

SOMMAIRE

* * * * *

PREFACE	<i>i</i>
REMERCIEMENT	<i>ii</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>vi</i>
LISTE DES FIGURES	<i>vii</i>
LISTES DES SIGLES ET ABREVIATIONS	<i>viii</i>

<u>PREFACE.....</u>	<u>4</u>
----------------------------	-----------------

<u>REMERCIEMENT.....</u>	<u>5</u>
---------------------------------	-----------------

<u>SOMMAIRE.....</u>	<u>7</u>
-----------------------------	-----------------

<u>LISTE DES TABLEAUX.....</u>	<u>10</u>
---------------------------------------	------------------

<u>LISTE DES FIGURES.....</u>	<u>11</u>
--------------------------------------	------------------

<u>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....</u>	<u>12</u>
---	------------------

<u>I.1. Présentation Géographique de la zone d'étude</u>	<u>4</u>
<u> I.1.1 Grands ensembles géomorphologiques</u>	<u>4</u>
<u> I.1.1.1 La sous région littorale ouest</u>	<u>4</u>
<u> I.1.1.2 Le couloir de Betsiriry (englobant la zone d'Ankilizato).....</u>	<u>4</u>
<u> I.1.2 Données climatiques</u>	<u>5</u>
<u> I.1.2.1 Le climat de Morondava (13)</u>	<u>5</u>
<u> Figure 3 : Evolution mensuelle de la température à Morondava.....</u>	<u>5</u>
<u> I.1.2.2 Les eaux de surface</u>	<u>6</u>
<u> I.1.3 Situation socio-économique</u>	<u>7</u>
<u>I.2. Contexte géologique de la zone d'étude</u>	<u>7</u>
<u> I.2.1 Structure du Sud Ouest de Madagascar</u>	<u>8</u>
<u> I.2.2 Stratigraphie.....</u>	<u>8</u>
<u>I.3 Hydrogéologie du Sud Ouest de Madagascar</u>	<u>11</u>
<u> I.3.1 Nappes souterraines de la région de Morondava.....</u>	<u>12</u>
<u> I.3.2 Nappes de la zone d'étude</u>	<u>12</u>
<u>II.1. Notion d'hydrochimie.....</u>	<u>15</u>
<u> II.1.1 Eléments présents dans l'eau</u>	<u>15</u>
<u> II.1.2 Propriétés organoleptiques de l'eau</u>	<u>15</u>
<u> II.1.2.1 Turbidité</u>	<u>16</u>
<u> II.1.2.2 Couleur</u>	<u>16</u>
<u> II.1.2.3 Goût et Odeur</u>	<u>16</u>
<u> II.1.2.4 Température</u>	<u>16</u>

II .1.3 Paramètres physico-chimiques de l'eau	17
II.1.3.1 pH ou potentiel d'hydrogène.....	17
II .1.3.2 Conductivité électrique	17
II .1.3.3 Oxygène dissout (OD).....	17
II .1.3.4 Solide total dissous (ou TDS).....	18
II .1.3.5 Alcalinité	18
II .2. Notion d'hydrologie isotopique.....	19
II .2.1 Isotopes présents dans l'eau	19
II.2.1.1 Isotopes du milieu.....	19
II.2.1.2 Fractionnement isotopique et la variation des teneurs des isotopes dans l'eau	20
II .2.2 Utilisation des isotopes stables en hydrogéologie.....	21
II .2.2.1 Deutérium et Oxygène 18.....	21
II .2.3 Utilisation des isotopes radioactifs en hydrogéologie	23
II .2.3.1 Tritium (3 H).....	23
III.1. Investigations géologiques et hydrogéologiques.....	24
III .1.1 Documentation.....	24
III .1.2 Investigation géologique et hydrogéologique	24
III .2. Mesures in situ.....	25
II .2.1 Coordonnées	25
II .2.2 Propriétés organoleptiques : la couleur, le goût, l'odeur et la turbidité.....	26
II .2.3 Température	26
II .2.4 Salinité, TDS et conductivité électrique.....	26
II .2.5 pH.....	27
II .2.6 Oxygène dissous.....	27
II .2.7 Alcalinité	27
II .2.8 Nitrate	28
II .2.9 Prélèvement d'eau	29
II .2.9.1 Matériels de prélèvement	29
II .2.9.2 Mode de prélèvement.....	30
II .2.9.3 Préparation des échantillons.....	30
III .3. Traitements des données.....	31
III .3.1 Système d'information géographique (SIG)	31
III .3.2 Logiciel AQUACHEM	31
III .3.3 Tableur EXCEL	31
IV .1. Résultats.....	32
IV .1.1 Investigations géologiques et hydrogéologiques.....	32
IV .1.2 Mesure in situ	35
IV .1.2.1 Caractéristique des points d'eaux	35
Tableau 05 : Les caractéristiques des puits et canal.....	35
Tableau 06 : Les caractéristiques des forages.....	35
IV .1.2.2 Coordonnées	36
IV .1.2.3 Les paramètres physico-chimiques.....	36
IV .1.3 Analyse au laboratoire	41
IV .1.3.1 Analyse chimique	41
IV .1.3.2 Analyse isotopique	42
IV .2. Interprétation et discussion sur la minéralisation de l'eau	43
IV .2.1 Caractérisation chimique	44
IV .2.1.1 Eau de puits.....	44
IV .2.1.2 Eau de forage.....	46

IV .2.2 Origine des eaux	47
IV .2.3 Origine de la minéralisation.....	49
IV .2.3.1 Dissolution des minéraux	50
IV .2.3.2 Apport marin	53
IV .2.3.3 Evaporation.....	55

[REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....60](#)

Annexe I.....	64
Annexe II.....	65
W1.....	71
Annexe IX.....	81

ANNEXES

Coordonnées de tous les points d'eaux visités	Annexe I
Résultats des mesures in situ	Annexe II
Résultats des analyses chimiques	Annexe III
Résultats des analyses isotopiques	Annexe IV
Techniques d'analyse de l'eau	Annexe V
Norme de la qualité d'eau	Annexe VI
Diagramme de Piper des eaux de forages.....	Annexe VII
Coupes lithologiques des puits et forages	Annexe VIII
Quelques photos des points d'eaux échantillonnés.....	Annexe IX

LISTE DES TABLEAUX

* * * * *

Tableau01 : Stratigraphie du bassin sédimentaire de Morondava.....	09
Tableau02 : Nappes souterraines de Morondava.....	12
Tableau03 : Principales nappes rencontrées dans la zone littorale.....	13
Tableau04 : Minéralisation correspondant à la valeur de la conductivité électrique.....	17
Tableau05 : Caractéristiques des puits	35
Tableau06 : Caractéristiques des forages.....	35
Tableau07 : Coordonnées des puits visités et échantillonnés	36
Tableau08 : Coordonnées des forages visités et échantillonnés	36
Tableau09 : Paramètres mesurés in Situ pour les eaux de puits et canaux.....	37
Tableau10 : Paramètres mesurés in Situ pour les eaux de forages	37
Tableau11 : Analyses chimiques des eaux de puits à TDS faible	41
Tableau12 : Analyses chimiques des eaux de puits à TDS élevé.....	41
Tableau13 : Analyses chimiques des eaux de forages.....	41
Tableau14 : Analyses isotopiques des eaux de forages.....	43
Tableau15 : Analyses isotopiques des eaux de puits et eau de surface	43

LISTE DES FIGURES

* * * * *

Figure01 : Carte de localisation de la zone d'étude.....	03
Figure02 : Régime moyen des pluies à Morondava.....	05
Figure03 : Evolution mensuelle de la température à Morondava.....	05
Figure04 : Réseaux hydrographiques de la région d'étude.....	06
Figure05 : Carte géologique du secteur d'étude.....	11
Figure06 : Carte hydrogéologique du secteur d'étude.....	14
Figure07 : Origine de la recharge.....	21
Figure08 : Evolution de la teneur en Oxygène dissous en fonction de la température et de la profondeur.....	38
Figure09 : Répartition géographique de la conductivité électrique des eaux.....	40
Figure10 : Histogramme de fréquence du TDS des eaux prélevées.....	42
Figure11 : Diagramme de piper des eaux de puits.....	44
Figure12 : Faciès chimique des eaux de puits à TDS élevé (Schoeller).....	45
Figure13 : Faciès chimiques des eaux de puits faiblement minéralisées.....	45
Figure14 : Faciès chimique des eaux de forages (diagramme de Schoeller).....	45
Figure15 : Evolution de la teneur en tritium des eaux	48
Figure16 : Relation entre les éléments chimiques et la minéralisation totale.....	49
Figure17 : Evolution des Indices de Saturation en fonction des principaux éléments constitutifs des minéraux concernés.....	50
Figure18 : Distribution des eaux à TDS faible par rapport à la droite de mise en solution de la calcite et du gypse.....	51
Figure19 : Distribution des eaux à TDS élevé par rapport à la droite de mise en solution de la calcite et du gypse.....	52
Figure20 : Distribution des eaux de forages par rapport à la droite de mise en solution de la calcite et du gypse.....	52
Figure21 : Relation entre le rapport SO ₄ /Cl et la conductivité électrique.....	54
Figure22 : Relation entre le rapport Na/Cl et le chlorure.....	54
Figure23 : Relation entre l'Oxygène 18 et le Deutérium des eaux à TDS élevé.....	55
Figure24 : Relation entre l'Oxygène 18 et le Deutérium des eaux à TDS faible.....	56

Figure25 : Relation entre le chlorure et l'Oxygène18 dans les eaux à TDS faible....57

Figure26 : Relation entre le chlorure et l'Oxygène 18 dans les eaux à TDS élevé...57

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

* * * * *

A.E.P: Adduction en Eau Potable

A.I.E.A.: Agence Internationale de l'Energie Atomique

B: forage

B.D: Bases de Données

B.I : Balance ionique

C: canal

C.N.R.E: Centre Nationale de la Recherche Environnementale

D.E.E: Direction de l'Exploitation de l'Eau

D.M.M: Droite Météorique Mondiale

D.O: Oxygène Dissous

Ec: Conductivité Electrique

G.P.S: Geographical Positioning System

I.N.S.T.N: Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires

IS : Indice de Saturation

J.I.C.A: Japan International Cooperation Agency

JI.RA.MA: Jiro sy Rano Malagasy

M.E.M: Ministère de l'Energie et des Mines

méq : milliéquivalent

mg : milligramme

NS : Niveau Statique

O.M.S: Organisation Mondiale de la Santé

pfT : Profondeur totale

pH: Potentiel d'Hydrogène

T : température.

S.M.O.W: Standard Mean Ocean Water

T.D.S: Solides Totaux Dissous

U.N.I.C.E.F: United Nation International of Children Emergency Fond

W: puits

α: Temps de résidence moyen

δ : différence de rapport isotopique entre l'étalon et l'échantillon

INTRODUCTION

Approvisionner la population en eau potable constitue l'une des préoccupations de l'Autorité Nationale Malgache.

Cependant, des problèmes se posent sur la potabilité de l'eau exploitée car plusieurs de ces points d'eaux réalisées n'ont satisfait que partiellement la population à cause de leur minéralisation assez élevée.

Tandis que d'autres points d'eaux à priori potables et satisfaisantes perdent leurs potabilités après quelques temps (deviennent salées . . .) ou tarissent en période d'étiage ou après un pompage d'une durée assez longue (rapport du JICA) Et ces problèmes se traduisent pour de nombreux habitants par la consommation inconsciente d'eau de très mauvaise qualité sur le plan physico-chimique que sur le plan bactériologique.

Une étude basée à Morondava est entreprise pour comprendre l'origine de la minéralisation dans cette zone.

A noter que la zone de Morondava est déjà bénéficiaire de quelques travaux géologiques et hydrogéologiques tels ceux effectués par BESAIRIE, JICA et le service hydrogéologique d'Antananarivo (MEM)

L'application de l'hydrochimie et de l'hydrologie isotopique dans l'étude hydrogéologiques, comme celles faites par E. Nicolini en 1980 et Luc Guyot, ont beaucoup contribué à la réalisation de ce travail.

Le présent travail se veut de mettre en exergue la contribution de l'hydrologie isotopique, l'hydrogéologie et l'hydrochimie dans la caractérisation de la minéralisation de l'eau souterraine.

Ce rapport comporte quatre parties dont les deux premiers présenteront brièvement les données utiles pour une bonne compréhension et les deux autres exposeront notre étude proprement dite.

- ✓ La première partie fera l'objet des généralités sur la zone d'étude.
- ✓ Les rappels sur l'hydrochimie et l'hydrologie isotopique utiles pour l'étude de la minéralisation des nappes littorales composeront la deuxième partie.
- ✓ La méthodologie de l'étude constituera la troisième partie.

- ✓ Les résultats et interprétations formeront la quatrième partie.
- ✓ La synthèse des résultats de l'étude suivie de quelques recommandations et perspective de recherche concluront ce rapport.

Des photos, coupes lithologiques et tableaux récapitulatifs ont été réunis en annexe.



Première partie

CONTEXTE GENERAL

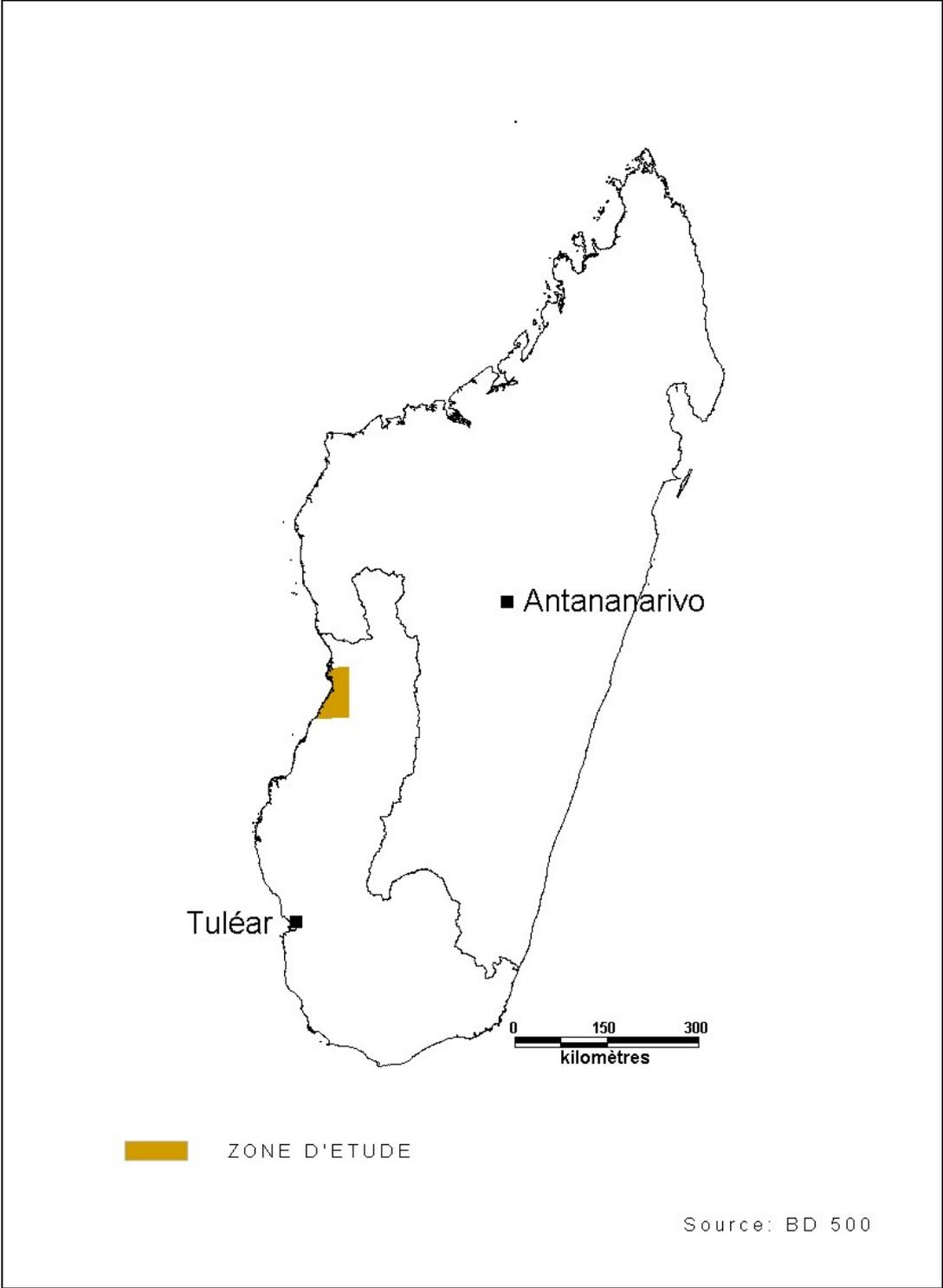


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude

I .1. Présentation Géographique de la zone d'étude

I .1.1 Grands ensembles géomorphologiques

Morondava se situe à 671km au sud ouest de la capitale de Madagascar, dans la province autonome de Tuléar.

Elle est limitée au Nord par le fleuve Tsiribihina, au Sud par le fleuve Mangoky, à l'Est par le socle des hauts plateaux et par le canal de Mozambique à l'ouest.

L'ensemble de la région possède un style monoclinal à pendage Ouest de l'ordre de 1.5% (07)

Elle est traversée par des réseaux hydrographiques.

Selon la classification du CNRE (13), la zone de Morondava est subdivisée géomorphologiquement en deux sous-régions.

I .1.1.1 La sous région littorale ouest

Elle est caractérisée par une topographie légèrement inclinée vers l'Ouest. Son altitude ne dépasse pas les 200 m.

Sa largeur est de 50 km environ dans sa partie centrale et se rétrécit progressivement aussi bien au nord qu'au sud (jusqu'à 20 km) (20)

Les végétations sont peu espacées et marquées par la prédominance des rizières, cocotiers, ...

Les mangroves à palétuviers occupent les dépressions littorales temporairement recouvertes par l'eau de mer à marée haute (18)

I.1.1.2 Le couloir de Betsiriry (englobant la zone d'Ankilizato)

Il est constitué de collines d'altitude allant de 200 à 1500 m, ces collines forment une crête de partage des eaux et les fleuves se divisent à partir de là en direction de l'est ou ouest

La limite entre ces 2 sous régions se situe à Dabara (situé à environ 60 km à l'Est de la ville de Morondava)

I.1.2 Données climatiques

I.1.2.1 Le climat de Morondava (13)

La région d'étude est soumise à un climat de type semi-aride avec une saison sèche, relativement fraîche du mois d'avril au mois d'octobre et une saison chaude et pluvieuse du mois de novembre au mois de mars.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 700 à 850mm

La température moyenne annuelle est de 28°C, avec une moyenne des maxima de 34°C et une moyenne des minima de 19°C.

L'évapotranspiration potentielle moyenne est de 1000 à 1100mm /an et l'évapotranspiration relative est de 500 à 700mm/an.

Les figures suivantes représentent l'évolution mensuelle moyenne de la précipitation, de la température et de l'évapotranspiration (Service météorologique de Morondava)

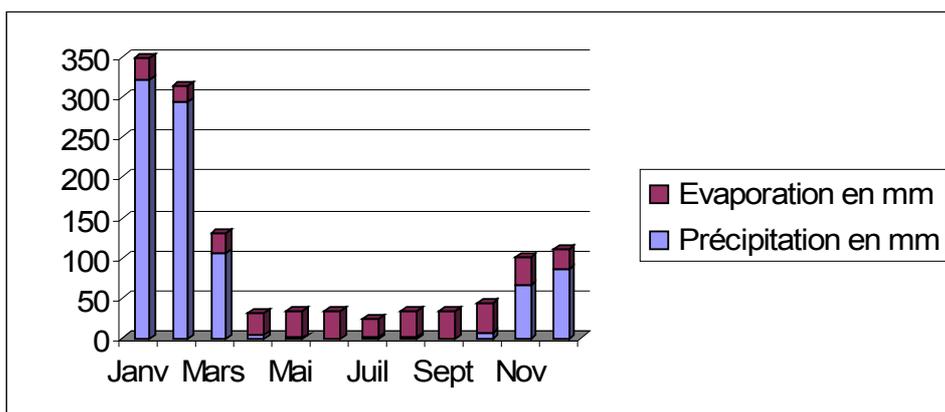


Figure 2 : Régime moyen des pluies à Morondava

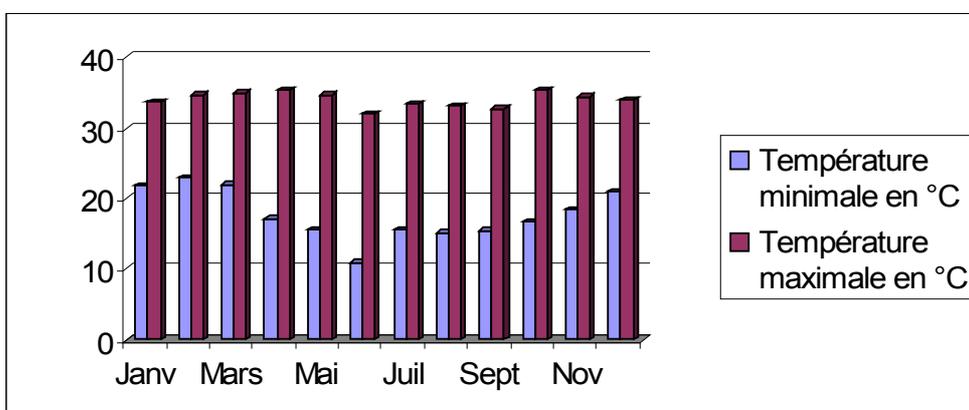
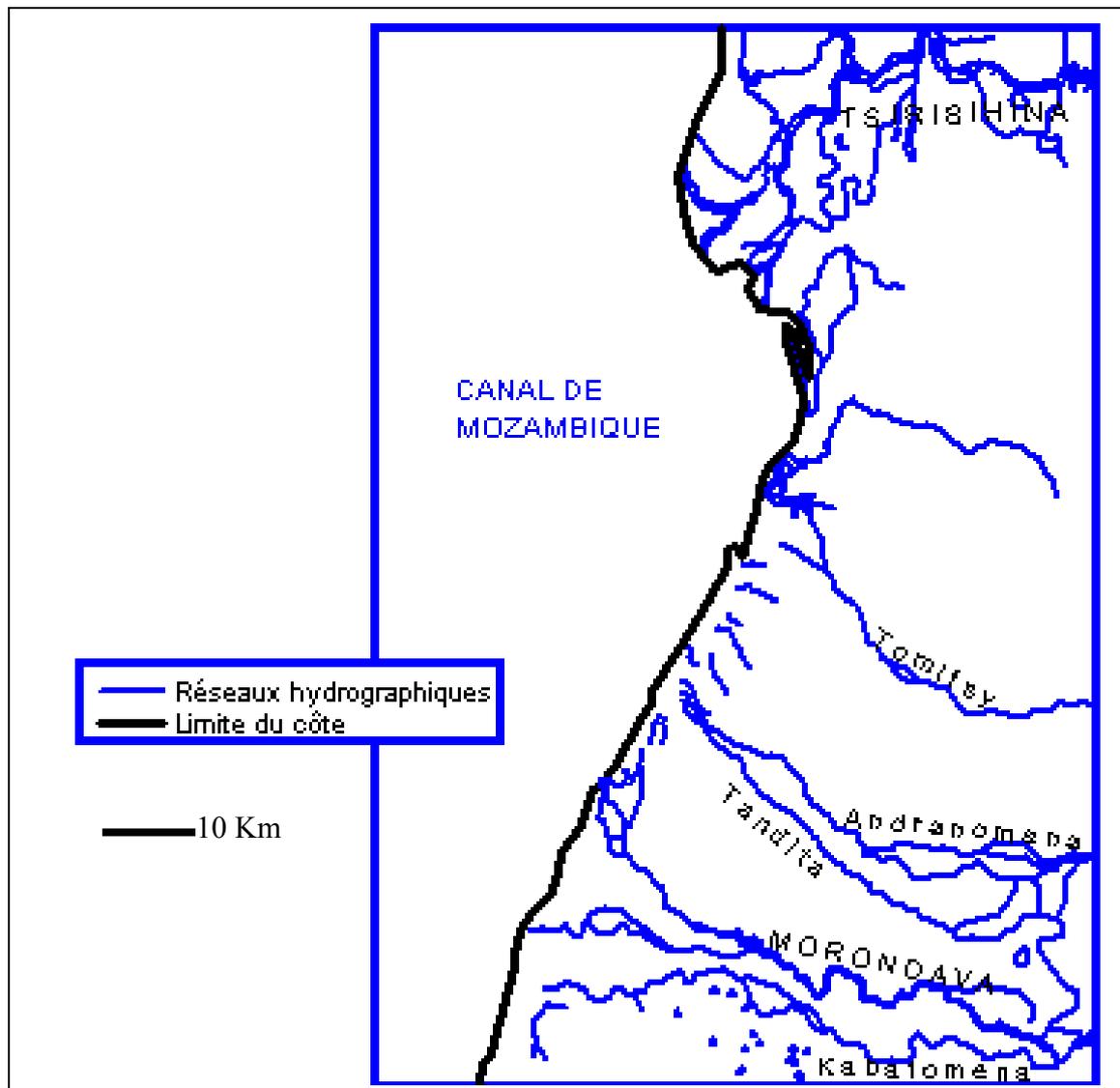


Figure 3 : Evolution mensuelle de la température à Morondava

I.1.2.2 Les eaux de surface



Source : BD 500

Figure 4 : Réseaux hydrographiques de la région d'étude

La zone d'étude est traversée par plusieurs réseaux hydrographiques à écoulement de direction Est Ouest (18)

Au total, il y a 3 rivières principales : la rivière Morondava, la rivière Andranomena et Tsiribihina. Ces rivières prennent leurs sources dans la zone montagneuse Est (grès rouges du crétacé) et s'écoulent en permanence.

Le fleuve Tomitsy s'écoule vers l'ouest du côté nord de la région de Marofandilia et Ampataka et se jette à la mer en déposant des alluvions assez étendues.

Le barrage de Dabara se situe sur la pente où la rivière Morondava pénètre dans la plaine, les canaux agricoles aménagés (ex : Dabara) arrosent environ 8000 ha des terres de la plaine littorale.

I .1.3 Situation socio-économique

Le Fivondronana de Morondava et Mahabo abritent 132 749 habitants (chiffre sorti en 2001) La densité est de 6.23 habitants par km².

Plus du 2/3 de la population habite en milieu rural et 80% sont des agriculteurs (20)

L'importance du cheptel bovin est considérée comme un signe de richesse. D'ailleurs, en milieu rural, la densité du bétail dépasse la densité humaine.

Le revenu de la population dépend de la production agricole par contre le problème de vol de boeuf, l'inondation et la coupure des routes réduisent ce revenu.

En milieu urbain, la population est approvisionnée en eau souterraine par la JIRAMA Morondava et Mahabo.

Par contre, l'alimentation en eau potable est très limitée en milieu rural. De ce fait, l'accès à l'eau est une tâche ménagère à part entière qui implique un déplacement vers le point d'eau pouvant prendre plusieurs heures dans une journée. Ainsi, les villageois ont l'habitude d'utiliser l'eau de rivière, des mares et des canaux de Dabara situés tout près de leurs villages.

La plupart des habitants ont aussi l'habitude d'utiliser des trous ou des puits ne respectant nullement les normes (très faible profondeur et non protégé)

Cette zone d'étude est bénéficiaire de plusieurs projets d'AEP entre autres les projets JICA et UNICEF.

Actuellement le taux de desserte en eau dans cette zone de Morondava est de 16% contre le taux de desserte national de 26,2% (chiffre sorti lors de la journée mondiale de l'eau, année 2003, par le Ministère de l'Energie et des Mines)

I .2. Contexte géologique de la zone d'étude

I .2.1 Structure du Sud Ouest de Madagascar

La partie Ouest de Madagascar est affectée par deux accidents majeurs de directions N85 et N170 qui ont favorisé et guidé la mise en place de trois bassins sédimentaires malgache et la séparation de l'île avec l'Afrique.

La région d'étude appartient au bassin sédimentaire de Morondava.

La tectonique profonde du bassin sédimentaire de Morondava met en évidence deux directions principales de cassure : Nord Nord Ouest et Nord Nord Est et un fossé de karroo.

Ce fossé a une profondeur de 7 à 8km jusqu'à la région côtière où le socle se relève jusqu'à 4km (02)

Le socle a une surface régulière mais dessine une courbure en profondeur, se relève au voisinage de la cote et détermine le fossé de Karroo comportant des sédiments de plus de 8km d'épaisseur (03)

Les failles de subsidence sont de direction Nord Nord Est – Sud Sud Ouest, à compartiment ouest abaissé (03)

Des failles récentes en majorité longitudinales, parallèles à la cote affectent surtout les marnes et les calcaires.

Elles ont un pendage de 40 à 75° et un sens de 10 à 30°W

La zone d'étude correspond à la région la plus calme du bassin sédimentaire de Morondava où n'existe aucun accident de grande envergure.

I .2.2 Stratigraphie

Le bassin sédimentaire de Morondava forme une vaste cuvette dont l'épaisseur maximale des sédiments est environ 8km au centre du bassin et de 4km vers le bord ouest près du littoral (13)

Les formations géologiques rencontrées dans cette zone sont essentiellement des formations sédimentaires.

Les couches sont légèrement inclinées de 3 à 5° vers l'ouest.

Ce pendage diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du socle (04)

Les intrusions basaltiques datées de la limite turonien-coniacien (crétacé) traversent les marnes jaunes d'Ankilizato situées à l'est de notre zone d'étude (04)

L'ensemble de la série sédimentaire peut être résumé par le tableau suivant :

Tableau 1 : Stratigraphie du bassin de Morondava

ERE	SYSTEME	ETAGE	FORMATION GEOLOGIQUE
QUATERNAIRE		Holocène	sable (dune)
		Pléistocène	calcaire
TERTIAIRE	néogène	Pliocène	grès à stratification oblique alternant avec des sables et argiles
		Miocène	marne à gastéropodes et oursins
	paléogène	Oligocène	marne à gypse
		Eocène	calcaire et calcaire gréseux
SECONDAIRE	crétacé	Maestrichtien	marne et calcaire à Pachydiscus et oursins
		campanien	basalte et calcaire à Pachydiscus
		santonien	grès marins
		Coniacien	grès à stratification oblique
		Turonien	grès et basalte
		cenomanien	marnes et grès à Acanthoceras
		Albien	marnes à Pervinquiera
		Aptien	calcaires à Australiceras
		Hauterivien	marnes à microfaune
		Valanginien	marnes à Duvalia
	jurassique	Tithonien	Marne à Bélemnites
		Kimeridgien	marnes
	supérieur	Argovien	marnes jaunes
		Oxfordien	grès glauconieux
		callovien	calcaires marneux et marnes à Macrocephalites
		Jurassique moyen	ISALO III: Calcaire de Bemaraha
		Jurassique inférieur	ISALO II: argile et grès avec intercalation marine
	Trias	ISALO I: grès blancs souvent conglomératiques à stratification entrecroisée	
PRIMAIRE	Carbonifère	Permien	SAKAMENA supérieur: argile et grès rouge
			SAKAMENA moyenne: faciès lagunaire et faciès marin (calcaire)
			SAKAMENA inférieur: schistes et grès à stratification entrecroisée
			calcaire, grès et argile rouge, grès blancs à stratification entrecroisée
			schiste noir, tillites et charbon
PRECAMBRIEN			Roches métamorphiques (gneiss...)

Source : 03

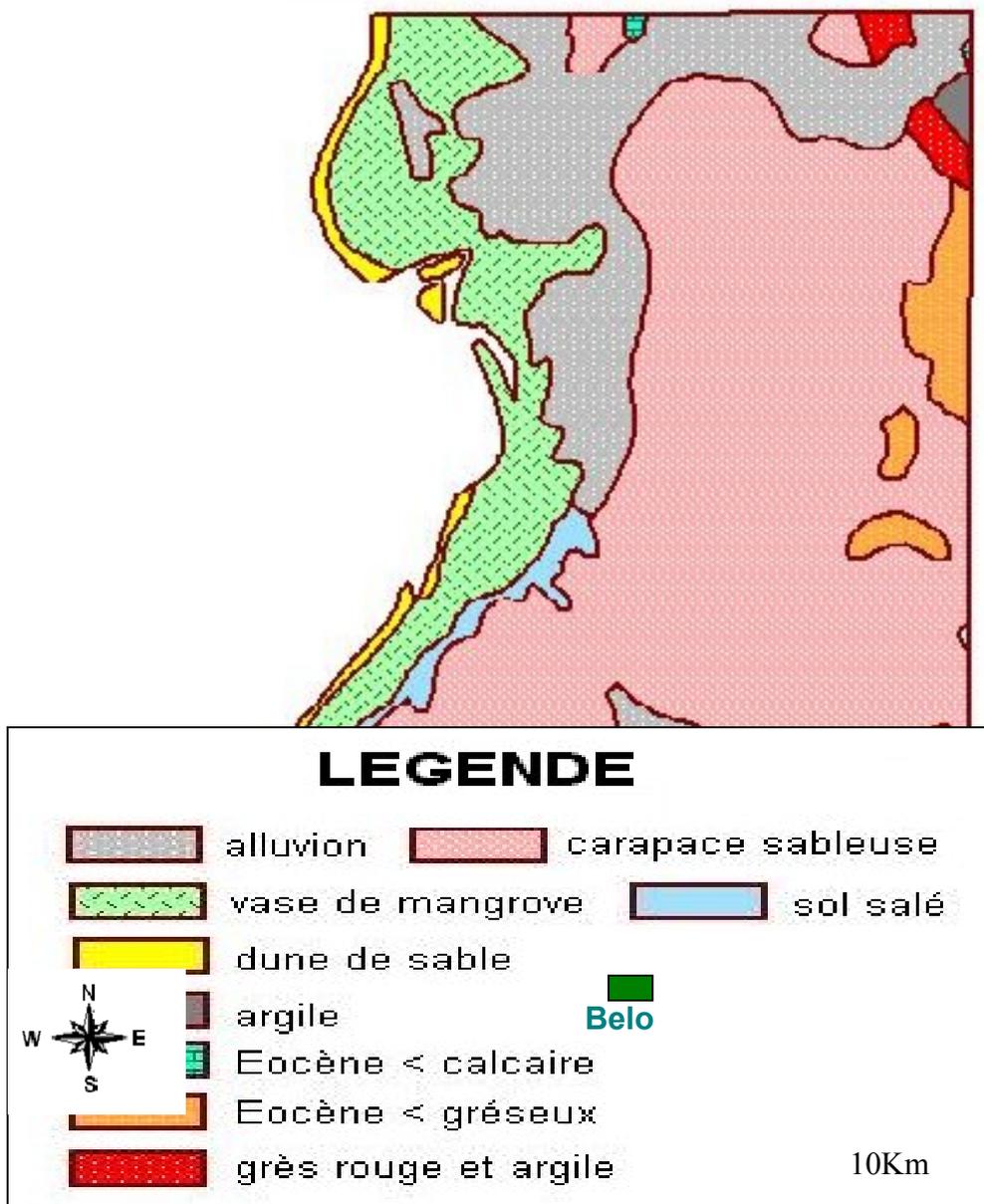
Le socle cristallin ne se rencontre qu'en très grande profondeur sauf dans la zone de collines Est (en dehors de notre zone d'étude), par exemple, à Ankotrofotsy

où il est représenté par des gneiss précambrien et des granites très diaclasés et altérés en boules.

Les dépôts du quaternaire sont recouverts de grands affleurements de carapace sableuse et d'important dépôts d'alluvions le long des rivières et forment des grands deltas avec des vases de mangroves aux embouchures (13)

- La carapace sableuse dérive en grande partie des grès du pliocène, son épaisseur peut atteindre 30m.
- Les alluvions recouvrant le grès du Pliocène présentent des bancs de galets à Tsiribihina. Elles ont une épaisseur importante pouvant atteindre une centaine de mètres dans les deltas de Morondava, Andranomena et Tsiribihina.
- Des latérites et argiles latéritiques sont rencontrées dans la partie Nord.

La figure suivante représente la carte géologique simplifiée de la zone d'étude, d'après la carte de H. Bésairie établie en 1972.



Morondava 

Figure 5 : Carte géologique du secteur d'étude

I .3 Hydrogéologie du Sud Ouest de Madagascar

En général, les points d'eau de cette zone ne tarissent pas même en période d'étiage.

L'alimentation de la nappe se fait principalement dans la zone amont, dans les zones de collines où la pluviométrie est importante (18)

Certaines nappes se rechargent à la faveur des cyclones ou par infiltration des eaux de surface (13)

I .3.1 Nappes souterraines de la région de Morondava

Elles peuvent être récapitulées par le tableau suivant

Tableau 2 : Nappes souterraines de Morondava

NAPPES	CARACTERISTIQUES
Nappe des basses terres littorales	Aquifère : sable de l'holocène et du pléistocène à chapeau d'argile ou non Eau douce lenticulaire ou eau salée à ion chlorure > 250ppm Quantité abondante soit Q moyen = 1105m ³ /jours Niveau statique aux environs de 2m Conductivité électrique comprise entre 751 et 1377µs /cm
Nappes de la plaine littorale	Aquifère : sable et gravier du pléistocène, intercalé ou non par une couche d'argile Quantité suffisante, Q = 500l / mn Nappe de type artésien ou phréatique perchée Conductivité électrique comprise entre 300 et 600µs /cm Niveau statique inférieur à 10m
Nappe de la zone des collines	Aquifère : grès agglomérés, calcaire et conglomérat du Jurassique mélangés à des marnes indurées. Quantité faible à cause de la faible perméabilité du terrain Niveau statique compris entre 10 et 30m

Source : [20]

I .3.2 Nappes de la zone d'étude

L'aquifère du littoral sud est constitué de sable et agglomérés (datés de l'holocène et du pléistocène)

Il est quelques fois à chapeau d'argile ou limon et surmonté de latérite constituant la zone non saturée (07)

Par contre, l'aquifère du littoral nord est moins perméable donc peu favorable à la retenue d'eau considérable car il est composé de sable mélangé avec de l'argile et de limon à forte proportion ou du grès à ciment argileux ou siliceux (22)

Le tableau ci-dessous récapitule la nature de l'aquifère côtier.

Tableau 3 : Les principales nappes rencontrées dans la zone littorale

Nappes	Formations
Nappes superficielles	alluvions grès argileux du pléistocène grès argileux du Néogène grès de l'Eocène
Nappes profondes (quelquefois artésiennes)	grès et calcaire du crétacé

Source : 20

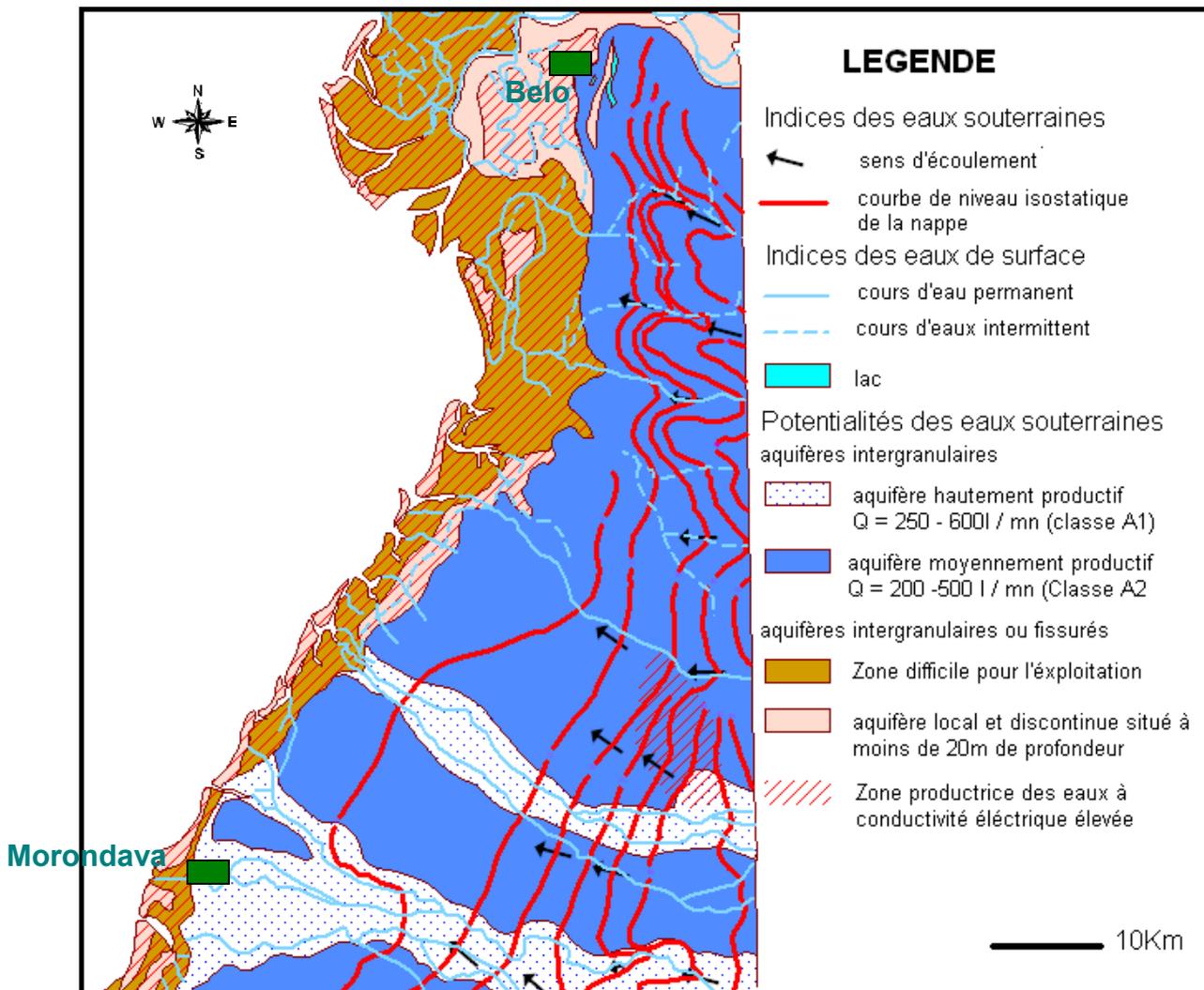
La qualité globale des eaux est comme suit (20) :

- Le fer et manganèse sont en faible quantité (en trace)
- La dureté est inférieure à la norme (dureté<500mg/l)
- Le chlore est supérieur à la norme (cl⁻ > 250 mg/l) à faible profondeur.
- Le Fluor est omniprésent mais inférieur à la norme (1mg/l)
- L'azote est quelques fois présent surtout dans les zones polluées (près de la canalisation, zone de culture, toilette, étable ...) et provoque un mauvais goût.
- L'eau souterraine est limpide, inodore et légèrement saumâtre.

Par contre, l'eau de surface prend une couleur verdâtre et une odeur désagréable.

Pour Tsiribihina, l'eau est trouble, rougeâtre à cause des argiles latéritiques (22)

- Les eaux les plus douces ont un faciès de type bicarbonaté calcique et les plus salées sont chlorurées sodiques. (29)



Source : 20

Figure 6 : carte hydrogéologique du secteur d'étude

Deuxième partie

**HYDROCHIMIE ET HYDROLOGIE
ISOTOPIQUE**

II .1. Notion d'hydrochimie

L'objectif principal de l'hydrochimie est la caractérisation chimique de l'eau afin d'avoir une idée sur l'origine de la minéralisation et sur la qualité de l'eau.

II .1.1 Eléments présents dans l'eau

La composition chimique des eaux souterraines résulte de plusieurs phénomènes entre autre la dissolution, l'évaporation, la concentration et l'hydrodynamisme (31)

Les substances contenues dans l'eau peuvent être soit en solution vraie soit en solution colloïdale soit en suspension plus ou moins fine (32)

Ainsi, on peut trouver dans les eaux naturelles :

- Des gaz : N, O, Ar, CO₂, He, H,
- Des sels minéraux : Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NH₃, ...

Elles peuvent aussi contenir du fer, fluor, manganèse et des éléments en trace tels le plomb et le cuivre dont leurs proportions sont très faibles pour une eau naturelle non polluée.

- Des matières minérales en suspension provenant de la zone d'infiltration
- Des matières organiques résultants de la décomposition des matières végétales et animales.
 - Des organismes vivants tels le virus, bactérie, amibe, algue, plantes...
 - Des déchets industriels tels les métaux, fibre, plastique, colorants...
 - Des engrais, pesticide, protéine, détergent ... liés aux activités humaines.

II .1.2 Propriétés organoleptiques de l'eau

Ce sont les propriétés qui se rapportent aux organes de sens, ces propriétés sont à apprécier directement sur le terrain.

Ceux considérés comme utiles à l'hydrogéologie sont la turbidité, le goût et l'odeur, la température et la couleur (32)

II .1.2.1 Turbidité

C'est la présence des particules en suspension qui est à l'origine de la turbidité.

Et une eau trouble nécessite un traitement.

II .2.1.2 Couleur

Elle est due aux matériaux en solution et en suspension dans l'eau.

Une eau potable est généralement incolore sous une épaisseur de 20cm (30)

II .1.2.3 Goût et Odeur

Ils sont causés par la présence de substances relativement volatiles.

Une eau potable est généralement inodore et douce.

L'apparition ou le changement du goût et odeur de l'eau potable peut être un signe d'activité microbienne.

II.1.2.4 Température

La température de l'eau est contrôlée soit par celle de l'air pour les nappes superficielles (hétérothermie journalière) soit par la saison (hétérothermie annuelle) soit par le gradient géothermique pour les eaux profondes.

Une eau profonde est moins sensible à la variation de la température ambiante, sa température est contrôlée par le gradient géothermique (12)

Une température supérieure à 20°C diminue la solubilité des gaz, favorise la prolifération des micro-organismes, l'intensification de la couleur et l'odeur de l'eau.

La température de l'eau potable ne doit pas dépasser 20°C (32)

C'est important de mesurer la température sur le terrain car l'eau collectée est très sensible à la température ambiante.

II .1.3 Paramètres physico-chimiques de l'eau

Les paramètres physico-chimiques de l'eau peuvent être mesurés directement sur le terrain.

II.1.3.1 pH ou potentiel d'hydrogène

Le pH de l'eau naturelle est compris entre 4.5 à 8.3 (32)

La mesure de pH est dans l'intérêt de définir l'acidité ou la basicité de l'eau.

Si le pH de l'eau est inférieur à 7, l'eau est acide.

Si le pH de l'eau est supérieur à 7, elle est basique.

Sa valeur permet de définir l'ion responsable de l'alcalinité de l'eau.

II .1.3.2 Conductivité électrique

Elle est exprimée en $\mu\text{s}/\text{cm}$ ou en ms/cm .

La conductivité électrique est due à la présence des sels dissous dans l'eau et sa mesure permet d'évaluer approximativement la minéralisation globale de l'eau (32)

Tableau 4 : Minéralisation correspondant à la valeur de la conductivité électrique

Valeur de CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Minéralisation
CE < 100	Minéralisation très faible
100 < CE < 200	Minéralisation faible
200 < CE < 333	Minéralisation moyenne
333 < CE < 666	Minéralisation moyenne accentuée
666 < CE < 1000	Minéralisation importante
CE > 1000	Minéralisation excessive

II .1.3.3 Oxygène dissout (OD)

Elle est exprimée en mg/l ou en pourcentage,

La teneur en Oxygène dissout est comprise entre 50 et 75%.

Sa teneur est influencée par la température, l'aération et la profondeur (30)

En général, la teneur en OD a tendance à diminuer avec la profondeur.

II .1.3.4 Solide total dissous (ou TDS)

Il est exprimé en mg/l ou en g/l

Le TDS exprime les résidus secs totaux dans l'eau (17)

Il permet de connaître le degré de la salinité de l'eau tel que :

- Si TDS < 600 mg/l : l'eau est douce
- 600 mg/l < TDS < 1000 mg/l : l'eau est saumâtre
- 1000 mg/l < TDS < 2500 mg/l : l'eau est moyennement saline
- 2500 < TDS < 5000 mg/l : l'eau est saline
- TDS > 5000mg/l : l'eau est très saline

En fait, la salinité est exprimée en ‰ ou en mg/l et sa valeur est généralement proportionnelle à celle de la conductivité électrique et du TDS.

La valeur de la salinité permet d'avoir une idée sur l'importance des teneurs en Sodium et en Chlorure dans l'eau.

II .1.3.5 Alcalinité

L'alcalinité est exprimée en mg/l de CaCO₃ ou en méq/l.

L'alcalinité est mesurée afin d'estimer si l'eau est dure ou non.

Le titre hydrotimétrique exprime approximativement la teneur en sels de CaCO₃ dans l'eau.

L'alcalinité de l'eau est généralement comprise entre 12 et 95°F (30)

Selon l'OMS, une eau est dure quand l'alcalinité dépasse 10°Français.

A noter que 1mg/l de CaCO₃ est égal à 0.1°Français.

Il existe une relation entre le pH et l'alcalinité (32)

- Si pH < 4,5, l'alcalinité est nulle
- Si 4,5 < pH < 8,3, l'alcalinité est attribuable aux HCO₃⁻
- Si pH > 8,3, l'alcalinité est due au CO₃⁻ et HCO₃⁻
- Si pH > 9.5, l'alcalinité est due à l'OH⁻

II .2. Notion d'hydrologie isotopique

Les isotopes sont les noyaux de même numéro atomique mais de nombre de masse différent, par exemple les isotopes de l'hydrogène sont le deutérium et le tritium.

Les isotopes peuvent être stables ou radioactifs (s'ils se désintègrent)

Les principaux isotopes du milieu utilisés en hydrologie isotopique sont surtout le deutérium, le tritium, l'oxygène 18, le carbone 14, l'azote 15 et le strontium (27)

II .2.1 Isotopes présents dans l'eau

II.2.1.1 Isotopes du milieu

L'oxygène et l'hydrogène qui combinent pour former la molécule d'eau peuvent être l'oxygène18, l'oxygène16, le deutérium, le tritium et l'hydrogène. Ce sont des traceurs intimes de l'eau (14)

Mais l'eau dissout aussi du CO₂ et de l'azote, ainsi on peut trouver dans l'eau des isotopes de carbone et de l'azote tels le carbone12, carbone13, carbone14, l'azote14 et l'azote15.

Et comme les eaux d'infiltration traversent des formations géologiques avant de parvenir dans les aquifères, elles peuvent être en interaction avec ces formations et amènent avec elles quelques éléments comme le phosphore, l'azote (des engrais et excréments), le soufre (dans le gypse...) et le strontium (notamment dans les sols calcaires) (30)

Les teneurs isotopiques sont données en différence de rapport isotopique entre l'échantillon et l'étalon. Cette différence est exprimée par δ soit

$$\delta = (R_e/R_s - 1)1000 \text{ ‰} \quad (27)$$

R_e est le rapport isotopique de l'échantillon c'est-à-dire le rapport entre l'isotope lourd et l'isotope léger ou banal.

R_s est le rapport isotopique de l'étalon.

L'étalon est généralement l'eau de mer (SMOW) avec $\delta O^{18} = 0\text{‰}$ et $\delta D = 0\text{‰}$ (Craig, 1961)

La teneur de ces isotopes dans l'eau est très variable et son abondance dépend du phénomène nommé fractionnement isotopique.

II.2.1.2 Fractionnement isotopique et la variation des teneurs des isotopes dans l'eau

Le fractionnement isotopique se produit lors du changement de phase de l'eau. Il se traduit par la séparation des isotopes lourds et des isotopes légers.

Ce processus est influencé par la température, la saison, la position géographique...

(27)

La teneur en isotope de l'eau varie en fonction des facteurs suivants :

- La variation saisonnière : la concentration en isotope lourd dans les eaux météoriques est minimale pendant les mois pluvieux.
- La vapeur est toujours appauvrie en isotope lourd au détriment du liquide qui lui a donné naissance.

Quand il y a précipitation, la vapeur restante s'appauvrit en isotope lourd.

Quand il y a évaporation, le liquide restant s'enrichit en isotope lourd, c'est l'effet

Rayleigh [27]

Selon la formule :

$$\delta v = \delta L + \epsilon \ln f (\text{‰})$$

ϵ est le facteur d'enrichissement

δv : teneur isotopique de la vapeur

δL : teneur isotopique du liquide

Plus on s'éloigne de la mer plus la vapeur s'appauvrit en isotope lourd, c'est l'effet de continentalité

- Plus on monte en altitude, plus la teneur en isotope lourd diminue soit une diminution moyenne de 0,3‰ tous les 100m (effet d'altitude)

D'ailleurs, la température décroît de 0,55°C tous les 100m (gradient de la température) La teneur en ^{18}O augmente de 0.52‰ pour une diminution de température de 1°C (gradient isotopique)

NB : ces variations peuvent présenter des exceptions comme dans le cas du tritium où plus on monte en altitude plus sa teneur augmente.

II .2.2 Utilisation des isotopes stables en hydrogéologie

Les isotopes stables considérés ici sont l'Oxygène 18 et le Deutérium.

II .2.2.1 Deutérium et Oxygène 18

Le Deutérium et l'Oxygène 18 sont des excellents traceurs pour déterminer l'origine de l'eau, le processus de salinisation des eaux souterraines et les possibilités de mélange entre eaux souterraines, eaux météoriques et eaux de surface. (Blavoux et Letolle, 1995) (06)

Le diagramme de corrélation Oxygène 18-Deutérium permet d'avoir une idée sur l'origine de la minéralisation de l'eau et de connaître la composition originelle de l'eau avant de subir une évaporation ou un mélange.

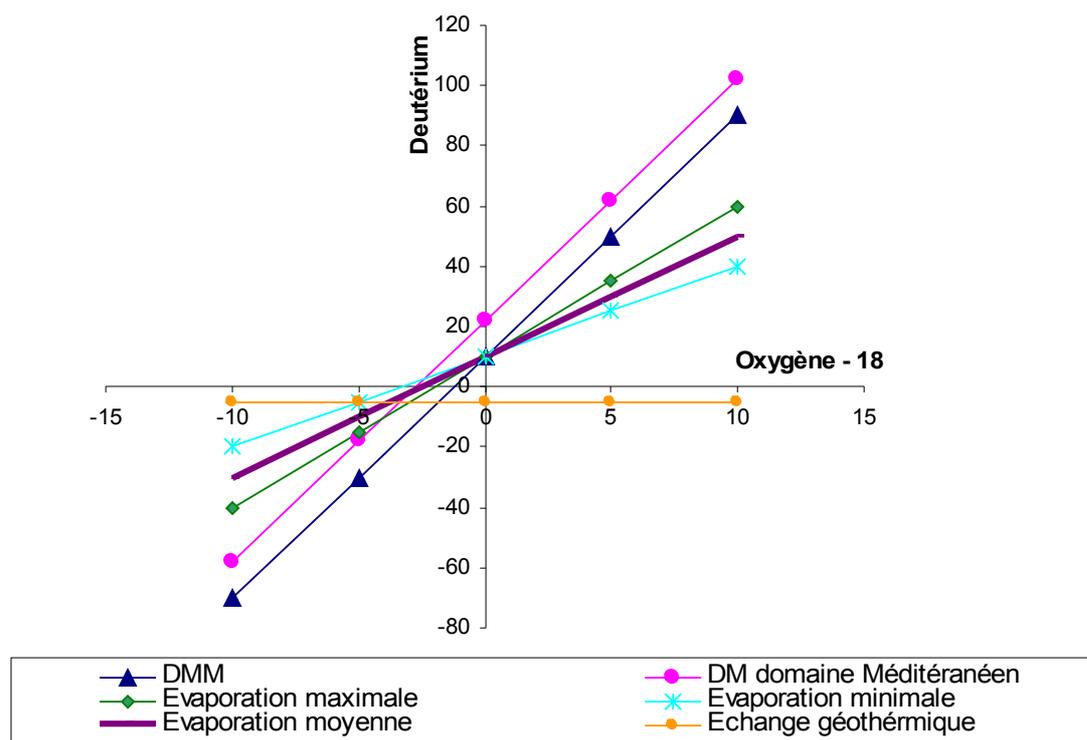


Figure 7: Origine de la recharge

- Pour les eaux rechargées par PRECIPITATION, les points sont regroupés sur la droite :

$$\delta D = a \delta^{18}O + d$$

$a = 8$ et $d = 10\text{‰}$

C'est la droite météorique mondiale ou DMM définie par H.Craig en 1961.

Avec δD : la teneur en Deutérium dans l'eau et $\delta^{18}O$ celle de l'Oxygène 18.

a : la pente de la droite variable suivant la nature de la recharge

d : l'excès en deutérium, d varie suivant l'origine de la vapeur qui condense

$d = + 10\text{‰}$ si la précipitation provient de la vapeur océanique et

$d = + 22\text{‰}$ si la précipitation provient des vapeurs du domaine Méditerranéen oriental

Il est préférable de remplacer cette droite par la droite météorique de la zone d'étude.

La relation entre la teneur en Oxygène 18 et la salinité de l'eau permet de déterminer si la minéralisation de l'eau provienne d'une dissolution de minéraux ou d'une évaporation.

- Pour les eaux rechargées par EVAPORATION.

La droite $\delta D = a \delta^{18}O + d$ a une pente plus faible que celle de la précipitation. Elle est généralement comprise entre 3 et 6.

Généralement, $\delta D = 4 \delta^{18}O - 5\text{‰}$ (27)

La corrélation Oxygène 18 – chlorure montre une évolution exponentielle représentant l'effet Rayleigh (Cf. page 20)

- Pour les eaux rechargées par ECHANGE GEOTHERMIQUE

Les eaux analysées se répartissent horizontalement.

- Pour les eaux mélangées avec l'eau de mer (intrusion marine ou aérosol), les eaux prélevées sont alignées sur une droite qui coupe la composition de l'eau de mer ou SMOW.

Les isotopes stables apportent donc beaucoup d'éclaircissement notamment sur l'origine de la minéralisation de l'eau (géochimie, apport marin, pollution...)

Mais ils ne permettent pas de déterminer l'âge des eaux.

D'où l'intérêt des isotopes radioactifs.

II .2.3 Utilisation des isotopes radioactifs en hydrogéologie

Les isotopes radioactifs les plus utilisés en hydrogéologie sont le tritium, le carbone 14 et le Strontium.

II .2.3.1 Tritium (^3H)

Le tritium est le seul isotope radioactif dont le comportement est identique à celui de l'eau dans le milieu souterrain (14)

Sa période est de 12,43ans (Unterweger et al, 1980)

Il a une activité d'environ $2 \cdot 10^6$ désintégrations par minute par gramme (31)

Ils sont distribués à la surface du sol par l'intermédiaire des précipitations.

Le taux de tritium naturel dans les eaux de pluie est de 4 à 25 TU (14)

La teneur en tritium est exprimée en UT ou Unité Tritium.

Les teneurs en tritium dans les eaux météoriques varient en fonction des facteurs suivants : saison, température, altitude, latitude et position par rapport à la mer (14)

- Les teneurs en tritium s'accroissent avec la latitude et l'altitude.
- La teneur en tritium des précipitations hivernales est faible alors qu'elle est maximale au cours du printemps.
- Les précipitations maritimes sont appauvries en tritium par rapport aux précipitations continentales.

D'ailleurs, la teneur en tritium des précipitations augmente avec la distance à la côte, c'est l'effet de continentalité.

- L'échange avec l'eau océanique appauvrit la vapeur atmosphérique en ^3H

La teneur en tritium est aussi liée à d'autres facteurs entre autres les réacteurs nucléaires qui libèrent une teneur en tritium assez significative et enrichissent la précipitation.

Le tritium est le seul indicateur de la recharge récente dans une région aride et semi-aride (14)

Si l'eau contient plus de 1 UT, l'eau est récente.

Mais si l'eau a une teneur en tritium inférieure à 1 UT, l'aquifère n'a pas reçu un récent remplissage ou elle est mélangée avec une eau ancienne profonde.

1 Unité tritium est la limite inférieure des teneurs interprétables pour la mise en évidence de la présence d'eau récente.

Troisième partie

STRATEGIE D'APPROCHE

Notre zone d'étude est classée dans la sous région littorale ouest.

Le stage effectué est surtout orienté en vue de maîtriser les techniques isotopiques et hydrochimiques utiles pour l'étude de la minéralisation de la nappe.

Pour cela, notre stage s'est effectué en trois étapes :

La première étape s'est déroulée du 02 avril 2003 au 02 juin 2003.

Elle consistait à la documentation et à l'apprentissage des différents logiciels utiles pour traiter les données obtenues sur terrain et au laboratoire.

Elle s'est terminée par la familiarisation avec les divers appareils de mesure et l'apprentissage de la technique de prélèvement.

La seconde étape a été consacrée à la descente sur terrain à Morondava.

Elle s'est effectuée en 2 vagues : la première a été consacrée à la collecte des échantillons d'eau et des mesures in situ.

La deuxième vague a été consacrée aux visites des points d'eaux, à l'étude de son environnement et du système hydrogéologique de la zone.

La troisième et dernière étape du stage s'est déroulée au sein du laboratoire de l'hydrogéologie et du Madagascar – INSTN et a fait l'objet de traitement et interprétation des données obtenues.

III.1. Investigations géologiques et hydrogéologiques

III .1.1 Documentation

La documentation a beaucoup contribué à cette étude parce qu'elle nous a permis de connaître quelques travaux antérieurement réalisés dans cette zone, d'exploiter quelques-uns pour mener à bien cette étude et d'approfondir sur l'utilité de la technique isotopique en hydrogéologie

Elle est effectuée dans plusieurs agences du secteur eau : Madagascar-INSTN, Laboratoire de l'hydrogéologie Université d'Antananarivo, Ministère de l'énergie et des mines – direction de l'eau, radio-isotope Ampandrianomby...

III .1.2 Investigation géologique et hydrogéologique

Les investigations géologiques et hydrogéologiques ont été effectuées pour mieux comprendre l'environnement de notre zone d'étude, à savoir la géomorphologie, la nature des formations géologiques, le système hydrogéologique...

Elle permet aussi de confirmer tout ce qui est décrit dans les documents que nous avons consultés.

Cette étape est très utile pour pouvoir bien interpréter les résultats des analyses et mesures.

Pour cela, nous avons :

- Revisité les points d'eaux.
- Observé les végétations et apprécié leurs répartitions et diversités
- Pris des photos des points d'eaux (cf. Annexe XI)
- Etudié le relief, les formations géologiques et essayé de comprendre le système hydrogéologique de la zone.
- Effectué quelques mesures piézométriques à l'aide d'une sonde électrique
Pour la plupart des forages, il nous était impossible de prendre la valeur de la profondeur totale et le niveau statique parce qu'ils sont équipés. Les quelques valeurs recueillies dans ce rapport relèvent de la documentation.

III .2. Mesures in situ

Les mesures in situ et l'échantillonnage ont été effectuées au début de la saison sèche (Juin 2003)

Presque tous les points d'eaux visités ont fait l'objet d'une observation et des mesures in situ.

On enregistre dans un carnet de terrain tous les renseignements, observations et données acquises.

II .2.1 Coordonnées

- Appareil utilisé : GPS
- Cet appareil permet d'avoir la position géographique (longitude, latitude et altitude) du point d'eau.
- Procédure : appuyer sur « power » puis sur « enter » et attendre par la suite que le nombre de satellites en liaison avec le GPS soit suffisant.

Quand le nombre de satellites nécessaires est atteint, le GPS affiche les coordonnées du point d'eau.

Elles sont nécessaires pour repérer la position géographique des points d'eaux.

II .2.2 Propriétés organoleptiques : la couleur, le goût, l'odeur et la turbidité

La détermination de ces propriétés se fait en collectant l'eau dans un petit récipient en verre transparente.

La couleur et la turbidité sont déterminées par simple observation à l'œil nu.

Ces propriétés donnent une idée sur la qualité de l'eau.

II .2.3 Température

La température de l'eau est mesurée à l'aide de l'appareil qui mesure à la fois la salinité, le TDS et la conductivité électrique.

Il faut noter que la mesure a été réalisée une fois arrivée sur un site et l'heure de la prise de mesure pour chaque point d'eau n'est pas la même, seulement elle est à indiquer dans le carnet de terrain.

La valeur de la température n'est pas à comparer avec la norme vue qu'elle en dépasse largement car le milieu est aride.

II .2.4 Salinité, TDS et conductivité électrique

- Appareil de mesure : le sensION5, modèle HACH
- Cet appareil donne la valeur de la salinité, la conductivité électrique ramenée à 25°C, la température et le TDS.
- Procédure : plonger l'électrode dans l'eau et attendre que le mot « stabilising » n'affiche plus sur l'écran.

La première valeur affichée correspond à la valeur de la conductivité électrique.

Le TDS, la température et la salinité sont affichés après avoir appuyer sur le bouton « sal » pour la salinité, « TDS » pour le TDS et « T » pour la température.

Après chaque mesure, l'électrode doit être rincé à l'eau distillée.

Le TDS, la conductivité électrique et la salinité sont les trois paramètres le plus important dans notre étude car grâce à leur répartition et leur valeur, on peut

avoir une idée sur l'origine de la minéralisation (contribution marine, dissolution...) et classer ainsi les eaux en quelques groupes suivant qu'elles sont très minéralisées ou non.

II .2.5 pH

- Appareil utilisé : pH 330/set 1-WTW (ph-mètre)
- Cet appareil affiche directement le pH de l'eau
- Procédure : il suffit de plonger l'électrode dans l'eau et attendre que la valeur affichée sur l'écran ne varie plus, c'est la valeur du pH.

La mesure du pH aussi bien sur terrain qu'au laboratoire est très utile pour vérifier si les mesures in situ sont fiables ou pour suspecter des réactions possibles dans l'eau après le prélèvement.

Il détermine l'acidité ou la basicité de l'eau et facilite ainsi les autres mesures notamment l'alcalinité.

II .2.6 Oxygène dissous

- Appareil de mesure : dissolved oxygen meter sensION6, modèle HACH
- Cet appareil donne directement le taux d'oxygène dissous dans l'eau.
- Procédure : il suffit de plonger l'électrode dans l'eau et attendre que la valeur affichée sur l'écran ne varie plus.

La teneur en Oxygène dissous dans l'eau détermine sa qualité et confirme ou discute certaine théorie entre autre la relation entre la température et la solubilité des gaz.

II .2.7 Alcalinité

- Matériels utilisés : un bêcher de 500ml, de l'indicateur coloré (bromo-crésol et phénol phtaléine), de l'acide sulfurique, une pipette, un titrateur numérique HACH 16900 et un tableau de calcul.
- La mesure consiste à titrer l'eau par un acide et déterminer par calcul l'alcalinité.

- Procédure : on regarde le pH de l'eau et on collecte l'eau dans un bêcher.

La nature du réactif utilisé dépend de la valeur du pH.

En effet, le phénol phtaléine est préconisé pour les eaux très basique (pH>8.3)

Le bromo-crésol est utilisé pour les eaux à pH inférieur à 8.3.

On verse du bromo-crésol, l'agite et l'eau prend une couleur bleuâtre.

On y ajoute goutte-à-goutte de l'acide sulfurique 0.16N ou 1.6N jusqu'à ce que la couleur vire au vert.

Lire ensuite la valeur inscrite sur le titrateur numérique.

Cette valeur correspond au volume d'acide utile pour pouvoir séparer totalement les carbonates et les bicarbonates des molécules tels les molécules d'alcalino-terreux
Multiplier enfin cette valeur par le facteur multiplicatif qui dépend de la normalité du titrant utilisé.

Certains échantillons sont privés de mesures d'alcalinité à cause de la couleur de l'eau où l'observation du virage est difficile.

La mesure de l'alcalinité donne une idée sur l'abondance de l'ion bicarbonate dans l'eau (dureté de l'eau), ce qui sera par la suite confirmée par les résultats des analyses.

II .2.8 Nitrate

- Matériel utilisé : le test strip (comme le papier pH)

Il ne donne pas directement la concentration du nitrate mais la teneur en azote.

- Procédure : plonger le test strip dans l'eau, le faire sortir de l'eau, puis attendre quelques dizaines de secondes

Ensuite, apprécier la couleur du test strip et la comparer avec la gamme de couleur affichée sur la boîte du test strip. Donc, il faut bien voir la couleur qui ressemble le plus à celle du test strip et lire la valeur inscrite en dessous.

Pour avoir la concentration du nitrate dans l'eau, la valeur lue sur la boîte (comme étant la concentration de l'azote dans l'eau) sera multipliée par la masse atomique du nitrate. Le tout est divisé par la masse atomique de l'azote

Selon la formule :

$$X(N) = \frac{x(N) \cdot 62}{14}$$

x : la valeur lue sur la boîte

La teneur en Nitrate dans l'eau définit sa qualité et permet d'estimer sa contribution dans la minéralisation de l'eau. Elle permet aussi de déterminer les différents facteurs qui font qu'une eau est enrichie ou non en nitrate.

II .2.9 Prélèvement d'eau

Au total, nous avons échantillonné 29 points d'eaux dont 15 dans la zone d'étude.

Le choix du point d'eau échantillonné ainsi que le nombre des éléments à échantillonné sont influencés par les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère, les résultats des mesures in situ et leurs situations géographiques.

En effet, deux points d'eau peu espacés et présentant à peu près les mêmes propriétés physico-chimique peuvent être représentés par l'un de ces points d'eau uniquement.

Cet approximation est surtout valable lorsque ces points d'eau se trouvent dans un même contexte hydrogéologique.

II .2.9.1 Matériels de prélèvement

Pour le prélèvement, il nous a fallu

- un seau pour puiser l'eau
- 4 flacons au maximum par point d'eau dont trois d'un volume de 500ml chacun et un flacon de 50ml. Ces flacons sont en polyéthylène et étiquetés.

Parmi les 04 flacons remplis :

- un flacon de 500ml a été destiné pour l'analyse du cation
- un autre de 500ml pour l'analyse de l'anion
- un autre de 500ml pour l'analyse du tritium et
- un flacon de 50ml a été destiné pour l'analyse de l'oxygène 18 et du deutérium.

II .2.9.2 Mode de prélèvement

Avant le prélèvement, il faut pomper l'eau assez longtemps pour mélanger et renouveler l'eau stagnant dans le tuyau et le corps de la pompe. La durée de pompage est d'environ 5mn.

Les échantillons d'eaux doivent être prélevés dans des flacons propres.

Ces flacons doivent être rincés avec l'eau à échantillonner elle-même puis fermés plein à ras bord sans laisser de bulles d'air.

Dans le cas des eaux de surface, le prélèvement se fait à mi-profondeur, en plein courant et face à l'amont.

L'analyse au laboratoire est réalisée dès que possible, en moyenne 72h après le prélèvement (12)

Ce laps de temps n'était pas respecté parce que nos échantillons ont du être envoyé à l'extérieur.

Ainsi, il nous a été nécessaire de préparer les échantillons pour leur conservation.

II .2.9.3 Préparation des échantillons

Pour l'analyse du deutérium, de l'Oxygène 18, l'anion et le tritium, une fois les flacons remplis, ils seront bouchés et étiquetés.

Par contre, l'analyse des cations nécessite l'ajout de quelques gouttes d'acide nitrique pour fixer les cations dans l'eau.

Les échantillons préparés peuvent être conservés 3 mois à température ambiante (12)

Tous les échantillons prélevés ont été expédiés à l'étranger, au laboratoire de l'A.I.E.A (Vienne)

III .3. Traitements des données

Les données recueillies sont traitées par micro ordinateur.
Ce traitement est nécessaire pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus.

III .3.1 Système d'information géographique (SIG)

Nous avons surtout utilisé le Map Info 7.0 qui permet de :

- Créer des cartes ou les actualiser.
- Déterminer la distance des points d'eaux par rapport à la mer.
- Faire des analyses spatiales et thématiques suivant les différents paramètres qu'on veut mettre en valeur.

III .3.2 Logiciel AQUACHEM

- Ce logiciel permet de déterminer le faciès chimique de l'eau et son évolution chimique.
- il permet de calculer l'indice de saturation de l'eau vis-à-vis de quelques minéraux.

III .3.3 Tableur EXCEL

Il permet, par diagramme binaire, de voir la corrélation entre les différents éléments chimiques, entre les éléments isotopiques et entre les éléments isotopiques et éléments chimiques.

Quatrième partie

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

IV .1. Résultats

Tous les résultats mentionnés ici sont complétés par la documentation effectuée.

IV .1.1 Investigations géologiques et hydrogéologiques

Nous avons constaté que :

- Le relief est généralement plan, l'altitude ne dépasse pas les 25m.
- Les affleurements connus sont surtout de nature sableuse avec une couche latéritique au nord de la zone d'étude. Les vases de mangrove envahissent presque toute la côte.
- Les végétations sont généralement à feuille très réduite (telles les zizifus, les tamariniers...) au sud mais au fur et à mesure qu'on se déplace vers le nord, les végétations commencent à présenter un feuillage plus développé.
Il y a des réserves naturelles forestières comme la réserve d'Andranomena.
- Des mares ou des petits lacs, au sein desquels les baobabs poussent, sont rencontrés partout surtout dans la partie nord de la zone d'étude.

Pour chaque point d'eau :

- **Tsimafana**

Il se situe sur la rive gauche du fleuve Tsiribihina.

Le puits W11 se trouve près du marché et il est busé mais non équipé ni de pompe ni de couvercle.

La prospection géophysique montre les couches suivantes :

0-96m : sable, gravier, calcaire et argile de l'holocène

96-128 : argile du pléistocène

- **Ampataka**

Il se situe dans le bassin du fleuve Tomitsy.

Il y a de nombreux lacs où les villageois puisent l'eau pour leurs besoins quotidiens car ils réclament que l'eau de puits W8 et W9 existant devient très salée lors d'un puisage assez long.

La prospection géophysique réalisée antérieurement lors de l'étude du JICA a montré des formations sablo-argileuses surmontées d'une vase épaisse (quelques mètres)

- **Marofandilia**

Il se situe dans le bassin du fleuve Tomitsy.

L'eau du puits W10 n'est utilisée par les villageois que pour le ménage (lessive) du fait de la salinité de l'eau assez élevée.

Ce puits se situe à 10m d'une étable.

Une étude géophysique a montré que l'aquifère sablo-argileux se situe jusqu'à 6m de profondeur tandis que l'argile du pléistocène est répartie entre 6 et 10m de profondeur.

Ce puits capte ainsi la nappe sablo-argileuse à perméabilité réduite.

- **Andranomena** : le village d'Andranomena est codé B2

Il se situe dans le bassin versant de la rivière Andranomena.

Le forage artésien codé B2 présente un débit important soit 3l / s et les villageois l'utilisent pour leurs besoins quotidiens.

La coupe de forage établie par JICA a montré que l'aquifère est captif et il est de nature sablo-graveleuse.

- **Les points d'eaux du bassin de la rivière Morondava**

Il s'agit de **Morafeno** codé W1, **Betesda** codé W7, **croisement Belo sur Tsiribihina** codé B1, **Benjamino** codé W5, **Tanandava Andrefana** (W3), **Tanandava benjamino** (W4), **Tsimahavaobe** (B3) et **Ambalarano** codé W2 dans les résultats.

L'environnement de ces points d'eaux comporte des vastes rizières, surfaces quadrillées par des canaux (canal de Dabara) destinés à l'agriculture.

Les formations géologiques sont constituées de sables, graviers et argiles du pléistocène (cf. Annexe 08)

La nappe a un niveau statique supérieur ou égal à 2m et sa conductivité électrique ne dépasse pas les 800µs/cm.

Morafeno, W1 : ce puits se trouve à proximité (environ 15m) d'une étable dernièrement abolie.

Dès fois, l'eau devienne rougeâtre à la fin de la journée et selon l'ingénieur du DEE, cet aspect provient du manque d'entretien de la pompe INDIA III.

Ambalarano, W2 : l'eau de ce puits présente quelques impuretés tels des dépôts rougeâtres ou sableux.

D'autres points d'eaux visités tels **Tanandava Ouest W3, Tanandava Benjamino W4, Benjamino W5** ne seront pas mentionnés ici à cause des observations assez similaire au point d'eau d'Ambalarano et Morafeno.

Dans **le village du Betesda**, nous avons visité trois points d'eaux dont un puits construit par l'UNICEF, un trou et un canal.

- Le **puits W7 construit par l'UNICEF** a une profondeur de 5.2m.

L'essai de pompage effectué en Septembre 2001 a montré que l'eau tarit après 10 minutes de pompage et le temps de remonté est très lent voire 10h environ.

L'eau a aussi une odeur désagréable et une conductivité électrique élevée.

Ainsi les villageois ne le puisent pas pour s'alimenter mais pour le ménage.

- un **trou** W6 situé à 200m environ du village.

Il constitue la source en eau potable de la population.

- **un canal C1.**

D'après les villageois, l'eau de ce canal transporte l'eau usée de l'usine SUCOMA situé à environ 20km à l'Est de ce village.

Les eaux de ce canal coulent vers l'ouest et son niveau est presque le même que celui du trou, la distance entre le canal et le trou est de 1m.

Selon les villageois, l'existence de ce canal est bénéfique pour l'agriculture.

Le forage B1 du village du **croisement Belo sur Tsiribihina** est la seule source d'eau potable du quartier car tous les points d'eaux de faible profondeur sont tous bouchés à cause de leurs salinités et de leurs odeurs désagréables.

A environ 30m du forage se trouve un étang à odeur désagréable. Le sol bordant cet étang est très salé.

Tsimahavaobe codé **B3** est un forage artésien et se situe près de la cote.

Toutes ces investigations ont été faites lors de la deuxième campagne et elles sont complétées par les données acquises par documentation.

IV .1.2 Mesure in situ

IV .1.2.1 Caractéristique des points d’eaux

Au total, 15 points d’eau ont été échantillonnés, dont 3 Forages, 11 puits et une eau de surface (Dabara).

La profondeur totale des points d’eau permet de supposer l’existence d’au moins deux nappes dont l’une, captée à une profondeur inférieure à 10m et la seconde captée aux environs d’une cinquantaine de mètres.

La première captée à une profondeur inférieure à 10 m correspond à la nappe superficielle.

La seconde est représentative de la nappe captive et profonde.

Tableau 05 : Les caractéristiques des puits et canal

CODE	SITE	NS (m)	Pft (m)	Type	DISTANCE Km à la mer
C1	Betesda Canal	0	0	Canal	11,7
W1	Morafeno	2,5	6,15	Puits protégé	6,8
W2	Ambalarano	1,85	6,06	Puits protégé	7,3
W3	Tanandava Andrefana	2,35	5,88	Puits protégé	10
W4	Tanandava Benjamino	2,6	4,4	Puits protégé	9,7
W5	Benjamino	1,9	4,47	Puits protégé	9,9
W7	Betesda Well	2,63	5,2	Puits non protégé	11,8
W6	Betesda Hole	2	0,3	Trou	11,7
W8	Ampataka 2	1,7	6	Puits non protégé	7
W9	Ampataka 1	1,5	6	Puits non protégé	7
W10	Marofandilia	4	6,4	Puits non protégé	19
W11	Tsimafana	3	12	Puits non protégé	18

Tableau 06 : Les caractéristiques des forages

CODE	SITE	NS (m)	Pft (m)	Type	DISTANCE Km à la mer
B1	Croisement BST	2,48	82	Forage	13,5
B2	Andranomena	0,5	78	Forage artésien	8,7
B3	Tsimahavaobe	0,5	50	Forage artésien	3,6

La distance des points d’eaux par rapport à la mer est calculée à l’aide de Map Info.

IV .1.2.2 Coordonnées

Ce tableau donne la valeur brute affichée par le GPS et la valeur convertie en Laborde.

Tableau 07 : Coordonnées des puits et canal visités

CODE	Site	Latitude	X	Longitude	Y	Altitude
C1	Betesda Canal	S20 15 21	188080,646	E44 24 29	648697,132	4
W1	Morafeno	S20 17 19	181163,21	E44 20 29	644982,463	7
W2	Ambalarano	S20 17 11	1820001,35	E 44 20 58	645239,072	10
W3	Tanandava West	S20 17 49	1826654,26	E 44 21 20	644078,854	12
W'4	Tanandava Benjamino	S20 17 54	182801,235	E44 21 25	643926,961	15
W5	Benjamino	S20 18 11	182749,809	E44 21 23	643403,582	15
W6	Betesda Vovo	S20 15 21	188080,646	E44 24 29	648697,132	4
W7	Betesda Puits	S20 15 28	188170,327	E44 24 32	648482,995	4
W8	Ampatake 2	S20 05 02	195196,579	E44 28 42	667815,536	6
W9	Ampatake 1	S20 05 00	195166,809	E44 28 41	667876,681	6
W10	Marofandilia	S20 07 58	202606,544	E44 32 55	662489,752	15
W11	Tsimafana	S19 43 08	205845,634	E44 35 04	708337,922	22

Tableau 08: Coordonnées des forages

CODE	Site	Latitude	X	Longitude	Y	Altitude
B1	Croisement BST	S20 17 46	187439,209	E44 24 05	644230,747	14
B2	Andranomena	S20 11 04	189870,628	E44 25 34	656621,235	6
B3	Tsimahavaobe	S20 17 57	178103,343	E44 18 43	643774,867	8

La prise de la coordonnée des points d'eau montre, quand on les reporte sur la carte géologique (cf.figure09), que tous les points d'eau échantillonnés se trouvent exclusivement sur la littorale de Morondava.

IV .1.2.3 Les paramètres physico-chimiques

Tableau 09: Paramètres mesurés in situ (eaux de puits et canal)

CODE	Ph	Ec ($\mu\text{s/cm}$)	T (° C)	Salinité (‰)	TDS (mg/l)	14 N (mg/l)	Nitrate (mg/l)	DO (mg/l)	Alcalinité (°F)
C1	7,08	144,4	21,5	0,1	72,1	0,5	2,21		
W1	6,72	416	28,6	0,2	207	2	8,86	1,7	7.29
W2	6,88	480	28	0,2	261	0	0	3,23	2.44
W3	7,06	450	28,6	0,2	243	0	0	2,1	6.22
W4	6,99	450	28,4	0,2	243	0,5	2,21	1,6	2.77
W5	7,04	422	28	0,2	211	0	0	2,22	3.89
W6	6,65	261	22,7	0,1	130,7	0	0	7,24	10.9
W7	6,93	6250	27,2	3,4	3120	0,5	2,21	4,7	26.1
W8	7,4	1687	21,1	0,8	838	0	0	4,36	13.7
W9	7,15	3560	26,2	1,9	1780	0	0	1,8	22.5
W10	6,85	2700	29,5	1,4	1351	10	44,29	2,51	20.5
W11	6,6	1050	28,4	0,5	515	10	44,29	3,9	7.85

Tableau 10: Paramètres mesurés in situ (eaux de forages)

CODE	Ph	Ec ($\mu\text{s/cm}$)	T (° C)	Salinité (‰)	TDS (mg/l)	14 N (mg/l)	Nitrate (mg/l)	DO (mg/l)	Alcalinité (°F)
B1	6,91	417	27,8	0,8	208	0	0	1,2	12.5
B2	6,6	748	28,1	0,4	374	0	0	3,1	8.2
B3	6,33	507	27	0,2	254	0	0	2,53	11.4

La valeur de l'alcalinité est très variée (2.77 à 26.1°F) et montre deux grands groupes d'eaux dont l'un est doux (alcalinité < 10°français) et l'autre passe de moyennement doux à dure soit une valeur d'alcalinité supérieure à 10°Français.

Les eaux des forages sont légèrement dures.

Il s'agit de W6, W7, W8, W9 et W10.

La valeur du pH reflète que les eaux ont un pH compris entre 6.33 et 7.5, ceci permet de définir que les eaux prélevées dans cette zone ont généralement du carbonate comme anion dominant.

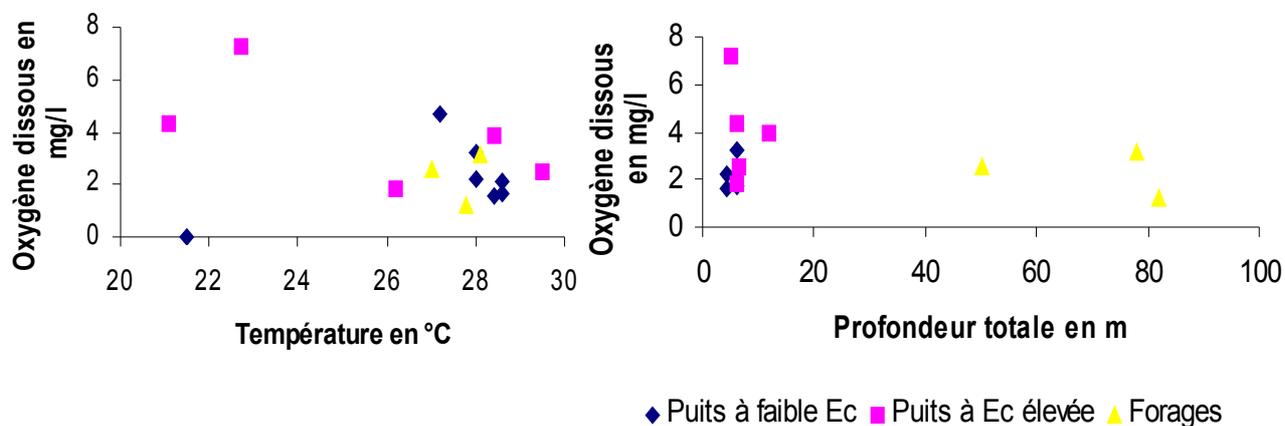
Ces résultats permettent aussi de supposer que l'aquifère traversé par l'eau est carbonaté.

En outre, on a constaté que la température de l'eau est largement supérieure à 20°C, valeur vraisemblablement liée au climat de la zone.

En effet, pour les eaux des puits, la température de l'eau est régit par la température ambiante (hétérothermie journalière)

Pour les eaux de forages, elle dépend de la saison (hétérothermie annuelle).

La figure ci-dessous montre que les eaux de forages sont pauvres en oxygène dissous ; ce qui illustre la diminution des gaz dissous quand la profondeur augmente. Pour la majorité des eaux de puits, on voit bien que la température contrôle la teneur en oxygène dissous : les eaux à basse température (22°C par exemple) présentent davantage d'oxygène dissous que les eaux à température élevée [26-30°C].



eaux souterraines environnantes et son origine lointain à cause de la valeur de sa conductivité électrique assez voisine de l'eau du socle cristallin.

Les eaux captées dans un aquifère à prédominance argileux tel W7, W8, W9, W10, W11 et B2 ont en outre une minéralisation importante voire excessive ($E_c > 666 \mu\text{s/cm}$)

Ainsi, la minéralisation des eaux échantillonnées, le TDS, la conductivité électrique et les investigations hydrogéologiques montrent que les eaux prélevées dans un aquifère alluvial (nappe sableuse) et situées près d'un cours d'eau présentent une valeur de TDS faible et relativement voisine (en moyenne 200mg/l) Les eaux échantillonnées dans une nappe à prédominance argileuse (nappe sablo-argileuse) ont généralement une valeur de TDS très variée mais importante ($>600\text{mg/l}$) et une conductivité électrique supérieure à $666 \mu\text{s/cm}$.

La teneur en nitrate mesurée sur terrain met en évidence la vulnérabilité de la nappe superficielle à la pollution notamment quand le point d'eau n'est pas protégé (sans couvercle ou situé près d'une toilette ou d'une étable) C'est le cas d'Ambalarano W1, Marofandilia W10 et Tsimafana W11.

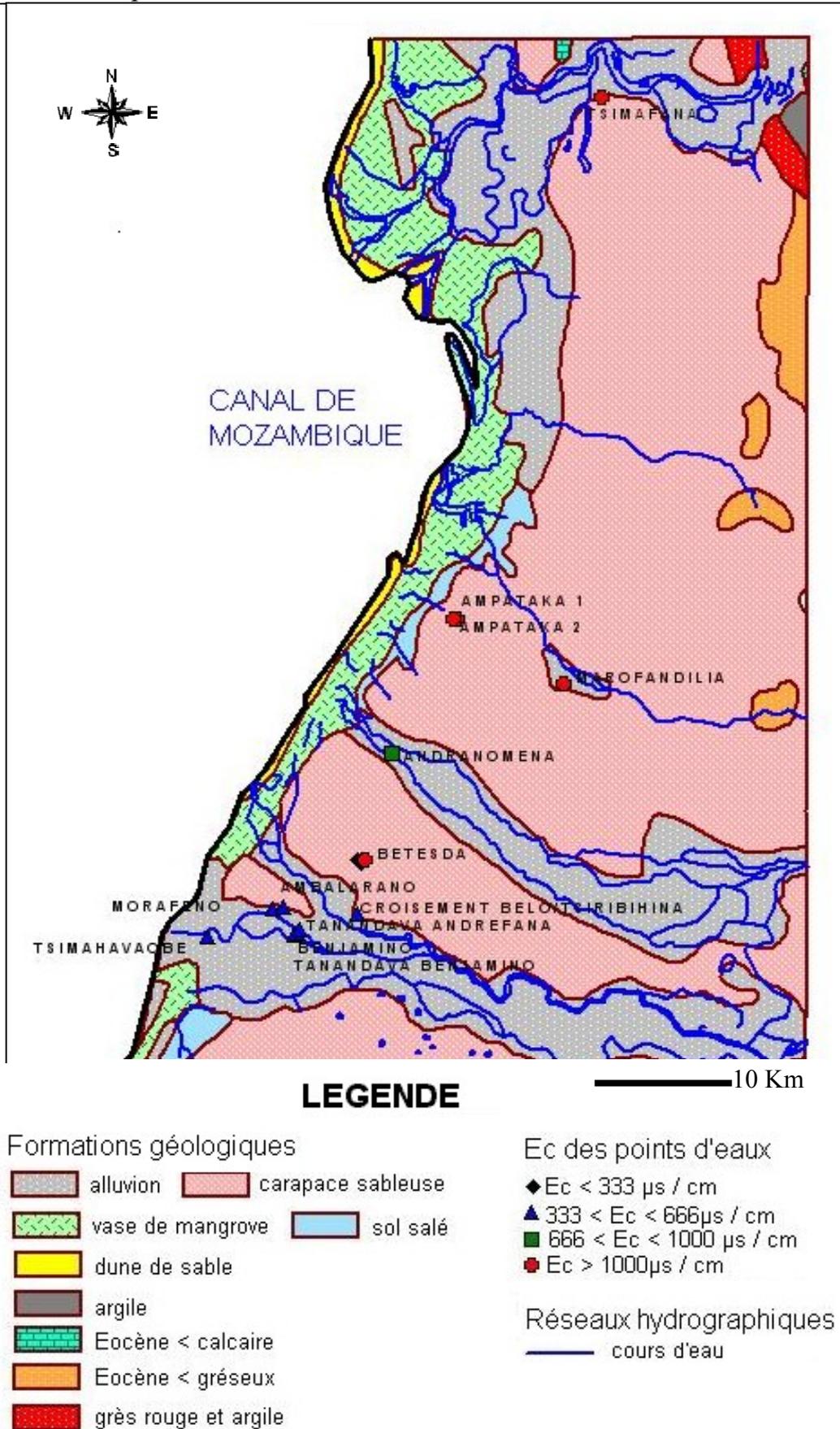


Figure09 : Répartition géographique de la conductivité électrique des eaux prélevées.

IV .1.3 Analyse au laboratoire

IV .1.3.1 Analyse chimique

Tous les résultats sont exprimés en méq/l.

MNT : Minéralisation Totale

Nous avons pris séparément les eaux de forages, les eaux de puits à TDS faible et les eaux de puits à TDS élevé.

Tableau 11 : Résultats des analyses chimiques des eaux de puits à TDS faible

CODE	Mg	K	Na	Ca	NO3	SO4	HCO3	Cl	MNT
C1	0,35	0,13	0,24	0,94	0,06	0,16	1,21	0,08	3,17
W6	0,44	0,49	0,66	1,22	0,00	0,48	1,57	0,62	5,48
W1	0,68	0,37	0,54	2,77	0,32	0,33	3,44	0,34	8,80
W5	0,99	0,11	0,65	2,90	0,03	0,20	4,10	0,39	9,38
W4	1,39	0,18	0,80	3,00	0,06	0,27	4,49	0,41	10,59
W3	1,46	0,36	0,69	2,90	0,09	0,28	4,69	0,42	10,89
W2	0,95	0,28	0,80	3,70	0,04	0,50	4,49	0,59	11,35

Tableau 12 : Résultats des analyses chimiques des eaux de puits à TDS élevé

CODE	Mg	K	Na	Ca	NO3	SO4	HCO3	Cl	MNT
W11	1,44	1,95	3,00	3,05	3,39	1,23	1,80	2,96	18,82
W8	3,47	1,10	7,39	3,98	0,00	0,94	3,05	12,39	32,32
W10	6,39	0,53	9,35	11,50	2,74	2,71	4,10	17,18	54,50
W9	10,25	3,13	3,65	11,00	0,00	1,67	5,57	23,24	58,51
W7	0,88	2,71	41,22	19,10	0,56	17,71	6,39	38,03	126,60

Tableau 13 : Résultats des analyses chimiques des eaux de forages

CODE	Mg	K	Na	Ca	NO3	SO4	HCO3	Cl	MNT
B1	1,16	0,29	1,26	2,05	0,00	1,04	2,79	1,07	9,65
B3	0,98	0,40	2,74	0,90	0,05	1,04	2,20	1,35	9,67
B2	0,11	0,27	6,43	0,14	0,00	0,71	1,80	4,51	13,98

La balance ionique est bonne, elle ne dépasse pas le 5% (cf. Annexe III)

La minéralisation de l'eau varie de 3.17 à 126.6 méq / l.
La minéralisation la plus faible correspond aux eaux de surface.

Nous avons dressé un histogramme de fréquence de TDS pour l'ensemble des échantillons prélevés.

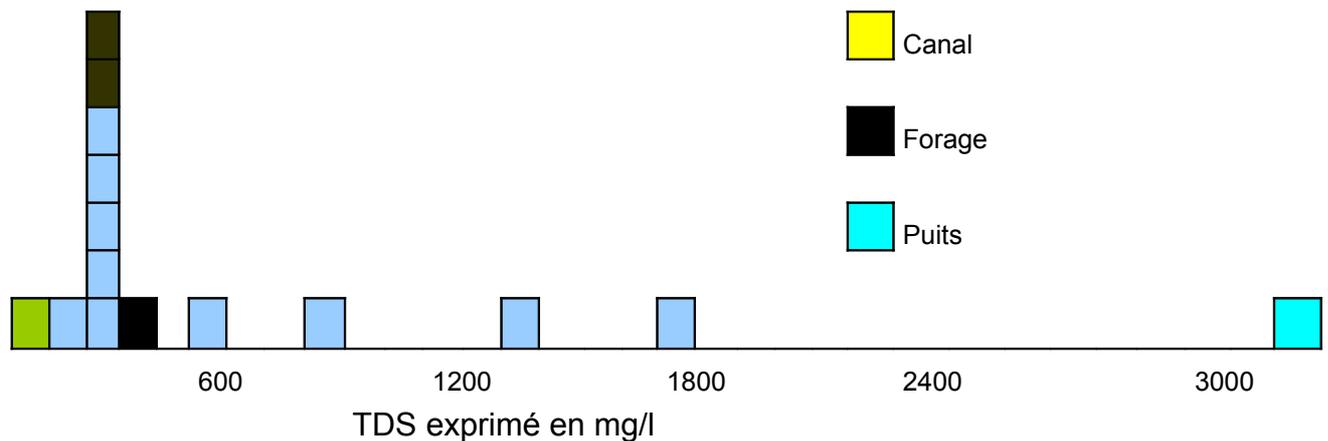


Figure10 : histogramme de fréquence du TDS des eaux prélevées

La figure montre deux grands groupes d'eaux dont l'une, prélevée dans un aquifère sableux très perméable, est généralement douce (TDS<600mg/l) et constant tandis que l'autre est légèrement saumâtre (TDS>600mg/l)

Ce second groupe est très hétérogène et il est prélevé dans la partie Nord de notre zone d'étude.

Les eaux de forages ont une minéralisation totale assez homogène.

IV .1.3.2 Analyse isotopique

Les résultats des analyses isotopiques relatent que la distance des points d'eaux par rapport à la mer n'a pas d'influence sur les teneurs isotopiques.

On constate que les eaux faiblement minéralisées présentent plutôt une teneur isotopique importante que celles à conductivité électrique importante.

La teneur en oxygène¹⁸ varie de -5.93 à -3.38%.

La teneur en Deutérium varie de -41.6 à -24.6%.

La teneur en tritium est généralement supérieure à 1UT à l'exception des eaux de forages, de l'eau prélevée dans le village d'Ampataka et celle du puits de Betesda.

L'eau du puits de Betesda (W7) est la plus minéralisée et elle se trouve dans un aquifère à prédominance argileux.

Les eaux d'Ampataka sont aussi captées dans un aquifère à prédominance argileux.

Tableau 14 : Résultats des analyses isotopiques des eaux de forages et une source

CODE	SITE	18 O	2 H	Tritium	erreur
B3	Tsimahavaobe	-5,59	-37,3	0,06	0,27
B1	Croisement BST	-4,35	-30,3	1,02	0,27
B2	Andranomena	-5,76	-37,3	0,03	0,26
S1	Ankotrofotsy	-3,38	-24,6	1,93	0,34

Tableau 15 : Résultats des analyses isotopiques des eaux de puits et eau de surface

CODE	SITE	18 O	2 H	Tritium	erreur
W1	Morafeno	-4,57	-34,3	1,58	0,33
W2	Ambalarano	-4,3	-31,3	1,36	0,33
W3	Tanandava Andrefana	-4,03	-30,5	1,02	0,31
W4	Tanandava Benjamino	-4,11	-30,1	1,64	0,33
W5	Benjamino	-3,74	-28,7	1,32	0,32
W6	Betesda Hole	-4,67	-33	1,32	0,28
W8	Ampataka 2	-4,41	-31,6	0,24	0,27
W9	Ampataka 1	-5,93	-40,2	0,25	0,33
W10	Marofandilia	-6,2	-41,6	1,33	0,29
W11	Tsimafana	-5,36	-35,2	1,21	0,27
W7	Betesda Well	-5,72	-38,4	0,98	0,27
C2	Dabara	-5,33	-37,6	1,21	0,34
C1	Betesda Canal	-5,14	-33,7	1,32	0,27

IV .2. Interprétation et discussion sur la minéralisation de l'eau

IV .2.1 Caractérisation chimique

La caractérisation chimique des eaux échantillonnées a été basée sur leurs faciès chimiques.

Les points d'eaux ont été reportés sur le diagramme de Schoeller et de Piper.

IV .2.1.1 Eau de puits

Pour avoir une visualisation globale sur les faciès des eaux échantillonnées, nous avons reporté les points d'eaux sur un diagramme de piper avant de les représenter séparément sur le diagramme de Schoeller.

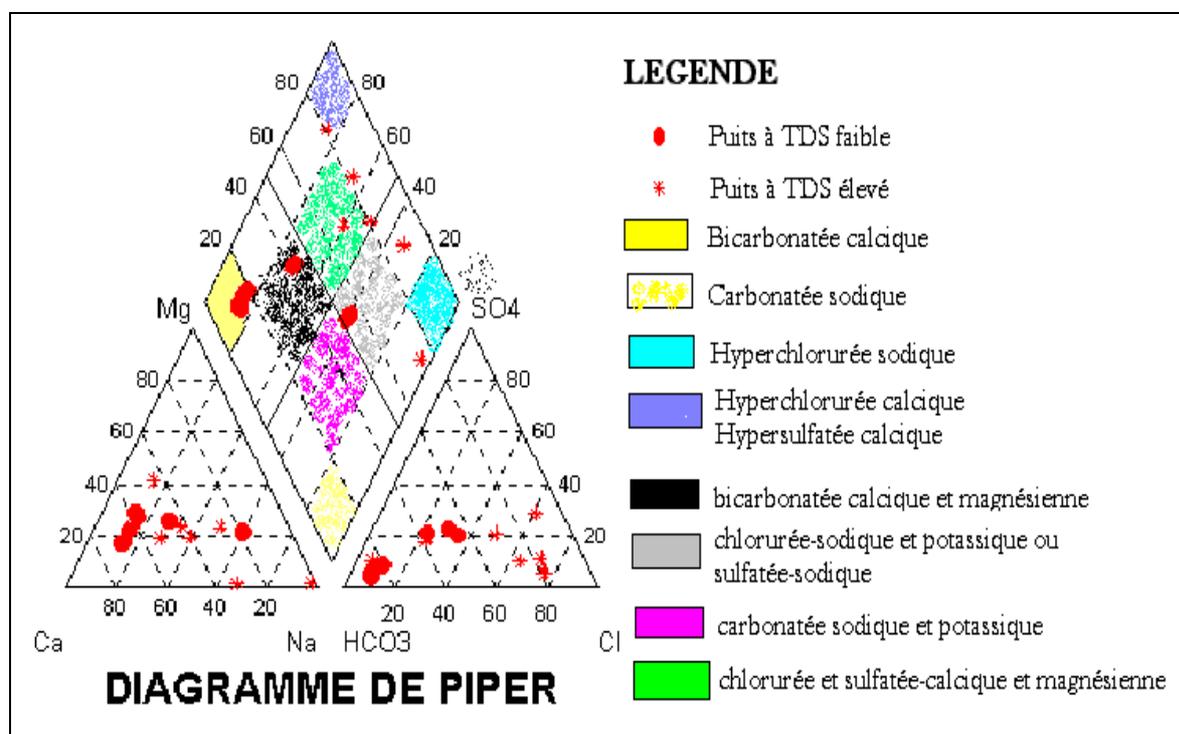


Figure11 : Diagramme de Piper des eaux de puits

Le faciès des eaux est hétérogène mais montrant une tendance chloruré-sodique et bicarbonaté-calcique.

L'analyse des données acquis a permis de constater que ce sont les eaux à minéralisation importante ($TDS > 600 \text{ mg/l}$ et $E_c > 666 \mu\text{s/cm}$) qui ont tendance à avoir une faciès Chloruré-sodique.

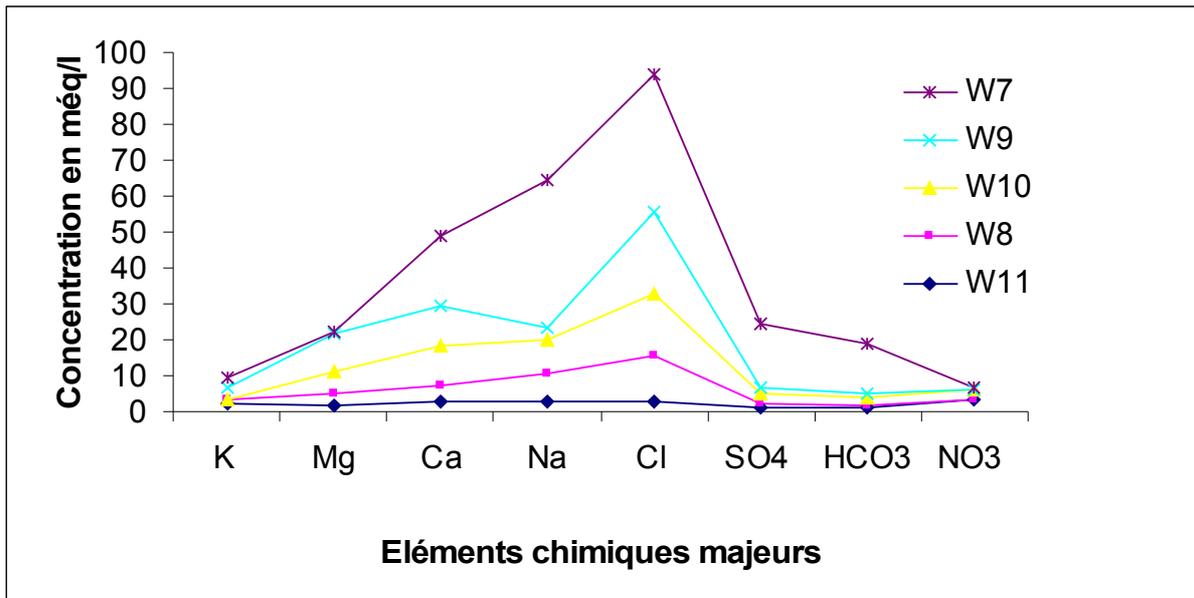


Figure 12 : Faciès chimique des eaux de puits à TDS élevé

Les eaux de puits à TDS élevé ont globalement une signature chimique chloruré sodique.

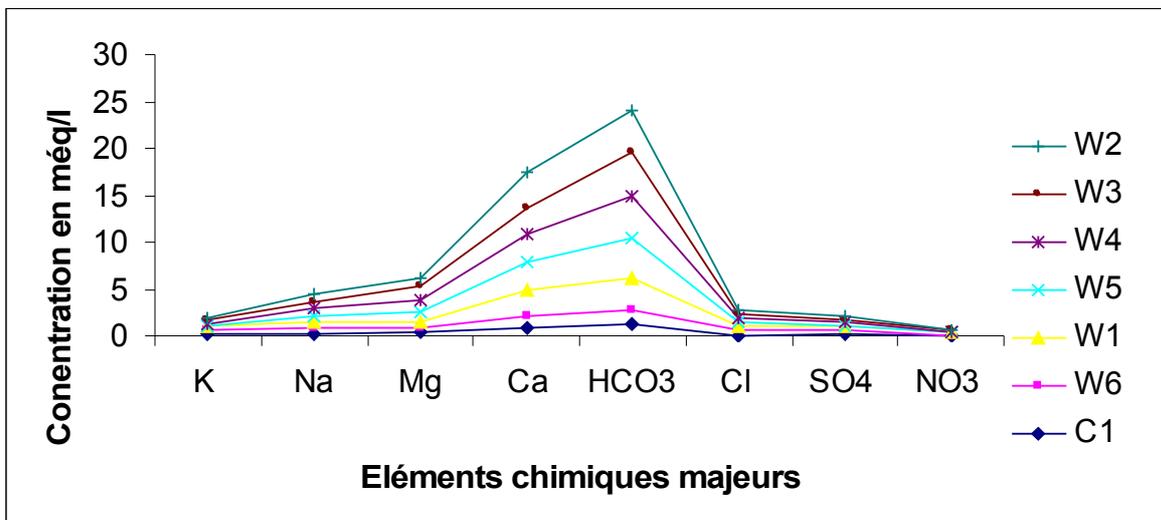


Figure 13 : Faciès chimique des eaux de puits faiblement minéralisées.

Les eaux de puits à TDS faible montrent une signature chimique homogène de type bicarbonaté calcique.

Les eaux de surface ont aussi un faciès bicarbonaté calcique

IV .2.1.2 Eau de forage

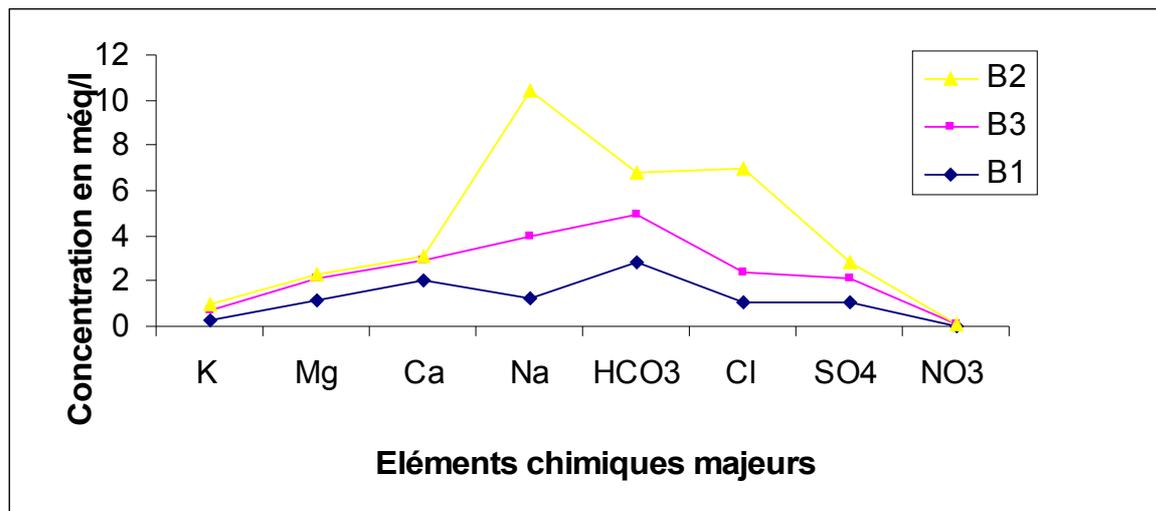


Figure 14 : faciès chimique des eaux de forages.

Les eaux de forages ont trois faciès différents: bicarbonaté-calcique, bicarbonaté-sodique et chloruré-sodique.

La plus minéralisée présente un faciès chloruré-sodique et celle moins minéralisée est bicarbonaté-calcique.

En observant ces diagrammes, on a constaté que le faciès chimique des eaux passe du bicarbonaté calcique au Chloruré sodique.

Les eaux à faciès bicarbonaté-calcique sont captées dans un aquifère sableux à perméabilité important.

Ce type de faciès pourrait être lié à une interaction eau –roche carbonatée.

Son faciès identique à l'eau de surface (C1) permet de supposer une infiltration de ce dernier pour alimenter la nappe superficielle.

Le faciès chloruré-sodique des eaux pourrait être lié à un apport marin (aérosol, invasion marine, intrusion marine) et à une interaction eau-sédiment du fait de la faible perméabilité du terrain.

IV .2.2 Origine des eaux

Les isotopes stables et le tritium permettent d'avoir une idée sur l'origine de la recharge de l'eau qu'on a échantillonnée.

La représentation de la teneur en tritium (figure 15) montre que les eaux de puits ont toutes une teneur en tritium assez élevée, généralement supérieure à 1TU, alors que les eaux de forages ont une teneur très faible, à l'exception du forage de croisement Belo sur Tsiribihina (B1)

Ce qui permet de supposer trois types de nappes dont la première est superficielle (tous les puits), la seconde est semi-captive (B1) et la dernière est captive (B2 et B3) Cette hypothèse est confortée par les coupes lithologiques des points d'eaux (Cf. Annexe VIII)

Les teneurs en Tritium >1 témoignent la présence d'une récente recharge infiltrée depuis moins de 50ans [35]

La plupart des eaux de puits ont une teneur en tritium supérieure à 1UT. Une exception est notée pour l'eau prélevée à Ampataka 1 et 2 (W8, W9) où la teneur en tritium est faible, assez proche de celle des forages B2 et B3 comme s'il y a soit mélange entre la nappe captive et l'eau captée par ces deux puits [33] soit une lenteur de l'infiltration de l'eau à travers les formations à perméabilité réduite (très argileuse)

La teneur faible en tritium des eaux de forages est sûrement liée au fait qu'elles sont captives, c'est-à-dire que l'eau a mis beaucoup de temps avant de rejoindre l'aquifère et que la recharge se fait principalement par écoulement souterrain en provenance de la zone des collines.

Le cas du forage au Croisement Belo sur Tsiribihina suppose une possibilité d'infiltration verticale des eaux à cause de la perméabilité assez importante du terrain (cf. coupe lithologique en Annexe 6) que les autres points d'eaux profondes.

La quasi-similarité de la teneur en tritium des eaux de surface avec celles des nappes superficielles et de la nappe captée par le forage du croisement Belo sur

Tsiribihina B1 montre la contribution de l'eau du canal de dabara dans l'alimentation de la nappe.

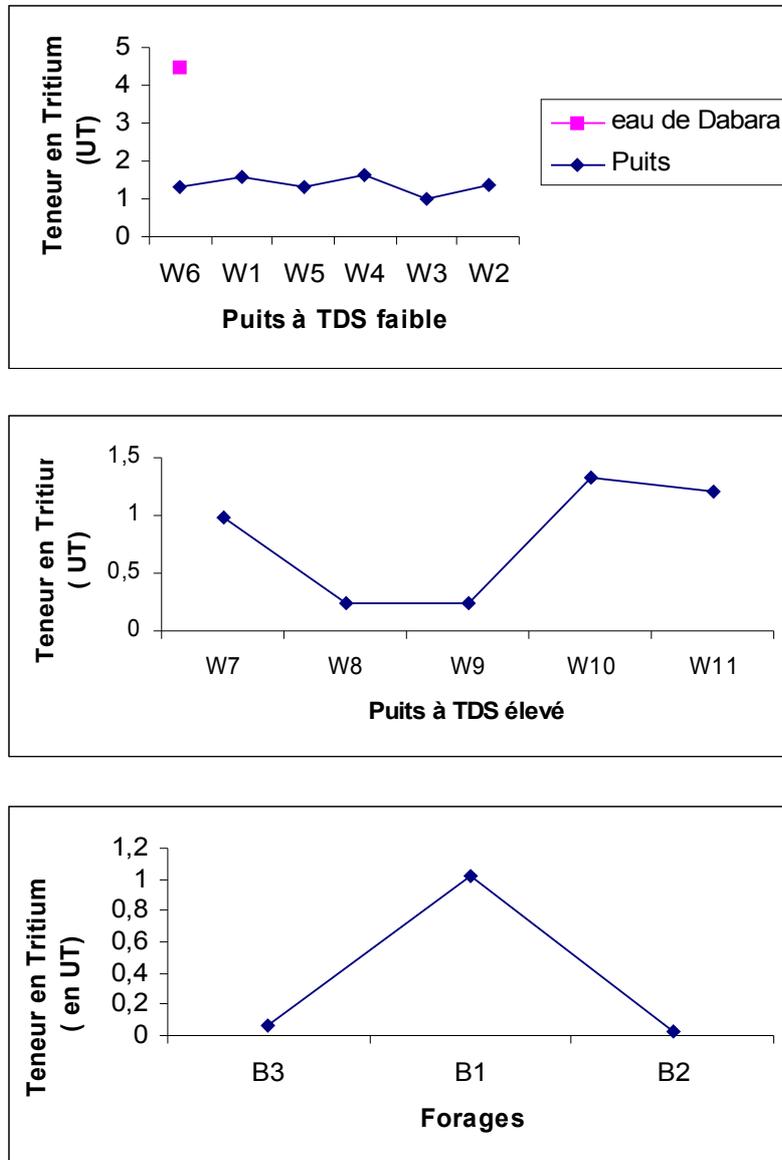


Figure15 : Evolution de la teneur en tritium des eaux en fonction du TDS et du type d'ouvrage.

TDS exprimés en méq/L

IV .2.3 Origine de la minéralisation

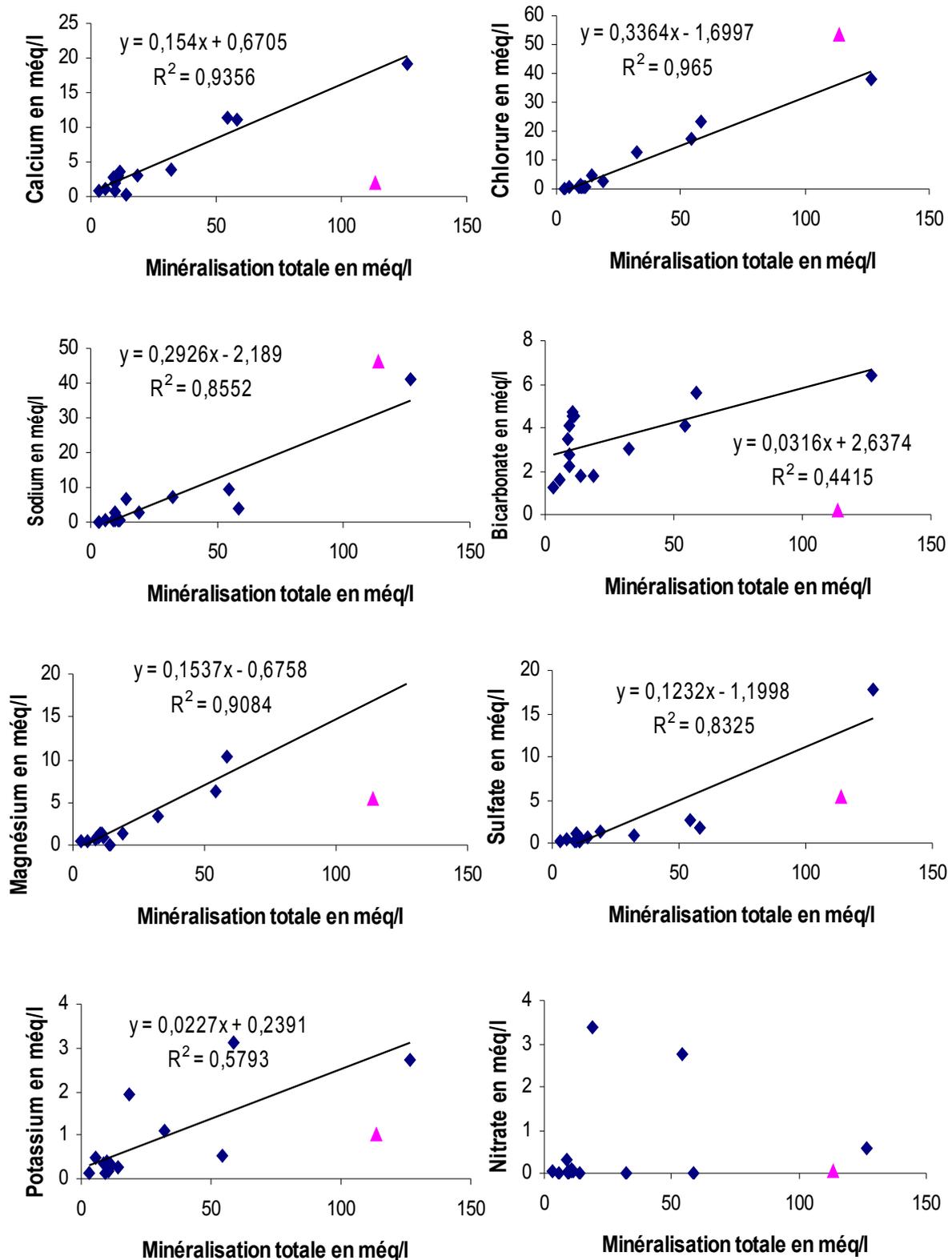


Figure 16 : Relation entre les éléments chimiques et la minéralisation totale des eaux. Le triangle représente l'eau de mer / 10.

Nous avons constaté à partir de ces figures que les teneurs en chlorure, calcium, magnésium et sodium augmentent avec la charge saline et sont donc déterminantes dans la minéralisation de l'eau.

Toutefois les bicarbonates participent à l'augmentation de la minéralisation des eaux surtout dans le secteur nord (aquifère sablo-argileux, classe A2)

Ses contributions dans le secteur sud ne sont pas très évidentes mais on note que sa teneur augmente considérablement d'un point à un autre même si la minéralisation des eaux reste assez constante.

Les autres ions tels le nitrate et le potassium contribuent de façon négligeable à la minéralisation.

Sachant les ions responsables de la minéralisation de l'eau, nous allons voir l'origine de ces ions.

IV .2.3.1 Dissolution des minéraux

L'indice de saturation des eaux vis-à-vis des phases minérales présentes dans les aquifères a été calculé à l'aide du programme PHREEQC de l'Aquachem.

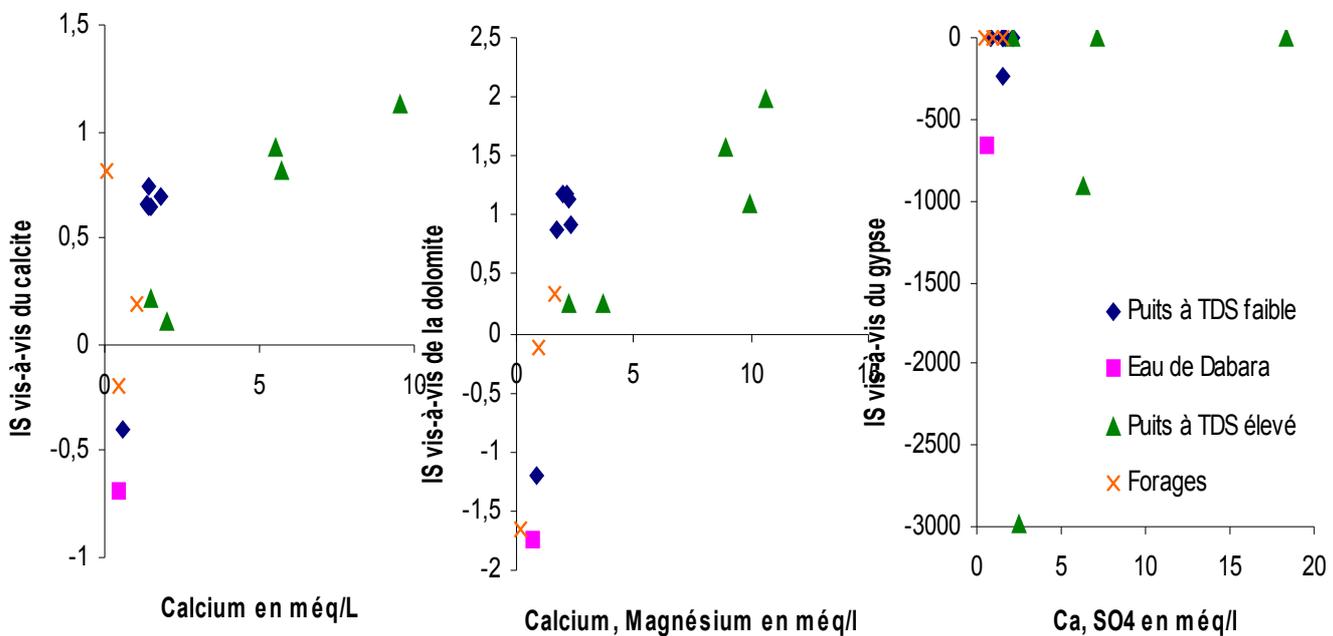
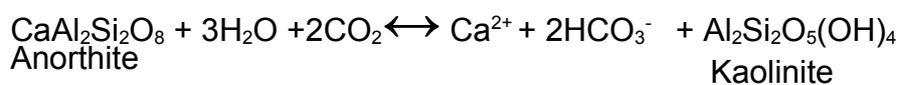
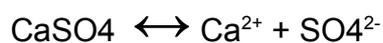
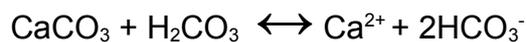


Figure17 : Evolution des Indices de saturation en fonction des principaux éléments constitutifs du minéral concerné.

Les figures ci-dessus montrent que les eaux sont généralement sous-saturées (Indice de saturation <0) vis-à-vis du gypse et sursaturées (IS>0) vis-à-vis de la calcite et de la dolomite, ce qui suppose une dissolution des roches carbonatées.

Les équations suivantes démontrent la dissolution de trois minéraux dont la calcite, le gypse et le feldspath.



Comme les eaux collectées présentent une teneur en calcium et en bicarbonate assez importantes, nous avons dressé les figures suivantes pour démontrer si ces éléments proviennent de la dissolution des minéraux carbonatés.

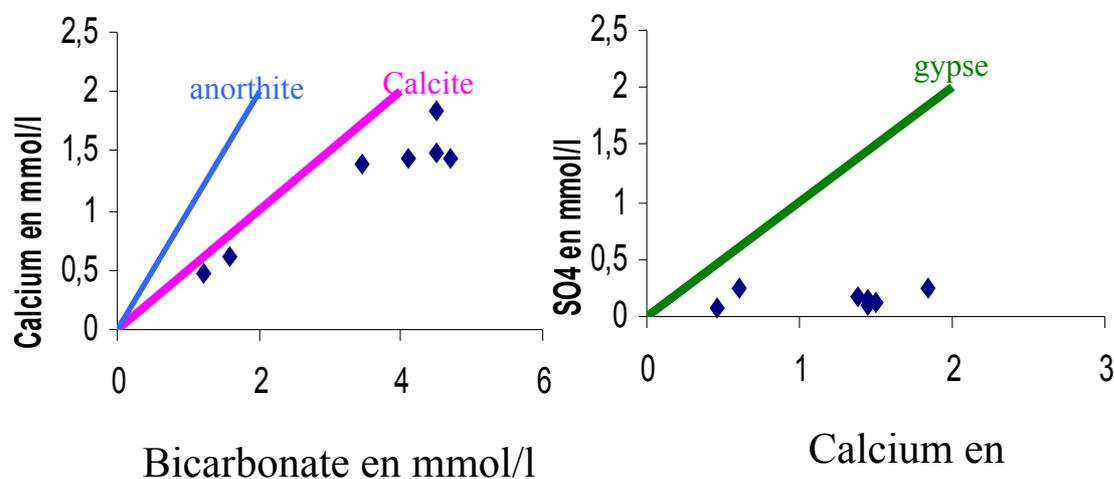


Figure18 : Distribution des eaux à TDS faible par rapport à la droite de mise en solution de la calcite et du gypse

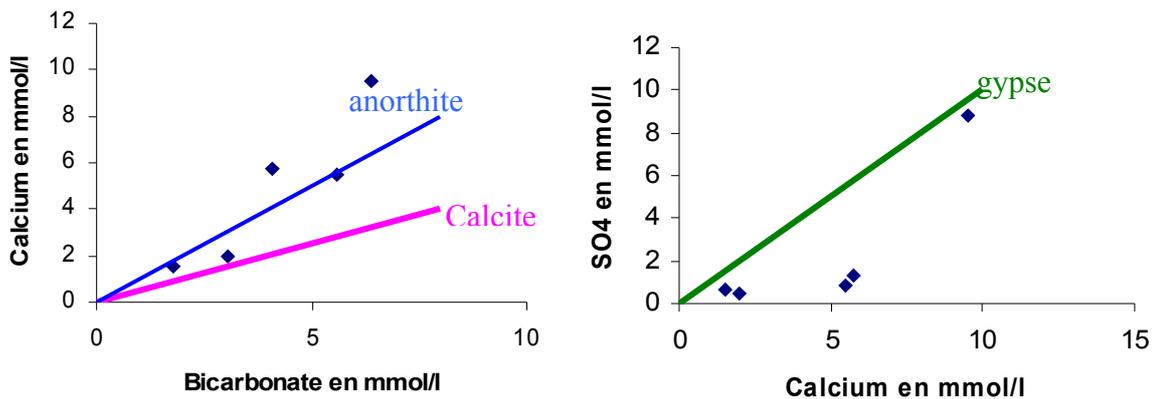
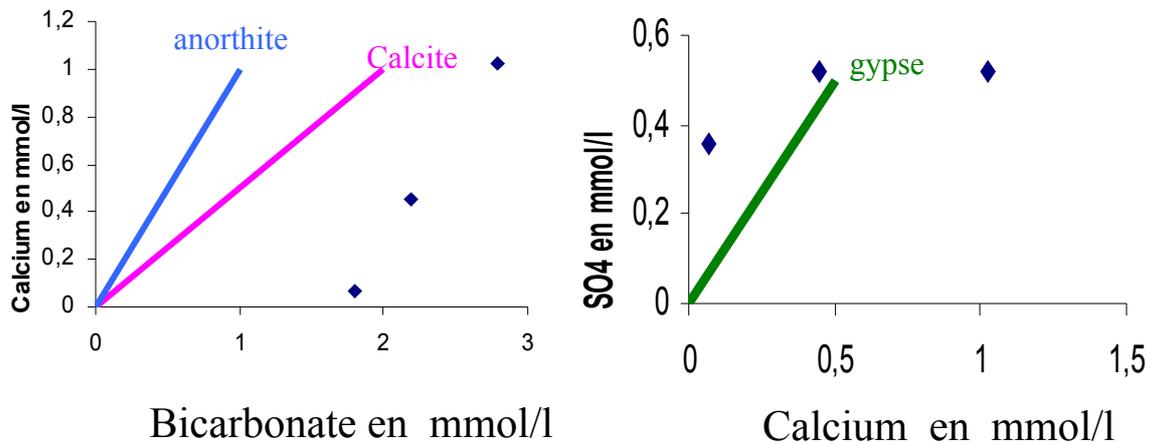


Figure19 : Distribution des eaux à TDS élevé par rapport à la droite de mise en solution de la calcite et du gypse.

Figure20 : Distribution des eaux de forages par rapport à la droite de mise en solution



de la calcite et du gypse

Le graphe ci dessus confirme qu'il y a dissolution de la calcite et de la dolomite.

Dans tous les cas, on constate que en plus de la dissolution de ces minéraux, il y d'autres phénomènes qui font le déficit ou l'excès du calcium.

Parmi eux, l'hydrolyse de l'anorthite pour les eaux à TDS élevé, la dissolution du gypse pour les échantillons prélevés dans le puits de Betesda (W7) et du croisement Belo/Tsiribihina (B1)

On peut supposer aussi une précipitation secondaire de la calcite ou une échange de base pour les eaux d'Andranomena (B2)

IV .2.3.2 Apport marin

En reportant la composition chimique de l'eau de mer dans le diagramme de corrélation entre les éléments chimiques et la minéralisation, nous avons remarqué que les sulfates, magnésium, sodium et chlorure ont en partie comme origine l'eau de mer (cf.figure 16)

La composition chimique de l'eau à prédominance d' ions chlorure, sodium et sulfate illustrent l'apport marin dans la partie Nord (aquifère à perméabilité faible)
En outre, la teneur en chlorure dans la zone où la minéralisation est déjà élevée augmente au fur et à mesure qu'on se rapproche de la mer :

-la teneur en Cl d'Ampataka 1 est de 23.24méq/l

-la teneur en Cl de Marofandilia est de 17.18méq/l

Ceci confirme l'apport de la mer dans la minéralisation.

Le cas d'Ampataka2 situé au voisinage d'Ampataka 1 est une exception et mérite une autre étude vu aussi sa température très différente (21.1°C)

Le faible minéralisation de W6 et W11 est sûrement liée à sa bonne alimentation par l'eau de surface (canal de Dabara et fleuve Tsiribihina)

Les mesures, études et enquêtes effectuées relatent que la forte minéralisation de l'eau est liée à l'intrusion marine et à l'ascension de la nappe profonde pour Ampataka (W8 et W9)

Ces phénomènes s'ajoutent à l'interaction eau-formation sédimentaire favorisée par la faible perméabilité du terrain.

Dans le secteur Sud (aquifère alluvial), la contribution de l'eau de mer est plus ou moins atténuée par la bonne alimentation de la nappe.

Les figures suivantes montrent à la fois l'apport marin dans la minéralisation de la nappe ($SO_4/Cl < 1$, $Na/Cl < 1$) et la contribution des eaux de surface (excès de la concentration en sodium) dans la recharge de la nappe notamment pour les points d'eau du secteur sud de notre zone d'étude.

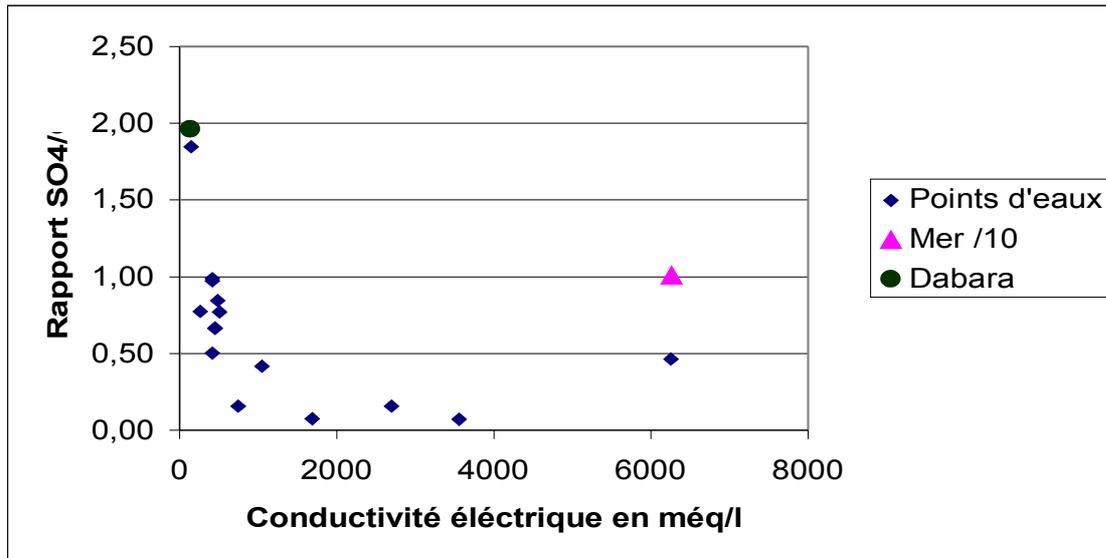


Figure 21 : Relation entre le rapport SO4/Cl et la Conductivité électrique

Cette corrélation SO4/Cl et la conductivité électrique montre que tous les points se trouvent en dessous ou près de la mer, à l'exception du W6.

La position du W6 près de l'eau du Dabara confirme que cette dernière s'infiltrerait rapidement et alimente le point d'eau W6.

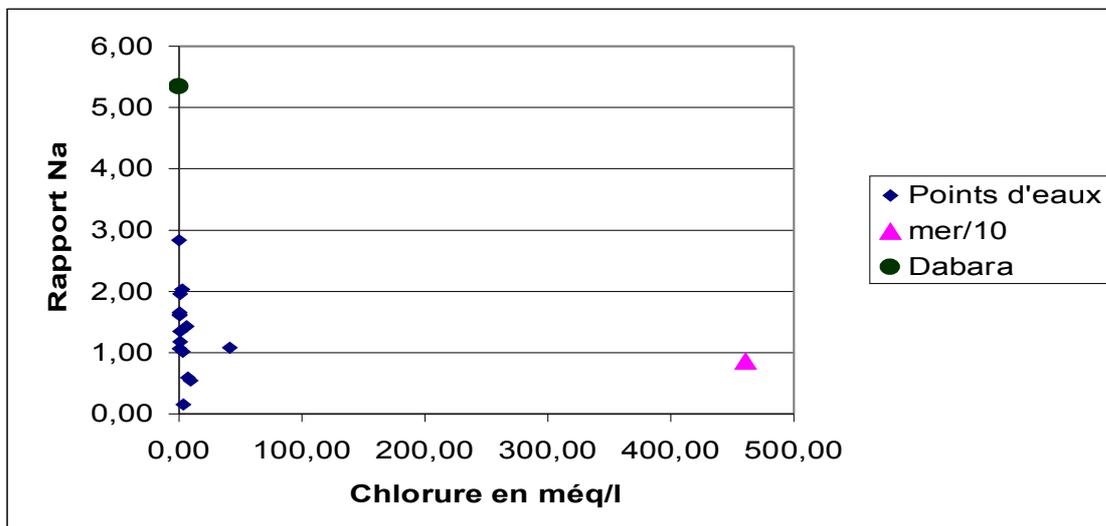


Figure 22 : Relation entre le rapport Na/Cl et la Chlorure

Le graphe ci-dessus répartit les eaux échantillonnées en deux groupes dont l'un à TDS faible et ayant tout un rapport Na/Cl >> 1 et l'autre à TDS élevé et à rapport Na/Cl < 1.

Le rapport $Na/Cl < 1$ montre bien un excès en chlorure probablement apporté par l'eau de mer (17)

Il s'agit des points d'eaux B2, W7, W8, W9 et W10 situés dans le secteur Nord de la zone d'étude.

Le rapport $Na/Cl > 1$ confirme la bonne alimentation de la nappe par les eaux de surface, il permet aussi de suspecter un processus d'échange de base.

La figure 23 ci-dessous illustre l'apport de la mer dans la minéralisation de l'eau car on constate que les eaux à TDS élevé s'alignent sur la droite de mélange avec les eaux océaniques (SMOW)

Cette droite a pour équation $y = 5.5579x - 6.4627$.

En outre, cette droite recoupe la DMM pour le couple $y = -44\text{‰}$ et $x = -6.7\text{‰}$, valeurs qui représentent la pluie à l'origine de la recharge de la nappe.

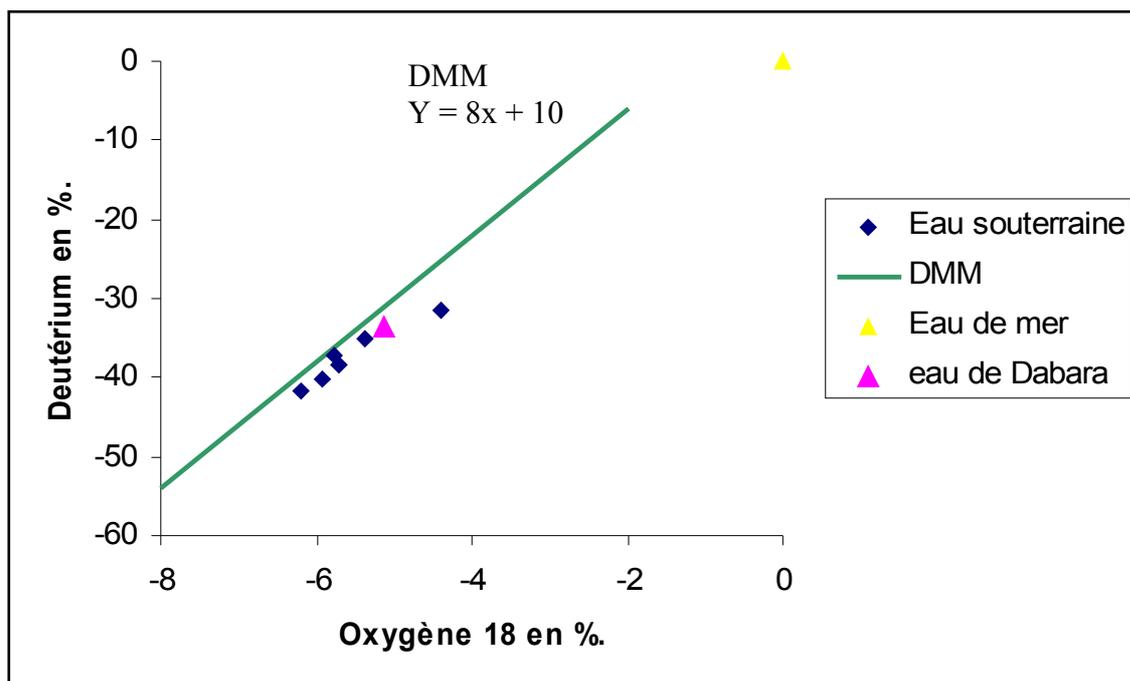


Figure 23 : Relation entre l'Oxygène 18 et le Deutérium des eaux à TDS élevé

IV .2.3.3 Evaporation

La zone de Morondava est sous un climat aride où l'évaporation est très importante.

Compte tenu du niveau statique moyen de la nappe assez proche du sol (environ 2m), on peut dire que l'évaporation affecte sûrement les nappes superficielles de la zone.

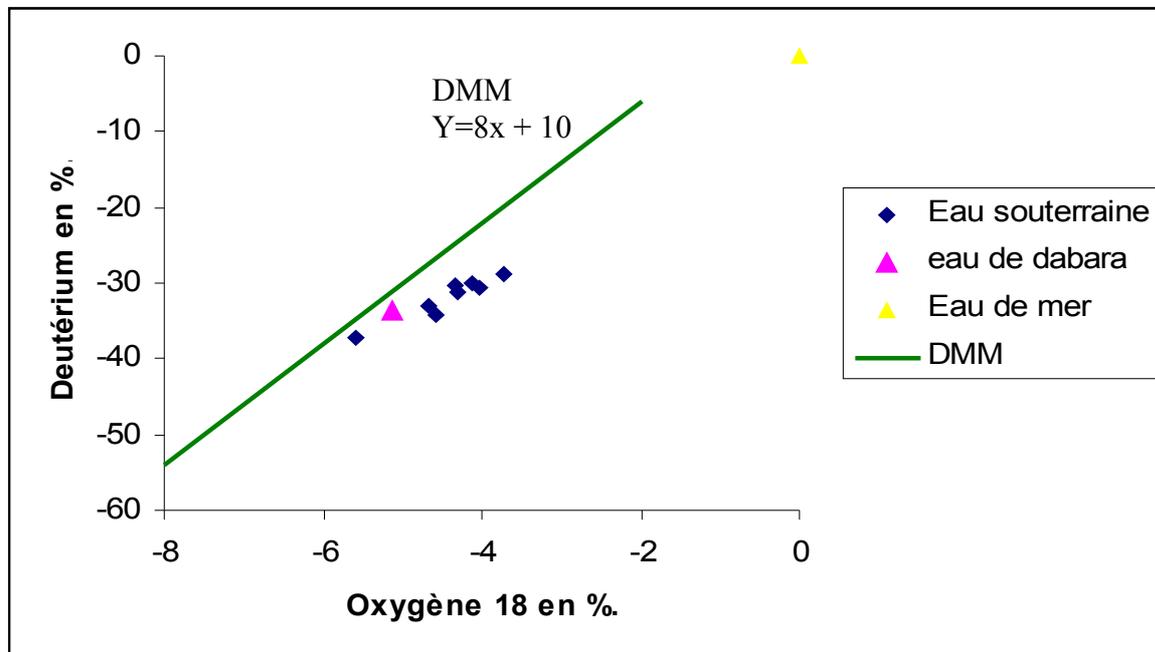


Figure24 : Relation entre l'Oxygène 18 et le Deutérium des eaux à TDS faible

Le graphe de corrélation Oxygène 18-Deutérium (figure 24) illustre bien que les eaux du secteur Sud sont affectées par l'évaporation car la pente de la droite est comprise entre 3 et 6

Pour les eaux à TDS élevé, la corrélation Oxygène 18-Deutérium montre aussi une légère évaporation vu la pente de la droite voisine de 6 (cf. figure 21) D'ailleurs, cette partie Nord a beaucoup de lac qui concentre du sel sous l'effet d'évaporation.

Cependant, pour tous les échantillons prélevés, il n'y a pas eu de dépendance nette (cf. page 20) entre les teneurs en chlorure et celles en Oxygène 18, ce qui prouve que, même si l'évaporation existe, son effet sur la minéralisation de l'eau est faible.

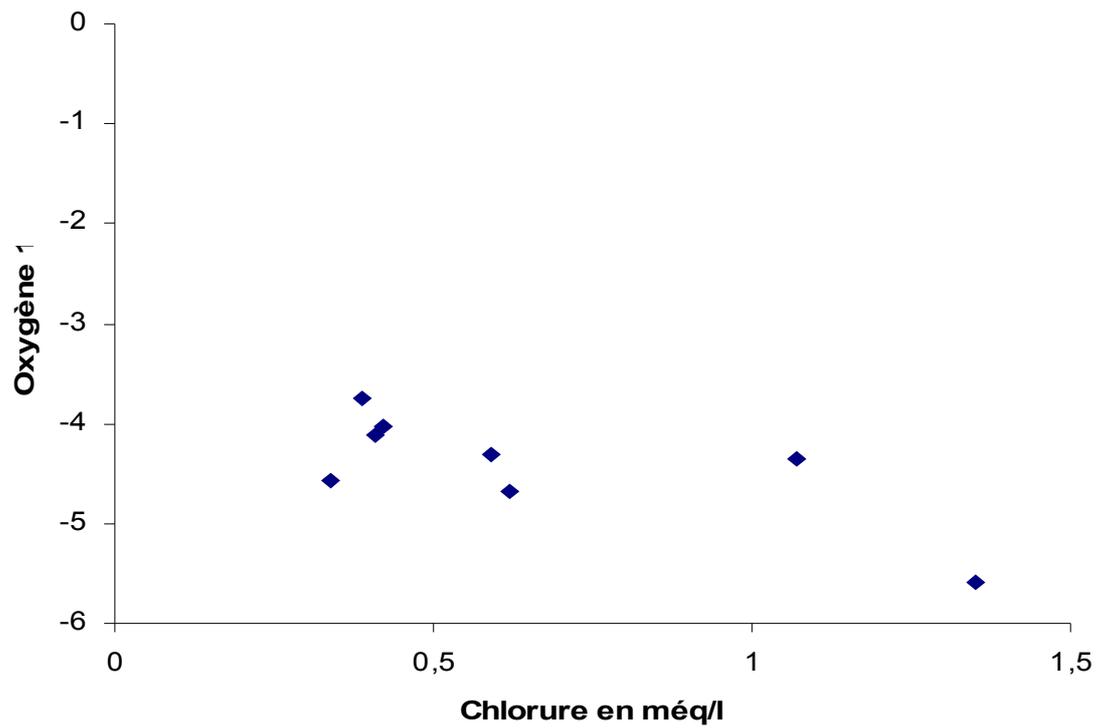


Figure25 : Relation entre le Chlorure et l'Oxygène 18 des eaux à TDS faible

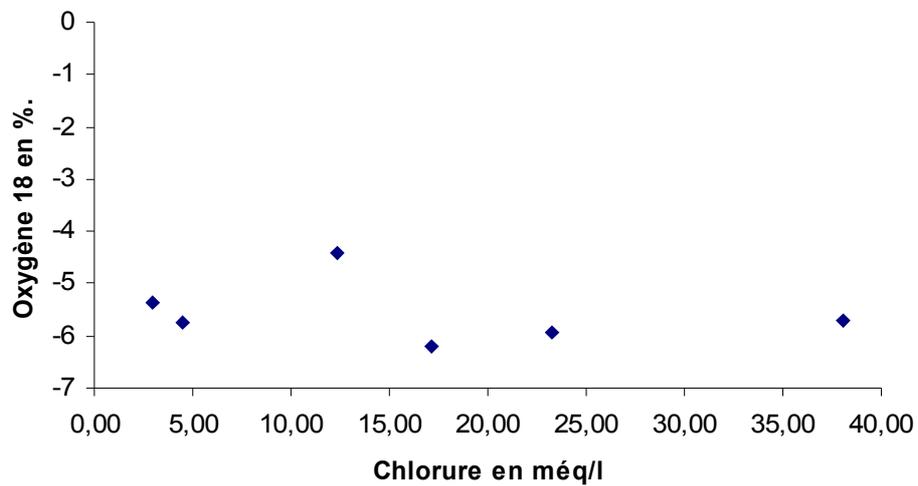


Figure26 : Relation entre le Chlorure et l'Oxygène 18 des eaux à TDS élevé

CONCLUSION

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L'application des outils isotopiques, chimiques et hydrogéologiques dans l'investigation de la nappe littorale a permis d'apporter quelques précisions sur l'origine de la minéralisation de l'eau souterraine.

Les investigations géologiques et hydrogéologiques ont mis en évidence deux nappes dont la première est exploitée à une profondeur inférieure à 12m tandis que la seconde n'est captée que par forage dépassant largement les cinquantaines de mètres.

Cette dernière peut être captive (B2 et B3) ou semi-captive (B1)

Les aquifères superficiels sont exclusivement du remplissage de quaternaire (sablo argileuse) à grande variabilité latérale qui fait que la partie Nord de la zone d'étude est plus argileuse (classe A2) donc moins perméable que la partie Sud (classe A1).

Les analyses chimiques montrent que les éléments responsables de la forte minéralisation de l'eau sont le chlorure, le bicarbonate, le magnésium, le calcium et le sodium.

Les eaux à minéralisation modérée ($E_c < 666 \mu\text{s/cm}$) sont rencontrées dans la nappe alluviale (partie Sud de la zone d'étude) et sont caractérisées par un faciès bicarbonaté calcique.

Les eaux prélevées dans l'aquifère sablo-argileux (classe A2) se distinguent par une minéralisation nettement plus élevée et un faciès généralement chloruré sodique.

Dans tous les cas, l'accroissement de la salinité s'accompagne d'une tendance du faciès chimique au chloruré-sodique.

La forte minéralisation de l'eau prélevée dans la partie Nord est liée à l'intrusion marine et à la mise en solution des minéraux telle la calcite, dolomite et l'anorthite.

Les compositions chimiques de la nappe alluviale (partie Sud) sont dues, d'une part, à la dissolution de la calcite et dolomite vis-à-vis desquelles les eaux sont sursaturées et d'autre part, à la recharge efficace de la nappe par les eaux de surface.

L'homogénéité du faciès des eaux ainsi que leurs minéralisations proviennent du fait que les puits, en quasi-totalité captent le même niveau aquifère (Type II)

Reporter les données isotopiques des eaux prélevées sur le diagramme de corrélation Oxygène 18- Deutérium ont permis de mettre en évidence l'apport marin dans la minéralisation élevée des eaux du nord et aussi l'effet d'évaporation dans celle du Sud.

Cependant l'effet de l'évaporation est très limité (Diagramme de corrélation Oxygène 18 – Chlorure) à cause de l'infiltration rapide des eaux à travers les formations sableuses (secteur Sud)

Les teneurs mesurables du tritium ($UT > 1$) sur presque l'ensemble des puits attestent la présence d'une récente recharge provenant de l'infiltration de l'eau de surface (Dabara)

Les eaux de forages sont faiblement tritiées. Ceci est probablement lié à un temps de séjour prolongé de l'eau et à un écoulement souterrain en provenance de la zone de colline.

Il y a une contribution de la nappe profonde dans les eaux captées à Ampataka.

Il existe des pollutions en nitrate d'origine organique affectant exclusivement les nappes superficielles. Les nappes profondes sont à l'abri de cette pollution.

Même si ce travail a permis d'apporter une certaine explication concernant la minéralisation de la nappe de notre zone d'étude, certains éléments en manque encore, ainsi :

-une étude plus détaillée reste à envisager pour pouvoir déterminer l'origine de la forte minéralisation du puits de Betesda, Ampataka1 et Ampataka 2.

-l'analyse de l'eau de pluie pour estimer son apport sur la minéralisation de la nappe est nécessaire

-faire des prélèvements d'eaux à différent période de l'année pourrait permettre de préciser la vraie origine de la minéralisation de toute la nappe littorale.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AQUACHEM 3.7 (logiciel) [35]

BACHY, 2001 : Historique des forages de la JIRAMA [01]

BESAIRIE H., 1960 : Recherche géologique à Madagascar de 1948 à 1958 [02]

BESAIRIE H., COLLIGNON M. : Lexique stratigraphique International Madagascar, Volume IV [03]

BESAIRIE H., 1972 : Géologie de Madagascar- les terrains sédimentaires [04]

BLAVOUX B., LETOLLE R., 1995 : Apport des techniques isotopiques à la connaissance des eaux souterraines, Géochronologie 54 [06]

BRGM, 1969 : Etude des ressources aquifères souterraines à Madagascar- Plaine de Morondava [07]

CASTANY G., 1982 : Principes et Méthodes de l'hydrogéologie [08]

CELLE H., 1996 : Hydrochimie des eaux du massif du Piton de la Fournaise, île de la Réunion [09]

DIENERT F., 1928 : Etude hydrogéologique des eaux circulant à travers les alluvions (vallée de la Loire) [11]

DROUART E., VOUILLAMOZ J.M., 1999 : Alimentation en eau des populations menacées – Action contre la faim [12]

EXCEL (tableur) [37]

FANOVOZANTSOA Association, 2002 : Etude, suivi et contrôle des 30 puits dans la région de Morondava [13]

FONTES J.C., 1976 : Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles [14]

GREUTER N., 2001 : Impact des activités humaines sur la qualité des eaux de puits dans la région d'Antananarivo [16]

GUYOT L., 2002 : Reconnaissances hydrogéologiques pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en milieu semi-aride : Sud Ouest de Madagascar [17]

JICA, 1996 : Etude de l'exploitation des eaux souterraines dans la région Sud Ouest de Madagascar, rapport final, Volume I [18]

JICA, 2001 : Rapport de l'étude du concept de base pour le projet de l'exploitation des eaux souterraines dans la région Sud Ouest de Madagascar, Phase II [20]

JICA, 2003 : Rapport d'achèvement des travaux du projet, Phase II (décembre 2002-mars 2003) [21]

LEMAIRE B., 1963 : Rapport hydrogéologique de Belo sur Tsiribihina [22]

MAP INFO 7.0 (logiciel) [36]

MAZOR E., 1997: Chemical and Isotopic groundwater hydrology [23]

MEM, 1999: Code de l'eau [24]

NICOLINI E., 1980 : Les isotopes du milieu dans les précipitations relevées à Antananarivo et aux stations du réseau AIEA de l'Océan Indien Occidental. Application des techniques isotopiques aux nappes captives du Sud Ouest de Madagascar [25]

NJITCHOUA R., 2004: Abundance of Stables Isotopes [26]

OLIVE P., 1995: Introduction à l'hydrologie isotopique [27]

OMS, 1994 : Directives de qualité pour l'eau de boisson, deuxième édition [28]

RAJAOBELISON J., MAMAFARANANAHARY E., 2003 : Apport des techniques isotopiques à l'étude des types d'infiltrations d'eaux dans les aquifères du Sud Ouest de Madagascar [05]

REBOZA M., 1986 : Contribution à l'étude des eaux souterraines de la plaine de Morondava à partir des forages des périmètres sucriers d'Analava [29]

RODIER J., 1976 : Analyse de l'eau, Tome II [30]

SALOMON J.N, 1987 : Le Sud Ouest de Madagascar [15]

SCHOELLER H., 1962 : Hydrologie des régions arides [31]

TARDAT M., 1989 : Chimie des eaux [32]

ZOUARI K., JERIBI L., 2002 : Identification des mécanismes de recharge de la nappe de surface du bassin de l'Oued Zroud : apport des techniques chimiques et isotopiques [19]

ZOUARI K., MALIKI M., KRIMISSA M., MICHELOT J.L., 2000 : Relation entre nappes superficielles et aquifère profond dans le bassin de Sfax (Tunisie) [33]

ZOUARI K., YERMANI M., MAMOU A., MICHELOT J.L., 2003 : Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale) [34]

ZOUARI K., MALIKI M., 2001: Isotope methodologies contribution to the evaluation and management of the Sfax Sahelian Aquifer [10]

ANNEXES

Annexe I
Coordonnées des points d'eaux visités

SITE	Latitude	Longitude	X	Y	Altitude en m
Marovoay	S0201843.00	E0442157.00	183748	642432	14
Manamby	S0202424.00	E0444800.00	229182	632458	40
SUCOMA-Betsipotika	S0201831.00	E0442730.00	193402	642920	25
Croisement Belo sur Tsiribihina	S0201746.00	E0442405.00	187439	648501	14
Andranomena	S0201104.00	E0442534.00	189871	667816	6
Ampandra	S0201814.00	E0442556.00	190669	643409	34
Tsimahavaobe	S0201757.00	E0441843.00	178103	643775	28
Morafeno	S0201719.00	E0442029.00	181163	644982	7
Ambalarano	S0201711.00	E0442058.00	182001	645239	7
Tanandava Andrefana	S0201749.00	E0442120.00	182654	644079	12
Tanandava Benjamino	S0201754.00	E0442125.00	182801	643927	15
Benjamino	S0201811.00	E0442123.00	182749	643404	15
Bekignana Ankilivalo	S0201748.00	E0443818.00	212182	644456	58
Tsaramandroso Ankilivalo	S0202112.00	E0443435.00	205784	638113	58
Tanambao Saraha	S0201838.00	E0442734.00	193520	642768	29
Betesda	S0201528.00	E0442482.00	189621	648697	4
Betesda	S0201521.00	E0442429.00	188081	648697	4
Ampataka2	S0200502.00	E0442842.00	195197	667877	6
Ampataka1	S0200500.00	E0442841.00	195167	667877	6
Marofandilia	S0200758.00	E0443255.00	202607	662490	15
Tsimafana	S0194308.00	E0443504.00	205846	708338	22
Ankilizato Avaradrova	S0202420.00	E0450253.00	255062	632817	188
Carroo	S0202438.00	E0450242.00	254748	632261	185
Ambatolahy	S0200050.00	E0453232.00	306389	676510	105
Dabara en aval	S0201836.00	E0442735.00	193548	644231	29
Betesda	S0201521.01	E0442429.01	188081	656621	4
Dabara	S0202418.00	E0444658.00	227383	632624	70
Ankotrofotsy	S0194808.00	E0453257.00	306992	699935	101
Antsakoameloka	S0201713.00	E0441932.00	179507	645146	32

Annexe II

Résultats des mesures in situ

SITE	pH	Ec	T	Sal	TDS	Nitrate	Alcalinité
		μS/cm	°C	‰	mg/L	mg/L	CaCO ₃ , mg/L
Marovoay	6,68	450	27,4	0,2	225	0	42
Manamby	6,35	170,6	28	0,1	85,3	0	48
SUCOMA-Betsipotika	6,95	332	28,6	0,2	165,8	0	92
Croisement Belo sur Tsiribihina	6,91	417	27,8	0,8	208	0	125
Andranomena	6,6	748	28,1	0,4	374	0	82
Ampandra	6,73	366	27,0	0,2	183,7	0	82
Tsimahavaobe	6,33	507	27	0,2	254	0	114
Morafeno	6,72	416	28,6	0,2	207	2	73
Ambalarano	6,88	480	28	0,2	261	0	24
Tanandava Andrefana	7,06	450	28,6	0,2	243	0	62
Tanandava Benjamino	6,99	450	28,4	0,2	243	0-1	28
Benjamino	7,04	422	28	0,2	211	0	39
Bekignana Ankilivalo	6,37	557	26,5	0,3	279	0	156
Tsaramandroso Ankilivalo	6,43	201	27,4	0,1	100,8	0	79
Tanambao Saraha	6,94	677	28,7	0,3	338	2	112
Betesda	6,93	6250	27,2	3,4	3120	0-1	261
Betesda	6,65	261	22,7	0,1	130,7	0	109
Ampataka2	7,4	168,7	21,1	0,8	838	0	137
Ampataka1	7,15	3560	26,2	1,9	1780	0	225
Marofandilia	6,85	2700	29,5	1,4	1351	05 à 10	205
Tsimafana	6,6	1050	28,4	0,5	515	05 à 10	79
Ankilizato Avaradrova	5,83	507	28,9	0,2	251	2	45
Carroo	6,13	391	29,7	0,2	195,6	5	46
Ambatolahy	5,56	203	28,2	0,1	101,3	1	6
Dabara en aval	7,4	138,1	26,4	0,1	69	0	54
Betesda	7,08	144,4	21,5	0,1	72,1	0-1	
Dabara	7,66	127	27	0,3	63,8		
Ankotrofotsy	6,85	67,3	27,7	0	33,7	0	21
Antsakoameloka	6,6	523	27,6	0,3	263	0	150

Annexe III Résultats des analyses chimiques

SITE	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	NO3	SO4	Cation	Anion	BI
Ankotrofotsy	0,04	0,11	0,47	0,03	0,66	0,03	0,00	0,00	0,64	0,69	-3,6 3
Morafeno	2,77	0,68	0,54	0,37	3,44	0,34	0,32	0,33	4,37	4,44	-0,7 9
Ambalarano	3,70	0,95	0,80	0,28	4,49	0,59	0,04	0,50	5,72	5,62	0,87
Tanandava Andrefana	2,90	1,46	0,69	0,36	4,69	0,42	0,09	0,28	5,41	5,48	-0,6 6
Tanandava Benjamino	3,00	1,39	0,80	0,18	4,49	0,41	0,06	0,27	5,36	5,23	1,27
Benjamino	2,90	0,99	0,65	0,11	4,10	0,39	0,03	0,20	4,66	4,72	-0,6 7
Marovoay	1,40	1,08	1,80	0,35	2,13	1,15	0,00	1,48	4,63	4,77	-1,4 2
Manamby	0,71	0,53	0,37	0,16	1,21	0,30	0,02	0,19	1,78	1,72	1,76
Dabara	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Bekignana Ankilivalo	2,43	1,35	1,60	0,46	3,74	1,58	0,00	0,63	5,83	5,94	-0,9 0
Tsaramandroso Ankilivalo	0,92	0,35	0,28	0,61	1,97	0,04	0,00	0,17	2,15	2,18	-0,5 4
SUCOMA- Betsipotika	1,55	0,84	0,98	0,26	2,49	0,37	0,00	0,56	3,63	3,42	3,02
Tanambao Saraha	2,70	2,02	1,87	0,70	2,95	1,52	2,13	0,79	7,30	7,39	-0,6 6
Dabara en aval	0,91	0,33	0,24	0,09	1,41	0,05	0,00	0,09	1,57	1,54	0,71
Croisement BST	2,05	1,16	1,26	0,29	2,79	1,07	0,00	1,04	4,75	4,90	-1,4 9
Betsda	19,10	0,88	41,22	2,71	6,39	38,03	0,56	17,71	63,90	62,69	0,95
Betsda	1,22	0,44	0,66	0,49	1,57	0,62	0,00	0,48	2,81	2,67	2,50
Betsda	0,94	0,35	0,24	0,13	1,21	0,08	0,06	0,16	1,66	1,51	4,70
Andranomena	0,14	0,11	6,43	0,27	1,80	4,51	0,00	0,71	6,96	7,02	-0,4 4
Ampataka2	3,98	3,47	7,39	1,10	3,05	12,39	0,00	0,94	15,94	16,38	-1,3 8
Ampataka1	11,00	10,25	3,65	3,13	5,57	23,24	0,00	1,67	28,03	30,48	-4,1 9
Marofandilia	11,50	6,39	9,35	0,53	4,10	17,18	2,74	2,71	27,77	26,73	1,90
Tsimafana	3,05	1,44	3,00	1,95	1,80	2,96	3,39	1,23	9,44	9,38	0,32
Ankilizato Avaradrova	2,05	1,52	1,04	0,46	1,08	1,35	2,02	0,60	5,07	5,05	0,19
Ampandra	1,45	0,90	1,13	0,23	1,97	0,87	0,00	0,75	3,71	3,59	1,61
Carroo	1,05	0,53	1,87	0,24	1,18	1,01	1,21	0,13	3,69	3,53	2,24
Antsakoameloka	0,93	1,02	2,87	0,38	2,20	1,69	0,06	1,00	5,20	4,94	2,48
Tsimahavaobe	0,90	0,98	2,74	0,40	2,20	1,35	0,05	1,04	5,02	4,64	3,93
Ambatolahy	0,25	0,40	0,61	0,53	0,30	0,70	0,81	0,00	1,78	1,81	-0,6 7

Annexe IV
Résultats des analyses isotopiques

SITE	18O	2H	3H
Ankotrofotsy	-3,38	-24,6	1,93
Morafeno	-4,57	-34,3	1,58
Ambalarano	-4,3	-31,3	1,36
Tanandava Andrefana	-4,03	-30,5	1,02
Tanandava Benjamino	-4,11	-30,1	1,64
Benjamino	-3,74	-28,7	1,32
Marovoay	-5,11	-36,1	0,28
Manamby	-6,16	-40,8	0,32
Dabara	-5,33	-37,6	1,21
Bekignana Ankilivalo	-3,92	-28,5	1,43
Tsaramandroso Ankilivalo	-5,09	-35,1	1,41
SUCOMA- Betsipotika	-4,43	-32,1	1,13
Tanambao Saraha	-4,99	-35,7	1,13
Dabara en aval	-5,19	-36,5	1,5
Croisement BST	-4,35	-30,2	1,02
Betesda	-5,72	-38,4	0,98
Betesda	-4,97	-33	1,32
Betesda	-5,14	-33,7	1,32
Andranomena	-5,76	-37,3	0,03
Ampataka2	-4,41	-31,6	0,24
Ampataka1	-5,93	-40,2	0,25
Marofandilia	-6,2	-41,6	1,33
Tsimafana	-5,36	-35,2	1,21
Ankilizato Avaradrova	-5,45	-36,3	1,48
Ampandra	-4,67	-32,6	0,63
Carroo	-4,22	-31	1,73
Antsakoameloka	-5,69	-38,5	0,23
Tsimahavaobe	-5,59	-37,3	0,06
Ambatolahy	-2,85	-20,8	1,78

Annexe V

Techniques d'analyse de l'eau

Les techniques citées ci-dessous ont été tirées du rapport de Luc Guyot [23], elles sont parmi ceux que le laboratoire de l'AIEA a utilisé pour analyser leurs échantillons prélevés en 2000 et 2001.

- Les isotopes stables ont été analysés par spectrométrie de masse.
- L'activité du tritium a été mesurée au compteur à scintillation liquide (LSC)
- Les anions majeurs ont été analysés par chromatographie ionique.
- Les cations ainsi que le strontium ont été analysés par spectrophotométrie.

Annexe VI

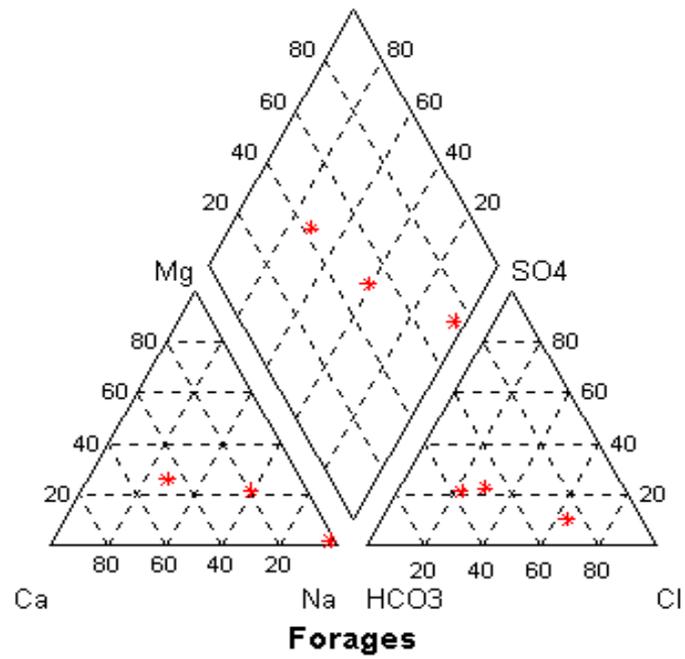
Norme de la qualité d'eau

Rubrique	Symbole chimique	Unité	Norme JIRAMA	Norme de l'OMS (référence)
Aspect			Transparence	
Turbidité		NTU	<5	<5
Couleur			Aucune	<15 (TCU)
Odeur			Aucune	Pas de valeur cible
Ec à 20°C		µS/cm	<2000	Pas de valeur cible
PH			6.5-9.5	Pas de valeur cible
Composants Organiques etc.		mg/l	<2	Pas de valeur cible
Dureté totale	Ca, Mg	°F	<50(=500mg/l)	Pas de valeur cible
Fer total	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	Mg/l	<0.3	<0.3
Ions de chlore	Cl ⁻	Mg/l	<250	<250
Ions d'acide Sulfurique	SO ₄	Mg/l	<250	<250
Azote ammoniacal	NH ₄ ⁺	Mg /l	<0.05	Pas de valeur cible
Azote nitreux	NO ₂ ⁻	Mg/l	<0.1	0.2
Azote nitrique	NO ₃ ⁻	Mg/l	<50	<50
colibacilles		MNP	-	0/100ml

Source : [20]

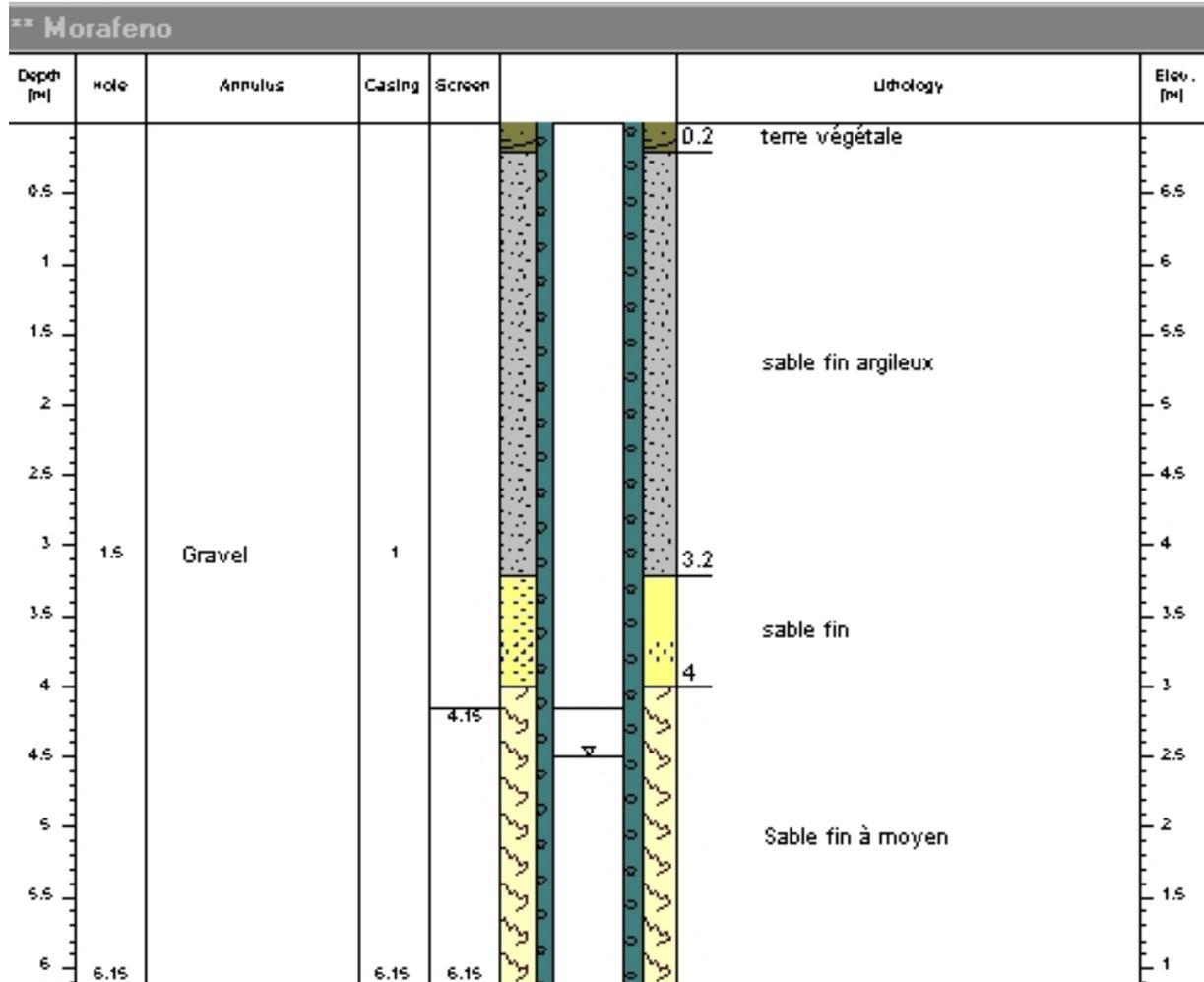
Annexe VII

Diagramme de Piper des eaux de forages

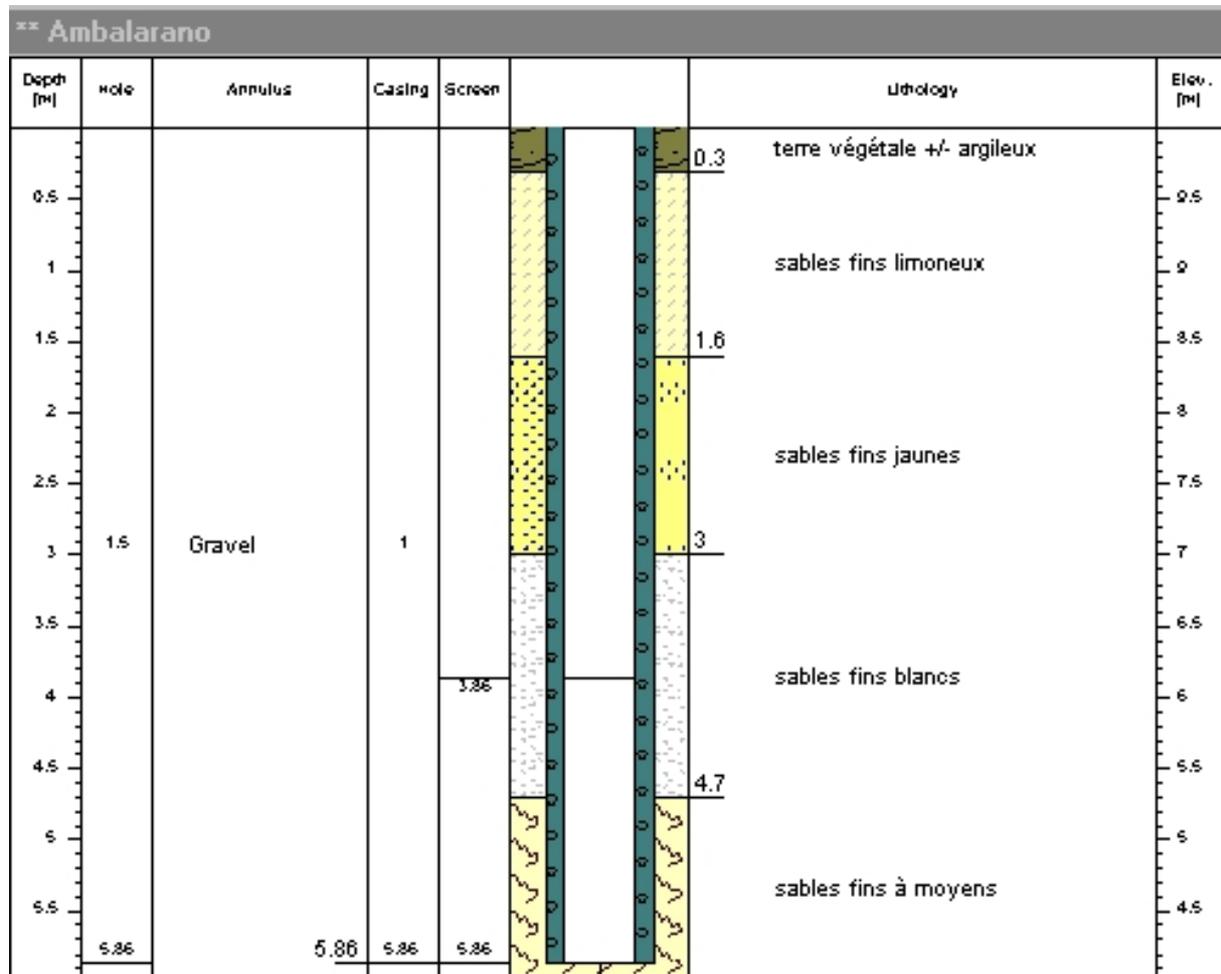


Annexe VIII Coupes lithologiques des Puits et Forages

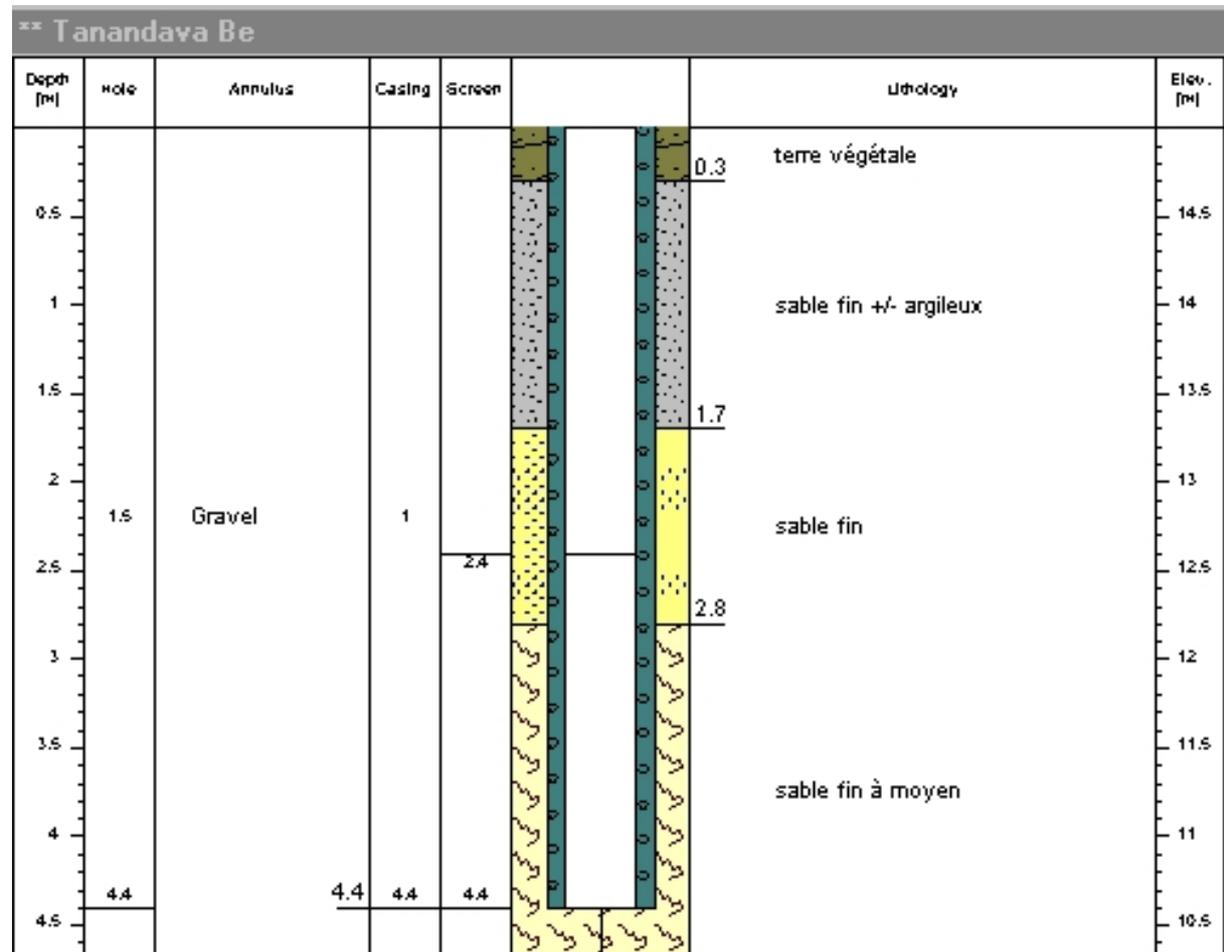
W1



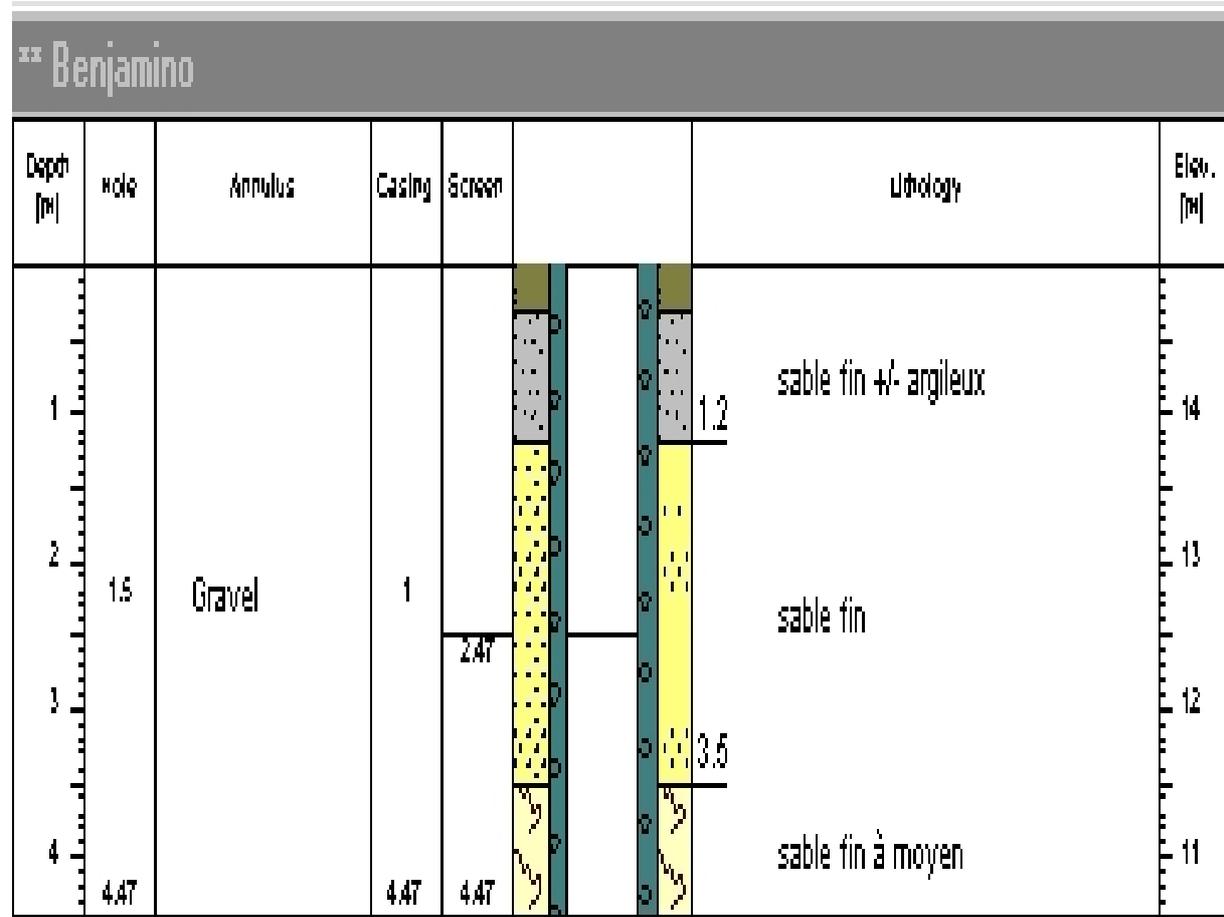
W2



W4



W5



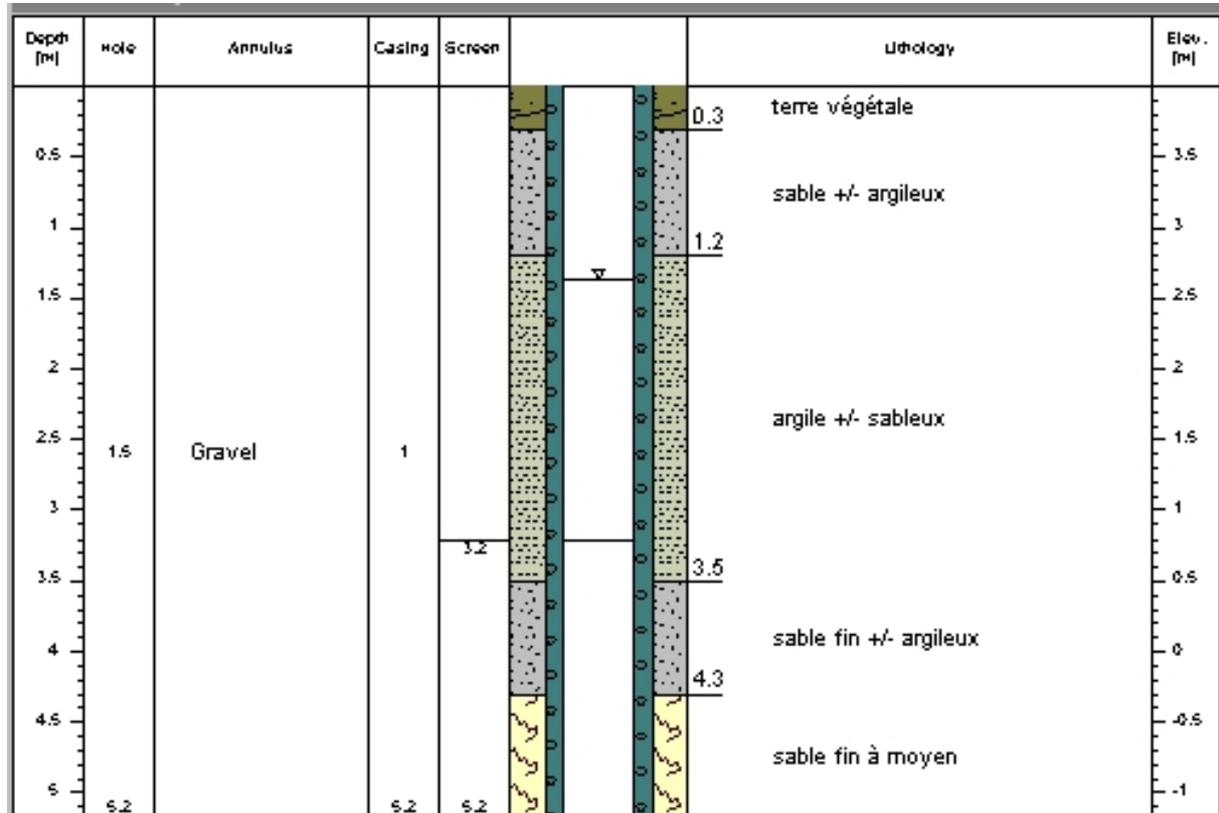
W6

** BETESDA Hole

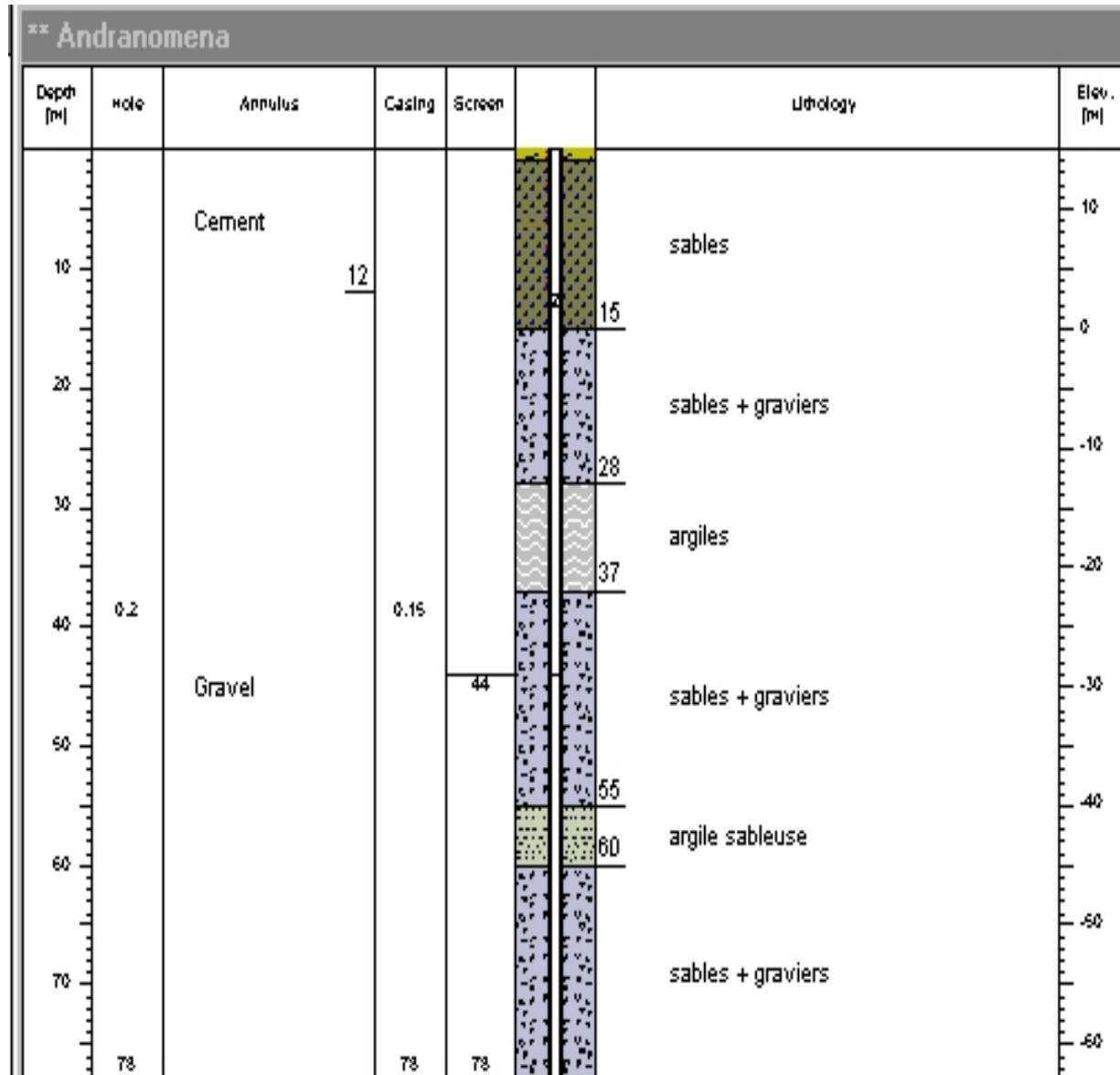
Depth [m]	hole	Annulus	Casing	Screen		Lithology	Elev. [m]
0.5	1.5	Non équipé	Ø			terre végétale	1.5
1						sable latéritique	3
1.5							2.5
2			2	2			

W7

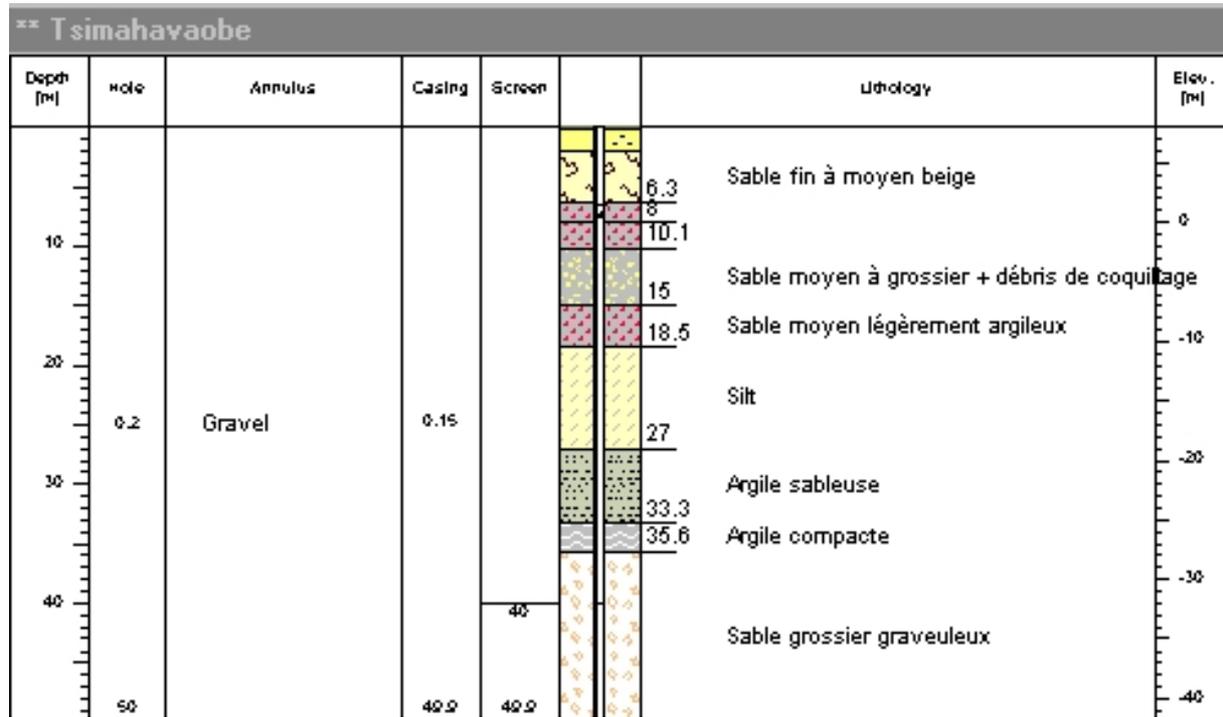
Betesda well



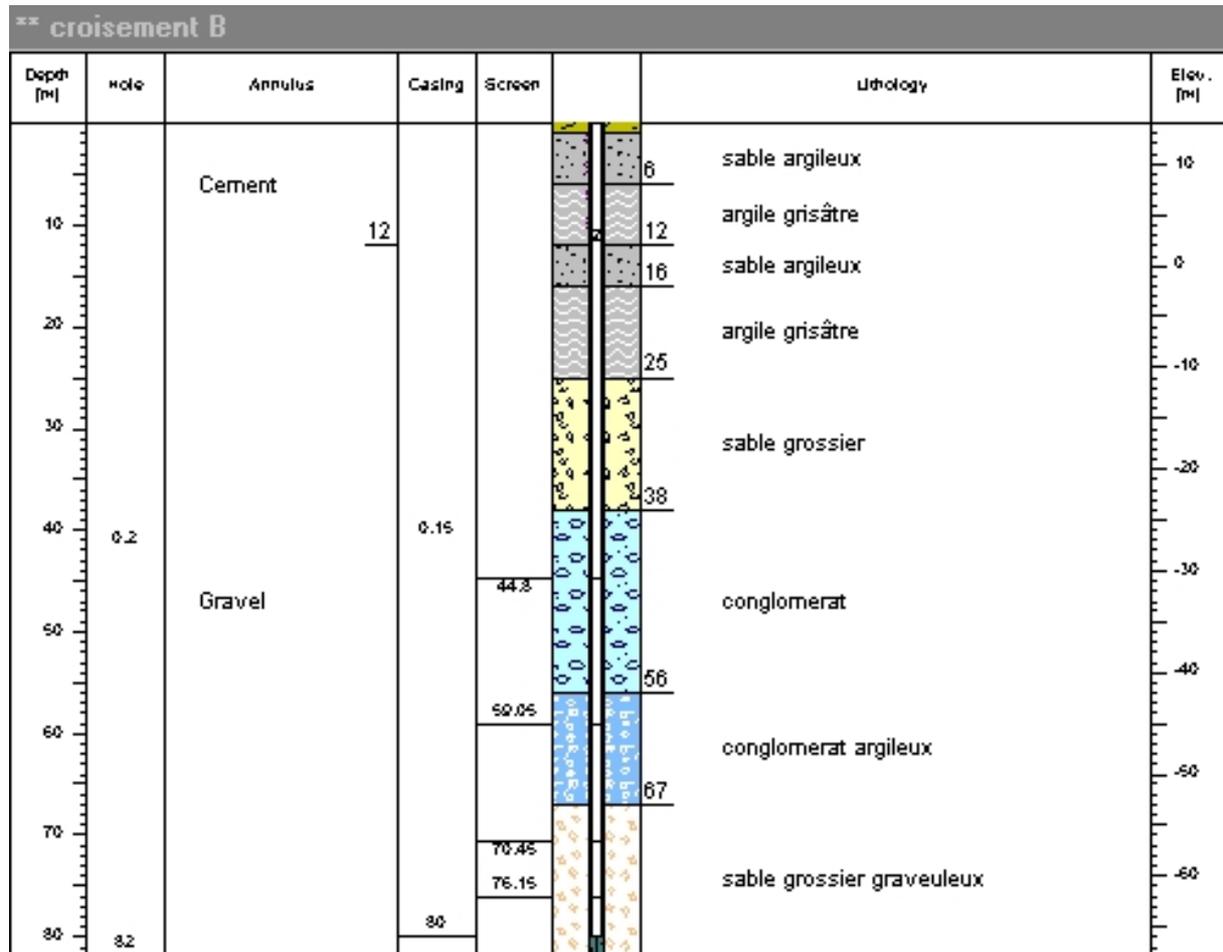
B2



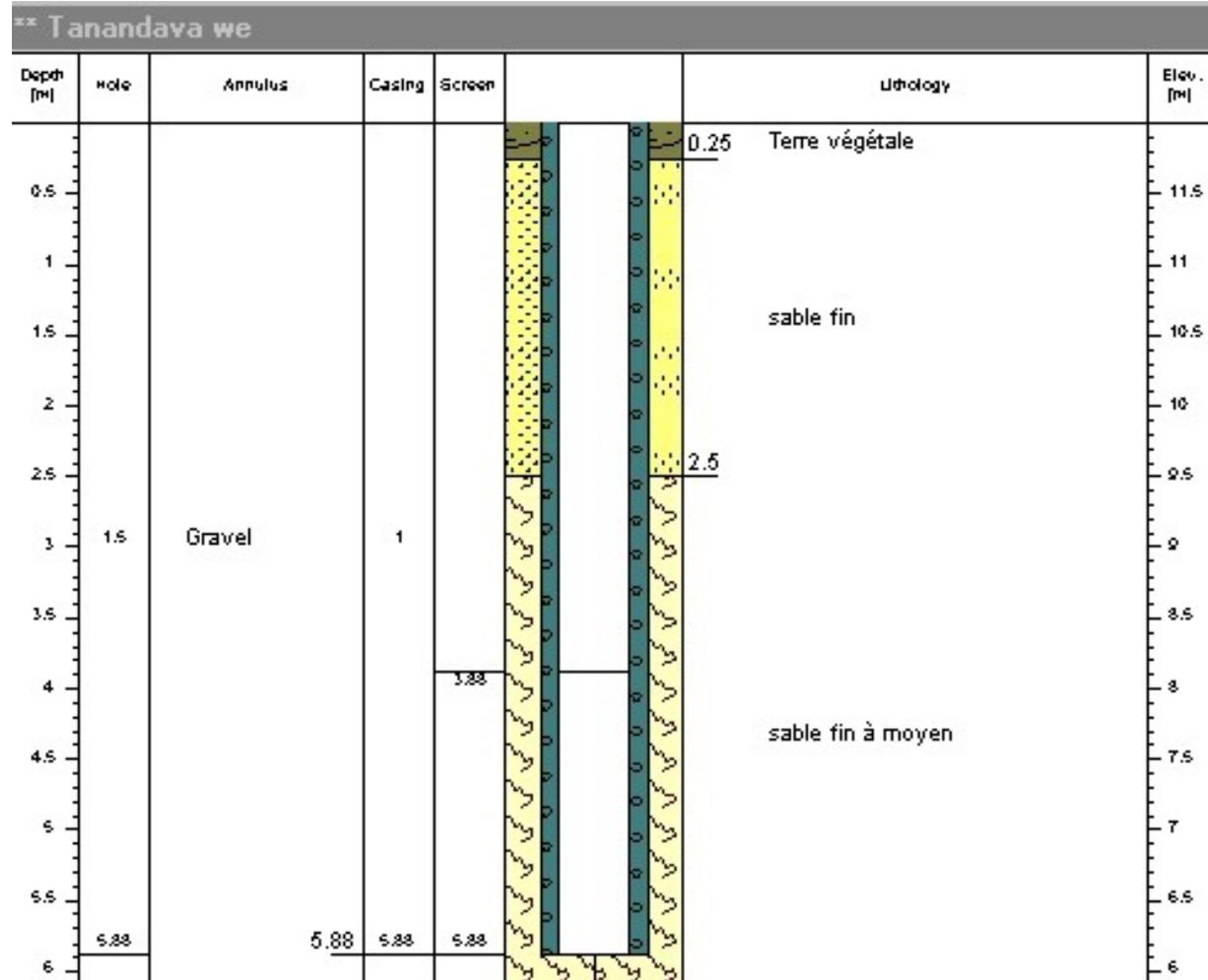
B3



B1



W3



Annexe IX

Quelques photos des points d'eaux échantillonnés



Barrage de Dabara

Il représente la limite de la plaine littorale.



Puits de betesda (W7)

Il est parmi les 30 Puits construits par l'Unicef.

Il n'est pas équipé car on l'a abandonné une fois qu'on a constaté que sa salinité est très élevée.

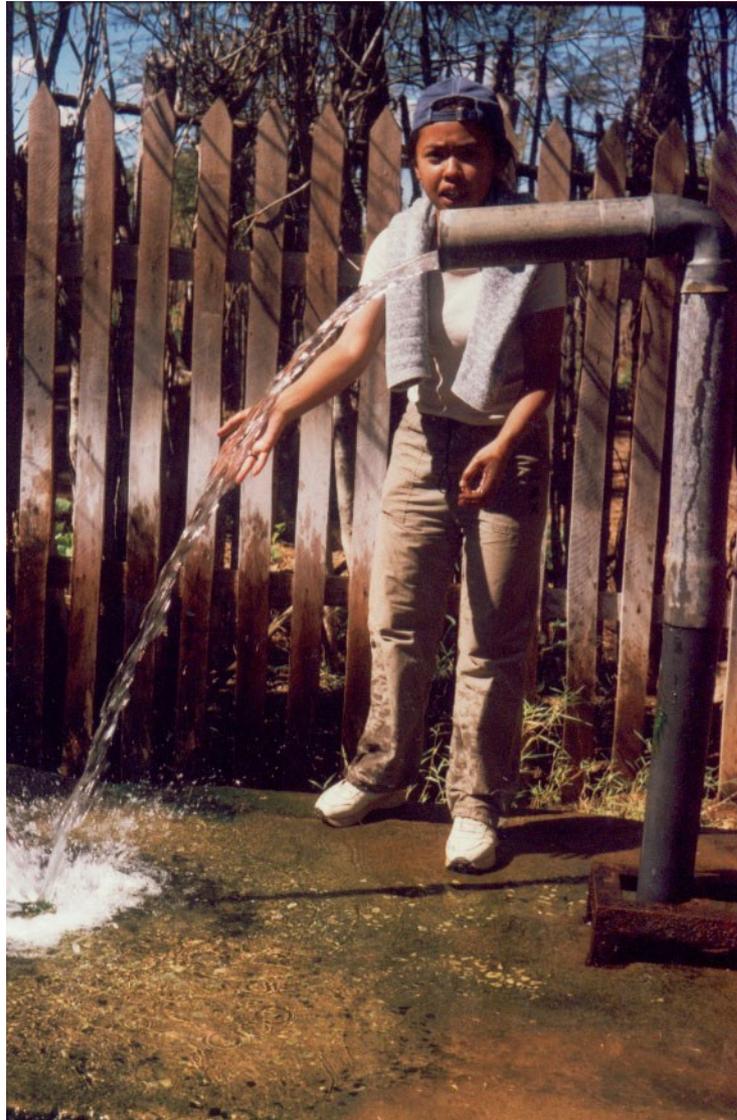


B1 : forage du Croisement Belo sur Tsiribihina

Forage à pédale construit par le JICA en 2003



Puits (W5) construit en 2000 par l'UNICEF dans le cadre du projet de construction de 30 puits dans la région de Morondava
Il est équipé d'une pompe à main INDIA III.



Point d'eau situé dans le village d'Andranomena (B2)
C'est un forage artésien.
Il est le plus sollicité par la population environnante.



Ampataka 1 (W9), puits construit par un politicien et abandonné du fait de sa salinité élevée.

Photos de l'équipe en train de se préparer aux mesures in situ et au prélèvement d'eau.



Mare située près du village d'Ampataka

C'est une des sources d'eau de la population bien qu'il y ait dans le village deux puits (W8 et W9)



Puits traditionnel de Marofandilia W10 (à gauche)

C'est un puits non busé et non équipé d'une pompe.

Il est couvert par une planche

Puits semi moderne de Tsimafana W11 (à droite)

Il est semi-ouvert et se situe près du marché.

