

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

I-1. Contexte géographique et situation administrative

I-2. Contexte géomorphologique

I-3. Contexte géologique

I-4. Contexte hydrographique

I-5. Contexte hydrogéologique

I-6. Répartition des points d'eaux de la zone d'étude

I-7. Contexte climatique

I-8. Contexte socio-économique

CHAPITRE II : METHODES ET MATERIELS

II-1. Rappel théorique

II-2. Acquisition et traitements de données

CHAPITRE III : INTERPRETATION ET RESULTATS

CONCLUSION

ANNEXES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation administrative et géographique de la zone d'étude	3
Figure 2 : Coupe schématique transversale du plateau Mahafaly (Luc GUYOT, 2002).....	4
Figure 3 : coupe longitudinale de la plaine littorale du Nord au Sud(Luc GUYOT ,2002)	4
Figure 4 : Carte géologique de la Commune Rurale Itampolo (Besairie, 1972)	5
Figure 5 : Carte de répartition des points d'eau sur la bande côtière (Source : Luc GUYOT, 2002)9	
Figure 6 : <i>Balance saisonnier des pressions et des vents (modifié après E. NICOLINI 1980)</i>	10
Figure 7 : Courbe représentative de la précipitation moyenne de l'année 1983-2015 de la Commune Rurale Itampolo (Source : Service Météorologique Malagasy-Ampandrianomby)	11
Figure 8 : Courbe représentative de la température de la Commune Itampolo de l'année 1961-2015(Source : Service météorologique Malagasy-Ampandrianomby).....	12
Figure 9 : Lignes de courant et les équipotentielles produites par une source ponctuelle [5]	14
Figure 10 : Distribution des lignes de courant (en rouge) et des équipotentielles(en gris) dans un sol homogène lors de la prospection par un quadripôle A-B-M-N. [7].....	15
Figure 11 .Exemples des dispositifs (Marescot L., 2000-2008)	17
Figure 12 :Illustration de principe de mise en œuvre de sondage électrique verticale [5]	18
Figure 13 : Illustration de principe de mise en œuvre d'un profil [5].....	18
Figure 14 : Principe d'une prospection par tomographie électrique, modifié par l'impétrant. [7]...19	
Figure 15 : Forme du courant dans la boucle d'émission	20
Figure 16 : Méthode TDEM; Schéma de la diffusion des boucles de courant dans le sol après la coupure	20
Figure 17 : Illustration de boucle coïncidente	21
Figure 18 : Illustration de Boucle central [10].....	22
Figure 19 : Organigramme de processus de l'inversion des données avec RES2DINV	26
Figure 20 : Répartition des 17Fokontany dans la Commune Rurale d'Itampolo (source: FTM, BD500)	27
Figure 21 : Plan de masse du site à Ampitanaka (Source : Google earth).....	28
Figure 22 : Courbe de sondage SE1 à Ampitanaka	28
Figure 23 : Plan de masse du site à Voroja (Source : Google earth)	29
Figure 24 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du PANNEAU1	30
Figure 25 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du PANNEAU2.....	30
Figure 26 : Courbe de Sondage obtenue à Voroja	31
Figure 27 : Courbe STDEM1 obtenue à Voroja	32
Figure 28 : Courbe STDEM2 obtenue à Voroja.....	32
Figure 29 : Courbe STDEM3 obtenue à Voroja	33
Figure 30 : Plan de masse du site à Nanohofa (Source : Google earth).....	34
Figure 31 : Courbe STDEM4 obtenue au fokontanyNanohofa	34
Figure 32 : Courbe STDEM5 obtenue au fokontanyNanohofa	35
Figure 33 : Plan de masse du site à Vohombe(Source :Google earth).....	35
Figure 34 : Courbe STDEM6 obtenue au fokontanyVohombe	36
Figure 35 : Courbe STDEM7 obtenue à Vohombe	36
Figure 36 : Plan de masse du site à Besasavy-Nord (Source : Google earth).....	37
Figure 37 : Courbe STDEM8 obtenue à Besasavy_Nord.....	37
Figure 38 : Courbe STDEM9 obtenue à Besavavy_Nord	38
Figure 39 : Plan de masse du site à Bemanateza (Source : Google earth).....	39
Figure 40 : Courbe STDEM10 obtenue à Bemanateza.....	39

Figure 41 :Plan de masse du site à Andranomasintsoa (Source : Google earth)	40
Figure 42 : Courbe STDEM11 obtenue à Andranomasintsoa	40
Figure 43 : Plan de masse à Ankazoabo-Nord.....	41
Figure 44 : Courbe de sondage SE3 à Ankazoabo.....	41
Figure 45 : Plan de masse du site à Malangariaka (Source : Google earth)	42
Figure 46 : Courbe de sondage SE4 à Malangariaka.....	42
Figure 47 : Courbe STDEM12 obtenue à Malangariaka	43
Figure 48 :Plan de masse du site à Itampolo (Source :Google earth).....	44
Figure 49 : Courbe STDEM 13 obtenue à Itampolo.....	44
Figure 50 : Plan de masse du site à Berovontsy (Source : Google earth).....	45
Figure 51 : Courbe STDEM14 obtenue à Berovontsy.....	46
Figure 52 : Plan de masse du site à Zoenarivo (Source : Google earth).....	47
Figure 53 : Courbe STDEM15 obtenue à Zoenarivo.....	47
Figure 54 : Courbe STDEM16 obtenue à Zoenarivo.....	48
Figure 55 :Plan de masse du site Tangainoro (Source : Google earth).....	49
Figure 56 : Courbe de sondage SE6 à Tangainoro	49
Figure 57 : Courbe STDEM17 obtenue au fokontany Tangainoro.....	50
Figure 58 : Plan de masse du site à Besasavy-Sud (Source : Google earth).....	51
Figure 59 : Courbe STDEM18 obtenue au Fokontany Besasavy_sud(STDEM1)	51
Figure 60 : Plan de masse du site à Tsiaンドriona-Nord	52
Figure 61 :Courbe de sondage SE7 à Tsiaンドriona Nord	52
Figure 62 : Plan de masse du site à Ambolisogno	53
Figure 63 : Courbe de sondage SE8 à Ambolisogno	53
Figure 64 : Courbe de sondage SE9 à Ambolisogno	54
Figure 65 : Plan de masse du site à Befengoka (Source : Google earth)	55
Figure 66 : Courbe de sondage SE10 à Befengoka	55
Figure 67 : Représentation des blocs et des points de mesure	I
Figure 68 : Principe de l'inversion	II
Figure 69 : Emplacement des profiles de coupes géologiques	III

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS

- BD 500** : Base de données 1/500.000
- FTM** : Foiben-Taotsaritanin'i Madagasikara
- GPS** : Global Positioning System
- IOGA** : Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo
- MT** : Méthode magnétotellurique
- RCM** : Remote Control Multiplexer
- RMSE** : Root-Mean Squared Error
- SE** : Sondage électrique
- SEV** : Sondage électrique Vertical
- STDEM** : Sondage Time Domain Electromagnetism
- TDEM** : Time Domain Electromagnetism
- ZCIT** : Zone de convergence intertropicale

INTRODUCTION

L'eau c'est la vie, donc la question de la disponibilité et accès à l'eau est sans aucun doute un des problèmes majeurs auquel devra faire face l'humanité durant les siècles à venir.

L'accès à l'eau sur le plateau Mahafaly, déjà difficile par la nature hydrologique du terrain, est rendu encore plus difficile suite au contexte climatique du Sud de Madagascar.

Le plateau Mahafaly se situe dans le Sud-ouest Malgache, dans une zone semi-aride dont la variabilité climatique plus sèche s'est accentuée ces dernières années.

La plaine littorale Mahafaly, qui s'étend sur 200 km au Sud-ouest de Madagascar, est particulièrement touchée par ce problème car (1) elle est soumise à l'ensemble des problèmes de salinités que connaissent la majorité des zones littorales (intrusion marine, embruns...) et (2) elle est située dans la zone la moins arrosée de l'île avec une pluviométrie de l'ordre de 300 à 400 mm/an. [1]

Face à ces problèmes d'accès à l'eau dans la bande côtière du Plateau Mahafaly, le recours à la ressource en eaux souterraines est la solution proposée pour l'approvisionnement en eau de la région.

Des études ont été réalisées dans le but d'exploiter les ressources en eaux souterraines, dans la Commune Rurale Itampolo afin de réaliser les points d'eau modernes pour une adduction en eau potable des Villageois qui souffre tant d'un manque d'eau. Les études d'exploitations font appel aux méthodes électrique et électromagnétique pour connaître la distribution de la résistivité électrique du sous-sol.

Notre travail consiste à localiser les points favorables pour l'implantation des puits ou forages et de réhabilitation d'ouvrages d'adduction d'eau potable dans le plateau Mahafaly.

Pour cette étude, nous avons utilisé des méthodes de prospection géophysique telles que la méthode électrique et la méthode électromagnétique.

La méthode électrique nous permet de faire la technique de sondage électrique ainsi que la tomographie électrique (Panneau électrique) et même le trainé électrique aussi. Et la méthode électromagnétique utilise comme signal des sources naturelle et contrôlée dont ce dernier inclut le sondage TDEM.

En géophysique de prospection des ressources en eaux souterraines, la résistivité des terrains (ou son inverse : la conductivité) constitue un paramètre intéressant en tout premier lieu car il est directement corrélé à la présence d'eau dans la roche et à la minéralisation de cette eau. [8]

Ainsi le présent mémoire est intitulé : « **Etude des ressources en eaux souterraines par méthodes électrique et électromagnétique de la Commune Rurale Itampolo, district Ampanihy, Région Atsimo-Andrefana** ».

Ce mémoire comporte trois chapitres. Le premier parle de la présentation générale de la zone d'étude. Le deuxième explique les diverses méthodes utilisées dans les études effectuées et l'acquisition des données. Enfin, le troisième développe l'interprétation et les résultats.

CHAPITRE I

PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Ce chapitre présente la description générale de la zone d'étude. Dans ce cadre, on va parler successivement de la situation géographique et administrative, du contexte morphologique, du contexte géologique, du contexte hydrographique, du contexte climatique et du contexte socio-économique.

I.1.CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIF

La Commune Rurale Itampolo se situe géographiquement à la latitude $24^{\circ} 41' 00''$ S et à la longitude $43^{\circ} 57' 00''$ E . Elle se trouve au Sud-ouest de Madagascar, à 350 Km au sud de la ville de Tuléar. Elle fait partie de la région Atsimo-andrefana, et appartient plus précisément au district Ampanihy. Sa superficie compte 2417 Km^2 dont la longueur 110 Km s'étend du Nord au Sud et la largeur 60 Km d'Est en l'Ouest. Cette commune est limitée par :

- la Commune Rurale Beheloka et Masiaboay au Nord
- la Commune Rurale Ejeda et Beahitse à l'Est
- la Commune Rurale Androka au Sud
- le Canal de Mozambique à l'Ouest

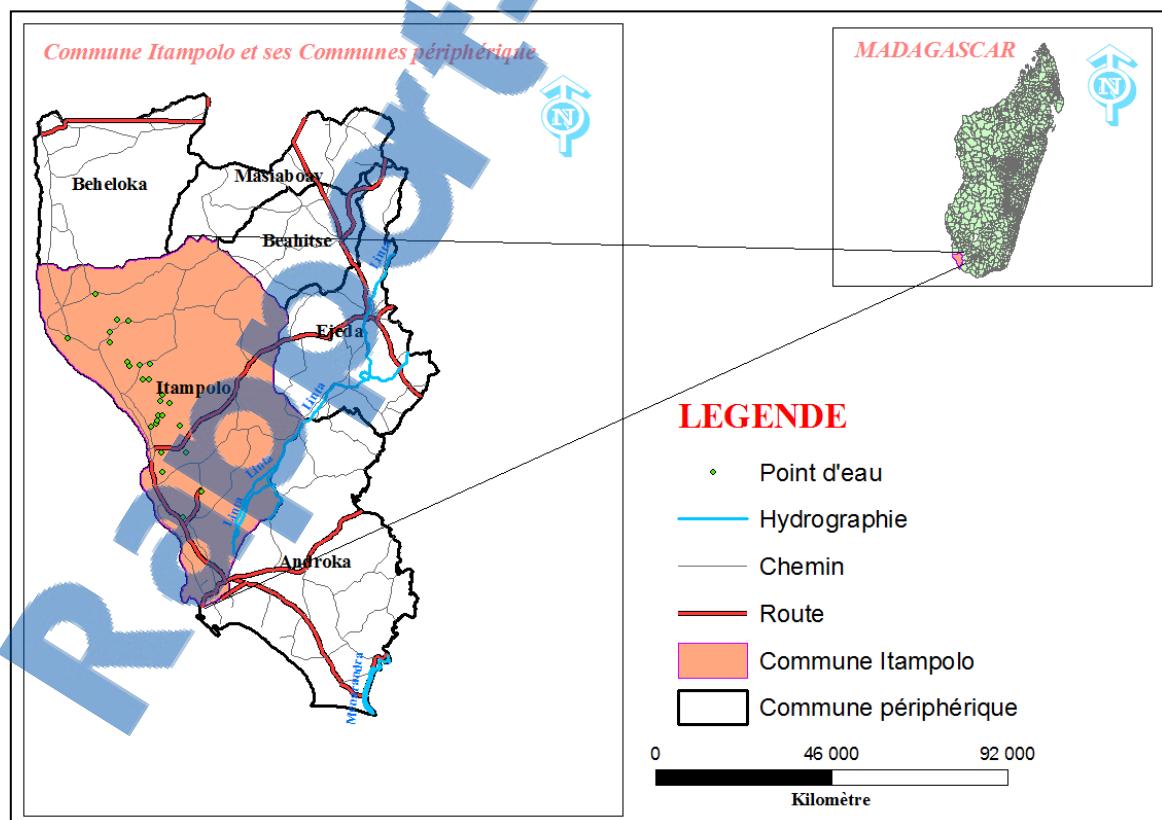


Figure 1 : Carte de localisation administrative et géographique de la zone d'étude

I.2.CONTEXTE MORPHOLOGIQUE

La zone d'étude est limitée par la faille du plateau Mahafaly à l'Est, par le canal du Mozambique à l'Ouest. La plaine côtière forme une bande continue mais de largeur variable (de 1.5 à 15 km pour une superficie totale inférieure à 1500 km²) entre l'Onilahy et la Linta. L'existence de la faille rectiligne est liée à un accident tectonique majeur, qui a abaissé le compartiment ouest mais dont on ne connaît ni la position exacte, ni le rejet dans notre zone. L'altitude moyenne de la bande côtière est relativement faible ne dépassant pas 30 m pour la moitié nord. Elle tend à augmenter vers le sud, dépassant fréquemment les 50 mètres (cf Figure 3).

La bande côtière est recouverte de dunes quaternaires de différentes générations, vives ou fixées, souvent grésifiées. Certaines zones plus argileuses en surface permettent la formation de mares temporaires, en saison des pluies. On notera aussi la présence d'un grand lac salé : le Lac Tsimanampetsotsa qui s'étend sur 15 km, le long de la falaise éocène. [1]

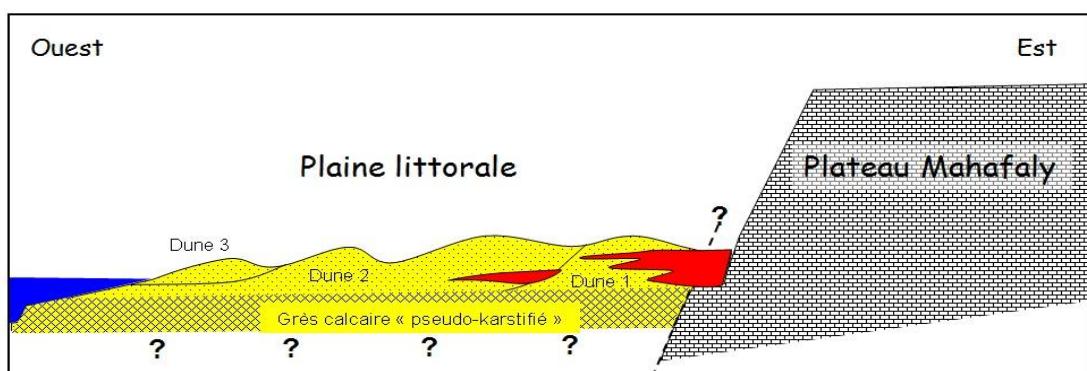


Figure 2: Coupe schématique transversale du plateau Mahafaly (Luc GUYOT, 2002)

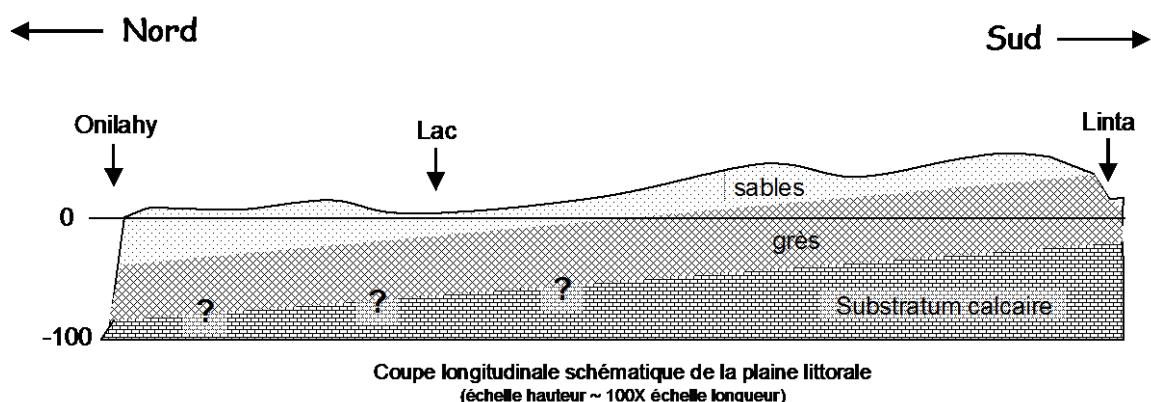


Figure 3 : Coupe longitudinale de la plaine littorale du Nord au Sud (Luc GUYOT, 2002)

I.3.CONTEXTE GEOLOGIQUE

Autre fois, la bande côtière a été considérée comme une zone à part entière. Toutefois, de manière générale, cette zone est constituée de calcaire datée de l'éocène. Cette remarque a été déjà avancée par Luc Guyot dans sa thèse (2002). Lors de notre descente sur le terrain, cette remarque a été vérifiée à plusieurs reprises au niveau des points d'eau traditionnels. Généralement, ces calcaires sont de massifs stratifiés. Une ressemblance se fait remarquer entre ce calcaire et celui de l'éocène du plateau. D'après ces remarques et celle de Luc Guyot, nous avons conclu que le compartiment abaissé du plateau se trouve juste sous la couverture sableuse, variant entre 3 et 8m de profondeur. Vers le Sud, à environ 8 Km, avant d'entrer dans la région d'Itampolo, des calcaires lapiazée affleurent aux environs d'un point d'eau.

La stratigraphie des dunes qui recouvrent le calcaire éocène peut être divisée en trois ou quatre selon les auteurs. [11].

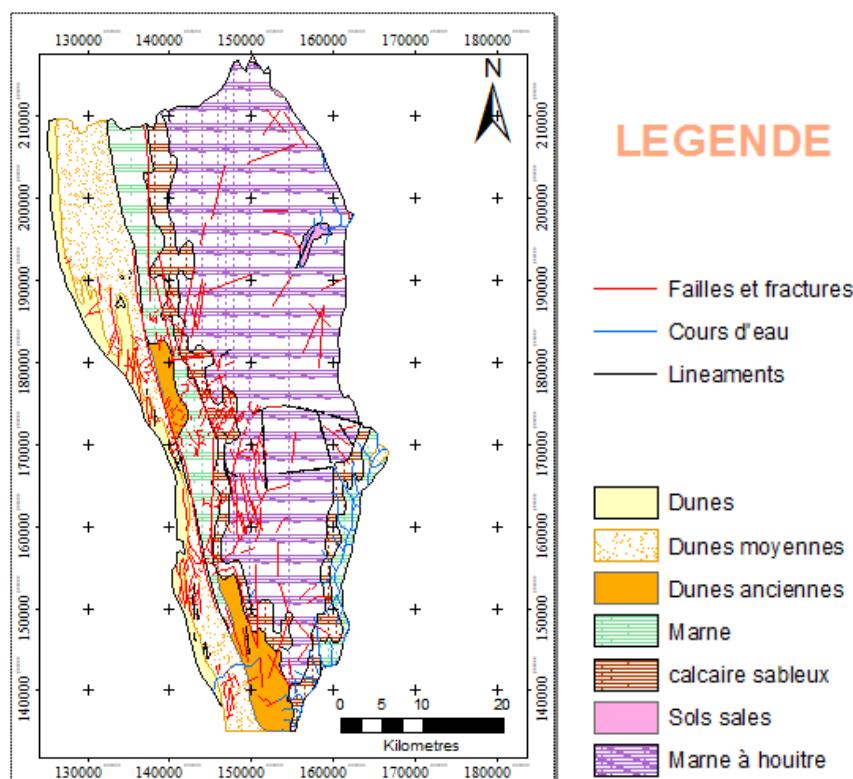


Figure 4: Carte géologique de la Commune Rurale Itampolo (Besairie, 1972)

I-4.CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE

La Linta dont le cours suit une direction NNE-SSW est un fleuve du Grand Sud. Son bassin est beaucoup plus limité que celui de l'Onilahy (5800km²) et s'étend sur une zone moins arrosée. La Linta est donc beaucoup moins alimentée. Même à la station limnigraphique d'Ejeda, située à la limite du socle, les écoulements en surface n'existent que pendant les mois de novembre à février. Ils sont tout à fait exceptionnels en aval où le fleuve se perd rapidement dans le réseau karstique, il ne peut alors y avoir un débit de surface que lors des très fortes pluies en amont. La Linta peut présenter des crues très violentes mais qui n'atteignent son embouchure près du village d'Androka que quelques jours par an. Alors que l'Onilahy a déblayé une importante vallée sous-marine dans le prolongement de son estuaire, la Linta quant à elle a déposé de nombreux matériaux ce qui se traduit par l'avancée sur la mer d'une langue de dunes et d'alluvions, sur plusieurs km². Ces alluvions étant remaniées lors des cyclones importants, le lit de la Linta à son embouchure peut changer de tracé assez brutalement. [1]

I-5.CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE [8]

Les anciennes recherches hydrogéologiques basées dans un premier temps sur le simple recensement des points d'eau traditionnels, conduisaient les auteurs à individualiser plus ou moins des systèmes hydrogéologiques, en tentant d'associer une "nappe aquifère", à une formation géologique donnée. Etant donné la diversité des formations géologiques du S-W, mais aussi, de la variabilité des paramètres hydrodynamiques au sein d'une même formation géologique, ce raisonnement ne se prête guère à l'hydrogéologie du Grand Sud. C'est pourquoi, J. Aurouze, (1959) a introduit la notion de nappe générale en se basant sur l'apparente continuité des niveaux piézométriques depuis les terrains du socle à l'Est jusqu'à la mer. Cette hypothèse a pu être vérifiée ensuite dans l'Extrême Sud, par des campagnes de forages, mais malgré quelques cartes locales, il n'y a pas eu avant le commencement de l'étude, de tentative de cartographie piézométrique pour l'ensemble de la nappe générale de S-W.

L'idée de cette nappe générale place *a priori* la bande littorale à l'aval hydrogéologique d'un vaste système de nappes. Il convient donc de préciser les diverses composantes de ce système. Cette nappe draine un très vaste domaine qui débute en amont, sur les pénéplaines cristallines de l'Androy et du Mahafaly. Cette nappe s'écoule ensuite vers l'Ouest en traversant les diverses formations géologiques des terrains néogènes, des calcaires du plateau puis des sables et grès de la plaine littorale où elle se raccorde au niveau de la mer.

Ainsi, la principale zone d'alimentation de la nappe générale se situent au niveau des terrains du socle où les pluies sont relativement importantes (pluviométrie supérieure à 600 mm). Selon Aurouze (1959), le ruissellement ne joue un rôle qu'au moment des fortes pluies provoquant la crue des rivières qui peuvent alors, temporairement alimenter la nappe générale. En revanche, en période de sécheresse, c'est la nappe qui alimente les écoulements de thalwegs qui de toute façon se ré-infiltrent dans la nappe un peu plus en aval (pertes dans le Néogène ou dans les calcaires du plateau).

Dans les terrains sédimentaires anciens de la zone de Betioky, les terrains sont relativement hétérogènes et certaines zones peuvent être favorables à l'infiltration. Une grande partie du plateau de Betioky est recouvert d'une carapace latéritique et doit se comporter globalement comme les terrains du socle, vis à vis de l'infiltration.

Dans le Néogène, les apports directs par infiltration sont certainement faibles du fait de la médiocre perméabilité des terrains. Dans les calcaires, notamment sur le plateau Mahafaly, la faible pluviométrie est *a priori* compensée par la possibilité d'infiltration très rapide. Les apports météoriques, sur la bande côtière sont considérés quant à eux comme nuls.

Dans le domaine cristallin, la surface de la nappe générale suit grossièrement la topographie et est assez facilement accessible car elle est soutenue par la zone non altérée située au plus à une vingtaine de mètres de la surface topographique. Il en est de même dans les formations néogènes. Par contre, lorsqu'on rentre dans le domaine du plateau calcaire, la nappe générale, devient par rapport à la surface topographique relativement profonde, elle est donc inaccessible avec les moyens traditionnel (puits) et seuls quelques points naturels (avens profonds) permettent d'y accéder directement.

Elle réapparaît à l'Ouest, sur la bande littorale où l'altitude des formations quaternaires est relativement faible et les points d'eau, plus nombreux.

I.6.REPARTITION DES POINTS D'EAUX DE LA ZONE D'ETUDE

Etant donnée la surface de la bande côtière (un peu plus de 1400 km²), la densité des points d'eau est relativement faible, de moins d'un puits pour 6 km². Leur répartition est très hétérogène, avec des zones de plusieurs dizaines de kilomètres, quasiment désertes. En ce qui concerne les points d'eau non naturels, ceux-ci sont localisés principalement, (1) là où la nappe est accessible à une faible profondeur, (2) dans des zones habitées (3) là où l'eau est la moins minéralisée possible. C'est souvent le premier paramètre qui est prépondérant, obligeant parfois les villageois à parcourir de grandes distances pour s'alimenter en eau, souvent encore de très mauvaise qualité.

Parmi les 42 forages réalisés sur la bande côtière, une quinzaine sont des forages de reconnaissance dont l'implantation a toutefois été limitée par certaines contraintes techniques (accès, profondeur...). L'implantation des forages d'exploitation a, quant à elle, été guidée par des critères d'hydraulique villageoise.

La figure suivant représente la répartition de tous les points d'eau connus sur la bande côtière, avec différents symboles selon leur type, la partie Nord à gauche et la partie Sud à droite.

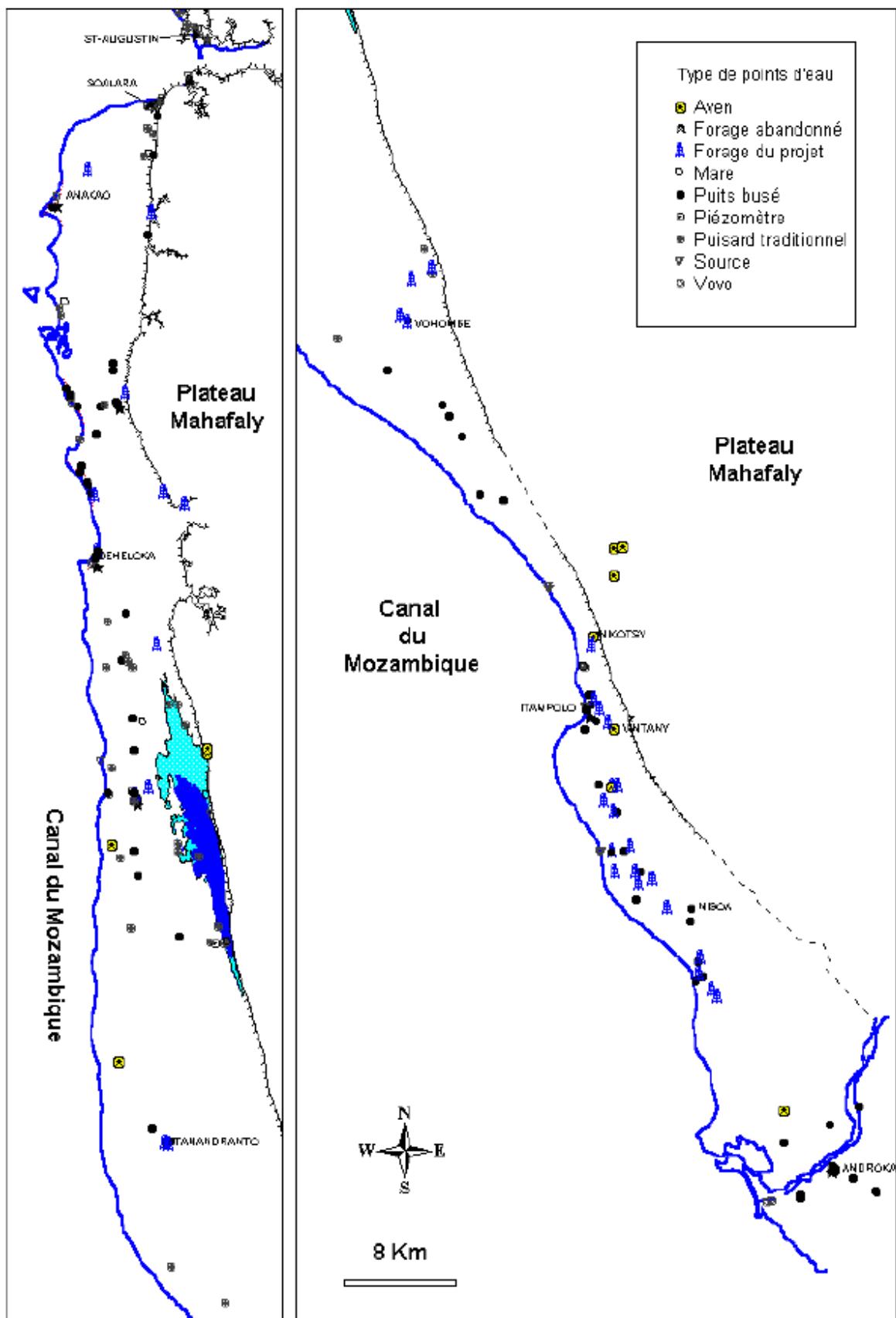


Figure 5 : Carte de répartition des points d'eau sur la bande côtière (Source : Luc GUYOT,2002)

I.7.CONTEXTE CLIMATIQUE

Le climat général de Madagascar est guidé par les deux régimes: l'**Alizé** et la **Mousson**

I.7.1.Le régime d'alizé

L'Alizé est le vent d'Est et de Sud-est. Il souffle pendant l'hiver austral, et apporte la masse d'air tiède et humide, et arrose la partie Est de l'Ile. Ce régime est actionné par la présence quasi-permanente de l'anticyclone subtropical de l'Océan Indien qui exerce son influence sur l'Ile.

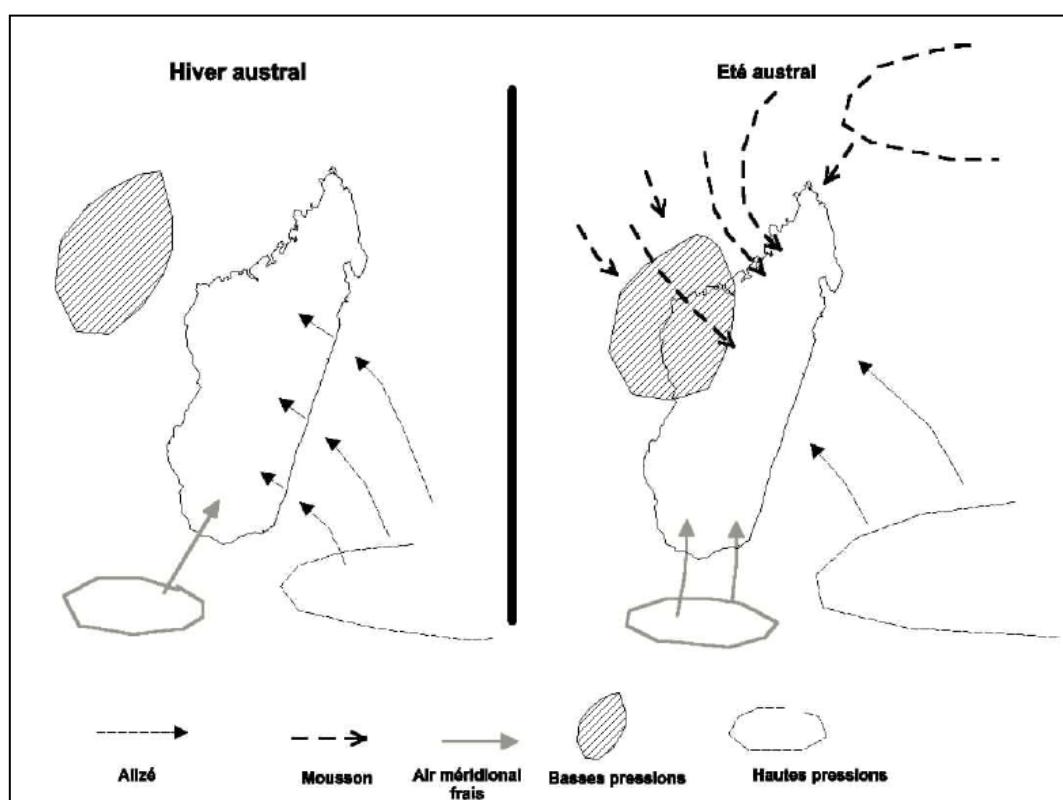


Figure 6: Balance saisonnier des pressions et des vents (modifié après E. NICOLINI 1980)

I.7.2. Le régime de mousson

La mousson, c'est le vent du Nord-Ouest, il apporte avec lui de l'humidité et arrose la partie Ouest et Nord-Ouest de Madagascar pendant l'été.

Pendant la saison d'été, l'anticyclone de l'Océan Indien recule vers le Sud et s'affaiblit, ce qui permet à la masse d'air équatorial d'avancer davantage vers le Sud, autrement dit, favorisant l'extension de la zone de dépression sur Mozambique et Madagascar.

La rencontre des deux masses d'air donne de l'instabilité, et créant ainsi la Zone de Convergence Intertropicale (Z.C.I.T.).

Le Nord de Madagascar est le siège permanent de la Z.C.I.T. qui apporte beaucoup de précipitations pendant la saison d'été. La Z.C.I.T est rarement descendue dans le Sud de Madagascar.

La mousson commence en Novembre et elle continue durant la saison humide jusqu'au mois d'Avril.

En plus de ces deux principaux régimes, l'extrême sud de Madagascar reçoit en permanence l'air méridional qui apporte avec lui de l'humidité (*Figure 2*).[2]

I.7.3.Précipitations

La répartition des pluies dans l'année suit le régime bi-saisonnier avec une saison "humide" de décembre à Mars. La saison des pluies dure en moyenne 4 mois sur la bande côtière, de décembre à mars, avec un maximum de précipitations mensuelles en Janvier. Toutefois ; on peut faire remarquer que dans le Sud de l'île, le passage de dépressions méridionales, à l'origine de quelques pluies pendant l'hiver austral, entraîne une légère atténuation du caractère saisonnier.

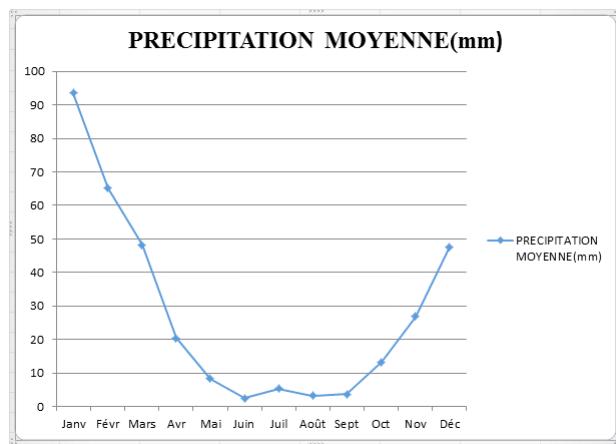


Figure 7: Courbe représentative de la précipitation moyenne de l'année 1983-2015 de la Commune Rurale Itampolo (Source : Service Météorologique Malagasy-Ampandrianomby)

I.7.4.Température

La saison humide correspond à la saison chaude avec une température moyenne annuelle de 25°C. Les mois les plus frais sont les mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril avec une température moyenne de l'ordre de 27 °C alors que les mois les plus secs commencent en mois de Mai jusqu'au Septembre.

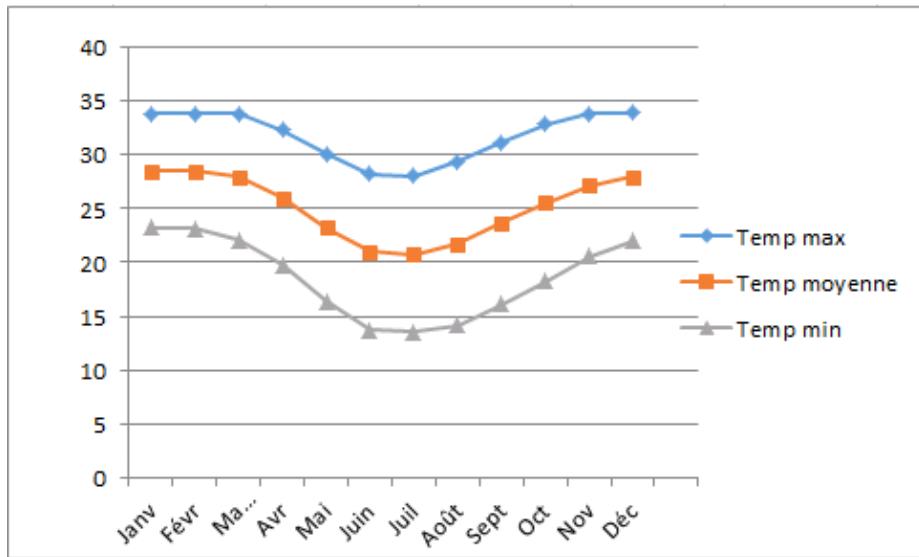


Figure 8 : Courbe représentative de la température de la Commune Itampolo de l'année 1961-2015 (Source : Service météorologique Malagasy-Ampandrianomby)

I.8.CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

Les habitants de cette zone sont répartis en deux groupes: les « Vezo » et les « Tanalanana ».

Les « Vezo » sont une ethnie établie le long du littoral Sud-ouest de Madagascar vivant exclusivement de la pêche en mer. Ils représentent environ 20% de la population d'Itampolo. Les « Tanalanana » constituent la majeure partie du reste des habitants de la commune. Ce sont des agro-éleveurs.

Ainsi, la principale activité économique des habitants de cette zone est l'agriculture, pratiquée entre la bande littorale et le plateau Mahafaly.

Elle concerne essentiellement les cultures vivrières : maïs, maniocs, patates douces, pastèques. La pêche, pratiquée de façon traditionnelle et familiale, tient cependant une part importante.

Enfin, quelques habitants pratiquent l'élevage de zébus principalement, mais on dénombre également parmi les cheptels quelques ovins et caprins.

Les habitations de ces villages sont principalement en végétaux avec une structure en bois et des murs en torchis. Les toitures sont en majorité végétales (jonc) ou en tôle. Quelques bâtiments en durs appartenant aux ménages les plus aisés sont également présents.[3]

CHAPITRE II

METHODES ET MATERIELS

A. RAPPELS

Un courant est créé en sous-sol à l'aide d'une source de courant (batterie par exemple) et des deux électrodes dites injection. Ce courant pénètre dans le sol par une électrode dite « A » et en sort par une électrode dite « B ». La répartition des lignes de courant dans le sol se fait alors en volume.

II-1. METHODE ELECTRIQUE

La méthode électrique consiste à injecter du courant d'intensité connue à l'aide d'une paire d'électrodes dites « électrodes de courant », de mesurer le potentiel généré par ce courant dans le sous-sol à l'aide d'une autre paire d'électrodes dites « électrodes de potentiel » et d'en déduire la résistivité électrique du sol à partir de la connaissance du potentiel et la géométrie du dispositif utilisé.

II.1.1. Notion de résistivité [5]

La résistance mesure l'opposition au passage d'un courant électrique et peut permettre de caractériser un matériau. La loi d'Ohm stipule que la résistance électrique est donnée par le quotient de V appliquée aux bornes d'un matériau par le courant I qui circule, soit

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Où R : résistance électrique exprimée en (Ω)

V : potentiel électrique exprimée en (Volt)

I : intensité du courant électrique exprimée en (Ampère)

Puisque la résistance dépend de la forme géométrique du corps, on doit se baser sur une propriété du corps, tout en caractérisant la facilité de laisser passer le courant, est indépendante de la forme géométrique de l'échantillon choisi.

Cette propriété s'appelle *la résistivité électrique* ρ et est reliée à la résistance par :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

II.1.2. Définition de résistivité électrique

La résistivité électrique d'un matériau, exprimée en Ωm , représente sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique.

II.1.3.BASES THEORIQUES DE LA METHODE ELECTRIQUE

Dans la pratique, on injecte dans le sol, au moyen d'électrodes, un courant continu dont on mesure l'intensité et on étudie la répartition du potentiel de l'espace environnant.

Dans cette répartition du potentiel, il est alors possible d'en déduire une répartition de la résistivité dans le sous-sol. (L Marescot 2000-2008)

II.1.3.1.Potentiel généré par une seule électrode

Par définition $I = \iint \vec{J} d\vec{s}$ (\vec{J} et $d\vec{s}$ sont perpendiculaire sur les lignes équipotentielle.)

Où $d\vec{s}$ l'élément de surface équipotentielle.

\vec{J} est la densité du courant ou bien courant par unité de surface traversée .Comme le champ

$$\text{électrique } \vec{E} \text{ dérive du potentiel } V, \vec{\nabla}V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} = -\vec{E}$$

Dans un milieu continu, la loi d'Ohm stipule que $\vec{E} = \rho \vec{J}$ ($E = \rho J$).

Le courant injecté en surface se répartit régulièrement radiale sur les surfaces équipotentielle(Figure8)

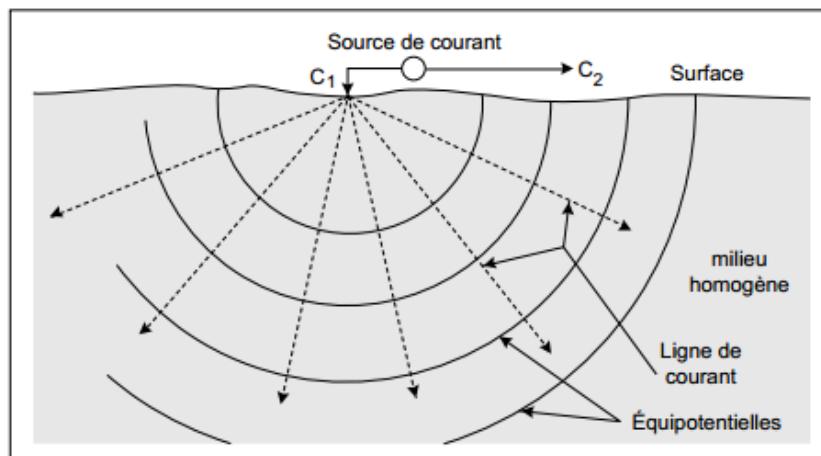


Figure 9 : Lignes de courant et les équipotielles produites par une source ponctuelle [5]

En effectuant l'intégration du courant I sur toute la surface hémisphérique de rayon r , on a

$$I = J * S \text{ avec } S = 2\pi r^2, \text{ alors } I = 2\pi * J * r^2$$

$$\Rightarrow J = \frac{I}{2\pi r^2}$$

Ainsi $E = -\frac{\partial V}{dr}$ où $E = \rho J$, par conséquent $dV = -\rho J dr$.

Si on remplace J par sa valeur on obtient, $dV = -\frac{\rho I}{2\pi r^2} dr$.

On peut écrire sous-forme intégrale $V = \int -\frac{\rho I}{2\pi r^2} dr$. Or $\int -\frac{1}{r^2} dr = \frac{1}{r}$

Alors $V = \frac{\rho I}{2\pi r} + Cte$

Comme le potentiel est nul lorsque r tend vers l'infini, la constante Cte doit être nulle

D'où $V = V(M) = \frac{\rho I}{2\pi r} (3)$

II.1.3.2. Principe de mesure de la résistivité

Pour mesurer la résistivité électrique d'un sol, il est nécessaire d'injecter un courant électrique continu à la surface du sol et de mesurer la différence de potentiel qui en résulte. Quelle que soit la technique choisie, le dispositif de mesure comporte quatre électrodes (on parle de quadripôle) : A et B pour l'injection du courant, M et N pour la mesure de la différence de potentiel.

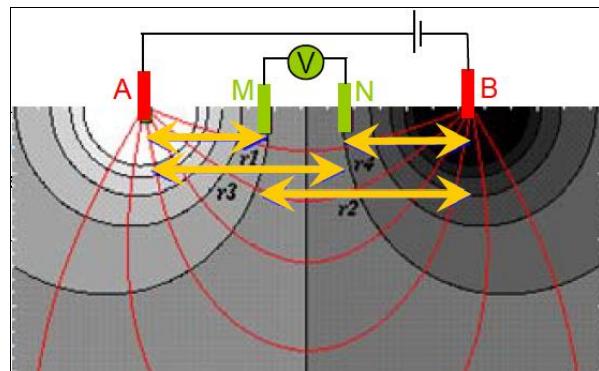


Figure 10: Distribution des lignes de courant (en rouge) et des équipotentielles (en gris) dans un sol homogène lors de la prospection par un quadripôle A-B-M-N. [7]

Notons que distances $r1, r2, r3$ et $r4$ correspondent respectivement aux distances AM, BM, AN et BN

Lorsqu'on utilise le quadripôle (c'est-à-dire utilise les 4 électrodes A, M, N et B), les deux électrodes de courant A et B génèrent des potentiels aux 2 électrodes M et N appelés électrodes de potentiel.

Donc, les potentiels aux électrodes M et N peuvent être calculés comme suit:

$$V(M) = V_A(M) - V_B(M)$$

$$V(M) = \frac{\rho I}{2\pi A M} - \frac{\rho I}{2\pi B M}$$

Et

$$V(N) = V_A(N) - V_B(N)$$

$$V(N) = \frac{\rho I}{2\pi A N} - \frac{\rho I}{2\pi B N}$$

$$\text{Or } \Delta V = V_A(M) - V_B(N)$$

$$\text{Donc, } \Delta V = \frac{\rho I}{2\pi A M} - \frac{\rho I}{2\pi B M} - \left(\frac{\rho I}{2\pi A N} - \frac{\rho I}{2\pi B N} \right)$$

Ainsi, la différence de potentielle ΔV entre deux électrodes de potentiel sera :

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

Et la résistivité électrique peut s'écrire :

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

$$\text{Donc } \rho = \frac{K \cdot \Delta V}{I} \quad (4)$$

ρ : résistivité électrique, exprimée en (Ωm)

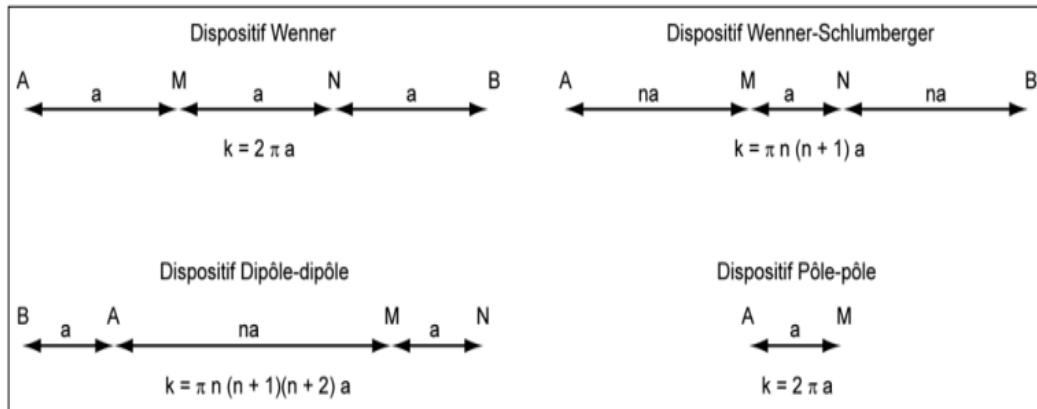
K : facteur géométrique, exprimée en (mètre)

ΔV : différence de potentiel, exprimée en (Volt)

I : intensité exprimée en (Ampère)

II-1-3-3. Dispositifs de mesure en méthode électrique [11]

On appelle dispositif de mesure, une figure géométrique mise en œuvre sur le terrain à l'aide de câbles d'émission de courant électrique et de câbles de réception permettant ainsi la mesure de la différence de potentiel entre deux électrodes.



II.1.3.4. Profondeur d'investigation (P)

C'est la profondeur maximale atteinte par les lignes de courant.

Généralement la profondeur d'investigation est fonction de la longueur de ligne.

$$\frac{AB}{10} \leq P \leq \frac{AB}{4}$$

Lorsque le milieu est conducteur la profondeur d'investigation correspond à la distance $\frac{AB}{10}$ et $\frac{AB}{4}$ dans le cas où le terrain est résistant.

II.1.3.6. Technique de mesure de la résistivité

L'objectif de la prospection électrique est justement de permettre au géophysicien de se faire une image de la structure et des hétérogénéités du sol. Plusieurs techniques sont possibles à la mesure de résistivité électrique sol.

II.1.3.6.1. Sondage électrique vertical (SEV)

Le principe de sondage électrique vertical repose sur l'utilisation d'un quadripôle AMNB. Il consiste à faire varier la longueur de ligne AB en laissant le point o centre d'AB et MN fixe (Figure6).

On peut alors tracer la courbe de résistivité apparente ρ_a en fonction de la longueur de ligne $L=AB/2$.

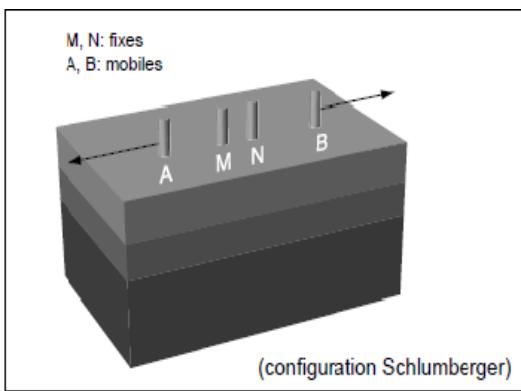


Figure 12: Illustration de principe de mise en œuvre de sondage électrique verticale[5]

II.1.3.6.2. Trainé électrique

Il s'agit simplement de déplacer un quadripôle AMNB de dimension fixe sur le site à explorer (Figure 7). A chaque station, on fait une mesure de I et ΔV qui permet de calculer la résistivité ρ_a qu'on affecte au centre du dispositif.

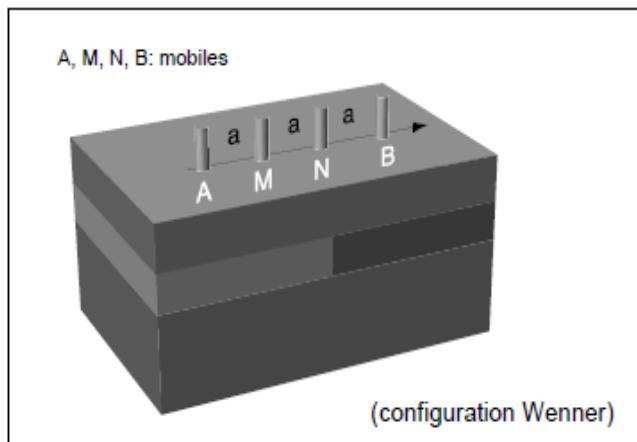


Figure 13: Illustration de principe de mise en œuvre d'un profil [5]

II.1.3.6.3. Technique du panneau électrique

Lorsqu'on déplace le quadripôle à la surface du terrain, on observe les variations latérales de sa résistivité électrique à une pseudo-profondeur donnée. En combinant les sondages avec des déplacements latéraux, on obtient des informations à la fois latérales et verticales, ce que l'on appelle un **panneau électrique** (ou une tomographie électrique). Cette technique est mise en œuvre grâce à un dispositif multi-électrode que l'on pilote depuis un matériel spécifique (multinodes et multiplexeur) et qui permet de réaliser rapidement un grand nombre de mesures selon des séquences préalablement enregistrées. Cette méthode de prospection est typiquement utilisée pour caractériser un profil de sol.

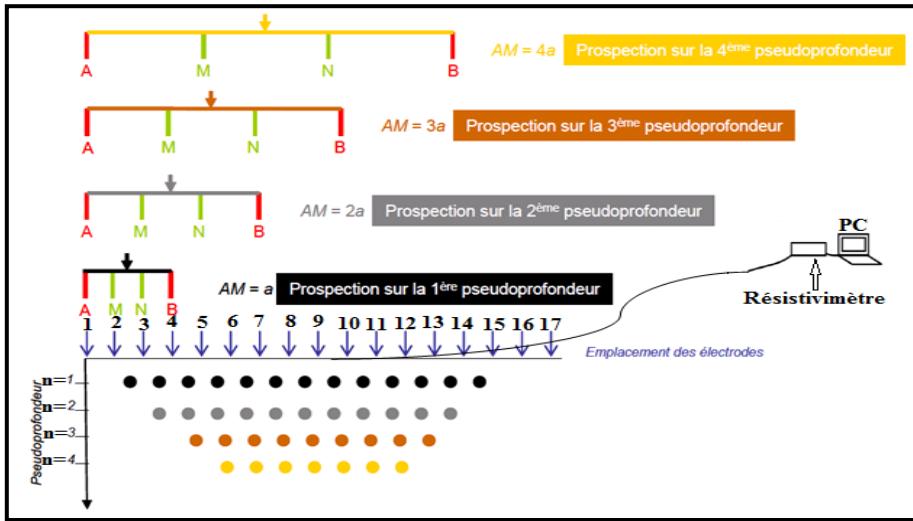


Figure 14: Principe d'une prospection par tomographie électrique, modifié par l'impétrant. [7]

Dans le cas général utilisant N électrodes, le nombre total de mesures m, pour un profil dont la distance entre deux électrodes consécutives est n_a , a pour expression :

$$m = \sum (N-3n), \text{ où } n \text{ entier inférieur ou égal à } N/3$$

II.2. METHODE ELECTROMAGNETIQUE [8]

Les méthodes électromagnétiques visent à déterminer la distribution de la conductivité des sols et du sous-sol en fonction de la profondeur. D'une manière générale, elles comprennent les méthodes qui utilisent des champs électromagnétiques naturels comme source (méthode magnétotellurique, MT, par exemple), et les méthodes à source contrôlée, dont la méthode TDEM en fait la partie (Time Domain Electromagnetic).

II.2.1. Principe général

Le fait de couper brusquement le courant dans la boucle d'émission produit une variation de flux du champ magnétique primaire qui produit, selon la loi de Faraday, une force électromotrice (f.e.m) dans le terrain. Cette f.e.m génère dans le sol des courants induits, appelée aussi courant de Foucault. Immédiatement après la coupure, ces courants circulent avec une géométrie similaire à celle du dispositif qui leur a donné naissance. Leur sens de circulation est le même que celui de courant initial dans l'émetteur.

Lorsqu'on injecte un tel courant dans un câble (boucle), la forme idéale serait celle d'un créneau parfait : la montée et la descente devrait être instantanée.

En effet la dérivée (par rapport au temps) de la coupure instantanée d'un signal infiniment long se traduit par un Dirac, un générateur en domaine fréquentiel d'une infinité

des fréquences. La méthode TDEM utilise le plus souvent comme signal-source un courant de forme carré (cf figure14). Cela n'est pas réalisable physiquement parlant. On définit le temps de montée du signal à sa valeur nominale par le « turn on-time » et le temps que met le signal à s'annuler « turn off-time ». La forme du créneau d'injection dépend de plusieurs paramètres. En particulier la durée de turn-off-time s'accroît lorsqu'on augmente l'intensité du courant, la longueur du câble d'émission et le nombre de spires. L'électronique joue aussi un rôle non négligeable dans la forme turn-off-time, notamment pour éviter les oscillations du courant.

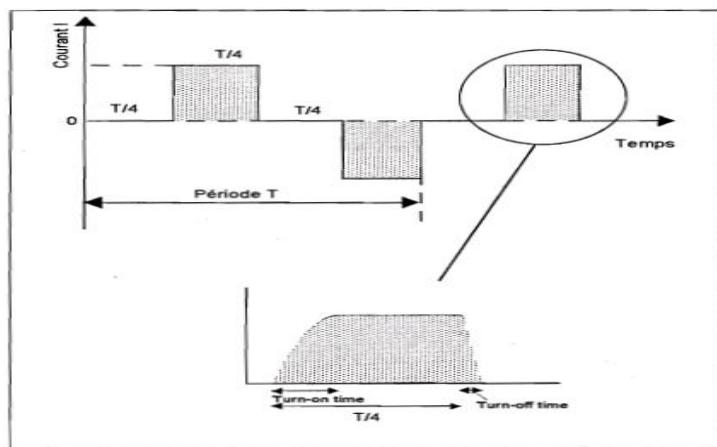


Figure 15 : Forme du courant dans la boucle d'émission

Les courants induits génèrent un champ magnétique secondaire dont son amplitude décroît avec le temps. Ce champ transitoire peut être mesuré en surface à l'aide de récepteur. Et le résultat est la plupart du temps exprimé en $V/A.m^2$

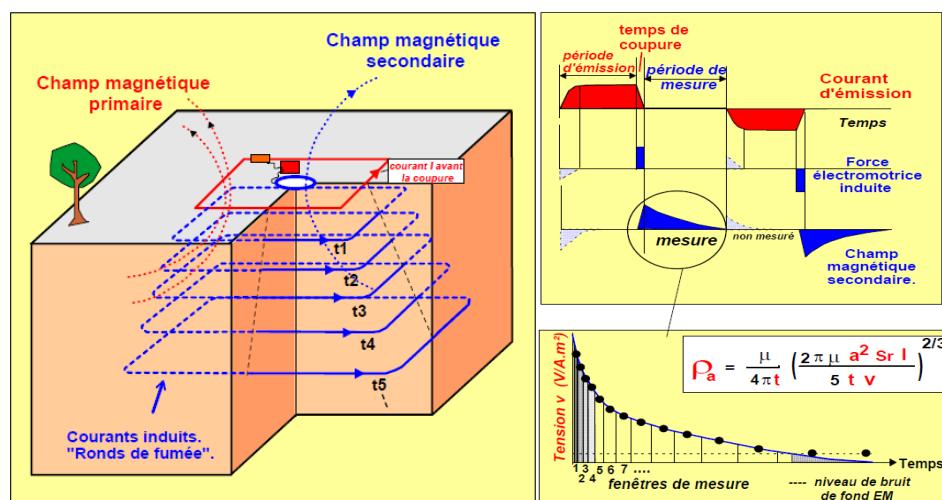


Figure 16 : Méthode TDEM, Schéma de la diffusion des boucles de courant dans le sol après la coupure (Source: Rapport TDEM Niger, Descloires et al., IRD-BRGM Iris instrument, 2007)

II.2.2. SONDAGE ELECTROMAGNETIQUE (OU SONDAGE TDEM)

Le **TDEM** (Time Domain Electromagnetism) est le terme classique utilisé dans les pays anglo-saxons. C'est une méthode de sondage EM à source contrôlée en domaine temporel.

Elle est parfois appelée **TEM** (Transient Electromagnetism), en raison de la forme décroissante de signal mesuré (« Transient » : Transitoire)

II.2.3. Dispositifs de mesure [9]

Différents dispositifs peuvent être utilisés pour organiser les boucles d'émission et de réception lors d'un sondage TDEM. Deux de ces dispositifs sont couramment utilisés :

II.2.4. Dispositif coïncident

Une seule boucle est utilisée pour l'émission et la réception du signal. Simple à mettre en place, ce dispositif permet de bénéficier d'une surface de réception importante, et donc d'amplifier le champ magnétique secondaire. Il est cependant très sensible aux effets magnétiques (Buselli, 1982).

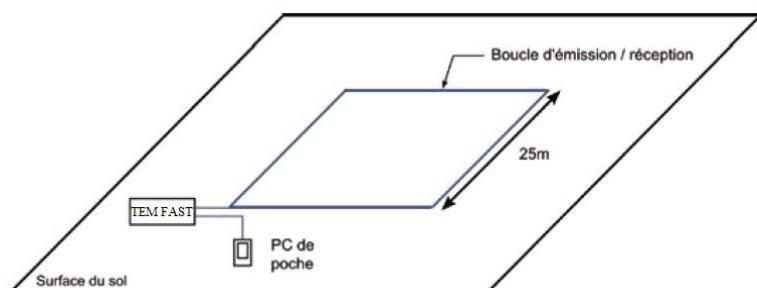


Figure 17: Illustration de boucle coïncidente

II.2.5. Dispositif central

L'émission et la réception des signaux sont assurées par deux boucles distinctes, la boucle de réception étant située au centre de la boucle d'émission. Ce dispositif, moins sensible aux effets magnétiques, permet de s'affranchir de quelques artefacts obtenus avec le dispositif coïncident.

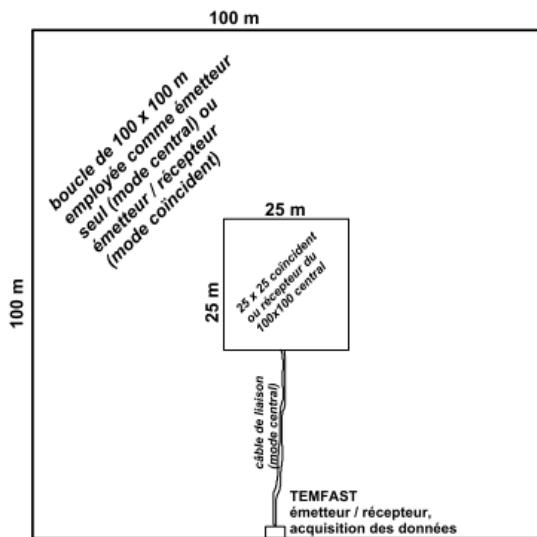


Figure 18: Illustration de Boucle central [10]

B. ACQUISITION DE DONNEES

Trois(3) techniques sont possibles avec la méthode électrique mais pour notre cas on n'a utilisé que 2 techniques dont le sondage électrique et le panneau électrique.

1. SONDAGE ELECTRIQUE

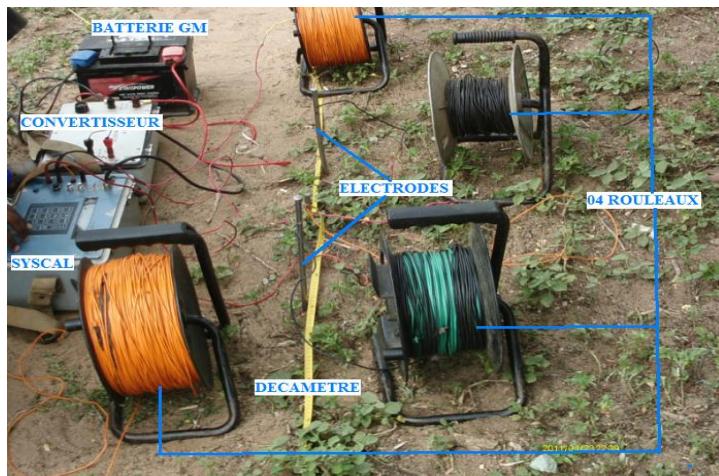


Photo 1:Le syscal et ses accessoires en pleine utilisation en sondage électrique(Source : Impétrant)

2. TECHNIQUE DU PANNEAU ELECTRIQUE

Le panneau électrique(ou tomographie électrique)est une technique de sondage en mode multi-électrodes qui sont pilotés par le RCM. Il nous permet de faire, en même temps, une investigation verticale et latérale du sous-sol.

La tomographie électrique permet d'obtenir des coupes des résistivités vraies des terrains sondés, qui sont fonctions de la géologie du site, à partir de la résistivité apparente.

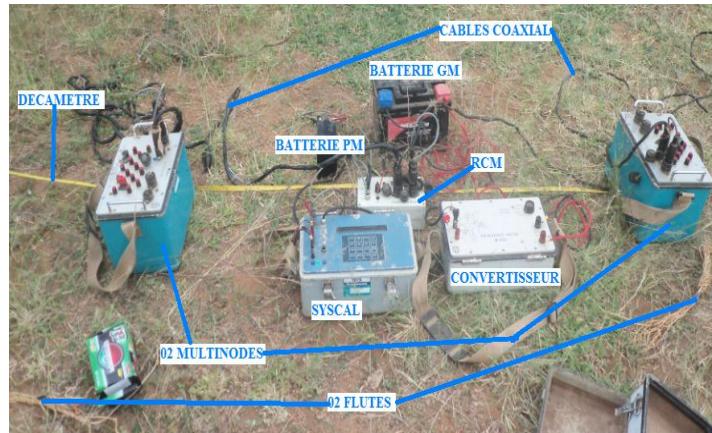


Photo 2: Syscal et ses accessoires en pleine utilisation en panneau électrique (Source : Impétrant)

3. SONDAGE TDEM

Lors de notre campagne de mesure le mois d'Avril 2016, nous avons utilisé le **TEM-FAST 48 HPC** qui est développé par Applied ElectroMagnetism Research (AEMR) avec ses accessoires (ordinateur, batterie 12V câble émettrice/réceptrice) qui est un appareil de mesure utilisé pour la méthode électromagnétique. Il est à noter que ces appareils appartiennent à l'IOGA. Un GPS est aussi utilisé pour localiser les points de mesure.



Photo 3: Le TEMFAST 48HPC et ses accessoires (Source : Impétrant)

C. TRAITEMENT DE DONNEES

1. SONDAGE ELECTRIQUE

Le traitement en sondage électrique comporte 2 phases : le traitement par abaque et le traitement avec un logiciel.

1.1. Traitement par abaque (Traitement manuel)

Dans la pratique, on utilise une échelle bilogarithmique pour représenter la courbe donnant la résistivité apparente ρ_a (en ordonnée) en fonction de $AB/2$, demi-longueur de ligne (en abscisse), 2 types d'abaques, crayon, gomme, le papier transparent (calque) sur lequel on reporte la courbe expérimentale.

Cette méthode consiste à trouver un modèle correspondant à la courbe expérimentale à l'aide de l'abaque deux terrains et l'abaque auxiliaire.

1.2. Traitement avec un logiciel

Le logiciel de traitement utilisé est le **QWSEL** qui est un logiciel léger (de l'ordre de Kilo-octet) et facile à manipuler.

Le premier pas c'est de saisir les données sur la feuille de mesure en cliquant l'option : **sondage** puis **saisie Données** et après une petite fenêtre s'affiche automatique pour passer au saisie de données de mesure (données expérimentales).Et une fois terminée la saisie des données, on valide par **OK**.

Toujours sur l'option **sondage**, on clique le **Modèle** et on voit une fenêtre qui s'affiche. Sur celle-ci, il suffit de saisir le nombre de terrains et les paramètres caractéristiques de chaque terrain qui sont déjà calculés par le traitement par abaque. Et on termine toujours par OK pour valider.

Après tout cela, on voit simultanément la courbe du modèle et les valeurs expérimentales qui s'affichent sur une petite fenêtre en format de papier bilogarithmique. On a vu aussi l'écart entre le modèle et les valeurs mesurées (valeurs expérimentales) ainsi que les paramètres qui caractérise le modèle de terrain étudié (résistivité et épaisseur).Le reste à faire, c'est de lisser la courbe (manipuler les valeurs, c'est-à-dire rendre proches le plus possible les valeurs du modèle et les valeurs expérimentales afin de diminuer l'écart entre les deux jusqu'en dessous de 5% qui est l'erreur maximale tolérable. Quand cette marge d'erreur est atteinte, on peut arrêter l'inversion. Et cette étape termine le traitement de données en sondage électrique.

1.3.Panneau électrique

Après l'acquisition de données en technique du panneau électrique, les données sont stockées en mémoire dans le SYSCAL. On extrait ces données avec le logiciel PROSYS. Quand l'extraction est terminée, on peut, tout d'abord, supprimer les valeurs aberrantes (résistivité négative ou chargeabilité négatives). Notons que les données stockées après l'extraction est un fichier sous l'extension **.bin** .

Après la suppression des valeurs inutiles, on exporte et enregistre le fichier avec l'extension **.dat**. Ce fichier **.dat** qu'on va inverser avec un autre logiciel de traitement qui est le RES2DINV.

Le logiciel RES2DINV est un programme développé par H. LOKE en 1997 pour inverser automatiquement les données expérimentales en modèle deux dimensions ou 2D ou même en 3D appelé « pseudo-section ». Mais dans notre cas, nous effectuons l'inversion en 2D.

La méthode d'inversion utilisée par le programme est basée sur la méthode des moindres carrés, utilisant la méthode des différences finies pour le calcul de la résistivité. Il commence par découper le profil en plusieurs blocs dont la taille augmente avec la profondeur, à cause de la perte de résolution de la méthode électrique (10% à 25%).

A l'intérieur de chacun de ces blocs, RES2DINV attribue une valeur de ρ_a calculée à partir des points de mesure. Il calcule ensuite, à l'aide d'une matrice de dérivées partielles des résistivités appelée matrice Jacobienne, la valeur de résistivité vraie de chaque bloc. Pour cette opération les premières valeurs introduites dans cette matrice sont les valeurs apparentes qui donnent un premier modèle approximatif (pseudo-section) de ρ_a mesurées. A partir de ce modèle, RES2DINV injecte un courant fictif et recalcule les valeurs apparentes (pseudo-section de ρ_a calculées). En comparant les 2 pseudo-sections, RES2DINV corrige la matrice et recalcule un modèle plus précis (coupe géoélectrique de ρ_a mais non plus pseudo-section).

Le logiciel essaie donc, à l'aide d'une méthode itérative, de réduire la différence entre les valeurs calculées et mesurées de ρ_a en ajustant la résistivité vraie de chaque bloc. Une mesure de cette différence est donnée par l'écart quadratique moyen ou le RMSE (Root Mean Squared Error).

En général, le modèle le plus fiable est celui qui correspond à l'itération où le RMSE ne change plus de manière significative, ce qui arrive habituellement après 4 ou 5 itérations. Pour le RES2DINV, voici l'algorithme qui traduit tous les processus d'inversion.(Notes de cours très succinct,2015)

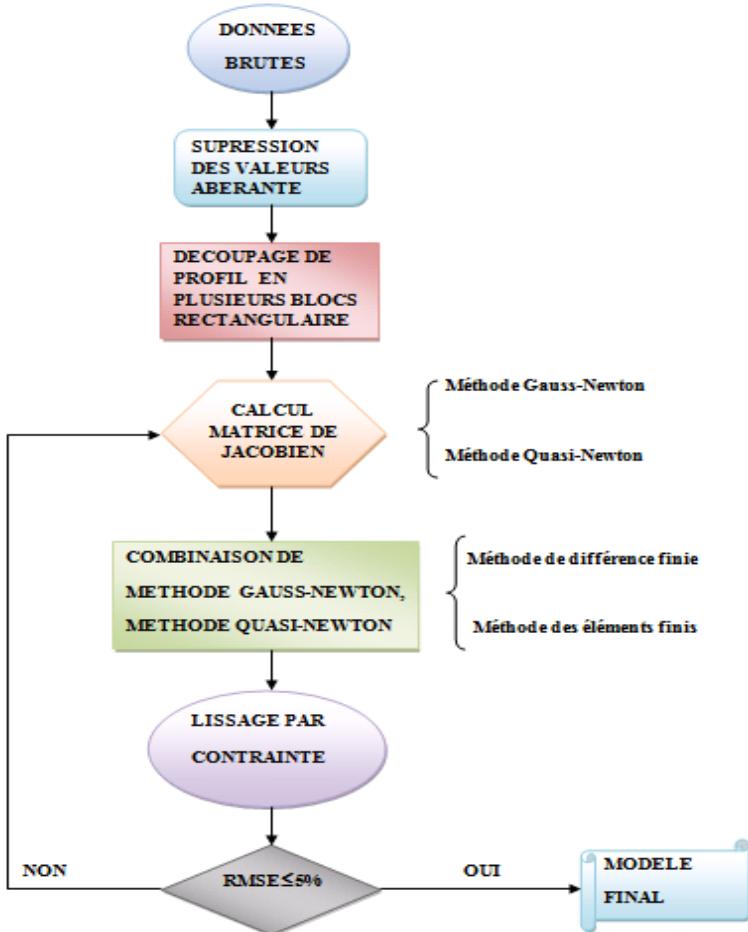


Figure 19: Organigramme de processus de l'inversion des données avec RES2DINV
(source: Impétrant)

2. SONDAGE TDEM

Les données enregistrées dans le TEM-FAST seront traitées à l'aide du logiciel TEM-RES. Ce logiciel effectue les calculs directs des réponses TEM pour des sections de couches suivant la méthode d'Anderson(1979) et le principe d'approximation proposée par Stoyer(1990).

Ensuite, il permet de faire une inversion des données selon la méthode des moindres carrés en utilisant l'algorithme de calcul de « Ridge regression » décrite par Inman(1975). Les résultats obtenus, qui vont servir à l'interprétation, sont des courbes de sondage TEM, de la résistivité en fonction de la profondeur.[12]

On rappelle que les données acquises en sondage TDEM sont des fichiers sous l'extension **.tem**. Avant de les traiter, il faut convertir ces données avec le logiciel **TEM CONVERTER**. Après la conversion, on peut ouvrir les données converties en utilisant le logiciel **TEMRES** avec la clé nommée **clé TEMFAST**. Notons que, sans cette clé, le traitement est impossible même si on a le logiciel **TEMRES**.

CHAPITRE III

INTERPRETATION ET RESULTATS

17 sur 40 Fokontany constituant la Commune Rurale Itampolo ont été visités et étudiés pendant la descente sur terrain (phase 2) dans la réalisation de l'étude de faisabilité de puits ou de forages pour le projet « accès à l'eau potable du Plateau Mahafaly ». La répartition de ces fokontany est représentée par la figure ci-dessous.

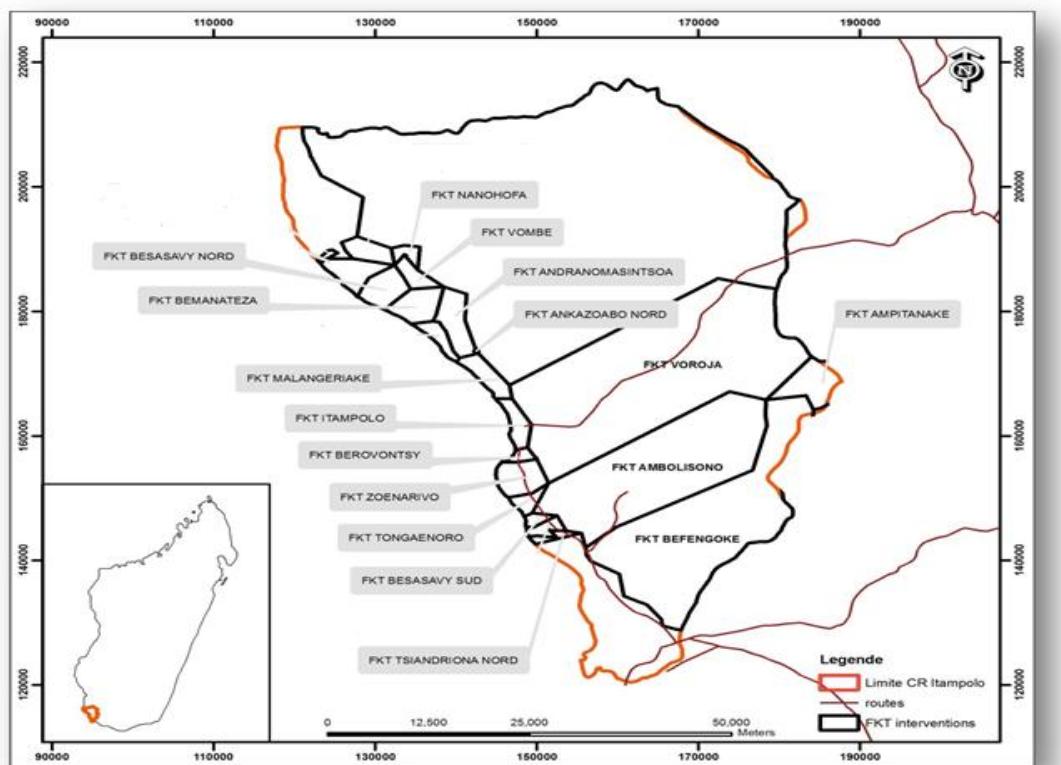


Figure 20: Répartition des 17 Fokontany dans la Commune Rurale d'Itampolo (source: FTM, BD500)

➤ FOKONTANY AMPITANAKA

La couverture végétale est constituée par des végétaux caducifoliés et de plantes épineuses qui dominent largement la surface. A cause de la déficience hydrique et la position du village par rapport à la topographie, les zones de cultures vivrières tels que les champs de maïs, de patate douce se font rares, seules les quelques surfaces dans les zones de basse altitude sont occupées par ces cultures vivrières. La géologie de ce site est caractérisée par des calcaires d'âge éocène recouvert par des sables alluvionnaires de la rivière Linta.

Un sondage électrique a été réalisé dans ce fokontany. Le sondage a été implanté au point de coordonnées (24°35'13.1"S, 44°20'06.3"E). Le plan de masse est représenté par la figure suivante.



Figure 21 : Plan de masse du site à Ampitanaka (Source : Google earth)

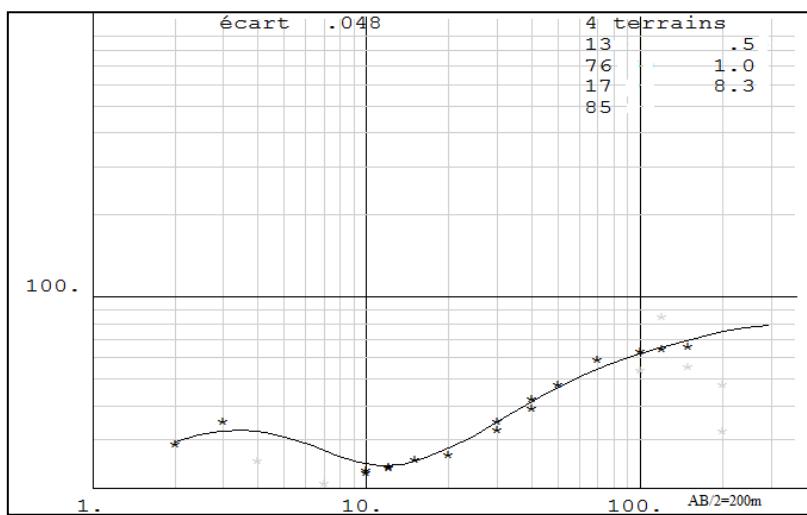


Figure 22: Courbe de sondage SE1 à Ampitanaka

La courbe de sondage présente 4 couches dont :

- la première couche conductrice, de résistivité $13\Omega\text{m}$, avec une épaisseur de 0.5m, pourrait être associée à des dunes moyennement humides.
- la deuxième couche moyennement résistante, de résistivité $76\Omega\text{m}$, d'épaisseur 1m, correspondrait à la formation de grès.
- la troisième couche conductrice, avec la résistivité $17\Omega\text{m}$ et d'épaisseur 8m, correspondrait à l'aquifère grès argileux.
- la quatrième couche moyennement résistante, de résistivité $85\Omega\text{m}$, probablement calcaire humidifié constitue le substratum.

➤ FOKONTANY VOROJA

La couverture végétale de cette zone est constituée essentiellement par des plantes épineuses et de quelques tamariniers épars. Due à l'insuffisance en eau dans cette localité, les zones de cultures vivrières souvent dans les zones de basse altitude se font rares. L'infrastructure en eau inventoriée dans ce fokontany est un impluvium.

Dans ce fokontany, on a effectué 2 panneaux électriques, un SE et 3 STDEM, tous auprès de l'impluvium.

Le but est de déterminer les paramètres physiques (résistivité) et géométrique (profondeur, épaisseur, extension) de l'aquifère à chercher, à partir de l'interprétation conjointe des courbes de sondage et des coupes géoélectriques obtenues.

Le sondage électrique permet de connaître la variation verticale de la résistivité du sous-sol, à faibles profondeurs tandis que le STDEM plus souvent utilisé dans les terrains conducteurs—et sert à déterminer la distribution des résistivités du sous-sol à des profondeurs plus importantes.

Les 2 profils des panneaux effectués à Voroja sont sécants au point de coordonnées ($24^{\circ}29'15.4''$; $44^{\circ}13'40.5''$). Le premier panneau électrique est orienté dans la direction NW-SW avec une distance inter-electrodes de 10m dont les résultats sont établis ci-dessous.

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

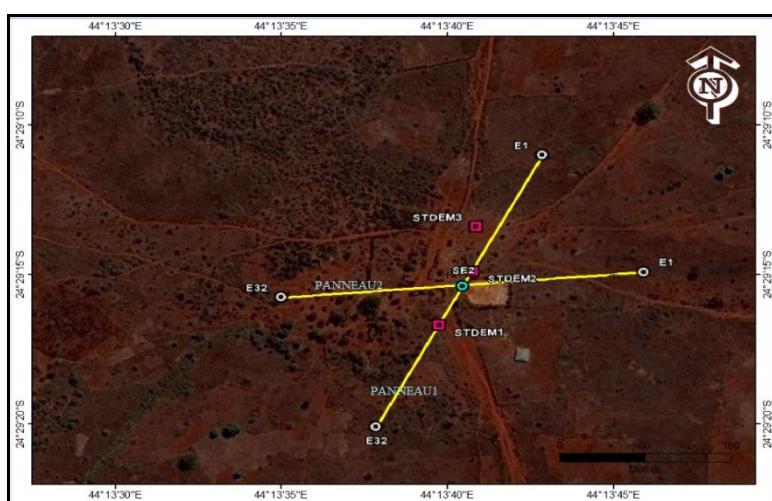


Figure 23 : Plan de masse du site à Voroja (Source : Google earth)

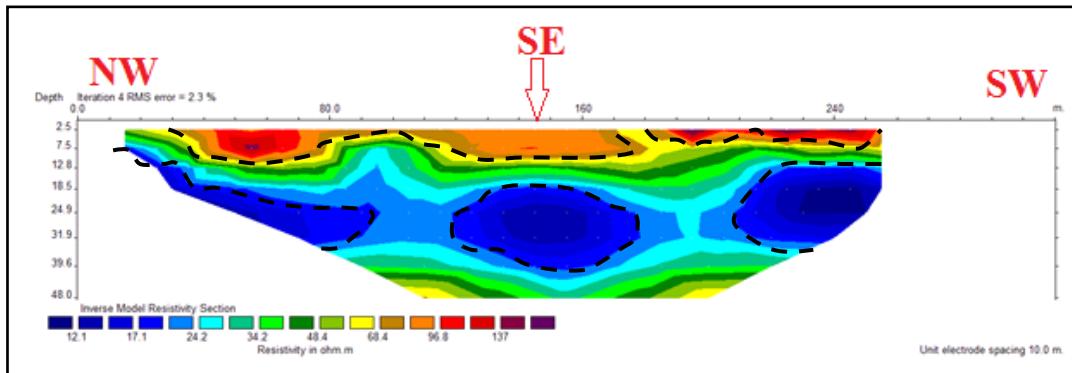


Figure 24: Coupe géoélectrique obtenue à partir du PANNEAU1

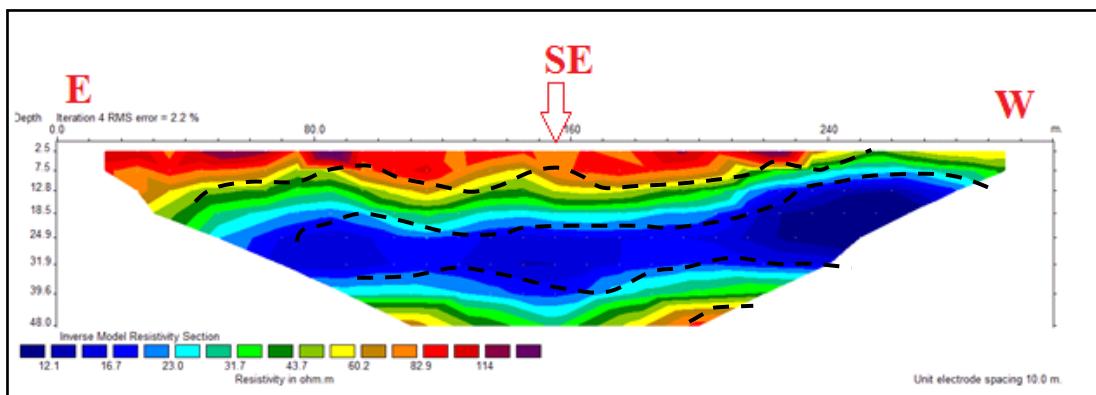


Figure 25: Coupe géoélectrique obtenue à partir du PANNEAU2

Ces 2 coupes géoélectriques montrent chacune trois formations dont la gamme de résistivités va de 8.6 jusqu'à 110Ωm environ.

- ❖ la première formation représentée par les couleurs Marron-Orange-Rouge et Violet est une formation résistante qui a pour gamme de résistivité environ entre 60 Ωm à 150Ωm. Elle couvre presque toute la partie superficielle de la coupe avec une épaisseur moyenne de 12m environ, mais elle apparaît aussi au fond de celle-ci. Compte tenu de la géologie de la région, il s'agirait d'une marne à huîtres.
- ❖ la deuxième formation est représentée par les couleurs Bleu-ciel- vert et Jaune. C'est une formation moyennement résistante. Elle se situe dans la gamme de résistivités 20Ωm à 60Ωm environ. Elle se trouve en profondeur 12m jusqu'à 36m environ (juste en-dessous de la formation résistante précédente) et occupe le long transversale de la coupe avec son épaisseur moyen de 26m environ. Elle correspondrait géologiquement à un aquifère de grès calcaire.
- ❖ la troisième formation est représentée par la couleur Bleu foncé. C'est une formation conductrice. Elle a une gamme de résistivité comprise entre 12Ωm et 20Ωm. Cette formation se trouve à une profondeur de 25m environ (qui occupe la

partie centrale de la formation moyennement conductrice). Compte tenu de la géologie d'Itampolo, il s'agirait probablement d'un calcaire argileux.

Le SE2 de longueur de ligne 1000m avec un dispositif Schlumberger a été réalisé au point de coordonnées (24°29'15.4 ''S ; 44°13'40.5''E). Puisque, notre site se trouve dans la zone karstique, alors on veut sonder les veines d'eau plus profondes en dessous de ce Karst. C'est pour cela qu'on a choisi la longueur de ligne assez grande.

La direction de la ligne de sondage coïncide avec celle du premier panneau, dont la courbe de sondage obtenue est représentée par la figure 26.

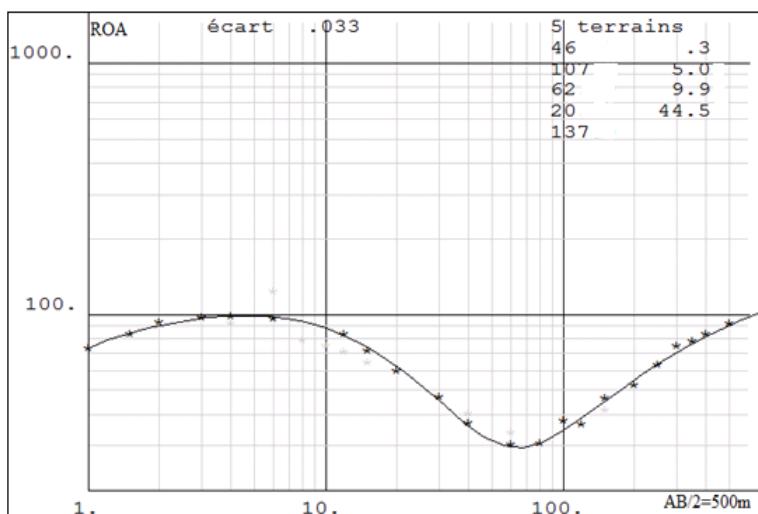


Figure 26 : Courbe de Sondage obtenue à Voroja

La courbe obtenue à Voroja est cohérente avec le résultat obtenu avec la technique du panneau électrique dans cette zone. Cette courbe SE présente 5 formations :

- la première, moyennement résistante, d'épaisseur très mince, superficielle, de résistivité 46Ωm, correspondrait à l'altérite observée sur terrain.
- la seconde, résistante, de résistivité 107Ωm, d'épaisseur 5m, peut correspondre à de la marne à huître.
- la troisième, moyennement résistante, de résistivité 62Ωm, d'épaisseur environ 10m, pourrait être un calcaire argileux.
- la quatrième, conductrice, de résistivité 20Ωm, ayant une épaisseur de 44m environ, correspondrait à un aquifère de grès calcaire.
- la cinquième, très résistante, de résistivité 137 Ωm, constitue la base de ces 4 formations précédentes et joue le rôle de substratum.

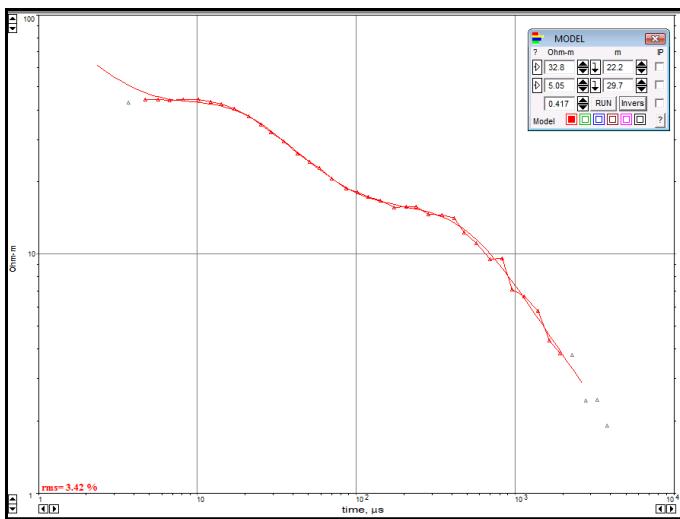


Figure 27 : Courbe STDEM1 obtenue à Voroja

Cette courbe STDEM1 nous montre 3 successions de couches dont la deuxième conductrice de résistivité 5 Ωm, d'épaisseur 29m correspondrait à un aquifère de grès calcaire. Le toit de cet aquifère se trouve à 22m.

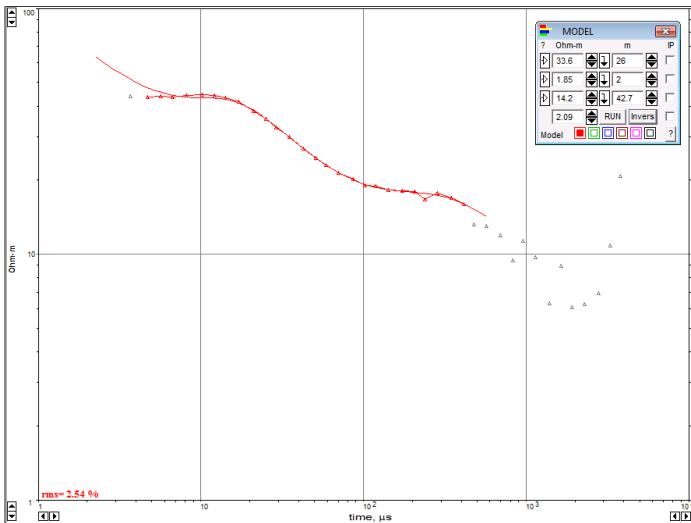


Figure 28 : Courbe STDEM2 obtenue à Voroja

La courbe STDEM2 présente 4 couches successives dont la première moyennement résistante, de résistivité 33Ωm avec une épaisseur de 29m, suivi d'une couche mince très conductrice de résistivité 2 Ωm et d'épaisseur 2m. La troisième couche conductrice de résistivité 14Ωm ayant une épaisseur de 43m environ, pourrait être un aquifère de grès calcaire. Et la dernière couche conductrice constitue le substratum. Le toit de cet aquifère se trouve à 28m.

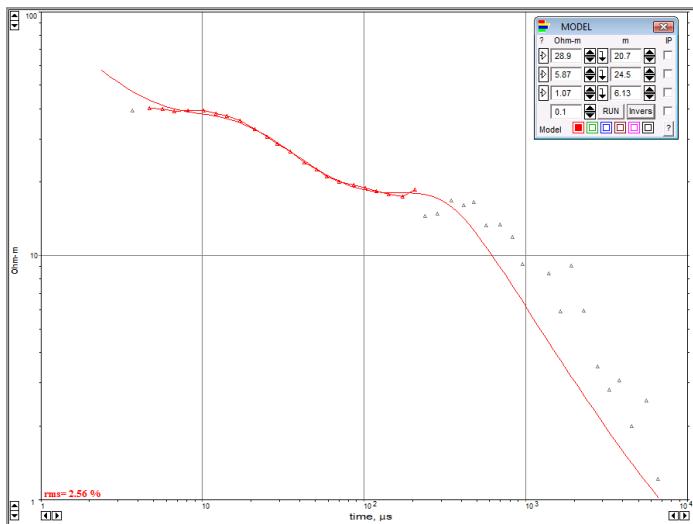


Figure 29 : Courbe STDEM3 obtenue à Voroja

Cette courbe STDEM3 met en évidence 4 couches successives. La deuxième couche, conductrice, de résistivité $6\Omega\text{m}$, d'épaisseur de 25m environ, pourrait être un aquifère de grès calcaire. Le toit de cet aquifère se trouve à 21m.

L'interprétation conjointe de la coupe géoélectrique, de la courbe de sondage électrique et les 3 courbes STDEM affirment l'existence de nappe exploitable à Voroja, à la profondeur de 57m, avec une épaisseur de 42m. Donc l'interprétation combinée de ces 3 techniques de sondage a contribué à l'obtention de plus de précision sur le résultat.

➤ FOKONTANY NANOHOFA

Ce fokontany possède 3 points d'eau répartis en deux localités. Seuls deux puits servent aux habitants et aux bestiaux à fournir tous les besoins en eau durant toute l'année. Le site est caractérisé par des sols sableux bruns très perméables sur des grès calcaires ou de calcaires plus ou moins puissants. Il est habituellement couvert de quelques formations végétales épineuses, utilisées comme prairie permanente. Des zones de cultures vivrières (manioc, patate douce, etc.) généralement dans les petits bas-fonds sont entourées par des clôtures vives en cactus.

Deux sondages TDEM ont été effectués dans ce fokontanyNanohofa. Leurs coordonnées respectives sont (24°23'28.0"S, 43°48'47.5"E) et (24°23'22.6"S, 43°48'41.2"E).

Le plan de masse est présenté par la figure suivante.

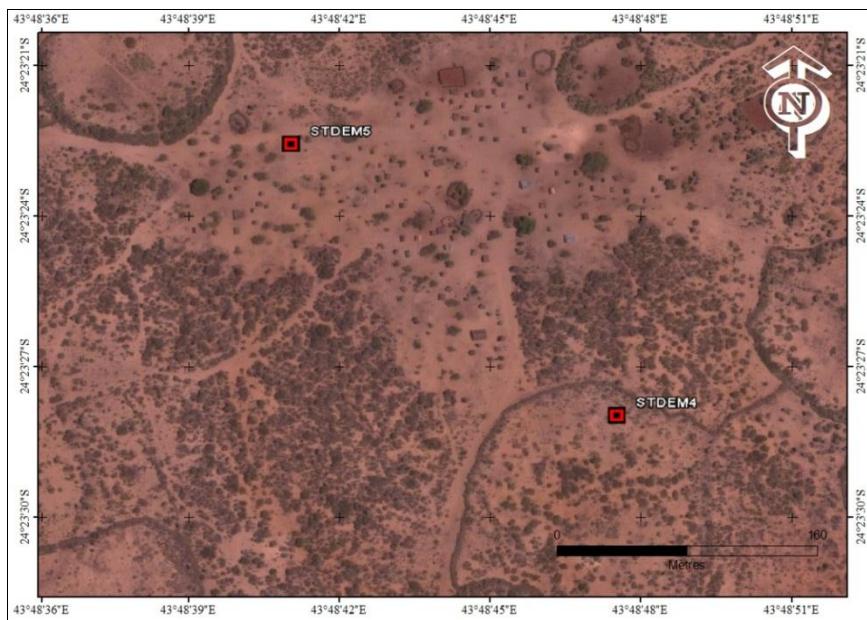


Figure 30 : Plan de masse du site à Nanohofa (Source : Google earth)

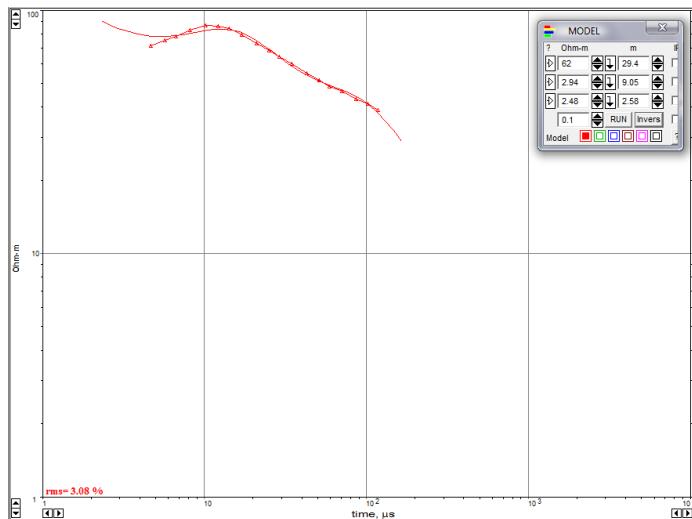


Figure 31: Courbe STDEM4 obtenue dans le Fokontany Nanohofa

La courbe STDEM montre une succession de 4 couches. La deuxième et la troisième couche conductrice, correspondraient à un aquifère de calcaire argileux. Le toit de cet aquifère se trouve à 30 m.

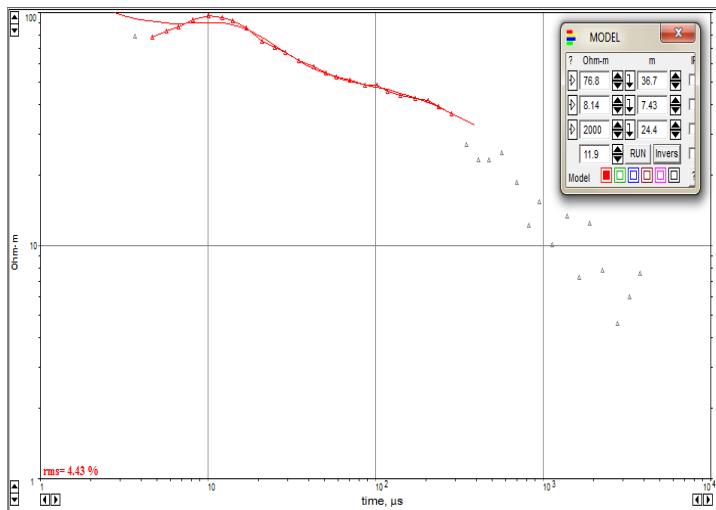


Figure 32: Courbe STDEM5 obtenue au fokontany Nanohofa

La courbe STDEM montre une succession de 4 couches. La deuxième couche conductrice, de résistivité $8\Omega\text{m}$ et d'épaisseur 7m, correspondrait à un aquifère calcaire sableux. La troisième couche résistante, de résistivité $2000\Omega\text{m}$ et d'épaisseur 24 m, correspondrait à des grès calcaires. Le toit de cet aquifère se trouve à 38 m environ. En dessous de cet aquifère se trouve une couche conductrice qui constitue le substratum.

➤ FOKONTANY VOHOMBE

Vohombe est caractérisé par l'existence de trois localités qui sont séparées par deux monticules allongées dont ses versants à l'Ouest et à l'Est sont occupés par la zone d'habitation et les bas-fonds sous forme de dépression accueillent les points d'eau.

Deux STDEM ont été effectués dans ce Fokontany Vohombe. dont l'un est localisé aux coordonnées $24^{\circ}24'50.2''\text{S}$, $43^{\circ}48'32.0''\text{E}$ et l'autre repéré par les coordonnées $(24^{\circ}24'50.1''\text{S}, 43^{\circ}48'32.3''\text{E})$. Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

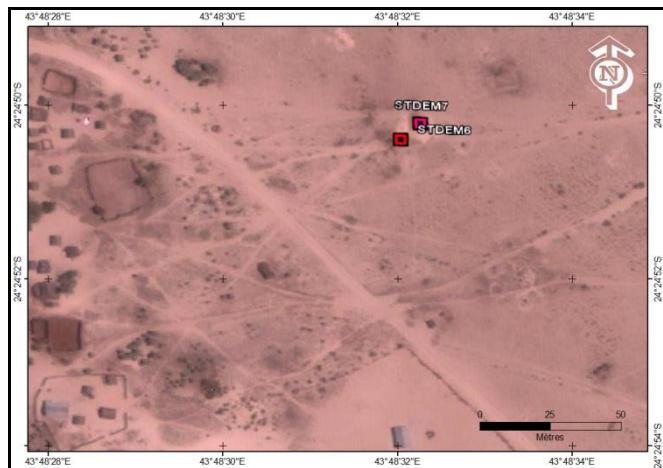


Figure 33 : Plan de masse du site à Vohombe (Source :Google earth)

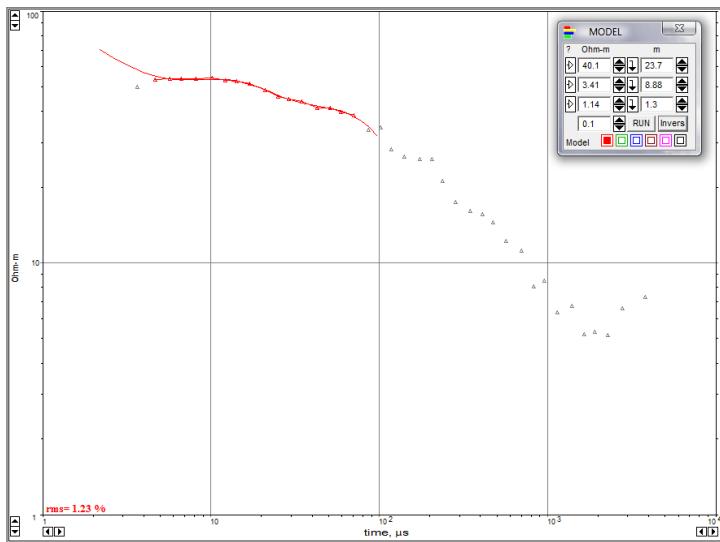


Figure 34: Courbe STDEM6 obtenue dans le Fokontany Vohombe

La courbe de sondage TDEM montre 4 couches successives. La deuxième couche conductrice, de résistivité $3\Omega\text{m}$, d'épaisseur 9m environ, correspondrait à un aquifère de calcaire argileux. Son toit se trouve à 23 m environ.

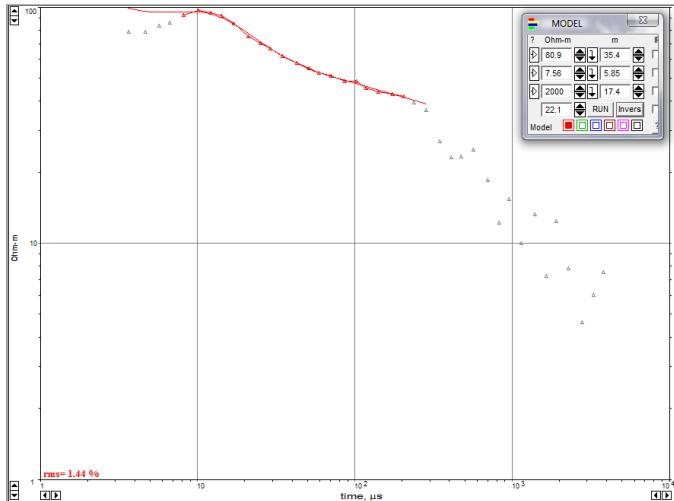


Figure 35: Courbe STDEM7 obtenue à Vohombe

La courbe de sondage TDEM montre 4 couches successives. La deuxième couche conductrice, de résistivité $7\Omega\text{m}$, d'épaisseur 6 m environ, correspondrait à un aquifère calcaire argileux. Son toit se trouve à 35 m.

➤ FOKONTANY BESASAVY NORD

La zone forme un petit bassin topographique et des versants de raccordement à pente faible à l'Ouest et au Nord. Ces versants s'inclinent doucement vers le Nord. Ce fokontany n'a pas de réseau hydrographique de surface permanent. Habituellement comme ailleurs sur la bande littorale, ce sont les sables qui couvrent toutes les surfaces dans la zone. Des aires d'exploitation agricole se rencontrent dans les bas fond des petits bassins.

Deux sondages TDEM ont été effectués dans ce Fokontany Besasavy Nord dont l'un est localisé aux coordonnées (24°27'06.3"S, 43°47'46.4"E) et l'autre aux coordonnées (24°27'09.4"S, 43°47'46.2"E). Le plan de masse est représenté par la figure suivante.



Figure 36 : Plan de masse du site à Besasavy-Nord (Source : Google earth)

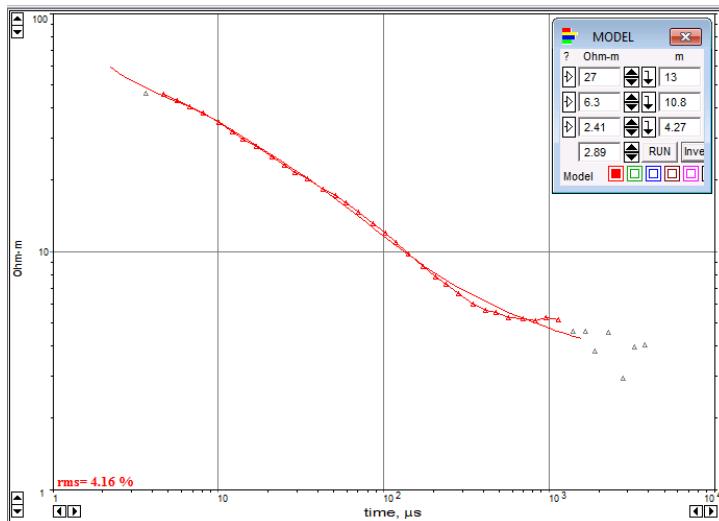


Figure 37: Courbe STDEM8 obtenue à Besasavy_Nord

La courbe STDEM8 montre 4 couches successives. La deuxième couche conductrice, de résistivité $6\Omega\text{m}$ et d'épaisseur environ 10 m, correspondrait à un aquifère calcaire sableux.

Le toit de cet aquifère se trouve à 13m. Une couche très conductrice, probablement du calcaire argileux, constitue le substratum.

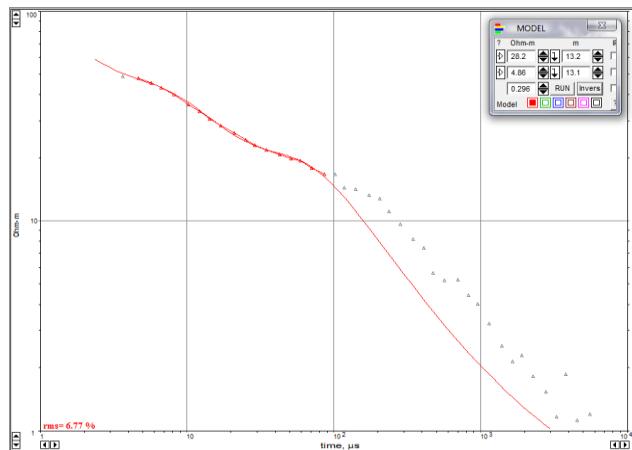


Figure 38: Courbe STDEM9 obtenue à Besavavy_Nord

La courbe STDEM9 montre 3 couches successives. La deuxième couche conductrice, de résistivité $5\Omega\text{m}$ et d'épaisseur 13 m, correspondrait à un aquifère de calcaire. Le toit de cet aquifère se trouve à 13m en-dessus. Une couche très conductrice probablement du calcaire argileux constitue le substratum.

➤ FOKONTANY BEMANATEZA

Ce Fokontany possède des points d'eau au nombre de 10 répartis en quatre localités. Comme tous les autres Fokontany, ces puits servent à la fois aux habitants et aux bestiaux de fournir tous les besoins en eau durant toute l'année. Le site est caractérisé entièrement par des sols sableux très perméables sur des grès calcaires ou calcaire gréseux et calcaire et sur des dunes formant des monticules allongés à l'Ouest du village. Il est habituellement couvert de quelques formations végétales épineuses, utilisées comme prairie permanente.

Un sondage TDEM10 a été effectué dans ce Fokontany Bemanateza. Ses coordonnées sont ($24^{\circ}28'31.45''\text{S}$, $43^{\circ}50'23.8''\text{E}$).

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

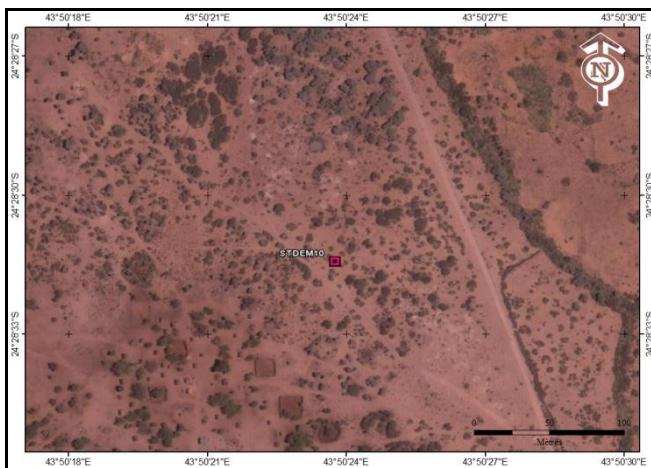


Figure 39 :Plan de masse du site à Bemanateza (Source : Google earth)

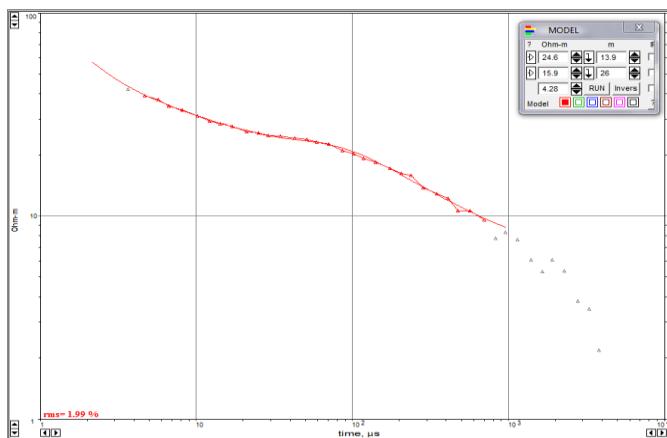


Figure 40: Courbe STDEM10 obtenue à Bemanateza

La courbe de sondage TDEM montre 3 couches successives. La deuxième couche conductrice, de résistivité $16\Omega\text{m}$ et d'épaisseur 26 m, correspondrait à un aquifère de calcaire sableux. Son toit se trouve à 13 m.

➤ FOKONTANY ANDRANOMASINTSOA

Le Fokontany d'Andranomasintsoa n'a pas de réseau hydrographique de surface permanent. Malgré cela, il est caractérisé par un bas fond à l'Est qu'il partage avec le Fokontany Ankazoabo. La couverture végétale est similaire à celle rencontrée dans les autres Fokontany qui sont constituées essentiellement par des euphorbia. Des végétaux caducifoliés s'ajoutent également aux euphorbia et aux zones de cultures vivrières telles que le manioc, la patate douce.

Un sondage TDEM a été effectué dans ce Fokontany Andranomasintsoa.

Ses coordonnées sont (24°32'23.1"S, 43°52'20.8"E).

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.



Figure 41 : Plan de masse du site à Andranomasintsoa (Source : Google earth)

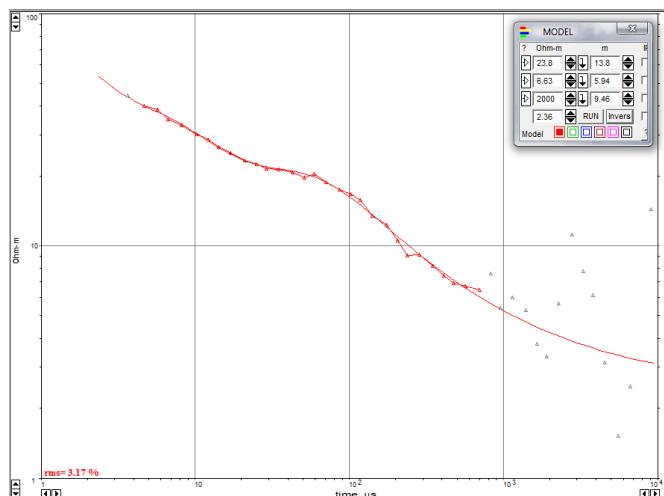


Figure 42: Courbe STDEM11 obtenue à Andranomasintsoa

La courbe de sondage TDEM montre la succession de 4 couches. La deuxième couche conductrice, de résistivité $7\Omega\text{m}$ et d'épaisseur 6m environ correspondrait à un aquifère calcaire sableux. La troisième couche très résistante, de résistivité $2000\Omega\text{m}$ a pour épaisseur à peu près 10 m. Le toit de cet aquifère se trouve à 14 m environ.

➤ FOKONTANY ANKAZOABO NORD

Le Fokontany d'Ankazoabo Nord n'a pas de réseau hydrographique de surface permanent. La couverture végétale est constituée essentiellement par des euphorbia mais les végétaux caducifoliées occupent largement la surface avec les zones de cultures vivrières tels que les champs de manioc, de patate douce qui se trouvent surtout dans les zones de basse altitude.

Un sondage électrique a été effectué dans ce Fokontany au point de coordonnées ($24^{\circ}32'36.4"S$, $43^{\circ}53'51.0"E$).

Le plan de masse est représenté par la figure suivante

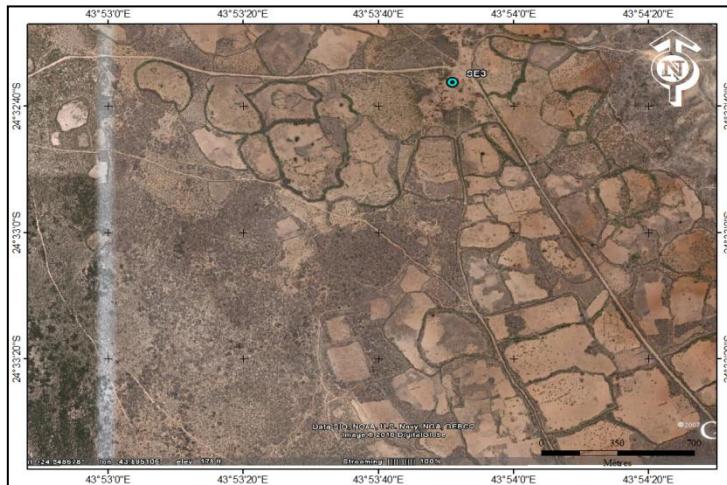


Figure 43: Plan de masse à Ankazoabo-Nord

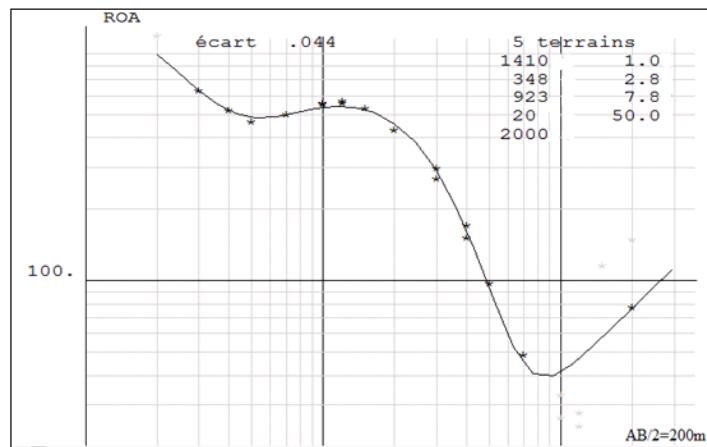


Figure 44 : Courbe de sondage SE3 à Ankazoabo

La courbe ci-dessus présente 5 couches successives dont :

-la première, très résistante, de résistivité $1410\Omega\text{m}$, d'épaisseur 1m, qui pourrait correspondre à la formation sable sec (dunes récente).

- la seconde, résistante, de résistivité $348\Omega\text{m}$, d'épaisseur environ 3m, correspond à la formation de dunes moyennes.

-la troisième, plus résistante que celle de précédemment, de résistivité $923\Omega\text{m}$, avec une épaisseur de 8m environ, correspond à une formation de grès.

-la quatrième, conductrice, de résistivité égale à $20\Omega\text{m}$, avec une épaisseur environ 50m pourrait être un aquifère calcaire sableux.

Et la dernière couche très résistante, de résistivité $2000\Omega\text{m}$, pourrait être du calcaire éocène (formation dure) et joue le rôle de substratum.

➤ FOKONTANY MALANGARIAKE

Le Fokontany Malangariake n'a pas de réseau hydrographique et aucun point d'eau dans ce Fokontany. Les habitants récupèrent la résurgence des eaux souterraines venant du plateau calcaire à l'Est durant les basses eaux de mer, mais en période de marée haute, la population s'alimente de l'eau saumâtre.

Un sondage électrique et un STDEM ont été effectués dans ce Fokontany Malangariake aux points de coordonnées respectives (24°35'27.6"S, 43°55'10.5"E) et (24°35'27.69"S, 43°55'10.40"E).

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

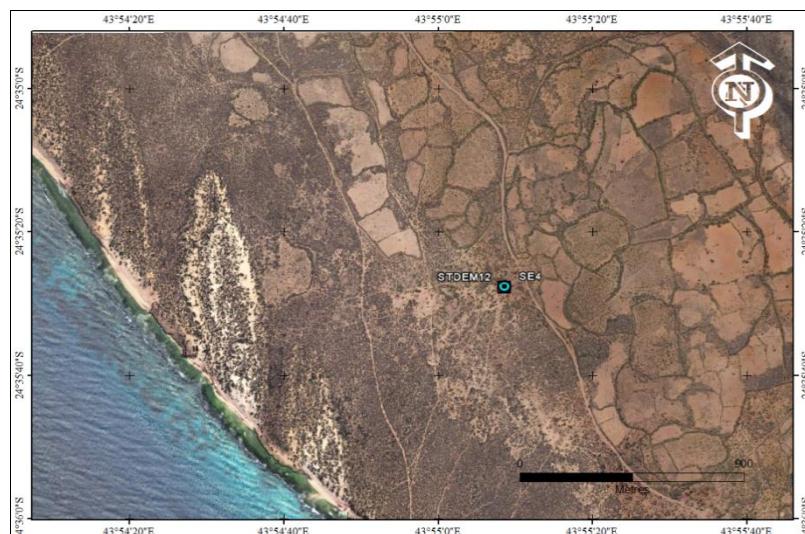


Figure 45 : Plan de masse du site à Malangariaka (Source : Google earth)

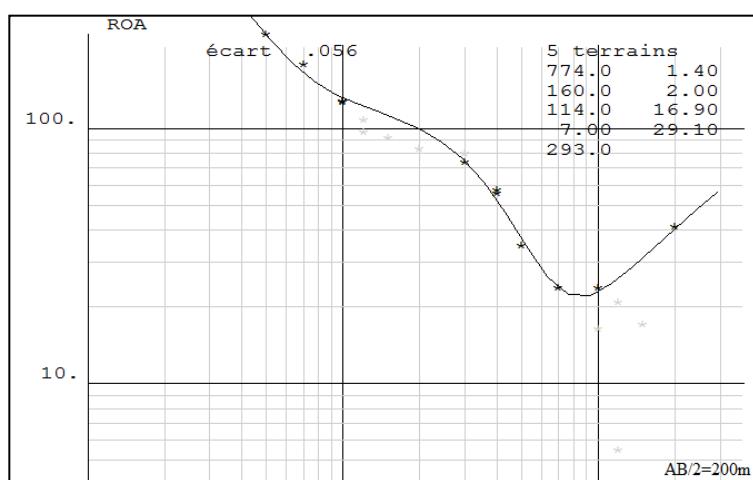


Figure 46: Courbe de sondage SE4 à Malangariaka

La courbe SE4 obtenue dans ce fokontany Malangariaka présente 5 terrains dont :

- la première couche plus résistante, de résistivité $774\Omega\text{m}$, d'épaisseur 1.40m environ, compte tenu de la géologie de ce site, correspondrait à la formation sableuse (dunes).
- la deuxième couche résistante, ayant la résistivité $160\Omega\text{m}$, d'épaisseur 2m, correspond à la formation de sable humide (dunes anciennes).
- la troisième couche moyennement résistante, de résistivité $114\Omega\text{m}$, d'épaisseur 17m environ, pourrait être du grès.
- la quatrième couche conductrice, de résistivité $7\Omega\text{m}$, d'épaisseur 29m, pourrait être un aquifère calcaire sableux saturé d'eau salée due à l'imbibition d'eau de mer.
- la cinquième couche très résistante, de résistivité $998\Omega\text{m}$, probablement un calcaire éocène, joue le rôle substratum.

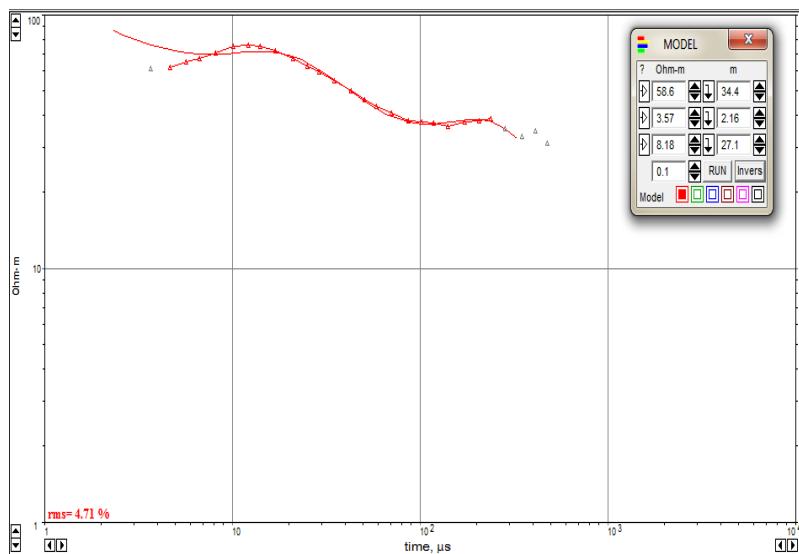


Figure 47: Courbe STDEM12 obtenue à Malangariake

La courbe STDEM12 montre 4 successions des couches dont : la première moyennement résistante de résistivité $59\Omega\text{m}$, d'épaisseur 34m environ; la deuxième couche est très conductrice de résistivité $4\Omega\text{m}$ avec une épaisseur de 2m et la troisième couche conductrice ayant une résistivité $8\Omega\text{m}$, d'épaisseur 27m. Ainsi la dernière couche très conductrice constitue le substratum. Cette courbe affirme la présence d'un aquifère qui est juste en-dessous de la formation résistante d'épaisseur estimée à 34m.

Ces 2 courbes permettent d'affirmer qu'il y aurait une nappe aquifère qui se situe juste en-dessous de 20m.

➤ FOKONTANY ITAMPOLO

L'existence de réseau hydrographique fait défaut dans le Fokontany Itampolo. La couverture végétale montre une certaine particularité par rapport à celle rencontrée dans les

autres Fokontany. Au Nord qui est constitué essentiellement par des végétaux caducifoliés dominent largement la surface mais la présence de songosongo lava-be marque cette région. De plus, les zones de cultures vivrières tels que les champs de manioc, de patate douce qui se trouvent surtout dans les zones de basse altitude occupent largement la surface et aussi l'avancée progressive du village vers une zone semi-urbanisée.

Un STDEM13 a été réalisé dans ce Fokontany Itampolo. Ce point est localisé aux coordonnées $24^{\circ}40'50.75"S$, $43^{\circ}56'42.19"E$.

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

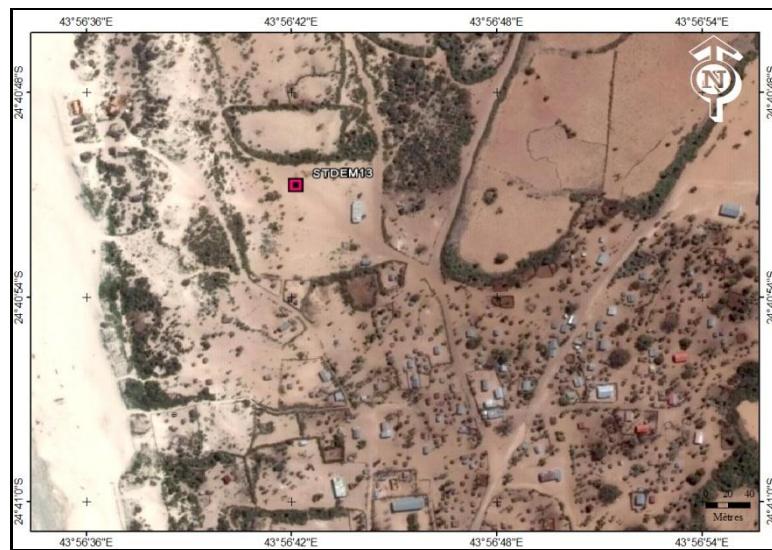


Figure 48: Plan de masse du site à Itampolo (Source : Googleearth)

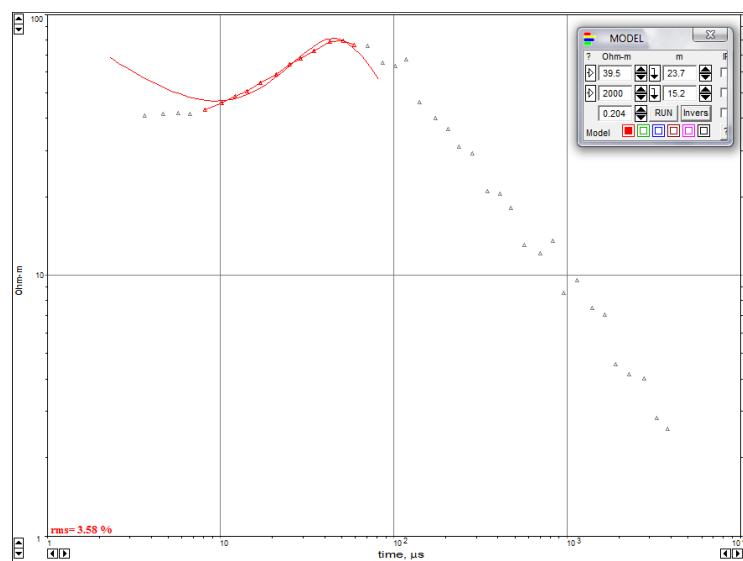


Figure 49: Courbe STDEM 13 obtenue à Itampolo

Cette courbe STDEM13 montre 3 couches successives :

- la première couche moyennement résistante, de résistivité $40\Omega\text{m}$, d'épaisseur approximative 23m, ceci pourrait être des dunes anciennes.
- la deuxième couche résistante, de résistivité $2000\Omega\text{m}$, avec une épaisseur environ 15m, correspondrait l'existence de Marne.
- la dernière couche correspondrait à une couche calcaire argileuse humidifiée par l'eau de mer. Le site est recouvert de carapace sableuse. La deuxième couche très épaisse (53 m environ), avec une résistivité de $98\Omega\text{m}$, correspondrait à des calcaires humidifiés.

➤ FOKONTANY BEROVONTSY

Le Fokontany Berovontsy n'a qu'un lac saumâtre à l'Ouest du village. Ce lac surtout rechargeé par les précipitations est tributaire de la fluctuation du niveau de la mer. La couverture végétale est similaire à celle rencontrée dans les autres Fokontany qui sont constitués essentiellement par des euphorbia et de cactus. Des végétaux caducifoliés s'ajoutent également aux euphorbia et aux zones de cultures vivrières dont le manioc, la patate douce.

Dans ce Fokontany Berovontsy, un STDEM a été réalisé au point de coordonnées $24^{\circ}41'52.8''\text{S}$, $43^{\circ}56'52.9''\text{E}$.

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.



Figure 50 : Plan de masse du site à Berovontsy (Source : Google earth)

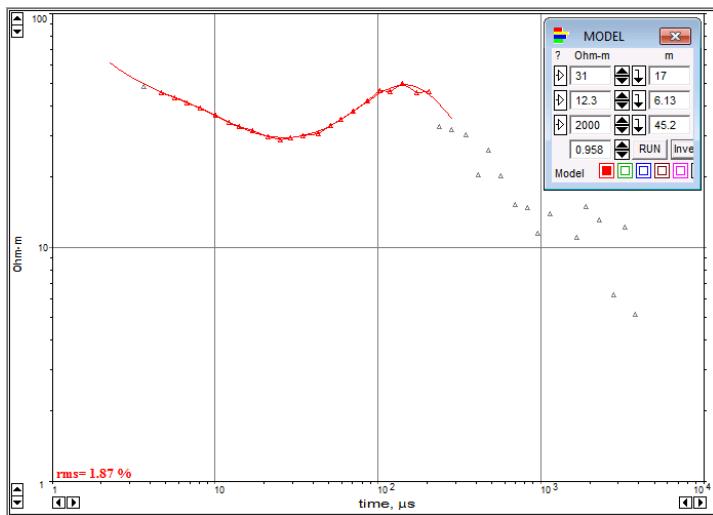


Figure 51: Courbe STDEM14 obtenue à Berovontsy

Cette courbe STDEM14 met en évidence une succession de 4 couches. La deuxième couche conductrice de résistivité $12 \Omega\text{m}$, avec une épaisseur 6m , correspondrait à un aquifère de calcaire sableux. Le toit de cet aquifère se trouve à 17m .

➤ FOKONTANY ZOENARIVO

Le Fokontany de Zoenarivo n'a pas de réseau hydrographique de surface permanent. Ce Fokontany n'a qu'un point d'eau au sein même du village. Ce point d'eau est implanté dans les sables blancs. La couverture végétale est similaire à celle rencontrée dans les autres Fokontany qui est constituée essentiellement par des euphorbia mais la densité des zones de culture est très remarquable vers le Sud, le long de la route menant vers Nisoa. Ce sont des champs de manioc, de patate douce et qui se trouvent surtout dans les zones de basse altitude.

Dans ce Fokontany Zoenarivo, deux sondages TDEM ont été réalisés. L'un est localisé aux coordonnées $(24^{\circ}44'35.88''\text{S}, 43^{\circ}57'04.74''\text{E})$ et l'autre aux coordonnées $(24^{\circ}44'31.05''\text{S}, 43^{\circ}57'03.65''\text{E})$.

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.



Figure 52 : Plan de masse du site à Zoenarivo (Source : Google earth)

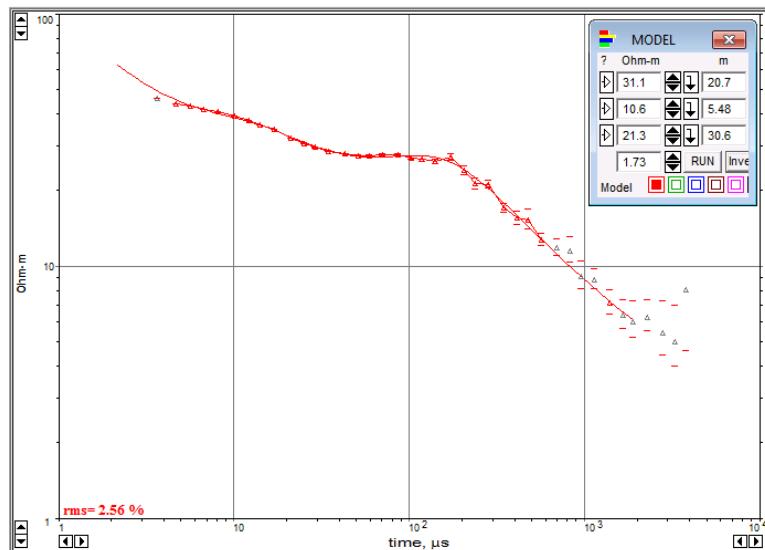


Figure 53: Courbe STDEM15 obtenue à Zoenarivo

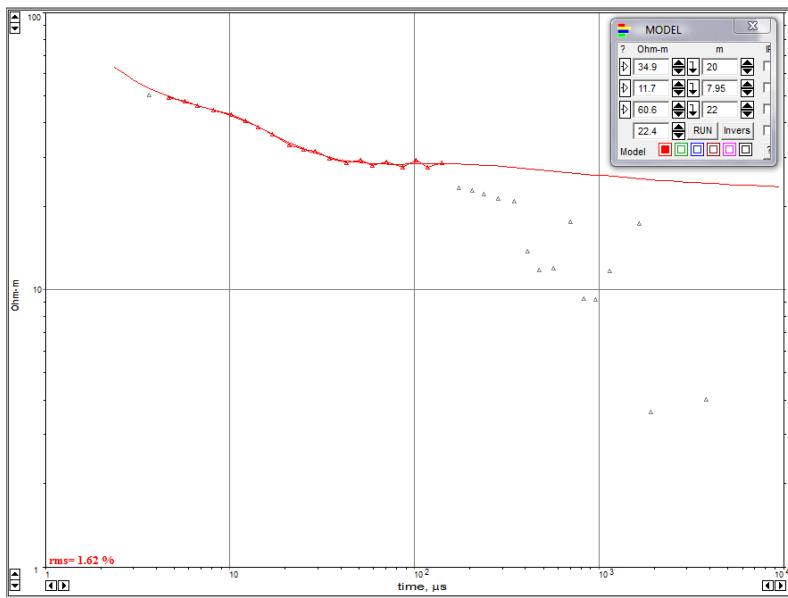


Figure 54: Courbe STDEM16 obtenue à Zoenarivo

La courbe de STDEM montre 4 couches successives. La deuxième couche conductrice, de résistivité $11\Omega\text{m}$ et d'épaisseur 8 m environ correspondrait à un aquifère de calcaire sableux. Son toit se trouve à une profondeur de 20 m environ.

➤ FOKONTANY TANGAINORO

Ce Fokontany n'a qu'un seul point d'eau servant au besoin en eau de la population et du bétail. Ce point d'eau a été implanté juste entre le contact des sables blancs et des dunes karimboliennes. Le site est caractérisé par des sols sableux très perméables sur des grès calcaires. Il est habituellement couvert de quelques formations végétales épineuses, utilisées comme prairie permanente.

Un sondage électrique et un STDEM17 ont été effectués dans ce Fokontany au point de coordonnées ($24^{\circ}45'33.9''\text{S}$, $43^{\circ}57'37.5''\text{E}$).

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.



Figure 55 :Plan de masse du site Tangainoro (Source : Google earth)

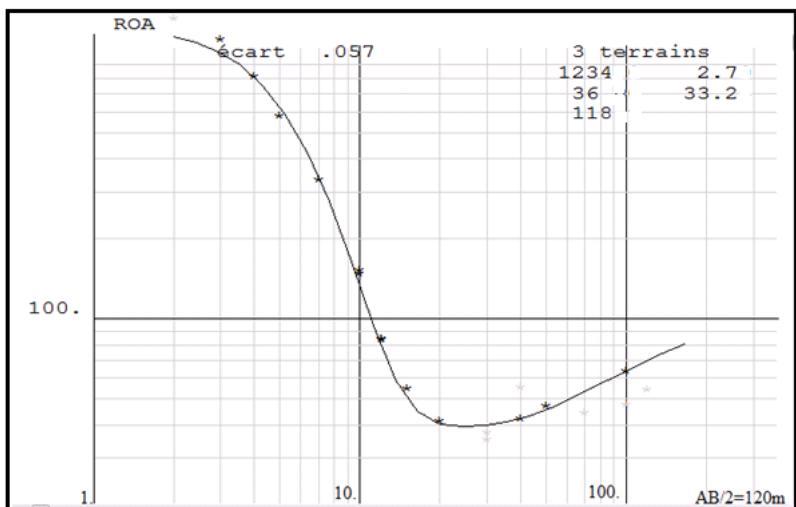


Figure 56: Courbe de sondage SE6 à Tangainoro

La courbe ci-dessous présente 3 terrains dont :

- la première couche très résistante, de résistivité $1234\Omega\text{m}$, d'épaisseur à peu près 3m, pourrait correspondre à la formation sableuse sec (dunes ou sable mouvant).
- la seconde couche moyennement résistante, de résistivité $36\Omega\text{m}$, d'épaisseur 33m environ, peut correspondre à l'aquifère calcaire sableux
- la troisième couche résistante, de résistivité $118\Omega\text{m}$, pourrait être une formation calcaire humidifiée, elle joue un rôle substratum.

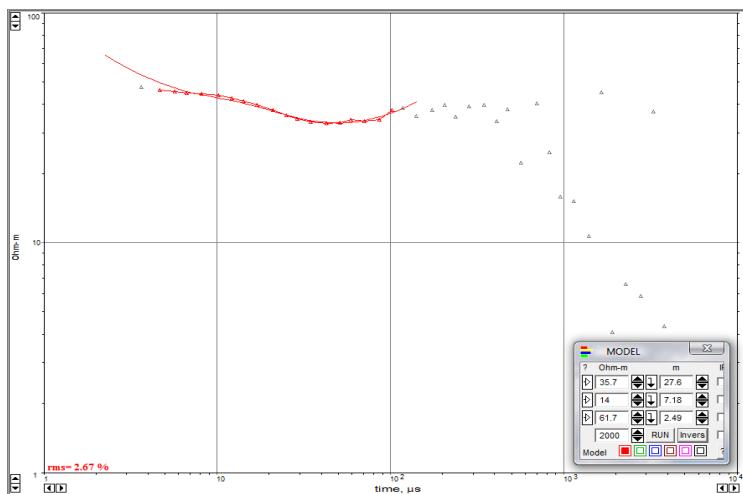


Figure 57 : Courbe STDEM17 obtenue au fokontany Tangainoro

Le STDEM17 effectué au même point que le sondage électrique SE2 confirme la succession de couches moyennement résistantes puis conductrices et enfin plus résistantes au substratum.

La courbe SE6 et la courbe STDEM17 affirment l'existence d'un aquifère situé à une trentaine de mètres avec une épaisseur de 7m.

➤ FOKONTANY BESASAVY-SUD

La couverture végétale est constituée essentiellement de végétaux caducifoliés qui dominent largement la surface. De plus, les zones de cultures vivrières telles que les champs de manioc, de patate douce se trouvent surtout dans les zones de basse altitude et occupent largement la surface.

Un STDEM a été effectué dans ce Fokontany Besasavy Sud au point de coordonnées (24°47'14.46"S, 43°57'33.95"E)

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.



Figure 58 : Plan de masse du site à Besasavy-Sud (Source : Googleearth)

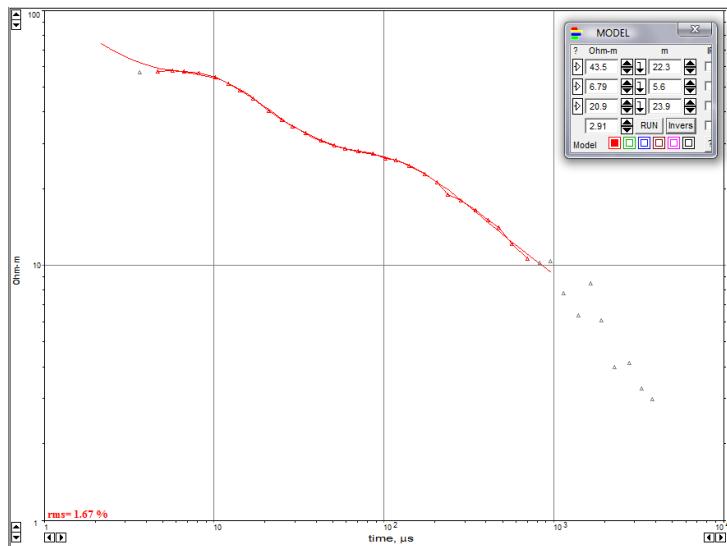


Figure 59: Courbe STDEM18 obtenue au FokontanyBesasavy_sud(STDEM1)

La courbe de sondage montre 4 couches successives. La deuxième couche conductrice, de résistivité $7\Omega\text{m}$ et d'épaisseur de 6 m environ, correspondrait à un aquifère de grès calcaires. La troisième couche, conductrice de résistivité $20\Omega\text{m}$ et d'épaisseur de 24 m environ pourrait être du calcaire humidifié. Le toit de cet aquifère se trouve à 22m environ. Les dernières couches très conductrices correspondraient à des couche argileuses, constitue le substratum.

➤ FOKONTANY TSIANDRIONA NORD

Ce Fokontany possède un seul point d'eau qui sert aux habitants et au bétail de fournir tous les besoins en eau durant toute l'année. Le site est caractérisé par des sols sableux très perméables sur des grés calcaires ou de calcaires plus ou moins puissants. Il est habituellement couvert de quelques formations végétales épineuses, utilisées comme prairie permanente.

Un sondage électrique a été réalisé dans ce Fokontany. Le point de sondage est repéré aux coordonnées $(24^{\circ}48'28.7''\text{S}, 43^{\circ}59'37.0''\text{E})$.

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

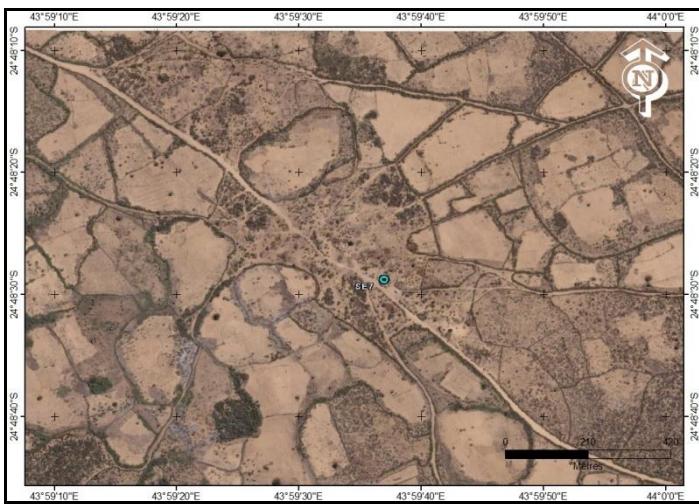


Figure 60 : Plan de masse du site à Tsiandriona-Nord



Figure 61: Courbe de sondage SE7 à Tsiandriona Nord

La courbe SE7 ci-dessus présente 4 successions de couches :

- la première couche résistante, de résistivité $560\Omega\text{m}$, d'épaisseur environ 3m, qui correspondrait à du sable sec observé sur terrain.
- la deuxième couche moyennement conductrice, de résistivité $66\Omega\text{m}$, d'épaisseur de 8m environ, correspondrait à l'alluvion (dune moyenne) selon la coupe géologique.
- la troisième couche conductrice, de résistivité $24\Omega\text{m}$, très épaisse de 34m, pourrait être un aquifère calcaire sableux.
- la dernière couche résistante, de résistivité $540\Omega\text{m}$ pourrait correspondre à la marne, qui constitue le substratum.

➤ FOKONTANTY AMBOLISOGNO

La couverture végétale est également constituée de végétaux caducifoliés qui dominent largement la surface. De plus, les zones de cultures vivrières telles que les champs de manioc, de patate douce se trouvent surtout dans les zones de basse altitude et occupent largement la surface. La géologie de ce site est caractérisée par des calcaires d'âge éocène recouverts de dunes tatsimienne.

Deux sondages électriques ont été effectués aux points de coordonnées respectives SE8 (24°47'14.6" S, 44°04'05.5" E) et SE9 (24°47'25.3"S, 44°03'49.1"E) dans ce Fokontany Ambolosogno.

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

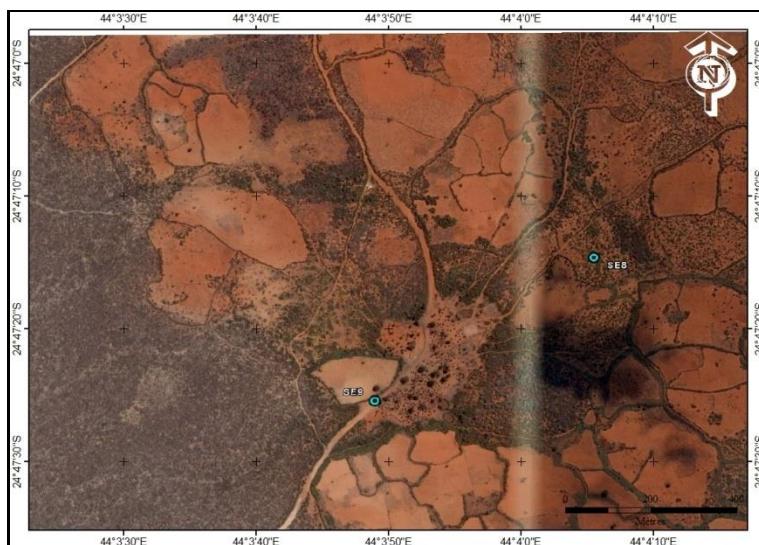


Figure 62 :Plan de masse du site à Ambolisogno

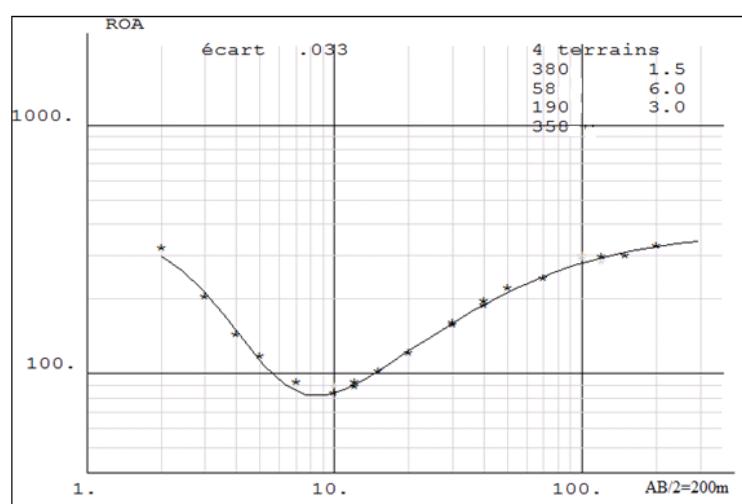


Figure 63: Courbe de sondage SE8 à Ambolisogno

La courbe obtenue dans ce Fokontany Ambolosogno présente 4 terrains successifs :

- la première couche plus résistante, de résistivité $380\Omega\text{m}$, d'épaisseur 1.50m, correspond à la formation marne à huitres.
- la seconde couche moyennement résistante, de résistivité $58\Omega\text{m}$, avec une épaisseur 6m, pourrait correspondre à un aquifère calcaire argileux.
- la troisième couche moyennement résistante, de résistivité $190\Omega\text{m}$, d'épaisseur environ 3m, pourrait être à une formation de grès.

La dernière couche plus résistante, de résistivité $358\Omega\text{m}$, qui correspond à la formation calcaire Eocène ; elle constitue le substratum.

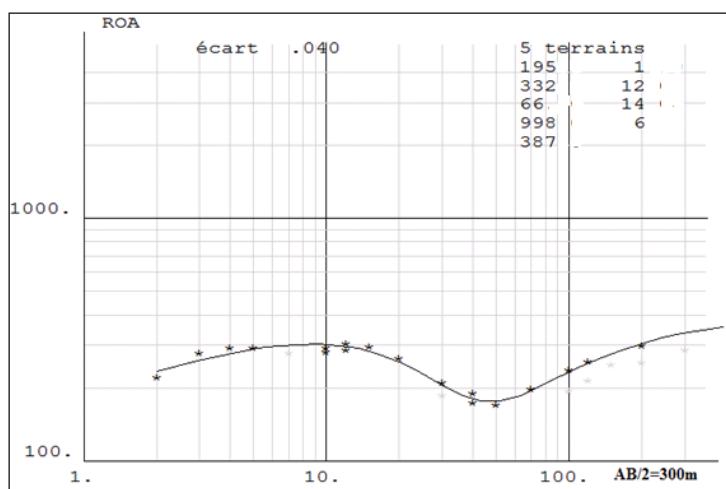


Figure 64: Courbe de sondage SE9 à Ambolisogno

La courbe SE9 obtenue dans le fokontany Ambolisogno montre 5 successions de formation :

- la première formation résistante, de résistivité $195\Omega\text{m}$, d'épaisseur 1m, qui couvre la partie superficielle, correspondrait à des dunes récentes (couverture sableuse).
- la deuxième formation plus résistante, de résistivité $332\Omega\text{m}$, d'épaisseur 12m, pourrait être de la marne à huitres.
- la troisième formation moyennement résistante, de résistivité $66\Omega\text{m}$, avec une épaisseur 14m, correspondrait à un aquifère calcaire argileux.
- la quatrième formation plus résistante, de résistivité $998\Omega\text{m}$, ayant une épaisseur de 6m, correspondrait à des marnes.
- la dernière formation résistante, de résistivité $387\Omega\text{m}$, constitue la base de la succession et joue un rôle substratum.

➤ FOKONTANY BEFENGOKA

La couverture végétale est essentiellement constituée par des végétaux caducifoliés qui dominent largement la zone. Par ailleurs, les zones de cultures vivrières telles que les champs de manioc, de patate douce se trouvent surtout dans les zones de basse altitude et occupent largement la surface au Sud et à l'Ouest du village.

Un sondage électrique a été réalisé dans ce fokontany. Le point de sondage a pour coordonnées (24°50'16.1"S, 44°01'50.5"E).

Le plan de masse est représenté par la figure suivante.

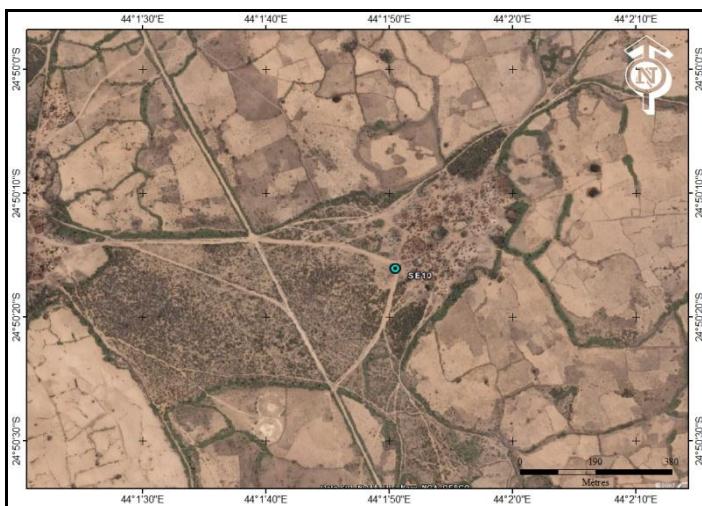


Figure 65 :Plan de masse du site à Befengoka(Source : Google earth)

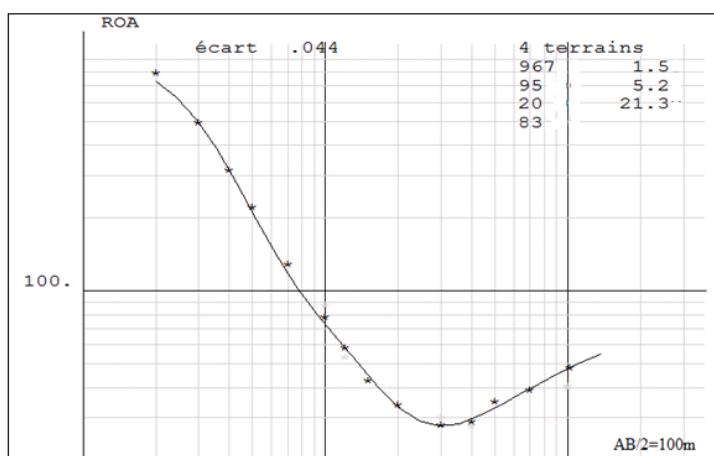


Figure 66: Courbe de sondage SE10 à Befengoka

La courbe de sondage à Befengoke montre 4 terrains dont les caractéristiques sont les suivantes :

-la première couche plus résistante, de résistivité 967Ωm, d'épaisseur environ 1.50m, peut correspondre à la formation marne à huitres.

- la deuxième couche moyennement résistante, de résistivité $95\Omega\text{m}$, d'épaisseur 5m, pourrait être une formation de calcaire argileux (peu perméable).
- la troisième couche conductrice, de résistance $20\Omega\text{m}$, pourrait être un aquifère de grès argileux.
- la dernière couche moyennement résistante constitue la base de la succession de 3 couches précédentes. Elle joue le rôle de substratum.

Fokontany	Coordonnées	Profondeur(m)	Nature géologique de l'aquifère
Ampitanaka	24°35'13.1"S, 44°20'06.3"E	77	Grés argileux
Voroja	24°29'15.4"S ; 44°13'40.5"E	61	calcaire argileux
Nanohofa	24°23'22.6"S, 43°48'41.2"E	30	calcaire argileux
Vohombe	24°24'50.1"S, 43°48'32.3"E	35	calcaire argileux
Besavavy-Nord	24°27'09.4"S, 43°47'46.2"E	15	Calcaire sableux
Bemanateza	24°28'31.45"S, 43°50'23.8"E	13	Calcaire sableux
Andranomasintsoa	24°32'23.1"S, 43°52'20.8"E	14	Calcaire sableux
Ankazoabo Nord	24°32'36.4"S, 43°53'51.0"E	12	Calcaire sableux
Malangariake	24°35'27.6"S, 43°55'10.5"E	21	calcaire sableux
Itampolo	24°40'50.75"S, 43°56'42.19"E	23	Calcaire argileux
Berovontsy	24°41'52.8"S, 43°56'52.9"E	17	calcaire sableux
Zoenarivo	24°44'31.05"S, 43°57'03.65"E	20	Calcaire sableux
Tagainoro	24°45'33.9"S, 43°57'37.5"E	30	Calcaire sableux
Besavavy-Sud	24°47'14.46"S, 43°57'33.95"E	22	Calcaire sableux
Tsiandriona Nord	24°48'28.7"S, 43°59'37.0"E	70	Calcaire sableux
Ambolisogno	24°47'25.3"S, 44°03'49.1"E	13	Calcaire argileux
Befengoke	24°50'16.1"S, 44°01'50.5"E	10	Grés argileux

Fig67 : Tableau récapitulatif des sites d'intervention

CONCLUSION

L'objectif de travail consistait à localiser les points favorables pour l'implantation de forages ou des puits dans le plateau Mahafaly, plus précisément dans la Commune Rurale Itampolo.

Pour atteindre cet objectif, en sachant que la cible est plus conductrice que l'encaissant, on a fait appel à la méthode électrique et la méthode électromagnétique. Pour la méthode électrique, nous avons utilisé les technique de sondage électrique et panneau électrique pour définir les caractéristiques géométriques des aquifères et nous avons mis en œuvre aussi, pour la méthode électromagnétique, le sondage TDEM pour confirmer les résultats obtenus.

Apres avoir interprété, les résultats géophysiques, nous pouvons confirmer l'existence des nappes aquifères dans la région .En général, les profondeurs de ces nappes aquifères sont comprises entre 10 à 70mètres avec une épaisseur qui varie de 6 à 50mètres. Ces nappes sont plus profondes dans le plateau que dans la plaine côtière.

D'après les résultats obtenus, nous avons pu constater que les 2 méthodes utilisées sont complémentaires à la recherche d'eaux souterraines. Elles permettent de bien définir la géométrie des aquifères. Toutefois, la géophysique ne permet pas de décrire la qualité de ces eaux. Il faudra donc faire des analyses des paramètres physico-chimiques et bactériologiques pour confirmer la potabilité de ces eaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: GUYOT L., 2002. Reconnaissance hydrogéologie pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en semi-aride Sud-ouest de Madagascar.
- [2] RAKOTO H., 2003. Caractérisation par géophysique, hydrogéologie classique et hydrochimie des aquifères en zone semi-aride : exemple du bassin sédimentaire de Beloha. Extrême Sud de Madagascar, Thèse de Doctorat ès Sciences, Université d'Antananarivo.
- [3] Programme hydraulique « plein sud » MADAGASCAR, Région Atsimo-Andrefana, District de Tuléar II, Pré-étude technique et diagnostic , 2011 . Rapport du projet d'adduction d'eau potable et d'appui à la maîtrise d'ouvrage de la commune d'Itampolo pour la mise en place d'un service public de l'eau.
- [4] Rapport final provisoire, 2014. Etude hydrogéologique pour l'évaluation de la potentialité en eaux souterraines dans le plateau Mahafaly
- [5] CHOUTEAU M., 2001. Notes de cours, Méthode électrique
- [6] ROMAIN B., 2012. Prospection géophysique : Méthode électrique (Introduction, sondage électrique)
- [7] COUSIN I., 2012. L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols
- [8] DESCLOÎTRES M., 1998. Les sondages électromagnétique domaine temporel (TDEM) : Application à la prospection d'aquifère sur le volcan du Fogo et du piton de la Fournaise (La Réunion) (Thèse de doctorat, université Paris 6).
- [9] ACF-INTERNATIONAL., 2010. Utilisation du TEM-FAST dans le cadre des missions de prospection géophysique.
- [10] Rapport de mission. 2006. Projet hydrogéophysique Niger sondages électromagnétiques tdem (Rapport_tdem_niger avec annexes)
- [11]. HACINI Y., 2006. Application des méthodes géophysiques à l'étude des deux sites (Kappelen et Grenchen) de l'aquifère poreux complexe de Seeland, Thèse de doctorat, Université de Lausanne.
- [12] ROBIHARIVELO F., 2014. Etude par prospection électrique et électromagnétique pour la recherche d'eaux souterraines dans la commune rurale de Masiaboay, district de Bétioky sud, région Atsimo-Andrefana. Mémoire DEA, Université d'Antananarivo.

ANNEXES

Annexe A: TRAITEMENT DES DONNEES AVEC RES2DINV

Le logiciel d'inversion RES2DINV permet de retrouver les vraies valeurs de la résistivité à partir des valeurs apparentes du terrain. Il reconstitue, par une méthode itérative, tous les différents terrains en résistivités et épaisseurs vraies qui ont donné naissance à nos résistivités apparentes.

Il utilise la méthode des différences finies pour le calcul de résistivité puis le lissage par contrainte pour le calcul du modèle approximatif. Il commence par découper le profil en plusieurs blocs dont la taille augmente avec la profondeur, à cause de la perte de résolution de la méthode électrique. Cette augmentation est généralement de 10% ou de 25% suivant le nombre de points et de niveaux d'acquisition du profil en question. A l'intérieur de chacun de ces blocs, le logiciel attribue une valeur de résistivité apparente calculée à partir des points de mesure. Il calcule ensuite, à l'aide d'une matrice aux dérivées partielles (Matrice Jacobienne), la valeur de la résistivité vraie de chaque bloc.

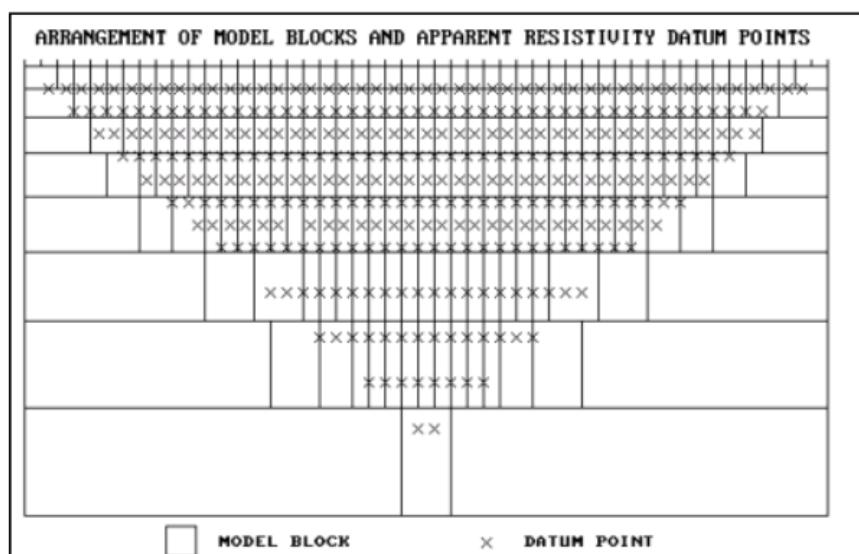


Figure 67: Représentation des blocs et des points de mesure

(Source : Manuel de RES2DINV)

Pour cette opération, les premières valeurs qu'il introduit dans cette matrice sont les valeurs apparentes qui lui permettent de donner un premier modèle approximatif. A partir de ce modèle, il injecte un courant fictif et recalcule les valeurs apparentes (figure 15, B). Il compare ensuite cette coupe de résistivité apparente avec celle qui a été dessinée à l'aide des valeurs mesurées (figure 15, A). La comparaison lui permet de corriger la matrice et de recalculer un modèle plus précis (figure 15, C).

Le logiciel essaie donc à l'aide d'une méthode itérative, de réduire la différence entre les valeurs calculées et mesurées de résistivité apparente en ajustant la résistivité vraie de chaque bloc. Une mesure de cette différence est donnée par l'erreur RMS (Root-MeanSquared). En général, le modèle le plus fiable est celui qui se situe juste après l'itération où l'erreur RMS ne change plus de manière significative, ce qui arrive habituellement entre 4 et 6 itérations.

Afin de s'approcher de la résistivité réelle du sous-sol, on effectue une inversion des valeurs de résistivités apparentes en deux dimensions ou 2D à l'aide du logiciel RES2DINV. On obtient un modèle et des résistivités calculées.

Tout d'abord, un modèle est élaboré à partir des données de résistivités apparentes mesurés :

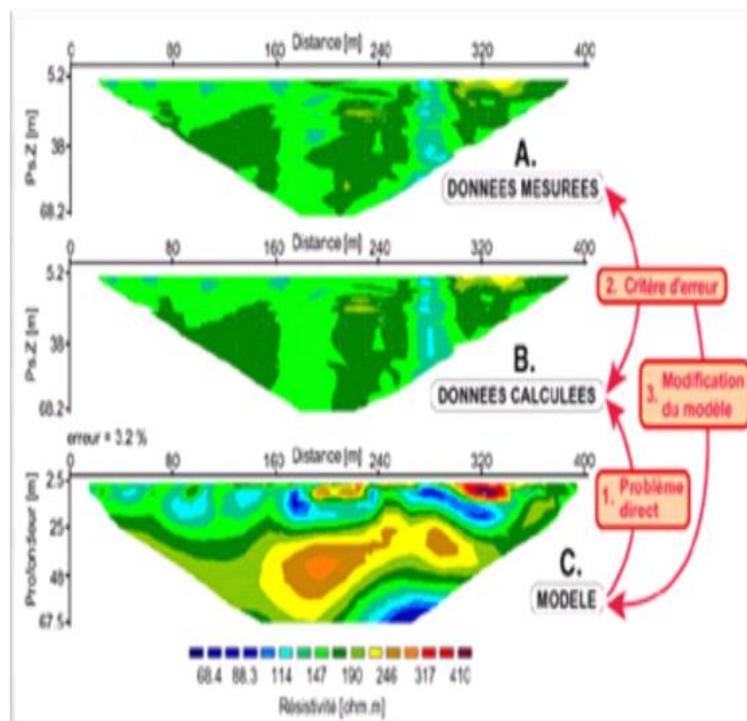


Figure 68: Principe de l'inversion

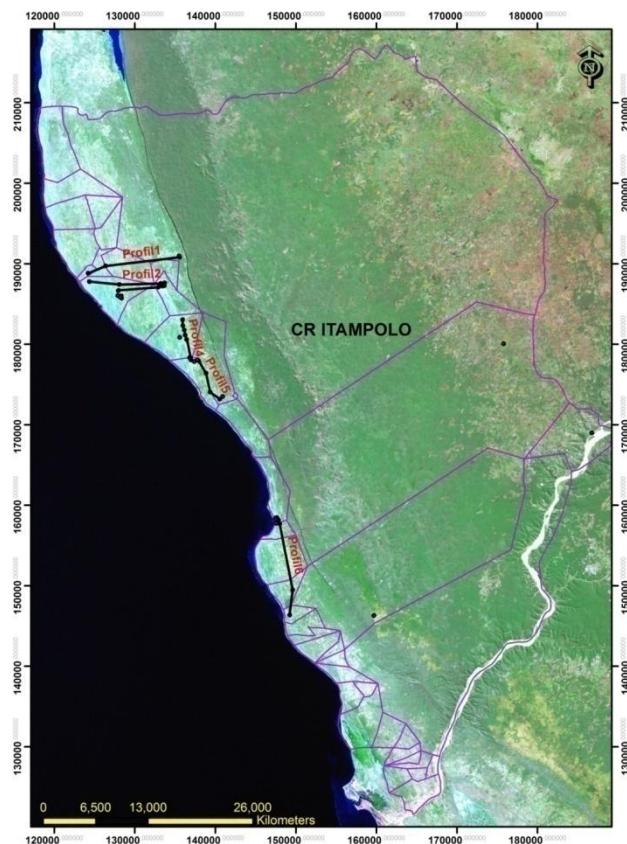


Figure 69: Emplacement des profils de coupes géologiques

Annexe B :Coupes géologique suivant le profil1:

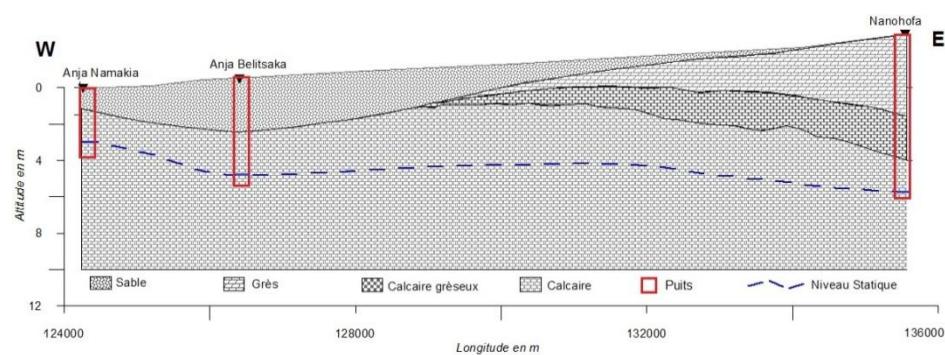


Figure 28 : Coupes géologiques suivant le profil1

Coupe géologique suivant le profil2:

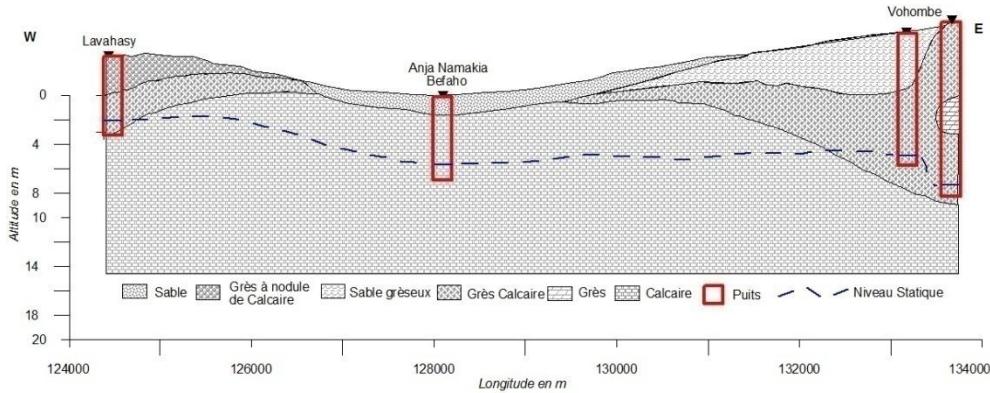


Figure 29 : Coupes géologiques suivant le profil 2

Coupe géologique suivant le profil 3:

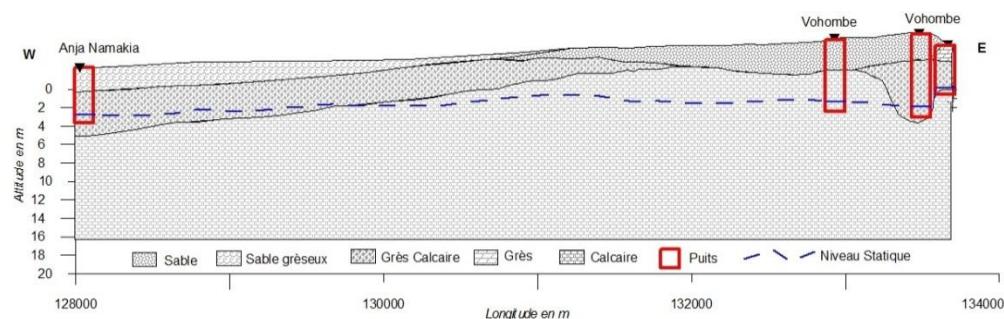


Figure 30 : Coupes géologiques suivant le profil 3

Coupe géologique suivant le profil 4:

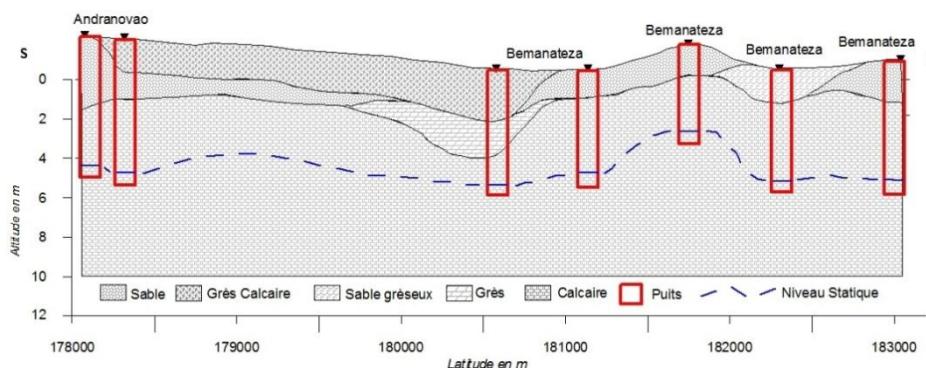


Figure 31 : Coupes géologiques suivant le profil 4

Coupe géologique suivant le profil 5:

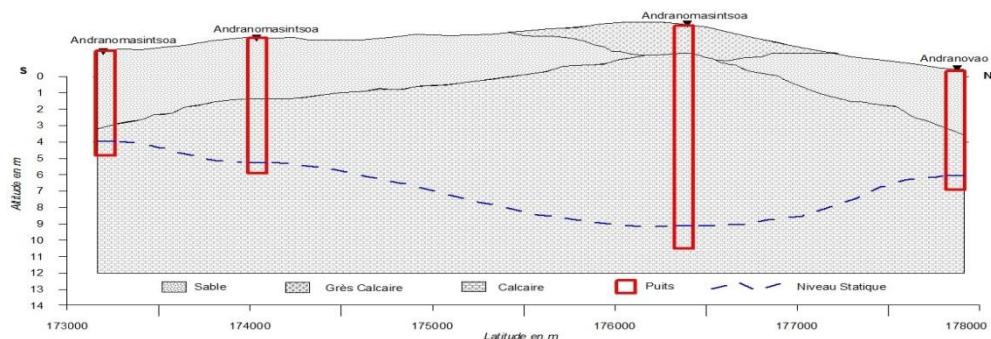


Figure 32 : Coupes géologiques suivant le profil 5

Coupe géologique suivant le profil 6:

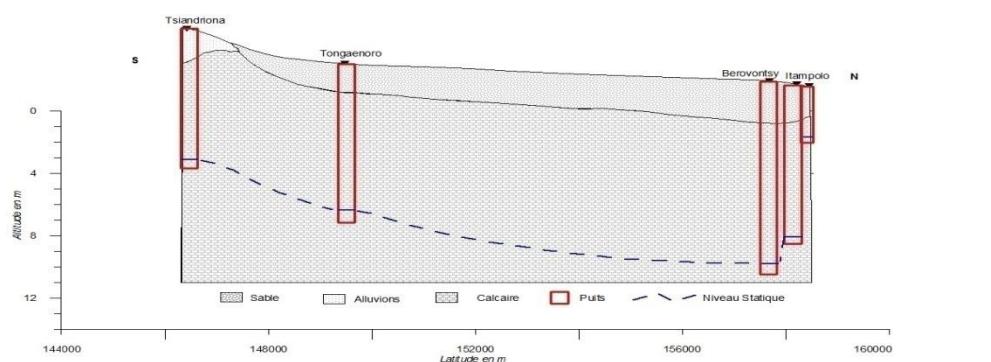


Figure 33 : Coupes géologiques suivant le profil 6

TABLE DES MATIERES

.....	3
REMERCIEMENTS	i
LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS	vi
INTRODUCTION	1
I.2.CONTEXTE MORPHOLOGIQUE	4
I.3.CONTEXTE GEOLOGIQUE	5
I.4.CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE	6
I.5.CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE [8]	6
I.7.1.Le régime d'alizé.....	10
I.7.2. Le régime de mousson.....	10
I.7.3.Précipitations	11
I.8.CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE.....	12
CHAPITRE II.....	13
METHODES ET MATERIELS	13
II.1.1. Notion de résistivité [5].....	13
II.1.2.Définition de résistivité électrique	13
II.1.3.BASES THEORIQUES DE LA METHODE ELECTRIQUE	14
II.1.3.1.Potentiel généré par une seule électrode	14
II.1.3.2. Principe de mesure de la résistivité	15
II-1-3-3.Dispositifs de mesure en méthode électrique [11]	17
II.1.3.6. Technique de mesure de la résistivité	17
II.2.METHODE ELECTROMAGNETIQUE [8]	19
II.2.2.SONDAGE ELECTROMAGNETIQUE (OU SONDAGE TDEM)	21
II.2.3.Dispositifs de mesure [9]	21
II.2.5. Dispositif central	21
B. ACQUISITION DE DONNEES.....	22
2. TECHNIQUE DU PANNEAU ELECTRIQUE	22
3. SONDAGE TDEM.....	23
C. TRAITEMENT DE DONNEES	24
1. SONDAGE ELECTRIQUE.....	24
1.1. Traitement par abaque (Traitement manuel)	24
1.2. Traitement avec un logiciel	24
1.3. Panneau électrique	25
2. SONDAGE TDEM.....	26

CHAPITRE III.....	27
INTERPRETATION ET RESULTATS.....	27
CONCLUSION	57
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	58

ENCADREUR
Pr. RATSIMBAZAFY Jean Bruno
e-mail :jbratsimbazafy@yahoo.fr
Tel : +261 33 11 580 19

IMPETRANT
RAKOTONOMENJANAHARY Emile
Lot IIF34ACD-Pépinière-Andraisoro
e-mail :rakotonomenjanaharyem@gmail.com
Tél : 033 74 173 10

TITRE : « ETUDE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINE PAR METHODE ELECTRIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE DE LA COMMUNE RURALE ITAMPOLO DISTRICT D'AMPANIHY REGION ATSIMO-ANDREFANA »

RESUME

L'accès en eau potable est un problème majeur pour la Commune Rurale Itampolo tant sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif. Les habitants de la région sont confrontés quotidiennement à des contraintes pour satisfaire leurs besoins en eau telles que la salinité des eaux, l'insuffisance des infrastructures en eaux et la défectuosité de certains points d'eaux. Pour y remédier, des études ont été effectuées dans cette région dans le but de rechercher des ressources en eaux souterraines.

Dans le cadre de ce travail, on a fait appel à des méthodes géophysiques pour localiser les points favorables à l'implantation des infrastructures en eau (forages et puits). Pour ce faire, on a utilisé la méthode électrique avec les techniques du panneau électrique et du sondage électrique. Dans notre zone d'étude, nous avons effectués 2 panneaux électriques, 10 sondages électriques et 18 STDEM répartis sur 17 fokontany.

Les méthodes électrique et électromagnétique sont complémentaires en prospection d'aquifère. La première est sensible à des sources superficielles tandis que la seconde à des sources plus profondes. Les résultats de la prospection géophysique ont permis de connaître la géométrie de la nappe aquifère (profondeur, épaisseur, extension), sa résistivité et de proposer des points favorables à l'implantation des forages ou des puits.

Donc la combinaison de ces 2 méthodes permet d'affiner la recherche des ressources en eaux souterraines. Mais la méthode géophysique ne permet pas de déterminer la qualité des eaux, alors il est nécessaire de faire une étude hydro-chimique si l'on veut connaître cette qualité.

Mots clés: Eaux souterraines, méthode électrique, méthode électromagnétique, Commune Rurale Itampolo

ABSTRACT

Water table access is a major problem for the Rural Municipality of Itampolo both in terms of quantity and quality. People of the region are daily confronted with constraints to satisfy their water needs such as water salinity, poor infrastructure and the water point defective.

To remedy this problem, studies were carried out in this region in order to find groundwater resources.

In this work, we used geophysical methods to locate favorable points for water infrastructure implementation (boreholes and wells). We chose the electrical method using electrical panel technique and vertical electrical sounding. In the study area, we carried out 02 electrical panels, 10 vertical electrical soundings, and 18 STDEM which are spread over 17 fokontany. The electrical and electromagnetic methods are complementary in aquifer exploration. The former is sensitive to surface sources and the latter to deeper sources.

Geophysical results allow to assess the geometry of aquifers (depth, thickness, extension) and their resistivity, and to propose favorable points to the implantation of boreholes or wells. The electrical and electromagnetic methods are complementary in aquifer exploration: the first is sensitive to subsurface sources while the second to deeper sources.

Therefore, the combination of these two methods permits to refine the groundwater resources research. However, the geophysical method does not permit to determine water quality. Hence, it is necessary to lead hydrochemical study to know that water quality.

Keywords: groundwater, electrical method, electromagnetic method, Rural Municipality Itampolo