

TABLE DE MATIERE

INTRODUCTION.....	1
II.1.1. LES DONNÉES SUR L'ASPECT PHYSIQUE.....	9
II.1.2. LES DONNÉES SUR L'ASPECT CHIMIQUE.....	11
III.2.1. SAISIE DES DONNÉES AVEC AQUACHEM.....	17
III.2.2. REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS D'ANALYSE	20
III.2.2.1. LE DIAGRAMME DE PIPER	21
III.2.2.2 LE DIAGRAMME DE SCHOELLER	23
III.4.1. EMPLACEMENT DES PUIITS À ÉTUDIER.....	24
III.4.2 INTERPRÉTATION HYDROCHIMIQUE DES DIAGRAMMES	25
III.4.2 1.VILLAGE ANDALAKAOLO (MD3).....	26
III.4.2.2 VILLAGE LAHIMANARA (MD4).....	27
III.4.2.3 VILLAGE IFANOMBIKE (MD7).....	28
III.4.2.4 VILLAGE MODOHOIKA HAUT (MD12).....	29
III.4.2.5 VILLAGE MODOHOIKA BAS (MD13).....	30
III.4.2.6 VILLAGE DASOTSY (MD21).....	31

III.4.2.7 VILLAGE ANDALIPITO (MD100).....	32
III.4.2.8 COMMUNE D'ANDALATANOSY	32
III.4.2.COMBINAISON DES INFORMATIONS HYDROCHIMIQUES ET GÉOPHYSIQUES.....	36
CONCLUSION.....	39
BIBLIOGRAPHIE.....	40

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ANDALATANOSY 2	
FIGURE 2 : RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE 4	
FIGURE 3 : CARTE DE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE.....	5
FIGURE 4: CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION D'ANDALATANOSY	7
FIGURE 5: LES PANNEAUX ÉLECTRIQUES.....	16
FIGURE 6: MÉTHODE D'INTERPRÉTATION D'UN DIAGRAMME DE PIPER.....	23
FIGURE 7: DIAGRAMME DE SCHOELLER.....	24
FIGURE 8 : EMBLACEMENT DES PUIXS ÉTUDIÉS.....	25
FIGURE 9 :DIAGRAMMES DE PIPER ET DE SCHOELLER DU VILLAGE D'ANDALAKAOLO.....	26
FIGURE 10 : DIAGRAMMES DE PIPER ET DE SCHOELLER DU VILLAGE DE LAHIMANARA.....	27
FIGURE 11 : DIAGRAMMES DE PIPER ET DE SCHOELLER DU VILLAGE D'IFANOMBIKE.....	28
FIGURE 12 :DIAGRAMMES DE PIPER ET DE SCHOELLER DU VILLAGE DE MODOHOIKA HAUT.....	29

FIGURE 13: DIAGRAMMES DE PIPER ET DE SCHOELLER DU VILLAGE DE MODOHOIKA BAS.....	30
FIGURE 14: DIAGRAMMES DE PIPER ET DE SCHOELLER DU VILLAGE DE DASOTSY.....	31
FIGURE 15: DIAGRAMMES DE PIPER ET DE SCHOELLER DU VILLAGE D'ANDALIPITO.....	32
FIGURE 16:DIAGRAMME DE PIPER ÉTABLI POUR L'ENSEMBLE DE LA COMMUNE D'ANDALATANOSY.....	33
FIGURE 17: DIAGRAMME DE SCHOELLER ÉTABLI POUR L'ENSEMBLE DE LA COMMUNE D'ANDALATANOSY.....	35

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: PARAMÈTRES PHYSIQUES DE L'EAU DANS LES 32 VILLAGES.....	10
TABLEAU 2: PARAMÈTRES CHIMIQUES DE L'EAU SOURCE : THÈSE DE RABEMANANA.V.2002[1].....	13
TABLEAU 3: LES DIFFÉRENTS TYPES D'EAU.....	19
TABLEAU 4 : VÉRIFICATION DE SAISIE DES DONNÉES.....	20
TABLEAU 5: NORMES DE QUALITÉ DE L'EAU.....	36
TABLEAU 6 : COMBINAISON DES RÉSULTATS.....	36

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé à l'Institut et Observatoire et Géophysique d'Antananarivo (IOGA), je tiens à remercier tous ceux qui, à divers titres, ont rendu possible sa réalisation. Il m'est impossible de tous les citer.⁸

J'adresse en premier lieu, mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur Titulaire RATSIMBAZAFY Jean Bruno, Directeur de l'Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), qui a bien voulu m'accueillir au sein du Laboratoire de Géophysique Appliquée et qui, depuis le début, n'a cessé de nous conseiller sur la manière de conduire sa vie, dans un contexte socio-économique aussi difficile que celui traversé, actuellement, par Madagascar et qui a bien voulu, malgré ses lourdes tâches, nous encadrer.

Ensuite, je suis heureux d'exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël, Responsable de la formation en Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée, à Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo, Professeur Titulaire, Président de jury, à Monsieur RASOLOMANANA Eddy, Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et Co-Responsable du Laboratoire de Géophysique Appliquée à l'IOGA, qui m'a proposé ce sujet. Grâce à lui, j'ai pu, tant matériellement que moralement, réaliser ce travail. Que des difficultés ai-je pu surmonter grâce à son assistance permanente et son encadrement. Il m'a prodigué avec beaucoup de patience, ses conseils judicieux et suivi avec dévouement l'avancement depuis le début jusqu'à la mise en forme finale de mes travaux. Qu'il en soit remercié profondément.

J'adresse également mes remerciements à tous les enseignants qui m'ont partagé leurs connaissances durant mes années d'études à l'I.O.G.A, ainsi qu'à tout le Personnel Administratif et Technique pour son assistance technique.

INTRODUCTION

La partie Sud de Madagascar souffre d'un manque aigu d'eau. En 1990 et 1991, la région autour de l'Androy est victime d'une sécheresse sévère qui a décimé la population. Pour cette situation dramatique, RABEMANANA [1] a fait une étude sur les ressources en eau dans les régions de l'Androy notamment dans la commune d'Andalatanosy.

La thèse de Rabemanana Vero s'intitule « Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy (Sud de Madagascar) ». Elle a utilisé plusieurs méthodes telles que : le sondage électrique, le panneau électrique, le Time Domain Electromagnetic (TDEM), la télédétection, l'hydrochimie,...

Comme la réalisation des travaux sur terrain coûte trop cher, faute de budget, nous n'avons pas pu nous y rendre et nous avons alors utilisé les extraits des données hydrochimiques et géophysiques de cette thèse pour essayer d'établir une synthèse des données hydrochimiques et géophysiques acquises dans cette région. Ce travail de mémoire fait partie intégrante du stage que nous devons effectuer pendant deux ans de formation pour l'obtention du Diplôme de Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée de la faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo.

Le but de la présente étude est de déterminer les faciès types des eaux souterraines de la commune d'Andalatanosy. Nous avons, ensuite, combiné les informations hydrochimiques et géophysiques obtenues dans la zone d'étude. Les résultats contribuent, d'une certaine manière, à l'étude du problème de salinité des nappes aquifères de la région.

Le travail se divise en trois parties à savoir :

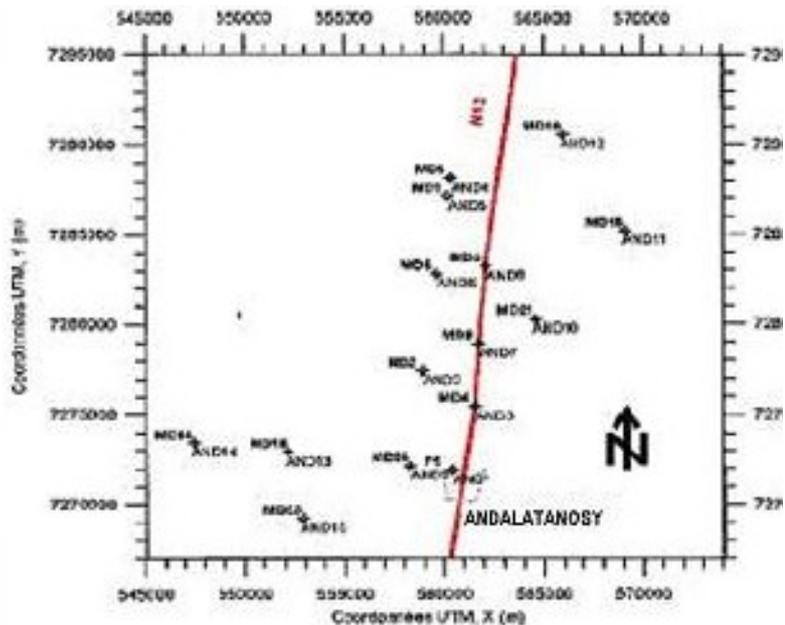
- dans la première partie on va présenter le contexte général de la zone d'étude
- dans la seconde partie, on va voir les acquisitions des données
- et, dans la troisième et dernière partie seront développés les traitements des données ainsi que les interprétations

Partie I: CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

Dans cette première partie nous allons voir les quatre contextes suivants : le contexte géographique, le réseau hydrographique, le contexte géologique et le contexte hydrogéologique.

I.1 CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

Andalatanosy est situé dans le district d'Ambovombe, dans la région de l'Androy et dans la Province autonome de Toliara. Il est situé à 950 km au Sud d'Antananarivo en suivant successivement la RN7 d'Antananarivo jusqu'à Ihosy puis la RN13 reliant Ihosy et Fort-dauphin. Andalatanosy est localisé entre Beraketa et Antanimora-Sud et s'étend environ entre les coordonnées X=146 km et X=188 km de latitude Sud et Y=291 km et Y=334 km, de longitude Est Laborde. Il se trouve aussi entre les fleuves Manambovo et Mandrare.



Source : Baltassat J.M (B.R.G.M). 2001

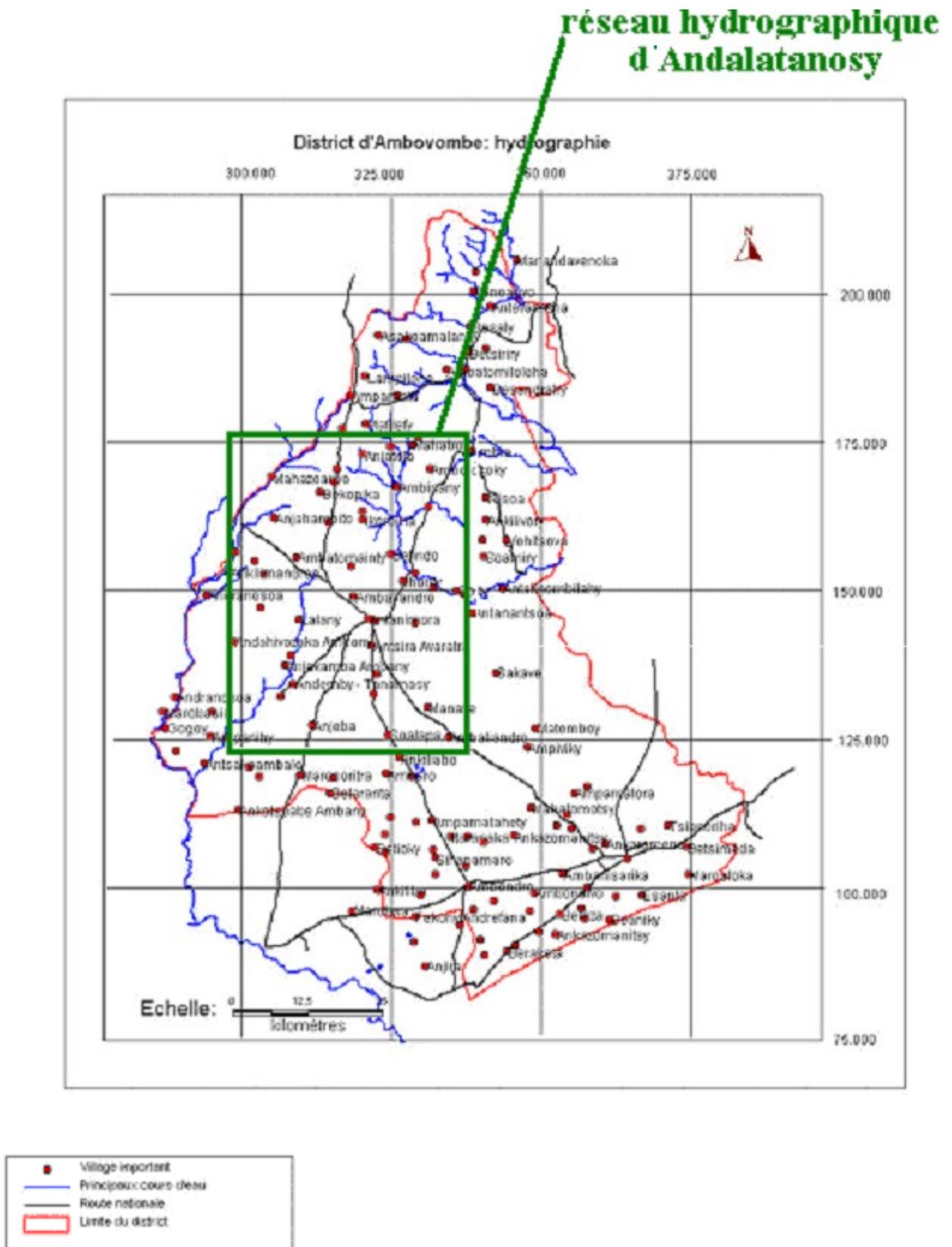
Figure 1 : Présentation de la région d'Andalatanosy

I.2.RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Dans la commune d'Andalatanosy, le réseau hydrographique est constitué principalement par le fleuve de Manambovo et le fleuve de Mandrare. L'Ouest et le Nord-Ouest de la zone d'étude font partie du bassin versant de Manambovo avec ses affluents Andrimbarotra, Sakavola et Andranomiteraka. L'Est de la zone d'étude est traversé par les rivières Ikoroma, Besatra, Bemanda correspond le bassin versant de l'Ikonda qui est un affluent du fleuve Mandrare.

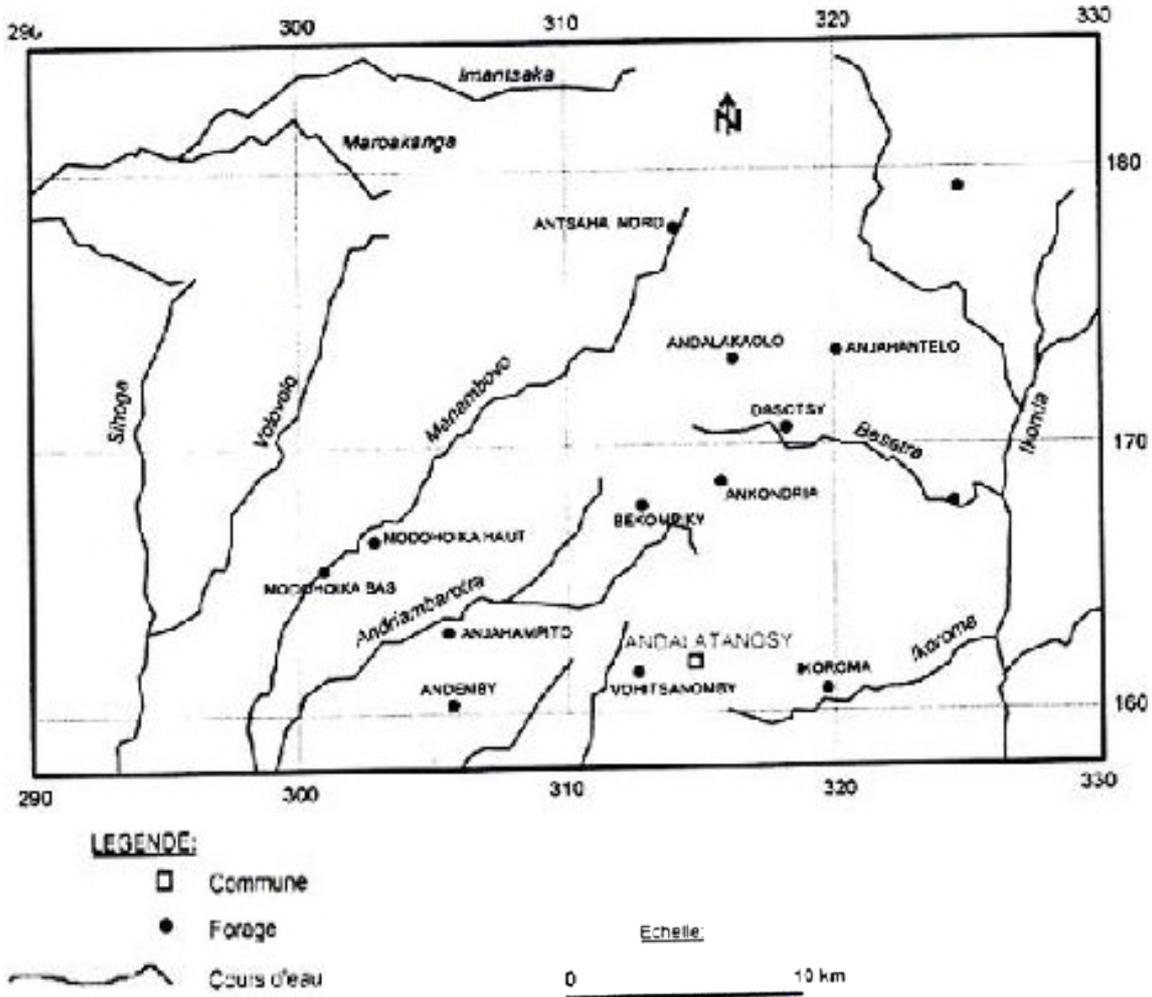
Dans la partie Sud de Madagascar, on sait que le régime de l'eau est toujours très irrégulier et suit les régimes des pluies : sans eaux courantes pendant les périodes sèches et avec un régime torrentiel durant quelques heures et dépassant rarement une journée, pendant la période de pluies.

Nous donnons les principaux cours d'eau du district d'Ambovombe-Androy dans la figure 2 ainsi que, les villages importants et les routes nationale, le réseau hydrographique de la zone d'étude tiré de cette figure est représenté sur la figure 3, la carte du réseau hydrographique.



Source : Extrait du BD500

Figure 2 : Réseau hydrographique de la zone d'étude



Source : Thèse de RABEMANANA V.2002

Figure 3 : Carte de réseau hydrographique

I.3.CONTEXTE GÉOLOGIQUE

L'île de Madagascar comporte deux grands types de terrains géologiques : le socle cristallin et les terrains sédimentaires. La géologie de la zone d'étude est groupée dans la partie de socle cristallin. Elle a environ à une superficie de 600 km².

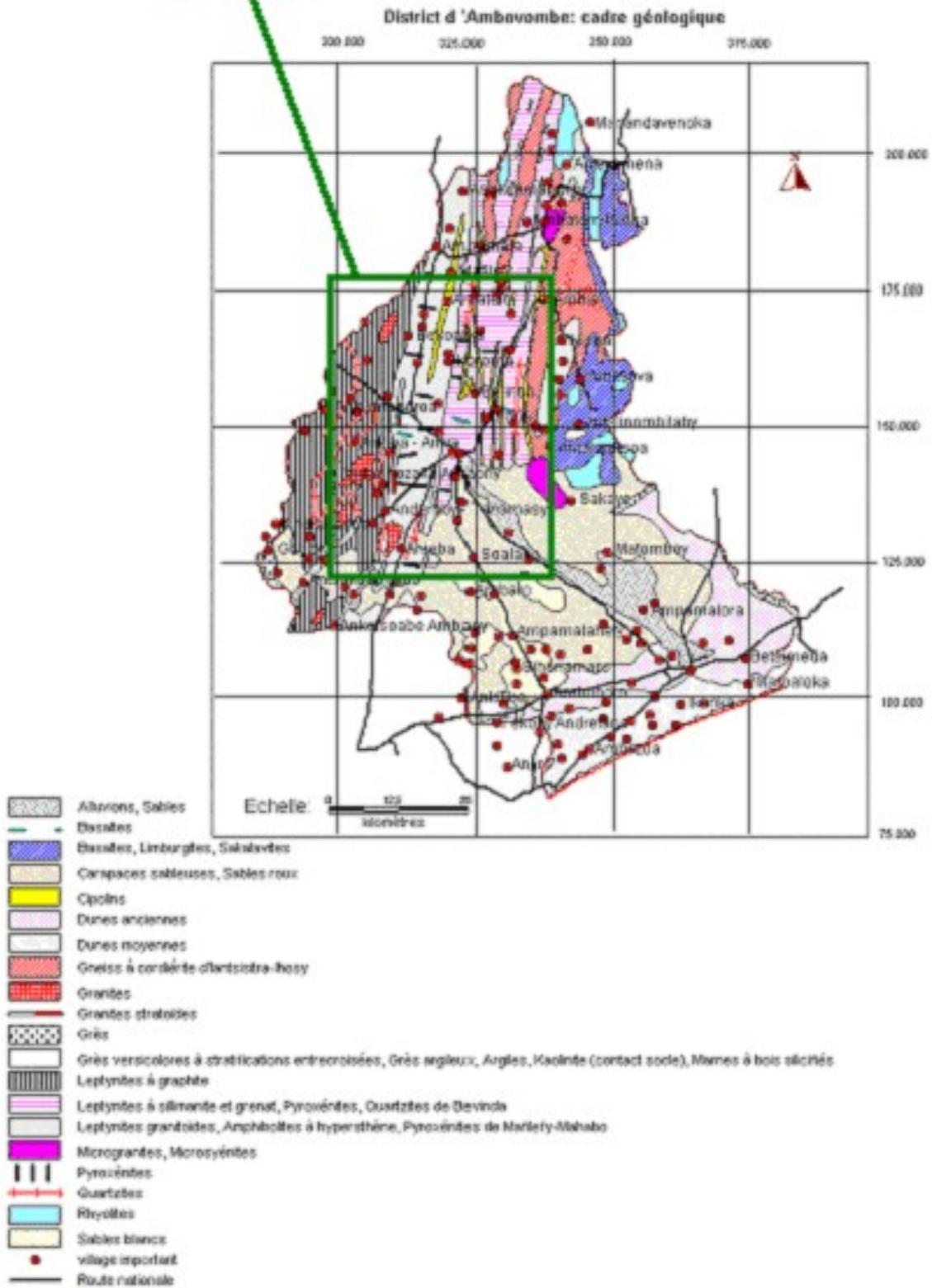
Elle est aussi située sur deux provinces métamorphiques dont la limite d'orientation Nord-Sud suit approximativement la RN13, elle appartient à la fois pour sa partie orientale et sa partie occidentale respectivement à la ceinture de Betroka et à celle de Bekily définies par Windley *et al*, (1994)[1]. Pétrographiquement, ces deux provinces sont généralement semblables et sont caractérisées par des gneiss, des léptynites et des quartzites.

La province Est est caractérisée par des pyroxènes à phlogopites, on y trouve des structures subverticales avec une orientation Nord-Sud.

Sur la province Ouest, on a une apparition des structures plissées et des zones graphiteuses, des massifs granitiques sont observés.

Les roches dans cette zone appartiennent toutes au métamorphisme allant du faciès des amphibolites jusqu'au faciès extrême des granulites, y compris des migmatites. L'âge des formations constitutives du secteur est d'environ 1200 Millions d'Années. Les paragneissiques sont des séries dominantes dérivant des séries calco-magnésiennes avec un niveau important des sédiments silico-alumineux pour la partie orientale. Dans la partie occidentale, elle dérive d'un sédiment silico-alumineux calcique et carboné (Noizet, 1954) [1].

géologie d'Andalatanosy



Source : Extrait du BD500 géologie

Figure 4: Carte géologique de la région d'Andalatanosy

I.4.CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Théoriquement, l'hydrogéologie du Sud de MADAGASCAR appartient à l'hydrogéologie des roches cristallines et métamorphiques. Le contexte hydrogéologique est caractérisé par :

- l'existence des trois types d'aquifères :
 - la nappe des terrains d'altération
 - la nappe des fissures et fractures du socle sain
 - la nappe des dépôts d'alluvions

- la théorie de l'altération qui montre les différentes couches suivantes :
 - le socle sain
 - la zone d'arènes grenues
 - la zone d'arènes argileuses
 - la zone d'argiles latéritiques
 - la zone de latérites.

On trouve la couche d'aquifère sur la zone d'arènes grenues. Il existe une partie de socle fissuré et fracturé entre le socle sain et la zone d'arènes grenues. Elle contient de l'eau de quantité notable et exploitable suivant la taille des accidents d'origine tectonique. Alors, le repérage de ces fractures et ces fissures est une technique d'exploitation acceptable[1].

Les zones les plus favorables sur le développement des eaux souterraines sont surtout sur les vallées alluviales car on trouve dans cette zone les différentes formations suivantes :

- le socle fissuré et fracturé avec une possibilité de trouver de l'eau
- les terrains d'altération avec une zone d'arène grenue et argileuse
- les formations alluviales peuvent contenir un niveau sableux aquifère

Partie II: ACQUISITION DES DONNEES

II.1.EXTRAITS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES

Rappelons que les données hydrochimiques ont été extraites de la thèse de RABEMANANA [1]. Ces données concernent trente deux villages. Les résultats des analyses sur les aspects physiques (tableau 1) et chimiques (tableau 2) ont été séparés, mais pour le traitement et l'interprétation, les données ont été combinées.

On a utilisé deux types de résultats en hydrochimie : ceux sur l'aspect physique de l'eau et ceux sur l'aspect chimique. Les paramètres relatifs au premier aspect sont la température (T) en °C, la conductivité électrique (CE) des eaux en $\mu\text{S. cm}^{-1}$, le niveau statique (N.S) de l'eau par rapport au sol en m, l'épaisseur d'altération (EA) en m et pour le deuxième aspect, le pH et les teneurs en Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Br^- , F^- , HCO_3^- .

II.1.1. Les données sur l'aspect physique

Nous décrivons successivement ci-dessous, la conductivité de l'eau, la température, le niveau statique et l'épaisseur d'altération. Ces différents paramètres physiques sont en relation avec la minéralisation des eaux.

Conductivité de l'eau ou CE

Les éléments dissous ionisés permettent le passage du courant électrique entre deux électrodes. Ainsi plus une eau est chargée en substances dissoutes, plus sa résistance électrique est faible.

Niveau statique

Le niveau statique se réfère au rabattement ou au ruissellement qui s'oppose à un niveau dynamique.

Epaisseur d'altération

Cette notion correspond, en fait, au niveau altéré de l'aquifère.

Température

La température de l'eau dépend de la profondeur (degré géothermique). Pour les eaux souterraines profondes celle-ci dépend de la profondeur de la couche aquifère, de la latitude géographique (les eaux de sub-surface ont souvent une température proche de la

moyenne inter-annuelle de l'air), de la présence de foyers volcaniques ou de zones tectoniques.

Les aspects physiques

Nous avons consigné les différents paramètres physiques obtenus dans les trente deux villages dans le tableau 1 comportant sept colonnes et trente trois lignes :

- dans la première colonne, on a les villages qui ont fait l'objet d'étude
- les dénominations des puits se trouvent dans la deuxième colonne
- et, les autres paramètres se trouvent dans les autres cinq colonnes

Tableau 1: Paramètres physiques de l'eau dans les 32 villages

Villages	Sites	N.S(m)	EA(m)	T(°C)	C E($\mu\text{S. cm}^{-1}$)	pH
Bekopiky	MD2	0.2	8.8	26.3	437	7
Andalakaolo	MD3	5.15	12.7	26.8	4020	7.33
Lahimanara	MD4	1.31	11.25	27	1980	7.28
Ambatomasy	MD5	3.3	11.25	27.2	1494	7.64
Antsaha avaratra	MD6	9.9	16	27.2	1132	7.04
Ifanombike	MD7	12.9	11.6	27.1	2180	7.15
Ambatofotsy	MD8	9.02	28.66	27.2	1490	7.19
Ankondria ambony	MD9	1.53	17.11	26.5	2240	7.59
Manolodroa	MD10	6.92	9.28	28.5	757	7.91
Mahazoarivo	MD11	1.63	13.03	26.9	2040	7.65
Modohoika ambony	MD12	6.22	10.58	27.5	720	7.9
Modohoika ambony	MD13	3.93	12.5	26.5	3230	6.92
Vohitrarivo	MD14	3.05	15.84	27.3	686	7.47
Anjahapito	MD15	5.92	13.27	27.3	1632	7.58
Ampanamperandrotsy	MD16	6.93	13.1	26.8	700	7.36
Besatra	MD17	1.97	13.53	25.3	555	7.33
Antanafianampela	MD18	1.88	11.18	25.8	663	7.14
Anjatelo	MD19	4.01	13.64	26.3	5300	7.42
Ankafoja	MD20	9.6	15.6	27.2	629	7.36
Dasotsy	MD21	2.81	10.6	26.2	790	7.48
Ikoroma	MD22	2.88	8.98	27.2	5840	7.22
Andemby	MD23	1.13	13.5	27.1	1272	8.28
Vohitsanomby	MD24	1.69	9.28	27.3	960	7.17
Morafeno	MD50	2.62	7.76	26.9	1178	7.58
Andalipito	MD100	10.67	17	26.8	2750	7.57
Ampozy	MD200	*	*	26.3	2340	7.7

Ampozy	MD201	8.13	12.67	26.4	836	7.64
Anjakamba ambany	MD202	6.79	16.6	28	2190	7.75
Bevoay	MD300	5.2	30.5	26.8	915	7.52
Antsakomiary	MD400	4.75	12.8	27	2350	7.47
Ankara andindo	MD401	4.17	10.15	26.4	2870	7.45
Manave	MD500	*	*	27.2	1330	7.06

Source : Thèse de RABEMANANA.V .2002[1]

II.1.2. Les données sur l'aspect chimique

Les paramètres chimiques considérés se rapportent aux éléments suivants Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , Br^- , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ces éléments sont en millimoles par litre (mmole/l), et le HCO_3^- en méq/l, et $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ sont en %. Et les $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^{14}C , et $\delta^{13}\text{C}$ sont des éléments traces.

Les ions majeurs sont : le Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} . Pour avoir plus de précision sur ces éléments, nous avons utilisé le logiciel Aquachem et les résultats de dosage des autres éléments qui sont qualifiés d'éléments mineurs. Ce sont : le Fer total, NH_4^+ , CO_3^{2-} .

Nous décrivons successivement ci-dessous le pH, le Fer total, le chlorure, l'azote ammoniacal, le nitrite, le nitrates, le deutérium (^2H), l'oxygène ^{18}O ce sont les différents paramètres chimiques en relation avec la minéralisation de ces eaux.

Le pH : $-\log [\text{H}_3\text{O}^+]$

L'eau à analyser en présence de réactif colorimétrique prend, avec les ions H^+ , une coloration dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en H^+ .

Le Fer total

Le fer à l'état ferreux est assez soluble dans l'eau. Oxydé à l'air, il passe à l'état ferrique et peut précipiter.

Chlorures

La présence de chlorure peut être attribuée à des sources naturelles, à la pollution par les rejets urbains et industriels, à l'intrusion de l'eau de mer. Les gros inconvénients des chlorures sont la saveur et les odeurs désagréables qu'ils introduisent dans l'eau.

Azote ammoniacal

La présence de l'azote ammoniacal dans l'eau traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique.

Nitrates

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitro-salicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique.

Le deutérium (^2H)

Est généralement utilisé en même temps que l'oxygène 18 dans les précipitations.

Deutérium et oxygène 18

Ce sont des isotopes stables qui sont utilisés comme traceurs en hydrogéologie.

Les aspects chimiques

Nous avons consigné les différents paramètres chimiques obtenus dans les trente deux villages dans le tableau 2 ci-dessous, il comporte dix sept colonnes et trente trois lignes.

- dans la première colonne les villages qui ont fait l'objet d'étude
- les dénominations des puits se trouvent dans la deuxième colonne
- et les autres paramètres se trouvent dans les autres colonnes

Tableau 2: Paramètres chimiques de l'eau

Source : Thèse de RABEMANANA.V.2002[1].

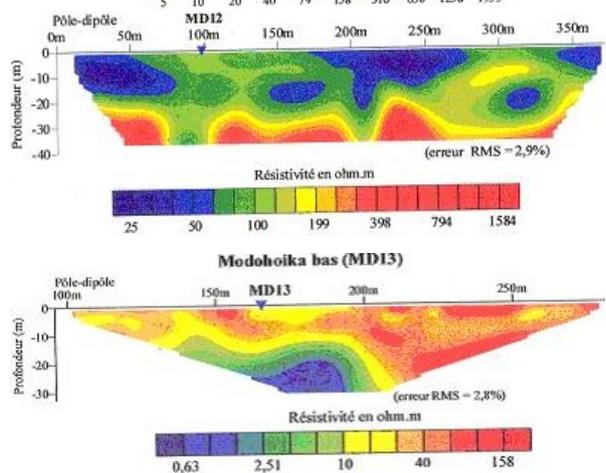
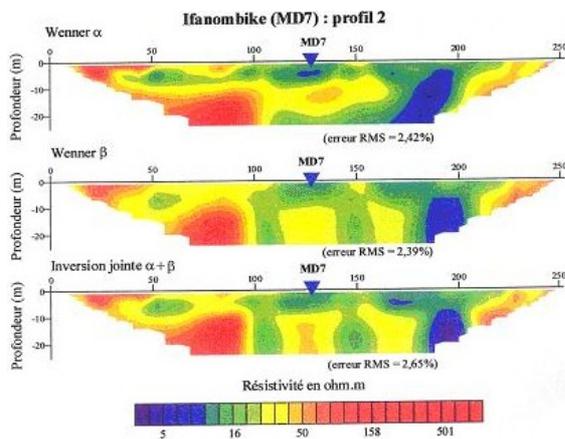
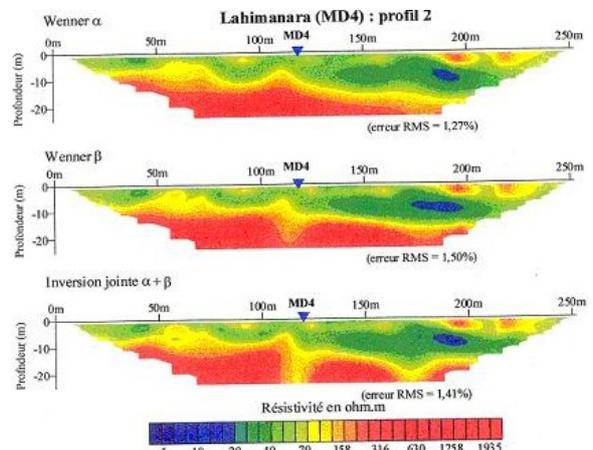
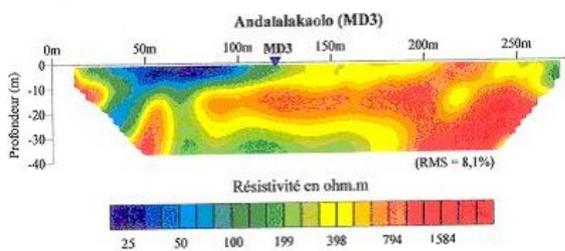
Villages	sites	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Br ⁻	F ⁻	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	δ ¹⁸ O	² H	¹⁴ C	δ ¹³ C
Bekopiky	MD2	0.22	0.36	3.24	0.07	0.08	0.3	0.85	0.002	0.025	1.16	2.74	-5.51	-36.1	*	
Andalakaolo	MD3	2.98	6.77	21.39	0.24	8.35	2.7	20.76	0.03	0.023	0.8	7.31	-4.97	-35.1	8.7	-13.47
Lahimanara	MD4	2.68	6.32	2.45	0.11	6.54	1.29	5.45	*	0.03	1.78	5.91	-5.07	-35.7	*	
Ambatomasy	MD5	0.68	1.22	12.88	0.08	0.05	0.87	6.33	0.012	0.119	1.37	8.88	-4.75	-34.3		
Antsaha avaratra	MD6	0.55	1.33	8.52	0.08	0.6	0.66	4.08	0.005	0.034	1.31	6.28	-4.45	-31.8		
Ifanombike	MD7	1.71	3.2	13.09	0.07	1.33	1.38	10.92	0.017	0.051	1.18	8.31	-4.96	-35.4	103.7	-13
Ambatofotsy	MD8	0.94	1.8	9.37	0.14	1.18	0.99	5.4	0.007	0.074	1.32	6.55	-5.1	-35.8		
Ankondria ambony	MD9	0.44	0.23	5.44	0.03	0.15	1.04	7.55	0.003	0.113	1.2	9.32	-4.87	-34	104.7	-12.73
Manolodroa	MD10	0.08	0.16	7.54	0.02	0.34	0.16	1.34	0.012	0.15	1.26	5.93	-0.57	-34.1	104.2	-10.9
Mahazoarivo	MD11	0.96	2.17	15.14	0.05	0.47	1.58	7.25	0.007	0.126	1.63	10.8	-4.1	-31.9	103.6	-11.28
Modohoika ambony	MD12	0.79	1.16	7.65	0.14	0.37	0.55	4.27	0.003	0.026	1.5	5.81	-4.84	-34		
Modohoika ambany	MD13	1.94	3.24	1.94	0.28	0.02	4.85	17.42	*	*	1.09	7.4	*	*		
Vohitrarivo	MD14	0.92	0.76	5.24	0.02	0.25	1.13	0.9	0.01	0.078	1.47	4.99	-5.18	-36.1		
Anjahapito	MD15	0.65	1.44	12.58	0.12	1.74	0.65	6.46	0.005	0.111	1.3	7.75	-4.51	-32.8		
Ampanamperandotsy	MD16	0.46	0.92	8.48	0.08	*	0.73	3.88	0.002	0.055	1.35	5.73	-5.41	-39.2		
Besatra	MD17	0.83	0.77	2.77	0.04	0.02	0.15	0.75	0.003	0.035	1.35	4.87	-5.5	-37.3		
Antanafianampela	MD18	0.85	1.9	1.25	0.04	0.92	0.41	1.01	0.046	0.027	1.8	4.19	-5.3	-37.4	69.1	-11.92
Anjatelo	MD19	1.88	4.1	43.13	0.12	0.02	4.44	35.59	0.002	0.131	1.19	10.4	-4.9	-34.1		

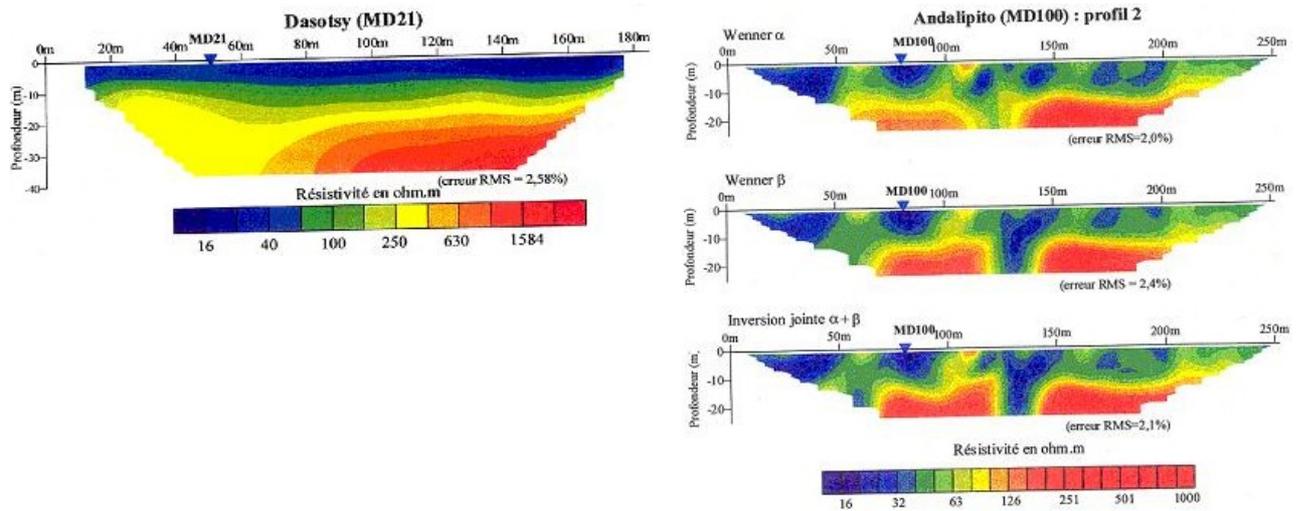
Ankafoja	MD20	0.45	0.54	4.8	0.02	0.1	0.17	0.77	0.003	0.074	1.44	5.47	-5.09	-36.1	112.6	-12.68
Dasotsy	MD21	0.58	1.13	5.07	0.01	0.27	0.18	1.36	0.058	0.063	1.51	6.27	-5.05	-34.7		
Ikoroma	MD22	6.43	8.85	33.25	0.24	*	7.1	41.94	0.004	0.04	1	6.73	-4.65	-33.6	94.9	-9.93
Andemby	MD23	0.11	0.18	13.61	0.04	0.05	0.36	1.97	*	0.132	1.72	11	-4.91	-35.8		
Vohitsanomby	MD24	0.46	1.15	5.5	0.03	1.38	0.37	1.83	0.004	0.068	1.63	4.62	-4.88	-34.4		
Morafeno	MD50	1.05	1.06	7.33	0.06	2.11	0.34	2.84	0.011	0.088	1.41	5.77	-4.7	-32.4		
Andalipito	MD100	1.07	2.69	5.97	0.26	0.85	0.46	7.55	0.011	0.014	1.41	4.45	-5.4	-36.8	102.6	-10.89
Ampozy	MD200	0.83	1.29	20.3	0.06	0.31	1.76	8.03	0.003	0.206	1.62	12.6	-5	-35.4		
Ampozy	MD201 201	0.55	0.5	6.81	0.09	0.09	0.52	1.06	0.003	0.06	1.07	6.8	-5.6	-38.9	93.7	-11.5
Anjakamba ambany	MD202	0.45	1.63	18.62	0.06	0.96	0.94	9.67	0.014	0.118	1.35	9.57	-4.5	-32.9		
Bevoay	MD300	1.62	1.17	3.25	0.06	0.06	0.74	3.27	0.014	0.028	1.52	3.92	-4.9	-37.1		
Antsakomiary	MD400	1.45	2.88	16.35	0.19	4.96	1.76	7.41	0.006	0.11	1.35	9.04	-4.3	-30.4		
Ankara andindo	MD401	1.53	2.51	21.8	0.18	0.43	2.42	13.52	0.022	0.086	1.51	11	-4.6	-31.5		
Manave	MD500	1.65	2.06	6.29	0.14	0.1	1.2	4.5	0.005	0.027	1.39	7.06	-5.4	-36.1		

II.2.EXTRAITS DES DONNÉES GÉOPHYSIQUES

Rappelons que le panneau électrique donne une distribution verticale et latérale (2D) des résistivités du sous-sol.

Notons que ces données géophysiques sont tirées de la thèse de RABEMANANA V. Nous utilisons ces données pour pouvoir les combiner aux résultats des données hydrochimiques précédentes. Nous allons utiliser les panneaux électriques dans les villages suivants : Andalakaolo (MD3), Lahimanara (MD4), Ifanombike (MD7), Modohoika haut (MD12), Modohoika bas (MD13), Dasotsy (MD21), et Andalipito (MD100).





Source : Thèse de RABEMANANA V.2002

Figure 5: Les panneaux électriques

Partie III: TRAITEMENT DES DONNEES ET INTERPRETATION

Rappelons que nous avons utilisé les extraits des données de la thèse de RABEMANANA Vero, et nous en avons fait les analyses et la synthèse.

III.1 MOYENS MATÉRIELS

Pour atteindre notre objectif, nous allons utiliser les deux diagrammes de représentation des analyses les plus pratiques dont ceux de Piper et de Schoeller, que nous avons établis avec le logiciel AQUACHEM.

III.2 PRÉSENTATION DU LOGICIEL AQUACHEM

Aquachem est un logiciel développé pour la représentation graphique et numérique spécialement destinée à analyser et modéliser des données de la qualité de l'eau. Il caractérise complètement les bases de données sur les paramètres physiques et paramètres chimiques de l'eau et fournit une sélection complète d'analyses. Il fait aussi des calculs et des graphiques pour interpréter les données de qualité de l'eau.

Le logiciel Aquachem peut réaliser plusieurs travaux dont l'analyse géochimique qui nous intéresse particulièrement dans le présent mémoire. C'est un outil puissant pour l'interprétation, l'analyse et la modélisation de données géochimiques simples ou complexes. Les outils intégrés dans Aquachem offrent de nombreuses méthodes de calculs standard pour analyser, interpréter et comparer des données géochimiques acquises.

En ce qui nous concerne, nous allons utiliser les diagrammes de Piper et de Schoeller pour déterminer les faciès types des différentes eaux de la région d'Andalatanosy.

III.2.1. Saisie des données avec Aquachem

Le menu général se compose :

- de la structure de la base de données hiérarchique : fournit des améliorations de performance plus flexible pour la personnalisation des paramètres hydrochimiques, et beaucoup plus de règles de l'intégrité des données encadrées.

- des données importées : dans la plupart des situations, les données utilisées par Aquachem doivent être importées d'un fichier fourni par un client, un laboratoire ou créé par

toute autre application de logiciel. Ces données peuvent être fournies sous plusieurs formats ne coïncidant pas exactement avec la structure de la base de données utilisée par Aquachem. En outre, les noms chimiques utilisés dans le fichier source peuvent être différents du champ utilisé dans Aquachem.

-du filtrage de données : quand on travaille avec de grandes bases de données qui contiennent des centaines ou des milliers, il est nécessaire de pouvoir filtrer rapidement et facilement les enregistrements d'échantillon pour ne montrer seulement que les échantillons satisfaisant aux critères définis par l'utilisateur. Aquachem vous autorise à créer, demander et sauvegarder facilement un nombre illimité de filtres personnalisés (Ex. $\text{Na}^+ > 100 \text{ mg.l}^{-1}$). N'importe lequel de ces filtres peut être sélectionné et appliqué à une liste d'échantillons en cliquant deux fois sur la souris.

Dans le présent mémoire, on fait la saisie des données sous Excel et on les enregistre sous forme de fichiers « .txt » (Exemple : demo.txt). Une fois cette saisie terminée,

on lance le logiciel Aquachem (double clique sur  : icône du logiciel), et on ouvre un exemple de données existantes dans ce logiciel.

Et après, on va dans « File / New » puis on enregistre. Si l'enregistrement est fini, on exporte les données saisies (demo.txt) vers Excel (on va dans « File / Exporte ASCII ») et puis on enregistre les données exportées de type « .txt » (Exemple : demo_1.tx). Et enfin, on importe dans « File / Importe ASCII » les données exportées. Et on ouvre le demo_1.txt.

On obtient alors le tableau 3 qui contient 6 colonnes :

- la première colonne contient l'identification des différents sites
- la deuxième colonne contient le nom du site
- la troisième colonne contient la géologie du site mais dans notre cas nous n'avons pas la géologie
- la quatrième colonne contient les différents types d'eau
- la cinquième colonne contient l'index de saisie
- et la sixième colonne les différents groupes de l'eau.

Tableau 3: Les différents types d'eau

Sample	Site	Geology	WTYPE	Index #Group
MD10	Sud de Mada		Na-HCO3	0117 (01)
MD100	Sud de Mada	gneiss et leptynite	Na-Mg-Cl-HCO3	0133 (02)
MD11	Sud de Mada		Na-Mg-HCO3-Cl	0118 (03)
MD12	Sud de Mada	altérite sableuse	Na-Mg-HCO3-Cl	0119 (03)
MD13	Sud de Mada	altérite argileuse	Na-Mg-Cl-SO4-HC	0120 (04)
MD14	Sud de Mada	gneiss	Na-Ca-HCO3-SO4	0121 (05)
MD15	Sud de Mada	leptynite	Na-HCO3-Cl	0122 (06)
MD16	Sud de Mada	socle indéterminé	Na-HCO3-Cl	0123 (06)
MD17	Sud de Mada		Na-Ca-Mg-HCO3	0124 (07)
MD18	Sud de Mada	leptynite, gneiss et quartzite	Mg-Ca-HCO3	0125 (08)
MD19	Sud de Mada	socle indéterminé	Na-Cl	0126 (09)
MD2	Sud de Mada	leptynite à grenat	Na-HCO3	0109 (01)
MD20	Sud de Mada		Na-HCO3	0127 (01)
MD200	Sud de Mada		Na-HCO3-Cl	0134 (06)
MD201	Sud de Mada		Na-HCO3	0135 (01)
MD202	Sud de Mada		Na-Cl-HCO3	0136 (10)
MD21	Sud de Mada	socle indéterminé	Na-Mg-HCO3	0128 (11)
MD22	Sud de Mada		Na-Mg-Ca-Cl-SO4	0129 (12)
MD23	Sud de Mada	socle indéterminé	Na-HCO3	0130 (01)
MD24	Sud de Mada	leptynite et grenat	Na-Mg-CO3-Cl	0131 (13)
MD3	Sud de Mada	socle indéterminé	Na-Mg-Cl-NO3	0110 (14)
MD300	Sud de Mada		Na-Ca-Mg-HCO3-C	0137 (15)
MD4	Sud de Mada	quartzite	Mg-Ca-NO3-HCO3-	0111 (16)
MD400	Sud de Mada		Na-Mg-HCO3-Cl	0138 (17)
MD401	Sud de Mada		Na-Cl-HCO3	0139 (10)
MD5	Sud de Mada	leptynite à grenat	Na-HCO3-Cl	0112 (06)
MD50	Sud de Mada		Na-HCO3-Cl	0132 (06)
MD500	Sud de Mada		Na-Mg-Ca-HCO3-C	0140 (18)
MD6	Sud de Mada	socle indéterminé	Na-Mg-HCO3-Cl	0113 (17)
MD7	Sud de Mada	leptynite	Na-Mg-Cl-HCO3	0114 (02)
MD8	Sud de Mada		Na-Mg-HCO3-Cl	0115 (03)
MD9	Sud de Mada	leptynite	Na-HCO3-Cl	0116 (06)

Après la saisie et l'enregistrement de toutes les données nous obtenons le tableau 3 avec les données. Pour vérifier l'exactitude de l'un des éléments du tableau 3, faisons une double clique sur l'un des lignes du tableau 3.

Par exemple on fait une double clique sur MD 100 et nous avons le tableau 4 ci-dessous où l'on peut faire la vérification de saisie des données et qui comprend six éléments dont la :

- description du site (localisation, nom du site,...)
- description des paramètres physiques (T, C.E,...)
- la description des cations (Ca^{2+} , K^+ ,...)
- description des anions (F^- , Cl^- , ...)
- description des éléments qui n'ont pas de charge (H_2SiO_3 , ...)
- description des éléments isotopes (^2H , ^{18}O ,...).

Tableau 4 : Vérification de saisie des données

Auparavant toutes les données ont été déjà copiées et enregistrées dans le tableau 3. Lorsque les corrections des saisies sont finies, on clique sur «save » pour enregistrer ces données. Après on clique sur « close » pour continuer les vérifications et on fait une double clique sur l'une des lignes du tableau 3, et ainsi de suite jusqu'à la fin de la vérification des saisies. A la fin de ces vérifications, en cliquant sur « save » et on revient au tableau 3.

Pour obtenir les différents diagrammes correspondant à ces données on va dans « Graphics / New / Piper » et après toutes ces opérations, nous obtenons par exemple le diagramme de Piper.

III.2.2. Représentation des résultats d'analyse

La représentation des résultats d'analyse a été faite sous forme de diagrammes : ce sont les diagrammes de Piper et de Schoeller. Ces diagrammes sont établis par le logiciel Aquachem. La caractérisation d'une ressource en eau minérale requiert l'obtention des

données hydrochimiques diverses obtenues à partir des analyses des échantillons prélevés. Elles induisent l'utilisation d'une représentation graphique.

L'objectif principal d'une représentation graphique est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau ou de la comparer à d'autres eaux minérales ayant des compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique. Il convient, toutefois, de rester critique vis à vis de l'interprétation qui en est faite, selon que l'on cherche à caractériser un faciès particulier ou à comparer différentes eaux entre elles.

Nous allons établir le diagramme de Piper et le diagramme de Schoeller pour les échantillons d'eau dans les figures représentatives suivantes, c'est à dire à balance ionique inférieur ou égale à 5 % : la balance ionique désigne la précision des analyses chimiques. Ce pourcentage est calculé d'après le bilan ionique (BI) par la formule suivante

$$\text{BI} = (\Sigma \text{ cations} - \Sigma \text{ anions}) * 100 / (\Sigma \text{ cations} + \Sigma \text{ anions})$$

où les ions sont exprimés en méq/l.

Une valeur élevée de BI indique :

- soit l'analyse est incomplète : par exemple il y a encore des composants non dosés.
- soit des erreurs de calcul ont été commises lors du dosage ou lors de la conversion (mg/l en méq/l).

Ce paramètre est utilisé pour vérifier les résultats des analyses. Voici quelques descriptions des deux diagrammes que nous représentons avec le logiciel Aquachem.

III.2.2.1. Le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations respectivement et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs, c'est-à-dire la projection des cations et anions donne le faciès hydrochimique des eaux. Ce diagramme permet une classification des analyses par famille géochimique et une visualisation des évolutions physico-chimiques d'une eau dans une chronique de données.

Le diagramme de Piper, qui a été choisi parmi d'autres, est une représentation des concentrations en ions majeurs les plus courants, il permet une représentation des anions et

des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions.

Les diagrammes sont tracés séparément de gauche à droite et nous avons :

- le premier triangle qui est réservé pour les cations : Mg^{2+} , Ca^{2+} , $(Na^+ + K^+)$ et les anions : SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-

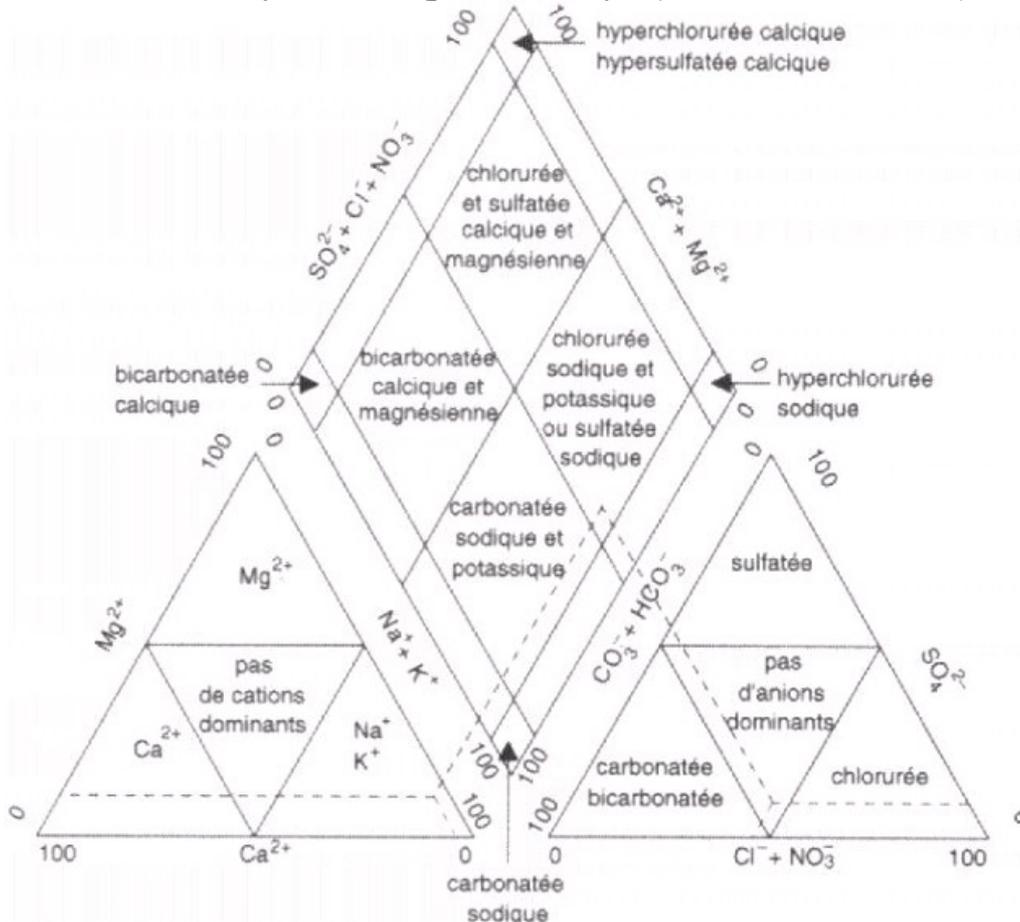
le coté droit du triangle contient les autres anions et le coté gauche du triangle les autres cations

La représentation graphique des résultats d'analyse d'eau minérale indique :

- pour le sommet du losange un faciès sulfaté/chloruré, calcique/magnésien
- pour la base du losange un faciès bicarbonaté, sodique
- pour la pointe droite du losange un faciès sulfaté/chloruré, sodique
- pour la pointe gauche du losange un faciès bicarbonaté, calcique/magnésien.

La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau minérale concernée.

Comment interpréter un diagramme de Piper (Voir le schéma suivant)



Source : Cours de RABEMANANA V (MSTGA).2005

Figure 6: Méthode d'interprétation d'un diagramme de Piper

III.2.2.2 Le diagramme de Schoeller

Ce diagramme est utilisé pour la typologie des eaux et l'appréciation de leurs concentrations ioniques. Il permet une détermination de la qualité chimique d'une eau à partir des données brutes de l'analyse de laboratoire.

Le diagramme de Schoeller comprend :

- six échelles verticales : ces échelles sont disposées à égales distances et marquées respectivement par Mg^{2+} , Ca^{2+} , $(Na^{+}+K^{+})$, Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} .
- deux échelles verticales sur les bords du diagramme graduées en millimoles par litre.

Les échelles logarithmiques principales, graduées servent à représenter les résultats de l'analyse chimique de l'eau.

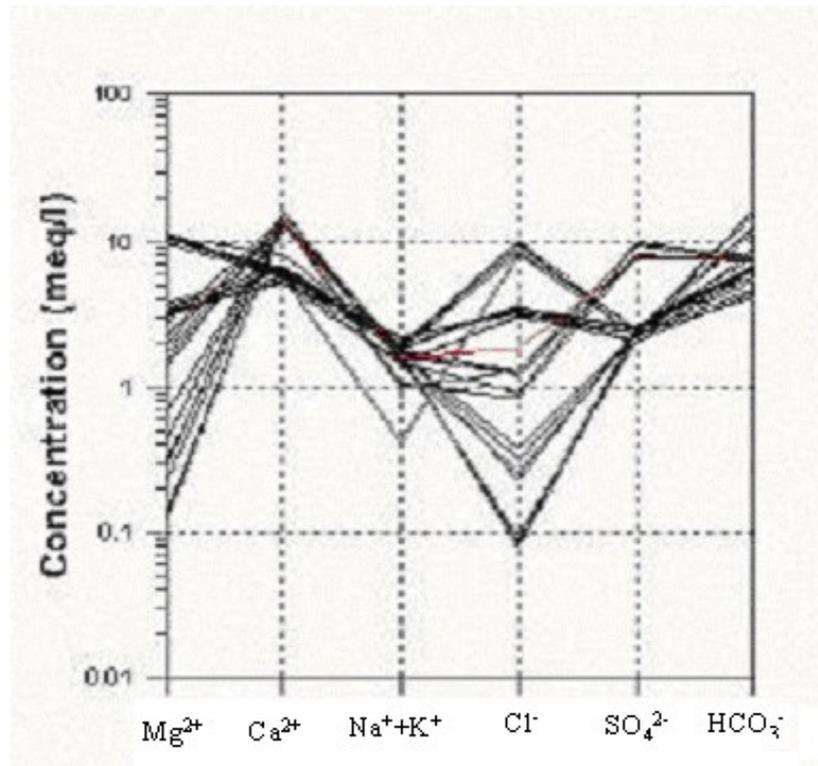


Figure 7: Diagramme de Schoeller

III.3. EXPLOITATION DES DONNÉES

Après la vérification de la balance ionique, nous avons commencé à dresser les différents diagrammes: diagramme de Piper pour la zonation géochimique et diagramme de Schoeller pour la classification hydrochimique. Dans notre étude, les deux diagrammes sont les outils principaux de l'interprétation des résultats.

III.4 RÉSULTATS

Plusieurs villages de cette région ont été visités et dans chaque village, on a effectué un prélèvement d'échantillon d'eau du puits mais dans ce travail, nous allons considérer l'ensemble de la zone et quelques villages, comme : Andalakaolo (MD3), Lahimanara (MD4), Ifanombike (MD7), Modohoika haut (MD12), Modohoika bas (MD13), Dasotsy (MD21) et Andalipito (MD100).

Les résultats sont donnés dans les diagrammes ci-dessous. Nous allons maintenant interpréter les diagrammes obtenus dans ces sept villages et ensuite tirer les résultats relatifs à toute la zone d'étude (figure 16 et figure 17).

III.4.1. Emplacement des puits à étudier

Nous avons consigné l'emplacement des puits étudiés dans les sept villages dans la figure 7 suivante :

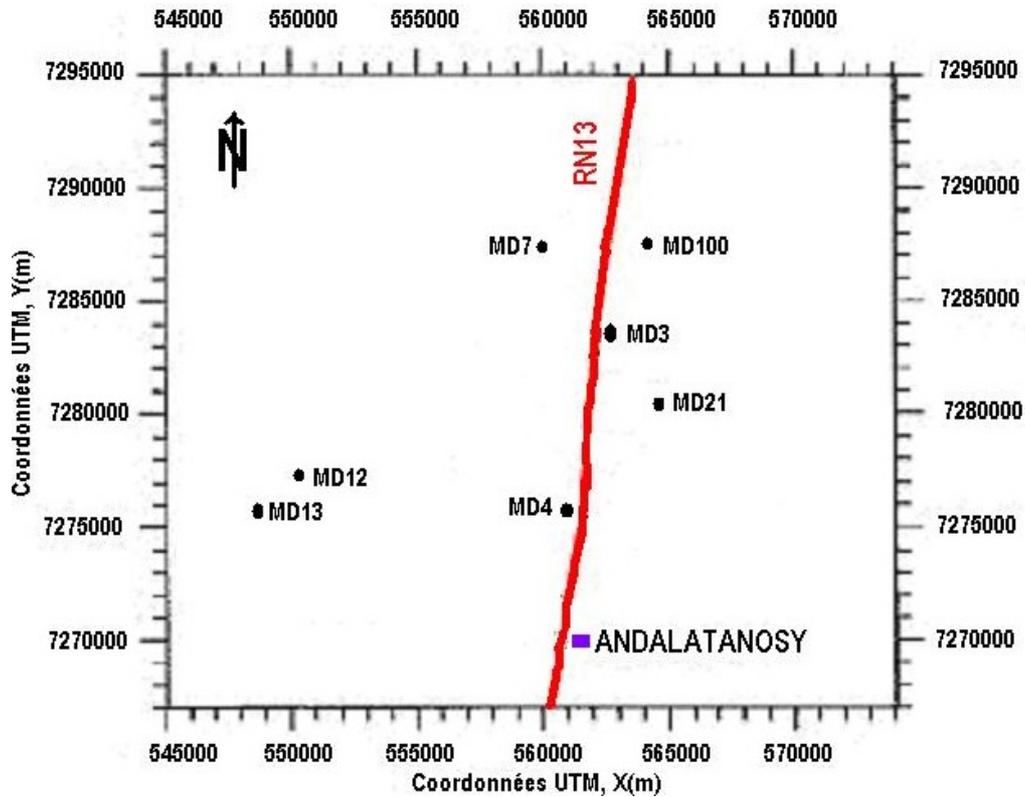


Figure 8 : Emplacement des puits étudiés

III.4.2 Interprétation hydrochimique des diagrammes

Pour chacun des sept villages, nous allons présenter les diagrammes de Piper et de Schoeller et faire leurs interprétations.

III.4.2 1.Village Andalakaolo (MD3)

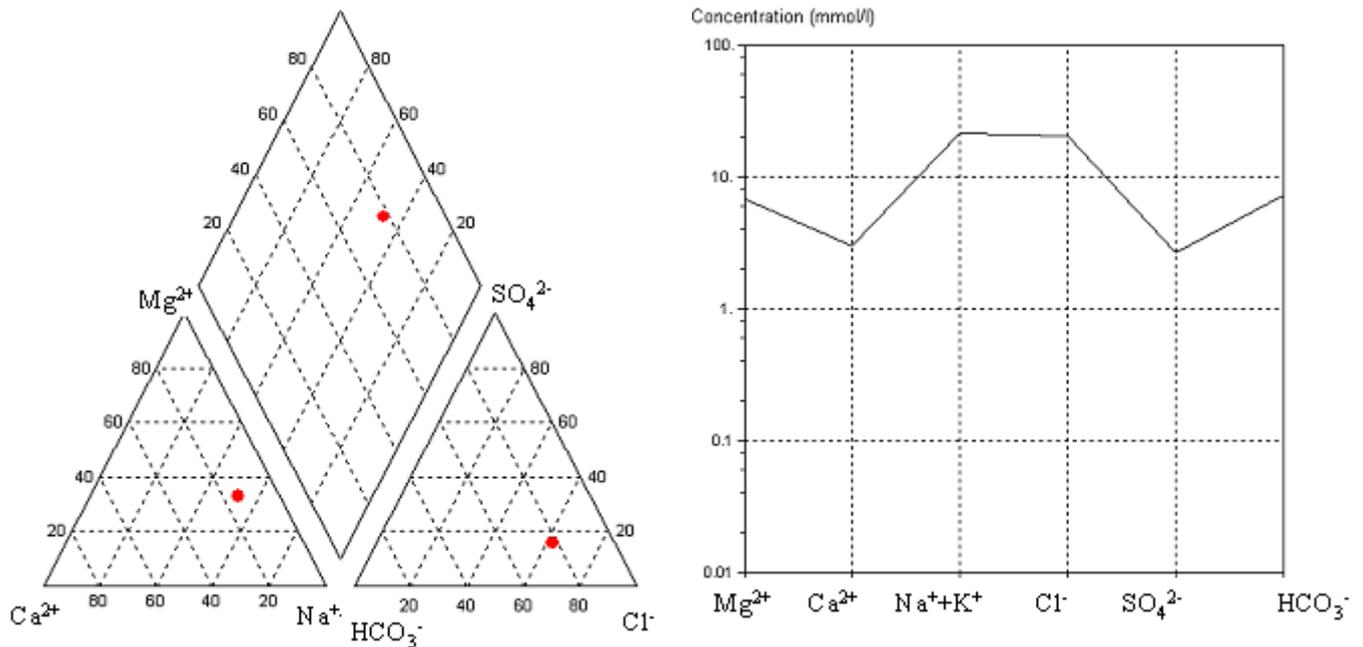


Figure 9 :Diagrammes de Piper et de Schoeller du village d'Andalakaolo

Interprétation

a. Diagramme de Piper

La projection dans le losange se trouve dans la classe de l'eau chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique pour l'eau analysée dans ce village.

b. Diagramme de Schoeller

Le diagramme de Schoeller met en évidence que cette courbe présente un même pic au niveau de $(Na^+ + K^+)$ et au niveau de Cl^- le pic est maximal, au niveau de Mg^{2+} et HCO_3^- on a un pic moyen et au niveau de Ca^{2+} et SO_4^{2-} les taux sont minimaux par rapport à ceux des autres pics d'ion.

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

III.4.2.2 Village Lahimanara (MD4)

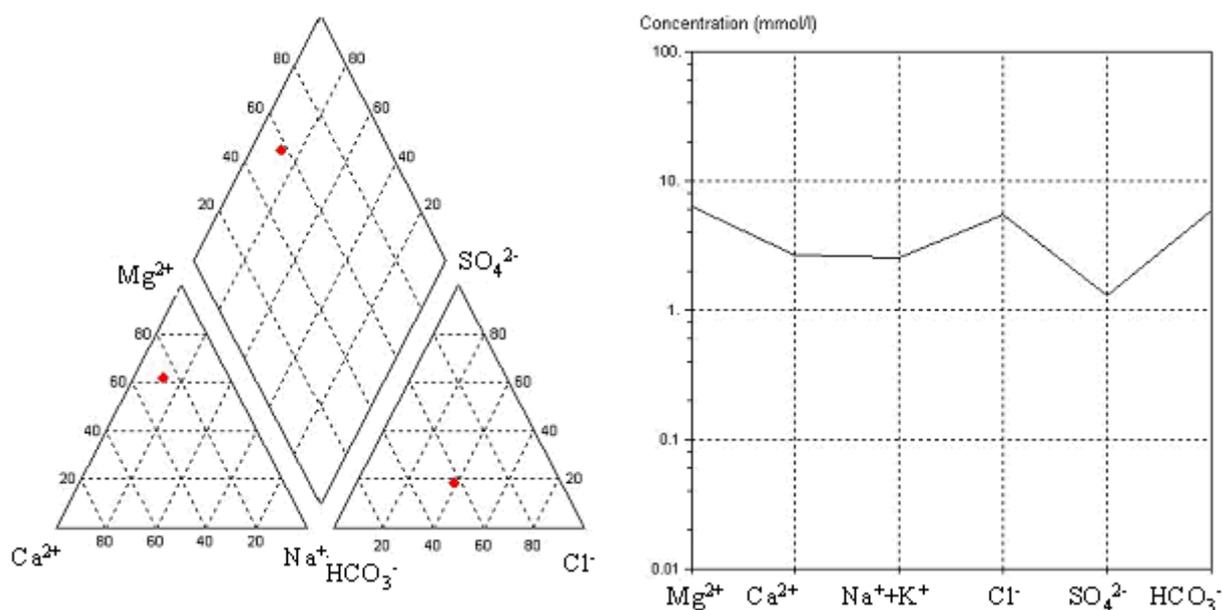


Figure 10 : Diagrammes de Piper et de Schoeller du village de Lahimanara

Interprétation

a. Diagramme de Piper

D'après ce diagramme, on conclut que la classe de l'eau de ce village est chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

b. Diagramme de Schoeller

On a les mêmes pics pour les taux de Mg^{2+} , Cl^- , et HCO_3^- ; les taux en Ca^{2+} , ($Na^+ + K^+$) sont voisins et le taux en SO_4^{2-} est minimal.

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

III.4.2.3 Village Ifanombike (MD7)

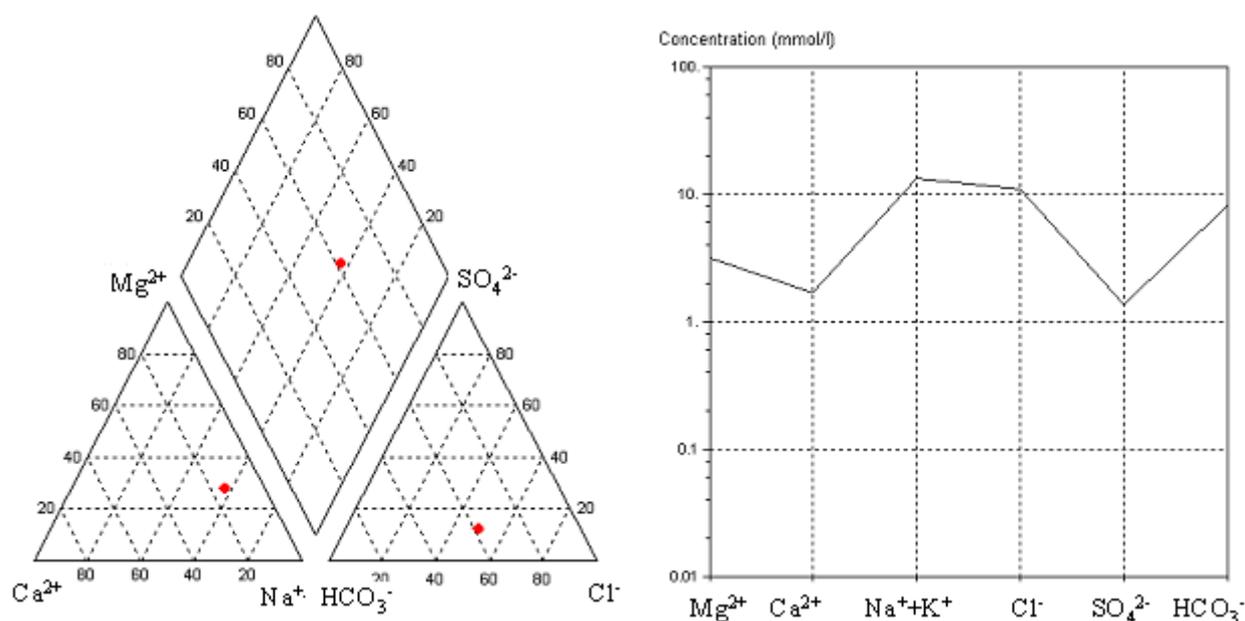


Figure 11 : Diagrammes de Piper et de Schoeller du village d'Ifanombike

Interprétation

a. Diagramme de Piper

La projection dans le losange indique le type d'eau chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique.

b. Diagramme de Schoeller

Le taux en (Na⁺+K⁺) est maximal, les taux en SO₄²⁻ et en Ca²⁺ sont minimaux, et les taux des autres ions sont différents.

La répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès type chlorurée sodique et potassique.

III.4.2.4 Village Modohoika haut (MD12)

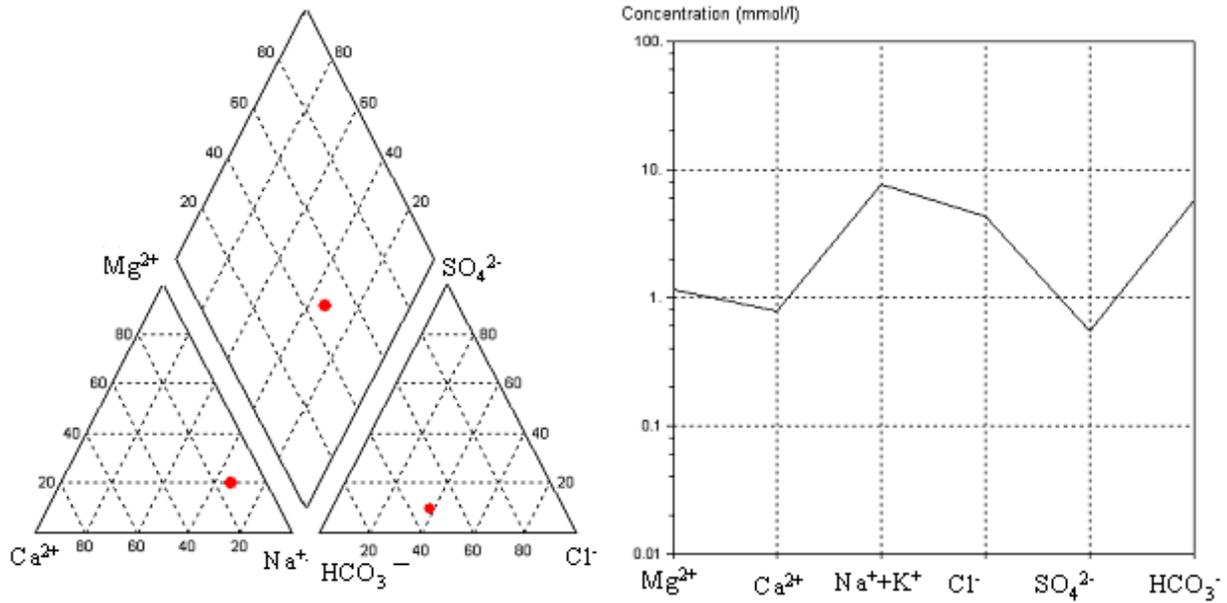


Figure 12 :Diagrammes de Piper et de Schoeller du village de Modohoika haut

Interprétation

a. Diagramme de Piper

La classe de cette eau est carbonatée sodique et potassique

b. Diagramme de Schoeller

On a un pic maximal pour (Na⁺+K⁺) et un minimum pour SO₄²⁻.

La répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès type d'eau carbonatée sodique et potassique.

III.4.2.5 Village Modohoika bas (MD13)

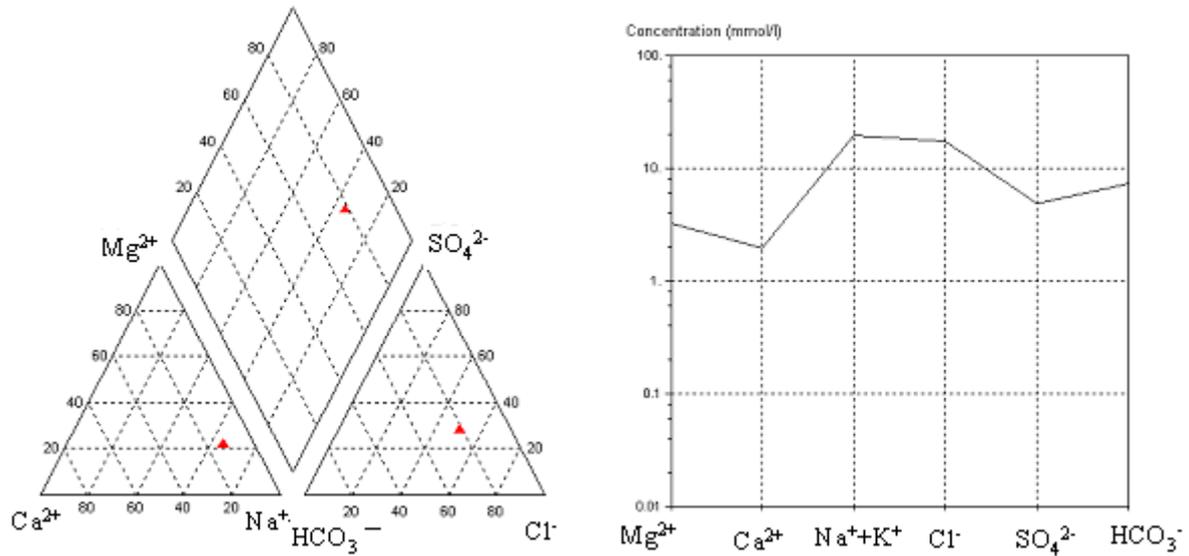


Figure 13: Diagrammes de Piper et de Schoeller du village de Modohoika bas

Interprétation

a. Diagramme de Piper

On trouve que la projection est dans la classe chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique.

b. Diagramme de Schoeller

Ici, on a des pics voisins pour ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) et Cl^- et un taux minimal en Ca^{2+} .

La répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès chloruré sodique et potassique.

III.4.2.6 Village Dasotsy (MD21)

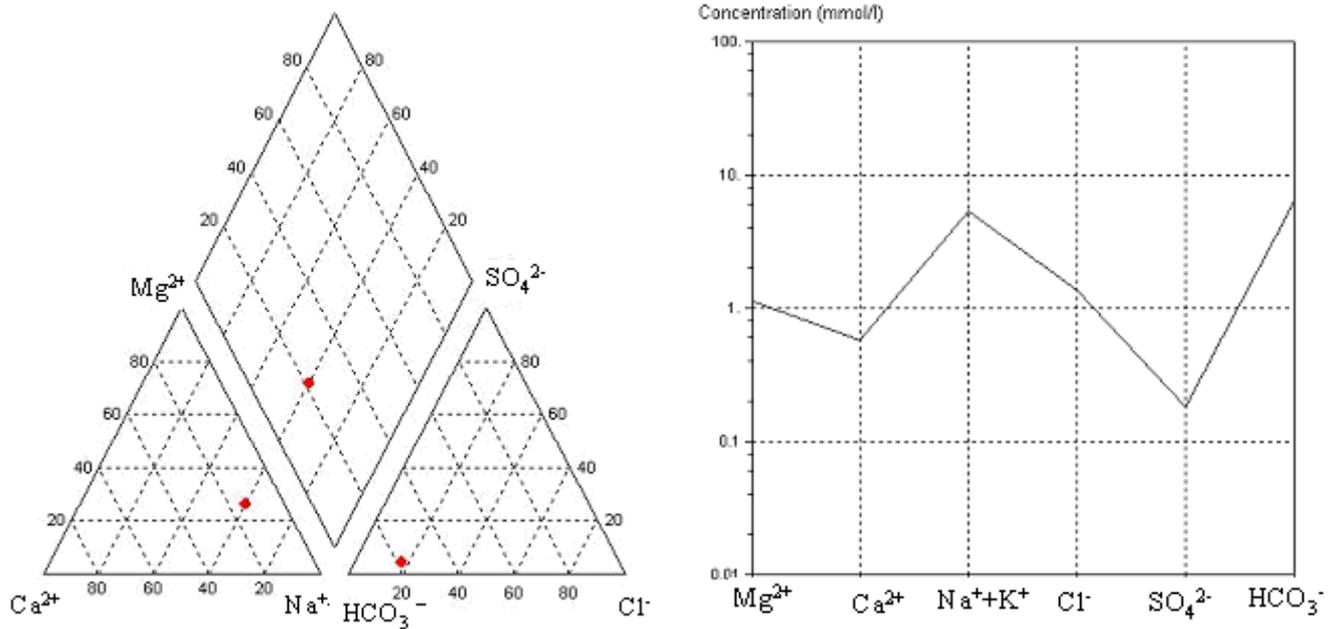


Figure 14: Diagrammes de Piper et de Schoeller du village de Dasotsy

Interprétation

a. Diagramme de Piper

L'eau de ce village a une classe carbonatée sodique et potassique

b. Diagramme de Schoeller

Les taux pour (Na⁺+K⁺) et HCO₃⁻ sont maximaux et minimal pour SO₄²⁻.

La répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès carbonaté sodique et potassique.

III.4.2.7 Village Andalipito (MD100)

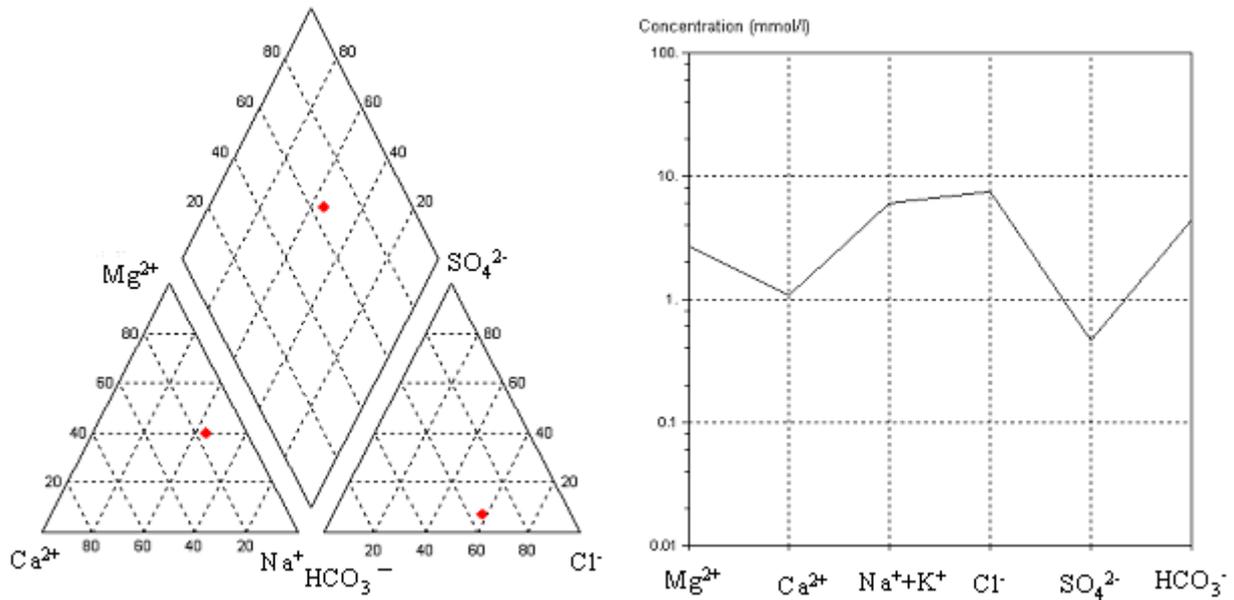


Figure 15: Diagrammes de Piper et de Schoeller du village d'Andalipito

Interprétation

a. Diagramme de Piper

Les projections de l'anion et du cation indiquent la classe chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

b. Diagramme de Schoeller

Avec le diagramme de Schoeller, on voit que le taux en chlore (Cl^-) de l'eau est maximal par rapport aux autres éléments, et cette eau a aussi une faible quantité de sulfate (SO_4^{2-}); les taux en Mg^{2+} , Ca^{2+} , ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) et HCO_3^- sont moyens.

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

III.4.2.8 Commune d'Andalatanosy

Après avoir étudié les résultats obtenus dans les sept villages, on peut établir les diagrammes de Piper et de Schoeller relatifs à l'ensemble de la commune d'Andalatanosy.

a. Diagramme de Piper

Rappelons que ce diagramme de Piper permet de déterminer le faciès types des eaux.

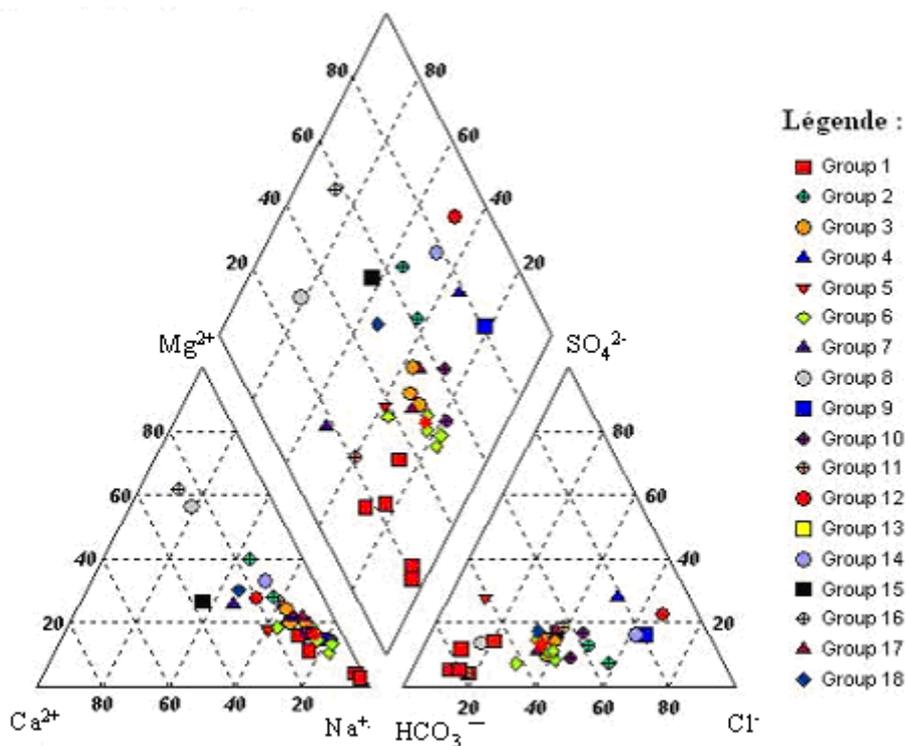


Figure 16: Diagramme de Piper établi pour l'ensemble de la commune d'Andalatanosy.

avec :

groupe 1 est de type : $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$	groupe 10 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$
groupe 2 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$	groupe 11 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$
groupe 3 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$	groupe 12 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$
groupe 4 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$	groupe 13 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{Cl}^-$
groupe 5 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$	groupe 14 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- - \text{NO}_3^-$
groupe 6 est de type : $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$	groupe 15 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{C}$
groupe 7 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$	groupe 16 est de type : $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{NO}_3^- - \text{HCO}_3^-$
groupe 8 est de type : $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$	groupe 17 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$
groupe 9 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$	groupe 18 est de type : $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{C}$

Interprétation

Classification des faciès chimiques des eaux

Pour avoir une vue globale de l'ensemble des analyses et pour déterminer une classification des faciès chimiques de ces eaux souterraines, nous allons représenter les teneurs des différents ions dans le diagramme de Piper.

D'après cette représentation graphique, on a :

-pour les anions :

A part quelques échantillons d'eau mixte où il n'y a pas d'anions dominants, deux pôles se distinguent. Cinq échantillons d'eau sont caractérisés par un pôle chloruré, le reste évolue vers un pôle bicarbonaté.

-pour les cations :

La majorité des échantillons d'eau évoluent vers un pôle sodique en fonction de la minéralisation des eaux. On constate toutefois deux échantillons d'eau MD4 et MD8 évoluant vers un pôle magnésien.

Pour le groupement des points dans le losange :

Trois types des faciès chimiques des eaux se distinguent : chloruré sodique, bicarbonaté magnésien, et bicarbonaté sodique.

Les eaux à faciès bicarbonatés acquièrent l'essentiel de leurs minéralisations par l'altération des silicates et la dissolution des carbonates. Leurs CE sont inférieurs à 2000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Les eaux à faciès chlorurés sont des eaux subissant une forte influence d'effet de sels. Cet effet de sel se manifeste par des teneurs excessives en chlorure, en sulfate et éventuellement en nitrate dû à des apports anthropiques. Des fortes CE des eaux (supérieures à 2000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) sont observées dans ce type d'eau.

En conclusion, d'après le diagramme de Piper, on a quatre types de faciès d'eau dans la commune d'Andalatanosy :

- carbonatée sodique et potassique (groupe 1 et 11)
- chloruré sodique et potassique ou sulfatée sodique (groupe 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 14, 17)
- bicarbonatée calcique et magnésien (groupe 7, 8, 18)
- chlorurée et sulfatée calcique et magnésien (groupe 2, 15, 16).

b. Diagramme de Schoeller

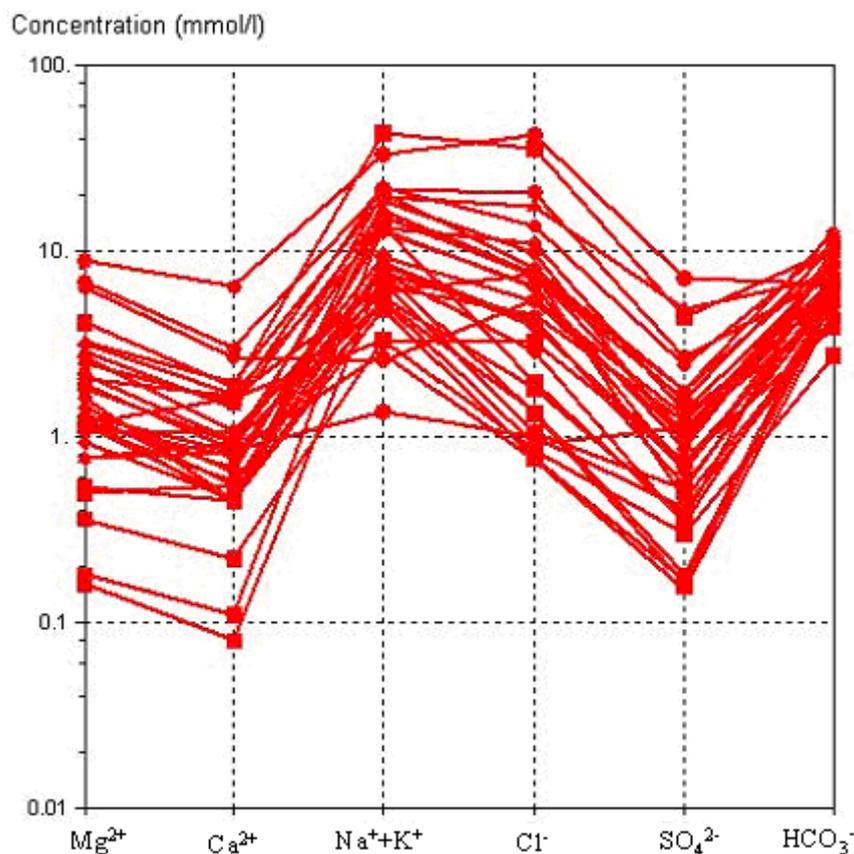


Figure 17: Diagramme de Schoeller établi pour l'ensemble de la commune d'Andalatanosy

Interprétation

Si la concentration de l'eau varie, la teneur des différents éléments change. Donc la position plus haute ou plus basse des points représentant la position des ions sur le diagramme correspond au logarithme de la concentration. Il en résulte que les graphiques des eaux de même composition chimique et de concentration voisine sont parallèles (H. Schoeller).

Si plusieurs eaux ont des concentrations différentes, avec des proportions identiques dans leurs différents éléments, elles se placent parallèlement les unes au dessus des autres au lieu de se recouvrir (J. Letourneur).

Un groupe d'eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donne une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

Alors, le diagramme de Schoeller montre que les eaux souterraines de la commune d'Andalatanosy ont des concentrations (teneurs) élevées en ions sodium et potassium ($Na^{+}+K^{+}$), et en chlorure (Cl^{-}), des teneurs moyennes en ions magnésium (Mg^{2+}), sulfate (SO_4^{2-}), et alcalinité (HCO_3^{-}), et des faibles teneurs en calcium (Ca^{2+}).

Ainsi, compte tenu de ces résultats on peut dire que la répartition synthétique des ions majeurs donne le faciès type des eaux carbonatées sodiques et potassiques, chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatée sodique, bicarbonatée calcique et magnésienne, chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

III.4.2. Combinaison des informations hydrochimiques et géophysiques

Jusqu'à maintenant, Madagascar utilise encore la norme proposée par l'UNICEF. Nous avons consigné les informations hydrochimiques et géophysiques (panneaux électriques) dans un tableau comportant quatre colonnes et huit lignes :

Tableau 5: Normes de qualité de l'eau

Rubrique	Symbole	Unité	Norme
Aspect			Transparence
Turbidité		NTU	<5
Couleur			Aucune
Odeur			Aucune
Conductivité		μS/cm	<3000
PH			6.5 – 9.5
Matière Organique		mg/l	<2
Dureté TH		°F	<50 =500mg/l
Fer total	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	mg/l	<0.3
Chlorure	Cl ⁻	mg/l	<250
Sulfate	SO ₄ ²⁻	mg/l	<250
Azote ammoniacal	NH ₄ ⁺	mg/l	<0.05
Nitrate	NO ₃ ⁻	mg/l	<50

Source: UNICEF

- la première colonne comporte les noms des villages
- la deuxième colonne présente les résultats hydrochimiques (faciès des eaux)
- la troisième colonne présente les résultats géophysiques obtenus à partir des panneaux électriques mentionnés au paragraphe II.2 de la partie II
- la quatrième colonne présente la conclusion pour chaque village.

Tableau 6 : Combinaison des résultats

Village	Faciès hydrochimiques	Résultats géophysiques (panneau, d'après V.R.)	Conclusions
Andalakaol	Chlorurée sodique et	Résistivité électrique de la	L'eau du puits à faciès chlorurée et

o (MD3)	potassique. C.E=4020 μ S.cm ⁻¹ . N.S =5.15m.	nappe= 200 Ω .m, épaisseur = 10m	sodique se trouvant à la profondeur 10m n'est pas potable (CE = 4020 μ S.cm ⁻¹) .Elle est localisée dans une aquifère de fissure.
Lahimanara (MD4)	Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne. C.E=1980 μ S. cm ⁻¹ . N.S =1.31m.	Résistivité électrique de la nappe= 80 Ω .m, épaisseur = 10m	L'eau du puits à faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne se trouvant à la profondeur 10m est potable (CE = 1980 μ S.cm ⁻¹) .Elle est localisée dans une aquifère des altérites et des fissures.
Ifanombike (MD7)	Chlorurée sodique et potassique C.E=2180 μ S. cm ⁻¹ . N.S =12.9m.	Résistivité électrique de la nappe= 50 Ω .m, épaisseur = 20m	L'eau du puits à faciès chlorurée sodique et potassique se trouvant à la profondeur 20m est potable (CE = 2180 μ S.cm ⁻¹) .Elle est localisée dans une couche altérée et fissurée de leptynite.
Modohoika haut (MD12)	Carbonatée sodique et potassique. C.E=720 μ S. cm ⁻¹ . N.S =6.22m.	Résistivité électrique de la nappe= 130 Ω .m, épaisseur = 20m	L'eau du puits à faciès carbonatée sodique et potassique se trouvant à la profondeur 20m est potable (CE = 720 μ S.cm ⁻¹) .Elle est localisée dans les altérites sableuses.
Modohoika bas (MD13)	Chlorurée sodique et potassique. C.E=3230 μ S. cm ⁻¹ . N.S =3.93m.	Résistivité électrique de la nappe= 30 Ω .m, épaisseur = 22m	L'eau du puits à faciès chlorurée sodique et potassique se trouvant à la profondeur 22m n'est pas potable (CE = 3230 μ S.cm ⁻¹) .Elle est localisée dans une altérite argileuse.
Dasotsy (MD21)	Carbonatée sodique et potassique. C.E=790 μ S. cm ⁻¹ . N.S =2.81m.	Résistivité électrique de la nappe= 300 Ω .m, épaisseur = 20m	L'eau du puits à faciès carbonatée sodique et potassique se trouvant à la profondeur 20m est potable (CE = 790 μ S.cm ⁻¹) .Elle est localisée dans un socle fissuré et une zone broyée.
Andalipito (MD100)	Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne. C.E=2750 μ S. cm ⁻¹ . N.S =10.67m.	Résistivité électrique de la nappe= 100 Ω .m, épaisseur = 20m.	L'eau du puits à faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne se trouvant à la profondeur 20m est potable (CE = 2750 μ S.cm ⁻¹) .Elle est localisée dans une zone de broyage, favorable à un épaissement de l'altération et exploite un aquifère de fissure

où P : la profondeur de la nappe

En MD13 et MD7, nous avons le même faciès (chlorurée sodique et potassique), de C.E différents (3230 μ S. cm⁻¹, 2180 μ S. cm⁻¹), et les eaux sont trouvées dans des conditions géologiques différentes; en MD100 et MD4, nous avons le même faciès(chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne), de même ordre de grandeur en C.E (de l'ordre de 2000 μ S. cm⁻¹) et les eaux sont trouvées dans des conditions géologiques différentes; en MD12 et MD21, nous avons un même faciès(carbonatée sodique et potassique), de même ordre de grandeur en C.E (de l'ordre de 700 μ S. cm⁻¹) et les eaux sont trouvées dans des conditions géologiques

différentes ; en MD3 nous avons un faciès chlorurée sodique et potassique, de C.E élevée ($4020\mu\text{S. cm}^{-1}$) et l'eau est localisée dans une aquifère de fissure.

L'eau de la zone située à proximité de l'Andalatanosy présente une partie de qualité acceptable.

CONCLUSION

En consultant les diagrammes de Piper et de Schoeller de la zone d'étude, on peut tirer les résultats suivants :

-les données de l'hydrochimie des eaux montre une distribution spatiale de la minéralisation des eaux et des faciès types des eaux

-les eaux fortement minéralisées ($CE > 2200 \mu S cm^{-1}$) ont une teneur en chlore (Cl^-) supérieur à 10 mmole/l et un faciès géochimique du type chloruré sodique

-pour les eaux ayant une conductivité électrique $CE < 2200 \mu S cm^{-1}$, on observe une teneur en chlore (Cl^-) inférieur à 10 mmole/l et un faciès géochimique du type bicarbonaté sodique.

On sait qu'il y a deux origines possibles pour le chlore (Cl^-): soit d'origine interne à la roche, soit d'origine externe. Le rapport molaire Br^-/Cl^- supérieur à celui de l'eau de mer exclut une origine marine des chlorures.

Le tracé Na^+/Cl^- en fonction du Cl^- indique que les chlorures peuvent provenir d'un mélange de deux pôles d'eau, l'un fortement minéralisé et l'autre peu minéralisé.

25% des puits ont produit de l'eau notamment à usage agricole. Ces puits ont été bouchés et abandonnés pour l'alimentation mais ont été utilisés pour le bétail. 75 % présentant une faible salinité ont été utilisés pour l'alimentation (c'est-à-dire pour les conductivités électriques (CE) inférieures à $3000 \mu S cm^{-1}$). En général, 64% ont été équipés en pompes à main et le reste 11% ont donné moins de $0.5 m^3.h^{-1}$ de débit a été équipé.

BIBLIOGRAPHIE

[1] **AEDES.**, 1999. (Association Européenne pour le Développement et la Santé). « Situation générale de la zone SAP (Système d'Alerte Précoce) », 48p.

[2] **Baltassat J.M.**, 2001. Caractérisation par Résonance Magnétique Protonique (RMP) des aquifères du socle de la région d'Andalatanosy (Madagascar), BRGM/RP-50900-FR.,

[3] **BD 500.**, 2003. « Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du grand Sud de Madagascar », 250p.

[4] **RABEMANANA, V.**, 2002. Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy (Sud de Madagascar). Thèse de doctorat de spécialité sciences de la terre, Université de paris VI, 203p.

[5] **RABEMANANA, V.**, 2005. "Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar", journal of hydrology 310 143-156, 15p.

[6] **RAHAJARISON, A R.**, 2002. Application de l'électromagnétisme fréquentiel à l'étude des eaux souterraines de la région d'Andalatanosy (AMBOVOMBE- ANDROY). Mémoire d'ingénieur des mines, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo, 71p.

[6] **RAZAKAMANANTSOA A R.**, 2004. Essai de Modélisation des ressources en eau du sous-bassin de Morondava. Mémoire d'Ingénieur des Mines, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo, 120p.

[7] SITE WEB

<http://www.intesoft.com/produits/prods/hydro.html>. Pour le logiciel Aquachem (consulté le 20 Octobre 2005).

RESUME

La région autour d'Andalatanosy dans l'Androy, Sud de Madagascar, située en zone de socle cristallin souffre énormément de problèmes d'alimentation en eau potable.

Dans le but de déterminer les bons emplacements des futurs points d'eau, les caractéristiques physico-chimiques, la potabilité des eaux ; une synthèse des données hydrochimiques (aspects physiques et chimiques) et géophysiques (panneaux électriques) extraites de la thèse de RABEMANANA V. intitulée « Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy » est proposée.

Les données physico-chimiques recueillies ont permis de caractériser et de comparer les eaux souterraines de la région à partir des diagrammes de Piper et de Schoeller établis à l'aide du logiciel AQUACHEM. Ces graphiques ont permis de visualiser directement les faciès types des eaux concernées, essentiellement, carbonatés sodiques et potassiques, chlorurés sodiques et potassiques, chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne qui démontrent la forte minéralisation et la potabilité de ces eaux.

Les données géophysiques recueillies, notamment le niveau aquifère, ont permis de déterminer les caractéristiques des nappes (résistivité, profondeur, ...) et globalement, les résultats obtenus sont en bonne cohérence avec l'hydrochimie.

Mots clés : Andalatanosy, hydrochimie, géophysique, Aquachem, diagramme de Piper, diagramme de Schoeller.

SUMMARY

The area around of Andalatanosy in Androy, South of Madagascar, located in zone of crystalline base suffers enormously of problems of drinking water.

With an aim of determining the good sites of the future water points, the physico-chemical characteristics, the potability of water; a synthesis of the hydrochemical data (physical and chemical aspects) and geophysical data (electrical panels) extracted from the thesis of RABEMANANA V untitled "Origin and characterization of the salinity of water in the aquifers of base: case of the area of Androy "is proposed.

The physicochemical data collected made it possible to characterize and compare subsoil waters of the area starting from the diagrams of Piper and Schoeller established with l'aide of software AQUACHEM. These graphs made it possible to directly visualize the standard facies of water concerned, primarily, carbonated sodic and potassic, chlorinated sodic and potassic, chlorinated and sulphated calcic and magnesian which shows the strong mineralisation and the potability of this water.

The data geophysics collected, in particular the aquiferous level, made possible the determination of the characteristics of the tablecloths (resistivity, depth...) and overall, the results obtained are in good coherence with the hydrochemistry.

Key words: Andalatanosy, hydrochemistry, geophysics, Aquachem, diagram of Piper, diagram of Schoeller