélation entre l'ion Ca et l'ion Na.

✓ Puits A2

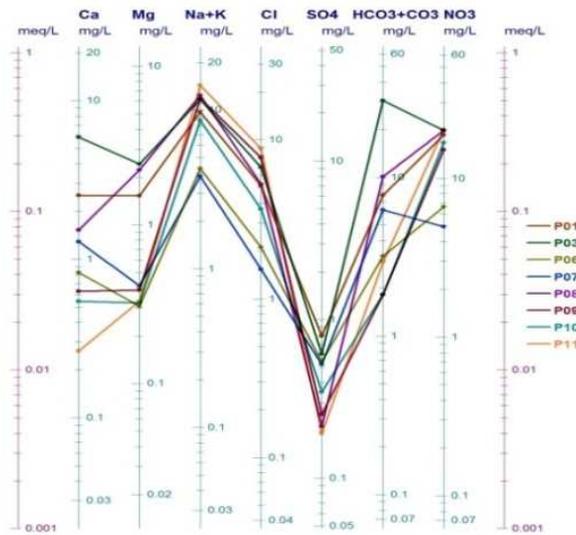


Figure 20: Diagramme de shoëller pour le puits A2

Ces eaux ont la même caractéristique chimique avec les eaux du groupe A1 mais leur concentration en nitrate est plus élevée. Les faciès chimiques avec la dominance de STD montrent que les eaux du puits sont assez fraîches. Puisque ces eaux se trouvent en haute altitude, donc elles sont rechargées directement à partir de la précipitation et une interaction entre l'eau et les composés des sels minéraux dissouts provoquent l'abondance ionique en calcium dans les échantillons d'eaux. Les autres qui sont dominés par le sodium sont beaucoup plus évolués et ayant réagi avec les substances minérales d'origine anthropiques. Elles sont justifiées par la corrélation entre les ions Na, Cl et NO_3^- .

✓ Puits B

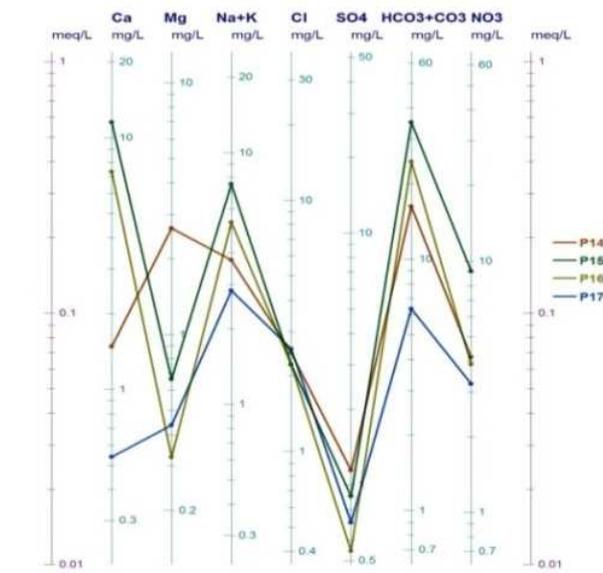


Figure 21: Diagramme de Schoëller pour le puits B

Pour les eaux de puits du groupe B, les faciès chimiques des eaux sont respectivement de type Ca-HCO₃, Mg-HCO₃ et Na-K-HCO₃-NO₃-Cl. Les eaux avec dominance en ion calcium et magnésium sont plus récentes parce qu'elles sont moins profondes par rapport à l'autre dominée par le sodium. Le dernier type d'eau est déjà affecté par la contamination des substances d'origine anthropique aussi.

✓ *Source*

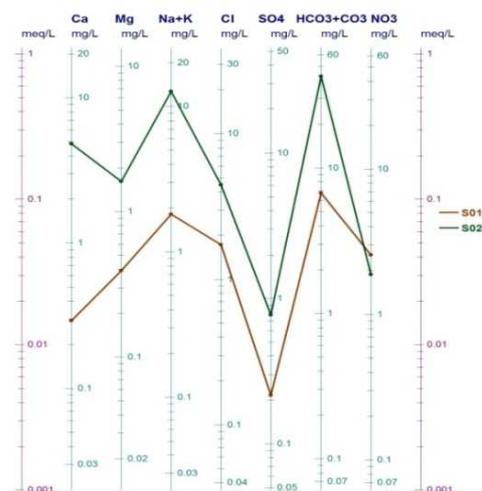


Figure 22: Diagramme de shoëller pour les Sources

Les eaux prélevées dans les deux sources sont moins minéralisées avec une dominance des cations Na⁺ et Ca⁺⁺. La dominance de l'ion bicarbonate dans les échantillons montre qu'elles sont fraîches. Donc, l'origine des ions Na et Ca peut être due à la dissolution des substances minérales riches en Na et Ca dans la roche métamorphique.

✓ *Borne fontaine*

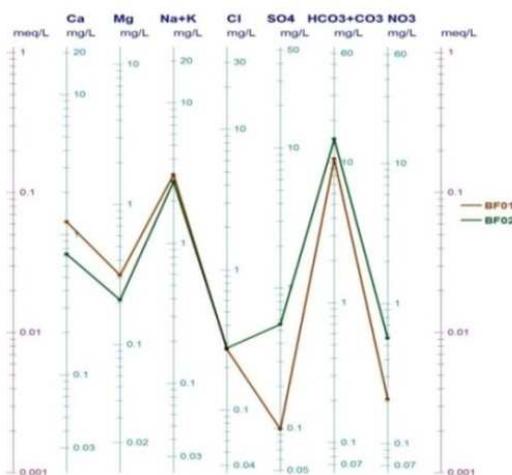


Figure 23: Diagramme de shoëller pour les bornes fontaines

Pour les bornes fontaines, l'eau présente un faciès chimique de type Ca-Na-HCO₃

VII.3.2. Corrélation entre ions majeurs et CE

- Puits A1

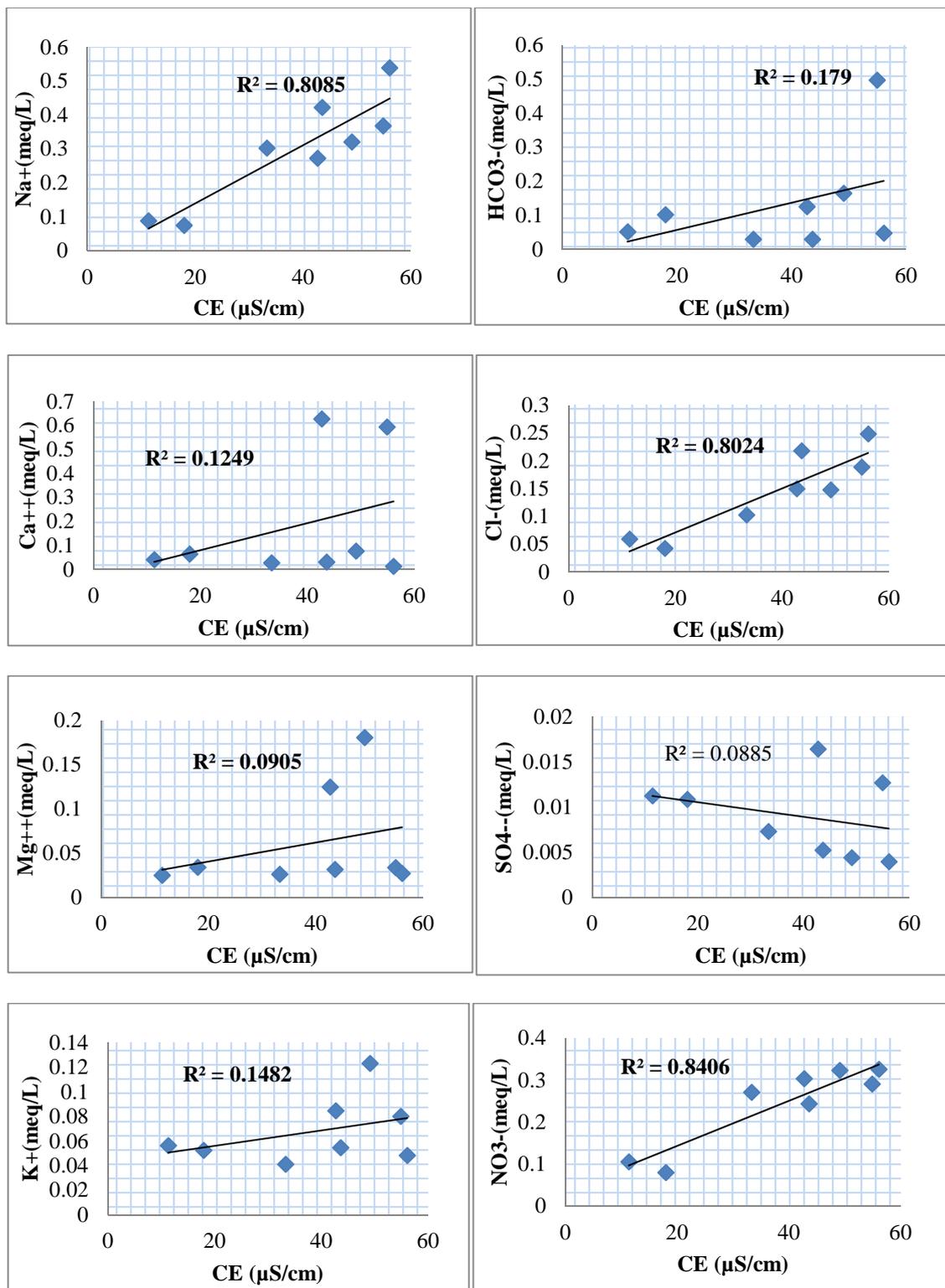


Figure 24: Corrélation entre ions majeurs et ce pour le puits A1

✓ Puits A2

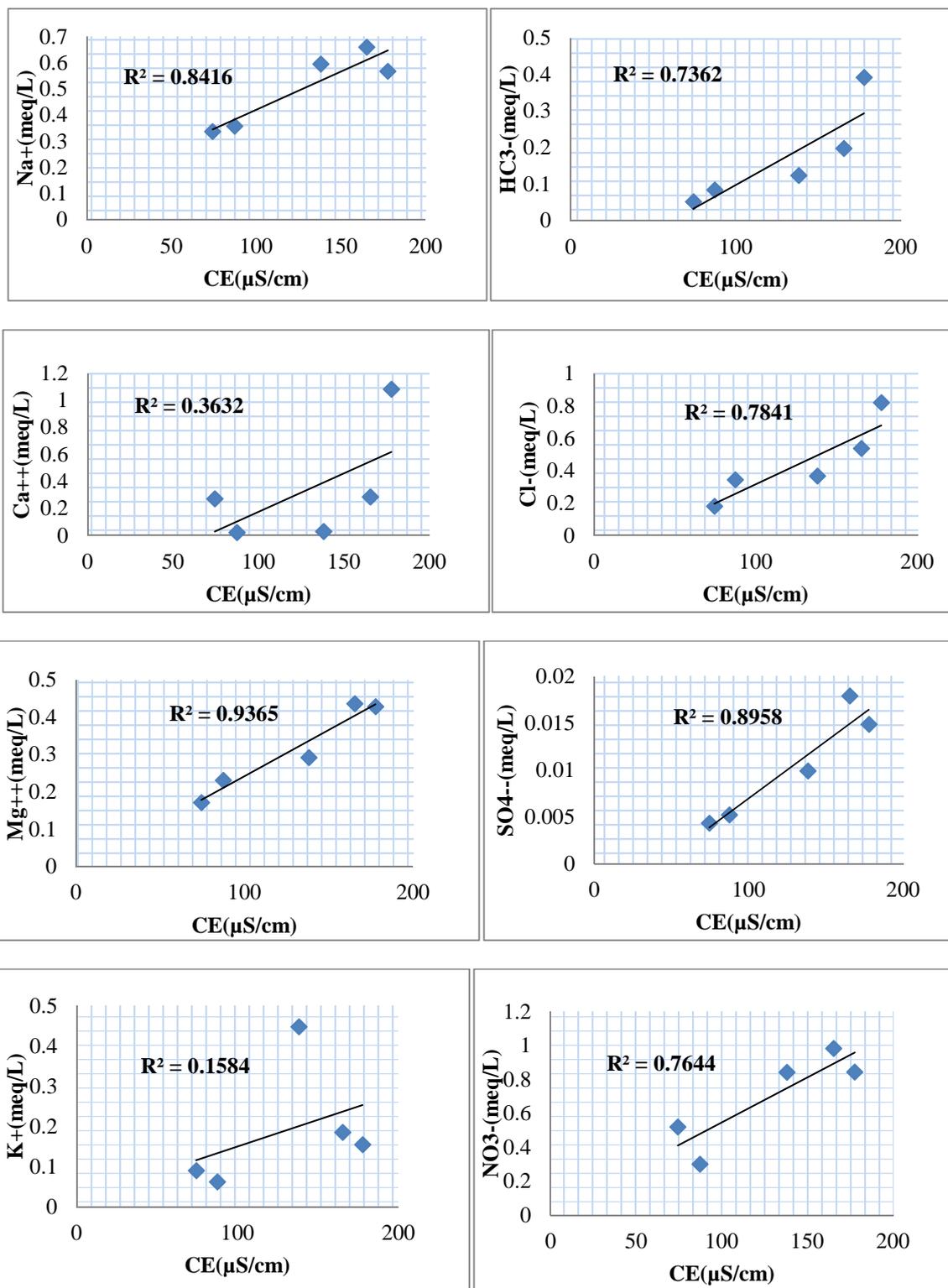


Figure 25: Corrélation entre ions majeurs et ce pour le puits A2

✓ Puits B

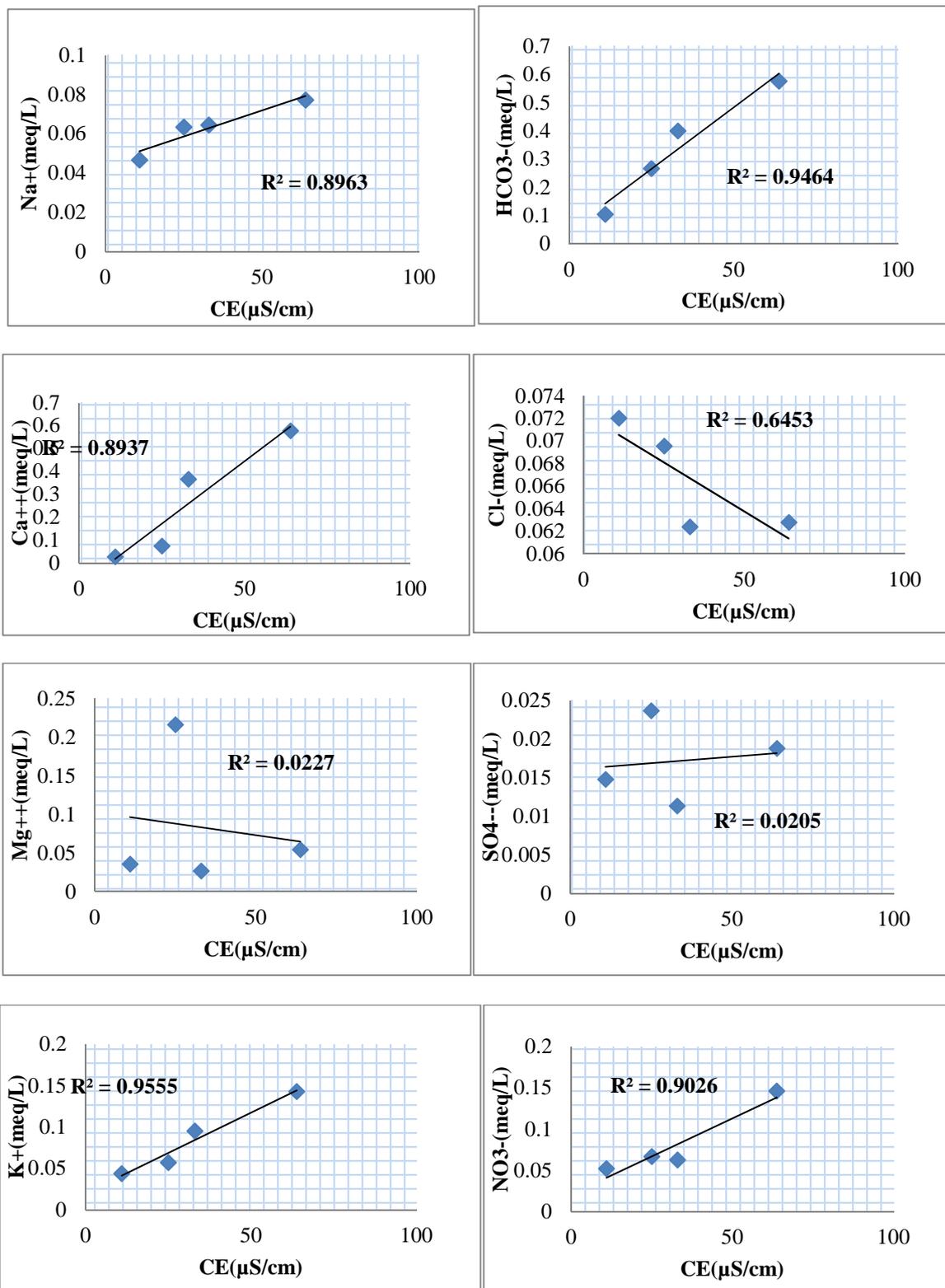


Figure 26: Corrélation entre ions majeurs et CE pour le puits B

- Pour les eaux de *puits A1*, il y a une forte corrélation positive entre l'ion sodium et la conductivité électrique ($R^2=0,8085$), l'ion chlorure et la conductivité électrique ($R^2=0,8024$) et l'ion nitrate et la conductivité électrique ($R^2=0,8406$) d'après la figure 24. Donc ces ions entrent dans le processus de minéralisation des eaux. Par contre, la réaction conduisant à la minéralisation des eaux ne prend pas compte de l'ion calcium ($R^2=0,1249$), l'ion sulfate ($R^2=0,0885$), l'ion potassium ($R^2=0,1482$), l'ion magnésium ($R^2=0,0905$) et l'ion HCO_3 ($R^2=0,179$).
- Pour les eaux de *puits A2*, il y a une forte corrélation entre l'ion magnésium et la conductivité électrique ($R^2=0,9365$), l'ion sodium et la conductivité électrique ($R^2=0,8416$), l'ion sulfate et la conductivité électrique ($R^2=0,8958$), l'ion chlorure et la conductivité électrique ($R^2=0,7841$), l'ion HCO_3 et la conductivité électrique ($R^2=0,7362$) et l'ion nitrate et la conductivité électrique ($R^2=0,7644$) d'après (figure 27). Donc ces ions entrent dans le processus de minéralisation des eaux. Par contre, l'ion calcium ($R^2=0,3632$) et l'ion potassium ($R^2=0,1584$) n'interviennent pas à la minéralisation des eaux (figure 25).
- ✓ Pour les eaux de *puits B*, il y a une forte corrélation entre l'ion sodium et la conductivité électrique ($R^2=0,8963$), l'ion HCO_3 et la conductivité électrique ($R^2=0,9464$), l'ion calcium et la conductivité électrique ($R^2=0,8937$), l'ion chlorure et la conductivité électrique ($R^2=0,6453$) l'ion potassium et la conductivité électrique ($R^2=0,9555$) et l'ion nitrate et la conductivité électrique ($R^2=0,9026$) d'après (figure 28). Donc ces ions entrent dans le processus de minéralisation. Par contre, l'ion sulfate ($R^2=0,0205$) et l'ion magnésium ($R^2=0,0227$) ne contribuent pas à la minéralisation des eaux (figure 26).

VII.3.2.1. Source de la minéralisation

✓ *Puits A1*

Le graphe entre Na et Cl montre une corrélation positive ($r^2=0,9244$) pour les eaux ayant le type Na-Cl. Cela signifie que ces ions ont la même origine. Si la concentration élevée de l'ion Na proviendrait de la dissolution de NaCl donc le rapport entre ces ions devra être égal à 1. Etant donné que le pH de ces eaux varie de 5,12 à 6,7 et le rapport Na/Cl est très grand, alors nous suggérons que l'ion Na se produit à partir de l'altération des silicates minéraux [27] car il existe des minerais comme le feldspath kaolinite présent dans la zone d'étude. D'ailleurs, le graphe entre Na et Ca (fig. 27) montre un excès de l'ion de sodium par rapport à l'ion Ca^{++} , ceci signifie que c'est l'échange des cations qui est le phénomène probable qui contrôlent la minéralisation des eaux souterraines dans cette zone qui est vérifiée par les faibles valeurs de pH des échantillons.

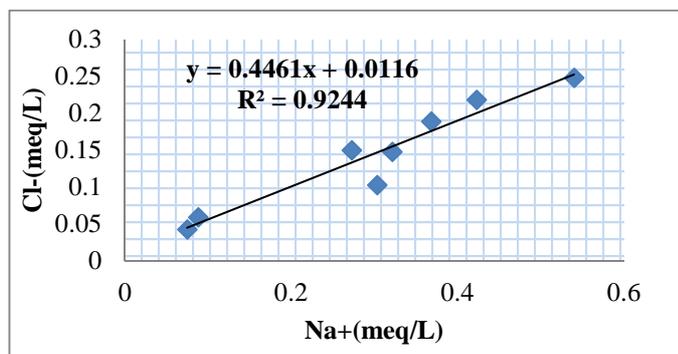


Figure 27: Relation entre les ions majeurs pour les eaux du puits A1

Ces échanges de cations sont dus à la présence d'argile latéritique dans la formation géologique de la zone d'étude car les ions Ca^{2+} porté par les eaux très récentes sont captés par l'argile et les ions Na^+ seront libérés.

L'équation d'échange des cations dans ce processus s'écrit :



✓ Puits A2

Pour les eaux de puits qui se trouvent dans cette partie, différents processus géochimiques pourraient conduire à la forte minéralisation à savoir la dissolution des carbonates, l'altération des silicates minéraux et les échanges de cations dans le milieu acide. Le graphe entre les ions Mg^{++} et HCO_3^- (fig.29) montre une corrélation positive ($r^2=0,706$). Cela signifie donc que l'origine de ces ions peut être expliquée à partir de l'altération de silicates minéraux tels que les micas. Malgré, l'excès de l'ion Mg^{2+} par rapport aux anions SO_4^{2-} et Cl^- , on suggère une altération des silicates étant donné que les valeurs de pH des eaux sont inférieures à 6.

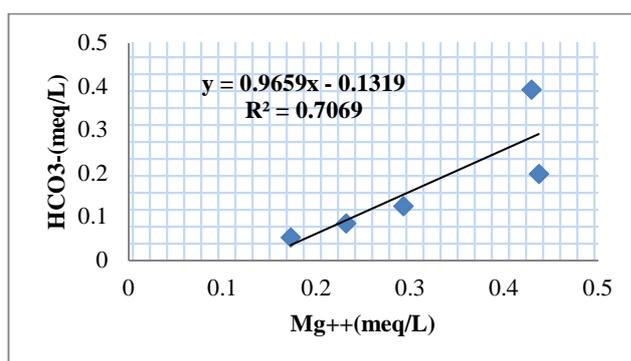


Figure 28: Relation entre les ions HCO_3^- et Mg pour les eaux du puits A2

Un autre phénomène mis en jeu par ce processus de minéralisation est l'échange des cations causé par la formation d'argile latéritique.

L'équation de cette réaction peut être traduite comme suit :

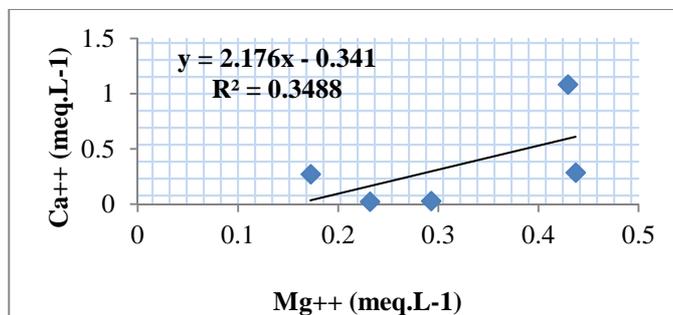
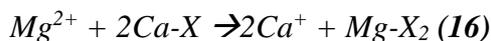


Figure 29: Relation entre les ions Ca et Mg pour les eaux du puits A2

✓ Puits B

La figure 31 de relation entre Ca^{2+} et HCO_3^- montre que seulement les eaux du puits B ont une bonne corrélation entre l'ion Ca et HCO_3^- . Cela veut dire que ces ions ont la même source. L'origine de ces ions pourrait expliquer par l'infiltration directe de la précipitation mais le rapport $\text{Ca}/\text{HCO}_3^- > 1$ signifie une autre source de l'ion calcium telle que l'altération des silicates à partir de la relation suivante :



Ces eaux sont obtenues à partir de l'infiltration directe des précipitations mélangées avec des eaux dans le réservoir aquifère sachant que la nappe est libre. Elles ne sont pas polluées par le nitrate parce qu'elles se trouvent dans la zone d'altitude élevée qui sont moins habitées donc l'installation septique est encore moins abondante.

De même, dans le graphe de corrélation entre les ions K^+ et HCO_3^- , on trouve un coefficient de corrélation 0,95, cela signifie donc que l'origine de ces ions peut être l'altération de silicates minéraux de la formation granite dont la réaction s'écrit :



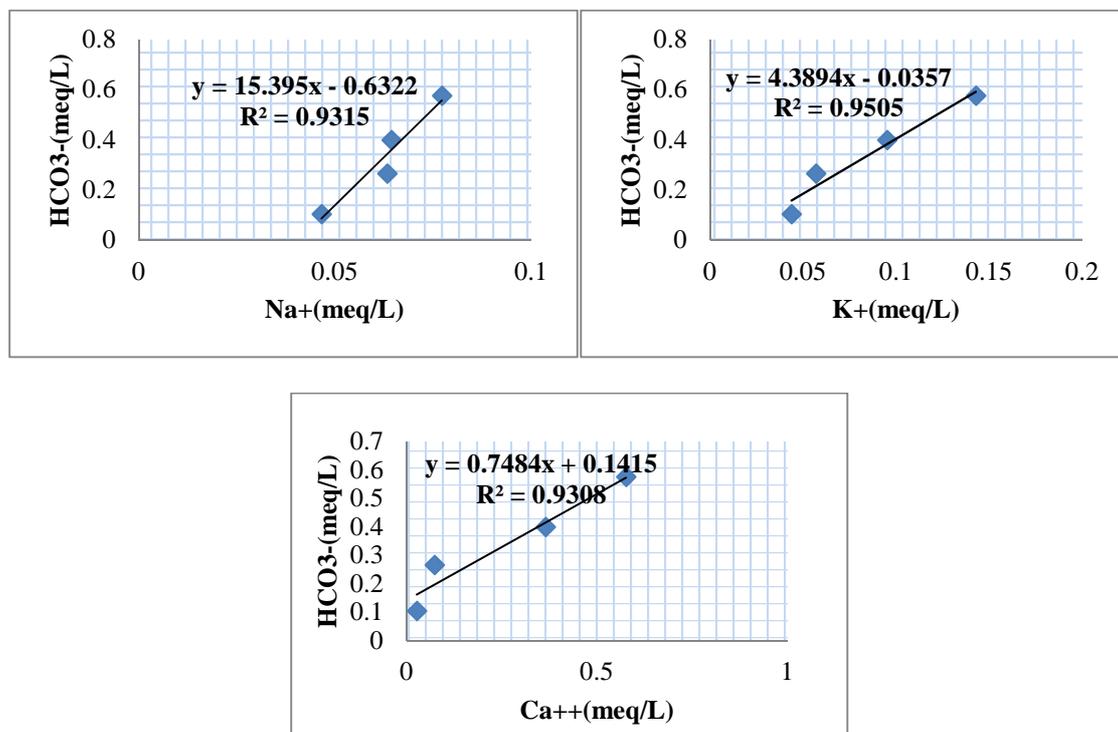


Figure 30: Relation entre les ions HCO₃, Na, K et Ca pour les eaux du puits B

VII.3.2.2. Pollution des eaux par le nitrate

L'étude de la minéralisation des eaux dans cette zone a montré une forte contamination par le nitrate dans les échantillons d'eaux prélevés sur les puits A1 et A2. Les graphes ci-dessus (figure 32) sont utilisés pour comprendre l'origine de nitrate dans les eaux. Le graphe entre Cl et NO₃ montre une corrélation positive ($r^2=0,6$) pour les eaux ayant de forte concentration en nitrate conduisant à une relation entre l'origine de ces ions. Donc, l'origine anthropique de l'ion nitrate dans les eaux souterraines d'Anjomakely proviendrait généralement par l'utilisation d'engrais chimiques et les latrines installées proches du point de captage.

La contamination des eaux par le nitrate se trouve dans la zone où l'on observe plus d'habitation justifiant donc leur origine à partir de l'activité humaine. Dans les sites périphériques de la zone, la concentration en nitrate diminue suivant la direction de l'écoulement des eaux souterraines à partir de la zone où la contamination par le nitrate se produit. Cette hypothèse est illustrée par la figure 33 montrant que la concentration en nitrate dans les eaux prélevées augmente au fur et à mesure qu'on s'approche du centre de la ville d'Anjomakely puis elle diminue en s'éloignant de cette ville.

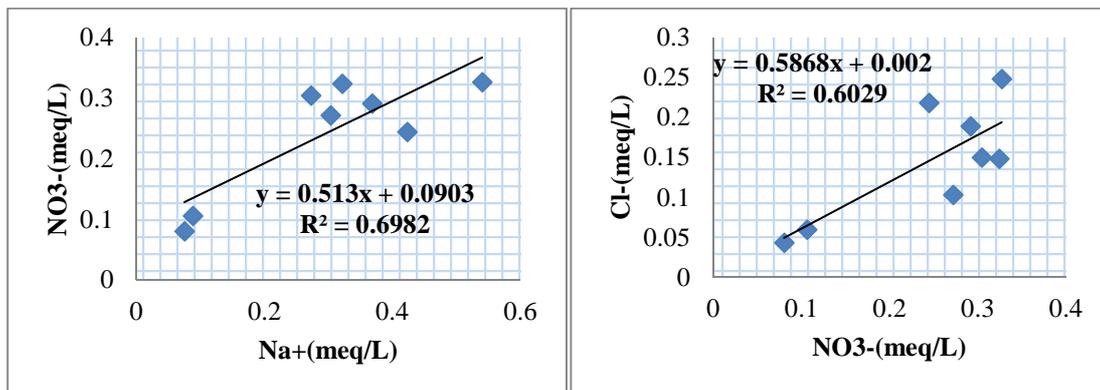


Figure 31: Corrélation entre les ions Na, Cl et NO3 dans les puits A1

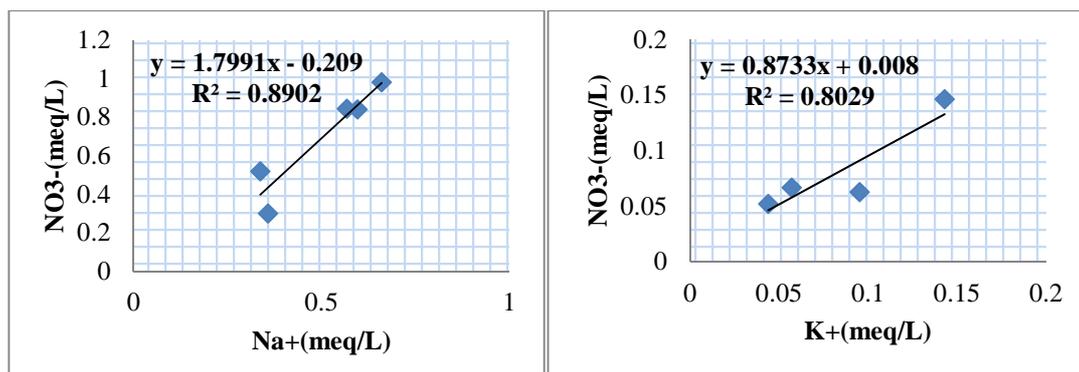


Figure 32: Corrélation entre les ions Na, K et NO3 dans les puits A2

VII.3.2.3. Relation entre le niveau piézométrique et le nitrate

La figure suivante nous montre la variation de la concentration des nitrates en fonction de l'altitude. Ici on trouve une confrontation entre les fluctuations des teneurs en nitrates des eaux souterraines et celles des niveaux piézométriques (Figure 34) montrent qu'il n'y a pas une réelle corrélation entre les teneurs en nitrates et la piézométrie.

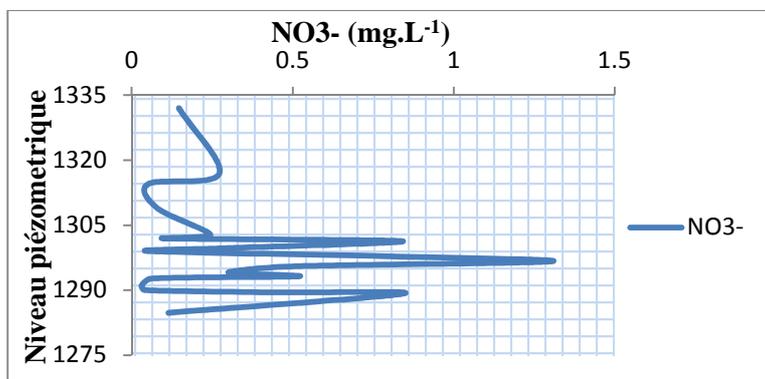


Figure 33: Relation entre Niveau piézométrique et NO3

CONCLUSION

CONCLUSION

A partir de l'infiltration des précipitations dans l'aquifère et tout au long de l'écoulement dans ce dernier, l'eau est soumise à des processus successifs qui modifient son faciès chimique. Les processus hydrogéochimiques sont généralement contrôlés ou influencés par différents processus physico-chimiques tels que la dissolution de certains minéraux présents dans les roches et dans les sols, l'infiltration et l'écoulement de l'eau dans la matrice aquifère, les interactions entre les minéraux dissous, et la salinisation des eaux lorsque l'eau souterraine est en contact prolongé avec des argiles d'origine marines. Selon les processus auxquels elle est soumise, l'eau souterraine acquiert ainsi une signature particulière en fonction du milieu où elle se trouve et de ceux qu'elle rencontre lors de son parcours.

Le présent travail a comme objectif d'étude hydrogéochimique de la nappe phréatique d'Anjomakely par la technique de chromatographie ionique qui est la méthode recommandée pour l'analyse des ions dans les eaux. Nous avons utilisé cette technique pour évaluer la teneur des ions (cations et anions) présents dans les eaux minérales et souterraines.

L'étude hydro chimique des eaux de la nappe phréatique dans la zone d'Anjomakely nous montre que les eaux prélevées sont faiblement minéralisées. La conductivité électrique spécifique ne dépasse pas les $200\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La valeur de la Conductivité Electrique (CE) des trois puits qui se trouvent à Antsahalava est relativement supérieure à celle de Manelo. On peut donc conclure que la minéralisation des points d'eaux d'Antsahalava est plus élevée que celles des points d'eau de Manelo par le phénomène d'altération des minéraux des roches dans cette zone qui intervient à la composition chimique de quelques échantillons collectés. Pour cela, les puits d'Antsahalava sont en amont que ceux de Manelo Par conséquent, la minéralisation des eaux de la zone d'étude pourrait provenir de la zone d'Antsahalava. Les eaux en profondeur sont plus minéralisées que celles peu profonde. Cela pourrait être dû au ruissèlement de la constitution géologique de la zone d'Anjomakely, c'est-à-dire elle est constituée principalement de roches métamorphiques sous l'action de la chaleur et de la pression, et des roches plutoniques obtenues à partir de l'activité volcanique qui se manifeste en profondeur. D'autre part, le nitrate se retrouve à des concentrations élevées, supérieures à la limite admissibles ($50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ -OMS) dans les ouvrages P4, P5 et P13 avec des concentrations égales à $60,91\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $52,17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $52,31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectivement. Ainsi, les eaux de ces ouvrages ne sont pas aptes à être utilisées pour la consommation.

De plus, l'utilisation des diagrammes de Piper et des diagrammes de Schöller-Berkaloff montrent que la majorité de ce type d'eau se trouve dans la famille de l'eau hyper chlorurée sodique. Et cinquante pourcent de ces eaux de puits ont tendance à évoluer vers ce faciès. Vingt-cinq pourcent des eaux de puits ont de faciès bicarbonatée et magnésienne. Elle est classée eau ancienne.

En fin, Cette étude hydrochimique de la nappe phréatique d'Anjomakely n'est que le début d'un travail de recherche. Il est nécessaire d'utiliser d'autres techniques, telles les techniques isotopiques pour mieux comprendre le mécanisme de recharge et la direction d'écoulement des eaux souterraines. Il est également important de conduire des investigations sur l'évolution de la qualité de l'eau aussi bien dans l'espace que dans le temps.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Documentation sur l'eau : « Dynamique de cycle de l'eau », < http://www.vienne.educagri.fr/apprendautre/eatc2003/Pages_WEB/penroyans.htm > 09 Janvier 2007.
- [2] Le Conseil canadien des ministres de l'environnement (RQEC) : « CCME Recommandation pour la qualité des eaux au Canada » publié par le Conseil canadien des ministres des ressources et de l'environnement (CCMRE). Novembre 2008.
- [3] Heriarivony S. C., Razanamparany B., Rakotomalala J. E., 2015. Caractères physico-chimiques et bactériologiques de l'eau de consommation (Puits) de la Commune rurale d'Antanifotsy, région Vakinankaratra – Madagascar
- [4] Rasolofonirina M., Ramaroson V., Raelina Andiambololona, 2015. On-site Sanitation influence on nitrate occurrence in the shallow groundwater of Mahitsy city, Analamanga region – Madagascar.
- [5] Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). « Dossier Scientifique : L'eau » < [Http://www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr) >, 09 Janvier 2007.
- [6] Centre d'Information sur l'eau (CI eau). « Propriétés chimiques de l'eau » <[Http://www.cieau.com/toutpubl/sommaire/texte/1/contenu/131.htm](http://www.cieau.com/toutpubl/sommaire/texte/1/contenu/131.htm), 09 Janvier 200
- [7] Éducation à l'Environnement. « Pollution de l'eau ». < <http://environnement.ecoles.free.fr> >, 09 Janvier 2007.
- [8] Eau Doc : "Cycle de l'eau" < <http://www.spge.be/xml/docIDC1297.html> >, 09 Janvier 2007.
- [9] Kevin L.L., 2012. Les eaux souterraines : Captage, exploitation et gestion.
- [10] Deutsch W. J. (1997) Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination Lewis Publishers of CRC Press, Boca Raton
- [11] <http://artsetsciences.free.fr/pages/environnement/eutrophisation/nitrates/formationnitrates.htm>.
- [12] Oumar Farouk Moucherou, Amidou Moundi, Jules Remy Ndam Ngoupayou, Andrew A. Ako, Pierre Wandji, Paramètres chimiques et source lithologique de la minéralisation des eaux souterraines des aquifères du Plateau Bamoun, Ligne Volcanique du Cameroun (LVC), 2011, p 71.
- [13] L. Matini, J.M. Moutou et M.S. Kongo-Mantono, Évaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo, Afrique Science 2009.
- [14] Dorice Kuitcha, Alain L Fouépé Takounjou, Joséphine Ndjama, Apport de l'hydrochimie et de l'isotope de l'environnement à la connaissance des ressources en eaux souterraines de Yaoundé, Cameroun, 2013.

- [15] Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2006 : Résultats et interprétation Rapport final BRGM/RP-55499-FR Novembre 2007
- [16] Paula Carreira, Addis Ababa, Ethiopia, Basic hydrogeochemistry concepts (Part I), 4 -15 JANUARY 2010.
- [17] H.Serra, E.Petelet-Giraud, Ph. Négrel, Inventaire du potentiel géothermique de la Limagne (COPGEN).Synthèse bibliographique de la géochimie des eaux thermales, Septembre 2003.
- [18] JIRAMA, 2007. Norme de Potabilité Malagasy (Décret n°2004-635 du 15/06/04)
- [19] Ecole des Mines. Saint-Étienne. Chromatographie ionique. Méthodes instrumentales d'analyse et de caractérisation. 30p
- [20] Dionex Corporation. DX-120 Ion Chromatograph Operator's Manual. Document N°031183. Révisions 03. September 1998. 162p.
- [21] Prof. Jhon H. Rasambainarivo, FOFIFA-DRZV, BP.4, Antananarivo 101, Madagascar, Dr. Nivo Ranaivoarivelo CNRE-GEREM. MADAGASCAR
- [22] DGM Ampandrianomby, Mars 2008. Le changement climatique à Madagascar.
- [23] AIEA, Manuels / Guide - Fonctionnement d'un Laboratoire d'Hydrologie Isotopique Echantillonnage de l'eau et traitement au laboratoire.
- [24] Dionex ICS-1100 Ion Chromatography System Operator's Manual, Document N° 065289, Revision 03
- [25] Louis A. Helfrich, Richard J. Neves, James Parkhurst, Extension Specialists, Department of Fisheries and Wildlife Sciences, Virginia Tech. Liming Acidified Lakes and Ponds, mai 2009
- [26] Ratavilahy T. H., 2008, Analyse et diagnostic de l'adduction d'eau potable, d'assainissement et de l'hygiène de grand Tana, mémoire d'Ingénieur, Ecole Polytechnique d'Antananarivo, 81p
- [27] Liu F., 2015, Identifying the origin and geochemical evolution of groundwater using hydrochemistry and stable isotopes in the Subei Lake basin, Ordos energy base, Northwestern China, Hydrology and Earth System Science, vol. 19, pp 551-565.

ANNEXES

ANNEXE 1

« Logbook » à remplir pendant l'échantillonnage : exemple pour le puits P04

DATA COLLECTION WORKSHEET
MAQ/7/005 Project N° 05

0. Sampler Name:

1. Name / Code of Water Site (WS): P04 **2. Date:** 24/12/15 **3. Hour:**

4. Lieu: Ambahubaru **5. Fokontany:** Ambodiaruna **6. Commune:** Bongatsara

7. WS Owner Address:

8. Geographical Position
Latitude: 5°19'02"03" Longitude: 047°32'46,5" Elevation: 1307 m

9. Sample Type
 Spring Well Borehole River Stream Irrigation Channel Tap

10. Use
 Private Public

11. Weather
 Clear Partly Cloudy Cloudy Rainy Windy

12. Well/Borehole (W/B) Features
 Depth: 14,65 m Static Water Level: 10,18 m W/B Diameter: W/B Age:

13. W/B Type
 Equipped Hand Dug Well Non-equipped Other

14. Type of Protection (Are the following items presents?)
 Housing Cap Cemented hole

15. Distance and direction to the closest land use and storage area listed below (Distance/Direction)
 Cesspool: / Septic System: / Agricultural field: /
 Manure storage: / Fertilizer storage: / Livestock park: /
 Pasture: / Surface water: /

16. Color, Taste and odor of water: 877 fpa
877%

17. Parameter field values
 pH/Eh: 5,72 / 67,3 mV/SEC: 465,3 mV/SEC TDS: 22,8 mg/L Temperature: 22,1°C DO: 6,58 mg/L Nitrate:
 Alkalinity: Sample volume: 100 ml Digit required: 14 Titrant Normality: 0,16

18. Analyses to be carried out: Trace Element Major ions Minor ions
 Stable Isotopes ³H ¹⁴C

19. Total number of taken samples:

20. Any Observation:

21. Measurement during sampling:

Time	WSL [m]	T [°C]	SEC [µS/cm]	pH	DO [mg/L]	Observation
						labure (12n)

ANNEXE 2



Photographie 1 : Puits traditionnel P01 mal-protégé -Antsahalava



Photographie 2 : Puits traditionnel P04 protégé -Antsahalava



Photographie 3 : Puits traditionnel P04 protégé -Antsahalava



Photographie 4 : Puits traditionnel P13 FJKM protégé -Anjomakely



Photographie 5 : Puits moderne P15 protégé -Manelo



Photographie 6 : Source S01- Antsahalava



Photographie 7 : Source S02- Antsahalava



Photographie 8 : Borne fontaine BF01- Anjomakely



Photographie 9 : Borne fontaine BF02 CSBII- Anjomakely

ANNEXE 3

RESULTATS DE L'ECHANTILLONNAGE :Paramètres physiques :

LIEU DE PRVMNTET CODE	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION (m)	Ph	Eh (mV)	CES (µS/cm)	STD (mg/L)	T° (°C)	OD (mg/L)	LATITUDE X (m)	LONGITUDE Y(m)
ANTSHALAVA (P01)	19°01'59.8" S	047°32'45.3" E	1301	5,33	88,6	42,7	21,36	21,8	6,11	516665,013	784888,446
ANTSHALAVA (P02)	19°01'59.8" S	047°32'44.9" E	1299	5,28	91,6	87,3	44,4	21,5	5	516653,32	784888,519
ANTSHALAVA (P03)	19°02'03.0" S	047°32'49.6" E	1297	6,12	45,4	54,9	27,3	22,2	3,46	516790,098	784789,299
ANTSHALAVA (P04)	19°02'03.1" S	047°32'46.5" E	1307	5,72	67,3	165,3	82,8	22,1	6,58	516699,458	784786,793
ANTSHALAVA (P05)	19°02'07.7" S	047°32'43.5" E	1316	5,26	92,9	138,1	68,7	22,4	6,52	516610,876	784645,949
ANTSHALAVA (P06)	19°02'09.3" S	047°32'46.5" E	1316	5,84	60,9	11,36	5,4	23,3	5,94	516698,265	784596,22
ANTSHALAVA (P07)	19°02'07.1" S	047°32'45.5" E	1323	5,72	67,5	17,97	8,88	22,1	4,69	516669,456	784664,026
ANTSHALAVA (P08)	19°02'06.4" S	047°32'42.3" E	1297	5,43	33,7	49,1	24,2	22,7	6,82	516576,047	784686,127
ANTSHALAVA (P09)	19°02'03.6" S	047°32'43.8" E	1305	5,16	98,5	43,6	21,49	22,2	6,02	516620,434	784771,918
ANTSHALAVA (P10)	19°02'04.0" S	047°32'42.4" E	1320	5,32	89,7	33,3	16,43	22,7	7,2	516579,431	784759,879
ANTSHALAVA (P11)	19°02'04.8" S	047°32'42.8" E	1303	5,35	88	56,1	27,7	22,6	5,34	516590,971	784735,216
ANTSHALAVA (P12)	19°02'04.7" S	047°32'40.3" E	1297	5,39	86,2	74,3	35,5	23,8	6,6	516517,909	784738,746
ANJOMAKELY(FJKM) (P13)	19°01'53.8" S	047°32'39.6" E	1302	6,7	13,5	177,7	87,9	22,5	7,35	516499,539	785073,912
MANELO (P14)	19°02'24.6" S	047°32'34.0" E	1314	6,38	31,1	25	12,13	22,9	6,17	516329,927	784128,221
MANELO (P15)	19°02'23.6" S	047°32'34.7" E	1340	6,69	14,4	63,8	31,4	22,7	5,7	516350,581	784158,83
MANELO (P16)	19°02'23.4" S	047°32'34.0" E	1299	7,73	12,2	33	16,36	22,1	6,49	516330,157	784165,106
MANELO (P17)	19°02'24.5" S	047°32'31.7" E	1332	6,61	18,9	10,91	5,23	22,8	5,7	516262,714	784131,714
ANTSHALAVA (S01)	19°02'06.4" S	047°32'50.2" E	1290	6,04	49,7	11,65	5,7	22,3	2,15	516806,983	784684,682
MANELO (S02)	19°02'28.4" S	047°32'29.0" E	1291	6,59	20	59,2	28,7	23,6	5,78	516183,041	784012,33
ANJOMAKELY (BF01)	19°02'03.0" S	047°32'36.6" E	1308	6,75	11	14,39	6,61	25,5	7,27	516410,074	784791,675
ANJOMAKELY(CSBI) (BF02)	19°01'55.1" S	047°32'36.9" E	1304	6,47	26,9	12,87	5,98	25,2	7,14	516420,36	785034,446

Paramètres chimiques :

CODE	en mg/L								en meq/L								SOMME CATIONS	SOMME ANIONS	BI	TDS(mg/l)	SOMME	%Na++	%K+	%Mg++	%Ca++	%HCO3-	%Cl-	%NO3-	%SO4--	FACIES CHIMIQUE
	Na+	K+	Mg++	Ca++	HCO3-	Cl-	NO3-	SO4--	Na+	K+	Mg++	Ca++	HCO3-	Cl-	NO3-	SO4--														
P01	6,27465	3,39765	1,52615	12,5428	7,703	20,1448	18,8623	0,7891	0,27281087	0,08494125	0,12509426	0,62714	0,12627869	0,56745915	0,30423065	0,01643958	1,109986382	1,014408072	4,49908489	71,24045	2,12439445	12,841818	3,99837468	5,88846681	29,5208829	5,9442204	1,92222962	14,3208171	0,77384797	Ca-NO3-Na
P02	8,2324	2,4812	2,8251	0,4563	5,124	12,1966	18,6136	0,2512	0,35793043	0,06203	0,23156557	0,022815	0,084	0,3435662	0,30021935	0,00523333	0,674341009	0,733018885	-4,16935832	50,1804	1,40735989	25,4327579	4,40754353	16,4538989	1,62112052	5,96862255	21,1931311	21,3320954	0,37185466	Na-NO3-Cl-Mg
P03	8,4748	3,2069	0,4143	11,89	30,378	6,7157	18,0754	0,6103	0,36846957	0,0801725	0,03395902	0,5945	0,498	0,18917465	0,29153871	0,01271458	1,077101082	0,991427941	4,14174226	79,7654	2,06852902	17,8131204	3,87582186	1,64169881	28,7402301	24,0750792	0,65822245	14,0940111	0,61466787	Ca-HCO3
P04	15,19095	7,40595	5,33145	5,7103	12,08	19,0693	60,9139	0,8616	0,66047609	0,18514875	0,4370041	0,285515	0,19803279	0,53716338	0,98248226	0,01795	1,568149395	1,735628425	-5,06949244	126,56345	3,30377236	19,9915737	5,60416184	13,2274276	8,64209058	5,9941414	6,21566478	29,7381947	0,54331831	NO3-Na-Mg
P05	13,7039	16,9049	3,56915	0,61965	7,564	13,0254	52,1727	0,4758	0,59582174	0,4226225	0,29255328	0,0309825	0,124	0,36691268	0,84149516	0,0099125	1,341980018	1,342320337	-0,01267815	108,0355	2,68430036	22,1965377	15,7442329	10,898679	1,15421137	4,61945325	31,7890366	31,348706	0,36927686	Cl-NO3-Na
P06	2,02455	2,26345	0,3061	0,82195	3,172	2,11405	6,58065	0,5404	0,08802391	0,05658625	0,02509016	0,0410975	0,052	0,0595507	0,10613952	0,01125833	0,210797827	0,228948554	-4,12754431	17,82315	0,43974638	20,0169727	12,8679285	5,70559874	9,34572786	11,8249978	0,63719707	24,1365298	2,56018783	NO3-Na-K-HCO3
P07	1,7242	2,1077	0,4161	1,2927	6,222	1,5285	4,9869	0,5215	0,07496522	0,0526925	0,03410656	0,064635	0,102	0,04305634	0,08043387	0,01086458	0,226399275	0,236354792	-2,15136252	18,7996	0,46275407	16,1997965	11,3867179	7,370342	13,967423	22,0419457	0,30826171	17,381559	0,37280937	HCO3-NO3-Na-Ca-K
P08	7,39235	4,9302	2,2061	1,53405	10,074	5,2618	20,0861	0,21205	0,32140652	0,123255	0,18082787	0,0767025	0,16514754	0,14821972	0,32396935	0,00441771	0,702191891	0,641754322	4,49702284	51,69665	1,34394621	23,9151328	9,17112596	13,454993	5,70725965	12,2882552	2,59703829	24,1058274	0,32871169	NO3-Na-Mg-k
P09	9,7302	2,1912	0,3894	0,6324	1,83	7,7545	15,1567	0,2516	0,42305217	0,05478	0,03191803	0,03162	0,03	0,21843662	0,2444629	0,00524167	0,541370207	0,49814119	4,15859001	37,936	1,0395114	40,6972137	5,2697835	3,07048416	3,04181369	2,88597125	7,18113079	23,517097	0,50424331	Na-NO3
P10	6,97665	1,6505	0,32235	0,5468	1,83	3,66195	16,85565	0,35095	0,30333261	0,0412625	0,02642213	0,02734	0,03	0,10315352	0,27186532	0,00731146	0,39835724	0,412330302	-1,72360638	32,19485	0,81068754	37,4167103	5,08981548	3,25922501	3,37244605	3,7005626	3,05871523	33,5351549	0,90188364	Na-NO3
P11	12,42115	1,9364	0,33135	0,2638	2,928	8,81835	20,26535	0,1912	0,54005	0,04841	0,02715984	0,01319	0,048	0,24840423	0,32686048	0,00398333	0,628809836	0,627248043	0,12434089	47,1556	1,25605788	42,9956302	3,85412176	2,16290769	1,05011084	3,82147995	23,6550481	26,0227247	0,31712976	Na-NO3-Cl
P12	7,7575	3,5803	2,1028	5,4531	3,172	6,3859	32,1851	2,0891	0,33728261	0,0895075	0,17236066	0,272655	0,052	0,17988451	0,51911452	0,04352292	0,871805764	0,79452194	4,63797273	62,7258	1,6663277	20,2410731	5,37154245	10,343743	16,3626278	3,12063467	1,09936197	31,1532068	2,6119062	NO3-Na-Ca-Mg
P13	13,0521	6,1721	5,2352	21,6654	23,912	29,19	52,3133	0,7156	0,56748261	0,1543025	0,42911475	1,08327	0,392	0,82225352	0,8437629	0,01490833	2,234169863	2,072924758	3,74370938	152,2557	4,30709462	13,1755315	3,58251939	9,96297486	25,1508289	9,10126279	3,26928994	19,5900712	0,34613434	Ca-NO3-Na
P14	1,45715	2,2829	2,63875	1,4786	16,226	2,46875	4,1448	1,1359	0,06335435	0,0570725	0,21629098	0,07393	0,266	0,06954225	0,06685161	0,02366458	0,410647831	0,42605845	-1,84181937	31,83285	0,83670628	7,57187429	6,82109138	25,850288	8,83583662	31,7913234	0,78704775	7,98985431	2,82830234	HCO3-Mg
P15	1,7768	5,7192	0,6632	11,5274	35,136	2,2286	9,0784	0,9014	0,07725217	0,14298	0,05436066	0,57637	0,576	0,06277746	0,14642581	0,01877917	0,85096283	0,803982438	2,83878825	67,031	1,65494527	4,66795944	8,63956064	3,2847404	34,8271336	34,8047764	1,18025447	8,84777336	1,13473038	Ca-HCO3
P16	1,4822	3,8107	0,3242	7,30455	24,4	2,21465	3,88715	0,5436	0,06444348	0,0952675	0,02657377	0,3652275	0,4	0,06238451	0,06269597	0,011325	0,551512249	0,536405475	1,38859526	43,96705	1,08791772	5,92356176	8,75686625	2,44262686	33,5712428	36,7674863	0,18582222	5,76293284	1,04097946	HCO3-Ca
P17	1,0725	1,7538	0,4355	0,5379	6,344	2,5569	3,2348	0,7081	0,04663043	0,043845	0,03569672	0,026895	0,104	0,07202535	0,05217419	0,01475208	0,153067156	0,242951629	-22,6970225	16,6435	0,39601879	11,7748038	11,0714445	9,01389597	6,79134451	26,2613805	1,06054629	13,1746764	3,72509686	HCO3-NO3-K-Na
S01	0,7519	1,0595	0,3925	0,2925	6,71	1,7324	2,5734	0,2155	0,0326913	0,0264875	0,03217213	0,014625	0,11	0,0488	0,04150645	0,00448958	0,105975935	0,204796035	-31,7982665	13,7277	0,31077197	10,5193864	8,52313031	10,3523272	4,70602287	35,3957276	1,03696904	13,3559187	1,44465517	HCO3-NO3-Na-Mg
S02	9,8858	2,77085	1,6064	4,82685	42,578	4,46485	1,8809	0,76775	0,42981739	0,06927125	0,13167213	0,2413425	0,698	0,12577042	0,0303371	0,01599479	0,872103272	0,870102311	0,1148522	68,7814	1,74220558	24,6708767	3,97606635	7,55778379	13,8526993	40,0641581	0,90791275	1,74130407	0,91807717	HCO3-Na-Ca
BF01	1,8719	1,2095	0,3129	1,2372	10,614	0,2689	0,2085	0,0982	0,08138696	0,0302375	0,02564754	0,06186	0,174	0,00757465	0,0033629	0,00204583	0,199131998	0,186983384	3,14636858	15,8211	0,38611538	21,0784031	7,83120834	6,64245513	16,0211778	45,0642497	0,04727915	0,87059511	0,52985025	HCO3-Na
BF02	1,5315	1,208	0,2075	0,7302	14,64	0,2764	0,5666	0,55	0,06658696	0,0302	0,0170082	0,03651	0,24	0,00778592	0,00913871	0,01145833	0,150305153	0,268382959	-28,2018529	19,7102	0,41868811	15,9037132	7,213030633	4,06225929	8,72009474	57,3219046	0,08928705	2,18270102	2,73672288	HCO3-Na

Impétrant :

ANDRIAMANJATO Herimalala Elie

Tél : 034 12 605 01/ 032 29 506 50*E-mail* : herimala.andriama@gmail.comLot VB V 102 Ter Tongarivo Tanjombato
Antananarivo 102 – Madagascar**Rapporteurs :**

- Professeur RAJAABELISON Joël
- Docteur RAMAROSON Voahirana

Domaine: Sciences et Technologies**Mention:** Physique et Application**Parcours:** Physique Nucléaire Appliquée et Environnement**TITLE:** « *HYDROCHEMISTRY STUDY OF AREA ANJOMAKELY, TOWN OF BONGATSARA-ANTANANARIVO-MADAGASCAR* »

ABSTRACT: The present work has been fully carried out at the “Institute National des Sciences et Techniques Nucléaires (I.N.S.T.N-Madagascar), especially in the Department of Isotope Hydrology.

This present work is to assess the degree of ions (cations and anions) presented in mineral and groundwater.

The groundwater geochemistry has been characterized in the area of Ajomakely – District of Bongatsara. The objectives of the study were to evaluate the groundwater chemical quality prior to the determination of the groundwater mineralization process. During the sampling campaign, performed in December 2015, 21 samples were collected from one borehole, 17 dug wells, two springs and two hydrants. Physical parameters were measured in the field while major ions were analyzed in the Isotope Hydrology Laboratory of INSTN-Madagascar by Ionic Chromatography methods.

Nowadays, the human being activities are increasing and enlarging quickly in different domains. These activities can affect the water quality, which is the basis of all living creature. Regular and continuous studies on water quality are therefore necessary so that potable water is available for use. In the framework of the present study, Anjomakely phreatic aquifers are investigated. The objectives of the research work are the determination of the water quality and the mechanism responsible for this quality. Ground water sample were collected to better understand the mechanism that controls the chemical composition of the surficial aquifers.

Field measurements indicate that groundwater in the study area is less mineralized because electrical conductivity are less than $200\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Nitrate is mainly the source of groundwater pollution caused by the use of latrines and chemical fertilizers at high altitude catchment points. In general, waters in the wells A1 and A2 have a poor quality because the pH values are almost less than 6 and nitrate concentrations are higher than $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (WHO standards). On the other hand, waters in the wells B, springs and standpipes are good and belong to the chemical facies of fresh (sweet) water.

Key-words: Ionic Chromatography, hydrochemistry, ion exchange, phreatic water, water rock interaction, anthropogenic, Anjomakely

<p><u>Impétrant :</u> ANDRIAMANJATO Herimalala Elie Tél : 034 12 605 01/ 032 29 506 50 E-mail : herimala.andriama@gmail.com Lot VB V 102 Ter Tongarivo Tanjombato Antananarivo 102 – Madagascar</p> <p><u>Rapporteurs :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Professeur RAJAABELISON Joël • Docteur RAMAROSON Voahirana 	<p><u>Domaine:</u> Sciences et Technologies</p> <p><u>Mention:</u> Physique et Application</p> <p><u>Parcours:</u> Physique Nucléaire Appliquée et Environnement</p>
---	---

TITRE : « *ÉTUDE HYDROCHIMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE DE LA COMMUNE D'ANJOMAKELY REGION BONGATSARA-ANTANANARIVO-MADAGASCAR* »

RÉSUMÉ: Le présent travail a été entièrement réalisé au sein de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (I.N.S.T.N - Madagascar), en particulier au Département d'hydrologie isotopique.

Ce présent travail consiste à évaluer le degré des ions (cations et anions) présentés dans les eaux minérales et souterraines

La géochimie des eaux souterraines a été caractérisée dans la zone d'Anjomakely - Commune Bongatsara. Les objectifs des travaux étaient d'évaluer la qualité chimique des eaux souterraines et par la suite, de remonter aux origines de leur minéralisation. Durant la campagne d'échantillonnage au mois de décembre 2015, 21 échantillons, répartis sur l'ensemble du territoire ont été prélevés dont : 17 puits, 2 sources et 2 bornes fontaines. Les paramètres physiques ont été mesurés in situ tandis que les ions majeurs ont été analysés au laboratoire d'Hydrologie Isotopique de l'INSTN-Madagascar par la méthode de Chromatographie Ionique.

Ces activités peuvent affecter sur la qualité de l'eau qui est la base de la vie de tout être vivant. Des études régulières et continues de l'eau sont donc nécessaires pour que l'eau utilisée soit toujours conforme aux besoins des hommes surtout à sa potabilité. Dans le cadre de ce travail, les nappes phréatiques d'Anjomakely sont étudiées. Les objectifs sont la détermination de la qualité de l'eau et la compréhension du mécanisme responsable de cette qualité. Des échantillons d'eau souterraine ont été prélevés pour mieux comprendre le mécanisme qui contrôle la composition chimique de ces deux nappes phréatiques.

Les résultats de mesures des paramètres sur terrain montrent que les eaux souterraines dans la zone d'étude sont moins minéralisées avec une conductivité électrique inférieure à $200\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Le Nitrate est principalement la source de la pollution des eaux souterraines causée par l'utilisation des latrines et d'engrais chimiques sur les points de captage situés dans la haute altitude. En général, les eaux des puits A1 et A2 sont de qualité mauvaise car les valeurs de pH sont presque inférieures à 6 avec une concentration en nitrate supérieur à $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Norme OMS). Par contre, les eaux des puits B, les sources et les bornes fontaines sont bonnes et appartiennent aux facies chimiques des eaux fraîches (douces).

Mots clés : Chromatographie Ionique, hydrochimie, échange d'ions, nappe phréatique, l'interaction eau-roche, anthropique, Anjomakely