

SOMMAIRE

| | |
|---|----------|
| INTRODUCTION | 1 |
| PARTIE I Contexte général de la zone d'étude | |
| 1 : Présentation de la zone d'étude | 3 |
| 1-1- Cadre géographique | 3 |
| 1-2- Contexte géologique | 4 |
| 1-3- Situation géomorphologique | 5 |
| 1-4- Forme végétale | 6 |
| 1-5- Réseau hydrographique | 7 |
| 1-6- Aperçus hydrogéologiques | 8 |
| 1-7- Données climatiques | 9 |
| 1-7-1 - La station d'Antananarivo | 9 |
| 1-7-2- La station d'Ambohimanga | 9 |
| 1- 8- Précipitation | 9 |
| 1-9- Températures | 11 |
| 1-10- Evaporation | 12 |
| 1-11- Bilan hydrique | 14 |
| PARTIE II Rappel méthodologique | |
| 1 - Généralité sur les aquifères | 17 |
| 1-1- Définition de l'aquifère | 17 |
| 1-1-1- Aquifère à nappe libre | 17 |
| 1-1-2- Aquifère à nappe captive | 17 |
| 1-1-3- Aquifère semi captive | 18 |
| 2 : Photo-interprétation | 18 |
| 2-1- Photo-interprétation | 18 |
| 2-2- Télédétection | 19 |
| 3 : Géophysique | 19 |
| 3-1- Principe de la méthode électrique | 20 |
| 3-1-1- Notion de résistivité vraie et résistivité apparente | 20 |
| 3-1-2- Sondage électrique | 21 |
| 3-1-3- Panneau électrique | 21 |
| 3-2 Méthode de résistivité | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 3-2-1- Principe de la méthode | 22 |
| 3-2-2- Mise en œuvre | 22 |
| 3-2-3- Interprétation | 23 |
| <u>4 : Conclusion.....</u> | <u>23</u> |
| PARTIE III Analyse et traitement des données | |
| 1 - Analyse par image satellitaire | 25 |
| 2 - Application à l'imagerie électrique 2D | 26 |
| 2-1- Travaux exécutés | 26 |
| 2-2- Matériels de prospection..... | 27 |
| 2-3- Interprétation des coupes géoélectriques | 28 |
| 2-3-1 Coupe A..... | 28 |
| 2-3-2- Coupe B..... | 29 |
| <u>3 : Conclusion.....</u> | <u>29</u> |
| PARTIE IV Résultat de forage | |
| 1-Résultat du forage | 32 |
| 1-1- Foration..... | 32 |
| 1-2- Equipement du forage..... | 32 |
| 1-3- Développement..... | 34 |
| 1-4-Essai de pompage | 35 |
| 1-4-1- Evaluation du débit critique (q_c) | 35 |
| 1-4-2- Evaluation de la perméabilité K_s | 36 |
| <u>2 : Conclusion</u> | <u>35</u> |
| CONCLUSION GENERALE | 37 |

LISTE DES ACRONYMES

| | |
|----------------|---|
| AEP : | Adduction en eau potable |
| CBIC : | Construction de B âtiments I ndustriels et C ivils |
| IOGA : | Institut et Observatoire Géophysique d’Ambohidempona |
| SGDM : | Société Géosciences pour le Développement de Madagascar |
| MSTGA : | Maîtrise en Sciences et Techniques en Géophysique appliquée |
| RMS : | Root Mean Squared |
| Stat : | Station |
| RFU : | Réserve facilement utilisable |

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE I** : Relation entre le courant injecté I et la résistivité ρ du sous sol.
- ANNEXE II** : Compléments du Bilan hydrique
- ANNEXE III** : Appareillage et matériels utilisés lors du forage

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|------|
| <u>Fig. 1</u> : Localisation de la zone d'étude | p.3 |
| <u>Fig. 2</u> : Carte géologique régionale (Extrait de BD500 Madagascar) | p.5 |
| <u>Fig. 3</u> : Carte de la végétation(Extrait du BD500 FTM)..... | p.7 |
| <u>Fig. 4</u> : Carte hydrographique | p.10 |
| <u>Fig.5</u> : Variation mensuelle de la précipitation | p.13 |
| <u>Fig. 6</u> : Variation mensuelle de la température | p.13 |
| <u>Fig. 7</u> : Variation mensuelle de l'évaporation | p.11 |
| <u>Fig. 8</u> : Variations mensuelles de la précipitation et de l'évaporation pour la station d'antananarivoo | p.14 |
| <u>Fig. 9</u> : Représentation schématique d'une nappe libre | p.18 |
| <u>Fig. 10</u> : Représentation schématique d'une nappe captive | p.18 |
| <u>Fig. 11</u> : Représentation schématique d'une nappe semi captive..... | p.18 |
| <u>Fig. 12</u> : Configuration des électrodes en prospection électrique | p.20 |
| <u>Fig.13</u> : Configuration du dispositif Schlumberger..... | p.21 |
| <u>Fig.14</u> : Configuration des électrodes pour le panneau électrique du type WENNER | p.23 |
| <u>Fig. 15</u> : Carte des linéaments, résultat d'analyse de l'image satellite..... | p.25 |
| <u>Fig. 16</u> : Plan de localisation des profils | p.26 |
| <u>Fig. 17</u> : Le résistivimètre et ses accessoires | p.27 |
| <u>Fig. 18</u> : Coupe géoélectrique du profil A..... | p.28 |
| <u>Fig. 19</u> : Coupe géoélectrique du profil B..... | p.28 |
| <u>Fig. 20</u> : Coupe du forage..... | p.34 |
| <u>Fig. 21</u> : Courbe Rabattement/Débit | p.35 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|------|
| <u>Tab. 1</u> : Répartition mensuelle de la précipitation | p.10 |
| <u>Tab. 2</u> : Variation des températures maximum et minimum..... | p.11 |
| <u>Tab. 3</u> : Variation mensuelle de l'évaporation | p.13 |
| <u>Tab. 4</u> : Bilan hydrique..... | p.15 |
| <u>Tab. 5</u> : Perméabilités dans chaque palier..... | p.36 |

INTRODUCTION

La question de la disponibilité et de l'accès à l'eau est sans aucun doute un des problèmes majeurs auquel devra faire face l'humanité durant le siècle à venir. Aujourd'hui on estime en effet qu'un habitant sur cinq de la planète n'a pas accès à l'eau et seulement, un sur trois du reste, dispose d'une eau de qualité. A Madagascar, 71% de la population vit en milieu rural et on estime que 12% ont accès à l'eau potable.

Ce mémoire se rapporte sur l'étude hydrogéologique et sur le forage d'eau effectué dans une propriété privée sise à Antanambao. Le site se trouve dans la commune de Talatan'ny Volonondry. Une construction est en cours de réalisation lors de la campagne de mesure.

L'étude se porte généralement sur l'analyse des documents hydrogéologiques, la prospection hydrogéologique détaillée dans le but de localiser la zone de circulation ou d'accumulation d'eaux souterraines pouvant satisfaire le débit de $1\text{m}^3/\text{h}$ et la reconnaissance géophysique. Cette dernière est basée sur la prospection électrique. Cette reconnaissance a été précédée par la photo-interprétation.

L'étude proprement dite a été réalisée par la Société Géosciences pour le Développement de Madagascar (SGDM), où j'ai effectué mon stage de fin d'études. La campagne de prospection s'était déroulée entre le 08 et le 09 septembre 2006. Le forage a été exécuté par l'entreprise **Ranosoa**.

Le présent mémoire comporte quatre grandes parties :

- Dans la première partie, nous présenterons un aperçu global du contexte général de la zone d'étude.
- Dans la deuxième partie, nous rappellerons la méthodologie appliquée en hydrogéologie telles que la photo-interprétation et la géophysique
- Dans la troisième partie, nous développerons l'analyse et le traitement des données
- Enfin, pour la quatrième partie, nous exposerons les résultats du forage.

PARTIE I

Contexte général de la zone d'étude

1 : Présentation de la zone d'étude

1-1- Cadre géographique :

La zone d'étude (cf. figure 1) se trouve, à environ 17 km, au Nord d'Antananarivo. Elle occupe une superficie d'environ 2 ha et se trouve géographiquement sur la latitude Sud $18^{\circ}47'38''$ et sur la longitude Est $47^{\circ}35'16''$ dans le fokontany d'Antanambao.

Antanambao appartient administrativement à la commune rurale de Talata'n'ny Volonondry dans le district d'Antananarivo Avaradrano de la région d'Analamanga dans la province autonome d'Antananarivo.

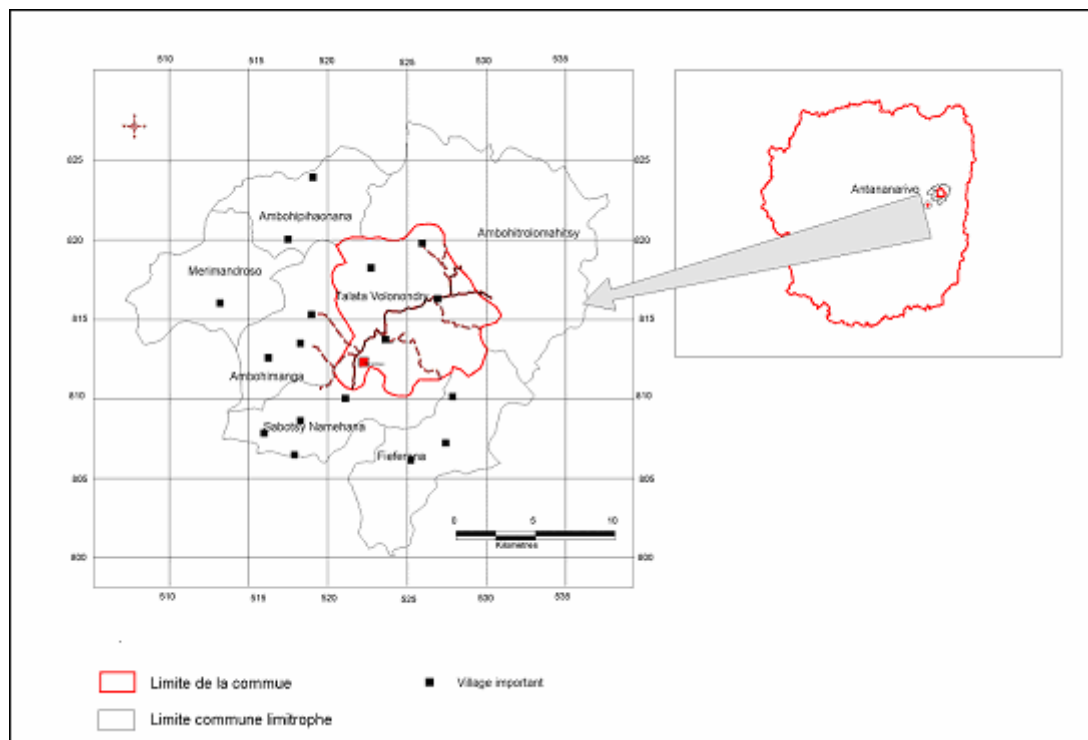


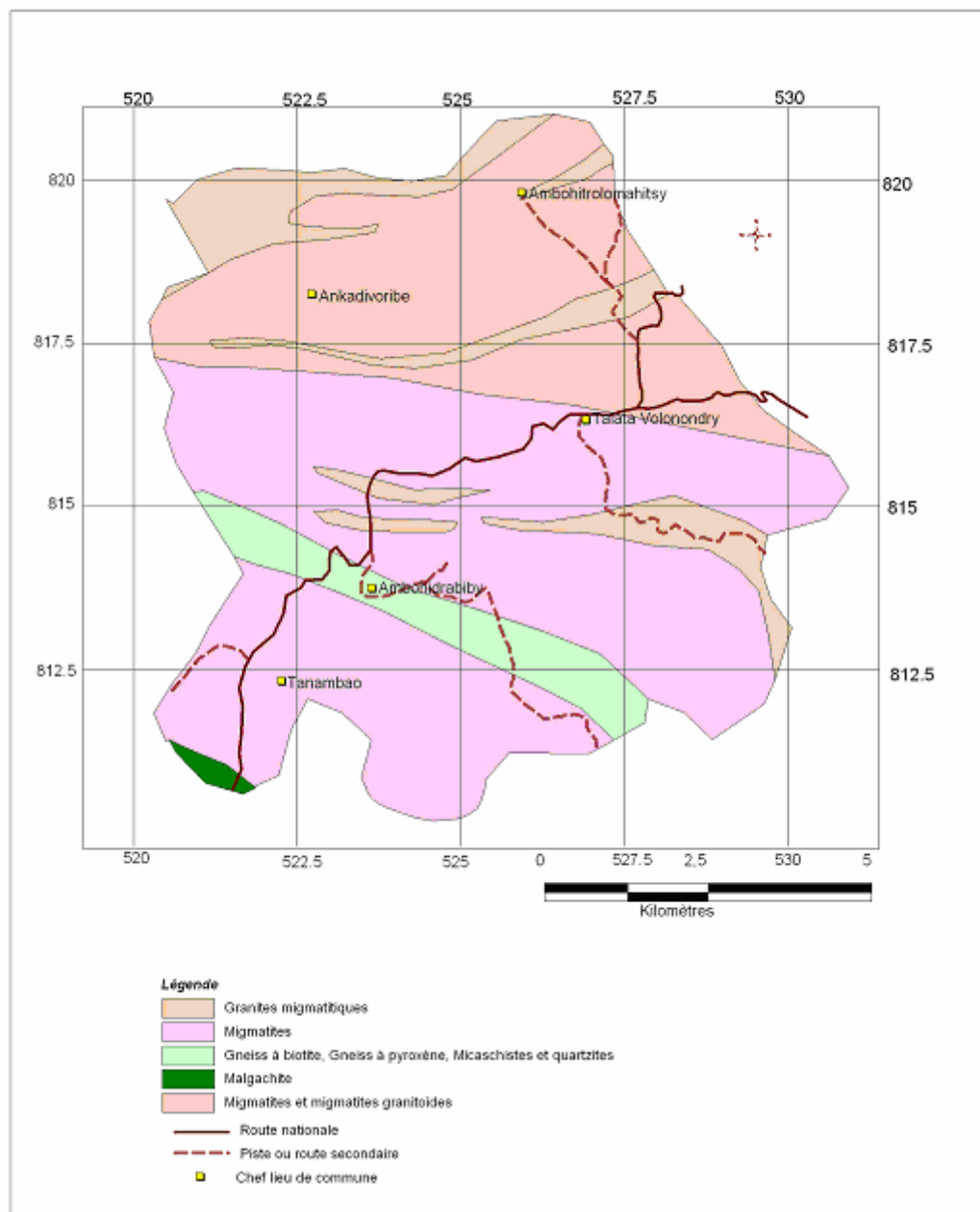
Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

1-2- Contexte géologique :

Madagascar est constitué pour les deux tiers de sa superficie par des roches magmatiques et métamorphiques précambriens constituant le socle cristallin (Haut Plateaux) et, pour le tiers restant, par des roches sédimentaires.

La zone d'étude est caractérisée par des formations superficielles et récentes, de roches intrusives et filoniennes et des schistes cristallins antécambriens.

- Les formations superficielles et récentes sont peu étendues dans l'ensemble. Elles sont constituées par des alluvions dans les différents cours d'eau du secteur.
- Les roches intrusives et filoniennes sont représentées par les filons granitiques dont certains sont assez chargés en ferromagnésiens.
- Les schistes cristallins d'âge antécambriens sont violemment plissés et en grande partie migmatisés et granitisés. Ils sont formés, d'une part, par la série amphibolique de Jabo considéré comme appartenant au système de Vohibory et d'autre part, par le système de Graphite comprenant les migmatites et migmatites granitoïdes à orthite d'Ankazobe-Angavo et les faciès gneissiques et micaschisteux à importantes intercalations de quartzite. La limite des deux systèmes dessine une ligne assez capricieuse parfois difficile à préciser. La migmatisation et la granitisation générale, ayant affecté une grande partie du socle, ont plus ou moins estompé les caractères pétrographiques des séries originelles, mais les considérations lithologiques (présence de faciès particuliers) ou structurales permettent d'apporter des précisions sur ces unités.



Source: SIGM-Service de la Géologie-Ampandrianomby

Figure 2 - Carte géologique (extrait de la base de données BD)

1-3- Situation géomorphologique

La zone de l'étude se trouve sur les Hautes Terres de Madagascar. Elle est caractérisée par un réseau très dense de bas fonds et de plaines alluviales, qui sont emboîtés dans les interfluviaux. Ces derniers sont dominés par des reliefs où le socle affleure de façon discontinue. En effet, le domaine est limité, à l'ouest par un bas fond principal, au sud et au nord par deux bas fonds adjacents beaucoup plus étroits que le bas fond principal.

En général, les plaines alluviales reposent sur le socle granito gneissique souvent altéré qui émerge par endroits pour former de petites collines bien individualisées.

En dehors de la plaine alluviale, le relief très vallonné rend compte du processus de pénéplanation du socle : dans les interfluves, l'essentiel des terrains à l'affleurement sont des produits de l'altération de ce socle alors que dans les bas-fonds se sont déposées alluvions et colluvions.

1-4- Forme végétale

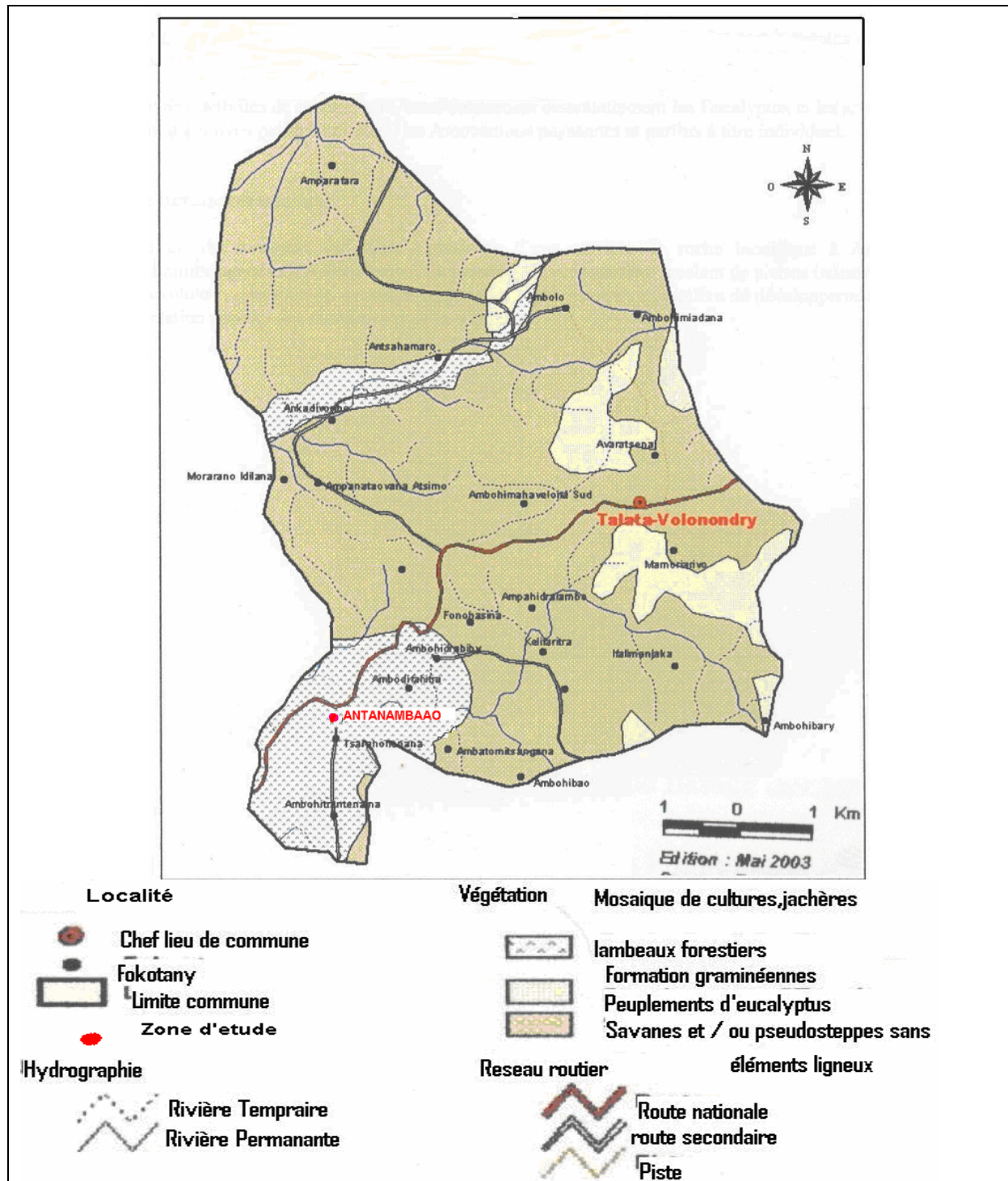
Les forêts et savanes dans la zone étaient réputées pour les innombrables richesses dont elles recelaient. Cependant, elles sont actuellement à une phase de dégradation très avancée, faute d'exploitation et de gestion rationnelle forestière.

Comme partout à Madagascar, la commune est confrontée au problème de détérioration de son écosystème. Les gens utilisent ce qui leur tombe entre les mains pour les valoriser. La forêt est la première à en faire face pour la confection des charbons de bois, sans parler de la fréquence des feux de brousse.

On y rencontre cependant, différentes espèces caractéristiques telles :

- Des arbres fruitiers tels que goyavier, citronnier, bibassier
- Des espèces végétales exotiques : eucalyptus, pinus patula.
- Des plantes médicinales : talapetraka,...

La carte suivante montre l'occupation du sol de la zone.

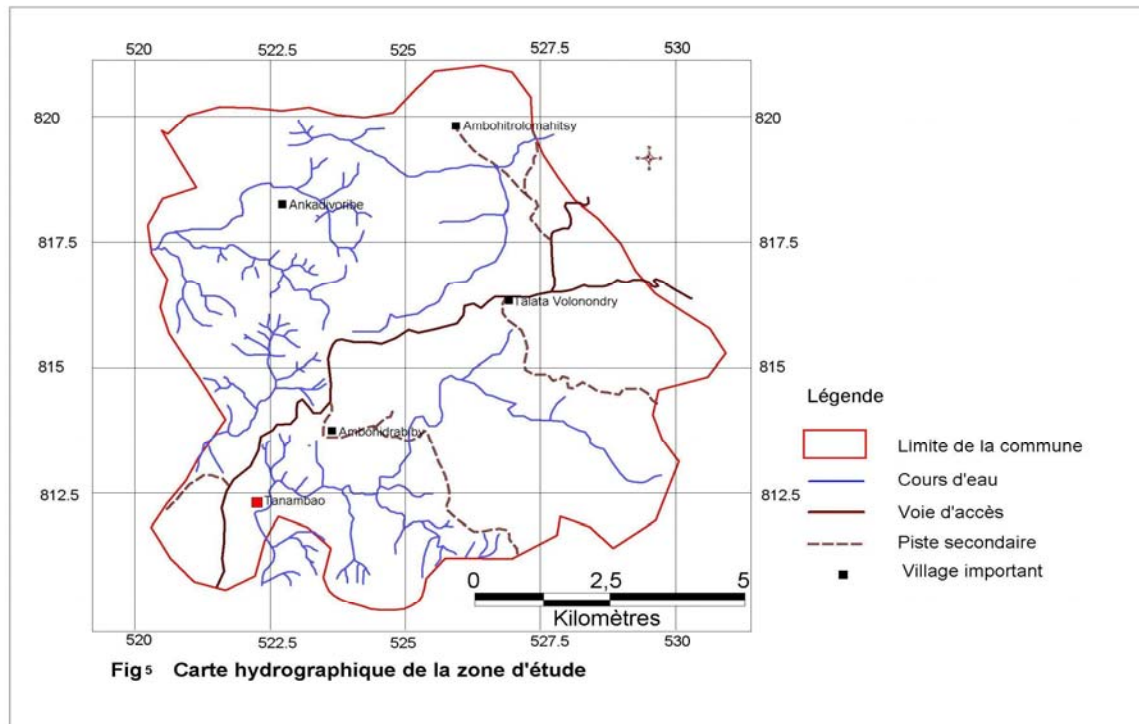


Extrait du BD500 FTM

Figure 3 - Carte de la végétation

1-5-Reseau hydrographique

La commune de Talatan'ny Volonondry est traversée par de nombreux rivières et cours d'eaux. La zone d'étude ne se situe pas près des grandes rivières de la région, mais elle est quand même traversée par un nombre important de cours d'eau. La plupart des ces cours d'eau sont temporaires.



Source: SIGM-Service de la Géologie-Ampandrianomby

Figure 4- Carte hydrographique de la zone d'étude

1-6- Aperçus hydrogéologiques

Les arènes qui surmontent partout le socle sain, sont composées d'un matériau argilo sableux riche en micas, feldspaths kaolinisés et ferromagnésiens. Il n'est pas rare que le toit de ce niveau soit argilifié. Ce niveau aquifère abrite une nappe qui est au minimum semi captive sous le niveau argilifié au droit des interfluves et le plus souvent captive au droit des bas-fonds et de la plaine alluviale, sous le remplissage quaternaire. Le principal réservoir aquifère de la zone est celui constitué par les nappes d'arènes et de fissure et /ou fracture du socle. Elles ne peuvent donner qu'un débit d'exploitation inférieur à 3m³/h (DUSSARAT B., 1994, Structure et fonctionnement des aquifères de socle altéré en zone tropicale d'altitude : cas du bassin de Mahitsy (Hautes terres Malgache), *Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc*).

Les deux puits, installés respectivement au sud et à l'ouest, dans la zone d'étude, semblent donnés de l'eau toute l'année. La courte période de leur utilisation montre que le rabattement de niveau, observé en période d'étiage, est faible. L'eau des deux puits est sans odeur et sans saveur. La conductivité électrique est bonne mais la turbidité laisse à désirer. Les déblais sortis des puits, encore trouvés sur place lors de la reconnaissance, indiquent que

le fond de ceux-ci n'a pas encore atteint le socle sain. On en déduit que ces puits exploitent la nappe d'altération.

1-7- Données climatiques

La zone d'étude se trouve au Nord d'Antananarivo, avec une altitude moyenne de 1300m. Son climat est de type tropical d'altitude. Elle est caractérisée par deux saisons bien contrastées :

- une saison chaude et humide de Novembre à Avril
- une saison sèche et fraîche de Mai à Octobre.

La température varie de 8°C en hiver jusqu'à 25°C en été.

La précipitation moyenne est de 1357mm. (SGDM, 2006 ; Rapport final. Etude hydrogéologique sur le site sis à Antanambao).

Les données climatologiques proviennent de la direction générale de la météorologie à partir des mesures effectuées par les stations météorologiques les plus proches, implantées respectivement à Antananarivo et à Ambohimanga.

1-7-1 - La station d'Antananarivo

Cette station est située à Antananarivo. Les données disponibles sont les moyennes de précipitations mensuelles des années 1961 et 1990. Elle a pour coordonnées géographiques, la latitude Sud 18° 54' et la longitude Est 47°32' à une altitude de 1310 m.

1-7-2-La station d'Ambohimanga

Elle a pour coordonnées géographiques, la latitude Sud 18°46' et la longitude Est 47°34' à une altitude de 1450m. Les données disponibles sont les moyennes normales des précipitations mensuelles sur une période allant de 1968 à 1989.

1- 8- Précipitation

Toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (grésil, grêle) sont dénommées précipitations.

Les Hautes Terres de Madagascar peuvent être subdivisées en deux zones, l'une à pluviométrie annuelle inférieure à 800mm au Sud et l'autre supérieure à 800mm. Le tableau 1 représente la répartition de la précipitation enregistrée sur les stations d'Antananarivo et d'Ambohimanga

Tableau 1 : Répartition mensuelle de la précipitation

| Mois | | Janv | Fev | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|--------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Précipitation (mm) | Ambohimanga (1968-1989) | 226,8 | 344,4 | 177,6 | 46,3 | 35,5 | 10,7 | 9,9 | 5,9 | 8,5 | 111 | 200,2 | 360,4 |
| | Antananarivo (1961-1990) | 270,4 | 256,9 | 183,1 | 50,5 | 20 | 7,2 | 11,1 | 15 | 9,5 | 66,6 | 170,8 | 304,1 |

[Direction Générale de la Météorologie]

La région d'Antananarivo possède une pluviométrie moyenne annuelle de 1365mm à Ambohimanga et 1537mm à Antananarivo avec cinq mois secs ($P < 50$ mm) du mai au septembre pour Antananarivo et six mois secs ($P < 50$ mm) pour Ambohimanga. Les plus fortes précipitations sont observées de décembre en février ($P > 220$ mm). La courbe de la variation de des précipitations est représentée sur la figure 5.

Variation des précipitations enregistrées dans les deux stations

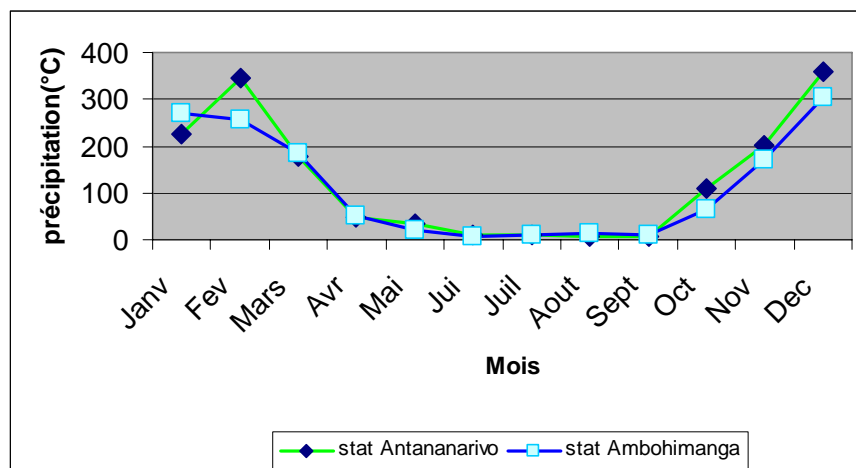


Figure 5 - variations mensuelles de la précipitation pour les stations Ambohimanga et Antananarivo.

Cette courbe confirme ce que nous avons annoncé précédemment sur la succession des pluies par saison.

Pendant la saison humide, les précipitations sont maximales et peuvent atteindre 360 mm en décembre sur la station d'Ambohimanga. La saison sèche (de mai jusqu'en septembre) les pluviométries sont faibles et ne sont que de 7 mm en juin sur la station d'Antananarivo.

En outre, les deux courbes des variations mensuelles de la précipitation sur les deux stations se ressemblent. L'allure des courbes de la précipitation est la même dans les deux stations. Ainsi, l'alimentation directe de la nappe se fait pendant la saison de pluie.

1-9- Températures

La température décroît à mesure que l'on pénètre dans les zones d'altitude. Le tableau 2 suivant nous donne les variations de la température mensuelle de l'année 1961 à 1990

Tableau .2 : Variation des températures maximum et minimum

| Mois | Jan | Fév | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tmin (°C) | 16,6 | 16,9 | 16,3 | 15,2 | 12,9 | 10,8 | 10,3 | 10,3 | 11,3 | 13,4 | 15,1 | 16,3 |
| Tmax (°C) | 20,2 | 20,3 | 19 | 19,1 | 17,0 | 14,9 | 14,3 | 14,5 | 16,3 | 18,4 | 19,4 | 19,9 |

[Direction Générale de la Météorologie]

Les températures mensuelles varient de 10.3 °C à 20.3 °C. Le mois le plus froid est le mois de juillet, tandis que, le mois le plus chaud est le mois de février.

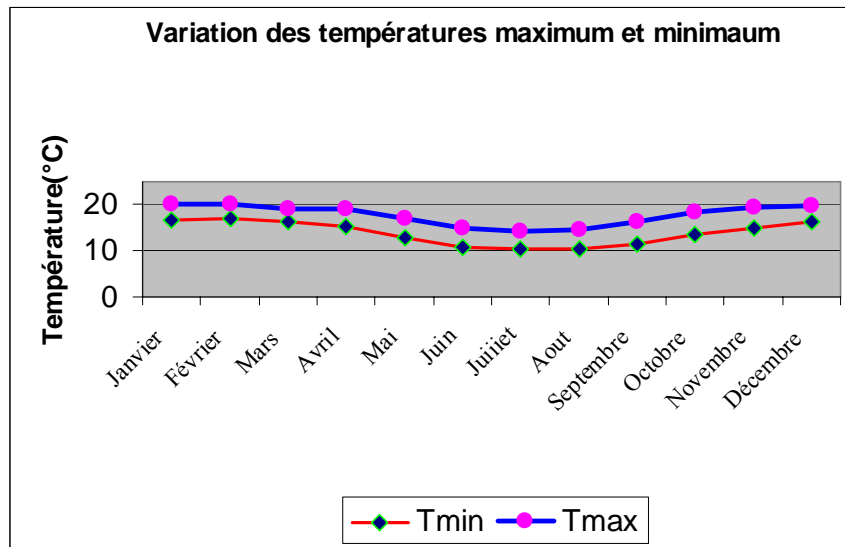


Figure 6 - Variation des températures mensuelles maximales et minimales

Le diagramme de la Figure 6 nous montre que les mois les plus chauds se confondent avec les mois les plus arrosés (cf Figure 5) à l'exception du mois de décembre où la température baisse légèrement par rapport au mois de janvier.

On constate aussi l'existence d'un écart de température mensuelle, entre le maximum et le minimum. Ces écarts vont favoriser l'évaporation.

1-10- Evaporation

L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique. Elle se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur. L'évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration. L'évapotranspiration de référence (ET_0) ou l'évapotranspiration potentielle comprend :

- l'évaporation des eaux de surface (marre, étang, lac, océan etc...)
- la transpiration des couvertures végétales.

Le tableau 3 ci-dessous nous donne la répartition de l'évaporation moyenne mensuelle de 1961 à 1990

Tableau 3 : Variation mensuelle de l'évaporation

| Mois | Janv | Fév | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|------|------|
| Evap(mm) | 77.8 | 66.8 | 71.4 | 73.7 | 73.9 | 68.1 | 69.1 | 80.2 | 103.8 | 116 | 96.9 | 80.1 |

[Direction Générale de La Météorologie]

Le diagramme correspondant est représenté par la figure 7

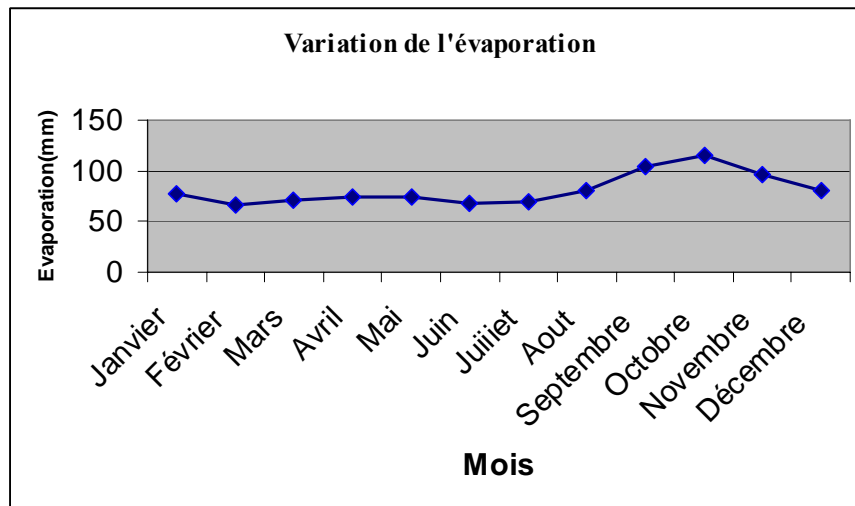


Figure 7 : variation mensuelle de l'évaporation pour la station d'Antananarivo

Cette figure montre que l'évaporation atteint sa valeur maximale pendant le mois d'octobre (116mm). La valeur minimale 66mm est obtenue durant le mois de février.

Ce maximum au mois d'octobre est dû au grand écart de température pendant ce mois.

En octobre, l'écart de température, entre le minimum et le maximum, est le plus élevé par rapport aux autres mois. C'est une des raisons qui explique l'évaporation excessive.

En superposant sur le même diagramme les variations mensuelles de l'évaporation et de la précipitation, on obtient la figure 8 qui nous montre que :

- La courbe d'évaporation passe au dessus de la courbe de précipitation du mois d'Avril au mois d'Octobre.
- La courbe d'évaporation passe en dessous de la courbe de précipitation du mois de Novembre au mois de Janvier.

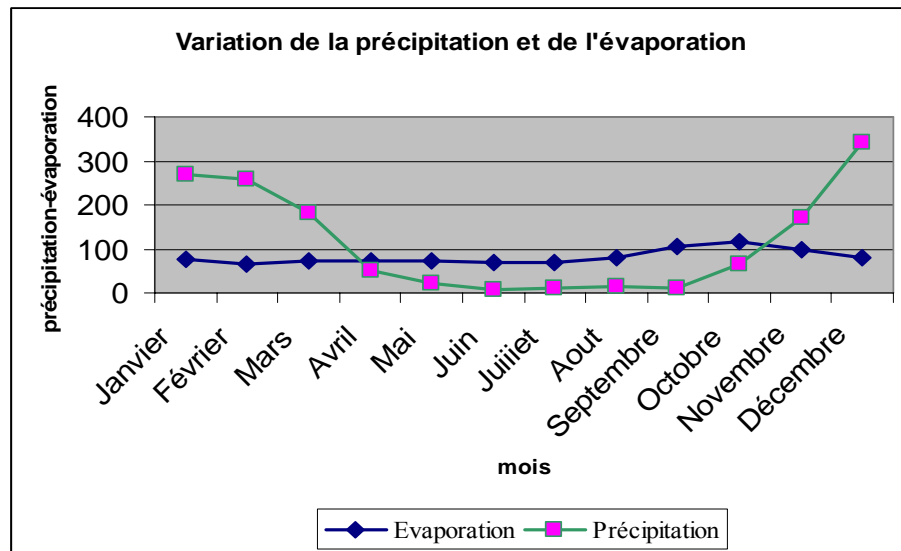


Figure 8- Variations mensuelles de l'évaporation et de la précipitation pour la station d'Antananarivo

On pourrait déduire que :

- Pendant la période de pluie, l'eau s'infiltre pour alimenter les aquifères. La recharge et/ou la réalimentation, des nappes et des réserves d'eau, s'effectuent au cours de cette période.
- Pendant la saison sèche, les rivières et les cours d'eau rechargent les nappes dans les cas les plus favorables. Cette situation signifie une forte évaporation des eaux retenues dans les réservoirs de surface (marre, étang, lac, rivière...etc.).

1-11- Bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi pendant une période donnée, par comparaison entre les apports et les pertes en eau. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration des plantes, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration. Les deux grandeurs sont évaluées en quantité d'eau par unité de surface, mais elles sont généralement traduites en hauteur d'eau. L'unité la plus utilisée est le millimètre

Le tableau 4 résume les données climatiques de la station d'Antananarivo. Ces données sont les valeurs moyennes normales recueillies au sein de la Direction générale de la Météorologie [DGM].

Tableau4: bilan hydrique

| | Nv | Dc | Jv | Fv | Mr | Av | Mai | Jn | Jl | At | Sp | Oc | Total |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|---------------|
| P | 170,8 | 304,1 | 270,4 | 256,9 | 183,1 | 50,5 | 20,1 | 7,2 | 11,1 | 15 | 9,5 | 66,6 | 1365,3 |
| ETP _c | 106 | 109 | 106 | 96 | 97 | 83 | 67 | 54 | 54 | 50 | 71 | 90 | |
| P-ETP _c | 64,8 | 195,1 | 164,4 | 160,9 | 86,1 | -32,5 | -46,9 | -46,8 | -42,9 | -35 | -61,5 | -23,4 | |
| RFU | 64,8 | 100 | 100 | 100 | 100 | 67,5 | 20,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| ΔS | 64,8 | 30,2 | 0 | 0 | 0 | -28 | -28 | -17 | -9 | -6 | -5 | -2 | |
| ETR | 106 | 109 | 106 | 96 | 97 | 78,5 | 48,1 | 24,2 | 20,1 | 21 | 14,5 | 68,6 | 789 |
| Ex | | 164,9 | 164,4 | 160,9 | 86,1 | - | - | - | - | - | - | - | 576,3 |

Bilan

Le bilan hydrique de la station est régi par l'équation :

$$P = I + ETR + R \pm \Delta S$$

Avec :

P indique la précipitation

I l'infiltration

ETR l'évapotranspiration réelle ;

R le ruissellement

ΔS la réserve.

Dans notre cas :

$$P = 1365,3 ; \quad I = 95 ; \quad ETR = 789 ; \quad R = 576,3 \quad \text{et} \quad \Delta S = -95.$$

Nous constatons que la réserve facilement utilisable (RFU) mensuelle de la région d'Antananarivo ne dépasse pas 100mm.

L'ETP calculée selon Thornthwaite varie d'un mois à l'autre et elle est de l'ordre de 100 mm.

Conclusion

La zone d'étude se trouve se situe sur le socle cristallin et connaît une précipitation annuelle de 1365,3 mm. La végétation est dans une phase de décadence avancée.

L'ETP calculée selon Thornthwaite est de l'ordre de 1000 mm. Les conditions climatiques sont favorables pour la recharge des nappes aquifères par des infiltrations efficaces en période de crue.

Le bilan hydrologique générale donne que les rivières et cours d'eau alimentent le système aquifère pendant la période de pluie.

PARTIE II

Rappel méthodologique

1 - Généralités sur les aquifères

1-1- Définition de l'aquifère

L'aquifère est une roche ou une formation géologique perméable à l'eau, comportant une zone saturée d'eau pour permettre un captage et un écoulement significatif. La nappe est l'ensemble des eaux comprises dans cette zone saturée dont toutes les parties sont en liaisons hydrauliques. Les aquifères sont limités par un toit à leur partie supérieure et par un substratum à leur partie inférieure. La nature de ces formations limites permet de déterminer le modèle de l'aquifère. Suivant les conditions hydrodynamiques, on distingue trois différentes nappes aquifères : nappe libre, nappe captive et nappe semi captive.

1-1-1- Aquifère à nappe libre

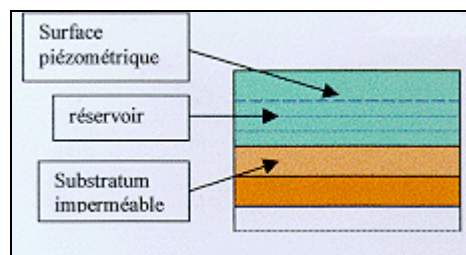


Figure 9 - Représentation schématique d'une nappe libre

On appelle nappe libre, une nappe dont la surface piézométrique se confond avec la surface de la nappe. La limite supérieure est perméable et peut fluctuer librement suivant la recharge et la vidange.

1-1-2- Aquifère à nappe captive

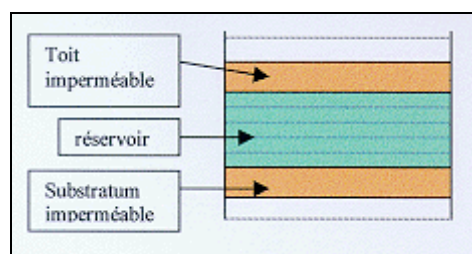


Figure 10 - Représentation schématique d'une nappe captive

Dans ce type de nappe la surface piézométrique n'est pas libre. L'aquifère est entièrement saturé, délimité au toit par des formations à perméabilité très faible faisant obstacle à tout flux appréciable.

1-1-3- Aquifère semi captive

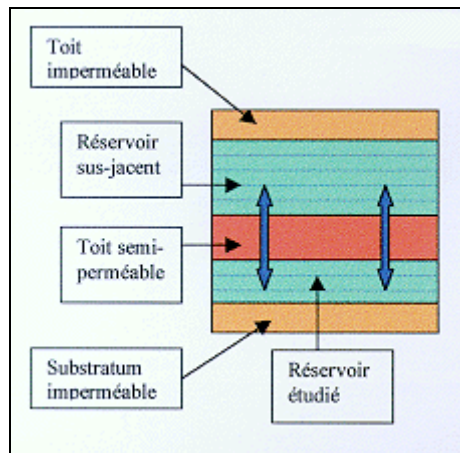


Figure 11 – Représentation schématique d'une à nappe semi captive

Cet aquifère repose sur un substratum imperméable. Il est surmonté d'une couche semi-perméable qui permet l'intercommunication avec la nappe de la couche hydrogéologique perméable sus-jacente. Dans certaines conditions, la surface piézométrique permet des échanges d'eau avec un aquifère superposé ou sus-jacent.

2 - Photo-interprétation et télédétection

En hydrogéologie, on distingue deux types d'utilisation de supports photographiques : la photographie aérienne classique et la scène d'image satellitaire. On parle, dans le dernier cas, de la télédétection.

2-1- Photo-interprétation

La photographie aérienne constitue le document de base le plus utilisé en hydrogéologie. Elle complète les cartes existantes (géologique, topographique...) qui donnent des informations intéressantes pendant la phase d'étude du point d'implantation du forage.

La photo-interprétation est une méthode rapide et peu coûteuse pour tracer une esquisse structurale, voir géologique. Elle est utilisée pour repérer les linéaments à l'échelle

locale ou régionale. On relève à priori tous les alignements morpho structuraux, soulignés par le réseau hydrographique, ou qui se détachent simplement en clair ou sombre sur la photo. On obtient ainsi une vision régionale des directions des linéaments. Ces dernières peuvent être répertoriées pour en faire une étude statistique.

2-2- Télédétection

Cette technique est utilisée depuis une vingtaine d'année à partir des données des satellites artificiels de la terre. Elle comprend un certain nombre d'avantages :

- ✚ Les périodes de prise de vue et la répétitivité des informations permettent de sélectionner les images les plus intéressantes.
- ✚ L'image satellite conduit à une meilleure intégration des fractures (plurikilométriques) souvent peu nombreuses.
- ✚ Si le contraste des images en noir et blanc est faible, divers traitements existants ont l'avantage de les améliorer.
- ✚ Le traitement des images permet aussi d'avoir des documents à des échelles plus grandes (1/10 000, 1/5 000).

Cependant certains inconvénients limitent considérablement la méthode :

- ✚ Les traitements élèvent les coûts des opérations
- ✚ Le manque de relief sur les images ne favorise pas une bonne relation entre ces dernières et la réalité du terrain.

Néanmoins, l'image satellite peut se relever un guide précieux pour l'hydrogéologue pour l'implantation des forages. En particulier, avec la nouvelle génération des satellites (Spot et Landsat D), la résolution est meilleure (30, 20, 10m).

3 - Géophysique

Les méthodes géophysiques servent à mesurer les paramètres physiques du sous sol à partir de la surface.

Les paramètres mis en jeu sont : la résistivité électrique, la chargeabilité, la conductivité électrique, la permittivité électrique, la densité, la susceptibilité magnétique etc ...

Dans notre étude, nous nous limiterons à la résistivité électrique et à la chargeabilité. La corrélation de ces paramètres avec la géologie permet de localiser les formations susceptibles de contenir de l'eau.

Dans cette partie, nous rappelons le sondage électrique et le panneau électrique.

3-1-Principe de la méthode électrique

Le principe de la prospection électrique est basée par l'injection d'un courant électrique dans le sol entre deux électrodes A et B. La réponse est recueillie par une autre paire d'électrodes qui mesure la différence de potentiel ΔV entre deux points M et N (figure 13).

A partir de la valeur du courant injecté I , de la mesure de la différence de potentiel ΔV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la résistivité électrique apparente en se basant sur la loi d'Ohm.

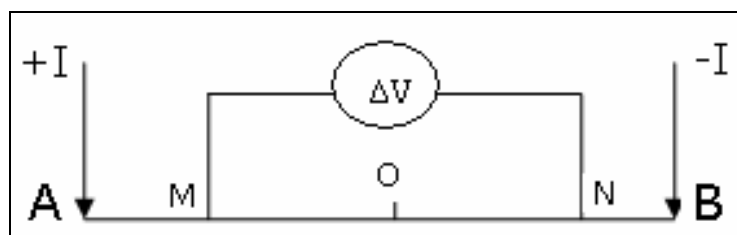


Figure 12 -Configuration des électrodes en prospection électrique

O est le centre de mesure

La formule qui traduit la résistivité vraie du sous sol est donnée par la relation

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Où

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (2)$$

K est nommé facteur géométrique et dépend de la disposition géométrique des électrodes.

Les calculs sont détaillés dans l'annexe I.

3-1-1- Notion de résistivité vraie et résistivité apparente

La résistivité obtenue dans la relation (1) est une résistivité vraie en supposant que le sol est homogène et isotrope. Dans la pratique le sous sol est hétérogène. La valeur de la résistivité ρ tend vers une résistivité ρ_a connue sous le nom de résistivité apparente.

De ce faite, ρ_a serait la résistivité vraie d'un sous sol homogène fictif qui donnerait les mêmes résultats de mesure dans les mêmes conditions.

3-1-2- Sondage électrique

C'est une technique permettant une investigation en profondeur du sous sol, au cours de laquelle les 4 électrodes (2 électrodes de courant et 2 électrodes de potentiel) sont alignées. Elles sont disposées symétriquement de part et d'autre du point de mesure O, [centre de (A, B) et de (M, N)] du dispositif de Schlumberger.

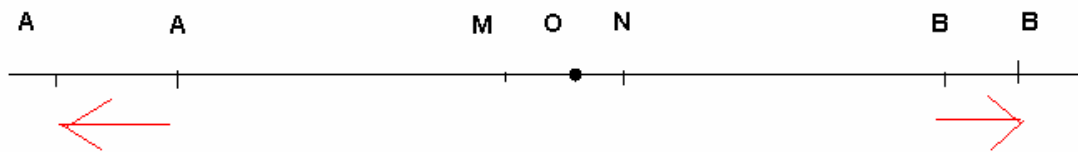


Figure: 13-Configuration du dispositif Schlumberger

On fait varier les longueurs AB et MN telle que $AB \gg MN$, en laissant le point O fixe . On peut alors tracer la courbe représentative de résistivité apparente (ρ_a) en fonction de la longueur $L = AB/2$. Cette courbe constitue le document d'interprétation de base et est appelée « courbe de sondage »

3-1-3-Panneau électrique

Le panneau électrique permet à la fois d'effectuer une investigation verticale et horizontale. On obtient une coupe en 2D du sous sol

Le modèle à deux dimensions demeure le plus utilisé actuellement car il présente des résultats précis à un coût moindre.

Dans ce paragraphe nous allons présenter la méthode de résistivité.

3-2 Méthode de résistivité

Cette méthode modélise le sous sol en fonction du paramètre « résistivité ». La résistivité et la chargeabilité électriques des terrains sont des paramètres très utiles. Elles permettent à l'hydrogéologue d'imaginer la structure et la nature des roches et d'en déduire la présence et la qualité de l'eau souterraine. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un résistivimètre couplé à un dispositif de mesure qui peut être disposé à la surface du sol ou descendu dans un trou de forage.

3-2-1- Principe de la méthode

Le principe de cette méthode est de réaliser un grand nombre de sondage électrique le long d'un profil à partir de diverses combinaisons de quatre électrodes spécifiques à un type de dispositif parmi les N électrodes telle que N est multiple de 4. Les électrodes sont regroupées en deux ensembles de 16 électrodes, soit un total de 32, séparées de 5m donnant une longueur de ligne de 155m.

Le modèle, de résistivité électrique et de chargeabilité vraies du sous sol, est obtenu après inversion automatique des données expérimentales en utilisant le programme « RES2DINV » de M .H. Loke.

3-2-2- Mise en œuvre

Le panneau électrique exige l'utilisation du dispositif multiélectrode comme dispositif de base. Soit « a » la distance entre deux électrodes successives. Chaque électrode est utilisée comme électrode d'injection du courant puis électrode de potentiel.

Le dispositif de Wenner est un dispositif classique, utilisant N électrodes. Nous l'adoptons pour la réalisation du panneau électrique. Soit « $n.a$ » la distance inter-électrode où n est le nombre de la séquence de mesures qui s'incrémente de 1 à $(N-1)/3$ si le nombre d'électrodes totales N est égale à un multiple de 3 plus 1. Pour la première séquence de mesures, la distance inter-électrode est égale à $1.a$. La première série de mesures débute d'abord avec les électrodes 1, 2, 3 et 4 dont les électrodes 1 et 4 sont utilisées comme électrodes de courant et les deux autres électrodes 2 et 3 comme électrodes de potentiel. La seconde série de mesures utilise ensuite les électrodes 2, 3, 4 et 5 et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les séries de mesures soient terminées.

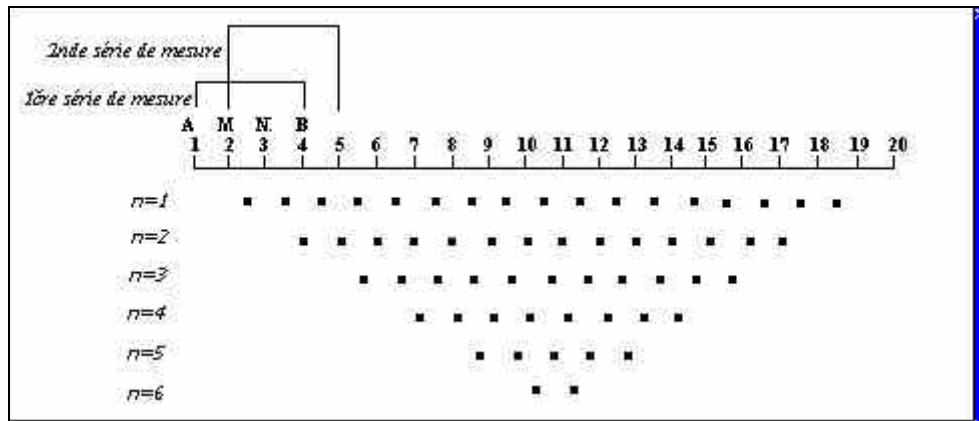


Figure 14-Configuration des électrodes pour le panneau électrique du type WENNER

3-2-3- Interprétation

Développé par H.loke, le programme RES2DINV inverse automatiquement les données expérimentales de résistivité et de chargeabilité. Ce modèle est aussi appelé « pseudo section ». Le programme utilise la méthode des moindres carrés qui est basée sur soit la méthode des différences finies soit la méthode d'éléments finis pendant l'inversion.

En tenant compte les points expérimentaux, le programme subdivise le modèle géoélectrique en blocs rectangulaires. Il fournit la résistivité vraie de chaque bloc en utilisant la méthode citée dessus.

4 - Conclusion

L'utilisation de méthodes de prospection (photo-interprétation, géophysique) en hydrogéologie permet de déterminer des paramètres fondamentaux indispensables à l'étude des potentialités d'un aquifère, notamment, la profondeur et l'épaisseur d'une formation aquifère

PARTIE III

Analyse et traitement des données

1 - Analyse par image satellitaire

Les étapes que nous avons suivies pour le traitement d'image sont :

- Le rehaussement d'image par étalement linéaire
- Le découpage des images
- Le filtrage
- La visualisation à canaux multiples
- La classification non supervisée.

Le traitement des différentes bandes d'image satellitaire nous a permis de faire apparaître les directions majeures des fractures et des failles observées dans la zone.

On observe sur l'image traitée deux directions bien distinctes, celles de N30° et de N150°. Elles sont différentes de la direction Ouest –Est qui est la direction de la faille majeure de la zone centrale de Madagascar.

Les deux linéaments N30° et N150° sont sécants aux environs de la zone d'étude (Figure 15)

Cette intersection est un point favorable à une circulation d'eau souterraine.

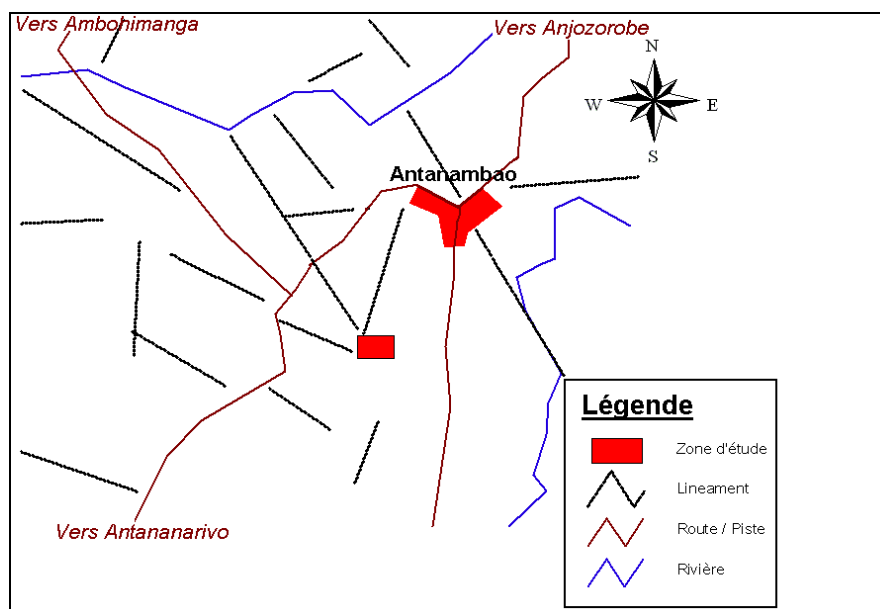


Figure 15: Carte des linéaments, résultat d'analyse de l'image satellite

2 - Application à l'imagerie électrique 2D

Nous avons utilisé la technique de l'Imagerie par Tomographie Electrique permettant d'avoir la distribution de la résistivité et de la chargeabilité électriques du sous-sol.

La combinaison des deux méthodes, résistivité et chargeabilité, donne de l'information sur la saturation en eau et sur la teneur relative en argile d'une structure. Plus la chargeabilité est élevée plus la formation est argileuse

2-1- Travaux exécutés

La technique du panneau a été adoptée dans le but de localiser le lieu de passage de la cible énoncé plus haut et de déterminer la profondeur du forage à réaliser sur le point le plus favorable localisé.

Trois panneaux électriques, constituant deux coupes de résistivité et de chargeabilité, ont été étalées sur le versant sud de la zone. La première, parallèle au bas fond adjacent sud de direction N105°, est implantée sur la terrasse d'aplanissement et la seconde, de direction Nord-sud, coupe perpendiculairement à la tête le même bas fond (figure 17).

La prospection s'est déroulée pendant deux jours. Le pas de mesure est de 5m. Les mesures, de la résistivité électrique et de la chargeabilité, ont été effectuées en utilisant une configuration d'électrodes en « Wenner alpha ».

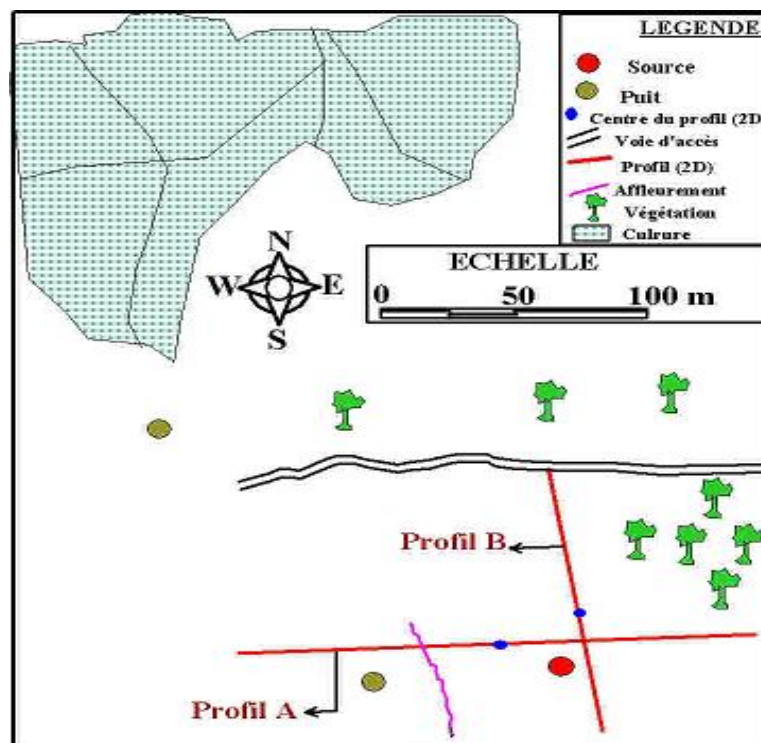


Figure 16 – Plan de localisation des profils

2-2- Matériels de prospection

Pendant cette campagne de prospection nous avons utilisé les matériels suivants :

- Le résistivimètre SYSCAL R2 équipé d'un système multi électrode
- Les fournitures annexes: des câbles, des électrodes et des outillages spécialisés divers
- Un ordinateur de terrain
- Des matériels de positionnement GPS et une boussole Suunto
- Un véhicule.

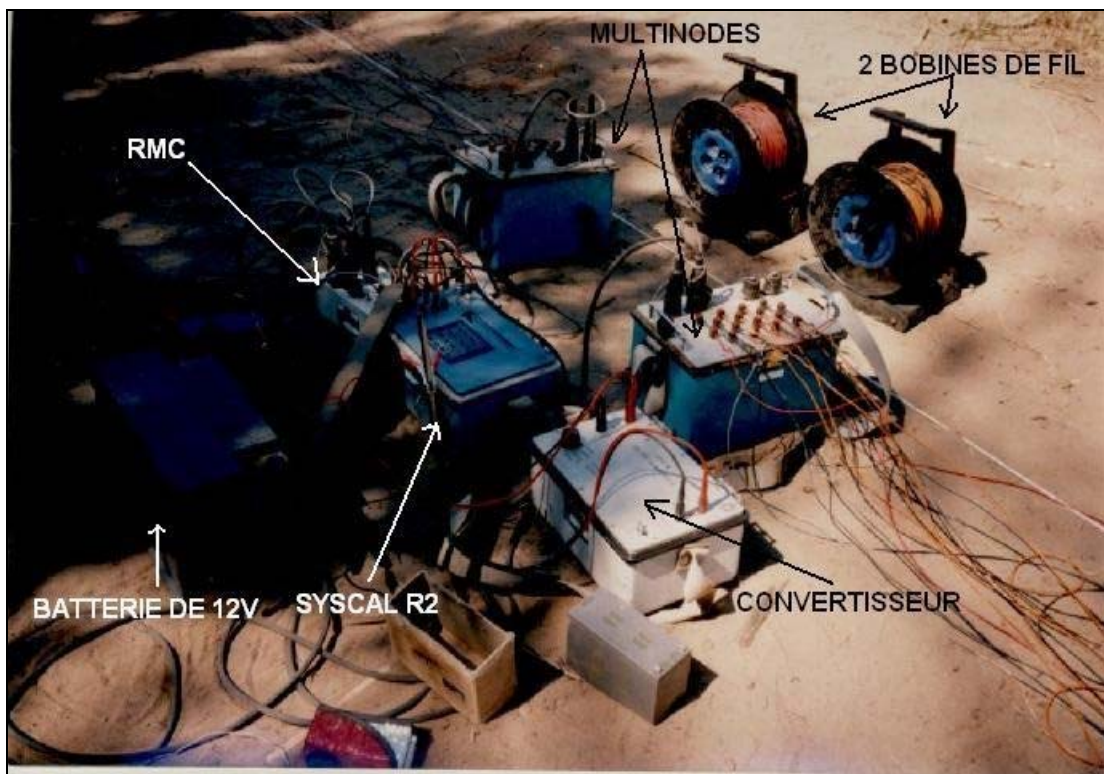


Figure 17- Le résistivimètre et ses accessoires

2-3- Interprétation des coupes géoélectriques

2-3-1 Coupe A

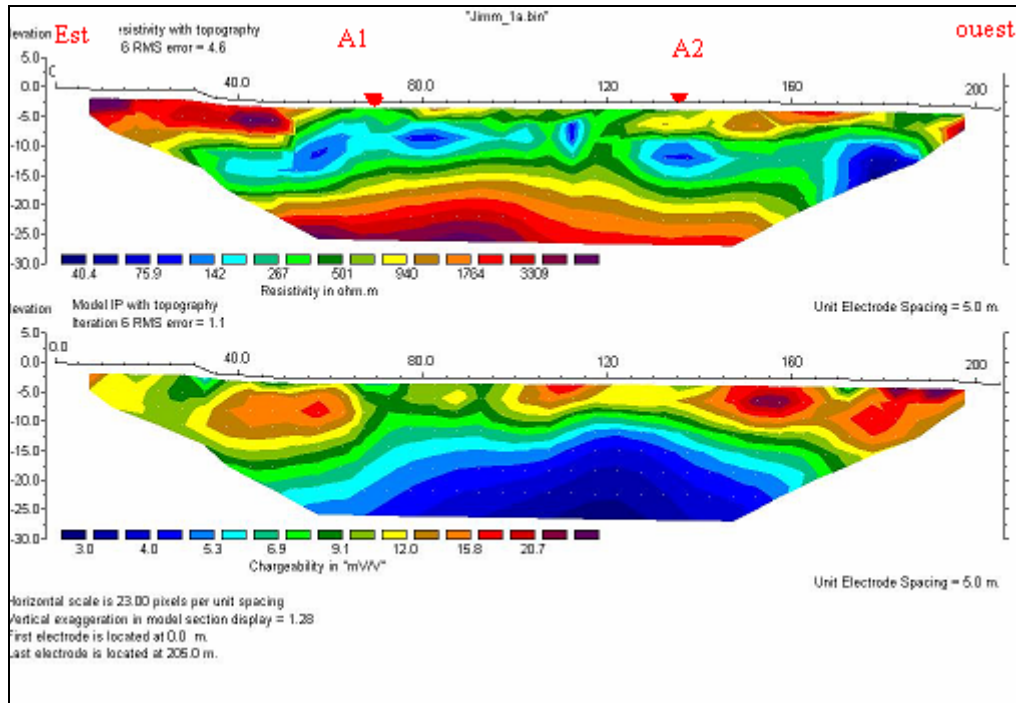


Figure 18- Coupe géoélectrique du profil A

Etude qualitative

La coupe de résistivité montre globalement la succession de trois terrains.

Une zone résistante, colorée en rouge sur la coupe, affleure superficiellement aux deux extrémités de la coupe. Elle pourrait correspondre aux latérites. Elle indique, en général la zone non saturée en eau. De même, une autre formation résistante de couleur rouge apparaît au fond du profil. Elle compose la roche saine. La formation conductrice (couleur bleue) est comprise entre ces deux formations résistantes.

Etude quantitative

Le profil électrique est réalisé suivant la direction Est-Ouest. Il est formé par assemblage de deux panneaux électriques. Sa longueur totale est de 200m. La figure 18 nous montre la distribution en profondeur des paramètres physiques résistivité et chargeabilité.

Une échelle horizontale des résistivités placée, au bas de la coupe géoélectrique, donne une idée sur la répartition des valeurs allant de 40 à 3310 Ω .m. La chargeabilité est comprise entre 3 et 20 mV/V.

La formation superficielle, de résistivité moyenne de 2125 Ω m, n'est pas intéressante de point de vue hydrogéologique.

L'horizon conducteur, compris entre les deux formations résistantes, de valeur de résistivité inférieure à 200 Ω m, a une puissance moyenne de 7m.

La chargeabilité ne dépasse pas les 30 mV/V. La structure à très faible valeur de chargeabilité apparaît dans la roche saine.

Le point de forage pourrait être situé au point A1 ou A2 d'abscisses $X=75$ m ou $X=135$ m. A ces niveaux, la formation est à la fois conductrice et à faible valeur de chargeabilité. La profondeur du forage proposé est de 18m à l'aplomb de ces deux points.

2-3-2- Coupe B

Etude qualitative

Comme la coupe A, la coupe B nous montre globalement la succession de trois terrains.

Une zone résistante, colorée en rouge sur la coupe, affleure superficiellement le long du profil. Elle pourrait correspondre aux latérites. Elle indique en générale la zone non saturée en eau. De même, une autre formation résistante de couleur rouge auréolée de couleur jaune et vert apparaît au fond du profil. Elle compose la roche saine. La formation conductrice (couleur bleue) est comprise entre ces deux formations résistantes.

Etude quantitative

Le profil électrique est réalisé suivant la direction Nord sud. Il est formé d'un seul panneau de longueur totale égale à 155m. La figure 20 nous montre la distribution en profondeur des paramètres physiques qui sont les résistivités et chargeabilités.

L'échelle horizontale des résistivités placée, au bas de la coupe géoélectrique, donne la répartition des valeurs allant de 50 à 7500 Ω .m. La chargeabilité est comprise entre 1 et 15mV/V, légèrement inférieure à celles observées sur la coupe A.

La formation superficielle est marquée par la présence des latérites qui ont des valeurs de résistivité supérieure à 3000 Ω m.

L'horizon conducteur, compris entre les deux formations résistantes, de valeur de résistivité inférieure à 200 Ωm , à une puissance moyenne d'environ 8 m.

La formation saturée en eau est colorée en bleu et vert sur la coupe. La présence probable d'une fissuration ou d'une fracturation du sous sol est observée à l'aplomb de $X = 75\text{m}$. Elle est caractérisée par un abaissement de la résistivité électrique. Ce lieu est intéressant de point de vue hydrogéologique, il est l'endroit préférentiel de circulation d'eau souterraine. A ce niveau, l'altération atteint sa puissance maximale qui est de 18 m. La chargeabilité correspondant a une valeur inférieure à 3mV/V à la profondeur de 20 m.

Le point favorable à l'implantation de forage est donc, le point A2 présenté sur la coupe B.

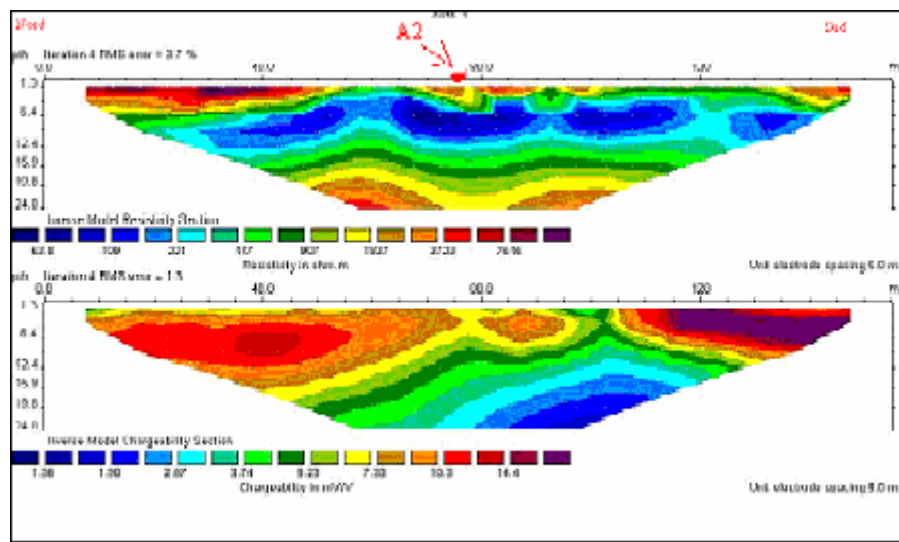


Figure 19 : Coupe géoélectrique du profil B

3 – Conclusion

L'Imagerie par Tomographie Electrique nous a permis de localiser le point favorable à l'implantation de l'ouvrage de captage d'eau souterraine.

Nous proposons deux points favorables, localisées le long du profil A et un troisième sur le profil B.

On retiendra le point A2 à l'abscisse 75m sur le profil B, car il nous semble meilleur du point de vue hydrogéologique. En effet, la coupe de résistivité et de chargeabilité montre qu'il se trouve à l'aplomb d'une ouverture du socle cristallin.

PARTIE IV

Résultats de forage

1-Résultats du forage

Après l'étude géophysique, le forage demeure la pièce maîtresse de l'exploitation des eaux souterraines. Il a pour objet d'assurer une qualité et un débit d'eau donné en préservant cette qualité depuis le gisement jusqu'à la tête de forage.

Nous nous contentons donc de rappeler ici les étapes fondamentales de la réalisation d'un forage :

- ✚ La foration
- ✚ L'équipement (alésage, mise en place de la double coque ou tubage, cimentation)
- ✚ Le développement
- ✚ L'essai de pompage

1-1- Foration

Le forage est un puit de petit diamètre. Il est creusé mécaniquement et destiné à l'exploitation d'eau souterraine. On parle de sondage en cas de son utilisation à la reconnaissance minière. Ce forage a débuté le 13 Novembre 2006 et pris fin le 14 décembre 2006. La première variante proposée se situe au point de latitude **S 18° 47' 41,0''** et à la longitude **E 47°35'13.8''**. Avec une diamètre 0,203m (8 pouces), la foration a duré deux jours (du 14 au 15 Novembre 2006). La profondeur totale du forage est 22m avec un niveau statique de 1,95m. La technique de forage rotary est appliquée par **Ranosoa**, l'entreprise qui a exécuté les travaux.

Les matériels et appareillages utilisés pour sa réalisation sont présentés dans l'annexe de ce mémoire

1-2- Equipement du forage

L'équipement de forage d'exploitation constitue la dernière étape avant la mise en production de la ressource d'un gisement. Cette étape est essentielle puisqu'il s'agit de garantir la qualité de l'eau exploitée au cours du temps.

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les principaux équipements utilisés en forage d'eau.

❖ **Tubage plein.**

Il a pour fonction de :

- Canaliser l'eau depuis la ressource jusqu'en surface
- Tenir mécaniquement les terrains traversés
- Participer à l'individualisation de l'eau captée du reste du forage ou de la surface
- Permettre la fixation du matériel de tête d'ouvrage (support de pompe immergée raccordement au réseau de surface).

Nous avons utilisé quatre tubes en PVC de longueur 6m et de diamètre extérieur de 5 1/8 (130mm) chacun.

❖ **Crépine**

Schématiquement la crépine est un tube perforé. Sa longueur est directement fonction de l'épaisseur de la formation à capter et du niveau de rabattement maximal.

Comme nous avons en présence de deux nappes, nous avons placé deux crépines. De longueur 2m, la première est destinée à capter le premier aquifère. La seconde, placée à une profondeur de 20m, va capter la deuxième nappe (voir figure 20).

❖ **Massif filtrant**

Il s'agit de mettre en place, entre la crépine et l'aquifère, un massif de gravier dont la granulométrie doit être élevée (limitation de perte de charge) tout en assurant une filtration efficace. Il faut s'assurer du nettoyage et désinfection du massif de gravier avant sa mise en place.

❖ **Cimentation**

La cimentation est l'opération qui consiste à mettre en place par simple déplacement, du laitier de ciment derrière une colonne de tubage, en une ou plusieurs fois. La cimentation du tubage est destinée à atteindre les objectifs suivants :

- Ancrer les tubages dans le terrain ou les tubes provisoires
- Empêcher toute migration de fluide d'une formation dans une autre
- Rendre l'espace annulaire étanche et empêcher la pollution par les eaux de surface
- Protéger le tubage de l'action corrosive de certains fluides ou terrain.

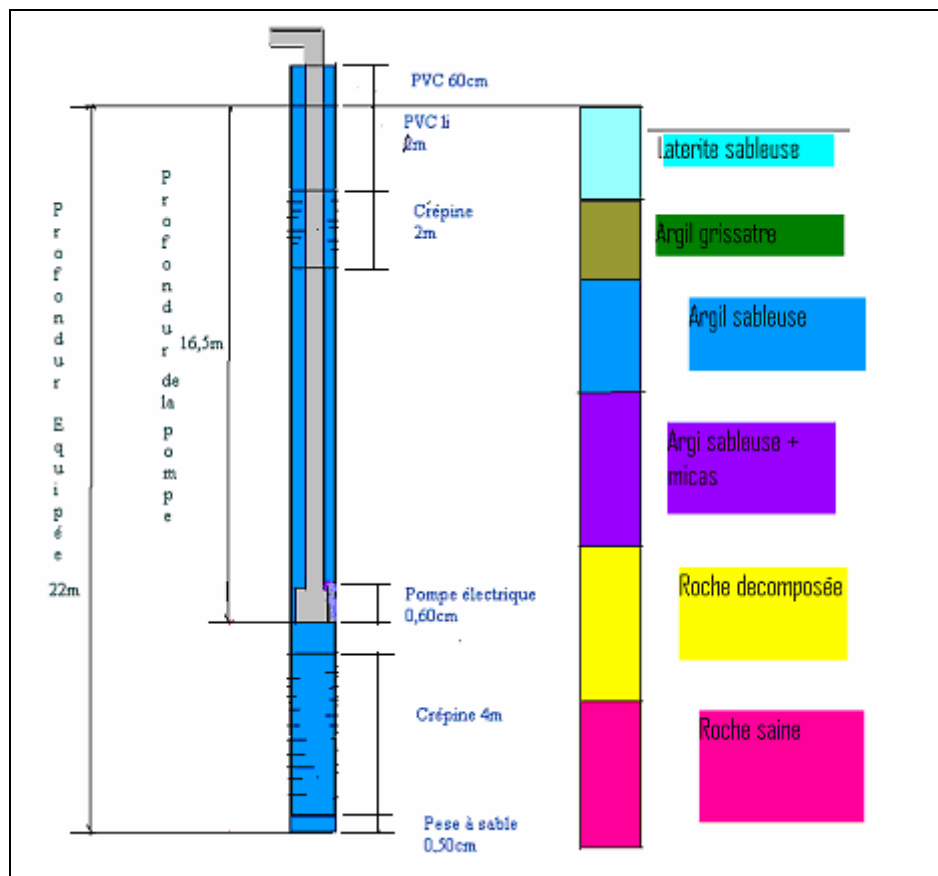


Figure 20 : Croquis du forage

1-3- Développement

On procède au développement d'un forage lorsque celui-ci est totalement équipé (tubage crépine et massif filtrant). Cette opération consiste à pomper le puit à un débit supérieur de celui d'exploitation estimé. Le développement a également pour but de stabiliser l'aquifère dans la zone de captage, d'éliminer le cake ou fluide de forage qui protège la paroi et d'augmenter les capacités spécifiques du forage.

Bien sûr, même en l'absence de développement, la mise en exploitation d'un ouvrage permet un auto développement mais cette opération est lente, destructrice pour le matériel de pompage et sans effet sur les ponts de sable qui risquent de venir ensabler le forage.

1-4-Essai de pompage

On appelle essai de pompage, un prélèvement qu'on effectue dans la nappe aquifère dans le but de caractériser les paramètres hydrodynamiques. Il a été effectué le 14 décembre 2006 et il a duré 10 heures en trois paliers.

1-4-1- Evaluation du débit critique (q_c)

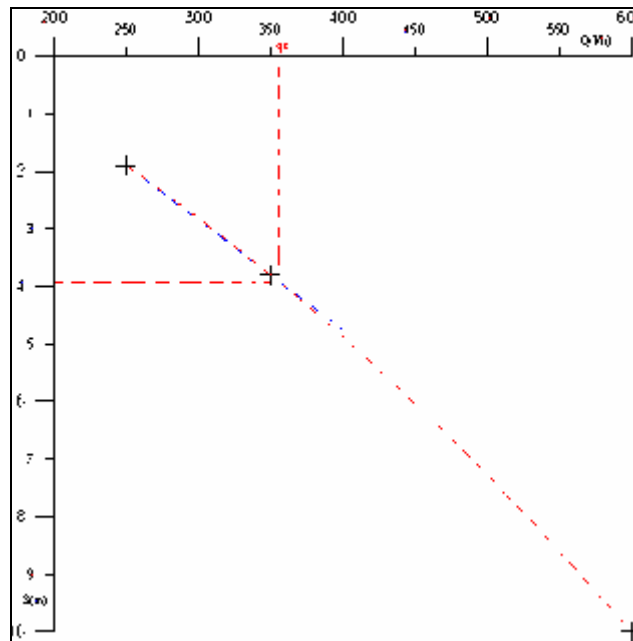


Figure.21 : Courbe Rabattement/Débit

Cette courbe représente les débits de chacun des trois paliers dont les equations d'ajustement sont $Y = 0.019 * X - 2.85$ et $Y = -1.4 + 0.009057142857 * X + 1.657142857E-005 * X^2$.

Les débits Q de chaque palier sont respectivement 250, 300 et 600 l/h. Le débit critique q_c correspond au débit maximum que l'on peut extraire de l'ouvrage. Il est atteint lorsque la pente de la courbe augmente brutalement. Il est de l'ordre de 356 l/h.

1-4-2- Evaluation de la perméabilité Ks

La perméabilité est la propriété d'un milieu à être traversé par l'eau en mouvement. Elle est exprimée en m/s. A partir de l'équation de Dupuit, on peut calculer la perméabilité en considérant qu'on est en présence d'une nappe libre :

(<http://hydram.epfl.ch/docs/Ecoulements%20vers%20....pdf>)

$$Ks = \frac{Q}{\Pi} \frac{\ln(R/r)}{(h^2 - z_0^2)}$$

Où

R est le rayon de la courbe de rabattement, déterminée expérimentalement

r le rayon du puit

h le niveau de l'eau avant le pompage

Z₀ le niveau stationnaire dans chaque palier

Nous avons résumé dans ce tableau, les valeurs calculées de la perméabilité de chaque palier.

Tableau 5- Perméabilités dans chaque palier

| N ⁰ de Palier | h (m) | Débits m ³ /h | Z ₀ | Rabattements (m) | K (m/s) |
|--------------------------|----------|-----------------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 20,5 | 0,3 | 3,88 | 1,9 | 3,17.10 ⁻⁷ |
| 2 | 20,5 | 0,4 | 5,03 | 3,8 | 4,8.10 ⁻⁷ |
| 3 | 20,5 | 0,6 | 10,05 | 10 | 1,16.10 ⁻⁶ |

On constate que la perméabilité obtenue est de l'ordre de 10⁻⁷ m/s pendant les deux les deux premiers paliers et 10⁻⁶ lors du dernier palier. Cette perméabilité est caractéristique des formations de mauvaise perméabilité constituée par des latérites.

2 – Conclusion

Le forage a mis en évidence la présence de deux nappes souterraines, mais l'essai de pompae a donné un débit légèrement inférieur à celui escompté.

CONCLUSION GENERALE

Le bilan hydrique de la zone confirme la recharge de la nappe aquifère pendant la saison humide. On peut dire que l'eau souterraine existe dans la région et elle est suffisante à l'exploitation pour l'A. E. P du site.

Le secteur étudié se trouve sur le versant sud de la colline constituant la propriété. Il est implanté sur la formation cristalline, formée des roches métamorphiques gneiss micaschiste. Trois des linéaments observés après traitement d'image satellite passent dans ce secteur. Ces linéaments sont le lieu préférentiel de la circulation d'eau s'ils sont assimilables à une fissuration et / ou à une fracturation du sous sol.

L'Imagerie par Tomographie Electrique nous a permis de localiser le point favorable à l'implantation de l'ouvrage de captage d'eau souterraine.

La caractéristique physique du sous-sol, donnée par la géophysique, indique le lieu favorable à l'implantation de forage d'exploitation d'eau souterraine. Ce point a été appelé A2 sur la coupe B.

L'essai de pompage a donné un débit de 356l/h.

Il reste à effectuer les analyses physico-chimique et bactériologique pour assurer la potabilité de cette eau.

ANNEXE

Annexe 1 : Relation entre le courant injecté I et la résistivité ρ du sous sol

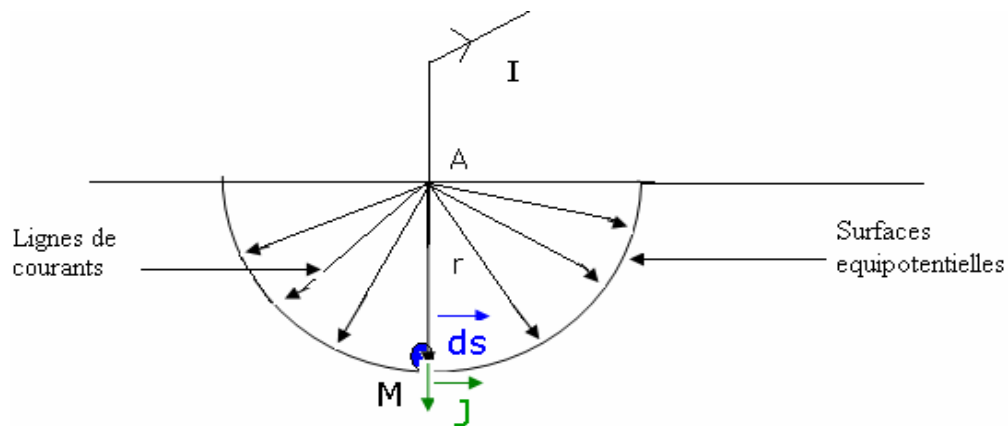


Figure 15 - Ligne de courant et surface équipotentielle dans un sol homogène et isotrope.

Dans le cas où le sol est homogène les lignes de courant sont radiales et les surfaces équipotentielles sont des hémisphères.

L'intensité I est le vecteur densité de courant \vec{J} à travers la surface (S).

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot ds.$$

Comme le sol est homogène, $\vec{J} \cdot \vec{n}$ sont colinéaires en tout point M de la surface (S).

Alors :

$$I = J \iint_S ds = JS = J2\pi r^2.$$

Alors la densité s'écrit :

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1)$$

Posons \vec{r} le vecteur unitaire porté par AM.

$$\text{Alors, } \vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

Où $\frac{\vec{r}}{r}$ est un vecteur unitaire radial.

La loi d'Ohm stipule que la densité de courant est proportionnelle au champ \vec{E} créé par le passage du courant dans le sol.

$\vec{J} = \sigma \vec{E}$, Où σ est la conductivité électrique, elle s'exprime en siemens.

Or, $\rho = \frac{1}{\sigma}$ est la résistivité électrique.

$$\text{Alors } \vec{E} = \rho \vec{J} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \frac{\vec{r}}{r}.$$

$$\text{Et sa norme s'écrit sous cette forme : } E = \rho \frac{I}{2\pi r^2}. \quad (2)$$

Le champ \vec{E} dérive d'un potentiel scalaire V, alors $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$.

Le sol est homogène, le champ est radial :

$$E = - \frac{dV}{dr}.$$

$$\text{En utilisant la relation, (2) nous pouvons écrire que } - \frac{dV}{dr} = \rho \frac{I}{2\pi r^2}.$$

$$\text{L'intégration de cette équation donne, } V = \rho \frac{I}{2\pi r} + K.$$

K est une constante d'intégration.

Pour une distance r infiniment grand ($r \rightarrow \infty$), le potentiel est négligeable ($V=0$).

$$\text{Alors } V = \rho \frac{I}{2\pi r}.$$

On rappelle que au niveau de l'électrode B l'intensité de courant I qui sort est équivalent à une intensité de courant -I qui entre.

$$\text{En A } V_A = \rho \frac{I}{2\pi AM}.$$

$$\text{En B } V_B = \rho \frac{I}{2\pi BM}.$$

Le potentiel au point M, V_M est la somme des potentiels en A et B

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right).$$

$$\text{De la même façon, } V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right).$$

Donc la différence de potentiel entre M et N sera :

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right).$$

Ce qui permet d'obtenir la résistivité du centre du dispositif :

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \frac{\Delta V}{I}. \quad (3)$$

De la forme $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$.

Cette dernière relation est la relation cherchée.

$$\text{Alors } K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

K est nommé facteur géométrique et dépend de la disposition géométrique des électrodes.

Annexe 2 : Compléments du Bilan hydrique

La formule de Thornthwaite donne, en premier lieu, une ETP non corrigée en centimètre, qu'il faut ensuite multiplier par un coefficient de correction λ . Ce coefficient dépend de la latitude et du mois considérés.

$$ETP_{nc} = 1,6x \left(\frac{10T}{I'} \right)^a$$

$$ETP_c = \lambda \times ETP_{nc}$$

$$I' = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 675.10^{-9}.I'^3 - 7715.10^{-7}.I'^2 + 0,01792.I' + 0,49239.$$

Avec ETP_{nc} :: évapotranspiration non corrigée

ETP_c : évapotranspiration corrigée

T : température mensuelle en degré Celsius

I' : indice thermique annuelle

i : indice mensuelle.

| | Nv | Dc | Jv | Fv | Mr | Av | Me | Jn | Jl | At | Sp | Oc | Tal |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| P | 170,8 | 304,1 | 270,4 | 256,9 | 183,1 | 50,5 | 20,1 | 7,2 | 11,1 | 15 | 9,5 | 66,6 | 1365,3 |
| T | 26.0 | 25.8 | 25.7 | 25.9 | 25.4 | 24.8 | 22.9 | 20.9 | 20.9 | 20.2 | 23.0 | 25.2 | |
| i | 12,1 | 12 | 11,9 | 12,1 | 11,7 | 11,3 | 10 | 8,7 | 8,7 | 8,3 | 10,1 | 11,6 | 128,5 |
| λ | 1,09 | 1,15 | 1,13 | 1 | 1,05 | 0,97 | 0,96 | 0,92 | 0,96 | 0,99 | 1 | 1 | |
| ETP_{nc} | 97 | 95 | 94 | 96 | 92 | 86 | 70 | 56 | 56 | 51 | 71 | 90 | |
| ETP_c | 106 | 109 | 106 | 96 | 97 | 83 | 67 | 54 | 54 | 50 | 71 | 90 | 983 |
| P-ETP | 64,8 | 195,1 | 164,4 | 160,9 | 86,1 | -32,5 | -46,9 | -46,8 | -42,9 | -35 | -61,5 | -23,4 | 382,3 |
| DC | | | | | | 32,5 | 79,4 | 126,2 | 169,1 | 204,1 | 265,6 | 289 | |
| S | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 72 | 44 | 27 | 18 | 12 | 7 | 5 | 963 |
| ΔS | | | | | | -28 | -10 | 0 | 3 | 5 | -17 | 26 | |
| ETR | 106 | 109 | 106 | 96 | 97 | 22,5 | 10,1 | 7,2 | 14,3 | 20 | -7,5 | 92,6 | 673,2 |
| Ex | 69,8 | 164,9 | 164,4 | 160,9 | 86,1 | - | - | - | - | - | - | - | 657 |

Annexe 3 : Appareillage et matériels utilisés lors du forage.

Une sondeuse Frast

Un compresseur (INGER SOL RAND 700)

Un groupe électrogène

Une pompe immergée

Une sonde électrique

Accessoires de forage

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

ANDRIAMPANARIVO R. E., 2003, Apport de la prospection électrique 1D et 2D à l'étude des nappes aquifères du Kabatomena, Région de Menabe. *Mémoire de DEA, Faculté des Sciences Université d'Antananarivo*

BURGEAP, Forage d'eau -Matériels et techniques. *Centre d'Information Technique et Economique d' Ambatonakanga (cite)*

COMMUNE RURALE de Talatany'ny Volonondry, 2000, Plan Communal de Développement (PCD)

DUSSARAT B., 1994, Structure et fonctionnement des aquifères de socle altéré en zone tropicale d'altitude : cas du bassin de Mahitsy (Hautes terres Malgache), *Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc*

ETIENNE LEFORT J.M., Les forages à faibles coûts. *Centre d'Information Technique et Economique d' Ambatonakanga (cite)*

FAMANTANANTSOANIRINA. M. R.; 2004, Etude de la sensibilité des dispositifs Wenner, Wenner –Schlumberger et dipôle- dipôle en prospection électrique –Application l'hydrogéologie et à la détection de cavité, *Mémoire de DEA, Faculté des Sciences Université d'Antananarivo*

MICHEL DETAY.; Le forage d'eau Réalisation Entretien Réhabilitation, *Centre d'Information Technique et Economique d' Ambatonakanga (cite)*

RAKOTOARIMANANA.M .J .Y., 2005, Contribution à la mise en valeur des ressources en eau dans le bassin d'Ambovombé, *Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise en Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée. Faculté des Sciences Université d'Antananarivo*

RANTOANINIA. M.; 1996, Géologie et prospection au 1/100.000 des feuilles Ambohimanga- Ambatomena ; *Rapport de fin de Mission, Etude de pétrographie de C. RATIMBAZAFY. Ministre de l'Industrie et des Mines, Direction des Mines et de L'Energie.*

RANIVORISOA. E., 2005 Exploitation des eaux souterraines dans le district de Mahabo dans la région de Menabe. *Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquées. Faculté des Sciences Université d'Antananarivo.*

SGDM, 2006, Etude hydrogéologique sur le site sis à Antanambao. *Rapport d'étud., Construction de Batiments Industriels et Civils.*

RASOLONJATOVO E., 2003 Rapport géologique de la mission hydro géophysique dans la région du Menabé, Sud –Ouest de Madagascar, *sous- projet F@DES- IOGA*

RASOLONRAZAO. L. ; 2001, Etude hydrogéologique du delta de Morondava Par prospection électrique – Application à l’implantation d’un point de forage, *Mémoire de DEA, Faculté des Sciences Université d’Antananarivo*.

RAZAFINDRAKOTO.B.G., 2004, Imagerie et modélisation géophysique et hydro chimiques du sous sol de la région du Menabe –Application à la recherche hydrogéologique, *Thèse de doctorat de troisième cycle en sciences physiques, option géophysique appliquée, Faculté des Sciences Université d’Antananarivo*.

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/matieres/pdf/nt02.pdf>: Les techniques de forage utilisées en eau minérale, septembre 2006

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/matieres/pdf/nt04.pdf>: Equipement de forage d’exploitation d’eau minérale, Approche méthodologique, décembre 2006

<http://hydram.epfl.ch/docs/Ecoulements%20vers%20....pdf>: Mécanique du sol,

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE POUR L'AEP DE LA NOUVELLE CONSTRUCTION
ERIGEE PAR CBIC SITUEE DANS LE FOKOTAN D'ANTANAMBAO

RESUME

Ce mémoire se rapporte sur l'étude hydrogéologique et sur le forage d'eau effectué dans une propriété privée sise à Antanambao.

L'objectif principal de l'étude est de détecter les nappes d'eau souterraines pouvant satisfaire le débit de 1 m³/h. Le panneau électrique a été utilisé pour l'Imagerie par Tomographique Electrique du sous-sol, tandis La technique de forage rotary a été exécuté. La photo-interprétation a permis de détecter les linéaments correspondants aux fractures, et l'imagerie par tomographie électrique a précisé la géométrie de l'aquifère et le point favorables au forage. Le forage a confirmé l'existence de la nappe mais avec un débit faible.

L'étude proprement dite a été réalisée par la Société Géosciences pour le Développement de Madagascar (SGDM), Le forage a été exécuté par l'entreprise par **Ranosoa**.

Mots clés : hydrogéologie, photo-interprétation, panneau électrique, imagerie, tomographie, forage, Débit

SUMMARY

This memory refers on the hydrogeologic study and the water drilling carried out in a private property located to Antanambao.

The principal objective of the study is to detect the underground sheets of water being able to satisfy the flow of 1 m³/h. The electrical panel was used for the Imagery by Tomographique Electrique of the basement, tandis the technique of drilling rotary drill was carried out. The photo-interpretation made it possible to detect the features corresponding to the fractures, and the imagery by electric tomography specified the geometry of the aquifer and the point favorable to drilling. Drilling confirmed the existence of the tablecloth but with a low flow.

The study itself was carried out by the Géosciences Company for the Development of Madagascar (SGDM), drilling was carried out by the company by Ranosoa.

Key words:

Hydrogeologic, photo-interpretation, electrical panel, Imagery, Tomographique, drilling, low.

| | |
|--|---|
| Encadreur : RAMANANTSOA Andriamahazoherizo Lot II E 87 FA Tsarahonenana Tana 101 Tel : 22 410 36 / 033 12 354 05 | Impétrant : MOHAMED DJOUNEID Madihali Lot II F 34 J Bis A Andraisoro Tana 101 Tel : 033 14 364 24 e-mail : mohamedjouneid@yahoo.fr |
|--|---|

