

# SOMMAIRE

DEDICACE .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
PREFACE .....	iv
TABLE DES MATIERES .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES ANNEXES .....	xii
INTRODUCTION .....	1

## PREMIERE PARTIE

<b><u>CHAPITRE I : DESCRIPTION GENERALE.....</u></b>	<b>3</b>
<b>DE LA ZONE D'ETUDE</b>	
I-1- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE [8], [15], [16], [40].....	3
I-1-1- Situation géographique .....	3
I-1-1-1- Localisation .....	3
I-1-1-2- Délimitation de la zone d'étude.....	3
I-1-2- Géomorphologie .....	6
I-1-3- Hydrographie (Réseau hydro-agricole Dabara).....	6
I-2- CONTEXTE CLIMATIQUE .....	7
I-2-1- Climat de la région.....	7
I-2-2- Précipitation.....	8
I-2-3- Température.....	9
I-2-4- Evaporation.....	9
I-2-5- Humidité atmosphérique.....	10
<b><u>I-3- CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE [11], [36] .....</u></b>	<b>11</b>
I-3-1 - Population et desserte en eau.....	11
I-3-2 - Caractéristiques économiques.....	11
<b><u>I-4- CONTEXTE GEOLOGIQUE [20], [21], [28], [33].....</u></b>	<b>12</b>

I-4-1- Géologie et structure géologique du sud-ouest de Madagascar .....	12
I-4-1-1- Généralité sur la géologie de Madagascar .....	12
I-4-1-2- Stratigraphie et Lithologie .....	12
I-4-1-3- Structure géologique .....	15
<b>I-5- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE [2], [5], [6], [7], [14]....</b>	<b>18</b>
I-5-1- Bilan hydrique.....	18
I-5-2-Notion de porosité (n).....	20
I-5-3-Propriété hydrodynamiques des aquifères .....	20
I-5-3-1- Structure et typologie des aquifères .....	20
I-5-3-2- Conductivité hydraulique ou Perméabilité (K) .....	23
I-5-3-3- Transmissivité (T) .....	23
I-5-3-4- Coefficient d'emmagasinement (S) .....	23
I-5-4-Les nappes du Bassin versants de la rivière Morondava.....	24
<b><u>CHAPITRE II : CHIMIE DE L'EAU</u> .....</b>	<b>27</b>
<b><u>II-1- RAPPELS DES DIFFERENTS PARAMETRES</u> .....</b>	<b>27</b>
<b><u>PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU [12], [25], [38], [42]</u></b>	
II-1-1 - Turbidité .....	27
II-1-2 - La Température.....	27
II-1-3 - Le pH .....	28
II-1-4 - Conductivité électrique.....	28

II-1-5 - Alcalinité.....	29
II-1-6 - Dureté.....	30
II-1-7 - Salinité.....	30
II-1-8 - TDS (Total Dissolved Solid).....	30
II-1-9 - Oxygène dissout.....	30
II-1-10- Le Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ).....	31
<b>II-2- POLLUTION DE L'EAU [4], [23], [26], [37].....</b>	<b>31</b>
II-2-1- Définitions.....	31
II-2-1-1- Eau potable .....	31
II-2-1-2- Pollution .....	32
II-2-2- Les principaux rejets polluants (type de polluants).....	32
II-2-2-1- Eau usée domestique .....	33
II-2-2-2- Eau usée industrielle .....	33
II-2-2-3- Eau usée urbaine .....	33
II-2-2-4- Les rejets polluants agricoles .....	33
II-2-2-5- La pollution liée au dépôt des déchets solides .....	33
II-2-2-6- La pollution naturelle .....	33
II-2-2-7- La pollution radioactive .....	34
II-2-3- Vulnérabilité des nappes.....	34
II-2-3-1- Système vulnérable .....	34
II-2-3-2- Fonction de vulnérabilité .....	34
 <b>CHAPITRE III : NOTION D'HYDROLOGIE.....</b>	 <b>36</b>
 <b>ISOTOPIQUE [3], [18], [19], [24],[29]</b>	
<b>III-1- DEFINITIONS .....</b>	<b>36</b>
III-1-1- Isotope.....	36
III-1-2- Isotopes stables.....	36
III-1-3- Isotopes radioactifs.....	36
III-1-3-1- Loi de désintégration radioactive .....	37
III-1-3-2- Période –Activité .....	37
III-1-4- Rapport isotopique.....	37
III-1-5- Méthode de mesure.....	38
III-1-5-1- Mesure des teneurs en : $^2\text{H}$ , $^{18}\text{O}$ , $^{15}\text{N}$ , $^{87}\text{Sr}$ .....	38
III-1-5-2- Isotopes radioactifs : $^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ .....	39
<b>III-2- UTILISATION DES TECHNIQUES ISOTOPIQUES.....</b>	<b>40</b>
 <b>EN HYDROGEOLOGIE</b>	
III-2-1- Technique de traçage.....	41
III-2-2- Utilisation des isotopes stables en hydrogéologie.....	41
III-2-2-1- Fractionnement isotopique .....	41
III-2-2-2- Principes et modalités de traçage .....	42
III-2-3- Utilisation des isotopes radioactifs en hydrogéologie.....	44
III-2-3-1- Tritium .....	44
III-2-3-2- Carbone-14 ( $^{14}\text{C}$ ).....	46

<b>DEUXIEME PARTIE</b>	
<b><u>CHAPITRE IV : METHODES ECHANTILLON- ....</u></b>	<b>47</b>
<b>NAGE ET D'ANALYSE</b>	
<b>IV-1- <u>MESURES IN SITU</u> .....</b>	<b>47</b>
IV-1-1- Les appareils de mesures.....	47
IV-1-2- Mesures in-situ des points d'eau visités.....	48
IV-1-3- Mesures in-situ des échantillons d'eau prélevés.....	48
<b>IV-2- <u>PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS À</u> .....</b>	<b>50</b>
<b><u>ANALYSER AU LABORATOIRE</u></b>	
<b>IV-3- <u>ANALYSE AU LABORATOIRE</u> .....</b>	<b>51</b>
<b><u>CHAPITRE V : RESULTATS</u> .....</b>	<b>52</b>
<b><u>CHAPITRE VI : INTERPRETATIONS</u> .....</b>	<b>61</b>
<b>ET DISCUSSIONS</b>	
<b>VI-1- <u>RESULTATS DES INVESTIGATIONS GEOLOGIQUES ...</u></b>	<b>61</b>
<b><u>ET HYDROGEOLOGIQUES</u></b>	
<b>VI-2- <u>MESURES IN-SITU</u> .....</b>	<b>63</b>
<b>VI-3- <u>LES FACIES CHIMIQUES DES EAUX</u> .....</b>	<b>63</b>
<b>VI-4- <u>LA POLLUTION DES NAPPES PAR LES NITRATES.....</u></b>	<b>66</b>
<b>VI-5- <u>LES CONDITIONS DE RECHARGES</u> .....</b>	<b>72</b>
<b>VI-6- <u>VULNERABILITES DES NAPPES</u> .....</b>	<b>73</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>76</b>

➤ <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>78</b>
➤ <b>ANNEXE I .....</b>	<b>I</b>
➤ <b>ANNEXE II .....</b>	<b>VII</b>
➤ <b>ANNEXE III-1 .....</b>	<b>XIX</b>
➤ <b>ANNEXE III-2 .....</b>	<b>XX</b>
➤ <b>ANNEXE IV .....</b>	<b>XXII</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Précipitation moyenne mensuelle à Morondava .....	8
Tableau 2 : Température moyenne mensuelle à Morondava .....	9
Tableau 3 : Evaporation moyenne mensuelle à Morondava .....	10
Tableau 4 : Humidité relative (%) à Morondava .....	11
Tableau 5 : Résumé stratigraphique du bassin du Morondava.....	13
Tableau 6 : La différence entre la précipitation et l'évaporation moyenne .....	19
mensuelle	
Tableau 7 : Caractéristiques des aquifères et nappes selon leur typologie .....	21
Tableau 8 : Classification des eaux d'après leur Conductivité .....	29
Tableau 9 : Normalité de titrant utilisé .....	50
Tableau 10 : Observation générale des points d'eaux visités .....	54
Tableau 11 : Résultats des mesures in-situ des points d'eaux visités .....	55
Tableau 12 : Résultats des mesures in-situ des échantillons d'eaux prélevés .....	56
Tableau 13 : Résultats des analyses chimiques des échantillons d'eaux prélevés	57
(en ppm)	
Tableau 14 : Résultats des analyses chimiques des échantillons d'eaux prélevés	58
(en méq/l)	
Tableau 15 : Résultats des analyses isotopiques des échantillons d'eaux .....	59
prélevés	

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation .....	4
Figure 2 : Carte de délimitation de la zone d'étude .....	5
Figure 3 : Histogramme de la Précipitation .....	8
Figure 4 : Courbe de Température .....	9
Figure 5 : Histogramme de l'Evaporation .....	10
Figure 6 : Carte géologique de la zone d'étude .....	16
Figure 7 : Coupe géologique d'après H-TORRENT (1970) .....	17
Figure 8 : Histogramme de la Précipitation et l'Evaporation .....	19
Figure 9 : Echelle stratigraphique et leurs types d'aquifères (E. Nicollini).....	22
Figure 10 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude .....	26
Figure 11 : Diagramme $\delta D$ en fonction $\delta^{18}O$ .....	44
Figure 12 : Courbe de décroissance exponentielle en Tritium de Pretoria .....	45
Figure 13 : Diagramme de Piper, Faciès type .....	51
Figure 14 : Carte géologique d'échantillonnage .....	60
Figure 15 : Diagramme de Piper des eaux échantillonnées .....	64
Figure 16 : Diagramme de Schoeller des eaux de forages .....	64
Figure 17 : Diagramme de Schoeller des eaux de puits .....	65
Figure 18 : Histogramme de la teneur en Nitrates .....	66
Figure 19 : Corrélation entre la teneur en Nitrates( $NO_3^-$ ) et la teneur en ..... Chlorure( $Cl^-$ ) .....	67
Figure 20 : Corrélation entre la teneur en Nitrates( $NO_3^-$ ) et la teneur en ..... Sulfates( $SO_4^{2-}$ ) .....	68
Figure 21 : Corrélation entre la teneur en Nitrates( $NO_3^-$ ) et la teneur en ..... Bicarbonates( $HCO_3^-$ ) .....	68
Figure 22 : Corrélation entre la teneur en Nitrates( $NO_3^-$ ) et la teneur en ..... Potassium( $K^+$ ) .....	69
Figure 23 : Corrélation entre la minéralisation totale et la teneur en ..... Nitrates( $NO_3^-$ ) .....	70
Figure 24 : Diagramme $\delta^2H$ en fonction $\delta^{18}O$ .....	72
Figure 25 : Histogramme de Tritium .....	73
Figure 26 : Corrélation entre la teneur en nitrates( $NO_3^-$ ) et la teneur en..... tritium( $^3H$ ) .....	74
Figure A : Carte de foyers potentiels à la pollution .....	62
Figure B : Carte de foyers actifs de pollution par le nitrate .....	71
Figure C : Carte des valeurs du Tritium .....	75

## LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Coupes lithologiques des forages .....	I
Annexe II : Coupes lithologiques des puits .....	VII
Annexe III-1 : La norme de potabilité des eaux d'après l'OMS .....	XIX
Annexe III-2 : Norme de référence de la JIRAMA applicable à l'eau de Boisson..	XX
Annexe IV : Quelques photos de points d'eaux .....	XXII
Photo 1 : Puit de l'UNICEF à Tsaramandroso (W7) .....	XXII
Photo 2 : Forage de JICA à Ampandra (B5) .....	XXII
Photo 3 et 4 : Puit de l'UNICEF à Betesda (W9) .....	XXIII
Photo 5 : Forage de JICA à Marovoay (B1) .....	XXIV
Photo 6 : Forage artésien à Manamby (B2) .....	XXIV
Photo 7 : Forage de JICA au croisement BST (B4) .....	XXV
Photo 8 et 9 : Barrage à Dabara (R1) .....	XXVI



# INTRODUCTION

L'eau est la plus importante de toutes les ressources naturelles, non seulement, aux processus vitaux de tous les êtres vivants, mais aussi, à nos activités quotidiennes (hygiène, économie, etc). Actuellement, cet élément devient un sujet d'actualité dans le monde, et à Madagascar, elle préoccupe le Gouvernement qui a recours dans une très large mesure à un approvisionnement en eau potable de qualité, et à la mise en valeur des ressources en eau.

Plusieurs travaux de prospection d'eau ont été effectués dans la partie Sud-Ouest de l'île, parmi lesquels le projet JICA ou Projet d'exploitation des eaux souterraines dans la région Sud-Ouest de Madagascar. L'exploitation des eaux souterraines dans quelques villages a commencé à partir de l'année 1994. Le projet JICA comprend la réalisation de 140 forages pour 61 villages sélectionnés. Il venait de terminer la deuxième phase d'exploitation l'année dernière, avec la réalisation de 11 forages. La suite de ce projet sera reprise au début de cette année.

Cependant, la compréhension des conditions de recharge et d'écoulement des systèmes aquifères a besoin d'être mieux appréhendée. De plus, une augmentation incontrôlée de l'exploitation des ressources en eaux souterraines pourrait entraîner une diminution des réserves et une détérioration de la qualité des eaux. C'est dans ce cadre que l'étude de la vulnérabilité des nappes à la pollution a été menée.

A cet effet, l'utilisation des techniques isotopiques dans l'étude des eaux souterraines peut avancer des explications hydrogéologiques significatives sur ces différents problèmes. Les isotopes peuvent être utilisés pour étudier les nappes d'eau souterraines en vue de déterminer leur origine, leur mode de réalimentation, si elles risquent d'être contaminées par la pollution ou l'intrusion d'eaux salées, et si elles peuvent être exploitées de manière durable. Ainsi,

- Les isotopes stables tels que l'oxygène-18 et le deutérium, qui sont des traceurs intimes de l'eau, fournissent des renseignements importants sur les origines des eaux souterraines et les aires de recharge, ainsi que les possibilités de mélange entre les eaux de surface et les eaux souterraines d'une part, et entre les aquifères d'autre part. De plus, d'autres isotopes stables comme l'azote-15 et le strontium-87 pourront être utilisés pour détecter les origines des pollutions anthropogéniques et naturelles, y compris le problème de forte minéralisation de l'eau.
- Les isotopes radioactifs tels que le tritium et le carbone-14 permettent par contre de connaître l'âge de l'eau, son temps de résidence ainsi que sa vitesse d'écoulement.

La présente étude intitulée : « **Etude préliminaire de vulnérabilité à la contamination de la nappe du bassin versant de la rivière Morondava** » se divise en deux grandes parties :

- la première partie comprend la description générale de la zone d'étude, ainsi que quelques rappels théoriques sur la chimie de l'eau et les techniques isotopiques utilisées en hydrogéologie.
- la deuxième partie est la partie pratique de nos études et relate les différentes méthodes d'échantillonnage, les résultats et les interprétations.

Une synthèse générale et quelques perspectives (suggestions et recommandations) concluront ce travail

# PREMIERE PARTIE

# **CHAPITRE I : DESCRIPTION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE**

## **I-1- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE**

### **I-1-1- Situation géographique**

#### **I-1-1-1- Localisation**

Morondava, une zone Menabe, est un chef lieu de Fivondronana dans la province de Tuléar (cf. figure1) ;

Elle se trouve à 671km au Sud-Ouest d'Antananarivo.

Ses coordonnées géographiques sont en moyenne 20°17 de latitude Sud et de 44°19 de longitude Est à partir de Greenwich; d'altitude inférieure à 200m dans la partie côtière et culmine à 1000m d'altitude à l'est du littoral (colline d'Ankilizato).

#### **I-1-1-2- Délimitation de la zone d'étude**

La présente étude se situe dans la partie Sud-Ouest de Madagascar et concerne la zone comprise entre la rivière Andronomena au nord, la rivière Maharivo au sud, à l'ouest par le canal de Mozambique et à l'est par une zone de collines, de massifs montagneux de direction Nord-Est\_Sud-Ouest (le massif d'Ankilizato, 75 km à l'est de Morondava).

Le Bassin versant de la rivière Morondava couvre une superficie de 6400km<sup>2</sup> avec une longueur du cours de 200km environ. Toutefois, notre étude ne présente uniquement que la partie aval de ce bassin (cf. figure 2) ;

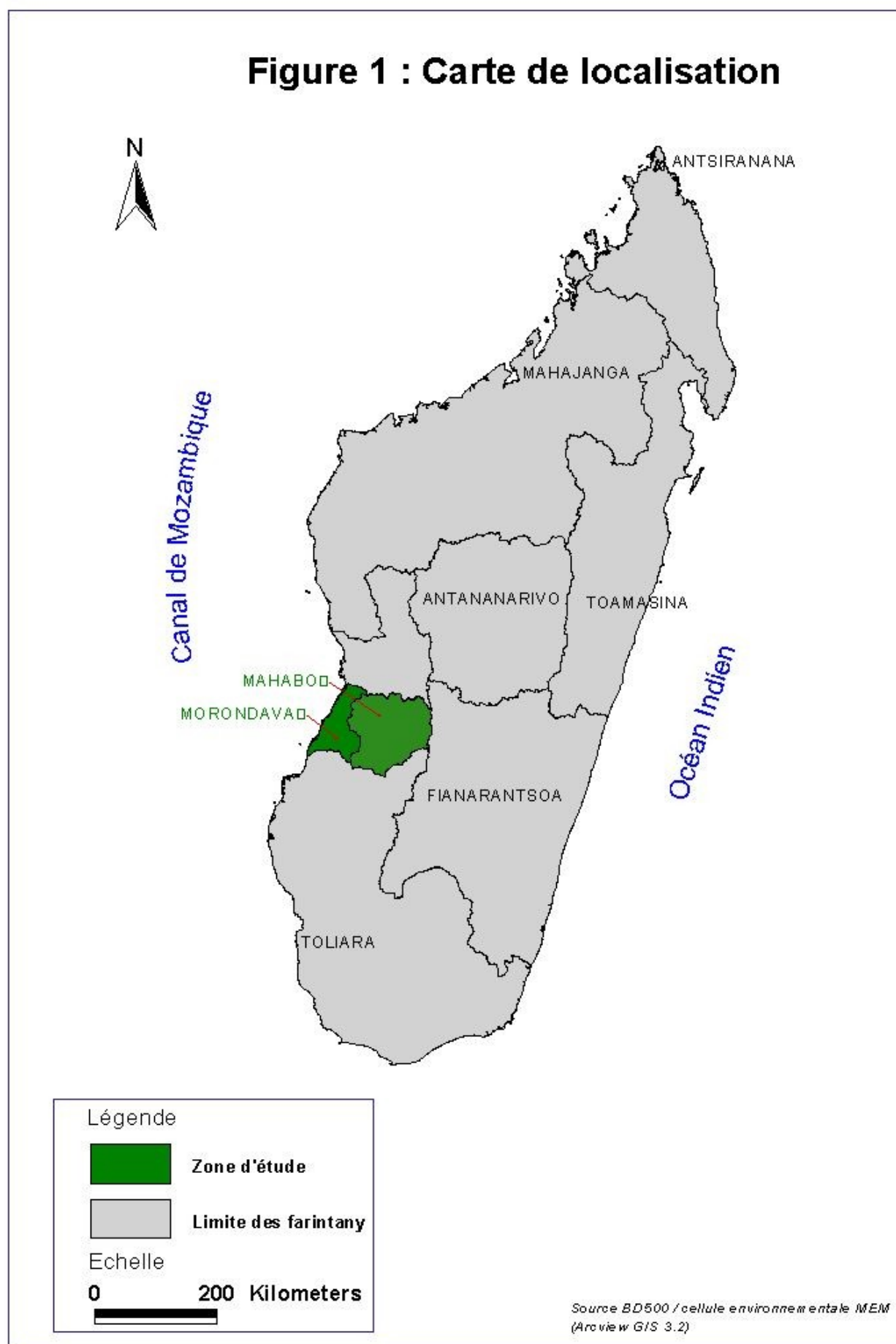
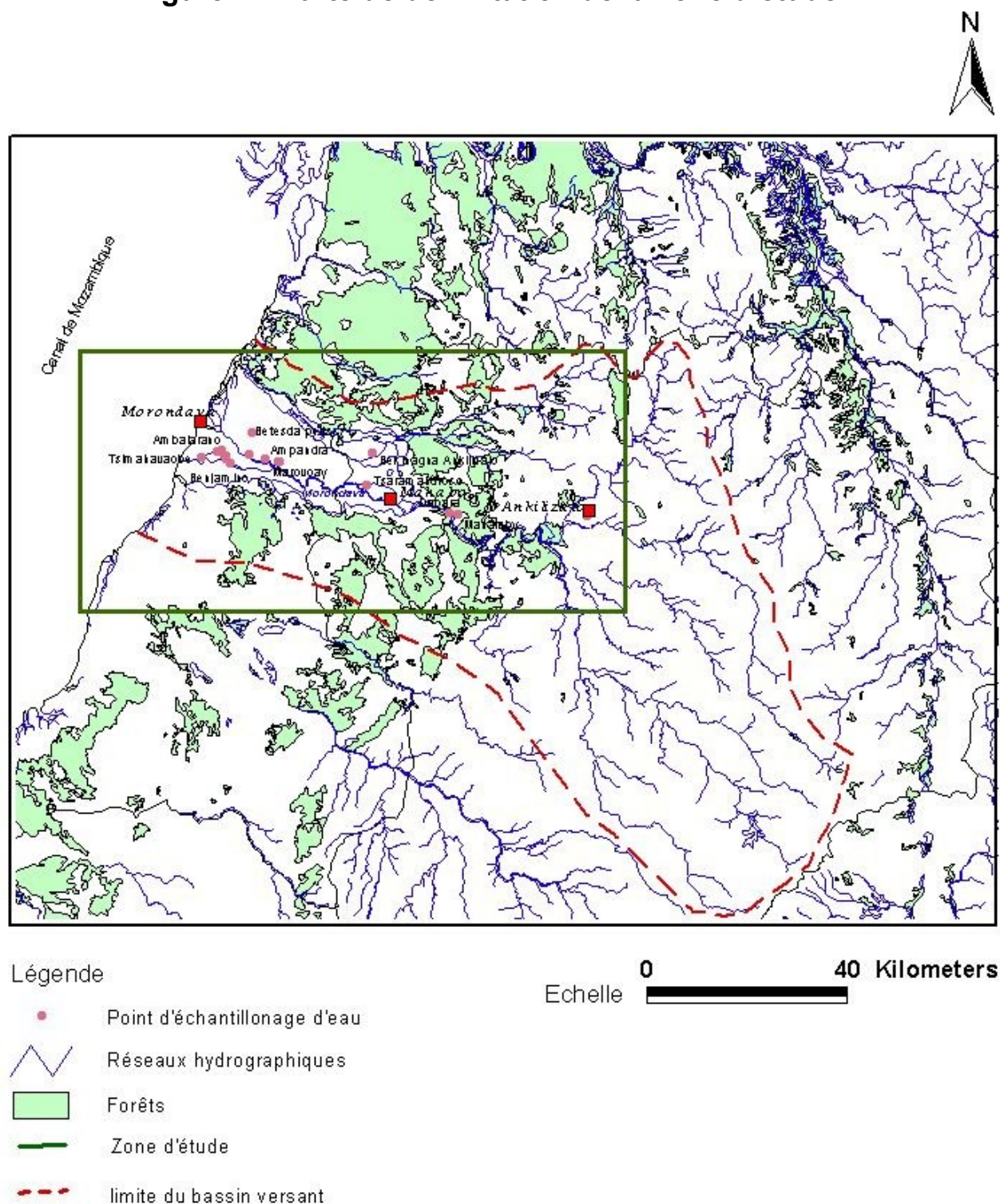
**Figure 1 : Carte de localisation**

Figure 2 : Carte de délimitation de la zone d'étude



Source : BD 500 / Cellule environnementale MEM  
(Arc view GIS 3.2)

### **I-1-2- Géomorphologie**

Dans l'ensemble et du point de vue géomorphologique, la partie aval du bassin versant de la rivière Morondava ne présente aucune unité particulière sauf son caractère de région côtière. Les affleurements sont très rares, voire inexistants, et quelques fois masquées par une couverture de dépôts récents (sables roux, argiles, sables argileux) provenant d'une sédimentation fluvio-lacustre et éolienne.

D'Est en Ouest, on peut distinguer :

- A l'Est, le couloir de Betsiriry où débute le massif d'Ankilizato, le plateau gréseux de Tsiandava, et une zone de rizières entourant le lac de Tsivalaka.
  - Au centre, une zone occupée par la forêt tropicale où de nombreux points bas (dépressions) sont particulièrement occupés par des mares d'eau plus ou moins permanentes appelées **ranovory** ;
  - A l'Ouest, la zone côtière qui comprend des rizières entre la rivière Morondava et la rivière Kabatomena. C'est une zone hétérogène mal drainée. En l'absence de récifs et d'affleurement rocheux, le littoral est formé de plages sableuses avec un cordon dunaire important et presque continue. Derrière cette dune qui peut atteindre jusqu'à 10m de hauteur, s'étend une zone de mangroves de 2 à 4km de largeur sauf dans les environs immédiats de la ville de Morondava, qui est entourée d'une lagune inondée à marée haute. Ainsi, la plaine de Morondava partant de Dabara jusqu'à l'océan a une pente moyenne de 1.4‰ (Salomon Jean Noël, 1987).
- La partie la plus élevée en amont de la rivière Morondava dans la plaine est à la cote +80 environ (Salomon Jean Noël, 1987) ;

### **I-1-3- Hydrographie (Réseau hydro-agricole Dabara)**

La majeure partie des cours d'eau du Bassin de Tuléar – Morondava appartient au régime de « Sud-Ouest » (M. Aldegheri, 1967). Ce régime correspond à une pluviosité comprise entre 500 et 800 mm. La saison sèche étant très prolongée dans la région, la période d'étiage n'existe pas (nulle) sur la presque totalité des petites rivières, excepté les rivières drainant le massif gréseux de l'Isalo. Les crues sont très brutales avec un débit spécifique très élevé de 1000 l/s/km<sup>2</sup>.

→ Deux rivières traversent la plaine de Morondava : la *Morondava* et l'*Andranomena*

- La *Morondava* prend sa source dans le massif du **Makay** (culminant à plus de 1000m) formé de grès et d'argilites de l'Isalo II. Mais la rivière quitte assez vite ce massif pour couler sur le grès de l'Isalo III, puis sur les marnes jurassiennes de l'Argovien et les grès du crétacé moyen. Dans la plaine d'Ankilizato, elle reçoit les



affluents *Maroalika* et *Sakamaly*, avant de franchir le plateau des grès rouges durs de Tsiandava dans lequel elle a creusé de profondes gorges.

Arrivée dans la plaine de Mahabo, elle émet un effluent, la *Kabatomena*, qui s'individualise jusqu'à la mer et forme la limite sud de la plaine deltaïque de la Morondava.

La *Morondava* a un lit d'une largeur de 300 à 500m constitué de sable fin mais très propre. La pente générale est forte, de l'ordre de 6 m/km (Chaperon Pierre, Danloux Joël, Ferry Luc, 1993) ;

Le bassin versant couvre une surface de 6 400 km<sup>2</sup>, la longueur du cours est de 200 km environ.

- L'*Andranomena* a son bassin versant limité au plateau de Tsiandava. L'altitude de ce bassin ne dépasse guère 500m et sa surface 500km<sup>2</sup>. A l'amont, le réseau hydrographique est bien individualisé avant de se dégrader dans la zone du lac Tsivalaka. Les eaux divaguent et se dispersent en de multiples petits canaux irriguant des rizières. En aval, la pente est plus forte et les eaux s'écoulent suivant deux lits : l'*Andranomena* et la *Tandila*. Un delta commun réunit ces deux rivières avant qu'elles se jettent dans le canal de Mozambique.

A environ 50 km à l'est de la ville de Morondava, un barrage de captage (**Dabara**) a été construit en 1972 sur la pente au point où la rivière Morondava pénètre dans la plaine. Les canaux agricoles aménagés arrosent environ 8 000 ha de terres de la partie centrale de la plaine et permettent la culture de riz et de soja grâce à ces abondantes ressources en eau. Les travaux de réhabilitation ont été effectués en 1995 avec l'aide de l'Union Européenne.

→ La *Maharivo* descend aussi du massif du MAKAY. Mais son bassin est plus petit que celui de Morondava, de l'ordre de 4 700 km<sup>2</sup>. En période d'étiage, son cours supérieur est à sec pendant une longue partie de l'année. De sa source à la Mer, la *Maharivo* mesure 165 km.

## **I-2- CONTEXTE CLIMATIQUE**

### **I-2-1- Climat de la région**

D'une manière générale, l'orientation sub-méridienne de Madagascar est responsable de l'opposition climatique entre les deux versants de l'île, la façade orientale étant la plus arrosée (Salomon, 1986)

Très schématiquement le climat de Sud-Ouest Malgache, tel que nous le considérons, est un climat chaud et semi-aride avec une courte saison de pluie en été et la sécheresse l'hiver. Le contraste saisonnier avec une saison sèche qui dure près de huit mois est son principal caractère.

Dans la région qui nous intéresse, le climat est de type tropical avec deux saisons bien tranchées : une saison chaude et humide de décembre en mars et une saison plus fraîche et sèche d'avril en novembre.

## **I-2-2- Précipitation**

Dans la zone d'étude, la saison de pluie dure 5 mois (novembre en mars) et la saison sèche 7 mois (avril en octobre). Les précipitations annuelles vont en augmentant géographiquement de la plaine littorale au sud-ouest (600-800m) vers les collines au nord-est (1400mm).

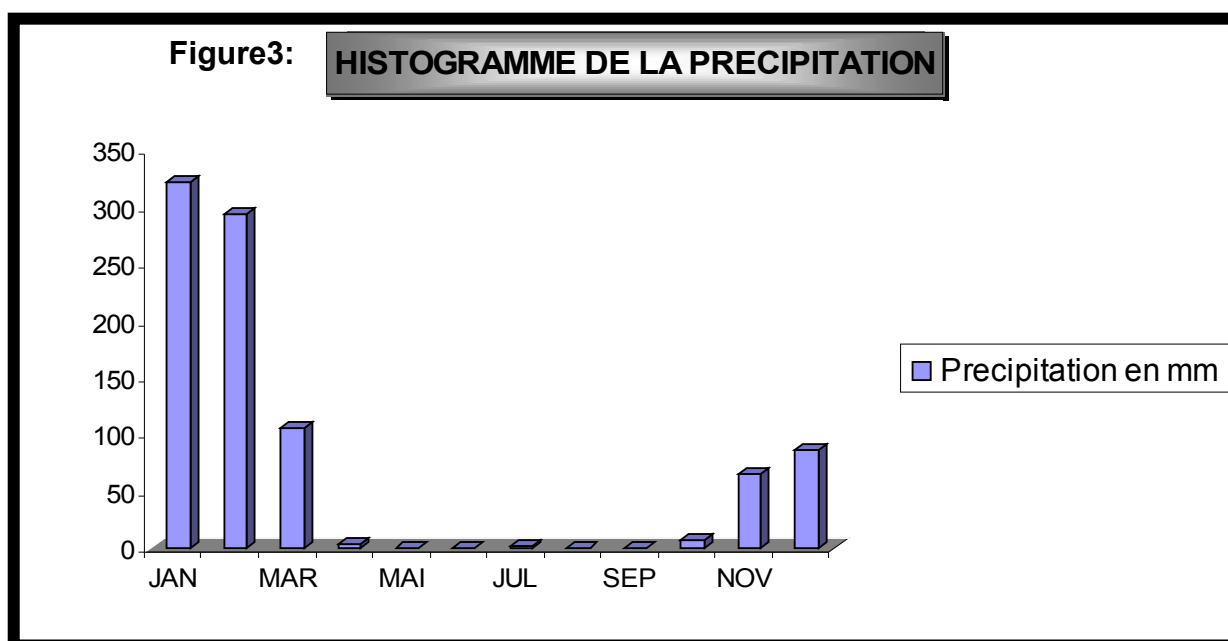
La pluviométrie moyenne annuelle à Morondava est de l'ordre de 800 mm. Les mois de janvier et février reçoivent plus de la moitié des précipitations annuelles, tandis que décembre et mars ont une précipitation autour de 100 mm, et les autres mois ont une précipitation insignifiante ou nulle. De plus, on voit que les précipitations peuvent varier du simple au double entre les années sèches et les années humides.

La précipitation est donc irrégulièrement répartie, elle est importante à l'est de la ville de Morondava (massif d'Ankilizato) en raison de la collision des cyclones (d'après la météo). On aura ainsi une précipitation de 800 mm près du canal de Mozambique et 1000 mm à l'approche des premiers reliefs qui bordent la plaine orientale. Le tableau suivant représente la précipitation moyenne mensuelle à Morondava

Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Précipitation en mm	322	294	105	2,7	0,15	0	0,7	0,3	0,05	7,18	64,9	86

**Tableau 1** : Précipitation moyenne mensuelle à Morondava  
Période : 2000 – 2003 (en mm)  
Source : Service Météorologique à Morondava

—



### I-2-3- Température

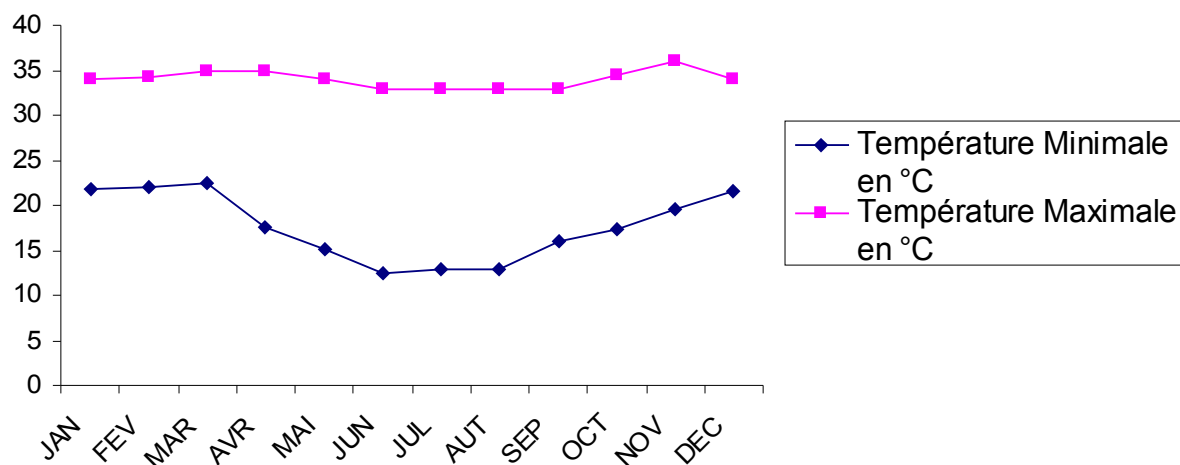
Les températures moyennes mensuelles maximales et minimales, observées à Morondava sont respectivement de 30°C sur le littoral ( 33°C zones de collines et des montagnes) et de 18°C. La température moyenne mensuelle des minimums la plus basse (froid) est de 12.6°C observée en juin-juillet alors que la moyenne mensuelle des maximums la plus haute (chaud)est de 35°C observée pendant la saison des pluies de novembre en avril.

Le tableau suivant montre la température moyenne mensuelle à Morondava

Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Température minimale en °C	21,8	22.1	22.4	17,6	15,1	12.4	12.8	13	16	17.4	19.5	21.5
Température maximale en °C	34.1	34,2	34.8	34.8	34	32.8	32.8	32.8	33	34.4	36	34

**Tableau 2 :** Température moyenne mensuelle à Morondava  
Période :2000 – 2003 (en degré Celcius)  
Source : Service Météorologique à Morondava

Figure 4 :

**COUBE DE TEMPERATURE****I-2-4- Evaporation**

Le tableau suivant nous montre la moyenne d'évaporation mensuelle à Morondava

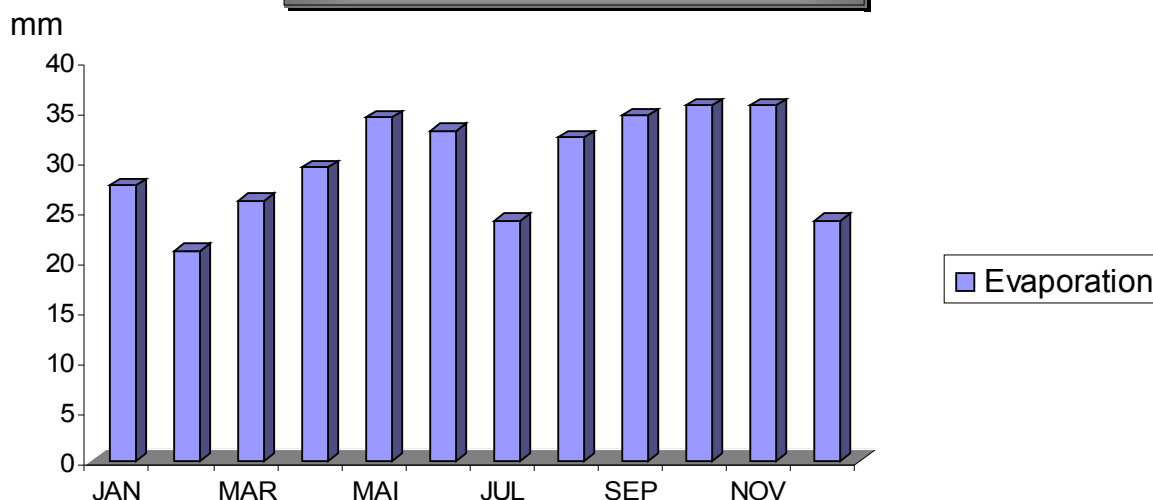
Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Evaporation en mm	27,5	21	26	29,3	34,3	33	24	32,3	34,5	35,5	35,5	24	356.9

**Tableau 3 :** Evaporation moyenne mensuelle à Morondava

Période : 2000 – 2003 (en mm)

Source : Service Météorologique à Morondava



**Figure 5 : HISTOGRAMME DE L'EVAPORATION**

Le maximum d'évaporation se situe aux mois d'Octobre et Novembre, c'est-à-dire durant la période printanière avec une valeur de 35.5 mm, et que le minimum en été (mois de Février) avec une valeur de 21 mm.

### **I-2-5- Humidité atmosphérique**

L'humidité atmosphérique est exprimée par l'humidité relative en pourcentage.

Le tableau (4) montre l'humidité relative moyenne mensuelle de l'air en pourcentage à Morondava.

L'analyse du tableau nous permet de constater que c'est en saison chaude et pluvieuse que l'humidité relative est plus forte (janvier-fevrier-mars) avec une valeur moyenne de 81%. Elle est, par contre, relativement faible pendant la saison fraîche et sèche (juin-juillet-août) où la valeur est de 74%.

Toutefois, nous avons remarqué que l'humidité relative a tendance à rester plus forte (autour de 79%) quelque soit la saison c'est-à-dire il y a une légère variation d'humidité relative durant toute l'année. C'est la situation littorale de cette région qui en est la cause.

**Latitude : 20° 17'S**

**Longitude : 41° 19'E**

**Altitude : 7m**

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aût	Sept	Oct	Nov	Déc
Humidité relative (%)	80	82	81	79	77	74	74	74	76	76	75	78

**Tableau 4 :** Humidité relative(%) à Morondava

Période : 1961 – 1990

Source : Service Météorologique à Morondava

## **I-3- CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE**

### **I-3-1- Population et desserte en eau**

Etant classée dans la zone de Menabe, où se concentrent environ 338 000 habitants, le secteur concerné (Fivondronana de Morondava et Mahabo) abritent environ 132 749 d'habitants (année 2001, INSTAT).

Dans cette région de Morondava, la densité du bétail dépasse largement la densité humaine, surtout en milieu rural. La densité de la population dans ce bassin est environ 6.23 habitants au km<sup>2</sup> (Ministère de l'Energie et des Mines, 1998).

De plus, du fait de problème de « **dahalo** » dans la région, les bétails se trouvaient dans le même quartier que la population. Cette situation entraîne la pollution de l'eau (surface ou souterraine) par les lisières.

En ce qui concerne la consommation en eau potable proprement dite, les études menées par le JICA (Agence Japonaise de Coopération Internationale) en 2001 et confirmées par les enquêtes qu'ils ont effectuées eux-mêmes, nous montrent que l'approvisionnement en eau potable dans ce milieu est très faible (2.6%).

En effet, l'approvisionnement en eau aussi bien pour l'alimentation que pour les besoins quotidiens s'effectue principalement au niveau des eaux de rivières et des eaux des puits (protégées ou non) dont la qualité est douteuse (salé et/ou à forte teneur en nitrate). Certains puits sont constitués seulement de simple trou, comme ceux de Betesda (W10). Mais l'utilisation de l'eau du canal de Dabara est généralisée même dans les établissements publics comme l'école.

Par contre, la population urbaine (ville de Morondava et Mahabo), ne rencontre pas ce genre de problème étant donnée qu'elle est approvisionnée par la JIRAMA (Jiro sy Rano Malagasy), et par quelques forages de l'Agence Japonaise (comme le cas de Marovoay B1, d'Ampandra B5, et de Croisement Belo sur Tsiribihina B4). Il est à noter que l'eau de la JIRAMA est aussi issue des forages.

### **I-3-2- Caractéristiques économiques**

La région de Menabe couvre 5 Préfectures : Morondava, Mahabo, Manja, Belo sur Tsiribihina et Miandrivazo.

L'élevage des bovins et l'agriculture tels le riz et le pois du cap sont les principales sources d'économie des habitants. La pêche prospère dans certains villages de la côte. Avec ses plages tropicales (Kimony) et ses magnifiques paysages (Allée du Baobab), les côtes de Morondava attirent de nombreux touristes.

Mais malheureusement, pendant les périodes cycloniques, la forte précipitation et la montée des eaux entraînent la coupure des routes. Par conséquent, les habitants n'arrivent plus à faire sortir leurs récoltes.

## **I-4- CONTEXTE GEOLOGIQUE**

### **I-4-1- Géologie et structure géologique du sud-ouest de Madagascar** (cf. figure 6 et figure 7)

#### **I-4-1-1- Généralités sur la géologie de Madagascar:**

La séparation de Madagascar avec l'Afrique (Carbonifère supérieur) est marquée par l'existence des failles et la création de bassins sédimentaires essentiellement continentaux jusqu'au Jurassique moyen dont les sédiments sont appelés KARROO. Ces sédiments se trouvent répartis dans trois(3) bassins sédimentaires à Madagascar : le Bassin de Morondava(sud) limité au Nord par le Cap St André, le Bassin de Majunga(Nord-Ouest) limité au Nord par le presqu'île d'Ampasindava et enfin le Bassin de Diégo(Nord).

A partir du jurassique moyen, les sédiments qui se déposent dans les bassins sédimentaires malgaches sont essentiellement marins avec quelques intercalations continentales, c'est le post karoo.

Le Bassin versant de la rivière Morondava occupe la presque totalité du bassin sédimentaire de Morondava, la partie Est du bassin sédimentaire, c'est-à-dire la dépression de Sakeny, étant drainée par des affluents de la Tsiribihina et du Mangoky.

#### **I-4-1-2- Stratigraphie et Lithologie**

Les formations sédimentaires par suite de l'instabilité du socle cristallin, affectées au cours des âges par des mouvements épirogéniques, présentent des alternances de formations marines et continentales, la série s'étend du carbonifère à l'actuel et à l'allure d'un vaste monoclinale s'ennoyant progressivement vers le canal de Mozambique (Guyot Luc, 2002).

Ainsi, les bassins sédimentaires de Morondava appartiennent à la formation récente et ils se divisent en 2 groupes principaux :

- A l'Est : Le Karoo, séries de la Sakoa, de la Sakamena, et de l'Isalo dont les faciès sont essentiellement continentaux.
- A l'Ouest : Le post-Karoo, Jurassique moyen à Néogène dont les faciès sont surtout marins.
- Un résumé de l'ensemble de la série sédimentaire se trouve dans le tableau ci-dessous ;

ERE GÉOLOGIQUE			LITHOLOGIE
Quaternaire		Système Holocène	Sable, gravier, argile
		Système Pléistocène	Sable, gravier, argile
<b>Cénozoïque</b> (Tertiaire)	Néogène	Système Miocène	Sédiment calcaire marins Grès et pélite continentaux
	Paléogène	Système Eocène	Calcaire, calcaire marneux, grès, pélite
<b>Mésozoïque</b> (Secondaire)	Crétacé	Système Crétacé	Partie 3 : grès, calcaires continentaux Partie 2 : calcaire, socle en basalte
	Période Jurassique	Jurassique Supérieure	Grès, pélite de continental marin
		<b>KARROO</b>  <b>Groupe ISALO</b>  <b>Groupe SAKOA</b>	Grès continentaux, grès marin calcaire
			Grès feldspathique
	Période Triasique		Stratification entrecroisée de grès et de conglomérats à la partie basse
<b>Paléozoïque</b> (Primaire)	Période Permienne	<b>Groupe SAKAMENA</b>	Faciès continental à couche marine
	Période Carbonifère		Calcaire, grès grossier conglomératique
Précambrien		Système Précambrien	Roche métamorphique dure (granite, gneiss)

**Tableau 5 :** Résumé stratigraphique du bassin de Morodava

Dans la partie aval du bassin versant de la rivière Morondava, on trouve de l'Est en Ouest, la succession des couches suivantes (cf. Figure 6) :

#### ☞ Le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur

**Morphologie :** ces dépôts sont représentés dans la plaine d'Ankilizato et à la base du plateau gréseux sur son bord oriental.



**Lithologie** : la série est constituée par les marnes vertes et jaunes d'Ankilizato (75m d'épaisseur) formant la plaine d'Ankilizato, recouvertes par des formations marno-gréseuses(20m) ; la série est datée de callovien-oxfordien, (P. A. Balloge, 1977) et les marnes grises datées du valanginien.

#### ☞ **Le Crétacé moyen : « le grès du Tsiandava »**

**Morphologie** : les grès rouges du Tsiandava forment un plateau profondément découpé par les rivières Andranomena au nord et Morondava au sud. Ce plateau débute à l'est par une falaise abrupte de 200 à 300m dominant les formations marneuses de la plaine d'Ankilizato.

**Lithologie** : La série est constituée par des formations gréseuses d'âge albien à turonien, essentiellement continentales, avec quelques intercalations marines fossilifères(V. Hourq, 1950 ; A. de Vendegies, 1955) ; les grès sont grossiers blancs à rouges, avec des niveaux conglomératiques et argilo-marneux, à stratification oblique. La surface du plateau est recouverte en partie par une carapace de grès ferrugineux de 1 à 3m d'épaisseur. L'épaisseur des grès sur le rebord du plateau varie de 250 à 300m.

**Propriétés aquifères** : Ces grès d'excellente qualité hydraulique reposent sur les marnes jaunes d'Ankilizato formant leur substratum ; de petits niveaux peu perméables au sein des grès permettent l'existence de lignes de sources perchées.

#### ☞ **Le Crétacé supérieur**

**Morphologie** : Le crétacé supérieur n'est pas représenté dans la région étudiée mais il affleure plus au nord à l'est de la source de Tomitsy.

**Lithologie** : La série est intérratifiée de plusieurs couches de basalte d'âge turonien. Comme les strates en contact avec des lits de basalte subissent généralement des altérations thermiques, on considère que les couches de basalte sont des bancs qui se sont introduit dans le crétacé supérieur. De plus, on retrouve plus au nord, un affleurement des argiles marno-sableuses datées du sénonien-maestricthien

Dans cette zone, le crétacé est recouvert en discordance par les séries de l'éocène.

**Propriétés aquifères** : Ces formations argileuses jouent le rôle de couverture imperméable sur les grès de Tsiandava.

#### ☞ **L'éocène**

**Morphologie** : l'éocène affleure au nord et au sud de Dabara, il forme un petit plateau de faible altitude sur le rebord ouest du plateau de Tsiandava.

**Lithologie** : La section inférieure des séries éocènes est principalement formée de calcaires et calcaires marneux. Les séries éocènes moyennes et supérieures sont constituées de calcaires, calcaires marneux, marnes, grès marneux, grès, etc.

De plus, à 70m à l'est de la faille de Manamby, et 200m à l'ouest, on trouve de grès grossiers à feldspaths blancs et roses d'âge éocène inférieure. Le système néogène repose en discordance sur ces séries de l'éocène.

**Propriétés aquifères :** Les grès inférieurs ont d'excellentes qualités hydrauliques ; les séquences marines supérieures jouant le rôle de couverture imperméable ; les intercalations gréseuses contiennent de petites nappes.

### ☛ Le Néogène

**Morphologie :** Le système néogène est aussi largement réparti dans la région et se trouve partiellement exposé dans la marge orientale de la plaine de Morondava.

**Lithologie :** La série est constituée des sédiments calcaires marins qui datent probablement du miocène et des faciès continentaux de calcaires datant probablement du pliocène. Notons quand même qu'on trouve ces sédiments exposés de façon sporadique.

### ☛ Les formations superficielles (Néogène-Quaternaire)

Elles s'étendent à l'ouest des dépôts éocènes et constituent une plaine d'alluvions fluviales et fluvio-lacustres. Cette série est formée de sables, graviers, galets, argiles rouges et repose en discordance sur les formations éocènes vers l'est.

**Propriétés aquifères :** Ces formations contiennent la nappe phréatique de la plaine.

## I-4-1-3- Structure géologique

La structure géologique générale de la région est monoclinale à faible pendage ouest. L'ensemble de la couche est affecté de plusieurs systèmes de failles en majorité longitudinales avec prédominance de deux grandes directions :

- **N. NE – S. SW, dites « Côte Est »**
- **N. NW – S. SE, dites « Bongolava »**

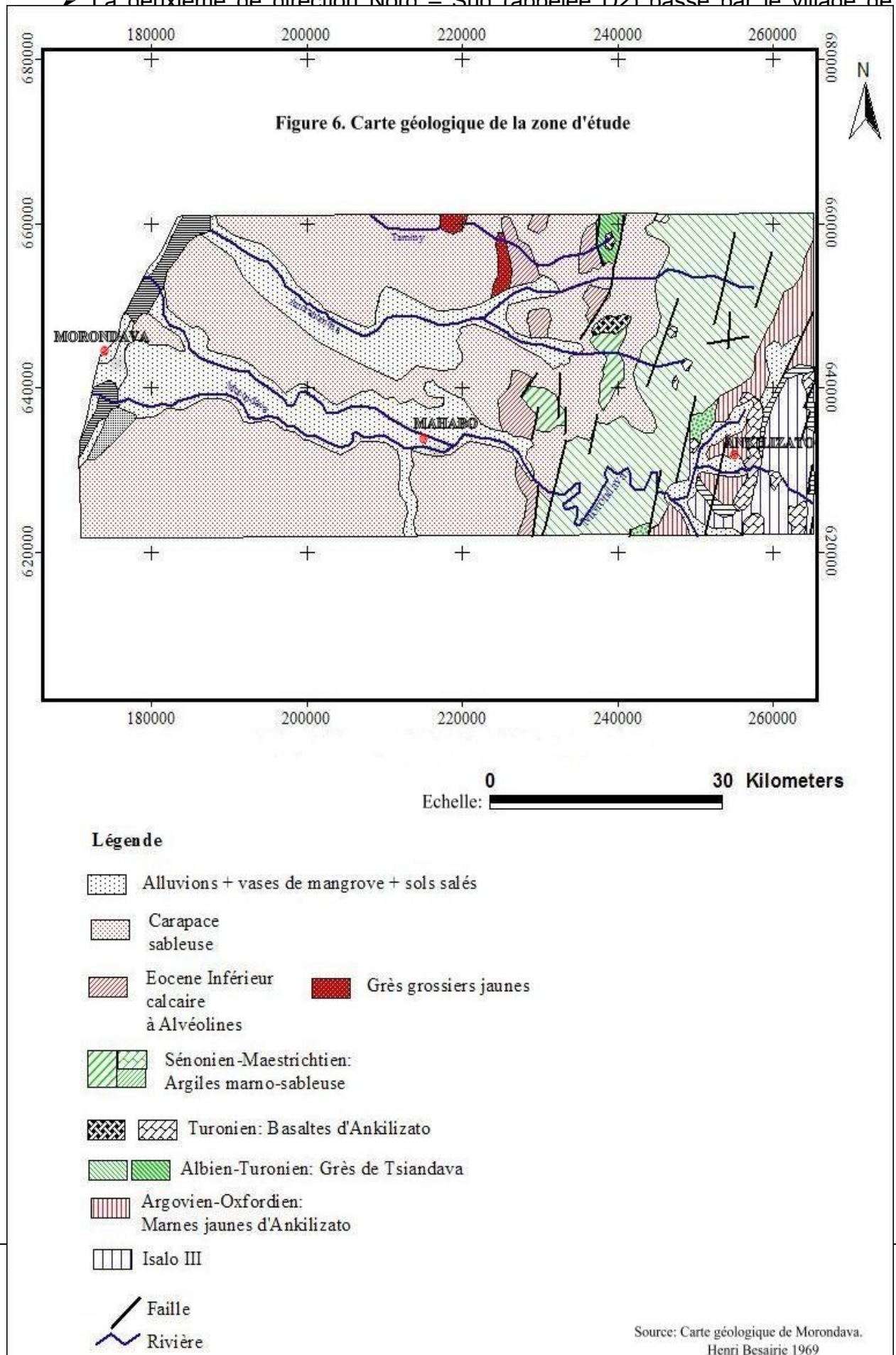
Ces failles abaissent les compartiments ouest et sont à l'origine du bassin côtier de subsidence où les dépôts crétacé-éocènes peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur au niveau du littoral.

Deux failles importantes reconnues par géophysique et confirmées par forages (H. Torrent, 1970) traversent la zone d'étude (cf. Figure 7) :

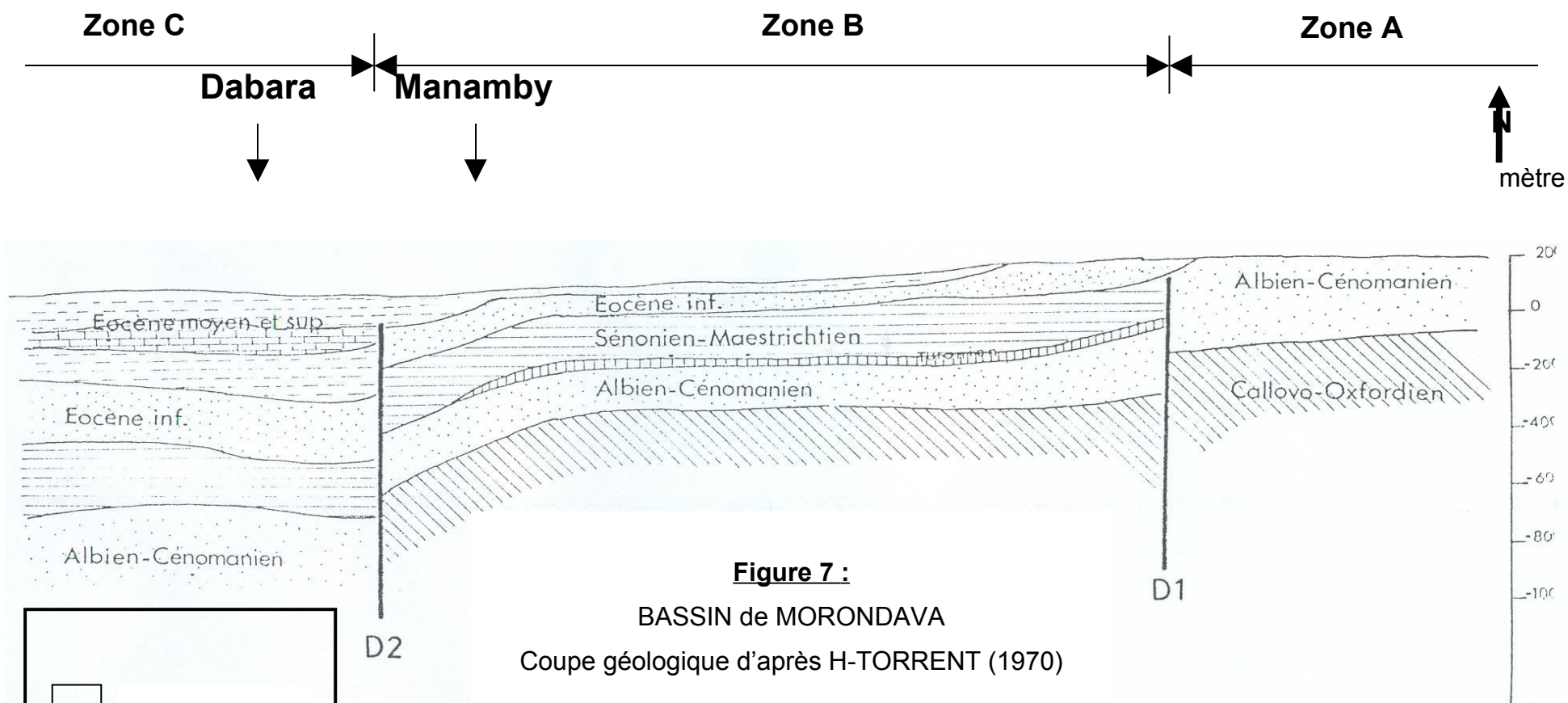
- La première appelée D1 de direction N. NW – S. SE limitant le plateau gréseux se termine en pente douce sur sa bordure occidentale. Nous appelons la zone, qui comprend le plateau situé à l'est de cette faille, « **zone A** », celle située à

l'ouest « **zone B** ». Le compartiment de la zone B s'est effondré avec un rejet de 200m.

➤ La deuxième de direction Nord – Sud (appelée D2) passe par le village de







- |  |                    |
|--|--------------------|
|  | Argiles, marnes    |
|  | calcaires          |
|  | Argiles marnueuses |
|  | basaltes           |
|  | Grès               |
|  | Marnes jaunes      |

Echelle horizontale : 1/50 000

Echelle verticale : 1/20 000

## I-5- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

### I-5-1- Bilan hydrique

Le bilan hydrique consiste à examiner au niveau d'une parcelle ou d'un bassin versant le cheminement de l'eau, à identifier les différents réservoirs et à quantifier leurs volumes suivant le principe de la conservation de masse. Lorsqu'il s'agit d'un bassin versant, on utilise souvent le terme « bilan hydrologique ».(RASOAMIADANA J., 1993)

On distingue ainsi :

Les apports : - Pluies

- Irrigation

- Contribution du sol et du sous-sol à l'alimentation hydrique

Les pertes : - Ruissellement

- Drainage

- Evapotranspiration (processus énergétique au niveau des plantes et du sol).

Le bilan hydrique exprime la différence entre les apports et les pertes d'eau du sol. Il est égal à la variation de la réserve d'eau du sol.

$$\boxed{\Sigma A - \Sigma P = R} \quad \left\{ \begin{array}{l} A : \text{Apports} \\ P : \text{Pertes} \\ R : \text{Réserves} \end{array} \right. \quad (1)$$

Le bilan hydrique ou hydrologique au niveau d'une parcelle ou d'un bassin versant s'exprime de la manière suivante :

$$\boxed{P + I = R + D + ETR + \Delta S} \quad (2)$$

Avec: P : Précipitation

I : Irrigation

R : Ruissellement de surface

D : Drainage du sol et des nappes

ETR : Evapotranspiration réelle

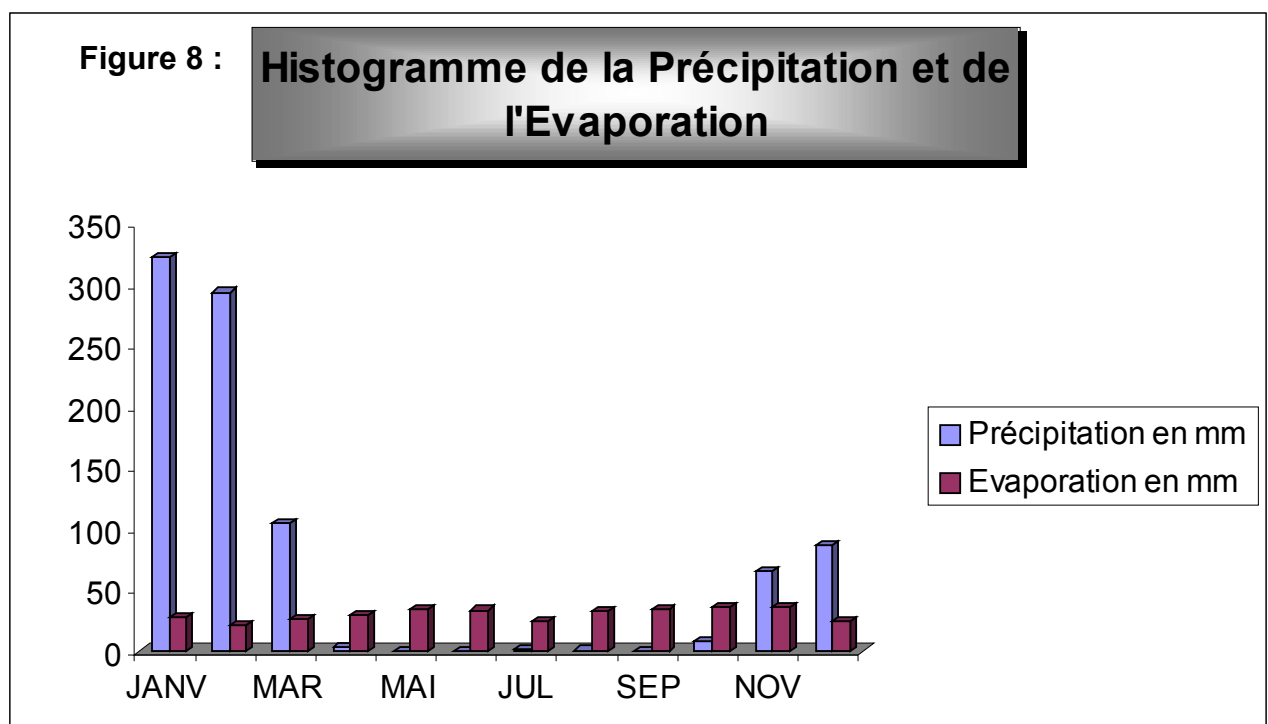
$\Delta S$  : Variation de la réserve en eau dans le bassin versant

Mais le manque d'information sur tous les facteurs pouvant entrer en jeu ne nous donne pas la possibilité de présenter même une ébauche de bilan dans notre zone d'étude. Ainsi, nous ne pouvons faire que la comparaison entre la pluviosité et l'évaporation. Le tableau (6) et la figure (8) montrent cette différence, ainsi que son histogramme.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aût	Sept	Oct	Nov	Déc
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----

<b>Précipitation en mm (P)</b>	322	294	105	2,7	0,15	0	0,7	0,3	0,05	7,18	64,9	86
<b>Evaporation en mm (E)</b>	27,5	21	26	29,3	34,3	33	24	32,3	34,5	35,5	35,5	24
<b>(P-E)</b>	<b>294.5</b>	<b>273</b>	<b>79</b>	<b>-27</b>	<b>-34</b>	<b>-33</b>	<b>-23</b>	<b>-32</b>	<b>-34,5</b>	<b>-28</b>	<b>29,4</b>	<b>62</b>

**Tableau 6 :** La différence entre la précipitation et l'évaporation moyenne mensuelle  
Source : Service Météorologique à Morondava



D'après le tableau (6), la quantité de pluie est supérieure à l'évaporation depuis le mois de novembre jusqu'au mois de mars. Donc, c'est pendant cette période que se fait l'alimentation de la nappe.

La quantité d'eau excédentaire théorique est de 737.9 mm après avoir additionné toutes les valeurs positives de (P-E). Pendant la saison sèche, c'est-à-dire entre le mois d'avril et le mois d'octobre, l'évaporation est très intense par rapport à la pluviométrie.

Le total de déficit entre P et E est théoriquement de 211.5 mm en additionnant toutes les valeurs négatives de (P-E). A cette valeur, il n'y a plus recharge de la nappe. On dit que la nappe est en régime de décharge, car elle ne débite que la réserve d'eau accumulée pendant la saison des pluies.

Donc la quantité totale théorique de pluie qui participe à la recharge de la nappe est de 526.4 mm.

### **I-5-2- Notion de porosité(n)**

La porosité d'un matériau représente l'ensemble de vide (ou pores) pouvant être occupé par un fluide (eau, pétrole) ou gazeux (air atmosphérique, gaz). Plusieurs types de porosité sont différenciés selon l'origine de ces vides. On distingue ainsi les porosités de vacuoles, d'interstices, de fissures, d'altération ou de dissolution. Et par définition, la porosité totale d'un matériau est le rapport du volume des pores au volume total occupé par le matériau sec (Banton Olivier et Bangoy Lumony, 1997).

Elle est exprimée comme une fraction de volume (généralement entre 0 et 1) ou en pourcentage (généralement entre 0 et 100 %).

Dans la région de Morondava, étant donné que c'est une région composée de formations sédimentaires, la porosité et la perméabilité sont assez importantes pour pouvoir emmagasiner l'eau.

### **I-5-3-Propriété hydrodynamique des aquifères**

Nous rappelons ci-dessous les définitions importantes nécessaires dans l'interprétation des résultats d'analyse.

#### **I-5-3-1- Structure et typologie des aquifères**

Un aquifère (acque = eau ; fera = je porte) est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine. En bref, c'est l'aquifère qui emmagasine l'eau infiltrée, et sa structure détermine l'écoulement souterrain (CASTANY G., 1982) ;

La base de l'aquifère ou substratum, est constituée par une formation hydrogéologique imperméable. Mais Il peut être libre, captif ou semi-captif suivant l'éponte supérieure c'est à dire :

- hydrodynamique avec fluctuations libres : aquifère à nappe libre
- Géologie imperméable : aquifère à nappe captive
- Géologie semi-perméable : aquifère à nappe semi-captive

Typologie d'aquifères	Aquifère libre	Aquifère semi-	Aquifère captif
-----------------------	----------------	----------------	-----------------



		<b>captif</b>	
Eponte supérieure	Perméable	Peu perméable	Imperméable
Recharge verticale	Libre (total)	Partielle (drainance)	Impossible (nulle)
<b>Typologie de nappes</b>	<b>Nappe libre</b>	<b>Nappe semi-captive</b>	<b>Nappe captive</b>
Fluctuation de la surface	Libre	Aucune	Aucune
$H_N^*$ versus $Z_N^*$	$H_N = Z_N$	$H_N > Z_N$	$H_N > Z_N$
Echange vertical	Libre	Limité (faible)	Aucun

(\*)  $H_N$  est le niveau piézométrique ou la charge hydraulique ;  $Z_N$  est l'altitude de la nappe.

**Tableau 7 :** Caractéristiques des aquifères et nappes selon leur typologie

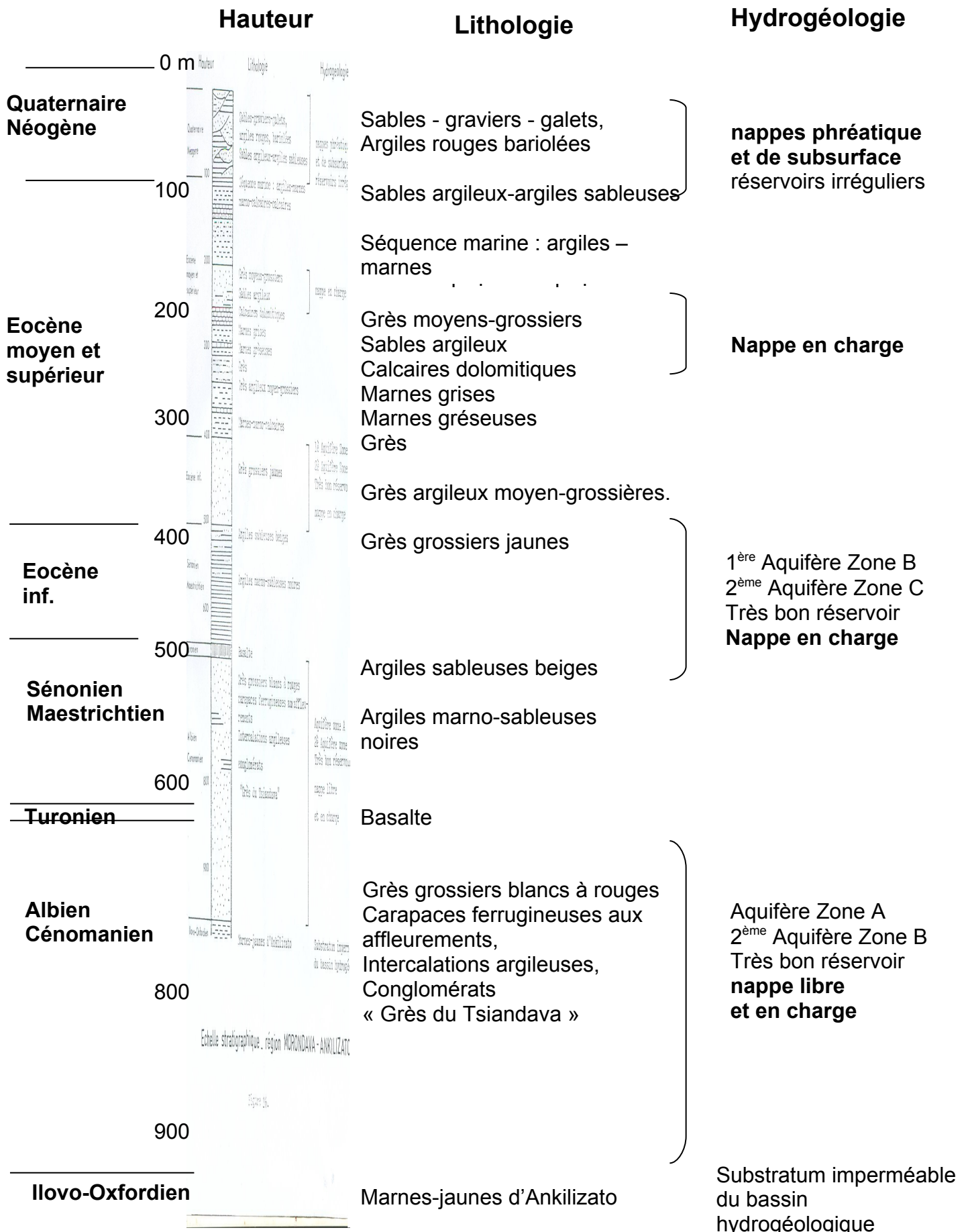
Dans notre zone (bassin versant de la rivière Morondava), il comporte de nombreuses formations aquifères très bien alimentées mais, du fait du pendage ouest des couches géologiques, ces formations se trouvent sous la plaine de Morondava à des profondeurs trop grandes pour présenter un intérêt quelconque bien qu'elles aient de grandes chances de présenter un artésianisme important.

Seule l'aquifère superficielle du plio-quatenaire présente des ressources facilement exploitables (Direction de l'Eau, 1982).

D'une épaisseur de centaine de mètre, cet aquifère est formé suivant les endroits de deux ou trois couches perméables plus ou moins individualisées. Il repose sur un substratum imperméable dont l'épaisseur dépasse 500m.

Ainsi, nous localiserons dans la figure (9), ces différents aquifères par rapport aux trois zones définies plus haut.

**Figure 9 :** Echelle stratigraphique et types d'aquifères de la région MORONDAVA-ANKILIZATO d'après Eric Nicollini (1980)



#### I-5-3-2- Conductivité hydraulique (K):

La conductivité hydraulique d'un matériau représente son aptitude à laisser circuler l'eau à travers lui. Cette conductivité hydraulique correspond au coefficient de proportionnalité, K, de la loi de Darcy (Banton Olivier et Bangoy Lumony, 1997).

Son unité est celle d'une vitesse ( $\text{m s}^{-1}$ ).

#### I-5-3-3- Transmissivité (T) :

La transmissivité d'un aquifère est le produit de la conductivité hydraulique du matériau aquifère par son épaisseur suivant la relation :

$$T = K \times b \quad (3)$$

Où T est la transmissivité de l'aquifère, b son épaisseur et K la conductivité hydraulique du matériau le constituant. Son unité est celle d'une surface par unité de temps ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), ou plus physiquement celle d'un débit par largeur unitaire d'aquifère ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ). Elle est plus communément déterminée en hydrogéologie, particulièrement dans le cas des essais de pompage.

Dans notre zone d'étude, les valeurs de T caractéristiques de l'aquifère inférieur varient de  $4 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . (Direction de l'Eau, 1982)

#### I-5-3-4- Coefficient d'emmagasinement (S):

Le coefficient d'emmagasinement spécifique d'un matériau aquifère représente sa capacité à libérer de l'eau sous l'effet d'un abaissement de la charge hydraulique. C'est le volume d'eau libéré par un volume unitaire de ce matériau pour une baisse unitaire de la charge hydraulique. Son unité est  $\text{m}^{-1}$ , ou plus physiquement  $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{m}^{-1}$ . Le coefficient d'emmagasinement (total) d'un aquifère est le produit du coefficient d'emmagasinement spécifique du matériau par son épaisseur. Ce coefficient est adimensionnel.

$$S = S_s \times b \quad (4)$$

Où S est le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère,  $S_s$  son coefficient d'emmagasinement spécifique et b son épaisseur.

Dans notre zone, le coefficient d'emmagasinement des zones captives d'une nappe dépend de l'élasticité de l'aquifère et de l'eau, et sa grandeur est de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$ . (Direction de l'Eau, 1982)

Le coefficient d'emmagasinement des nappes à surface libre équivaut en pratique à la porosité efficace de l'aquifère, sa valeur est de  $10^{-3}$ . (Direction de l'Eau, 1982)

## **I-5-4-Les nappes du bassin versant de la rivière Morondava (cf.Figure 10)**

Dans cette zone, 5 types de nappes ont été reconnues (H. TORRENT, 1970) avec notamment la nappe libre des formations gréseuses de l'Isalo III (nappe profonde). Mais, dans la partie aval du bassin versant de la rivière Morondava, seules les nappes superficielles sont exploitées. Dans ce cas, on ne distingue que quatre (4) grands types de nappes. Ce sont la nappe alluviale, la nappe des sables de plage, la nappe de l'Eocène et la nappe du Crétacé.

### **☞La nappe alluviale**

Aquifère constitué d'alluvions d'âge néogène à quaternaire. Ce sont des sédiments très hétérogènes de type fluvio-lacustre, lenticulaires.

C'est une nappe superficielle pouvant descendre jusqu'à 10m de profondeur. Mais, elle peut être semi-captive quand elle est intercalée par une mince couche d'argile, on parle de nappe multicouche. Son débit spécifique est de 1.69 à 2.54 l/s/m.

C'est une eau bicarbonatée calcique. Ayant une bonne alimentation, elle est capable d'assurer l'approvisionnement en eau du village même en période d'étiage excepté pour des puits de moins de 6m parce que ces dernières sont moins profondes.

Cette nappe est la plus facile à exploiter dans cette zone et utilisée par l'industrie pour l'irrigation de la canne à sucre et par la JIRAMA pour l'alimentation en eau de la ville de Morondava et Mahabo.

### **☞La nappe des sables de plages**

Aquifère constitué de sables blancs ou jaunes d'âges néogène à quaternaire.

C'est une nappe superficielle, pouvant être rencontrée à partir de 1m de profondeur. Son débit spécifique est de 0.04 à 2 l/s/m.

Cette eau a une teneur élevée en fer. Son alimentation dépend surtout de la précipitation et comme elle réagit très vite aux sollicitations de cette dernière, elle est soumise à des variations saisonnières importantes.

En saison des pluies cette nappe peut affleurer à la surface, ce qui entraîne l'inondation d'une grande partie de la plaine.

Cette nappe est utilisée surtout en milieu rural.

### ☞ La nappe de l'éocène

Aquifère constitué de grès moyens à grossiers et de sables marneux d'âge éocène. La puissance de l'éocène varie entre 350 – 400m à l'ouest de la faille de Manamby et 200m à l'est.

C'est une nappe captive en charge rencontrée entre 10 et 100m de profondeur. Son débit spécifique est de 0.5 à 5l/s/m.

C'est une eau bicarbonatée, limpide, inodore, avec un goût un peu amer. Son alimentation est faible à cause de la perméabilité et porosité faible du terrain.

Cette nappe est difficile à exploiter par puits et la quantité d'eau ainsi obtenue n'est pas réellement suffisante pour l'alimentation en eau de toute la région.

### ☞ La nappe de crétacé

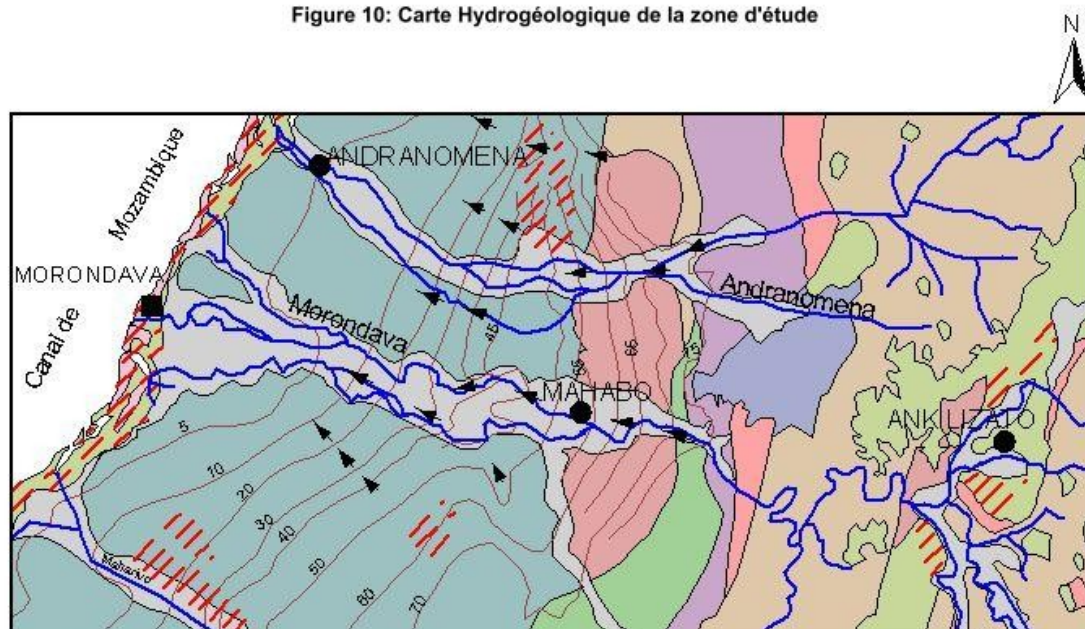
Aquifère constitué de grès grossiers blancs à rouges (grès de Tsiandava) d'âge Crétacé moyen. Ces grès d'excellente qualité hydraulique reposent sur un substratum formé de marnes jaunes d'Ankilizato. La présence de petits niveaux peu perméables au sein de grès a engendré l'existence de lignes de sources perchées.

C'est une importante nappe artésienne de 150m de profondeur.

C'est une eau agressive et ferreuse, bicarbonatée ferreuse et bicarbonatée calcique ; son débit spécifique est de 1 à 14l/s/m. Ces grès sont très favorables à l'emmagasinement de grandes quantités d'eau et constituent un excellent aquifère.

Le plateau de Tsiandava constitue le réservoir et l'aire de mise en charge de toutes les nappes captives reconnues plus à l'ouest.

Figure 10: Carte Hydrogéologique de la zone d'étude



Echelle: 0 0.5 Kilometers

### Légende

#### Potentialités des eaux souterraines

##### Acquifères intergranulaires

- Aquifère hautement productif (Q= 250-600 l/mn)  
profondeur: 30 à 50 m
- Aquifère hautement productif (200-600 l/mn)  
profondeur: 50 à 100 m
- Aquifère hautement productif (Q= 200-600 l/mn)  
profondeur: 150 à 250 m
- Aquifère moyennement productif (Q= 50-150 l/mn)  
profondeur: 100 m
- Aquifère moyennement productif (Q= 50-150 l/mn)  
profondeur: 150 à 200 m

##### Acquifères fissurés

- Aquifère hautement productif (Q= 200-600 l/mn)  
profondeur: 50 à 100 m
- Aquifère hautement productif (Q= 200 à 600 l/mn)  
profondeur: 150 à 250 m
- Aquifère moyennement productif (Q= 50-150 l/mn)  
profondeur: 150 à 200 m

##### Roches intergranulaires ou fissurées

- Zone difficile pour l'exploitation des eaux souterraines
- Aquifère locale et discontinue profondeur: 20 m
- Zone productive des eaux souterraines à conductivité électrique élevée

#### Indices des eaux souterraines

- Réseaux hydrographiques
- Courbes piézométriques
- Direction d'écoulement

Source: carte hydrogéologique de Madagascar (2) région du Sud-Ouest (JICA)

## **CHAPITRE II: CHIMIE DE L'EAU**

L'eau naturelle n'est pas pure puisqu'elle contient toujours des substances (gaz, liquides ou solides) dont les concentrations dépendent des paramètres tels que le pH du milieu, la pression partielle de gaz en contact avec les eaux, la nature des substances minérales, organiques ou inorganiques dissoutes, la texture des sols, etc. (Rodier J., 1976)

En ce qui concerne le projet MAG/ 8 / 003 intitulé intégration des techniques isotopiques dans le projet national d'exploitation des eaux souterraines des Sud-Ouest de Madagascar, l'étude chimique est axée surtout sur l'étude des ions (majeurs, mineurs, et en trace) et la salinité de l'eau.

Mais avant d'entrer dans les détails, nous voudrions d'abord apporter un petit rappel sur les différents paramètres physico-chimiques de l'eau.

### **II-1- RAPPELS DES DIFFERENTS PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU**

#### **II-1-1- Turbidité**

La turbidité est l'inverse de la limpidité et la transparence.

Elle traduit la présence des particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...).

Cependant, une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur les particules en suspension : la qualité bactériologique d'une eau turbide est donc suspecte. L'unité de mesure est NTU

#### **II-1-2- La température**

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger d'autres paramètres dont les valeurs sont liées à la température (Conductivité).

La température d'une eau potable ne devrait pas dépasser 25°C ; ce qui correspond en quelque sorte à la limite par rapport à laquelle l'eau potable peut nous désaltérer.

De plus, au dessus de cette limite, il y a risque de croissance accélérée de microorganisme (microbes, algues...). Cela peut entraîner des goûts et d'odeurs désagréables, et aussi une augmentation de la couleur et de la turbidité.

Pratiquement, la température de l'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé de l'homme.

En hydrogéologie, les eaux souterraines sont d'autant plus chaudes qu'elles sont profondes suivant le gradient de la température géothermique de 1°C par 33m. On peut constater aussi que les eaux souterraines sont moins sensibles à la variation de la température que les eaux de surface.

### **II-1-3- Le pH**

Le pH (potentiel Hydrogène) est une activité des ions hydrogènes contenu dans une solution donnée (eau). Ainsi il mesure la concentration en ions  $H^+$  présents dans l'eau.

Il traduit la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de la neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau.

**Classification des eaux d'après leur pH** (Eric Drouart et Jean Michel Vouillamoz, 1999)

pH < 5	acidité forte, présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	neutralité approchée, majorité des eaux de surfaces
5.5 < pH < 8	majorité des eaux souterraines
pH > 8	alcalinité, évaporation intense

### **II-1-4- Conductivité électrique**

Par définition, la conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre 2 électrodes métalliques de 1cm<sup>2</sup> de surface et séparés l'un de l'autre de 1cm. Son unité est le micro-siemens par centimètre ( $\mu S/cm$ ). Elle est également fonction de la température.

Avec la température, les contrastes de conductivité permettent de mettre en évidence le degré des pollutions, les zones de mélange ou l'infiltration...

La mesure de la conductivité permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.



C (µS/cm)	Type d'eau
0.5	eau déminéralisée
10 < C < 80	eau de pluie
30 < C < 100	eau peu minéralisée, domaine granitique
300 < C < 500	eau moyennement minéralisée, domaine des roches carbonatées (karst)
500 < C < 1 000	eau très minéralisée
1 000 < C < 3 000	eau très minéralisée, saumâtre ou saline
C > 30 000	eau de mer

**Tableau 8:** Classification des eaux d'après leur conductivité (C) (Eric Drouart et Jean Michel Vouillamoz, 1999)

**Remarque :** On peut déterminer les faciès de l'eau par la relation suivante :

$$\boxed{\text{TDS} = A \times C} \quad (5)$$

Où **TDS**: Total Disolved Solid

**A** : Coefficient de proportionnalité

**C** : Conductivité électrique

Si A = 0.55 : l'eau est bicarbonatée

Si A = 0.75 : l'eau est sulfatée

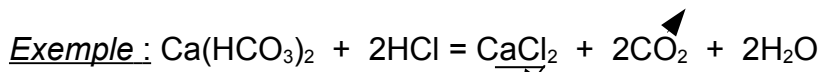
Si A = 0.9 : l'eau chlorurée

### **II-1-5- Alcalinité**

L'alcalinité est mesurée afin de pouvoir déterminer la concentration en carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ou en bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). Elle correspond à l'ensemble des anions d'acides faibles susceptibles d'agir avec  $\text{H}^+$ .

Dans la pratique et pour des systèmes dominés par les relations des carbonates dont le pH varie de 7 à 9, l'alcalinité peut être assimilée aux bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$ .

Ce paramètre est important, car il joue un rôle prépondérant sur l'effet tampon de l'eau. Il détermine la manière dont le pH se modifie lors de l'ajout d'acides ou de bases faibles, notamment lors des procédés de traitement (floculation et désinfection).



Ainsi, Si  $\text{pH} < 5$  ; l'espèce est la plupart du temps de l'acide carbonique pure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ou  $\text{CO}_2$  dissous ;

Si  $7 < \text{pH} < 9$ , l'espèce dominant est le  $\text{HCO}_3^-$

Si  $\text{pH} > 9$ , présence de bases fortes :  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$

### **II-1-6- Dureté**

La dureté de l'eau regroupe les caractéristiques particulières des eaux naturelles, résultant de la faible solubilité de sel des cations bivalents et trivalents. Ce sont essentiellement les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  qui sont responsable de la dureté dans les régions calcaires.

Dans la pratique, une eau est dite « **dure** » lorsqu'elle mousse difficilement et laisse la peau rêche même après rinçage. Elle est exprimée en mg/l de  $\text{CaCO}_3$ .

La pollution peut aussi dans une certaine mesure augmenter la dureté de l'eau par le  $\text{CaCl}_2$ .

### **II-1-7- Salinité**

La salinité est définie comme la somme des matières solides en solution contenues dans une eau, après conversion des carbonates en oxydes, après oxydation de toutes les matières organiques et après remplacement des iodures et bromures par une quantité équivalente de chlorures.

Elle peut être estimée en mesurant la conductivité. Si la conductivité est faible, la salinité est aussi faible et ainsi de suite.

### **II-1-8- TDS (Total Dissolved Solid ou résidu sec)**

Les TDS sont les résidus secs filtrables se trouvant dans les eaux souterraines. Par cette mesure, on peut aussi connaître le degré de la salinité de l'eau tel que :

Si :	$\text{TDS} < 1\text{g/l}$	: l'eau est douce
	$1\text{g/l} < \text{TDS} < 10\text{g/l}$	: l'eau est saumâtre
	$10\text{g/l} < \text{TDS} < 100\text{g/l}$	: l'eau est salée
	$\text{TDS} > 100\text{g/l}$	: l'eau est très salée (saumure)

### **II-1-9- Oxygène dissout (OD)**

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que les pressions partielles d'oxygène dans le liquide et dans l'air soient en équilibre.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique ( donc de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau : la saturation en O<sub>2</sub> diminue lorsque la température et l'altitude augmentent. Une eau très aérée est généralement sursaturée en oxygène (torrent), alors qu'une eau chargée en matières organiques dégradables par des micro-organismes est sous saturée.

## **II-1-10- Le Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

C'est une propriété chimique de l'eau. Les sources de nitrate sont : soit par l'oxydation de matière organique liée à des activités humaines, agricoles (fumier, lisier) ou urbaines (effluent domestique), soit par synthétisation des nitrates du sol par le processus micro-biologique de minéralisation de la matière organique du sol.

Les risques liés aux nitrates sont surtout importants pour le nourrisson et le fœtus. La toxicité est due aux nitrites formés par la réduction des nitrates dans l'estomac, et conduit au blocage de la fonction oxygénante de l'hémoglobine. La méthémoglobinémie provoque une cyanose qui peut conduire à la mort par asphyxie.

Ainsi, le taux de nitrate dans un échantillon d'eau est comme suit, selon les sources de nitrates(Mazor Emmanuel, New York 1997) :

- Si [-10 à 10mg/l] : le nitrate provient de l'engrais chimique
- Si [10 à 30mg/l] : le nitrate provient de l'activité humaine

## **II-2- POLLUTION DE L'EAU**

L'eau souterraine est le véhicule des substances minérales ou organiques ou des bactéries pathogènes. Par son mouvement dans toutes les zones du sol et du sous-sol, elle provoque la propagation des polluants, leur persistance ainsi que la pollution générale de l'espace souterrain. Ainsi, la pollution de l'eau souterraine est le risque permanent de limitation de la ressource en eau dans un proche avenir (CASTANY G., 1982).

### **II-2-1- Définitions**

#### **II-2-1-1- Eaupotable**

Une eau potable est définie comme une eau destinée à la consommation humaine qui, par traitement ou naturellement, répond à des normes organoleptiques, physico-chimiques, bactériologiques et biologiques fixées par décret (Code de l'eau, Chapitre IV, Section I, Article 38, 1999).

Ainsi, une eau, pour être considérée comme potable, doit satisfaire aux conditions suivantes :

- limpide, incolore, inodore et fraîche
- l'eau ne doit pas contenir plus de 0.50 g/l de matières minérales dissoutes
- l'eau ne doit pas contenir plus de 2 mg/l de matières organiques, exprimées en oxygène emprunté ou permanganate de potassium
- l'eau ne doit pas renfermer de nitrites ni d'ammoniaque (tolérable à l'état de trace, cf. Annexe III-2)
- le taux des chlorures exprimé en Cl, ne doit pas dépasser 40 à 50 mg/l, sauf en terrains salés
- ne pas contenir d'organismes parasites ou pathogènes, ni de germes de putréfaction.

L'eau potable doit satisfaire aux normes de potabilité des eaux.

La norme de potabilité des eaux d'après l'OMS et la norme de référence de la JIRAMA applicable à l'eau de boisson se trouvent dans l'Annexe III-1 et Annexe III-2

### **II-2-1-2- Pollution**

La pollution s'étend de tous déversements, écoulements, rejets, dépôts directs ou indirects de matières de toute nature et plus généralement de tout fait susceptible de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux, en modifiant leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques ou bactériologiques et radioactives, qu'il s'agisse d'eaux de surface ou souterraines (Code de l'Eau, Chapitre I, Section II, Sous Section I, Article 13, 1999).

De plus, la pollution des eaux souterraines peut être aussi définie comme étant la dégradation artificielle de la qualité des eaux induite par l'activité humaine. Ce phénomène peut limiter sérieusement les quantités d'eaux exploitables mais peut surtout être à l'origine de graves ennuis pour la santé de l'homme.

Les causes de cette perturbation sont nombreuses et variées ; elles sont en général d'origine humaine et industrielle.

### **II-2-2- Les principaux rejets polluants (type des polluants)**

Les polluants peuvent être classés, selon leur nature, en quatre grandes catégories : physiques, chimiques, organiques et bactériologiques (G. Castany, 1978 et 1980). Mais dans notre zone d'étude, les rejets polluants qui se mélangent aux eaux naturelles sont classés d'après leur origine en :

- Eau usée domestique
- Eau usée industrielle
- Eau usée urbaine
- Les rejets polluants agricoles
- La pollution liée au dépôt des déchets solides
- La pollution naturelle
- La pollution radioactive

### **II-2-2-1- ~~Eaux usées domestiques~~**

Les eaux usées domestiques, elles-mêmes divisées en eaux ménagères et eaux vannes, contiennent des matières en suspension et dissoutes d'origine minérale et organique tels que des graisses de cuisine, des détergents divers pour le lavage et des substances provenant du lavage des sols.... Elles renferment également de l'urine et des matières fécales.

### **II-2-2-2- ~~Eaux usées industrielles~~**

La composition des effluents industriels diffère beaucoup d'une industrie à l'autre.

Ainsi, une étude qualitative et quantitative des eaux usées industrielles est un préalable essentiel tant à l'estimation de leurs conséquences sur le milieu naturel qu'à la conception d'une station d'épuration.

### **II-2-2-3- ~~Eaux usées urbaines~~**

Les eaux usées urbaines englobent les eaux usées domestiques, les eaux usées industrielles et les rejets des installations à caractère collectif (bâtiments scolaires, commerces, hôpitaux,...). Leur composition est ainsi très variable puisqu'elles ont une composition moins constante que les eaux usées domestiques.

### **II-2-2-4- ~~Les rejets polluants agricoles~~**

Les rejets agricoles sont caractérisés surtout par l'apport des engrais chimiques (riches en azote), des pesticides (polluants types), des insecticides, etc.

A titre de remarque, dans notre zone d'étude, la densité des bétails dépasse largement celle de la population alors que l'élevage est un très gros contributeur à la pollution azotée.

### **II-2-2-5- ~~La pollution liée au dépôt des déchets solides~~**

Les décharges de déchets solides se sont multipliées avec le développement urbain et le développement industriel. Ainsi, elles entraînent la contamination des eaux surtout souterraines, à la suite d'infiltrations liées à la lixiviation des dépôts.

### **II-2-2-6- ~~La pollution naturelle~~**

La présence d'éléments indésirables dans une eau n'est pas toujours une conséquence des actions de l'homme. A titre d'exemple la présence de la teneur élevée en fer dans l'eau souterraine est probablement due aux interactions des eaux et des roches encaissantes (riche en fer) ou à la précipitation.

### **II-2-2-7- La pollution radioactive**

La radioactivité naturelle des eaux existe toujours mais elle est très faible. Cependant une élévation de radioactivité naturelle peut avoir lieu au voisinages des mines de minerai radioactif (Uranium, Thorium).

### **II-2-3- Vulnérabilité des nappes**

La vulnérabilité des nappes à la pollution est leur sensibilité aux différents facteurs physiques stables déterminant la mesure où elles sont, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. (CASTANY Gilbert, 1982)

Elle étudie les possibilités de propagation des polluants dans l'espace souterrain. Celle-ci est, en premier lieu, liée à l'autoépuration naturelle du sol, donc à la présence de conditions favorables à son action. En second lieu, elle dépend de la circulation de l'eau.

Ainsi la vulnérabilité est définie comme une propriété intrinsèque des aquifères, qui exprime la sensibilité de ces derniers aux impacts naturels et anthropogènes.

#### **II-2-3-1- ~~Système~~ vulnérable**

En fait, la notion de vulnérabilité est indissociable à la notion d'agressivité et de défense. Ainsi, un système est vulnérable si un seul de ses éléments est susceptible d'être atteint ; et que l'intégralité des propriétés du système n'est pas protégée, il est vulnérable dans son ensemble.

Et si l'environnement actif d'un système est totalement neutre (non agressif et non défensif), celui-ci est invulnérable.

Un système vulnérable à la pollution est donc un milieu recevant dans son environnement actif des pollutions (directe ou indirecte), susceptible de porter atteinte à l'intégralité de ses propriétés naturelles.

#### **II-2-3-2- ~~Fond~~ de vulnérabilité**

Les variables entrant dans la vulnérabilité sont la densité, l'intensité, l'étendu et la fréquence d'une pollution. Ces variables peuvent toucher tout ou une partie seulement.

L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines nécessite donc :

- l'évaluation du potentiel de pollution aux frontières des eaux (interface atmosphère-sol ; zone insaturée, zone saturée)

- l'estimation du potentiel de défense naturelle(atmosphère jusqu'à la zone saturée)

- l'estimation du temps de reversion (réversibilité) et le contraste de réversibilité.

Enfin, l'étude de la vulnérabilité d'un système à la pollution suivant le degré de vulnérabilité, aboutit à l'établissement des cartes de vulnérabilité. Mais à Madagascar, cette carte n'existe pas encore et nous nous proposons d'initier ce processus.

# CHAPITRE III : NOTION D'HYDROLOGIE ISOTOPIQUE

L'hydrologie isotopique est un moyen d'évaluer la vulnérabilité à la pollution des sources d'eau souterraines. Les isotopes stables ou radioactifs permettent de déterminer la rapidité du mouvement de l'eau et la zone d'alimentation du système.

Mais avant tous, nous apportons un rappel sur quelques importantes définitions en hydrologie isotopique ainsi que leurs applications en hydrogéologie.

## **III-1- DEFINITIONS**

### **III-1-1- Isotope**

Le mot « *isotope* » vient du mot Grecque « *iso* et *topos* » qui signifie « *même* et *place* ». Les isotopes sont donc des éléments qui occupent la même place dans le tableau de classification périodique. Ce sont des différents nucléides appartenant à un même élément, et qui ont un même nombre de charge  $Z$ , mais de nombres de masse  $A$  différents. (Fontes J. C., 1978)

Exemple :  $^1_1\text{H}$  (Hydrogène) ,  $^2_1\text{H}$  (Deutérium) ,  $^3_1\text{H}$  (Tritium) qui sont les isotopes de l'hydrogène.

Les isotopes peuvent être stables ou radioactifs.

### **III-1-2- Isotopes stables** (Gat JR., Gonfiantini, 1981)

Un isotope est dit « **stable** » s'il ne désintègre pas spontanément.

Exemple :  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  pour l'hydrogène  
 $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  pour l'oxygène  
 $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$  pour l'azote

### **III-1-3- Isotopes radioactifs**

Un isotope est dit « **radioactif** » ou « **instable** », s'il se désintègre spontanément en émettant une particule ( $\alpha$  ou  $\beta$  ou  $\gamma$ ) et en donnant naissance à un autre nucléide fils (stable ou radioactif)



### III-1-3-1- Loi de désintégration radioactive

La loi de désintégration radioactive est:  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$  (6)

Où  $N_0$  : nombre d'atomes présents à l'instant  $t = 0$

$N$  : nombre d'atomes présents à l'instant  $(t)$

$\lambda$  : constante de désintégration radioactive du nucléide considéré.

### III-1-3-2- Période Activité

La période est le temps au bout duquel la moitié des atomes présents à l'instant  $t=0$  ( $N_0$ ) se sont désintégrés.

Avec  $T = \ln 2 / \lambda$  ou  $T = 0.693 / \lambda$  (7)

L'activité est le nombre de désintégration par unité de temps

$$a = \lambda N \quad (8)$$

$a$  est exprimé en becquerel (Bq) ou en curie (Ci), tel que:  $1\text{Bq}=1\text{dps}$  et  $1\text{Ci}=3.7 \cdot 10^{10}\text{Bq}$   
Où dps est la désintégration par seconde.

### III-1-4- Rapport isotopique

Le rapport isotopique d'un élément donné est la concentration de l'espèce isotopique, c'est-à-dire, le nombre d'atomes d'un isotope lourd de l'élément divisé par le nombre d'atomes de l'isotope léger le plus abondant de cet élément.

Exemple : pour l'hydrogène, le rapport isotopique pour l'isotope stable  $^2_1\text{H}$  est donné par :

$$R = ^2_1\text{H} / ^1_1\text{H}, \quad ^1_1\text{H} \text{ étant l'isotope léger le plus abondant de l'hydrogène}$$

De même pour l'oxygène, le rapport isotopique pour l'isotope stable  $^{18}_8\text{O}$  est donné par :

$$R = ^{18}_8\text{O} / ^{16}_8\text{O}, \quad ^{16}_8\text{O} \text{ étant l'isotope léger le plus abondant de l'oxygène}$$

### III-1-5- Méthode de mesure

En hydrogéologie, on utilise surtout les isotopes de l'environnement, notamment les isotopes de : l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le carbone (C), le soufre (S) et le strontium (Sr). Ces isotopes sont les principaux éléments constitutifs du système hydrogéologique. Ainsi, les isotopes les plus utilisés en hydrogéologie sont :

- Les isotopes stables : le  $^{18}\text{O}$ , le  $^2\text{H}$ , le  $^{15}\text{N}$  et le  $^{87}\text{Sr}$
- Les isotopes radioactifs : le  $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$

#### III-1-5-1- Mesure de $^2\text{H}$ , $^{18}\text{O}$ , $^{15}\text{N}$ et $^{87}\text{Sr}$

Ce qui est important en étude hydrogéologique c'est de comparer surtout les variations en concentration des isotopes stables plutôt que de savoir leur abondance actuelle. Seule la différence relative du rapport entre l'isotope lourd et léger le plus abondant de l'échantillon, par rapport à une référence (ou étalon) peut être déterminée.

Cette différence désignée par  $\delta$  est donnée par la relation :

$$\delta = \frac{R_{\text{échantillon}} - R_{\text{étalon}}}{R_{\text{étalon}}} \quad \text{ou} \quad \delta = \frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{étalon}}} - 1 \quad (9)$$

Où R est le rapport isotopique

Exemple : Pour le deutérium

$$\delta ^2\text{H} = \left( \frac{(^2\text{H}/^1\text{H}) \text{ échantillon}}{(^2\text{H}/^1\text{H}) \text{ étalon}} - 1 \right) \times 1000 \text{ (‰)}$$

Pour l'oxygène

$$\delta ^{18}\text{O} = \left( \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ échantillon}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ étalon}} - 1 \right) \times 1000 \text{ (‰)}$$

Dans la pratique,  $\delta$  est exprimée en parts pour mille (‰)

Dans le cas des eaux, l'étalon utilisé est le VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean waters) qui représente la composition isotopique moyenne des eaux océaniques. C'est un étalon logique et naturel car presque tous les cycles hydrologiques prennent leur source et retournent à l'océan.

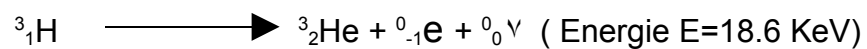
- Pour un échantillon ayant une valeur de  $\delta > 0$  (positive), alors on dit que l'échantillon est riche en isotopes lourds par rapport à la référence.

- Pour une valeur de  $\delta < 0$  (négative), cela veut dire que l'échantillon est appauvri en isotopes lourds par rapport à l'étalon.

### III-1-5-2- Isotopes radioactifs $^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$

#### Le Tritium ( $^3\text{H}$ )

Le Tritium( $^3\text{H}$ ) est l'isotope radioactif de l'hydrogène en se désintégrant, il donne naissance à un noyau d'Hélium (He) avec une émission de particule  $\beta^-$  selon l'équation :



La concentration en tritium dans l'eau est mesurée en terme de « Tritium Unit » (TU) ou « unité de tritium » qui est le rapport isotopique :  $R = ^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$  telle que

$$\boxed{\text{TU} = 10^{-18} \frac{a \cdot M}{2 \cdot \mathcal{N} \cdot \lambda}} \quad (10)$$

Où  $a$  : activité du tritium dans l'eau

$M$ : 0.018015kg/mole d'eau

$\mathcal{N}$  : nombre d'Avogadro= $6.23 \cdot 10^{23}$

$\lambda$  : constante radioactive du tritium

$$\mathbf{1\text{TU} = 0.12\text{Bq/kg} \sim 7.2\text{dpm/kg} \sim 3.2\text{pCi/kg}} \quad (11)$$

La période T du Tritium( $^3\text{H}$ ) est de 12.43ans.

#### Remarque :

Il existe 2 sources de tritium:

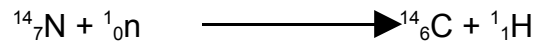
-Le tritium naturelle qui est formé à partir de la collision des neutrons cosmiques avec l'azote de l'air (avec un taux de 3 à 25 TU dans les eaux de pluie).

-Le tritium artificiel qui est produit en forte quantité, lors des essais de bombe thermonucléaire en 1954(le taux est resté très faible).

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

#### Le Carbone-14 ( $^{14}\text{C}$ )

Le carbone-14 ( $^{14}\text{C}$ ) se forme dans les hautes atmosphères à partir des noyaux de l'azote-14 ( $^{14}\text{N}$ ), selon l'équation :



La période du  $^{14}\text{C}$  est de  $(5730 \pm 40)$  ans

Dans les études environnementales, les résultats en  $^{14}\text{C}$  sont reportés comme étant une activité relative par rapport au standard acide oxalique pur (distribué par le US National Bureau of standard – NSB). L'activité relative  $a^{14}$  a donné en « pourcentage moderne du carbone » (pmC ou pMC).

$$a^{14} = \frac{A^{14}}{A_s^{14}} \cdot 100 \text{ pmc} \quad (12)$$

Où  $A^{14}$  est l'activité mesurée de l'échantillon.

$A_s^{14}$  ( $=0.95A^{14}_{\text{ox}}$ ) est l'activité standard déterminée avec le même compteur d'efficacité, dans un même temps et normalisé à :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{ox}} = -19.3 \text{ ‰} \quad (13)$$

**Remarque :**

Après oxydation, le  $^{14}\text{C}$  qui s'est formé en haute atmosphère, est distribué dans le cycle général du carbone sous forme de  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Le  $^{14}\text{C}$  est un traceur extrinsèque de l'eau. On le retrouve dissous sous forme d'espèces variées. Ainsi, sa pénétration dans les eaux souterraines est soit par :

- la dissolution des carbonates du sol par le  $\text{CO}_2$  des sols
- l'érosion de la roche par le  $\text{CO}_2$  du sol
- la dissolution des carbonates du sol par les acides humiques
- la réduction des sulfates.

## **III-2- UTILISATION DES TECHNIQUES ISOTOPIQUES EN HYDROGEOLOGIE**

Les isotopes peuvent être utilisés pour résoudre différents problèmes en hydrogéologie.

En effet, les isotopes naturels stables ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ) seront utilisés pour déterminer les origines des eaux et les aires de recharge, ainsi que les possibilités de mélange entre les eaux de surface et les eaux souterraines d'une part, et entre les aquifères d'autre part.

D'autres isotopes stables comme l'azote-15 ( $^{15}\text{N}$ ) et le strontium-87 ( $^{87}\text{Sr}$ ) pourront être utilisés pour détecter les origines probables de pollutions anthropogéniques et naturelles, y compris les problèmes de forte minéralisation.

Les isotopes radioactifs naturels ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) seront utilisés pour caractériser le taux de renouvellement et le régime des écoulements.

Les isotopes sont utilisés en tant que traceur en hydrologie.

---

### **III-2-1- Technique de traçage**

La technique de traçage en hydrogéologie, est utilisée pour repérer, et le plus souvent pour mesurer les teneurs en composés chimiques, en substances colorées, en molécules isotopiques stables ou radioactifs, présents en un point du cycle hydrologique placé sous étude.

### **III-2-2- Utilisation des isotopes stables en hydrogéologie**

La méthode isotopique peut apporter des explications supplémentaires sur des problèmes hydrogéologiques que d'autres méthodes dites classiques (géophysiques, géochimiques, et les méthodes de l'hydrodynamisme de l'aquifère).

Les isotopes stables ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) sont utilisés pour déterminer :

- les origines et le processus de recharge des eaux souterraines ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) ;
- les possibilités de mélange entre les eaux souterraines et les eaux de surfaces d'une part et entre les aquifères d'autre part ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) ;
- les origines probables (anthropogéniques ou naturelles) des pollutions des eaux souterraines ( $^{15}\text{N}$ ) ;
- les origines de la salinité de l'eau et le mouvement des eaux souterraines ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ).

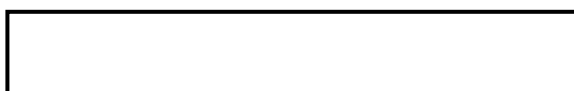
#### **III-2-2-1- Fractionnement isotopique**

Lors d'un changement de phase (par condensation ou par évaporation), il y a apparition d'un fractionnement isotopique  $\alpha$  qui décroît lorsque la température augmente tel qu'il se traduit par la séparation des isotopes lourds et des isotopes légers.  $\alpha$  est le quotient entre les rapports isotopiques des deux phases :

$$\alpha_{1-2} = R(\text{phase1})/R(\text{phase2})$$

(14)

$\alpha$  est proche de 1, il est thermodépendant et s'exprime généralement par rapport à la grandeur mesurée delta :



$$\alpha_{1-2} = (1000 + \alpha_1) / (1000 + \alpha_2) \quad (15)$$

Exemple :

$$\alpha^{18}\text{O} = \frac{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{liquide}}}{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{vapeur}}} \quad \alpha\text{D} = \frac{\left( \frac{\text{D}}{\text{H}} \right)_{\text{liquide}}}{\left( \frac{\text{D}}{\text{H}} \right)_{\text{vapeur}}}$$

C'est le facteur de fractionnement  $\alpha$  qui traduit l'enrichissement ou appauvrissement isotopique de l'une des phases par rapport à l'autre.

Les isotopes se fractionnent suivant différent phénomène tel que :

- *la variation de la température :*

La vapeur est toujours appauvrie en isotopes lourds au détriment du liquide qui lui a donné naissance, c'est-à-dire que le condensat est riche en isotopes lourds par rapport à la vapeur d'origine.

- *la variation saisonnière :*

Dans les zones tempérées et polaires, les précipitations hivernales sont appauvries en isotopes légers,

- *l'effet de continentalité :*

Plus on va vers le continent, plus les précipitations sont appauvries en isotopes légers,

- *l'effet de latitude et d'altitude :*

En altitude les précipitations sont appauvries en isotopes légers.

### III-2-2-2- Principes du traçage

Connaissant les teneurs en isotopes stables ( $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$ ) dans les eaux souterraines, on peut donc connaître l'origine de la recharge de ces eaux.

En traçant  $\delta\text{D}$  en fonction de  $\delta^{18}\text{O}$  (cf. **Figure 11**), on remarque la présence d'une corrélation entre les deux.

Pour les eaux rechargées par :

➤ **Les précipitations :**

L'équation de la droite est :

$$\delta D = 8\delta^{18}O + d$$

(16)

→ C'est la Droite Météorique Mondiale ou DMM  
Où **d** est l'excès de deutérium

La valeur de **d** peut varier d'une région à une autre selon l'origine de la vapeur qui condense :

- pour **d = +10 ‰** (cas le plus fréquent) : la précipitation provient de la vapeur océanique,
- pour **d = +22 ‰** : la précipitation provient des pluies du domaine méditerranéen oriental.

➤ **Evaporation :**

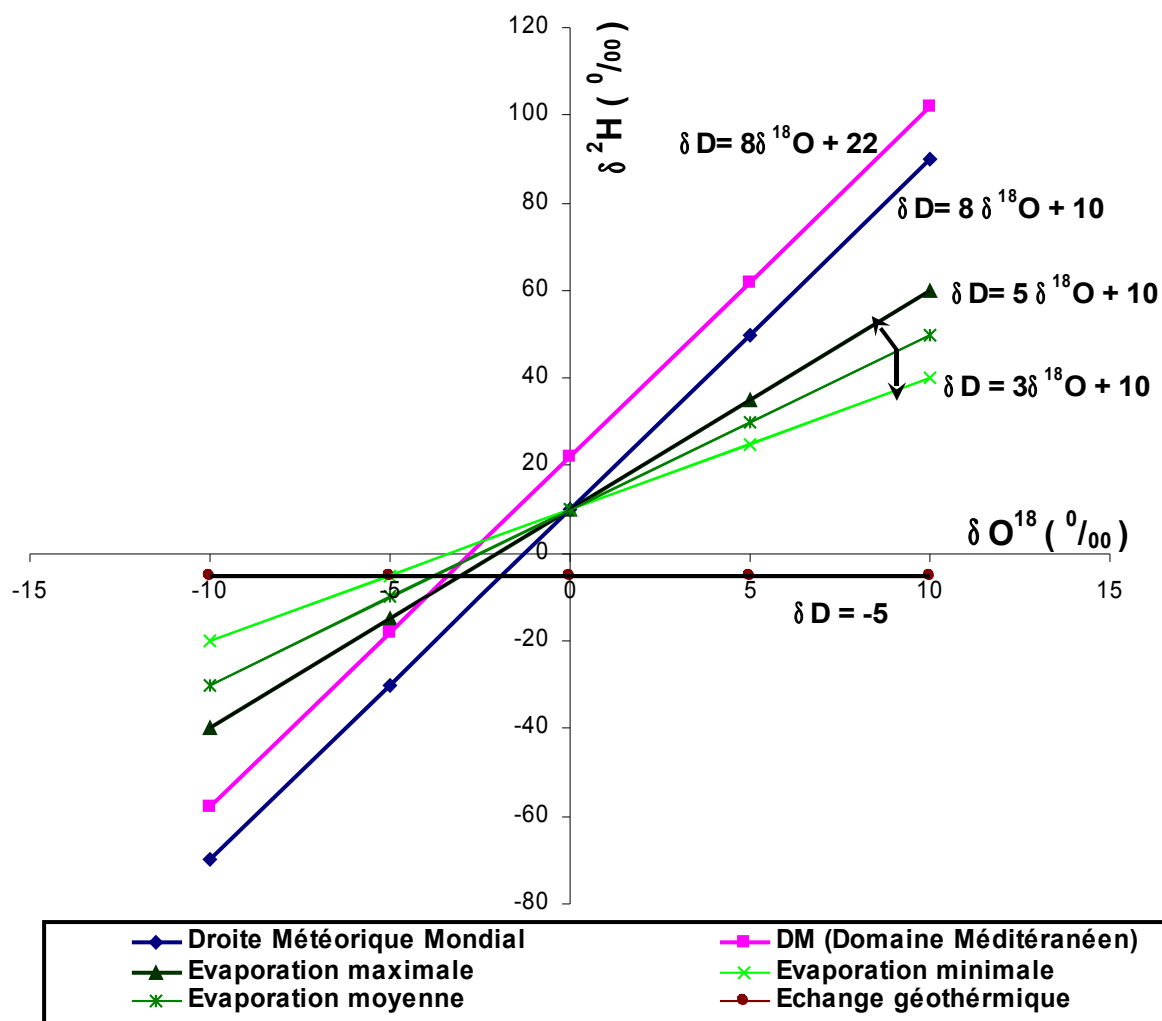
La droite d'équation a une pente plus faible que celle de la précipitation.

Sa valeur est comprise entre 3 et 5. La droite de l'évaporation sera donc sous celle de la précipitation.

➤ **Echange géothermique :**

On a une droite horizontale sous la droite de la précipitation. Cela veut dire que l'échange géothermique n'affecte que les teneurs en  $^{18}O$ .

En effet dans le domaine géothermique (à température élevée), l'eau entre en réaction avec les minéraux du milieu riche en oxygène, ce qui augmente la teneur en oxygène<sup>18</sup> de l'eau surchauffée.



**Figure 11 :** Diagramme  $\delta D$  en fonction  $\delta^{18}O$

### **III-2-3- Utilisation des isotopes radioactifs en hydrogéologie**

En hydrogéologie, les isotopes radioactifs sont utilisés surtout pour déterminer l'âge, le temps de résidence, la direction et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

#### **III-2-3-1- Tritium**

Le Tritium ( $^3H$ ) est un excellent indicateur d'un récent remplissage du réservoir souterrain.

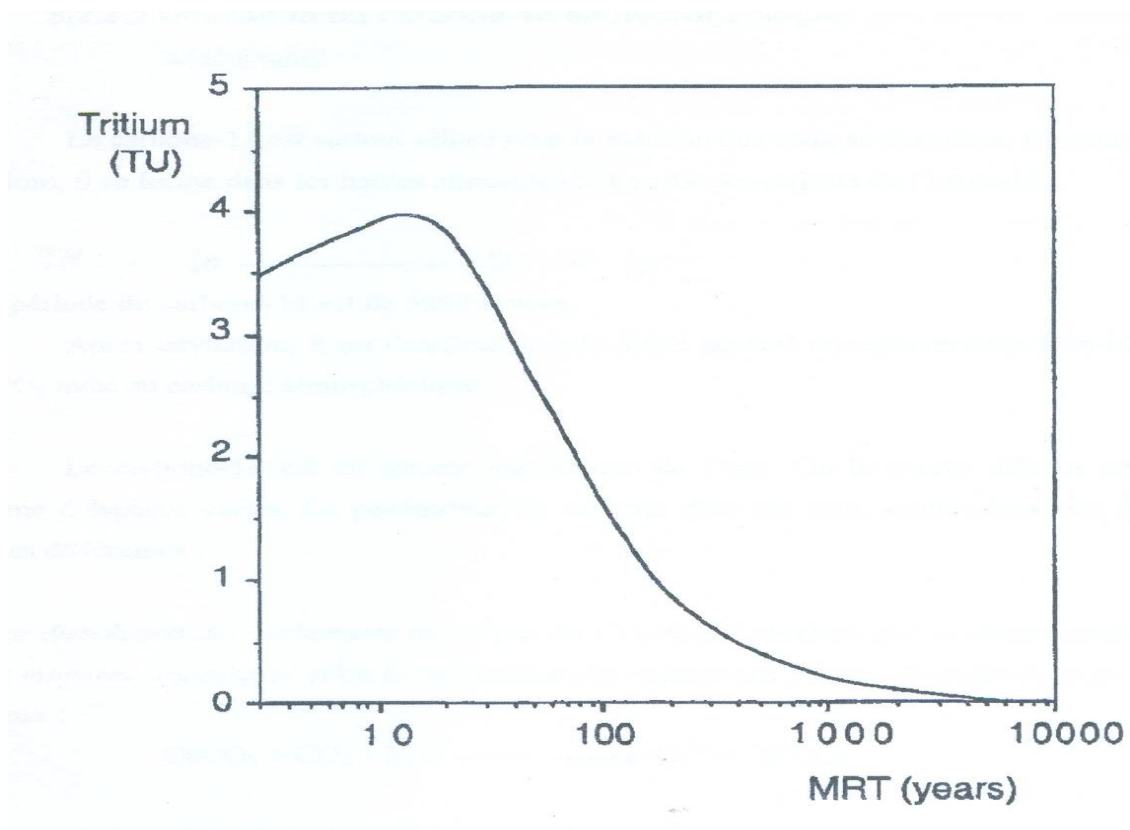
En effet, si on considère que les précipitations infiltrées avant les essais contiennent 4 à 2 TU de  $^3H$ , avec la désintégration naturelle actuellement, il ne resterait que 1TU. Deux cas peuvent alors se présenter :



- ☞ 1<sup>er</sup> cas : si l'eau contient plus de 1TU de  $^3\text{H}$ , cela veut dire que l'eau est récente (contribution d'eau récente) et qu'elle est rechargée soit par la précipitation, soit par l'infiltration des eaux de surface (lacs, rivières, canaux,...).
- ☞ 2<sup>ème</sup> cas : si l'eau a une teneur en  $^3\text{H}$ , inférieure à 1TU, cela veut dire que l'eau est ancienne. L'aquifère n'a donc en effet reçu aucune récente recharge. C'est le cas des systèmes fermés dont le temps de circulation entre la zone de recharge et le point d'échantillonnage est assez long. C'est aussi le cas des régions arides et semi-arides où les précipitations se perdent par évaporation et évapotranspiration avant d'atteindre l'aquifère.

Du fait que le tritium est un traceur intime de l'eau, son comportement est identique à celui de l'eau. Ce qui nous amène à dire que le tritium est un traceur précieux pour l'étude des eaux souterraines.

Pour le calcul du temps de résidence de l'eau, on utilise la courbe exponentielle de décroissance du tritium, extrapolée à partir des valeurs expérimentales de Pretoria (1958-1985).



**MRT : « Mean Residence Time » ou Temps Moyen de Résidence**

**Figure 12** : Courbe de décroissance exponentielle en tritium de Pretoria (1958-1985)

### III-2-3-2- Carbone<sup>14</sup>:

Le carbone-14 (<sup>14</sup>C) est surtout utilisé pour la datation des eaux souterraines. Ainsi, l'âge de l'eau souterraine est défini comme l'intervalle de temps durant lequel elle a été isolée de l'atmosphère, c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu d'échange entre le système aquifère et atmosphère.

L'équation générale utilisée pour la datation est :

$$A(t) = \int_0^{\infty} A_0(t-\tau) \cdot e^{-\lambda\tau} \cdot g(\tau) \cdot d\tau \quad (17)$$

Avec  $A_0(t-\tau)$  : activité du <sup>14</sup>C à l'instant initial (pMC)  
 $A(t)$  : activité observée à un instant  $t$  (pMC)  
 $\lambda$  : constante de désintégration du <sup>14</sup>C  
 $g(\tau)$  : fonction de distribution du temps de résidence

En bref, dans un système où le CO<sub>2</sub> domine, il est plus fiable d'utiliser le <sup>14</sup>C que le tritium pour les aquifères qui ont reçu des récentes recharges. Tandis que pour un système où les carbonates qui dominent, le <sup>14</sup>C sert surtout à donner des informations sur les directions et les vitesses d'écoulement.

## DEUXIEME PARTIE

## **CHAPITRE IV : METHODES D'ECHANTILLON- NAGE ET D'ANALYSE**

Deux campagnes ont été effectuées dans le cadre du projet MAG/8/003 intitulé « Intégration des techniques isotopiques dans le projet national d'exploitation des eaux souterraines du Sud-Ouest de Madagascar ». La première campagne a été réalisée du 02 au 12 juin 2003 et la deuxième du 09 au 12 juillet 2003.

La première campagne a été consacrée à l'échantillonnage d'eau (eau de surface et eau souterraine), tandis que la deuxième a été basée sur les études géologiques et hydrogéologiques c'est-à-dire ayant comme objectifs d'apporter certaines précisions sur les données géologiques acquises lors de la première campagne et d'étudier le système hydrogéologique de la zone d'étude.

La zone d'échantillonnage est située dans la région de Menabe. Au total 29 échantillons d'eau ont été mesurés et collectés dont 21 se trouvent dans notre zone d'étude.

Les eaux échantillonnées sont destinées aux analyses chimiques et isotopiques. Ainsi, à chaque point d'eau, on a fait des mesures in situ et des préparations des eaux échantillonnées pour les analyses au laboratoire.

### **IV-1- MESURES IN SITU**

#### **IV-1-1- Les appareils de mesures :**

Plusieurs appareils de mesures ont été utilisés durant cette campagne d'échantillonnage à savoir :

- Le GPS (Global Positioning System) Magellan / GPS 315, pour mesurer la position géographique (latitude, longitude et altitude) de la zone d'étude ;
- L'altimètre, pour mesurer l'altitude d'une position donnée ;
- Le « Dissolved Oxygen Meter » (HACH SensION 6), pour mesurer l'oxygène dissout dans les échantillons d'eau ;
- La conductimètre (HACH SensION 5), pour mesurer la conductivité, la salinité, le TDS et la température ;
- Le pH-mètre (WTW – pH 330/ set 1), pour mesurer le pH de l'eau ;
- Le « test-strips » (papier indicateur comme le papier pH) pour nitrate et nitrite (HACH), pour mesurer le taux de nitrate dans un échantillon d'eau donné.

### **IV-1-2- Mesures in-situ des points d'eau visités :**

Nous avons enregistré la position géographique (latitude, longitude et altitude) du lieu à l'aide d'un GPS. Après, on a vérifié l'altitude d'une position donnée par l'Altimètre.

Ensuite, on a pris des photos qui montrent l'environnement entourant les points d'eau.

Le tableau (10) résume les paramètres géographiques des points d'eau visités.

**Remarque :** un «Log-Book » a été utilisé pour relever les observations in-situ et pour enregistrer les différentes valeurs mesurées.

### **IV-1-3- Mesures in-situ des échantillons d'eau prélevés :**

Avant de procéder à l'échantillonnage, les puits et forages équipés ont été pompés à un débit constant pendant quelques minutes. Ensuite, l'eau collectée des puits et forages est séparément mise dans :

- un bêcher pour les mesures du pH, de la température, du TDS (mg/l), de la salinité (‰), l'oxygène dissout (mg/l) et de la conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ );
- un récipient quelconque, pour déterminer le goût ;
- un autre récipient, pour mesurer la teneur en azote, l'alcalinité en  $\text{CaCO}_3(\text{mg}/\text{l})$  et l'oxygène dissout dans l'eau (mg/l).

Le tableau (11) donne les valeurs de ces paramètres.

#### **Remarques :**

##### **☞ Mesure de Nitrate :**

Lors de la campagne, nous avons procédé à la mesure de la concentration de l'azote dans l'eau afin de pouvoir déterminer la concentration du nitrate.

Cette concentration est donnée par le « test-strips » qu'on plonge dans l'échantillon (en comparant la valeur de ce papier avec celle sur la boîte).

Pour obtenir la concentration X du nitrate, on utilise la formule suivante :

$$\boxed{X(\text{NO}_3^-) = \frac{X(\text{N}) \cdot 62(\text{NO}_3)}{14(\text{N})}} \quad (18)$$

Où  $X(\text{NO}_3^-)$  : concentration du nitrate  
 $X(\text{N})$  : concentration de l'azote (lue sur le test-strip)  
 $62(\text{NO}_3)$  : masse atomique du nitrate  
 $14(\text{N})$  : masse atomique de l'azote

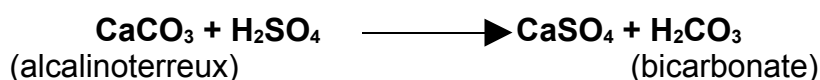
#### ☞ Mesure de l'alcalinité :

Pour la mesure de l'alcalinité, nous avons mis l'échantillon dans un bêcher de 100ml et ajouté un sachet de phénol phtaléine (indicateur coloré) tout en agitant le bêcher.

Et comme résultats, deux cas peuvent se présenter :

- si l'eau change de couleur (en rose) : il faut ajouter quelques goûtes d' $\text{H}_2\text{SO}_4$  (titration avec l'acide fort) dans le bêcher tout en l'agitant jusqu'à ce que l'eau change de couleur.

A noter que l'indicateur coloré est utilisé afin de pouvoir suivre les réactions qui se produisent dans l'eau après avoir y ajouté de l'acide fort. Le changement de couleur traduit la fin des réactions.



- si l'eau ne change pas de couleur, il faut verser un sachet de bromocrésol (2<sup>ème</sup> indicateur coloré) dans le bêcher et normalement l'eau aura une couleur bleuâtre.

C'est le cas de tous les échantillons que nous avons collectés. Après, nous avons fait la titration toujours avec de l'acide sulfurique jusqu'à ce que l'eau change de couleur.

Ensuite, nous avons procédé à la lecture de la valeur inscrite sur le titrateur numérique ( Model 16900 – HACH ) qui correspond au volume d'acide utilisé pour pouvoir séparer totalement les carbonates dans les molécules alcalino-terreux. Cette valeur sera multipliée par le facteur multiplicatif qui dépend de la normalité du titrant utilisé.

Ainsi, nous pouvons avoir la valeur de l'alcalinité suivant la relation :

$$\text{Alcalinité} = V \times C$$

(19)

Avec l'**alcalinité** est exprimé en terme de  $\text{CaCO}_3$

**V** : Volume d'acide versé (ml)

**C** : Coefficient multiplicateur (0.1 ou 1)

Concentration en $\text{CaCO}_3$ (mg/l)	Volume d'eau Utilisé (ml)	Normalité du titrant (mg/l)	Facteur multiplicatif
10 – 40	100	0.1600	0.1
100 – 400	100	1.600	1.0

**Tableau 9** : Normalité du titrant utilisé

## **IV-2- PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS À ANALYSER AU LABORATOIRE**

Plusieurs échantillons d'eau ont été collectés pour les analyses chimiques et isotopiques. A chaque échantillon prélevé correspond une bouteille, selon les types d'analyses à effectuer :

- Anions : les échantillons ont été mis dans une bouteille de 500ml,
- Cations : nous avons mis les échantillons dans une bouteille de 500ml, et 3 gouttes d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) ont été ajoutées pour la fixation des cations.
- Le tritium ( $^3\text{H}$ ) : l'échantillon a été mis dans une bouteille de 500ml,
- Le deutérium ( $^2\text{H}$ ) et l' $^{18}\text{O}$  : nous les avons collectés dans une bouteille de 50ml,
- L'azote-15 ( $^{15}\text{N}$ ) : une autre bouteille de 500ml a été utilisée et 2 gouttes d' $\text{H}_2\text{SO}_4$  ont y été ajoutées pour éviter les réactions micro biologiques et pour obtenir l'azote du nitrate,
- Le strontium-87 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) et  $\text{Sr}^{2+}$  : nous avons utilisé d'abord une bouteille de 50ml avant de le transvaser dans une autre bouteille de 10ml. Et puis, on a filtré l'échantillon avec un filtre micro pore pour s'assurer que seuls les espèces dissoutes seront analysées. Pour terminer, 2 gouttes d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) ont été ajoutées pour fixer le  $\text{Sr}^{2+}$  dans la solution.

Chaque échantillon est facilement identifiable par leurs propres étiquette de renseignement collées sur chaque bouteille. Les cases contiennent le numéro de code de l'échantillon, nom de localité, nom du pays : Madagascar, et le type d'analyse à faire ; tous ses renseignements sont inscrits à l'aide d'un feutre indélébile.

### IV-3- ANALYSES AU LABORATOIRE

Une fois l'échantillonnage terminé, les échantillons passent aux analyses chimiques et isotopiques. Du fait du programme du projet AIEA, on devait envoyer les échantillons en Afrique du sud (au laboratoire de l'AIEA) pour les analyses chimiques et isotopiques ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$  et  $^{87}\text{Sr}$ ), et en Egypte pour l'analyse de l'azote-15 ( $^{15}\text{N}$ )

Concernant les analyses chimiques, nous avons mesuré les teneurs en ions majeurs :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , pour les cations et  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , pour les anions. Et c'est à partir de ces ions que l'on peut faire la classification de l'eau.

Pour cela, le diagramme de Piper (cf. Figure13) et Schoeller-Berkaloff seront utilisés pour trouver les faciès chimiques de l'eau. L'unité utilisée dans ces diagrammes est le méq/l (une unité qui correspond à un besoin de normalisation ou unité de la masse équivalente).

Ces diagrammes, après avoir été traités sur le logiciel Aquachem (Piper) et Excel (Schoeller), peuvent être représentés par le schéma suivant.

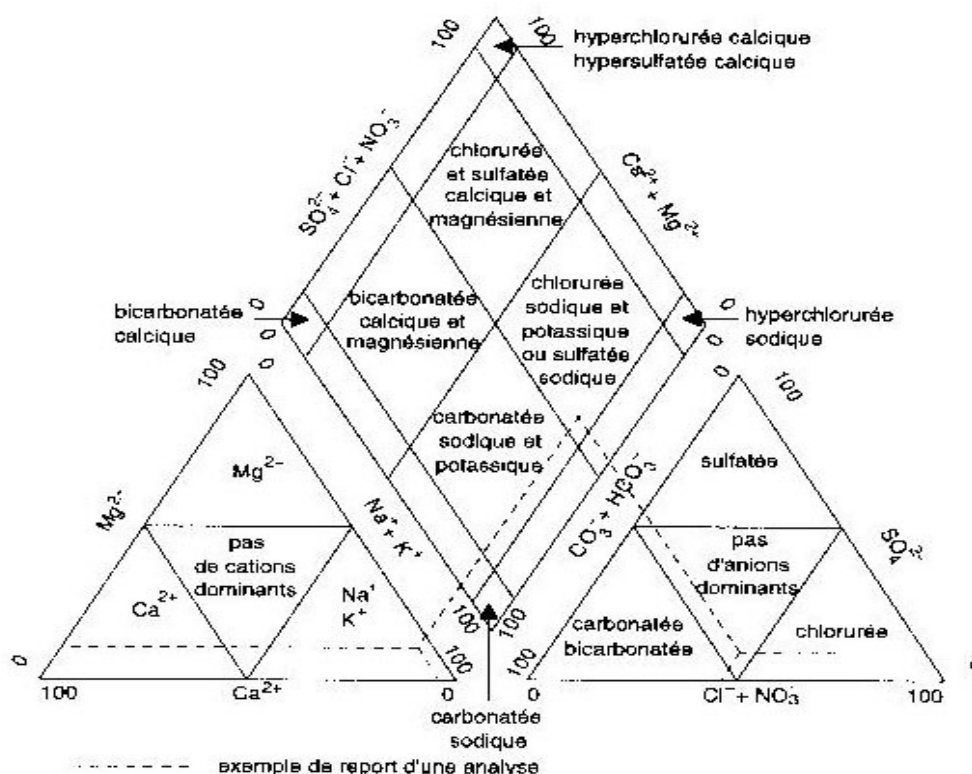


Figure 13 : DIAGRAMME DE PIPER (FACIES TYPE)



## CHAPITRE V : RESULTATS

Les tableaux (10, 11, 12, 13, 14, 15) regroupent toutes les données que nous avons pu recueillir tant sur le terrain qu'au laboratoire.

- Le tableau 10, représente les observations générales sur tous les points d'eau visités ( type des puits ou forages de chaque site visité ainsi que leur code, caractéristique et utilisation de l'eau par les utilisateurs concernés),

- Le tableau 11 et 12 récapitulent les résultats des mesures in-situ des points d'eau visités ainsi que les échantillons d'eau prélevés (paramètres géographiques des points d'eau visités et paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés),

- Le tableau 13, 14 et 15 résument les résultats des analyses au laboratoire des échantillons prélevés c'est-à-dire éléments majeurs exprimés soit en ppm (mg/l) ou en méq/l et isotopiques ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ).

La figure (14) récapitule la carte géologique de la zone d'étude, ainsi que l'emplacement de tous les points d'eaux à échantillonner ( carte géologique d'échantillonnage d'eau).

Les coupes de forages et des puits visités, ainsi que quelques photos représentatives des points d'eau ont mis en Annexe I, II et IV.

<b>Codes</b>	<b>SITES</b>	<b>OBSERVATIONS</b>
<b>B1</b>	Marovoay	- forage de JICA (à pédale), situé près d'une école - l'eau a une odeur suffocante - utilisée pour les besoins quotidiens
<b>B2</b>	Manamby	- forage artésien avec un débit $Q=6.8\text{l/s}$ - eau de bonne qualité - eau destinée pour les besoins journaliers
<b>B3</b>	SUCOMA-Betsipotika	- forage de la SUCOMA ( fabriqué par SIF-BACHY) - eau de bonne qualité - eau destinée pour les besoins industriels
<b>B4</b>	Croisement BST	- forage de JICA - l'eau a une odeur suffocante - à 500m, à l'Est, le sol est salé avec $E_c= 10.18\text{mS/cm}$ - eau utilisée pour les usages quotidiens
<b>B5</b>	Ampantra	- forage de JICA, se trouve près d'une école - eau de bonne qualité - eau destinée pour l'usage quotidienne
<b>B6</b>	Tsimahavaobe	- forage artésienne de la JIRAMA, qui alimente le village de Morondava

<b>W1</b>	Morafeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits moderne fabriqué par l'UNICEF</li> <li>- eau de bonne qualité</li> <li>- eau destinée pour les besoins quotidiens</li> <li>- présence d'étables aux environs de la borne</li> </ul>
<b>W2</b>	Ambalarano	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits moderne</li> <li>- eau destinée pour l'usage quotidienne</li> </ul>
<b>W3</b>	Tanandava West	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits moderne de l'UNICEF</li> <li>- eau devient rougeâtre vers la fin de l'après midi</li> <li>- utilité journalière</li> </ul>
<b>W4</b>	Tanandava Benjamino	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits de l'UNICEF</li> <li>- eau colorée (jaunâtre)</li> <li>- ensablement du puits</li> <li>- eau destinée pour les besoins domestiques</li> </ul>
<b>W5</b>	Benjamino	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits de l'UNICEF</li> <li>- eau de couleur jaune</li> <li>- ensablement du puits</li> </ul>
<b>W6</b>	Bekinagna Ankilivalo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits de l'UNICEF</li> <li>- eau trouble et saumâtre après la pluie</li> <li>- quand on pompe pendant un certain temps, des débris de fer montent avec l'eau</li> <li>- eau destinée pour les besoins quotidiens</li> </ul>
<b>W7</b>	Tsaramandroso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits équipé</li> <li>- eau de couleur jaune (le matin)</li> <li>- après puisage, présence de dépôts dans le seau</li> </ul>
<b>W8</b>	Tanambao Saraha	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits de l'UNICEF, situé à 20m de la SUCOMA</li> <li>- eau saumâtre</li> <li>- niveau d'eau très bas, la montée est difficile</li> <li>- présence d'étables près de la borne</li> </ul>
<b>W9</b>	Betesda Well	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits semi-moderne(non protégé)</li> <li>- eau salée avec <math>E_c = 6.250 \text{ mS/cm}</math></li> <li>- existence d'un forage en panne qui fournissait de l'eau douce à quelques mètre</li> <li>- présence de sables fins noirs sur le canal d'évacuation</li> <li>- eau utilisée uniquement pour les usages quotidiens</li> </ul>
<b>W10</b>	Betesda Hole	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits traditionnel (simple trou) situant au Nord-Ouest du puits précédant (tout près du canal d'irrigation de l'usine SUCOMA)</li> <li>- eau douce, mais trouble</li> <li>- eau destinée pour les besoins journaliers</li> </ul>
<b>W11</b>	Ankilizato Avaradrova	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits de l'UNICEF</li> <li>- eau de bonne qualité</li> <li>- aire d'assainissement non soigné</li> <li>- puits près d'une étable</li> <li>- eau utilisée pour les besoins quotidiens</li> </ul>
<b>W12</b>	Carroo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- puits de l'UNICEF, mais la pompe est abîmée</li> <li>- eau saumâtre</li> <li>- existence d'une étable tout près du puits</li> <li>- utilisée pour les usages quotidiens</li> </ul>

<b>C1</b>	Dabara en aval	- canal d'irrigation - utilisé uniquement pour laver les linges
<b>C2</b>	Betesda Canal	- canal d'irrigation situé à 2.5m au Nord du puits traditionnel - eau en provenance de l'usine SUCOMA
<b>R1</b>	Dabara	- barrage de Dabara - utilisé par les habitants pour laver les linges et pour abreuver les bovins

**Tableau 10 :** Observations générales sur les points d'eau visités

*Rapport-gratuit.com*   
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Date	Sites	Codes	Latitude	X(m)	Longitude	Y(m)	Altitude (m)	Formations géologiques
06/05/03	<b>Marovoay</b>	B1	<b>S20 18 43</b>	<b>183748</b>	<b>E44 21 57</b>	<b>642432</b>	<b>14</b>	<b>Alluvion</b>
06/05/03	Manamby	B2	<b>S20 24 24</b>	<b>229182</b>	<b>E44 48 00</b>	<b>632458</b>	<b>40</b>	<b>Laterite</b>
06/06/03	SUCOMA Betsipotika	B3	<b>S20 18 31</b>	<b>193402</b>	<b>E44 27 30</b>	<b>642920</b>	<b>25</b>	Alluvion, Grès continentaux
06/06/03	Croisement BST	B4	<b>S20 17 46</b>	<b>187439</b>	<b>E44 24 05</b>	<b>644231</b>	<b>14</b>	<b>Alluvion</b>
06/10/03	Ampandra	B5	<b>S20 18 14</b>	<b>190669</b>	<b>E44 25 56</b>	<b>643409</b>	<b>34</b>	<b>Alluvion</b>
06/10/03	Tsimahavaobe	B6	<b>S20 17 57</b>	<b>178103</b>	<b>E44 18 43</b>	<b>643775</b>	<b>8</b>	<b>Alluvion</b>
06/05/03	<b>Morafeno</b>	<b>W1</b>	<b>S20 17 19</b>	<b>181163</b>	<b>E44 20 29</b>	<b>644982</b>	<b>7</b>	Alluvion
06/05/03	Ambalarano	W2	<b>S20 17 11</b>	<b>182001</b>	<b>E44 20 58</b>	<b>645239</b>	<b>10</b>	<b>Alluvion</b>
06/05/03	Tanandava West	W3	<b>S20 17 49</b>	<b>182654</b>	<b>E44 21 20</b>	<b>644079</b>	<b>12</b>	<b>Alluvion</b>
06/05/03	Tanandava Benjamino	W4	<b>S20 17 54</b>	<b>182801</b>	<b>E44 21 25</b>	<b>643927</b>	<b>15</b>	<b>Alluvion</b>
06/05/03	Benjamino	W5	<b>S20 18 11</b>	<b>182750</b>	<b>E44 21 23</b>	<b>643404</b>	<b>15</b>	<b>Alluvion</b>
06/06/03	Bekinagna-Ankilivalo	W6	<b>S20 17 48</b>	<b>212182</b>	<b>E44 38 18</b>	<b>644456</b>	<b>58</b>	Alluvion, Grès continentaux
06/06/03	Tsaramandroso	W7	<b>S20 21 12</b>	<b>211003</b>	<b>E44 37 35</b>	<b>638171</b>	<b>58</b>	<b>Alluvion</b>
06/06/03	Tanambao Saraha	W8	<b>S20 18 38</b>	<b>193521</b>	<b>E44 27 34</b>	<b>642706</b>	<b>29</b>	Alluvion, Grès continentaux
06/07/03	Betesda Puits	W9	<b>S20 15 28</b>	<b>188170</b>	<b>E44 24 32</b>	<b>648483</b>	<b>4</b>	<b>Alluvion</b>
06/07/03	Betesda Vovo	W10	<b>S20 15 21</b>	<b>188081</b>	<b>E44 24 29</b>	<b>648697</b>	<b>4</b>	<b>Alluvion, Latérite</b>
06/09/03	Ankilizato Avaradrova	W11	<b>S20 24 20</b>	<b>255062</b>	<b>E45 02 53</b>	<b>632817</b>	<b>188</b>	<b>Marne jaune, Alluvion</b>
06/09/03	Ankilizato Caroo	W12	<b>S20 24 38</b>	<b>254748</b>	<b>E45 02 42</b>	<b>632261</b>	<b>185</b>	<b>Marne jaune, Alluvion</b>
06/06/03	Dabara en aval	C1	<b>S20 18 36</b>	<b>193549</b>	<b>E44 27 35</b>	<b>644231</b>	<b>29</b>	<b>Alluvion</b>
06/07/03	Betesda Canal	C2	<b>S20 15 21</b>	<b>188081</b>	<b>E44 24 27</b>	<b>656621</b>	<b>4</b>	<b>Alluvion, Latérite</b>
06/05/03	Dabara	R1	<b>S20 24 18</b>	<b>227383</b>	<b>E44 46 58</b>	<b>632624</b>	<b>70</b>	<b>Sable, Marne, Calcaire, Dolomie</b>

**Tableau 11 : RESULTATS DES MESURES IN-SITU DES POINTS D'EAUX VISITEES**

<b>Sites</b>	<b>pH</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Conductivités (µs/cm)</b>	<b>TDS (mg/l)</b>	<b>Salinité (‰)</b>	<b>Azote (mg/l)</b>	<b>Nitrate en NO<sub>3</sub> (mg/l)</b>	<b>OD (mg/l)</b>	<b>Alcalinité (mg/l)</b>
Marovoay	<b>6,68</b>	<b>27,4</b>	<b>450</b>	<b>225</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>274</b>	<b>41,5</b>
Manamby	<b>6,35</b>	<b>28</b>	<b>170,6</b>	<b>85,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3,34</b>	<b>48,1</b>
SUCOMA Betsipotika	<b>6,95</b>	<b>28,6</b>	<b>332</b>	<b>165,8</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6,35</b>	<b>92</b>
Croisement BST	<b>6,91</b>	<b>27,8</b>	<b>417</b>	<b>208</b>	<b>0,8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1,2</b>	<b>125</b>
Ampandra	<b>6,73</b>	<b>27</b>	<b>366</b>	<b>183,7</b>	<b>0,2</b>		<b>0</b>	<b>2,31</b>	<b>82</b>
Tsimahavaobe	<b>6,33</b>	<b>27</b>	<b>507</b>	<b>254</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,42</b>	<b>114</b>
Morafeno	<b>6,72</b>	<b>28,6</b>	<b>416</b>	<b>207</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>8,86</b>	<b>1,7</b>	<b>72,9</b>
Ambalarano	<b>6,88</b>	<b>28</b>	<b>480</b>	<b>261</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3,23</b>	<b>24,4</b>
Tanandava West	<b>7,06</b>	<b>28,6</b>	<b>450</b>	<b>243</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,1</b>	<b>62,2</b>
Tanandava Benjamino	<b>6,99</b>	<b>28,4</b>	<b>450</b>	<b>243</b>	<b>0,2</b>	<b>0,5</b>	<b>2,21</b>	<b>1,6</b>	<b>27,7</b>
Benjamino	<b>7,04</b>	<b>28</b>	<b>422</b>	<b>211</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,22</b>	<b>38,9</b>
Bekinagna- Ankilivalo	<b>6,37</b>	<b>26,5</b>	<b>557</b>	<b>279</b>	<b>0,3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,68</b>	<b>156</b>
Tsaramandroso	<b>6,43</b>	<b>27,4</b>	<b>201</b>	<b>100,8</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,66</b>	<b>78,9</b>
Betesda Puits	<b>6,93</b>	<b>27,2</b>	<b>6250</b>	<b>3120</b>	<b>3,4</b>	<b>0,5</b>	<b>2,21</b>	<b>4,7</b>	<b>261</b>
Tanambao Saraha	<b>6,94</b>	<b>28,7</b>	<b>677</b>	<b>338</b>	<b>0,3</b>	<b>2</b>	<b>8,86</b>	<b>3,46</b>	<b>112</b>
Betesda Vovo	<b>6,65</b>	<b>22,5</b>	<b>261</b>	<b>130,7</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>7,24</b>	<b>109</b>
Ankilizato Avaradrova	<b>5,83</b>	<b>28,9</b>	<b>507</b>	<b>251</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>8,86</b>	<b>2,84</b>	<b>45</b>
Ankilizato Caroo	<b>6,13</b>	<b>29,7</b>	<b>391</b>	<b>195,6</b>	<b>0,2</b>	<b>5</b>	<b>22,14</b>	<b>3,03</b>	<b>46,1</b>
Dabara en aval	<b>7,4</b>	<b>26,4</b>	<b>138,1</b>	<b>69</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6,7</b>	<b>54</b>
Betesda Canal	<b>7,08</b>	<b>21,5</b>	<b>144,4</b>	<b>72,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>2,21</b>		
Dabara	<b>7,66</b>	<b>27</b>	<b>127</b>	<b>63,8</b>	<b>0,3</b>		<b>0</b>		

Tableau 12 : RESULTATS DES MESURES IN-SITU DES ECHANTILLONS D'EAUX PRELEVEES												
Codes	SAMPLE SAMPLE	SAMPLE SITE SAMPLE SITE		Ca	Na	Mg	K	NO3	Cl	SO4	HCO3	
Codes	CODE	NAME	Type Water	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	MNT
	CODE	NAME	Type Water	Ca (méq/l)	Na (méq/l)	Mg (méq/l)	K (méq/l)	NO3 (méq/l)	Cl (méq/l)	SO4 (méq/l)	HCO3 (méq/l)	mg/l
B4	CROI BRH 66,3	Croisement BST	Borehole	41	29	14,1	11,5	0	38	50	170	353,6
B4	CROI BRH 66,3	Croisement BST	Borehole	2,05	1,26	0,59	0,29	0,00	1,04	1,07	2,79	9,09
B3	BETS BRH SUCOMA	SUCOMA Betsipotika	Borehole	31	22,5	10,3	10,4	0	13	27	152	266,2
B3	BETS BRH SUCOMA	SUCOMA Betsipotika	Borehole	1,55	0,98	0,43	0,27	0,00	0,56	0,37	2,49	6,64
B5	68 Ecole BRH	Ampandra	Borehole	29	26	11	9	0	31	36	120	262
B5	68 Ecole BRH	Ampandra	Borehole	1,45	1,13	0,46	0,23	0,00	0,75	0,87	1,97	6,86
B1	MARO BRH 59,1	Marovoay	Borehole	28	41,5	13,2	13,8	0	41	71	130	338,5
B1	MARO BRH 59,1	Marovoay	Borehole	1,4	1,80	0,55	0,35	0,00	1,48	1,15	2,13	8,87
B6	Artesian TSIM JIRAMA	Tsimahavaobe	Borehole	18	63	12	16	3,3	48	50	134	344,3
B6	Artesian TSIM JIRAMA	Tsimahavaobe	Borehole	0,9	2,74	0,50	0,41	0,05	1,04	1,35	2,20	9,19
B2	Artesian Well MANA	Manamby	Borehole	14,2	8,6	6,5	6,4	1,2	10,5	9	74	130,4
B2	Artesian Well MANA	Manamby	Borehole	0,71	0,37	0,27	0,16	0,02	0,19	0,30	1,21	3,23
W9	BETEW	Betesda	Well	382	948	10,7	108	35	1350	850	390	4075,7
W9	BETEW	Betesda	Well	19,1	41,22	0,45	2,77	0,56	17,71	38,03	6,39	126,23
W2	AMBA W 12754	Ambalarano	Well	74	18,3	11,6	11	2,5	21	24	274	436,4
W2	AMBA W 12754	Ambalarano	Well	3,7	0,80	0,48	0,28	0,04	0,50	0,59	4,49	10,88
W4	TANA H. W 12770	Tanandava Benjaminio	Well	60	18,4	16,9	7,1	3,6	14,5	13	274	407,5
W4	TANA H. W 12770	Tanandava Benjaminio	Well	3	0,80	0,70	0,18	0,06	0,27	0,41	4,49	9,92
W3	TANA W 12777	Tanandava West	Well	58	15,8	17,8	14,5	3,5	15	13,5	286	426,1
W3	TANA W 12777	Tanandava West	Well	2,9	0,69	0,74	0,37	0,09	0,28	0,42	4,69	10,18
W5	BENJ W 12811	Benjaminio	Well	58	15	12,1	4,5	1,8	14	9,5	250	364,9
W5	BENJ W 12811	Benjaminio	Well	2,9	0,65	0,50	0,12	0,03	0,20	0,39	4,10	8,89
W1	MORA W 12681	Morafeno	Well	55,4	12,5	8,3	14,9	20	12	16	210	349,1
W1	MORA W 12681	Morafeno	Well	2,77	0,54	0,35	0,38	0,32	0,33	0,34	3,44	8,47
W8	TANA W 12787	Tanambao Saraha	Well	54	43	24,7	28	132	54	38	180	553,7
W8	TANA W 12787	Tanambao Saraha	Well	2,7	1,87	1,03	0,72	2,13	0,79	1,52	2,95	13,71
W6	BEKI W 12642	Bekinagna Ankilivato	Well	48,5	36,7	16,5	18,4	0	56	30	228	434,1
W6	BEKI W 12642	Bekinagna Ankilivato	Well	2,43	1,60	0,69	0,47	0,00	0,63	1,58	3,74	11,12
W11	ANKI WELL	Ankilizato Avaradrova	Well	41	24	18,5	18,5	12,5	48	29	66	370
W11	ANKI WELL	Ankilizato Avaradrova	Well	2,05	1,04	0,77	0,47	2,02	0,60	1,35	1,08	9,39
W10	BETEHOLE	Betesda	Well	24,3	15,2	5,4	19,6	0	22	23	96	205,5
W10	BETEHOLE	Betesda	Well	1,22	0,66	0,23	0,50	0,00	0,48	0,62	1,57	5,27
W12	CARR WELL	Carroo	Well	21	43	6,5	9,5	7,5	36	6	72	269
W12	CARR WELL	Carroo	Well	1,05	1,87	0,27	0,24	1,21	0,13	1,01	1,18	6,96
W7	TSAR W 12875	Tsaramandroso	Well	18,3	6,4	4,3	24,3	0	1,5	8,1	120	182,9
W7	TSAR W 12875	Tsaramandroso	Well	0,92	0,28	0,18	0,62	0,00	0,17	0,04	1,97	4,17
C2	BETECANA	Betesda	Irrigation channel	18,7	5,5	4,3	5,3	3,5	3	7,5	74	121,8
C2	BETECANA	Betesda	Irrigation channel	0,94	0,24	0,18	0,14	0,06	0,16	0,08	1,21	2,99
C1	CANA DABARA	Dabara en aval	Channel	18,2	5,6	4	3,4	0	1,6	4,3	86	123,1
C1	CANA DABARA	Dabara en aval	Channel	0,91	0,24	0,17	0,09	0,00	0,09	0,05	1,41	2,95
R1	Dabara Dam	Dabara	River									
R1	Dabara Dam	Dabara	River	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 13 : RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES ECHANTILLONS D'EAUX PRELEVEES (en ppm)

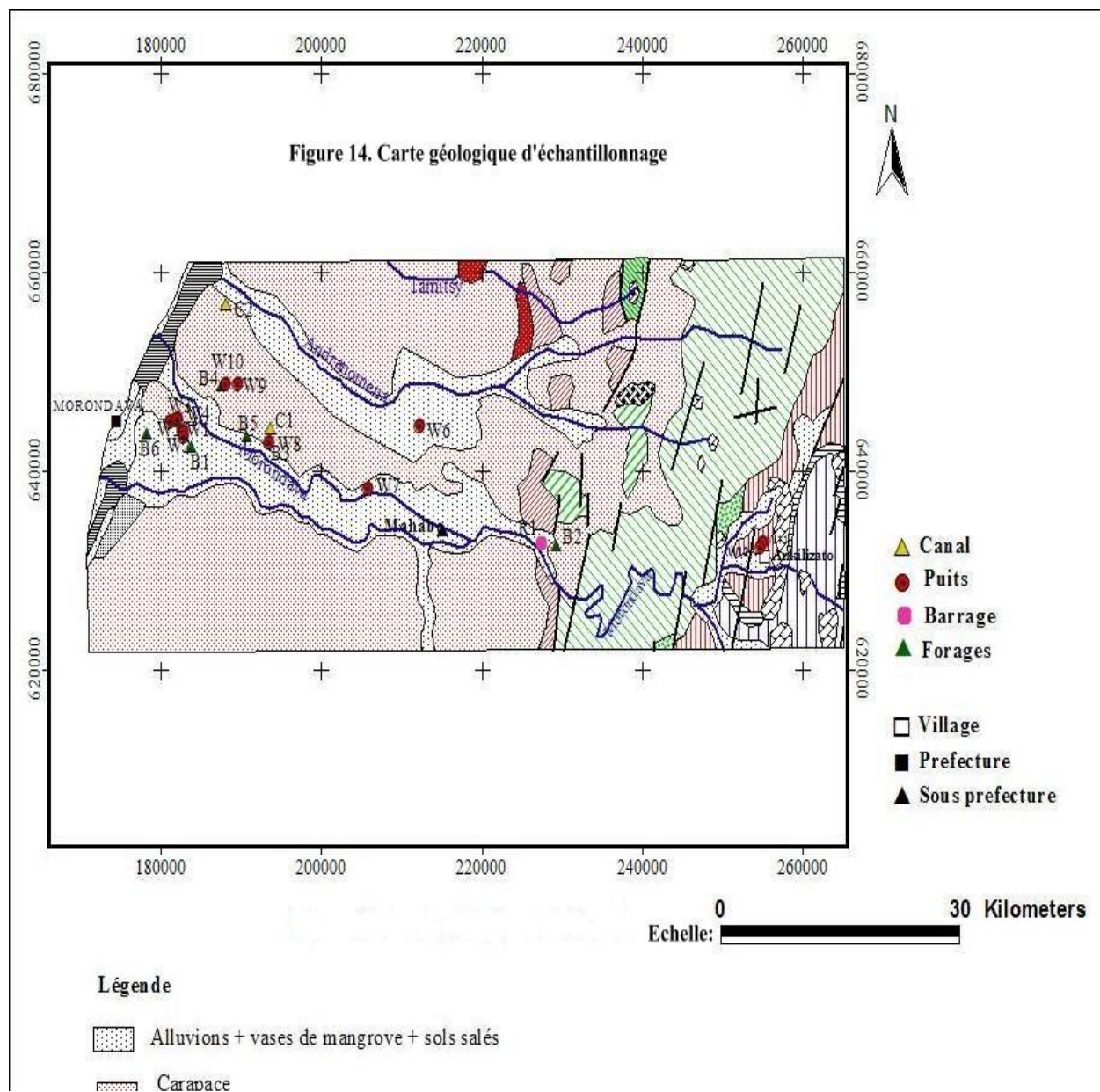
Tableau 14 : RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES ECHANTILLONS D'EAUX PRELEVEES (en méq/l)



Codes	SAMPLE CODE	SAMPLE SITE NAME	Type Water	3H (Tritium)	18 O	2 H ( Deutérium )	Erreur
B3	BETS BRH SUCOMA	SUCOMA Betsipotika	Borehole	<b>1,13</b>	<b>-4,43</b>	<b>-32,1</b>	<b>0,32</b>
B4	CROI BRH 66,3	Croisement BST	Borehole	<b>1,02</b>	<b>-4,35</b>	<b>-30,3</b>	<b>0,27</b>
B5	68 Ecole BRH	Ampandra	Borehole	<b>0,63</b>	<b>-4,67</b>	<b>-32,6</b>	<b>0,34</b>
B2	Artesian Well MANA	Manamby	Borehole	<b>0,32</b>	<b>-6,16</b>	<b>-40,8</b>	<b>0,31</b>
B1	MARO BRH 59,1	Marovoay	Borehole	<b>0,28</b>	<b>-5,11</b>	<b>-36,1</b>	<b>0,32</b>
B6	Artesian TSIM JIRAMA	Tsimahavaobe	Borehole	<b>0,06</b>	<b>-5,59</b>	<b>-37,3</b>	<b>0,27</b>
W12	CARR WELL	Carroo	Well	<b>1,73</b>	<b>-4,22</b>	<b>-31</b>	<b>0,3</b>
W4	TANA II, W 12770	Tanandava Benjamino	Well	<b>1,64</b>	<b>-4,11</b>	<b>-30,1</b>	<b>0,33</b>
<b>W1</b>	MORA W 12681	Morafeno	Well	<b>1,58</b>	<b>-4,57</b>	<b>-34,3</b>	<b>0,33</b>
W11	ANKI WELL	Ankilizato Avaradrova	Well	<b>1,48</b>	<b>-5,45</b>	<b>-36,3</b>	<b>0,28</b>
W6	BEKI W 12642	Bekinagna Ankilivalo	Well	<b>1,43</b>	<b>-3,92</b>	<b>-28,5</b>	<b>0,33</b>
W7	TSAR W 12875	Tsaramandroso	Well	<b>1,41</b>	<b>-5,09</b>	<b>-35,1</b>	<b>0,32</b>
W2	AMBA W 12754	Ambalarano	Well	<b>1,36</b>	<b>-4,3</b>	<b>-31,3</b>	<b>0,33</b>
W5	BENJ W 12811	Benjamino	Well	<b>1,32</b>	<b>-3,74</b>	<b>-28,7</b>	<b>0,32</b>
W10	BETEHOLE	Betesda	Well	<b>1,32</b>	<b>-4,67</b>	<b>-33</b>	<b>0,28</b>
W8	TANA W 12787	Tanambao Saraha	Well	<b>1,13</b>	<b>-4,99</b>	<b>-35,7</b>	<b>0,27</b>
W3	TANA W 12777	Tanandava West	Well	<b>1,02</b>	<b>-4,03</b>	<b>-30,5</b>	<b>0,31</b>
W9	BETEW	Betesda	Well	<b>0,98</b>	<b>-5,72</b>	<b>-38,4</b>	<b>0,27</b>
C1	CANA DABARA	Dabara en aval	Channel	<b>1,5</b>	<b>-5,19</b>	<b>-36,5</b>	<b>0,28</b>
C2	BETECANA	Betesda	Irrigation channel	<b>1,32</b>	<b>-5,14</b>	<b>-33,7</b>	<b>0,27</b>
R1	Dabara Dam	Dabara	River	<b>1,21</b>	<b>-5,33</b>	<b>-37,6</b>	<b>0,34</b>

**Tableau 15:** RESULTATS DES ANALYSES ISOTOPIQUES DES ECHANTILLONS D'EAUX PRELEVEES





### **VI-1- RESULTATS DES INVESTIGATIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES**

Les coupes lithologiques des forages et des puits (cf Annexe I et II) réalisées au niveau de chaque point d'eau visitée nous ont permis de déterminer les aquifères et la nature des nappes captées.

Ainsi, on a identifié 2 types de nappes, à savoir la nappe superficielle ou phréatique qui est captée par les puits, et la nappe profonde captée par les forages.

☞ Les nappes superficielles, de profondeur inférieure à 10m, sont formées par des aquifères constitués de sables blancs ou jaunes d'âges néogène à quaternaire (rencontrés dans tous les puits autour de la plaine de Mahabo) ; et de sables marneux (observés surtout dans les puits de la région d'Ankilizato).

Malgré une dilution apparemment bonne, confirmée par une perméabilité moyenne (K) relativement élevée de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-4} \text{m.s}^{-1}$  et porosité moyenne totale (n) relativement élevée de 40% , donc l'épaisseur de la zone non saturée est très faible (cf. Annexe I et II). Par conséquent, l'autoépuration naturelle est faible.

Donc on peut déjà dire que cette aquifère est plus vulnérable même si on ne connaît pas encore le temps de séjour de l'eau souterraine.

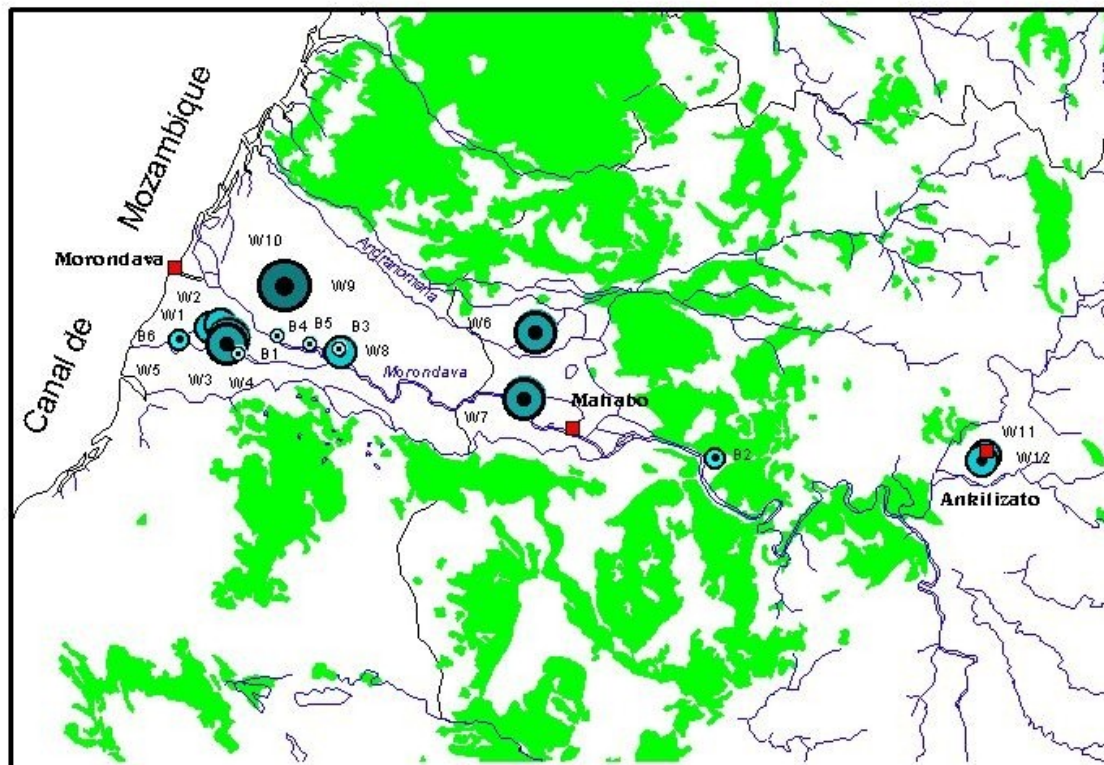
☞ Les nappes profondes, de profondeur supérieure à 50m appartiennent à des aquifères constitués de sables argileux, de grès de l'éocène inférieur et de calcaire marneux de crétacé moyen (rencontrer surtout à Manamby, Ampandra et Croisement BST).

C'est un excellent aquifère parce que les grès sont très favorables à l'emmagasinement de grandes quantités d'eau et les argiles présentent une barrière naturelle à la pollution.

De plus, l'épaisseur de la zone non saturée est beaucoup plus grande par rapport à la première nappe. En fait, c'est un aquifère plus protégé donc moins vulnérable.

La figure (A) récapitule ces différentes zones vulnérables par rapport à la profondeur. On les appelle **Foyers potentiels de pollution**.

**Figure A : Carte des foyers potentiels à la pollution**



**Légende**

**Profondeur des points d'eau (m)**

- ⊙ 55-80m moins vulnérable
- ⊙ 8.55-55m
- ⊙ 5.2-8.55m

## **VI-2- MESURES IN-SITU**

Du point de général, notre zone d'étude est riche en ressource en eau souterraine. Cela est justifié par la présence des nappes artésiennes (comme le forage B2 à Manamby) qui sont à fortes potentialités (débit=6.8 l/s).

Mais la population s'alimente toujours par des puits traditionnels non protégés ou des mauvaises qualités. En effet, l'alimentation en eau potable dans cette région reste toujours un problème majeur pour la population.

A cause de la semi-aridité de la région, la température des eaux de surfaces ou eaux souterraines des nappes superficielles reste plus élevée (en moyenne 27.5°C). Et pour les eaux souterraines des nappes profondes, le gradient géothermique est mis en jeu.

D'après les valeurs de pH mesurées, variant de 6.35 à 6.91 pour les forages, de 5.83 à 7.06 pour les puits et de 7.4 à 7.66 pour les eaux de surface, correspondent aux valeurs de la majorité des eaux souterraines et des eaux de surfaces (cf. Chapitre II-1-2). Cette valeur de pH indique que le bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) contrôle l'alcalinité de l'eau.

La conductivité électrique mesurée à chaque point d'eau (souterraine ou surface) se situe entre 200  $\mu\text{S/cm}$  et 700  $\mu\text{S/cm}$ . Ce qui nous amène à dire que les eaux souterraines échantillonnées sont moyennement minéralisées ; ce qui cadre bien à la classification des eaux d'après leur conductivité, excepté le puits (W9) à Betesda dont l'eau, très minéralisée, a une conductivité  $C=6250 \mu\text{S/cm}$  (supérieur à la norme de potabilité des eaux fixée par l'OMS,  $C=1500 \mu\text{S/cm}$ ).

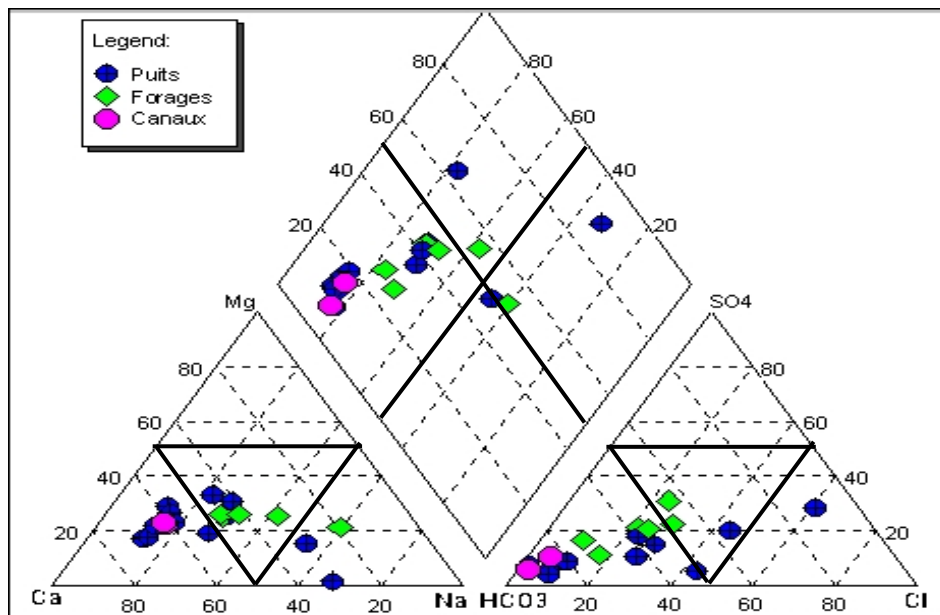
Cela serait à l'origine que ce point d'eau (W9) n'est pas protégée (cf. Tableau 10, Annexe III-Photo 3 et 4), et exposé à la pollution anthropique.

Les mesures de TDS (ou résidu sec filtrable) ont permis de connaître le degré de salinité de l'eau (cf. Chapitre II-1-9). Ainsi, la plupart des eaux échantillonnées sont plus ou moins douces ( $\text{TDS} < 1000 \text{mg/l}$ ) sauf le puits à Betesda qui fournit une eau saumâtre ( $\text{TDS}=3120 \text{mg/l}$ ).

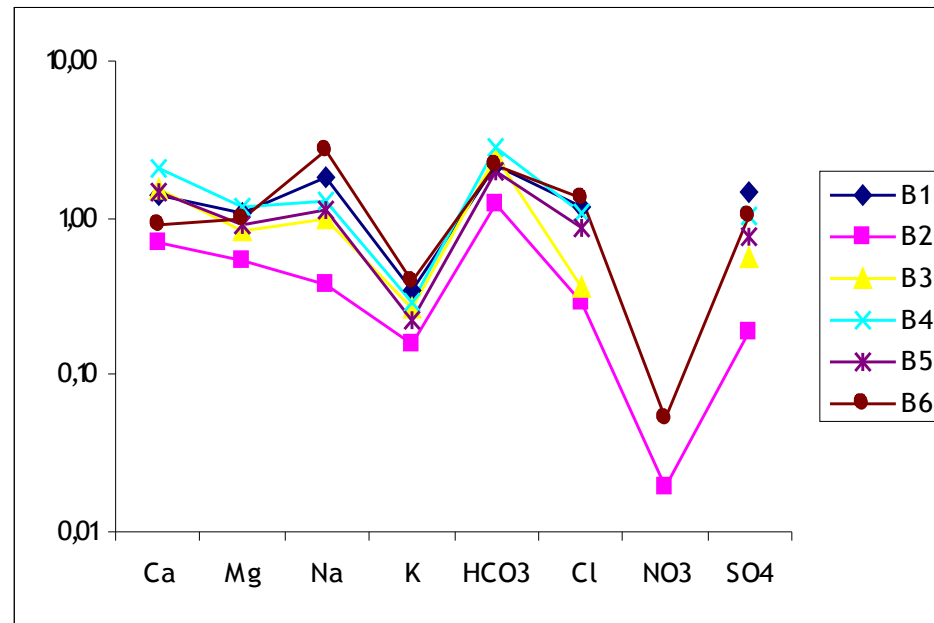
D'après la relation  $\text{TDS} = A \times C$  (cf. Chapitre II-1-3), et en faisant quelques calculs, nous avons obtenu une valeur de A comprise entre 0.50 à 0.55 ; ce qui signifie que l'eau est, généralement bicarbonatée.

### VI-3- LES FACIES CHIMIQUES DES EAUX

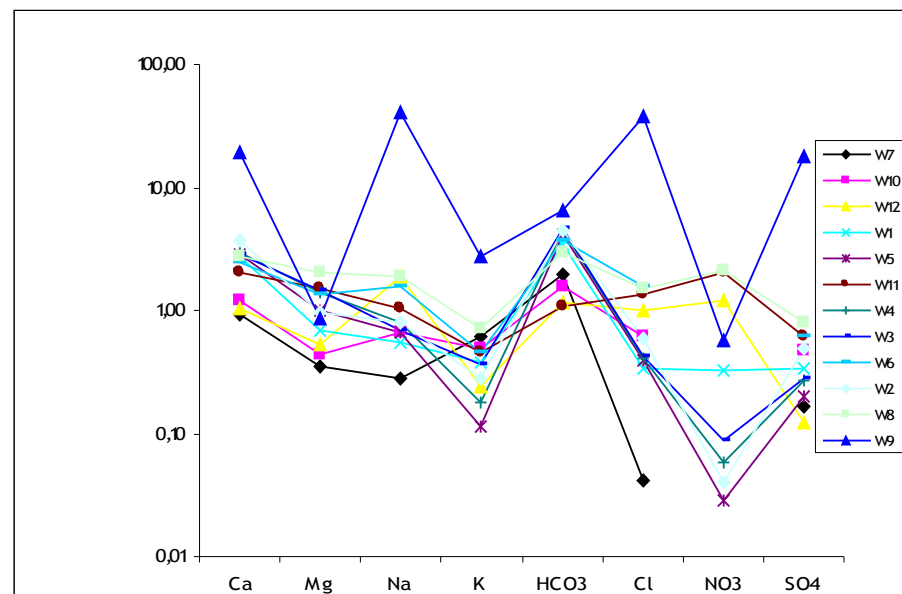
La représentation des résultats des analyses chimiques des échantillons d'eau prélevés (Forages et Puits) sur les diagrammes de Piper et Schoeller montre les faciès chimiques des eaux (cf. : figure15,16 et 17).



**Figure15 :** Diagramme de Piper des eaux échantillonnées



**Figure 16 :** Diagramme de Schoeller des eaux de Forages



**Figure 17 :** Diagramme de Schoeller des eaux de Puits

Le diagramme de Piper nous montrent que même si la minéralisation totale présente des fortes variations, on constate que l'ensemble des points dans les bassins versants de la rivière Morondava se regroupe dans un nuage, représentatif d'un faciès bicarbonaté-calciq, à l'exception de quelques points d'eau qui est un faciès chloruré-sodique (cf. figure 15).

Pour les forages (cf. figure 16), le diagramme de Schoeller nous montre des segments plus ou moins parallèles et présente un faciès bicarbonaté sodique avec une faible teneur en potassium. Seuls les deux forages artésiens, Manamby (B2) et Tsimahavaobe (B6) sont différentes. Cette distinction est due probablement à une faible teneur en nitrate car ils sont captés par les nappes profondes (aquifère plus protégé). En effet, les eaux de forages présentent une grande homogénéité par rapport aux eaux de puits.

Pour les puits (cf. figure 17), le diagramme de Schoeller présente des segments plus ou moins parallèles mais assez dispersés, représentatif d'un faciès bicarbonaté calciq. La légère dispersion est due, d'abord à la faible teneur en chlorure à Tsaramandroso



(W7), puis à la forte teneur en nitrate au niveau des puits : Ankilizato avaradrova(W12), Carroo (W11) et Tanambao saraha (W8). Tous ces points d'eau captent les nappes superficielles (eaux de subsurface), c'est pour cette raison qu'ils sont plus sensibles à la pollution nitratée.

Mais, un point se dégage particulièrement dans les diagrammes des anions, et également dans le diagramme de Schoeller. Il s'agit d'un point d'eau à Betesda (W9) qui présente quant à lui un faciès chloruré-sodique et un peu sulfaté-potassique.

Cette exception peut être due à l'aérosols marins ou l'intrusion saline, ou plus probable d'origine industrielle

Ainsi, malgré l'influence non négligeable de la nature du sol sur la qualité des eaux, cette minéralisation s'amplifie au niveau des trous d'eau utilisés par la population.

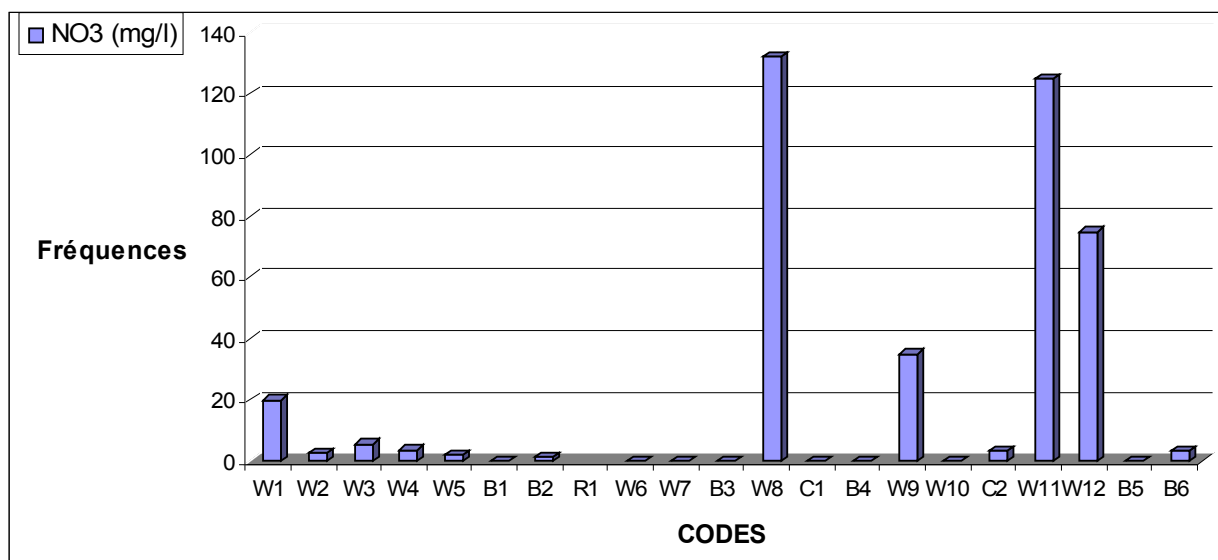
Dans ce sens on observe non seulement une forte conductivité de l'eau ( $C = 6250 \mu S/cm$ ), dépassant la norme, mais également une salinité de 3.4‰, et une teneur en chlorure de l'ordre de 1350mg/l.

En effet, les eaux de puits ou eaux de subsurface présentent une grande variabilité par rapport aux eaux de forages : elles sont moins protégées. C'est ce qui nous amène à dire auparavant qu'ils sont plus vulnérables à la contamination que des eaux de forages.

## **VI-4- LA POLLUTION DES NAPPES PAR LES NITRATES**

Malgré le manque d'information ou résultats sur la teneur en  $\delta^{15}N$ , seule l'étude de la teneur en Nitrates dans les eaux souterraines nous aide à expliquer les sources probables de la pollution des eaux.

La figure(18) montre l'histogramme de la teneur en Nitrates dans tous les points d'eaux.



**Figure 18 : Histogramme de la teneur en Nitrates**

Dans cet histogramme, il se dégage 03 échantillons qui présentent des valeurs dépassant la limite recommandée par les normes (50mg/l).

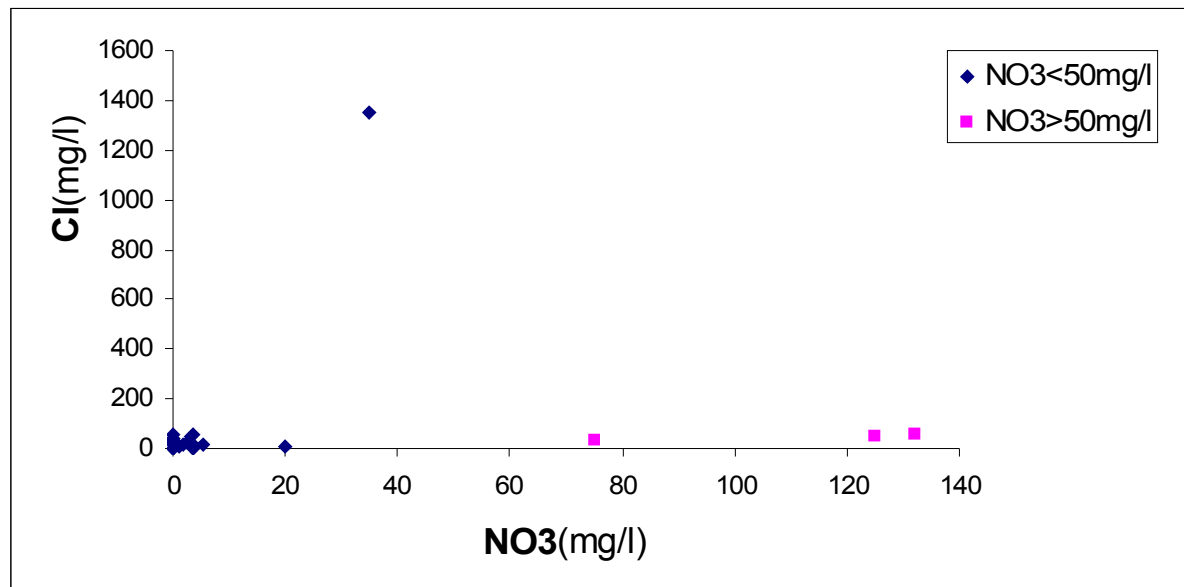
Ces échantillons provenant les puits de l'UNICEF captant les nappes superficielles : nappe alluviale et la nappe au sable de plage. Ce sont les puits à Tanambao Saraha (W8) avec une valeur de Nitrate égale à 132 mg/l, à Ankilizato Avaradrova (W11), 125 mg/l et Ankilizato Carro (W12) 75 mg/l.

La présence des nitrates au niveau du W8 peut s'expliquer par l'utilisation d'engrais chimique N, P, K, dont les résidus se trouvent dans les boues de lavages de la canne à sucre ou due à la présence d'une étable autour du point d'eau.

Et la plus forte teneur en nitrates au niveau du W11 et W12 peut s'expliquer par la proximité d'un parc à bœufs (valan'omby), zones de concentration de la pollution organique azotée.

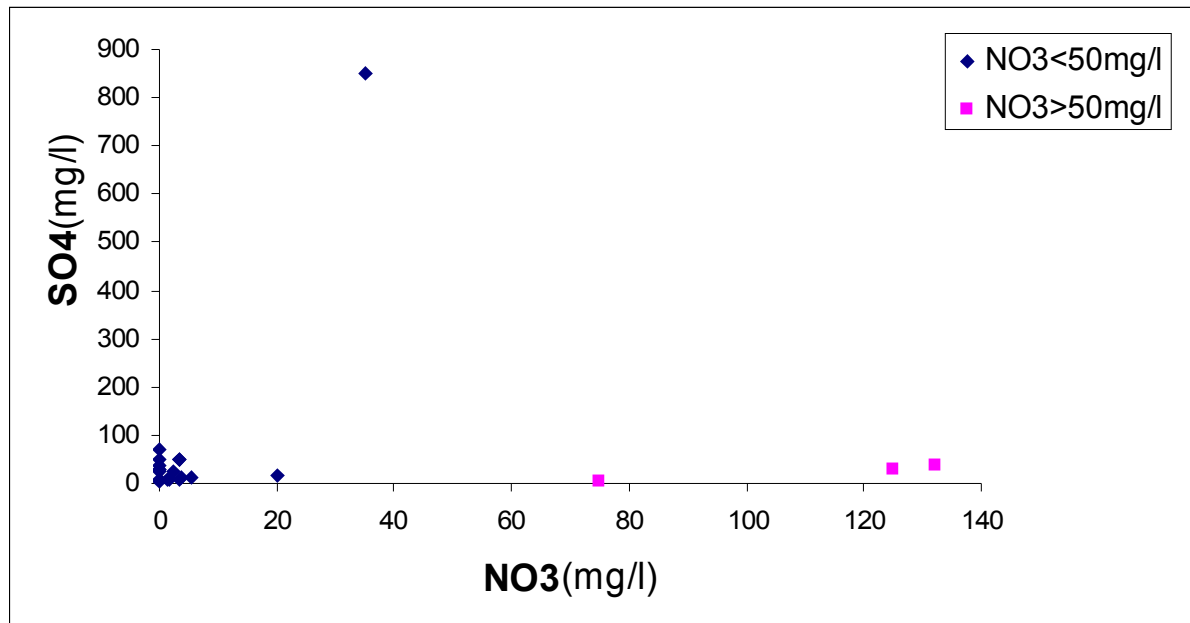
Toutefois, cette explication n'est qu'une hypothèse. Seule l'explication des données chimiques et isotopiques des eaux de cette zone nous permettrait de confirmer cette hypothèse.

Les figures (19,20,21,22 et 23) présentées ci-après montrent des corrélations entre la teneur en nitrates et les autres ions comme le Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), le Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), le Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), le Potassium ( $\text{K}^+$ ) et la minéralisation totale (MNT) exprimée en mg/l.



**Figure 19 :** Corrélation entre la teneur en  $\text{NO}_3^-$  et la teneur en  $\text{Cl}^-$

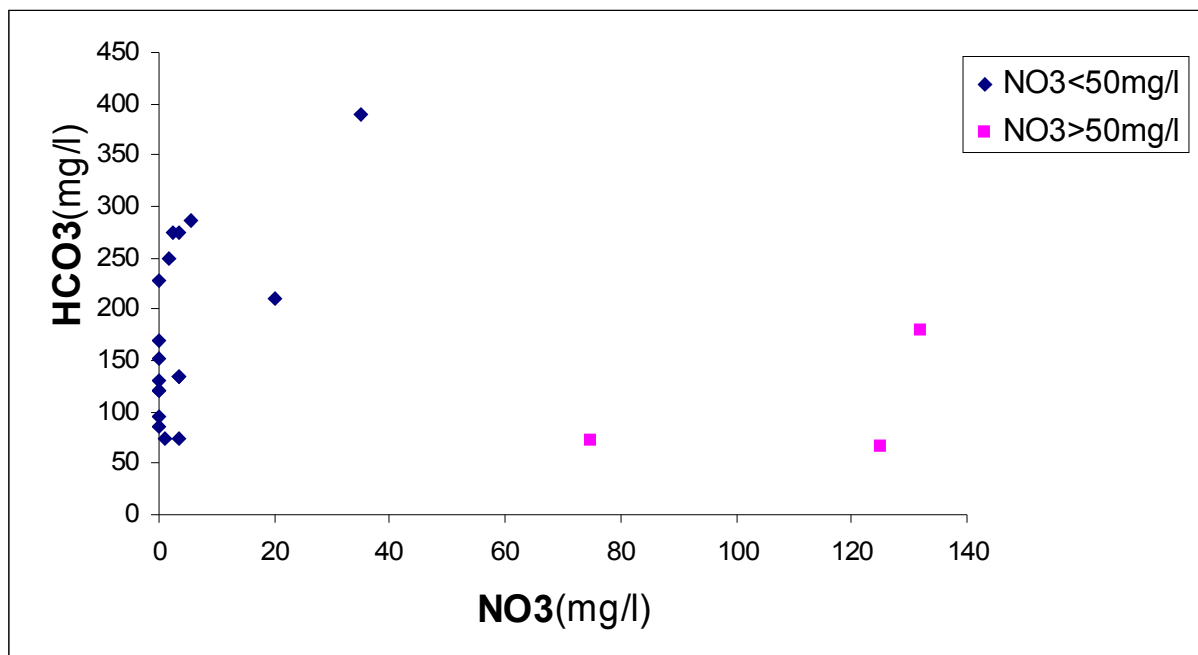
D'après cette figure, on constate que l'augmentation de la teneur en nitrates aux W8, W11, et W12 n'a rien avoir avec la teneur en Chlorure.



**Figure 20** : Corrélation entre la teneur en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et la teneur en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

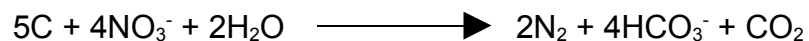
De même, la forte teneur en nitrates apparaît relativement indépendante de la teneur en Sulfates (cf. figure 20).

Ainsi, il se peut que la sulfite soit d'origine industrielle

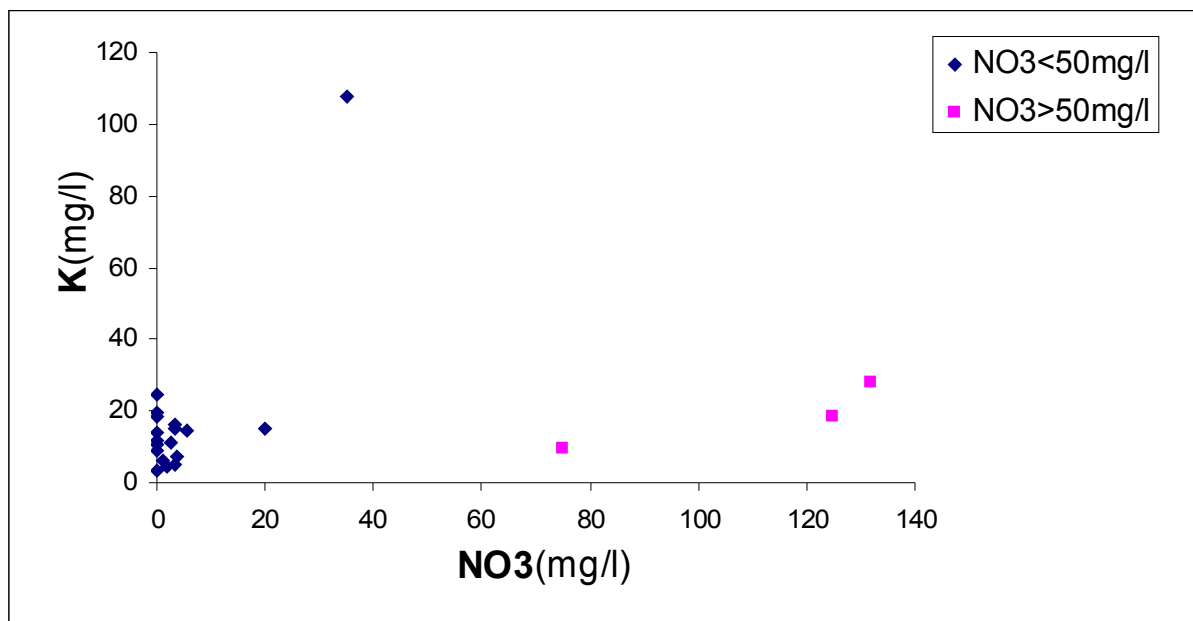


**Figure 21 :** Corrélation entre la teneur en  $\text{NO}_3^-$  et la teneur en  $\text{HCO}_3^-$ .  
D'après la figure (21) ci-dessus, il n'existe pas de corrélation entre la teneur en  $\text{NO}_3^-$  et la teneur en  $\text{HCO}_3^-$ .

Alors la faible teneur en nitrates est due au phénomène de dénitrification, par la présence de forte teneur en  $\text{HCO}_3^-$  c'est-à-dire qu'en milieu anaérobie, l'eau souterraine peut être exempte de nitrate car il devient  $\text{N}_2$  gaz suivant la réaction :

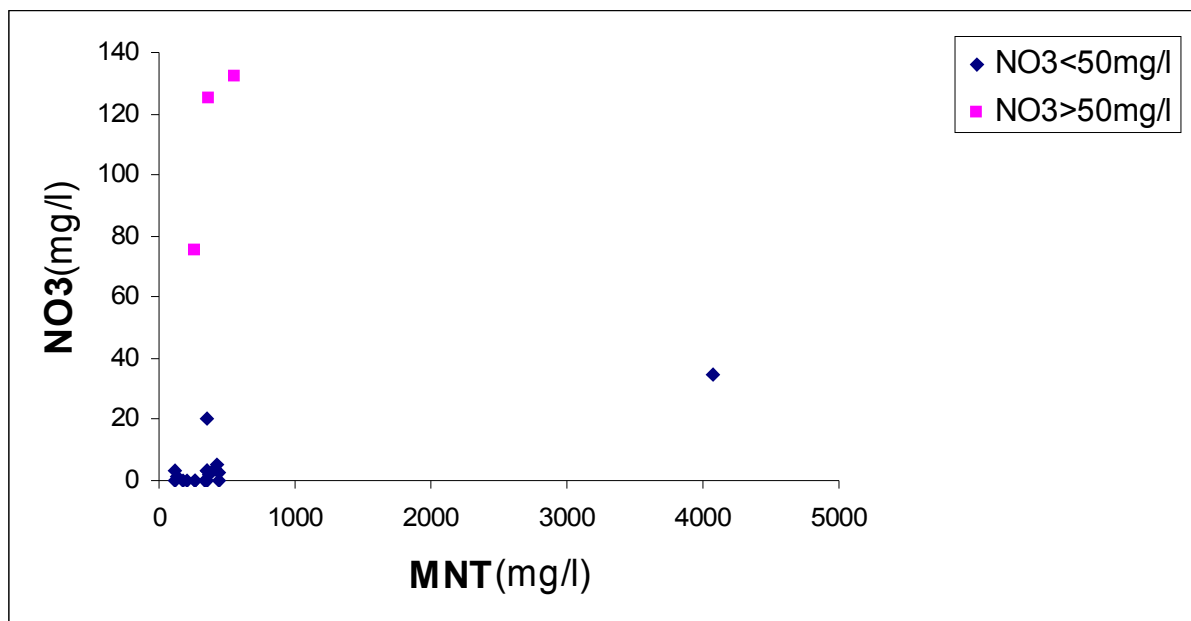


—



**Figure 22 :** Corrélation entre la teneur en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et la teneur en K<sup>+</sup>

Pareille à la figure précédente, il n'y a pas non plus de corrélation entre la teneur en nitrates et la teneur en potassium. Mais la forte teneur en potassium au niveau du puits W9 (Betesda) est due à l'utilisation des engrais pour l'entretien des champs de canne à sucre d'une part et d'autre part par l'urine du bétail (ou lisier) car les points d'eaux se trouvent à proximité du champ de bétail.



**Figure 23 :** Corrélation entre la minéralisation totale et la teneur en  $\text{NO}_3^-$

D'après cette figure, on constate une légère contribution des nitrates à la minéralisation totale des eaux car certains points d'eau présentent une MNT (minéralisation totale) élevée mais la teneur en nitrates reste insuffisante ou presque nulle et vice versa, exemple le puits à Betesda (W9), le puits à Tanambao Saraha (W8).

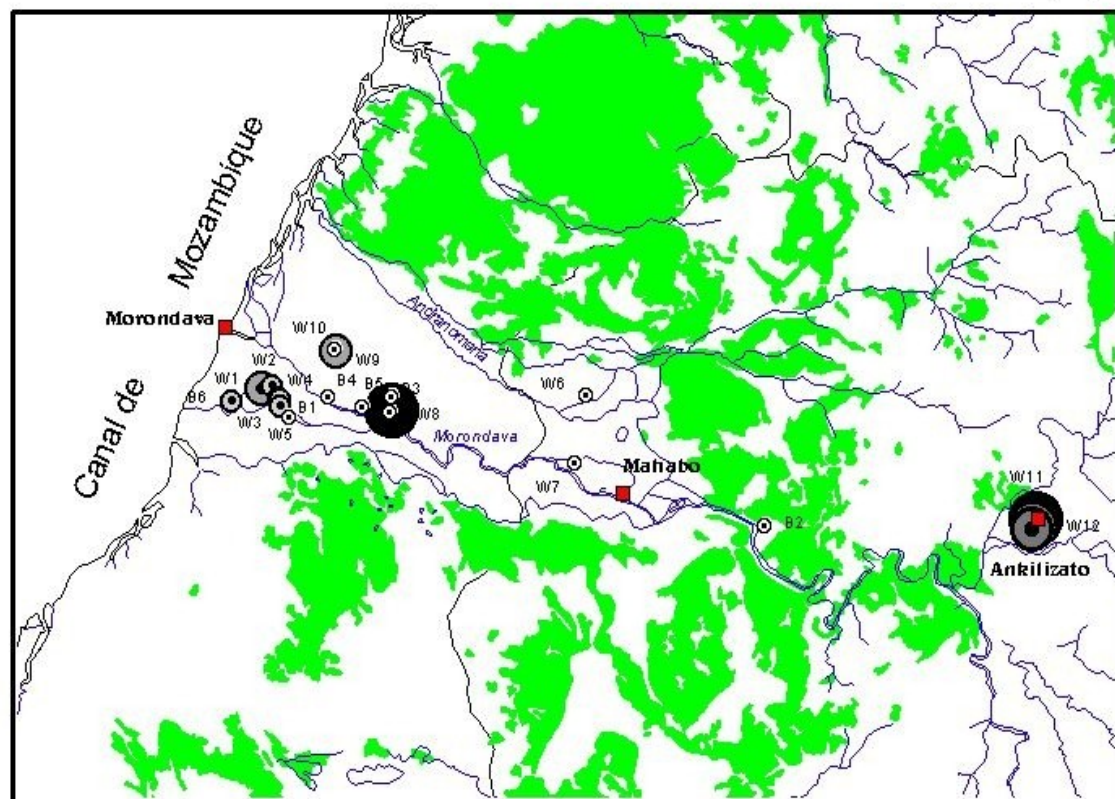
En conclusion et d'après toutes ces figures, on constate qu'il n'existe pas de corrélation entre cet élément et les autres espèces. Ainsi, l'augmentation de la teneur en nitrate au niveau de quelques points d'eau est indépendante de la teneur en ion, donc on se réfère à la pollution domestique ou anthropique. De plus, on peut aussi remarquer que les eaux provenant des forages analysés montrent des teneurs en nitrates très faibles (inférieur à 5mg/l) ou nulles, ce qui tend à montrer que la pollution de la nappe

par les nitrates est concentrée autour de certains puits (temporaires), ou u ne concerne que la zone superficielle de la nappe (captée seulement par les puits mais pas par les forages).

La figure (B) résume ces différentes zones polluées par les nitrates. On les appelle **Foyer actif de pollution par les nitrates**



**Figure B: Foyer actif de pollution par le nitrate**



**Légende**

Teneur en Nitrate (mg/l)

○ 0 - 1.2 moins vulnérable

⊙ 1.2 - 5.5

## VI-5- LES CONDITIONS DE RECHARGES

La carte piézométrique de la zone d'étude montre que le sens d'écoulement souterrain est d'Est en Ouest (cf figure 10) ;

Ainsi, pour avoir une idée sur la recharge de la nappe (superficielle ou profonde), nous allons représenter sur la figure (24) la teneur en  $^{18}\text{O}$  en fonction de la teneur en  $^2\text{H}$ .

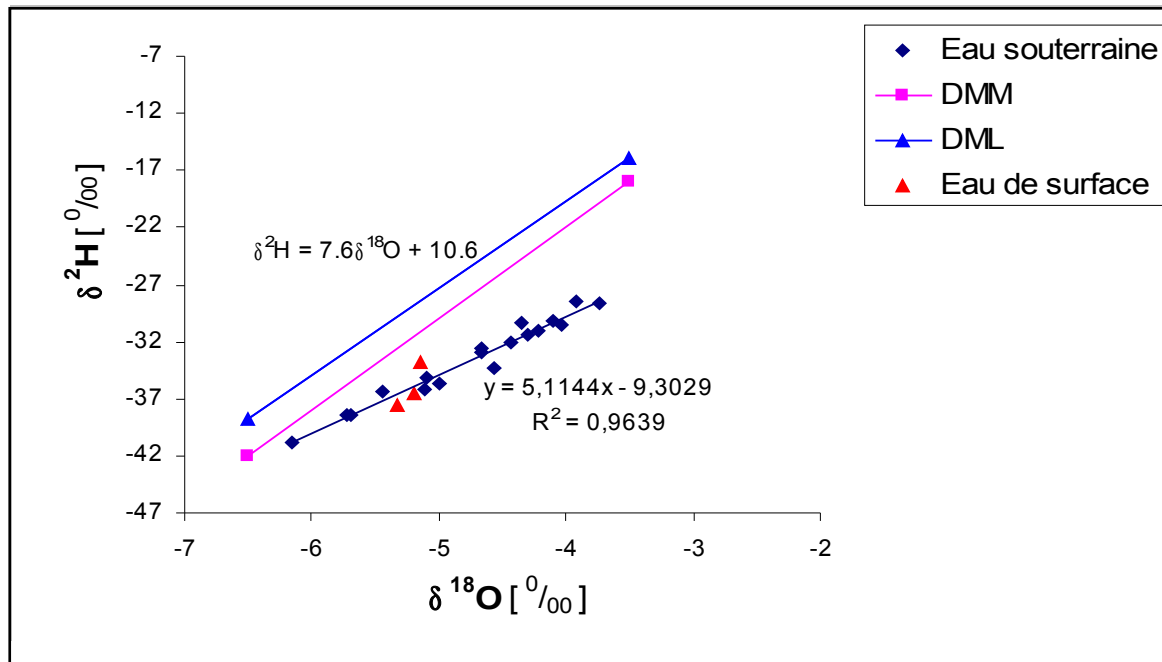


Figure 24 : Diagramme  $\delta^2\text{H}$  en fonction  $\delta^{18}\text{O}$

Ce diagramme indique que les eaux souterraines forment une droite de régression ayant une pente voisine de 5, et montrent qu'elles sont affectées par l'évaporation avant ou au cours de l'infiltration et par l'intrusion marine.

Pour la droite météorique locale (DML, Nicollini 1980), sur des précipitations mensuelles durant une année (août 1977 – juillet 1978) prélevées à la station de Morondava-aérodrome,

On constate que :

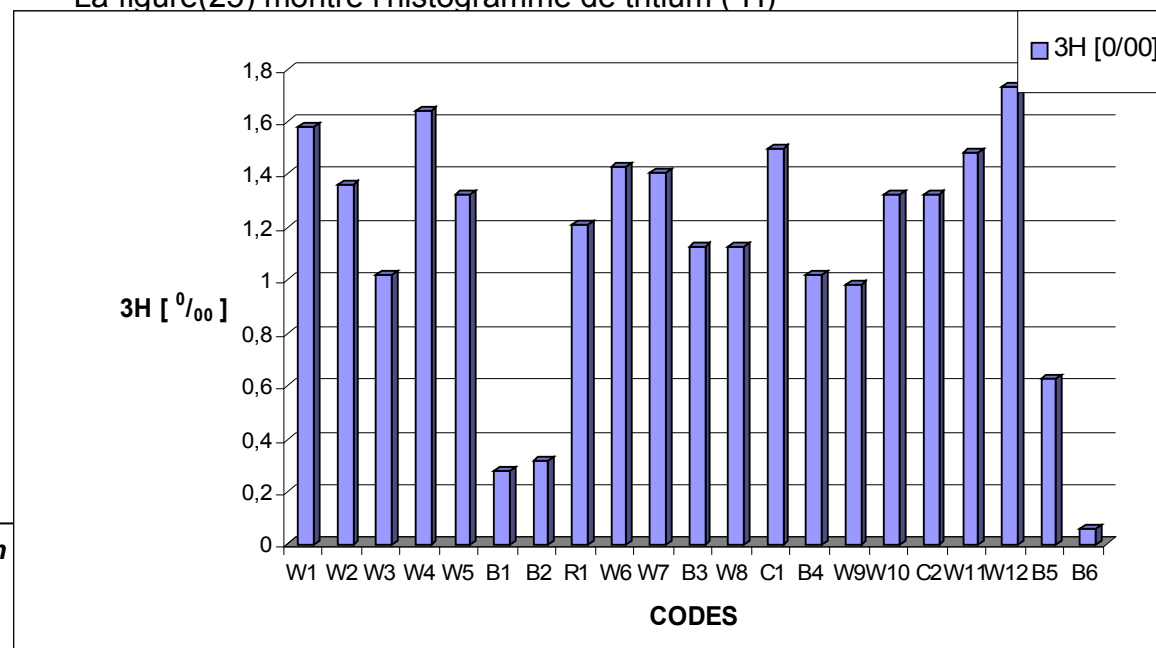
- la pente très proche de 8 vient du fait que la condensation est un phénomène d'équilibre puisqu'il intervient à la saturation.

- la quantité d'excès de deutérium, très voisine de 10 est traduite par le fait que la station est soumise à un régime de précipitations océaniques simples.

## VI-6- VULNERABILITES DES NAPPES

Pour avoir une idée sur la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de la rivière Morondava et faute du manque des résultats de l'azote-15 ( $^{15}\text{N}$ ) et du strontium-87 ( $^{87}\text{Sr}$ ), seules les valeurs de tritium dans cette région nous apportent des explications isotopiques plus ou moins concrètes.

La figure(25) montre l'histogramme de tritium ( $^3\text{H}$ )



**Figure 25 :** Histogramme de Tritium ( $^3\text{H}$ )

D'après cet histogramme, la valeur moyenne du tritium est de 1.1UT. On peut dire que presque tous ces points d'eau ont reçu une récente recharge.

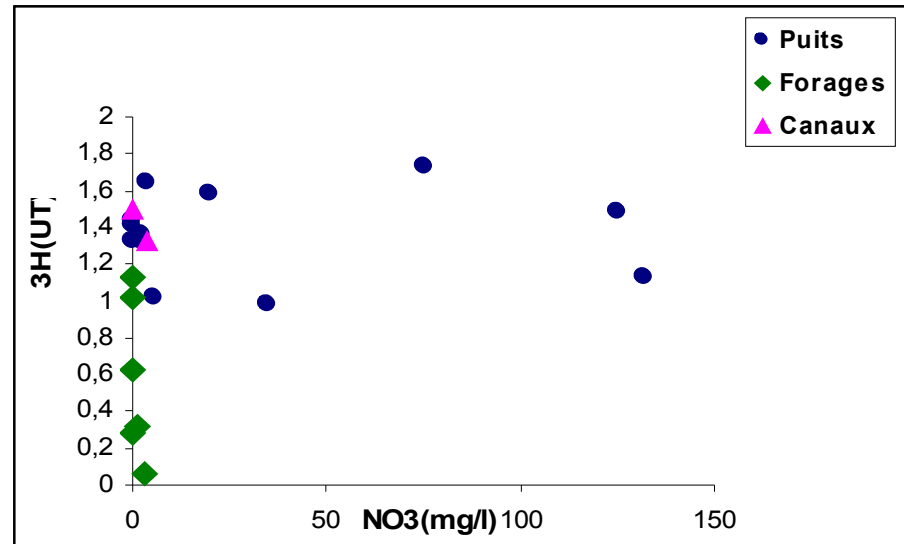
Toutefois, quatre (04) points d'eau retiennent quand même notre attention. Il s'agit du Tsimahavaobe (B6) dont la teneur en tritium est de 0,06UT, d'Ampandra (B5) à 0.63UT, de Marovoay (B1) à 0.28UT et de Manamby (B2) à 0.32UT.

Ces quatre(04) points d'eau se trouvent dans le forage et captent la nappe profonde (aquifère homogène). Ces points d'eau présentent un débit important ou même artésien.

Ainsi, pour le cas de la vulnérabilité de la nappe, nous pensons que les points d'eau présentant une valeur de tritium élevée sont plus vulnérables à la contamination par rapport à ceux qui présentent une valeur moins élevée car plus la valeur de tritium est élevée, plus la vitesse d'infiltration des contaminants dans la nappe est rapide.

De plus, les vitesses effectives (rapport de vitesse de filtration et la porosité efficace) sont alors de l'ordre de 0.2m/an pour la transmissivité (T) égale à  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  et 4.2 m/an pour  $T=1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , valeurs encadrant celle obtenue à partir des activités mesurées(Nicollini Eric, 1980).

Aussi, cette hypothèse est confirmée par la figure (26) en dessous, en faisant une corrélation entre la teneur en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et la teneur en tritium ( $^3\text{H}$ ). En effet, l'augmentation de la teneur en nitrates au niveau de quelques points d'eau (W8, W11 et W12) avait une influence sur la teneur en tritium dans ce même point d'eau.



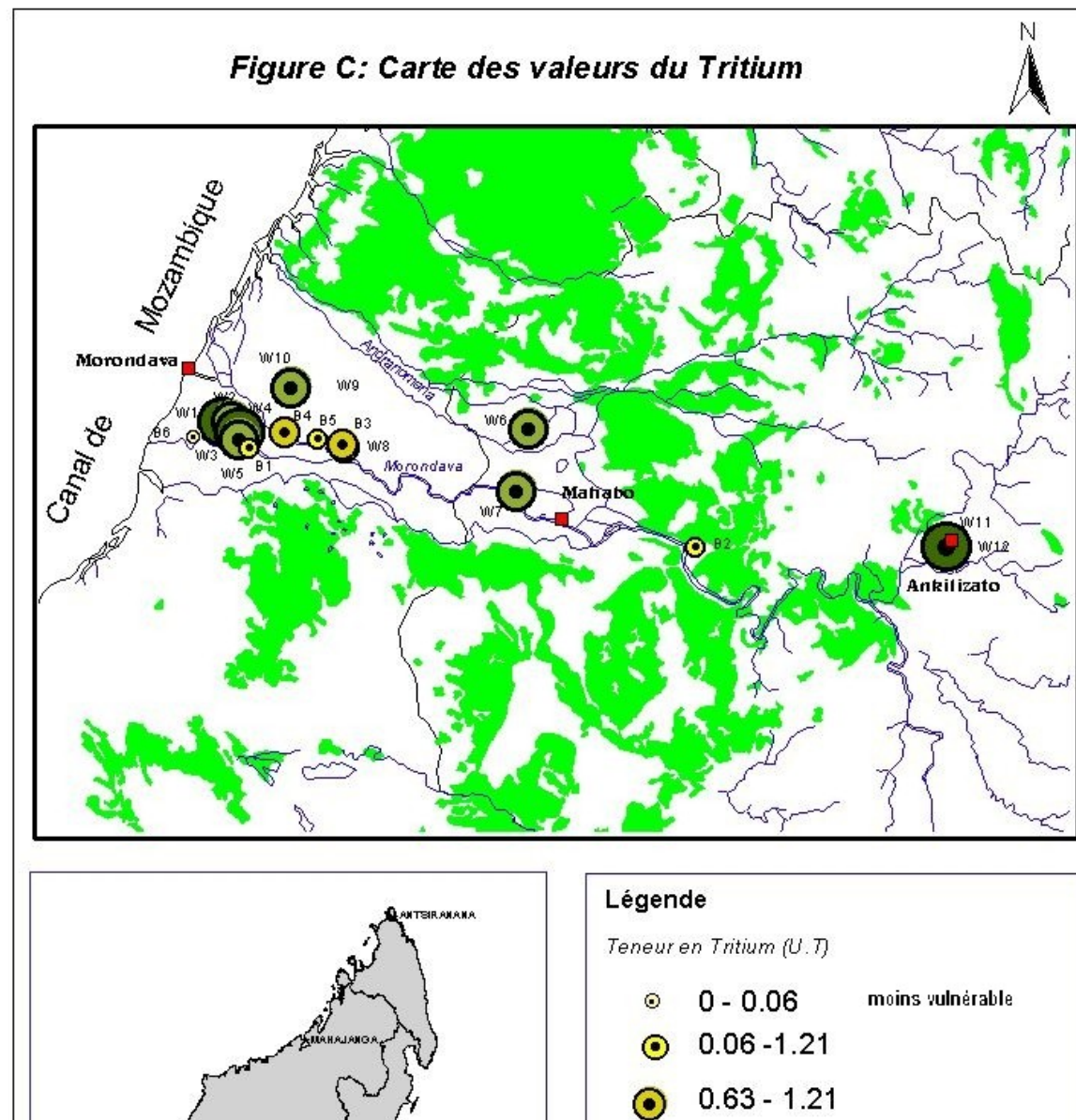
**Figure 26** : Corrélation entre la teneur en  $\text{NO}_3^-$  et la teneur en  $^3\text{H}$

On constate aussi que presque toutes les eaux de puits (eaux de subsurface) présentent une teneur en tritium plus élevée que les eaux de forages. En effet, il est confirmé que les puits captant les nappes superficielles sont plus vulnérables que les forages captant les nappes profondes.

La figure (C) **carte de la valeur de tritium**, présente les zones vulnérables par rapport à la teneur en tritium.

Enfin, vu le fait que cette région ne dispose pas encore d'une station pluviométrique destinée à mesurer les tritiums dans les précipitations, on ne peut pas se prononcer sur l'origine exacte de ces tritiums. Mais à partir de la valeur moyenne du tritium (supérieur à 1UT), nous estimons quand même un temps de séjour moyen faible inférieur à 1000 ans.

**Figure C: Carte des valeurs du Tritium**



# CONCLUSION



En résumé, le bassin versant de la rivière Morondava se trouve dans un grand bassin sédimentaire de la province de Toliary.

Le climat est de type semi-aride avec deux saisons bien distinctes : la saison chaude et humide s'étalant entre le mois de décembre et mars et une saison plus fraîche et sèche d'avril en novembre.

La température est assez élevée qui atteint en moyenne 18°C au minimum et 35°C au maximum. De plus, le bilan hydrologique n'est pas largement suffisant pour assurer une bonne alimentation de la nappe souterraine malgré le fait que les formations géologiques rencontrées sont de nature sédimentaire allant de Jurassique supérieur au Quaternaire, donc présentant une bonne perméabilité.

Sur le plan hydrogéologique, la région de Morondava possède un bon système hydrogéologique à quatre (4) types de nappes : la nappe alluviale, la nappe de sables de plage, la nappe de l'éocène et la nappe du Crétacé. Toutes fois, les deux premières nappes (nappes alluviale et nappe de sables de plage) sont captées par les puits tandis que les deux autres sont captées par les forages.

Concernant le projet MAG/8/003, nous avons démontré l'importance des techniques isotopiques (isotopes stables :  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ , isotopes radioactifs :  $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$ ) en hydrogéologie, pour comprendre le fonctionnement de la recharge d'une part, et la vulnérabilité de la nappe à la contamination d'autre part.

A partir des données recueillies lors de la campagne d'échantillonnage et d'après les résultats chimiques et isotopiques des échantillons d'eaux prélevées dans ce présent travail, nous avons pu avancer les conclusions supplémentaires suivantes :

- ♣ le diagramme  $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$  nous a montré que les nappes sont affectées par l'évaporation avant ou au cours de l'infiltration et par l'intrusion marine d'une part, et d'autre part la région de Morondava est soumise à un régime de précipitation océanique simple.
- ♣ l'étude hydrogéologique et géologique nous a permis de dresser une carte de foyer potentielle à la pollution qui se trouve à Betesda (W9 et W10), Benjamino (W5), Bekignana ankilivalo (W6), Tsaramandroso (W7), Tanandava (W3 et W4), Ambalarano (W1) et Morafeno (W2).
- ♣ l'étude chimique en particulier la teneur en nitrate nous a permis également de dresser une carte de foyer actif à la pollution par le nitrate qui se trouve à Ankilizato (W11 et W12), Tanambao Saraha (W8) et Betesda (W9).

- ♣ Enfin, l'étude isotopique par l'isotope de Tritium vient de confirmer ces 2 dernières remarques et d'ajouter que tous les puits captant les nappes superficielles sont vulnérables par rapport aux forages captant les nappes profondes (nappes homogènes). Cette zone vulnérable est repérée sur la carte de valeur de Tritium.

En effet, pour l'exploitation des eaux souterraines soit scientifiquement raisonnable et durable, il est fortement conseiller de ne pas capter les nappes superficielles ; tout en sachant bien que ces dernières sont très sensibles à la pollution anthropique ou industrielle c'est-à-dire elles sont sensibles à la pollution de toute nature.

Pour conclure, cette étude n'est qu'une étude préliminaire pour l'étude de la vulnérabilité de la nappe a la contamination. Pour compléter, il est conseillé l'utilisation d'autres isotopes stables comme le Strontium-87 pour trouver l'interaction eau-roche et l'Azote-15 pour trouver les sources probables de pollution est indispensable pour cette étude.

La mise en place d'une station pluviométrique destinée à mesurer le Tritium dans les précipitations pour déterminer l'origine du tritium dans l'eau est importante. Ainsi, le prélèvement des échantillons d'eaux par mètre ou quelques centimètres en utilisant les piézomètres pour le calcul des vitesses d'infiltration des contaminants dans la zone non saturée est souhaitable.

# **BIBLIOGRAPHIE**

- 
- [1] **Andriavelojaona Nirina L.**, « Etude géochimique des eaux souterraines du socle du Sud de Madagascar », mémoire d'Ingéniorat en Hydraulique, ESPA, Université d'Antananarivo, 1998.
- [2] **Banton Olivier et Bangoy Lumony M.**, « Hydrogéologie, Multiscience environnementale des eaux souterraines », presses de l'Université du Québec, 1997.
- [3] **Bedient Philip B., Rifai Hanadi S., Newell Charles J.**, « Groundwater Contamination; transport and remediation », second Edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1997.
- [4] **Bontoux J.**, « Introduction à l'étude des eaux douces : eaux naturelles, eaux usées, eaux de boissons », deuxième édition, Paris.
- [5] **Brassington Rick**, « Field Hydrogeology », second Edition, England, 1988.
- [6] **CASTANY G.**, « Traité Pratique des eaux souterraines », deuxième édition, Paris, 1967.
- [7] **CASTANY Gilbert.**, « Principes et méthodes de l'hydrogéologie », Bordas, Paris, 1982.
- [8] **Chaperon Pierre, Danloux Joël, Ferry Luc**, « Fleuves et rivières de Madagascar », édition DMA ORSTOM – CNRE, 1993.
- [9] « Code de l'Eau », Loi n° 98 – 029, Ministère de l'Energie et des Mines, Programme Assainissement, Eau potable, Soins Primaire de l'Environnement, UNICEF, Janvier 1999.
- [10] « Cours régional de base sur l'utilisation des méthodes isotopiques en hydrogéologie », Dakar, Sénégal, 17- 28 mai 2004.
- [11] « Document de base sur l'atelier d'uniformisation des indicateurs du secteur de l'eau et de l'assainissement », Ministère de l'Energie et des Mines, Comité National de l'Eau et de l'Assainissement, UNICEF, Antananarivo, Octobre 1998.
- [12] **Drouart Eric et Vouillamoz Jean-Michel**, « Alimentation en eau des populations menacées », Paris, 1999.
- [13] **ELOUARD Jean Mars, ANDRIANTSIFERANA Marta**, « Actes des Journées de l'Eau », Antananarivo, MADAGASCAR, 16 – 20 Novembre 1992.
- [14] « Etude hydrogéologique pour l'alimentation en eau souterraine du périmètre sucrier d'Analava », rapport du Ministère de l'Energie et des Mines, Service Hydrogéologique (directiondel'eau), Décembre 1982.

- [15] « Etude hydrogéologique pour la réalisation de 30 puits dans la région de Morondava », Association FANOVOZANTSOA, Novembre 2000.
- [16] « Etude, suivi et contrôle des 30 puits dans la région de Morondava », rapport final, Association FANOVOZANTSOA, Programme AEPSPE / UNICEF, avril 2002.
- [17] **Fontes J. C.**, « Hydrogéologie, un champ privilégié de l'application des isotopes du milieu : l'âge des eaux souterraines », Montpellier (France), Septembre 1978.
- [18] **Fontes J. C.**, « Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles », laboratoire de Géologie Dynamique, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- [19] **Gat JR., Gonfiantini R.**, « Stable Isotope Hydrology; Deutérium and Oxygen-18 in the water cycle », International Atomic Energy Agency, Vienna, 1981.
- [20] **GUYOT Luc**, « Reconnaissance hydrogéologique pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en milieu semi-aride : Sud-Ouest de Madagascar », Thèse de Doctorat Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Université des Nantes, Octobre 2002.
- [21] **KOGYO KOKUSAI Co., SANYU CONSULTANTS Inc.**, « Etude de l'exploitation des eaux souterraines dans la région du Sud-Ouest de la République de Madagascar, phase II », rapport final volume I (rapport récapitulatif), JICA, Tokyo, Août 1996.
- [22] **KOURDIAN Raphaël**, « Origine et distribution des eaux salées issues du socle méridional de Madagascar », Mémoire d'Ingénieur Géologue de l'IGAL, Juillet 2002.
- [23] **Leroy J B**, « Que sais-je ? la pollution des eaux », presses Universitaires de France, 2<sup>ème</sup> Edition, 1992.
- [24] **MAMIFARANANAHARY E.**, « Interprétation des analyses isotopiques d'un échantillonnage des 150 points d'eau du socle cristallin Sud de Madagascar », mémoire DEA, INSTN, Juin 2000.
- [25] **Mazor Emmanuel**, « Chemical and isotopic, Groundwater hydrology », Second Edition, Revised and Expanded, New York, 1997.
- [26] **MONG Yves Jean Michel**, « Rapport de mission sur l'état des lieux de l'usine sucrière de Morondava (SUCOMA) et ses environs », Département Environnement et Qualité de la vie, Centre National des Recherches sur l'Environnement (CNRE), Octobre 2000.
- [27] **MONTENAT (C), RAMAHAVORY (L), CROSILE (M)**, « La séquence tectono-sédimentaire de la marge Ouest Malgache au Jurassique, bassin de Morondava », série II CR Académies des Sciences, Paris, 1993.

[28] **NICOLLINI Eric**, « Les isotopes du milieu dans les précipitations à Antananarivo et aux stations du réseau AIEA de l'Océan Indien, Application des techniques isotopiques aux nappes captives du Sud-Ouest de Madagascar », Thèse du Doctorat de troisième cycle, 1980.

[29] **Olive Philippe**, « Introduction à l'hydrologie isotopique », publication Centre de Recherches Géodynamiques, Université de Pierre et Marie Curie (Paris), Septembre 1995.

[30] **RAJAABELISON J., MAMIFARANANAHARY E., RAMAROSON V.**, « Apport des techniques isotopiques à l'étude des types d'infiltration d'eau dans les aquifères du Sud-Ouest de Madagascar », Institut National des Sciences et des Techniques Nucléaires (INSTN), Octobre 2002.

[31] **Rajaobelison Joël**, « contribution à l'optimisation du traçage des isotopes de l'Environnement en hydrogéologie. Cas du Sud de Madagascar », Thèse du Doctorat d'Etat, Madagascar-INSTN, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences – Département de Physique.

[32] **RAOLIHARIVAO A.**, « Utilisation des données multi-sources à l'étude de potentiel en eaux souterraines du Sud-Ouest de Madagascar entre Belo-sur-Tsiribihina et Manja », mémoire d'Ingéniorat des Mines, ESPA, Avril 2003.

[33] « 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, Ministère de l'Energie et des Mines, Direction de l'Eau, Mars 2001.

[34] **RASOAMIADANA Jeannine Marie Yvette**, « Synthèse des observations hydroclimatologiques faites sur le bassin versant d'Ambohitrakoho », mémoire d'Ingéniorat en Hydraulique, ESPA, Université d'Antananarivo, Janvier 1993

[35] **RASOLONJAZAO Lantsoa**, « Etude hydrogéologique du delta de Morondava par prospection électrique » mémoire DEA Géophysique, IOGA, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Novembre 2001.

[36] « Recensement général de la population et de l'habitat », tableaux statistiques, tome V, Province de Tuléar, Documentation INSTAT.

[37] **Robins N S**, « Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability », special publication No.130, Geological Society, 1998.

[38] **Rodier J.**, « L'Analyse de l'Eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer », tome 2, cinquième édition, Bordas, Paris, 1976

[39] **Rodier J.**, « L'Analyse de l'Eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer ; Chimie, Physico-chimie et Bactériologie », sixième édition, Bordas, Paris.

[40] **Salomon Jean – Noël**, « Le Sud-Ouest de Madagascar », tome I, Université d'Aix-Marseille, 1987.

**[41] SARROT-REYNAULD J.A.P., POLYAKOV V.A.,** « Isotope Hydrology 1983 », Session VI et Session VII, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1984.

**[42] TARDAT-HENRY Monique,** « Chimie des eaux », Université de Cégep de Saint-Laurent.

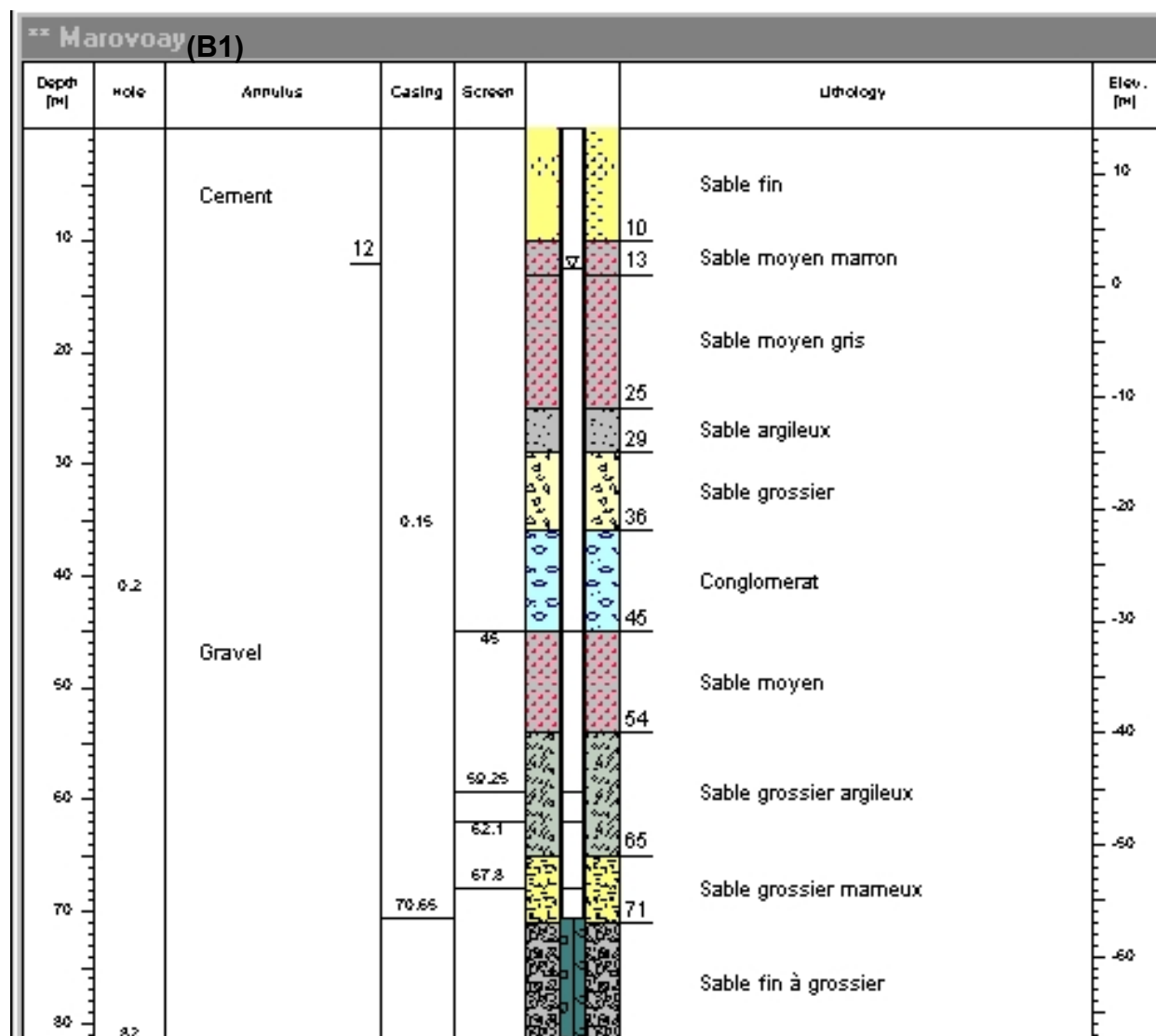
**[43] TOGNIHANITSE,** « Etude d'approvisionnement en eau de la région comprise entre le fleuve Onilahy et Mangoky à partir de l'exploitation d'eaux souterraines », mémoire d'Ingéniorat en Hydraulique, ESPA, 1998.

**[44] TORRENTH,** « Etude des ressources en eaux souterraines de la plaine de Morondava », rapport BRGM – Nations Unies, 1970.

# ANNEXES

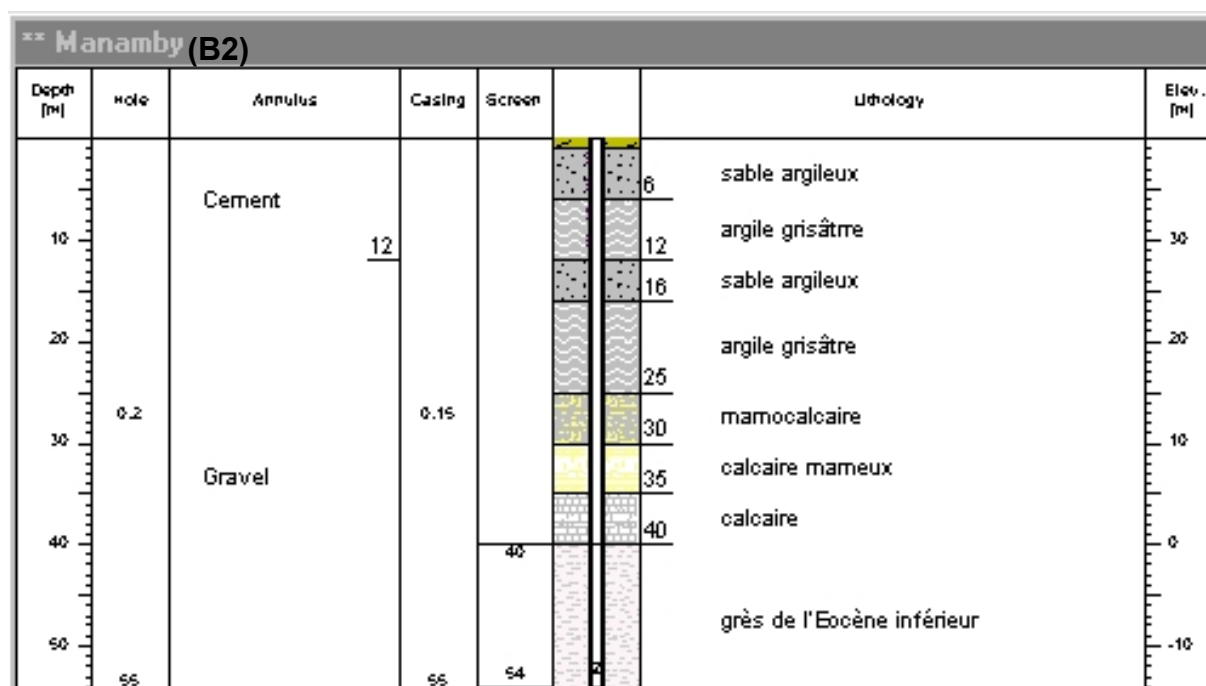


# I- COUPES LITHOLOGIQUES DES FORAGES



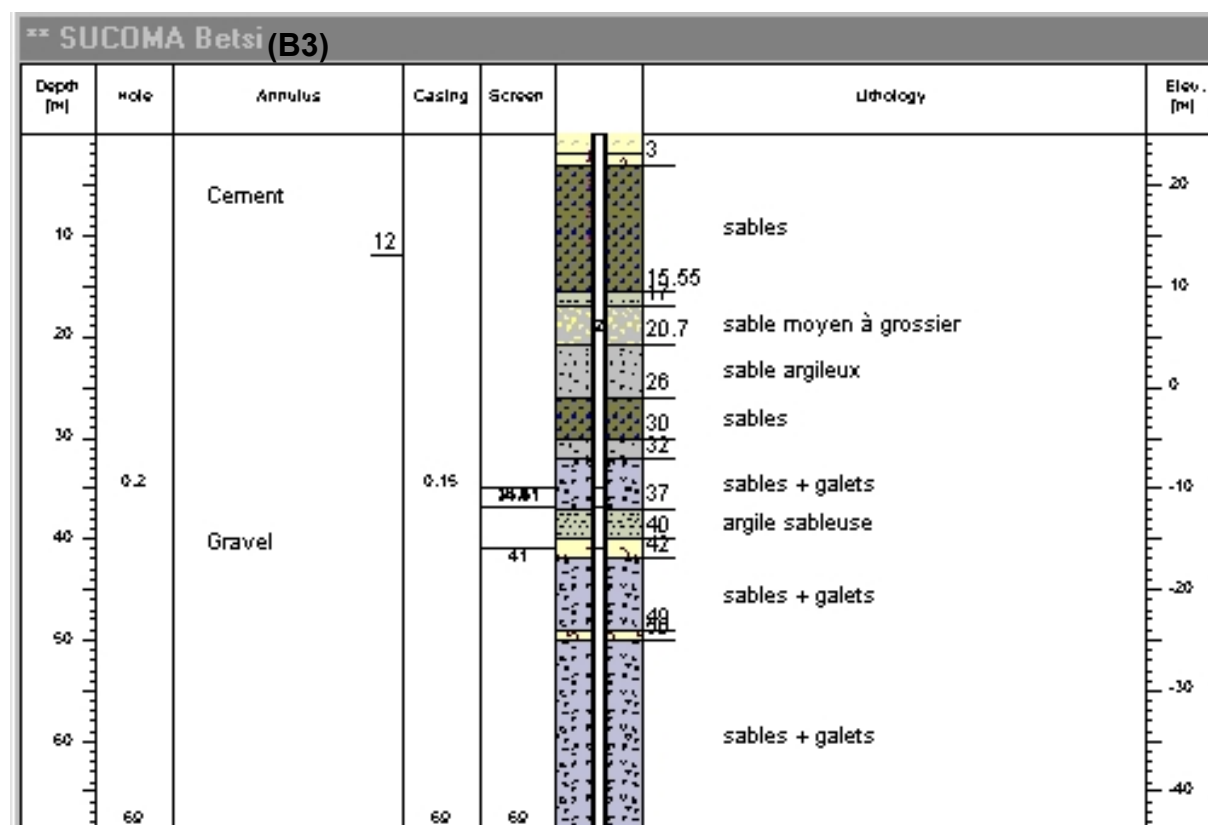
Niveau Statique : 1.62m

Profondeur : 70.65m



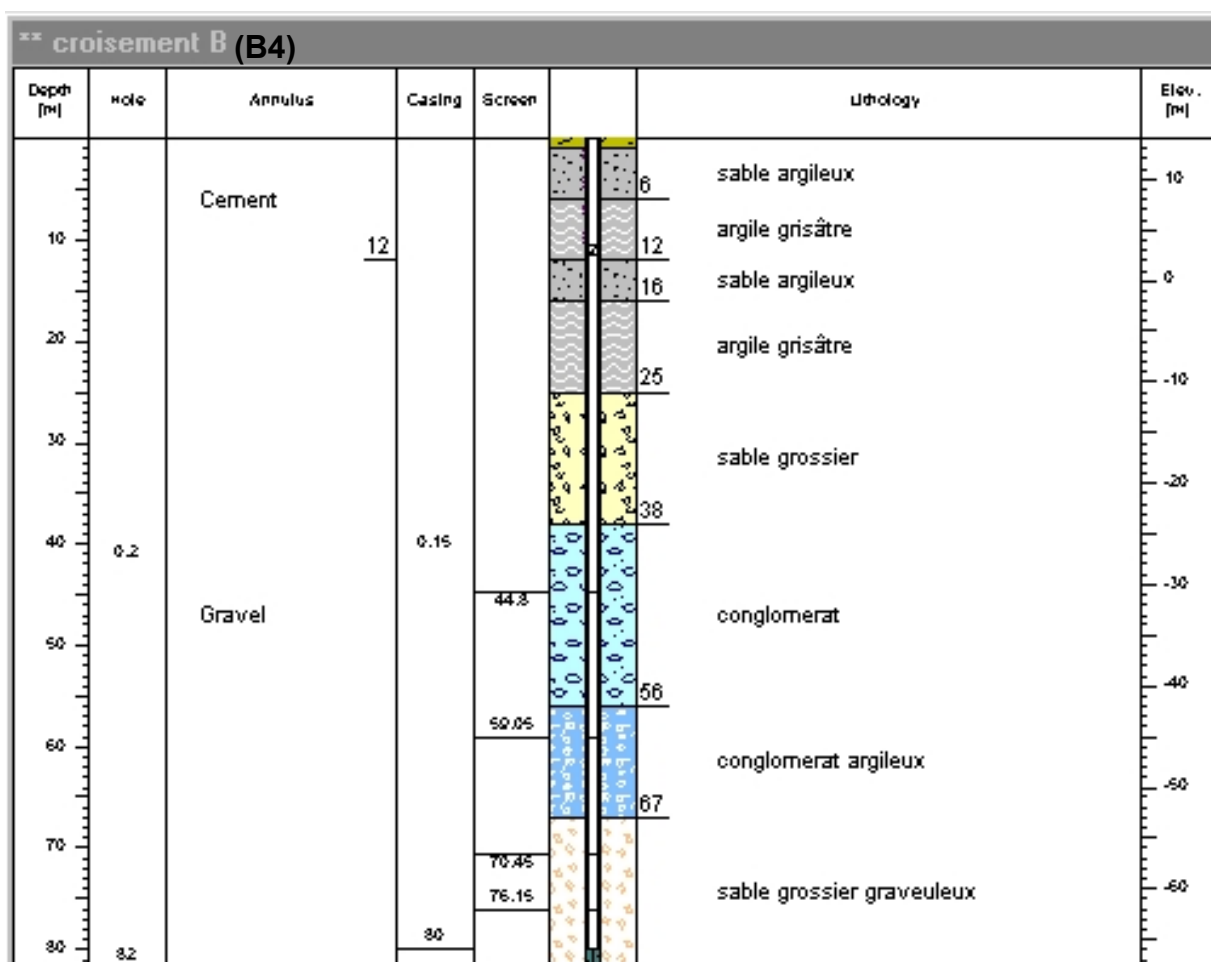
Niveau Statique : +12.60m

Profondeur : 55m



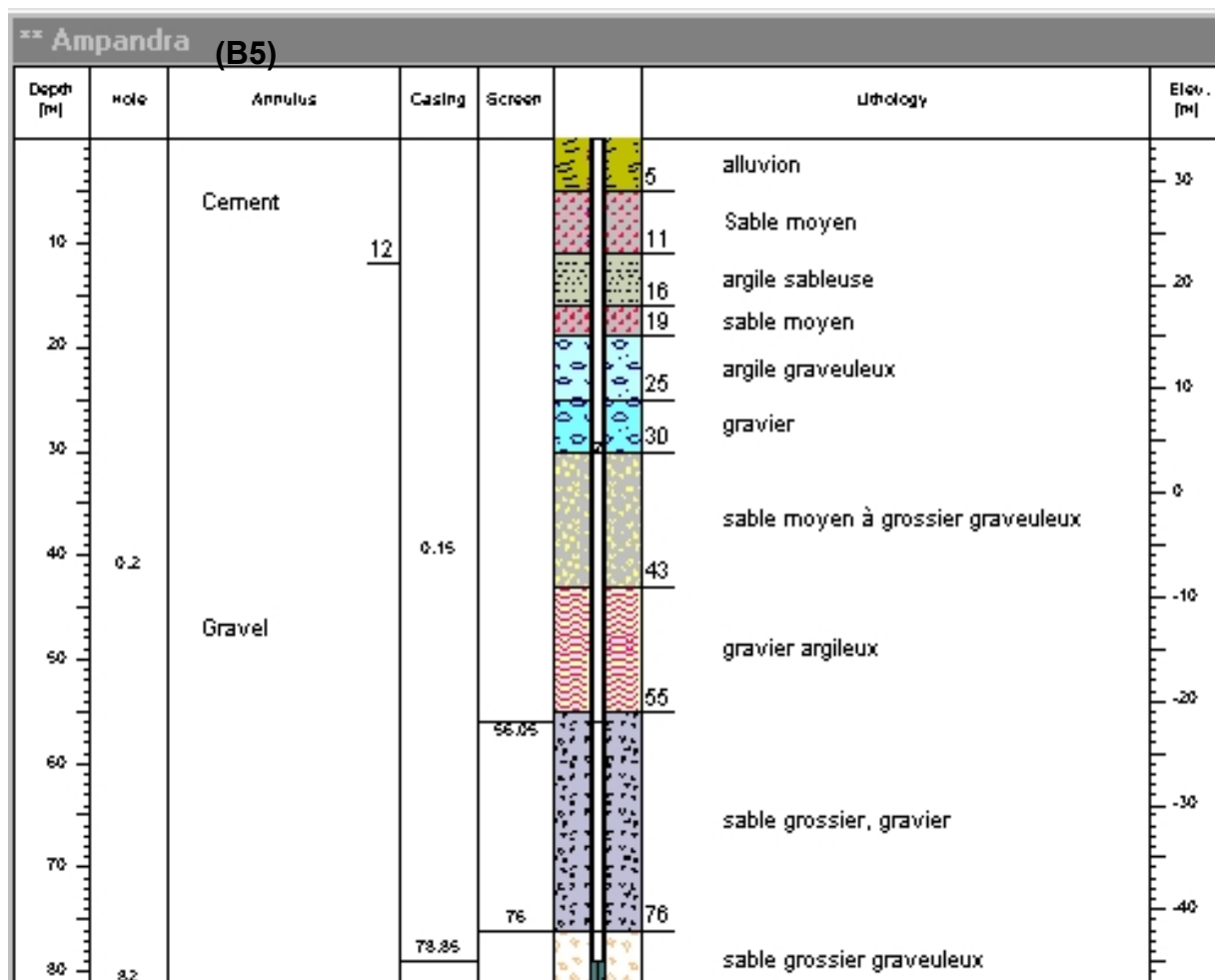
Niveau Statique : 5.63m

Profondeur : 69m



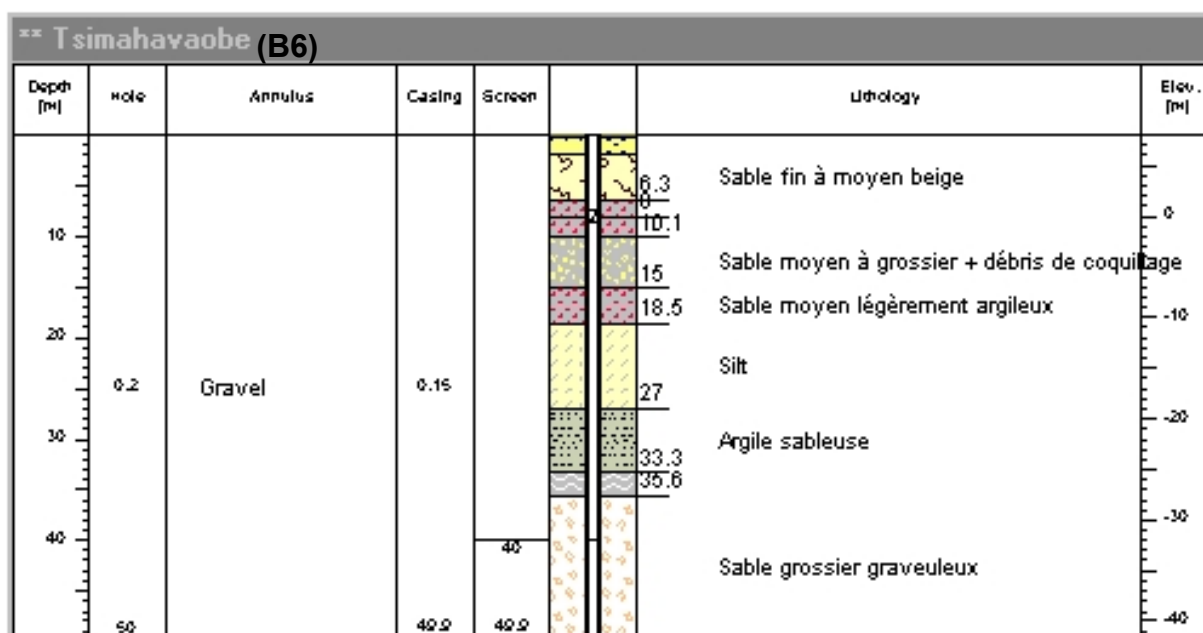
Niveau Statique : 2.48m

Profondeur : 80m



Niveau Statique : 3.86m

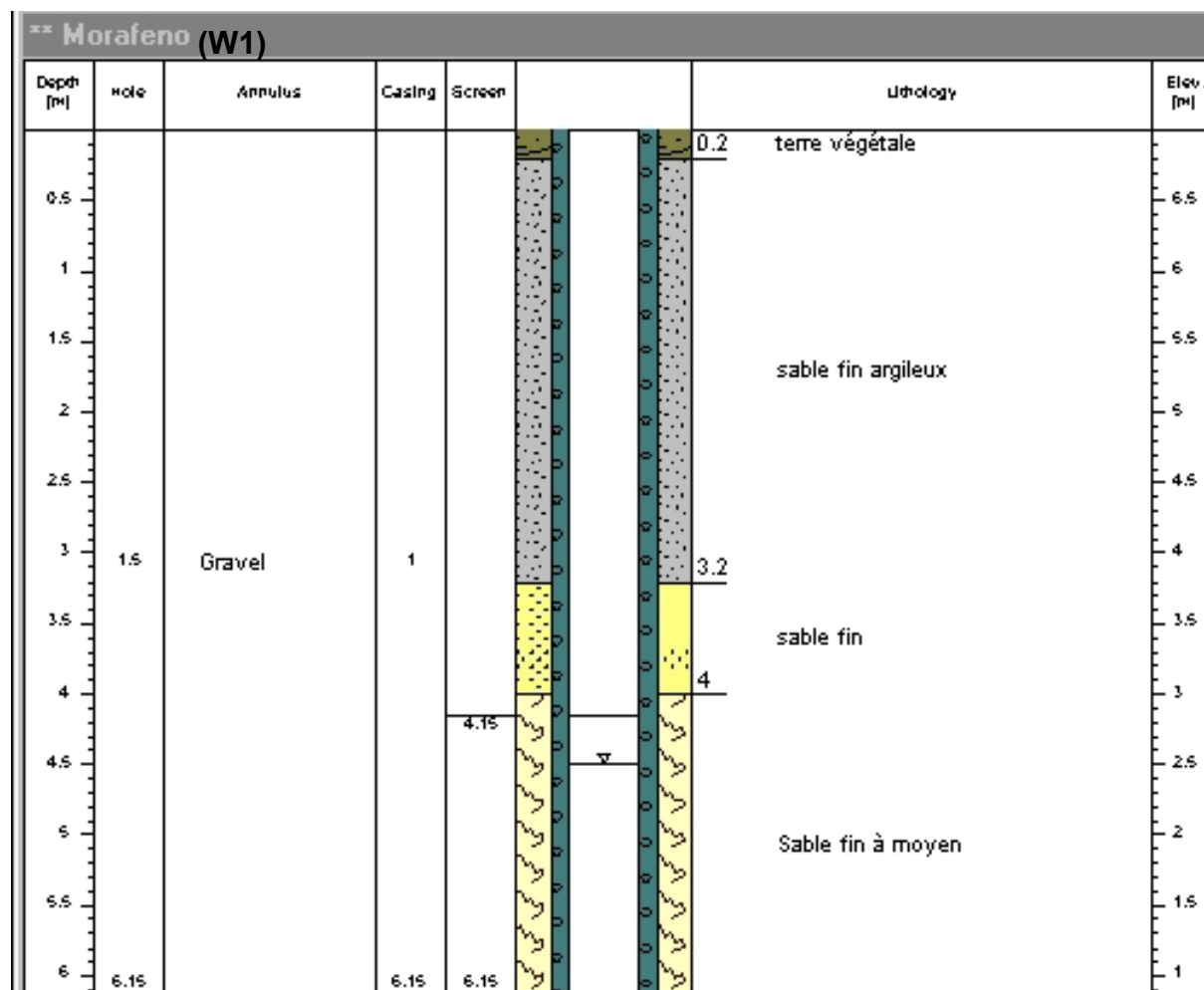
Profondeur : 78.85m



Niveau Statique : +0.50m

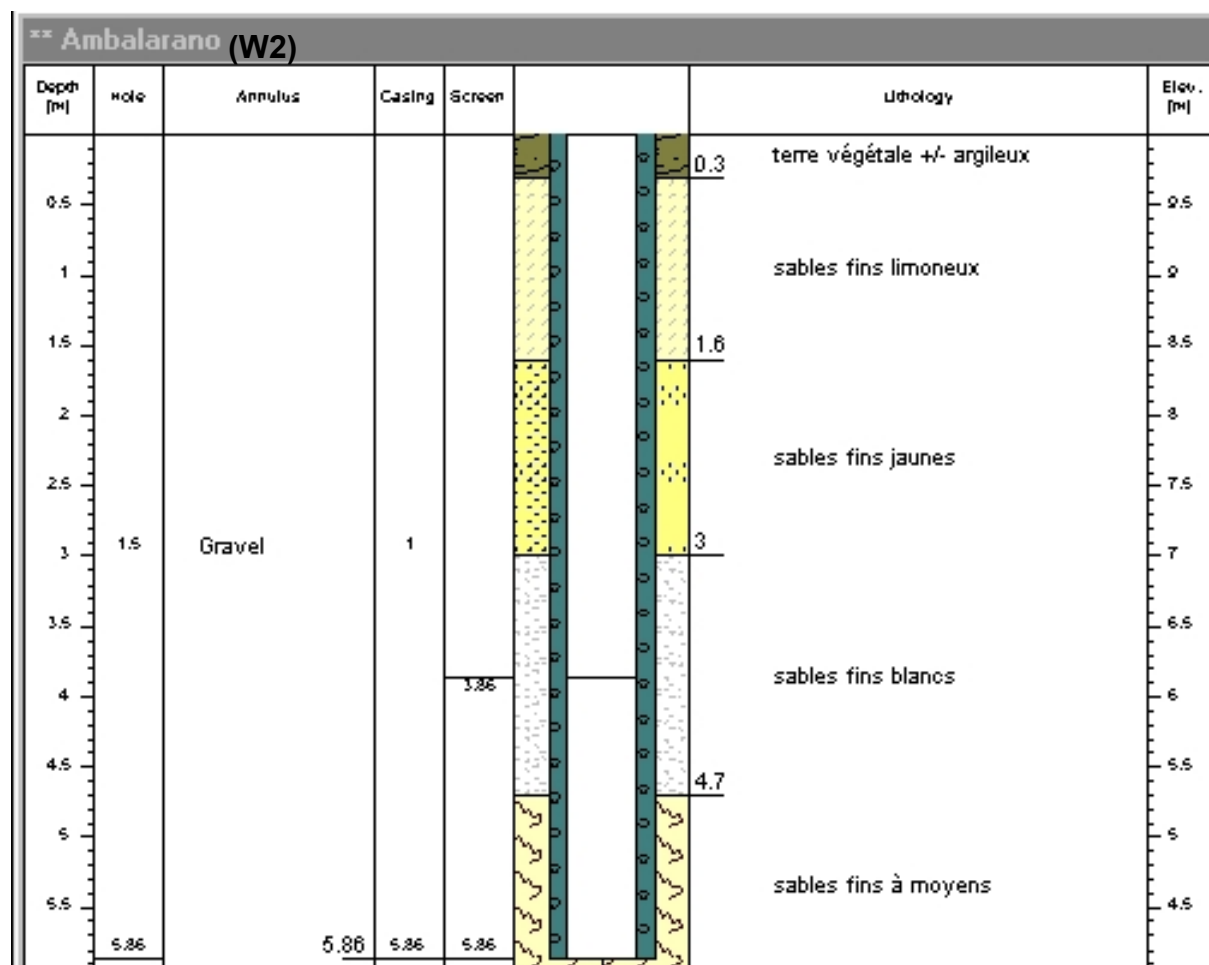
Profondeur : 49.9m

## II- COUPES LITHOLOGIQUES DES Puits



Niveau Statique : 2.50m

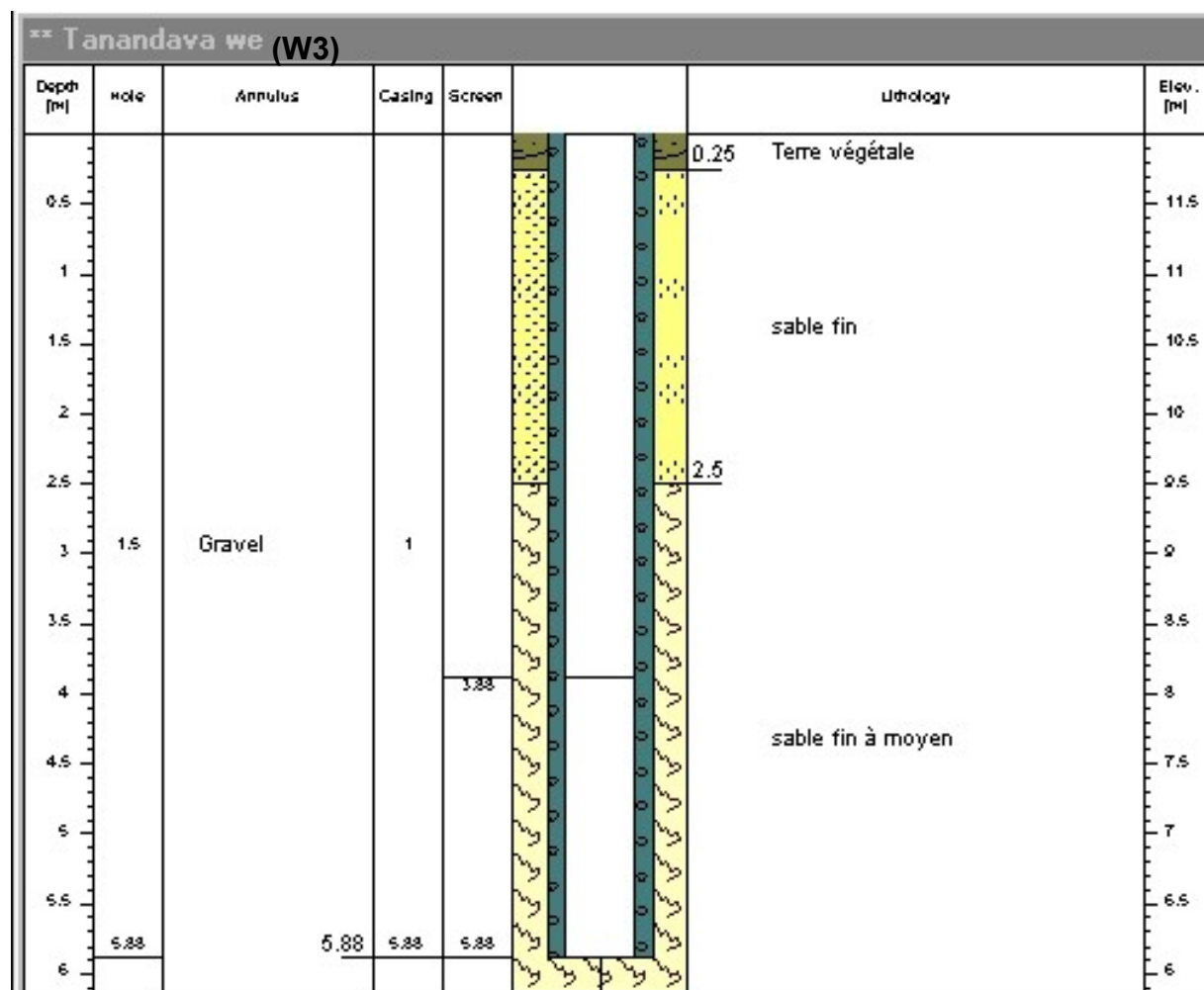
Profondeur : 6.15m



Niveau Statique : 1.76m

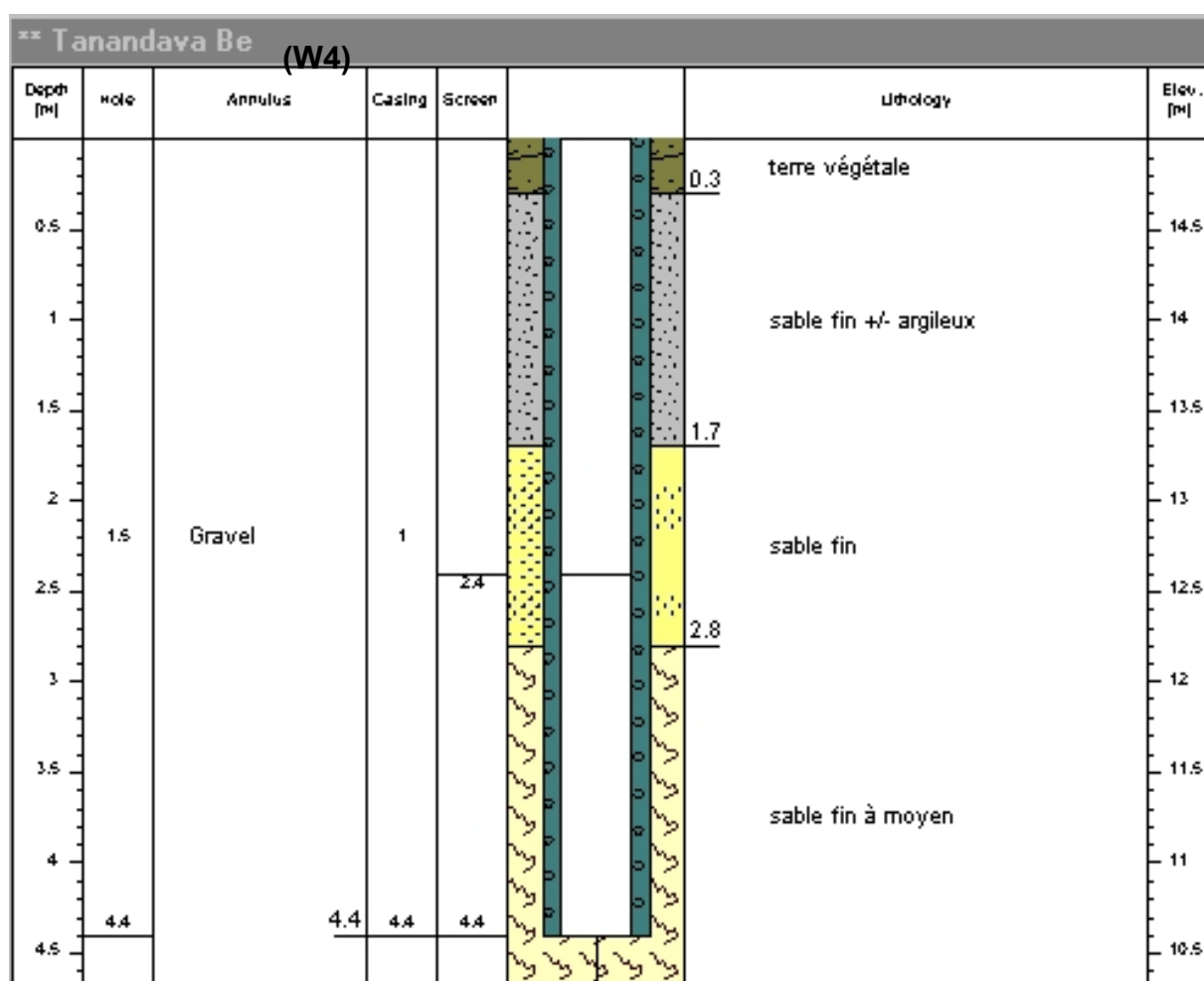
Profondeur : 5.86m





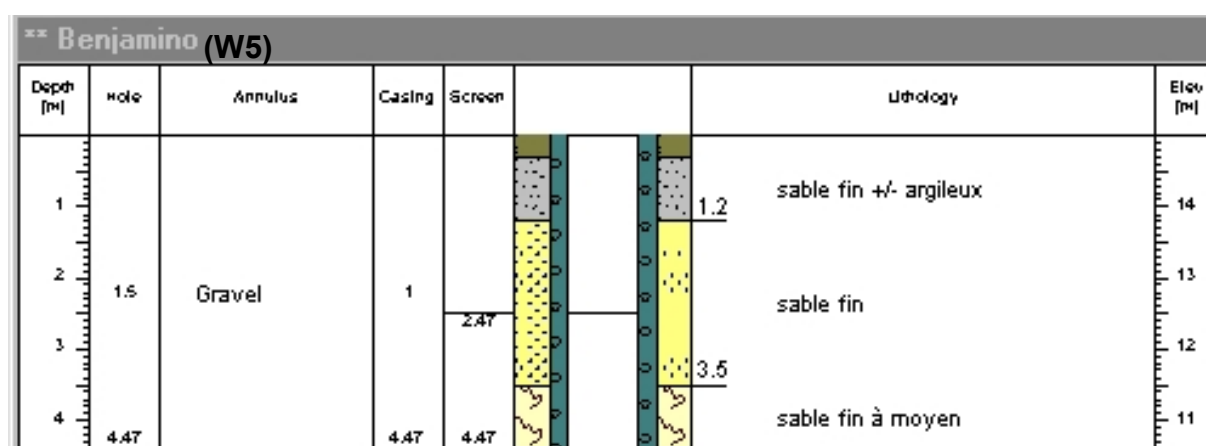
Niveau Statique : 2.35m

Profondeur : 5.88m



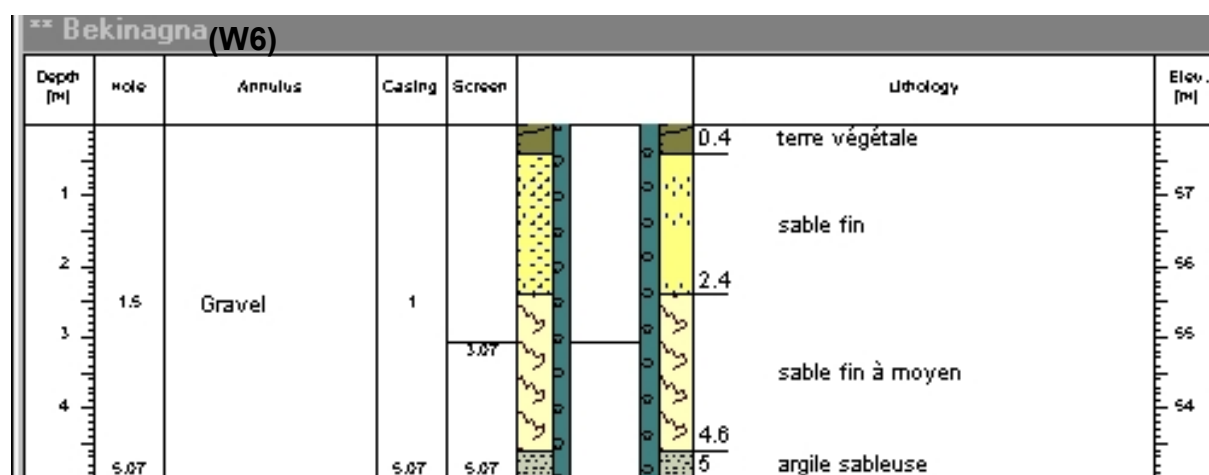
Niveau Statique : 2.60m

Profondeur : 4.4m



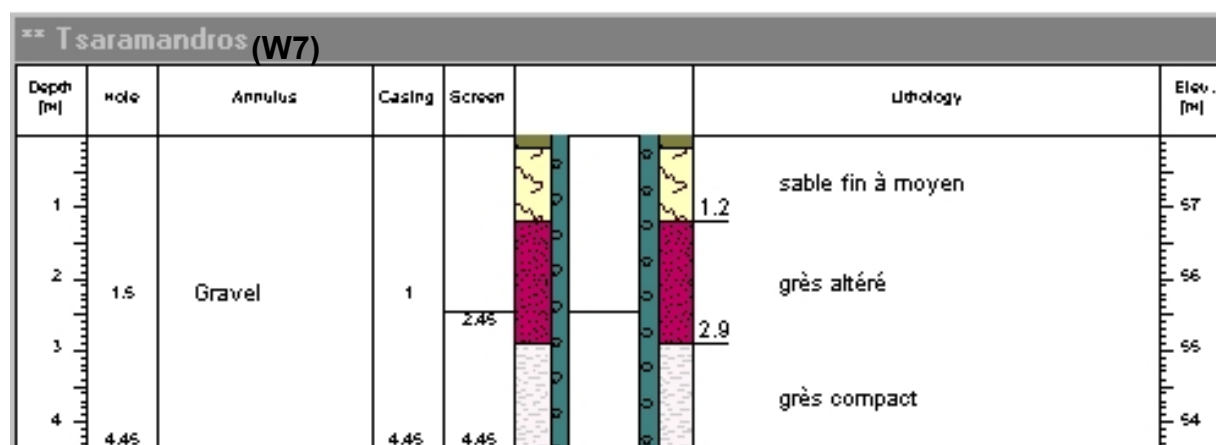
Niveau statique : 1.90m

Profondeur : 4.47m



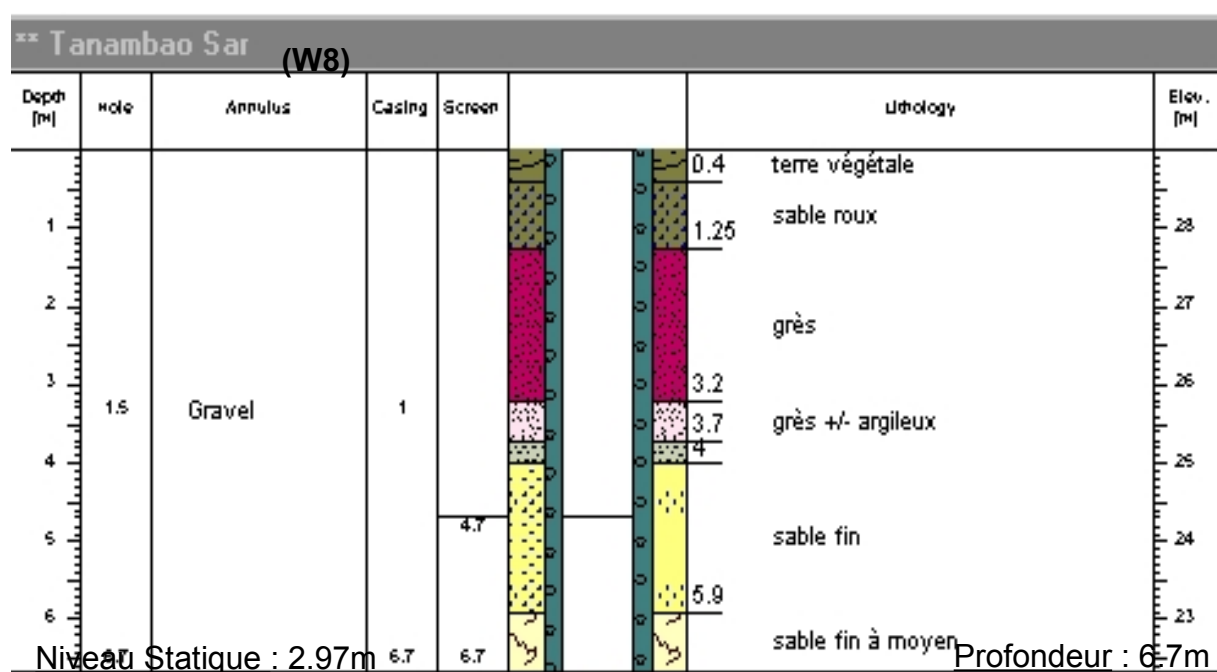
Niveau Statique : 1.69m

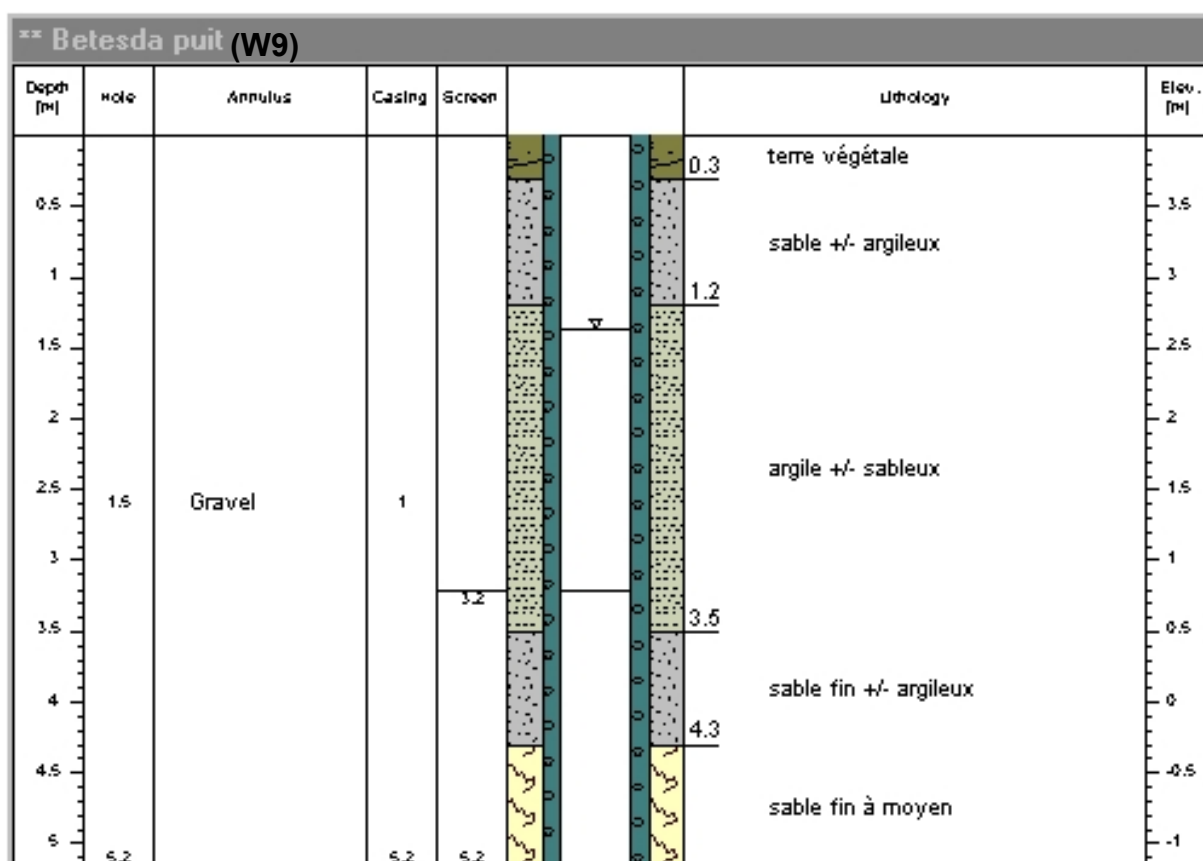
Profondeur : 5.07m



Niveau Statique : 1.45m

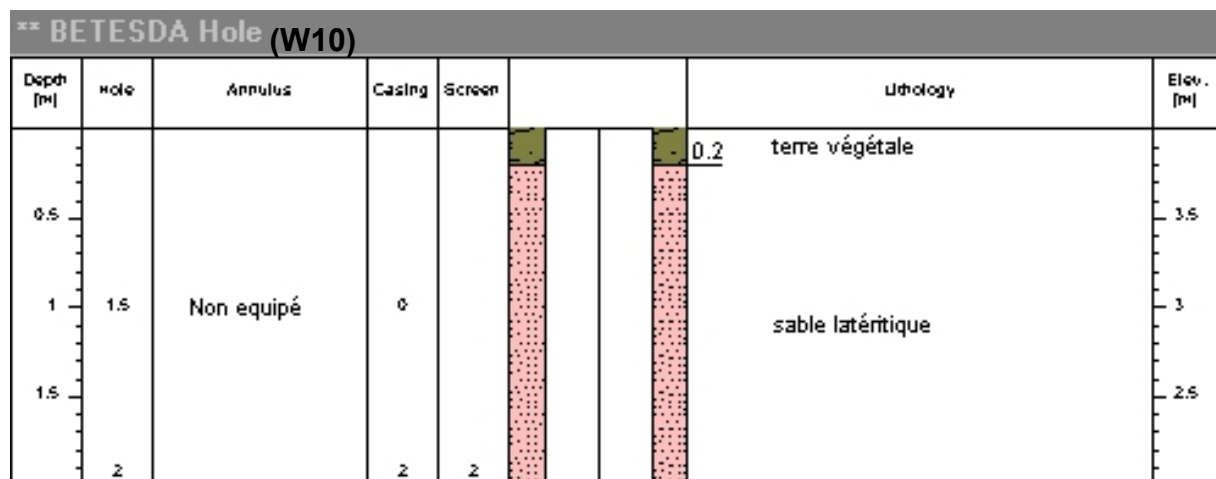
Profondeur : 4.45m





Niveau Statique : 2.63m

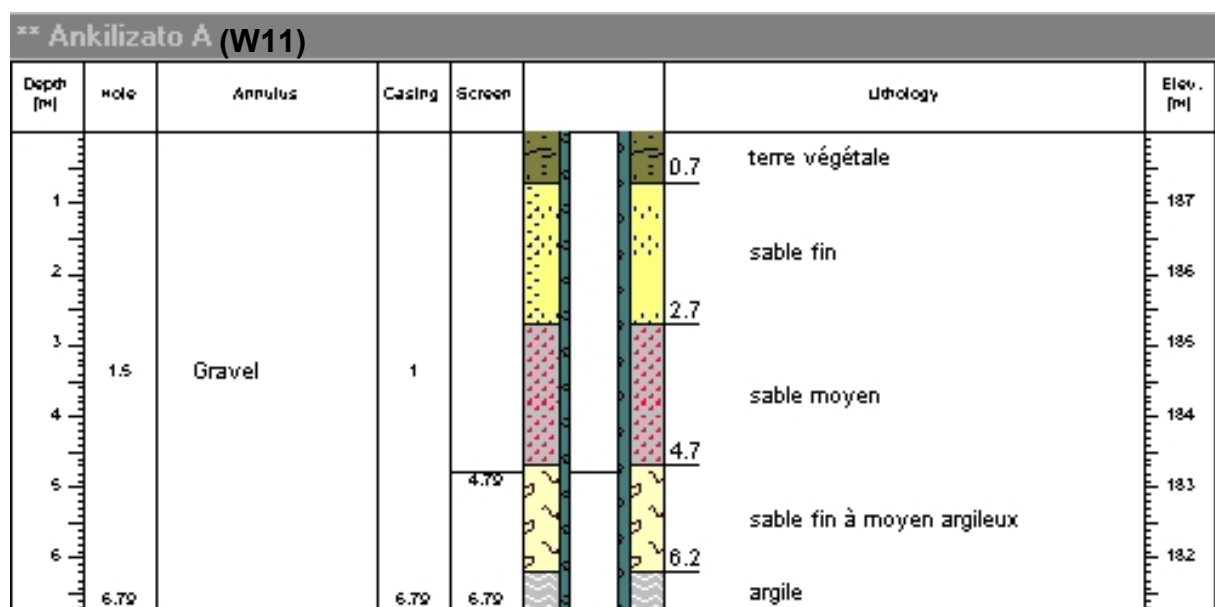
Profondeur : 5.2m



Niveau Statique : 0.30m

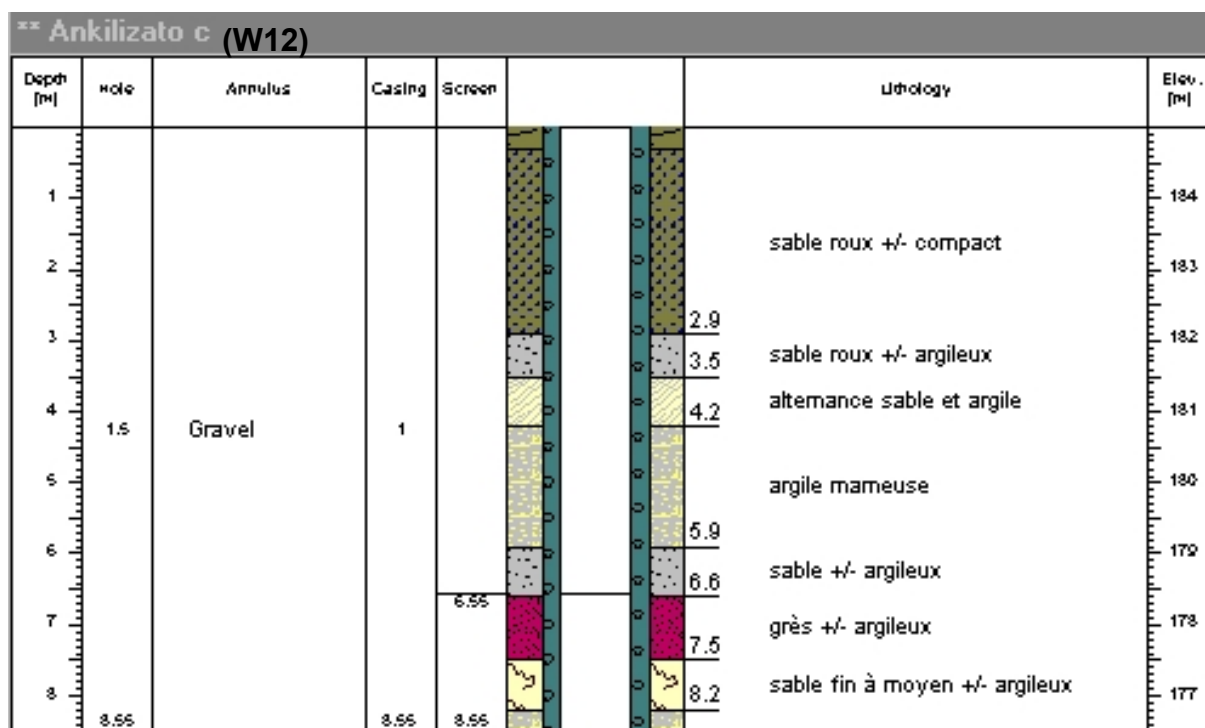
Profondeur : 2m





Niveau Statique : 4.76m

Profondeur : 6.79m



Niveau statique : 1.91m

Profondeur : 8.55m

### III-1- NORME DE POTABILITE DES EAUX D'APRES L'OMS

SUBSTANCES	CONCENTRATION MAXIMALE ACCEPTABLE	CONCENTRATION MAXIMALE TOLERABLE
Solides (total).....	500 mg/l	1500 mg/l
Fer (Fe).....	0.3 mg/l	1.0 mg/l
Magnésium (Mg).....	50 mg/l	150 mg/l
Manganèse (Mn).....	0.1 mg/l	0.5 mg/l
Cuivre (Cu).....	1.0 mg/l	1.5 mg/l
Zinc (Zn).....	5.0 mg/l	15.0 mg/l
Calcium (Ca).....;	75 mg/l	200 mg/l
Sulfate (SO <sub>4</sub> ).....	200 mg/l	400 mg/l
Chlore (Cl).....	200 mg/l	600 mg/l
Magnésium et Sodium (Sulfates).....	500 mg/l	1000 mg/l
Composés phénoliques.....	0.001 mg/l	0.001 mg/l
Chloroforme de carbone.....	0.2 mg/l	0.5 mg/l
Sulphonates Alkyl Benzyl....	0.5 mg/l	1.0 mg/l
PH.....	7.0 à 8.5	6.5 à 9.2
Conductivité(μS/cm à 20°C).	1500	2000

### III-2- NORME DE RE FERENCE DE LA JIRAMA APPLICABLE A L'EAU DE BOISSON

	Paramètres	Limites Acceptables
<b>Paramètres microbiologiques</b>	Organisme pathogène	
	- Salmonelles	
	- Staphylocoques	Absence
	- Enterovirus	
	- Coliformes	0/ 100ml
	- Streptocoques fécaux	0/ 100ml
	- Clostridium Sulfito-réducteur	0/ 20ml
<b>Paramètres organoleptiques</b>	- Aspect	Limpide
	- Couleur	< 15mg/l Pt - co
	- Turbidité	< 5 NTU
	- Saveur et Odeur	Non gênant pour le Consommateur
<b>Paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelles des eaux</b>	- Température	< 25°C
	- Conductivité à 20°C	< 2000µS/cm
	- pH	6.5 – 9.5
	- Chlorures	
	- Sulfates	250mg/l
	- Magnésium	50mg/l
	- Sodium	175mg/l
	- Potassium	12mg/l
	- Aluminium	0.2mg/l
	- Dureté	50°F
<b>Paramètres concernant les substances indésirables</b>	- Résidu sec	< 1500mg/l
	- Nitrates	50mg/l
	- Nitrites	0.1mg/l
	- Ammonium	0.05mg/l
	- Azote Kjeldalh	2mg/l (en N)
	- Oxydabilité en permanganate	2mg/l
	- Fer	0.3mg/l
	- Manganèse	0.05mg/l
	- Cuivre	1mg/l
	- Phosphore	5mg/l (P205)
	- Fluor	1.5mg/l
	- Argent	0.01mg/l

---

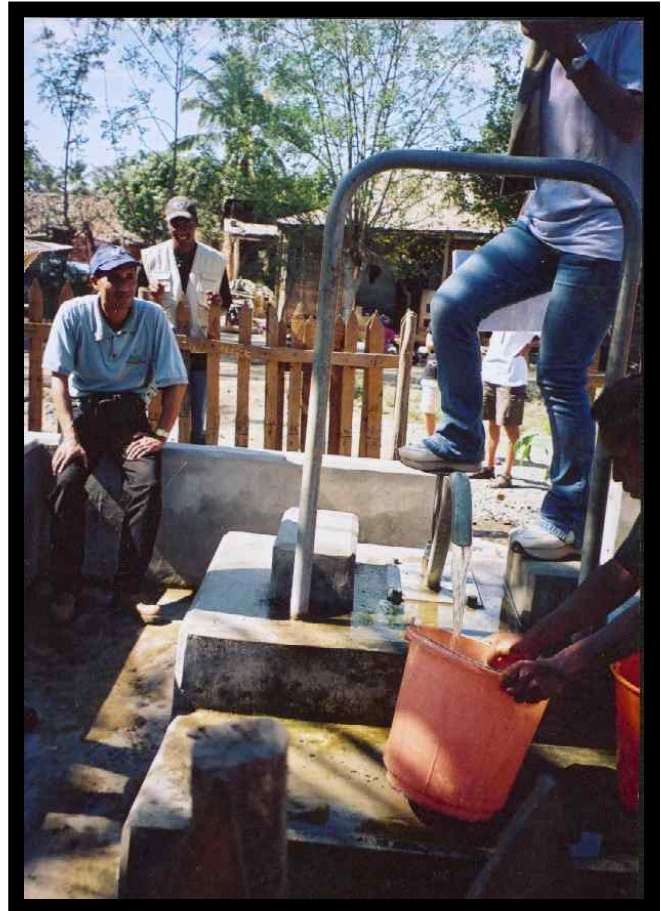
<b>Substance toxique</b>	- Plomb	0.1mg/l
	- Selenium	0.05mg/l
	- Arsenic	0.05mg/l
	- Cyanure	0.01mg/l
	- Mercure total	0.001mg/l
	- Chrome hexavalent	0.05mg/l
	- Cadmium	0.01mg/l

---

#### IV : QUELQUES PHOTOS DE POINTS D'EAUX



**Photo 1 : Tsaramandroso (W 7)**  
**Puit moderne de l'UNICEF (à main)**



**Photo 2 : Ampandra (B 5)**  
**Forage de JICA (à pédale)**





**Photo 3 : Betesda Puit (W 9)**  
**Puit de l'UNICEF (non équipé)**



**Photo 4 : Betesda Puit (W 9)**  
**Puit de l'UNICEF (non équipé)**



**Photo 5: Marovoay (B 1)**  
**Forage de JICA (à pédale)**



**Photo 6: Manamby (B 2)**  
**Forage artésien**





**Photo 7 : Croisement BST (B 4)**  
**Forage de JICA (à pédale)**



**Photo 8: Barrage à Dabara (R 1)**



**Photo 9: Barrage à Dabara (R 1)**

## **RESUME**

L'objectif de ce travail est de faire une étude préliminaire de la vulnérabilité à la contamination de la nappe du bassin versant de la rivière Morondava. Les méthodes utilisées sont conjointement les études géologiques, hydrogéologiques, l'hydrochimie et les techniques isotopiques.

Cette étude nous a permis d'avoir un aperçu des faciès chimiques des eaux, les conditions de recharge de la nappe, mais surtout pour déterminer les foyers potentiels et actifs de la pollution nitraté.

Pour cela, deux descentes sur terrain ont été effectuées dans le cadre du projet MAG/8/003. La première a été consacrée à l'échantillonnage des eaux (souterraines ou surfaces), et la deuxième a été basée sur les études géologiques et hydrogéologiques. Les échantillons collectés sont destinés à l'analyse des isotopes stables ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{15}\text{N}$  et  $^{87}\text{Sr}$ ) et radioactifs ( $^3\text{H}$ ), et des ions majeurs dans le laboratoire de l'A.I.E.A.

L'étude a donné la conclusion suivante :

- ❖ les nappes sont affectées par l'évaporation avant ou au cours d'infiltration et par l'intrusion marine.
- ❖ la région de Morondava est soumise à un régime de précipitation océanique simple (excès en deutérium).
- ❖ les eaux de forages ont un faciès bicarbonaté sodique, tandis que les eaux de puits appartiennent au faciès bicarbonaté calcique.
- ❖ les nappes superficielles (nappes de subsurface) captées par les puits sont plus vulnérables que les nappes profondes (nappes homogènes) captées par les forages. Ces hypothèses sont prouvées par les résultats des investigations géologiques et hydrogéologiques, par les résultats d'analyse des nitrates dans les nappes, et confirmés par les isotopes radioactifs ( $^3\text{H}$ ).

---

**Mots clés :** *vulnérabilité, contamination, bassin versant, isotopes stables, radioactifs, évaporation et intrusion marine.*

**Encadreur :** *Prof. RAJAOBELISON Joël*

---

## **ABSTRACT**

The objective of this work is to make a preliminary survey of the vulnerability to the contamination of the aquifers of Morondava river catchments. The methods used are the geological and hydrogeological surveys, the hydrochemistry and isotopic techniques.

This survey allows us to have an overview of the chemical features of groundwaters, conditions of recharge, and especially to determine the potential and active zone of nitrate pollution.

Two field works have been carried out within the frame of MAG/8/003 project. The first one is focused on groundwater sampling and surface water sampling, and the second one is based on the geological and hydrogeological surveys. The samples were sent for isotope ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{15}\text{N}$  and  $^{87}\text{Sr}$ ) and radioactive ( $^3\text{H}$ ), and chemical analysis to the I.A.E.A laboratories.

The survey conclude that:

- ❖ the groundwaters are affected by evaporation before or during infiltration and saline intrusion.
- ❖ the region of Morondava is submitted to a regime of simple oceanic precipitation (excess in deuterium).
- ❖ the boreholes waters of sodic-bicarbonate chemical type, whereas well waters belong to the calcic-bicarbonate.
- ❖ all wells trap the superficial aquifers (subsurface aquifers) which are more vulnerable with respect to the deep aquifers (homogeneous aquifers) which are trapped by boreholes. These hypotheses are proven by geological and hydrogeological investigations, by the groundwaters nitrate analyses results, and are confirmed by radioactive isotope ( $^3\text{H}$ ).

---

**Key words :** *vulnerability, contamination, catchments, stable isotopes, radioactive isotopes, evaporation and saline intrusion.*

**Supervisor :** *Prof. Joël RAJAOBELISON*

---

