

Prospection hydrogéologique sur l'Androy pour la réalisation de six forages prospectifs



Nicolas Brisset

Décembre 2022

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	4
2.	Contexte géographique et géologique.....	4
3.	Contexte Hydrogéologique.....	6
3.1.	Aquifère des bassins sédimentaires.....	6
3.2.	Aquifères de socle.....	7
4.	Accès à l'eau.....	9
5.	Qualité des eaux souterraines.....	11
6.	Investigations géologiques.....	13
6.1.	Introduction.....	13
6.2.	Secteur Sédimentaire.....	13
6.2.1.	Taranake.....	13
6.2.2.	Ambatomainty.....	16
6.2.3.	Botreoke.....	18
6.3.	Secteur Jafaro.....	19
6.3.1.	Magnevotse Anaramiteraka.....	19
6.3.2.	Andahivozaka Haut.....	21
6.3.3.	Ambanditse.....	23
6.3.4.	Antanivelo.....	26
6.3.5.	Ankobo I.....	29
6.3.6.	Ambari.....	30
6.4.	Choix des sites sur Jafaro.....	31
7.	Recherche de linéaments – Structures tectoniques.....	32
7.1.	Modèle Numérique de Terrain.....	32
7.2.	Images satellites domaine visible.....	33
7.3.	Images satellites radar.....	33
7.4.	Mesures de la déformation tectonique in-situ.....	34
8.	Choix du positionnement des profils électriques.....	37
8.1.	Ambatomainty.....	37
8.2.	Taranake.....	38
8.3.	Botreoke.....	40
8.4.	Andahivozaka Haut.....	40
8.5.	Antanivelo.....	41
8.6.	Ankobo I.....	42
9.	Réalisation des tomographies de résistivité électrique.....	43
9.1.	Méthode d'acquisition.....	43

9.2.	Résultats	45
9.2.1.	Ambatomainty.....	46
9.2.2.	Botreoke	47
9.2.3.	Taranake	49
9.2.4.	Andahivozaka Haut.....	50
9.2.5.	Antanivelo.....	51
9.2.6.	Ankobo I.....	52
10.	Récapitulatif des forages positionnés	54
11.	Bibliographie.....	55
Annexe1 :	Mesures in-situ de déformations tectoniques et métamorphiques	58
Annexe2 :	Réaction d'échantillons de roche après attaque à l'acide chlorhydrique.....	59
Annexe3 :	Principe de la méthode du panneau électrique	60
Annexe4 :	Données brutes des Tomographies de Résistivité Electrique	67
Annexe5 :	Couches vecteurs créées pour cette prospection	79

1. INTRODUCTION

MSF est revenu dans le Sud de Madagascar en mars 2021 en réponse à une crise nutritionnelle, sanitaire et hydrique dans les régions de l'Androy et d'Anosy. Concernant les activités liées à l'accès à l'eau, en plus des réparations de Pompes à Motricité Humaine, et leur pérennisation, il a été prévu la réalisation d'une trentaine de nouveaux points d'eau sur l'ensemble du projet, que ce soient des puits busés, des jettings, ou des forages mécaniques. Concernant cette dernière catégorie, MSF s'est engagé dans la réalisation de forages prospectifs dans des secteurs où les besoins sont très importants alors que les premiers points d'eau sont très éloignés (5 à 25 km).

Sur les dernières décennies, très peu d'organisations ont pris le risque de réaliser des ouvrages dans ces zones en raison de la difficulté technique de localiser une ressource en eau souterraine exploitable, et aussi d'une qualité se conformant l'eau de boisson. De plus, les informations concernant le sous-sol du Sud malgache sont peu nombreuses dès que l'on s'éloigne des sites miniers. C'est ainsi que six forages, appelés « prospectifs » en raison des risques de résultats négatifs, ont été programmés dans le cadre du projet sur la région Androy. Dans le cas où les résultats se révèlent satisfaisants, ces travaux pourront être d'une grande utilité pour convaincre d'autres ONG, mais aussi les compagnies de forage, de réaliser de nouveaux points d'eau dans ces secteurs.

La présente étude expose le cheminement scientifique et technique entrepris pour positionner les futurs forages.

2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

La région de l'Androy, qui veut dire « pays de l'épine » se situe dans l'extrême sud de Madagascar (encart sur la Figure 1). Cette région semi-aride est subdivisée en trois grands ensembles géologiques qui influencent la morphologie et le relief actuel (Rabemanana, 2002) :

- La zone cristalline composées de roches granitiques et métamorphiques précambriennes (supérieur à 540 Millions d'année) ;
- Le massif volcanique, daté de 85 Ma ;
- Les bassins sédimentaires de Beloha et Ambovombe, déposé au Néogène et Quaternaire (de 20 Ma à nos jours)

Les bassins présentent un relief doux et légèrement vallonné, et sont limités au nord par les moyennes montagnes de la partie cristalline et volcanique et par la mer au Sud. Il est important de noter qu'en dehors de la rivière Manambovo, qui n'est pas pérenne, les cours d'eau du bassin d'Ambovombe n'atteignent pas la mer.

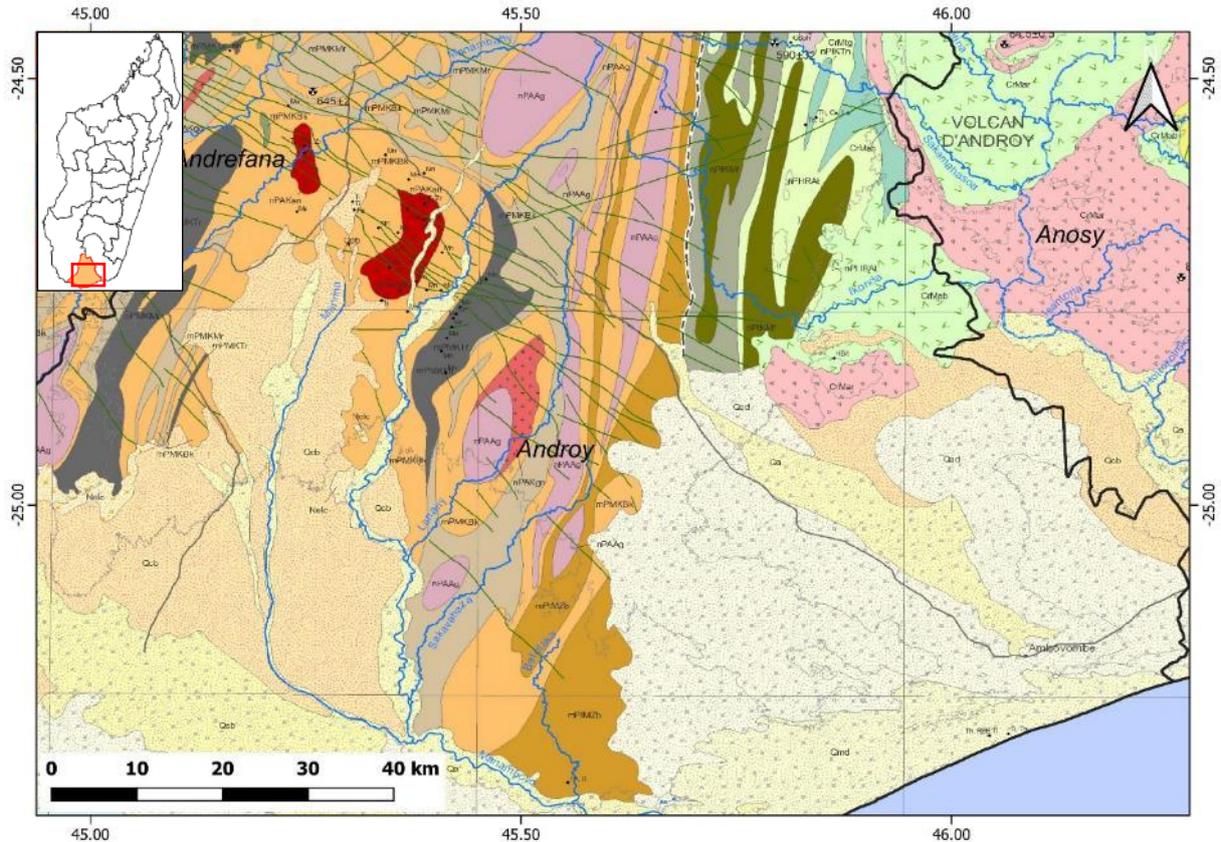


Figure 1: Géologie du Sud de Madagascar, centrée sur la région d'Androy (source MMRS). En blanc et jaune les bassins sédimentaires, en vert clair et rose le massif volcanique, les autres couleurs traduisent les roches cristallines

Le socle précambrien présente des déformations importantes dues à de fortes contraintes encaissées au cours du temps, dont deux orogénèse (création de chaîne de montagne) et une extension avec la séparation du super continent Gondwana (Monteleone, 2018). Il plonge sous le bassin sédimentaire à une quarantaine de kilomètres au nord d'Ambovombe.

Les coulées volcaniques du volcan d'Androy, plus récentes que les roches du socle qu'elles recouvrent mais plus anciennes que les dépôts sédimentaires sus-jacents, ont une extension qui pourrait potentiellement couvrir un quart de toute la région. Les données d'anomalie magnétique mesurées par capture aéroportée, obtenues récemment grâce au Ministère des Mines et de la Recherche Stratégiques, semble en effet montrer un système volcanique ayant une influence sur plus de 140 km du nord au Sud et 60 km d'Est en Ouest. Il est ainsi probable que des coulées basaltiques ou rhyolitiques se trouvent sous les sédiments du bassin d'Ambovombe, sous la moitié de leur surface.

3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

3.1. AQUIFERE DES BASSINS SEDIMENTAIRES

Au niveau des grands bassins sédimentaires de Beloha et Ambovombe, les rares puits et forages existants exploitent des petits systèmes aquifères localisés, dit « perchés », composés majoritairement de sables et de grès¹. Ces formations sableuses font partie intégrante d'un vaste complexe sédimentaire datant de quelques millions d'années et toujours en évolution, déposé sur un socle cristallin beaucoup plus ancien. Aurouze (1957) a élaboré une coupe géologique simplifiée schématisant ces dépôts sur le socle (Figure 2). Il met ici en évidence les systèmes de nappes perchées, représentant de l'eau exploitable tout ou partie de l'année, déconnectées entre elles et déconnectées des masses d'eaux souterraines principales se trouvant dans les sédiments plus anciens sous-jacent, dont le niveau est représenté en vert sur le schéma. Ce schéma conceptuel est aujourd'hui en partie remis en question avec la découverte récente que la pluviométrie n'influence pas directement la recharge des nappes perchées (JICA 2006, Monteleone 2018), mais qu'un apport souterrain depuis le nord de la zone d'étude contribue également à l'équilibre de ces masses d'eau secondaires.

Egalement il a récemment été mis en évidence que ce complexe sédimentaire n'est pas homogène, avec un entrecroisement de lentilles de sables et d'argiles, probablement sur toute l'épaisseur des dépôts (MSF, 2022). Ce type de sédimentation entrecroisée traduit probablement une dynamique de déposition fluvio-marine, par exemple deltaïque, qui se retrouve sur les anciens littoraux (Brisset et al., 2018). Les massifs sableux ou gréseux pouvant contenir d'important volumes d'eau mobilisables, en raison d'une porosité efficace généralement comprise entre 20 et 40 %, la mise en lumière de couches sableuses ou gréseuses profondes est d'un grand intérêt pour la réalisation de forages positifs dans ce contexte.

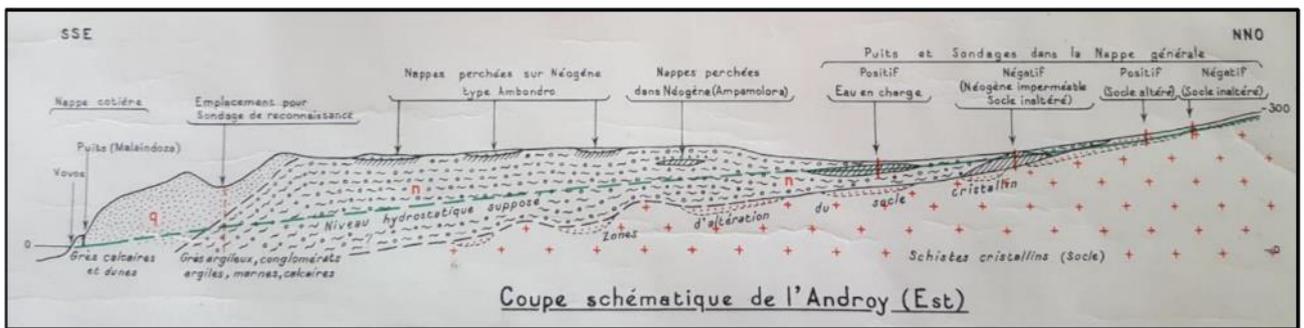


Figure 2: Coupe géologique simplifiée à l'Est d'Androy (Arouze, 1957)

¹ Le gré est une roche sédimentaire issue de sables compactés et dont les grains sont cimentés entre eux par de la silice ou du calcaire.

3.2. AQUIFERES DE SOCLE

Il a été identifié que l'essentiel de la réserve en eau souterraine de la zone cristalline est situé dans les aquifères de socle (Wyns et al., 2006), dans la partie profonde des profils d'altération, au niveau de l'horizon fissuré (Figure 3). Dans la région Androy, une campagne de 150 forages réalisés sur la commune d'Antanimora au début des années 1990 appuie également ce concept (Bergeron, 1995).

Cet horizon fissuré, situé sous les altérites, est lié au développement de l'altération au sein de la roche dure. Il est caractérisé par un réseau très dense de fractures interconnectées, dont la fréquence décroît avec la profondeur. Ces fractures résultent du gonflement de certains minéraux, principalement la biotite (mica noir) au stade précoce de l'altération.

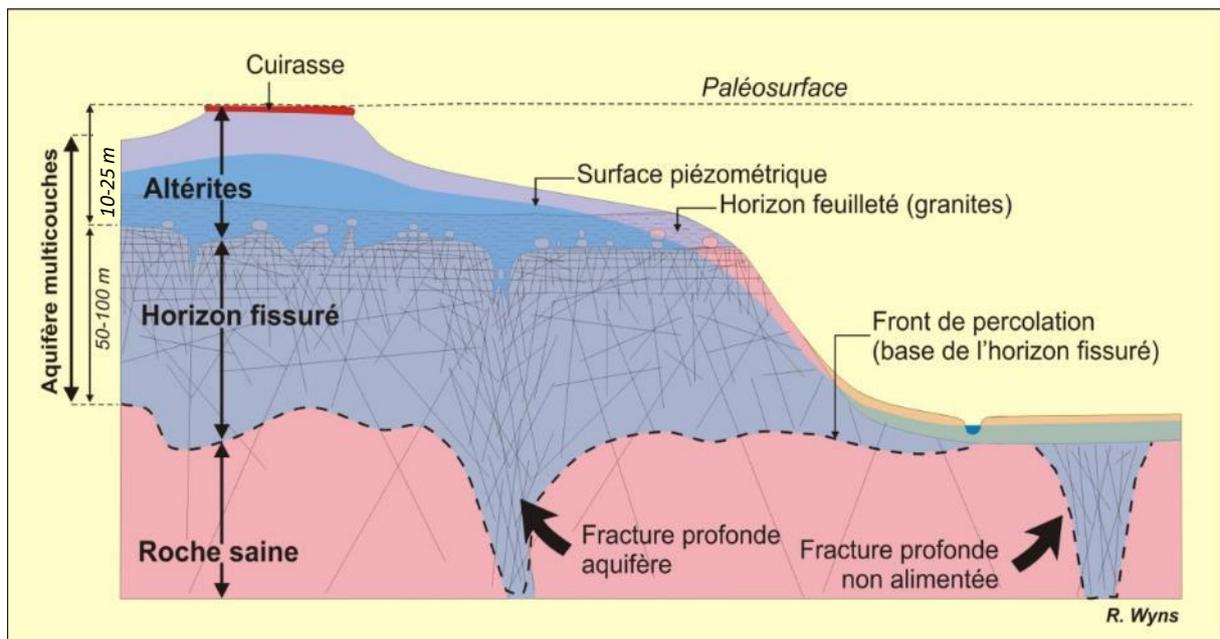


Figure 3: Importance du profil d'altération pour l'eau mobilisable dans les aquifères de socle (Wyns, 2006)

Les propriétés hydrogéologiques de cet horizon fissuré sont déterminées par la densité des fractures pour la porosité et par leur interconnexion pour la perméabilité. La densité des fractures est maximale au sommet de l'horizon fissuré et décroît vers le bas. On peut généralement diviser l'horizon fissuré en deux parties : une partie supérieure, épaisse de 10 à 25 m (horizon fissuré supérieur), où la porosité moyenne et la perméabilité sont optimales et une partie inférieure, épaisse de 40 à 60 m ou plus, où la porosité et la perméabilité décroissent régulièrement avec la profondeur.

Les débits d'exploitation moyens attendus dans les aquifères de socle sont généralement compris entre 1 et 6 m³/h dans les cas favorables (lithologie adaptée au développement d'un profil d'altération). Ils peuvent être sensiblement supérieurs localement, avec une dizaine de m³/h, voire exceptionnellement plus lorsqu'ils captent une fracture drainante majeure et interconnectée à l'horizon fissuré (Brisset et al., 2019).

Outre ces mécanismes de fissuration liés à des processus d'altération (gonflement des biotites lorsqu'elles sont présentes dans la minéralogie de l'encaissant), d'autres phénomènes mécaniques participent à la fissuration des roches cristallines et ce quel que soit la lithologie de la formation. De nombreuses études (Le Borgne et al. 2004, Holland et Witthüser, 2011) montrent que la fissuration

des roches cristallines est augmentée en périphérie des structures filoniennes (filon de quartz, dolérite, pegmatite, aplites), de failles, et de contacts lithologiques créés par l'ascension d'un pluton intrusif dans l'encaissant d'âge plus élevé. A titre d'illustration, suite à des essais de pompage sur plus de 2500 puits dans la province de Limpopo (Afrique du Sud), Holland et Witthüser proposent le schéma conceptuel présenté sur la Figure 4. Il permet de visualiser les variations de transmissivité² dans le socle, à l'échelle de la région, en fonction des différents paramètres évoqués plus haut :

- proximité à une faille,
- proximité à un filon (Dyke),
- proximité à une nappe alluviale,
- proximité à un pluton intrusif dans une formation plus ancienne.

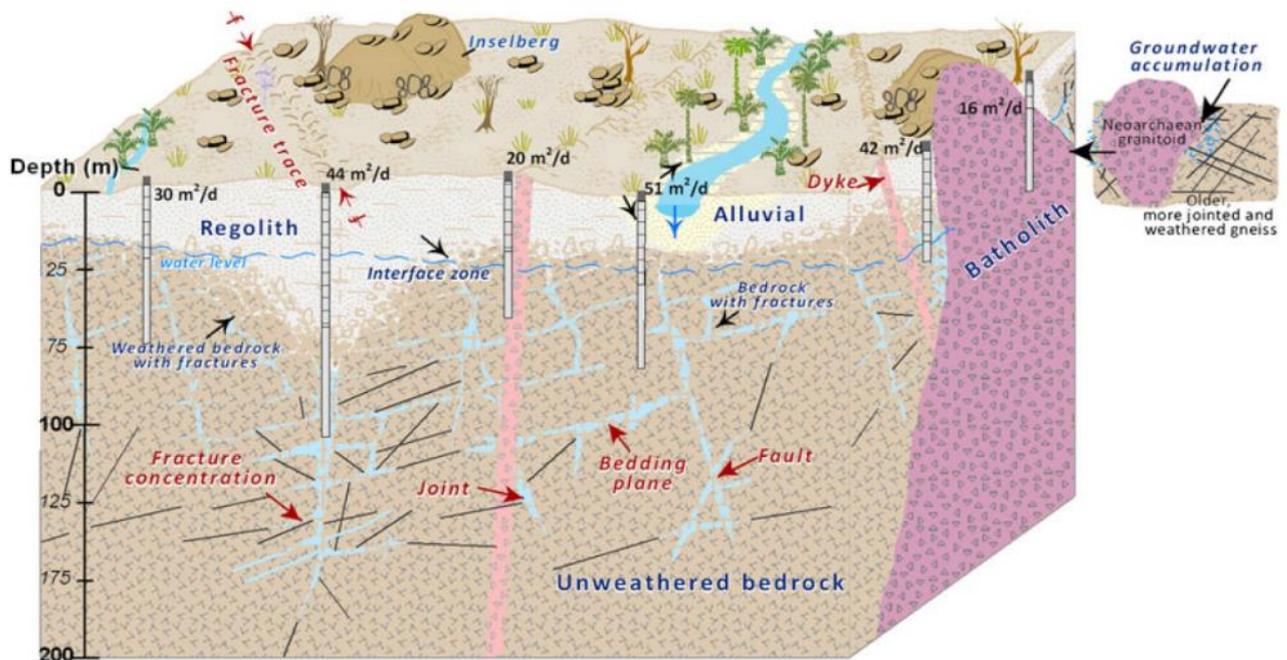


Figure 4 : Les principales cibles hydrogéologiques dans le socle (Holland et Witthüser, 2011)

La conjugaison de l'ensemble de ces facteurs conduit à localiser des zones préférentielles pour le positionnement de forages dans les formations de socle.

Les roches volcaniques, quant à elles, vont également avec le temps subir des phénomènes de fracturation en raison des mouvements tectoniques. En revanche ces roches ont des processus d'altérations souvent beaucoup plus long que les roches cristallines, et les profils d'altération vont ainsi être moins épais et les fractures drainantes se développent moins facilement.

² Paramètre traduisant la capacité d'un aquifère à transmettre l'eau. Plus il est élevé et plus les débits peuvent être importants.

4. ACCES A L'EAU

Afin de localiser les plus gros besoins en eau, il a débord été produit une carte projetant à la fois la densité de population par fokontany et les points d'eau répertoriés (Figure 5). Il convient d'être prudent quant aux données affichées sur cette figure, qui comporte des points d'eau hors-services depuis longtemps ou secs une grande partie de l'année, ou parfois mal positionnés. Cette carte met néanmoins en lumière des secteurs relativement peuplés et ne disposant d'aucun points d'eau à moins de 10 kilomètres. Les informations issues des précédentes explorations et les discussions avec la DREAH (Direction Régionale de l'Eau Assainissement et Hygiène) ont permis de compléter ce constat et ont aussi été prises en compte pour cibler les communes qui vont bénéficier d'une prospection hydrogéologique en vue de la réalisation de futurs forages. La Figure 7 , réalisé plus tardivement dans cette étude, utilise une base de données « points d'eau » beaucoup plus robuste, consolidé par MSF au cours des travaux de diagnostic et de réparation de PMH.

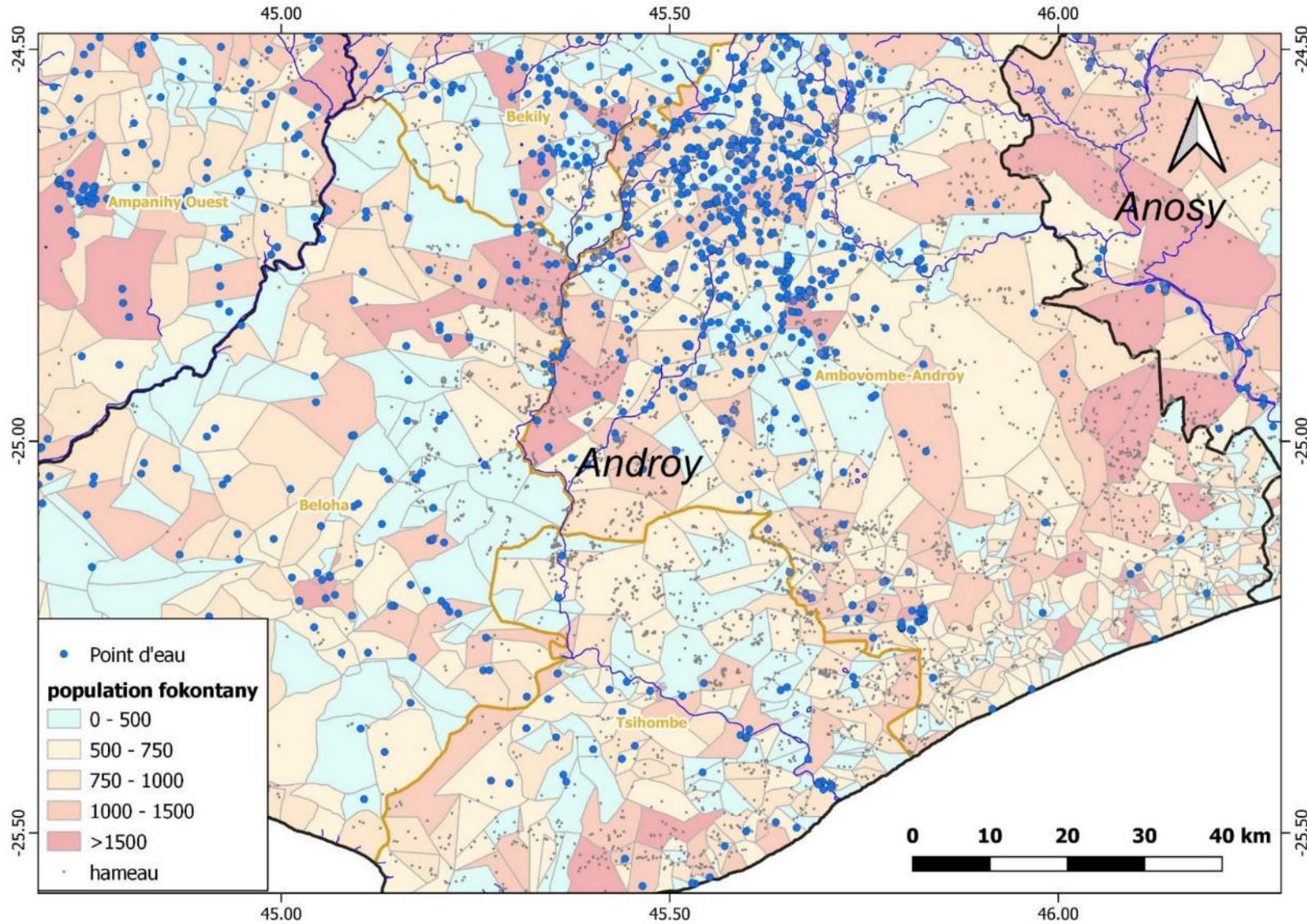


Figure 5: Répartition des points d'eau dans la région d'Androy en fonction de la répartition de la population (MSF, données source : UNICEF)

5. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

Au-delà du problème de la présence de l'eau, se présente également la problématique de la qualité de l'eau. Une forte salinité, souvent supérieur à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, est retrouvée dans l'ensemble du Sud de Madagascar (*Figure 6*). Les teneurs élevées rendent parfois le goût de l'eau inacceptable pour la population qui ne peuvent pas la consommer. L'Organisation Mondiale de la Santé ne donne pas de valeur guide quant à la salinité de l'eau mais précise que l'eau devient imbuvable progressivement lorsque la concentration en matières solides totales dissoutes dépassent les 1000 mg/l, ce qui correspond à environ 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le ministère de la santé malgache, en revanche, fixe une limite de conductivité à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ concernant l'eau potable. Le risque sanitaire liée à une salinité élevée de l'eau est encore débattu au sein de la communauté scientifique. Différentes études semblent néanmoins montrer qu'une consommation quotidienne d'une eau ayant une conductivité de plus de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pourraient être à l'origine de problèmes de santé chez les nourrissons et les personnes sujettes à l'hyper-tension artérielle (*source : sante-canada*).

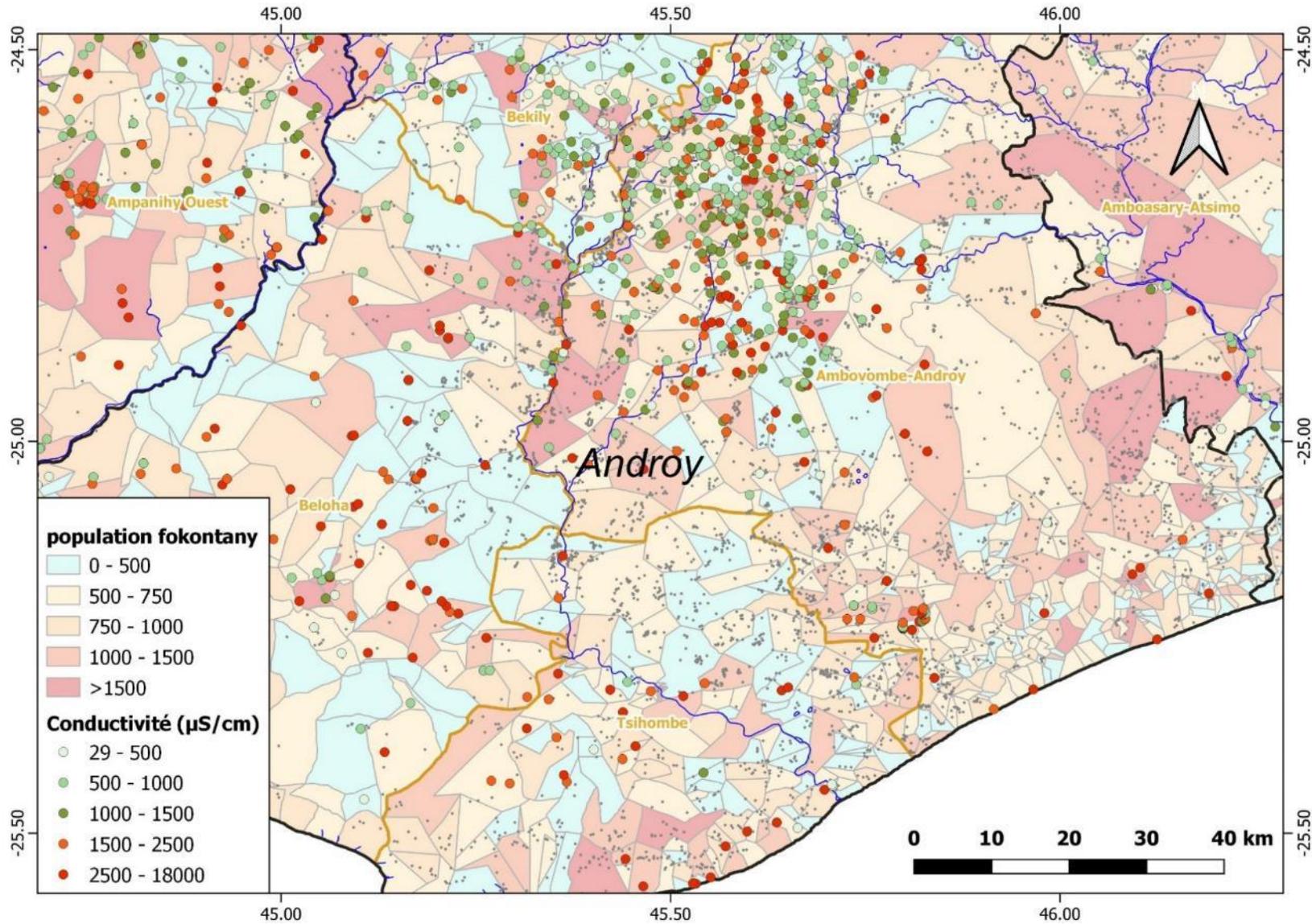


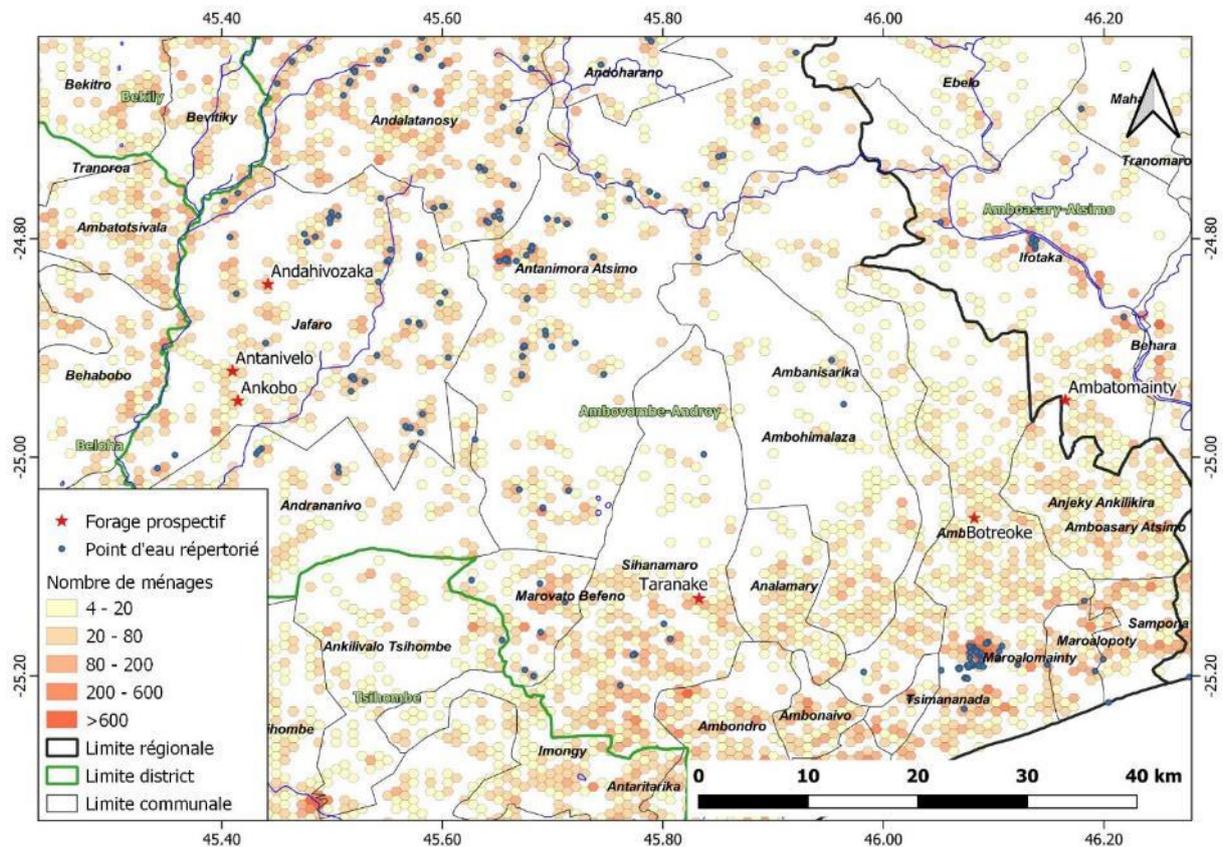
Figure 6: Répartition de la salinité des eaux souterraines sur la région d'Androy (MSF, données source : UNICEF)

6. INVESTIGATIONS GEOLOGIQUES

6.1. INTRODUCTION

Suite à l'analyse des besoins, comme expliqué précédemment, plusieurs secteurs, pouvant regrouper plusieurs fokontany, ont été ciblés pour poursuivre les investigations (Figure 7) : Ambatomainity (en partie sur la commune de Ifotaka et Anjaky Ankilikira), Botreoke (Ambovombe), Taranake (Sihanamaro), et trois sites sur la commune de Jafaro.

La présence de ressources en eau souterraines exploitables étant directement liée au contexte géologique, topographique et climatique, la prise en compte des paramètres physiques décrivant le territoire est indispensable pour la réussite d'un projet de réalisation de nouveaux points d'eau.



6.2. SECTEUR SEDIMENTAIRE

6.2.1. Taranake

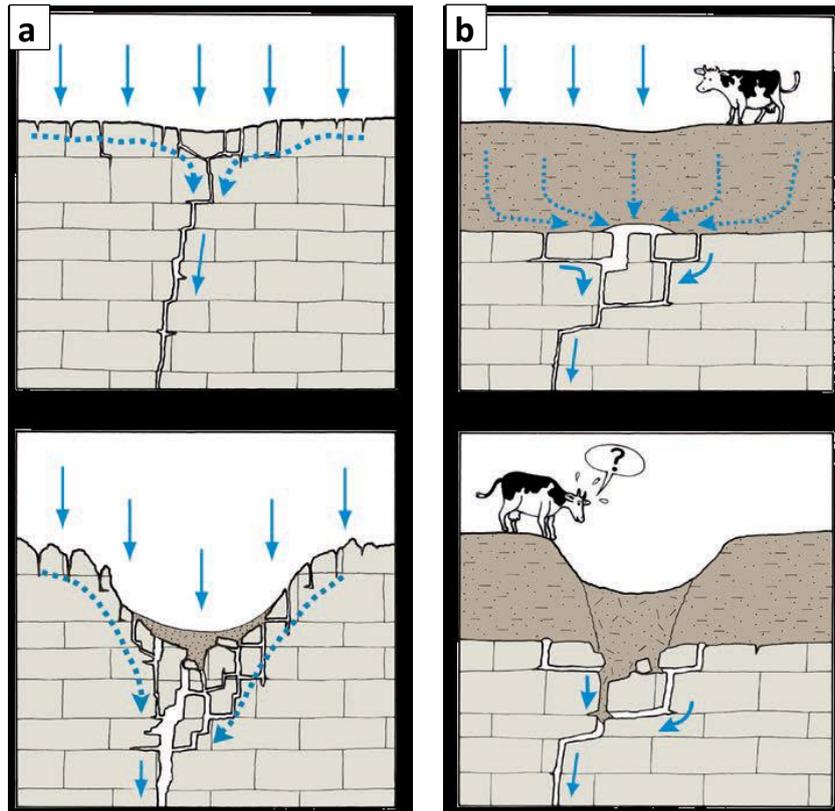
Parmi les différents sites où d'importants besoins en eau se sont fait ressentir, s'illustre le fokontany de Taranake, où une clinique mobile MSF et une distribution d'eau par waterTrucking sont présents toutes les 2 semaines. Les statistiques issues des distributions d'eau sur la clinique mobile montrent que les habitants du village principal et des autres environnants parcourent en moyenne 5 heure et 30 minutes pour aller chercher de l'eau (seulement le trajet aller) lorsqu'il n'y a pas de waterTrucking. Près de 5000 personnes se trouvent dans un rayon de 5 km autour du hameau principal de Taranake.

Une des particularités géomorphologiques du secteur de Taranake est la présence de dépressions visible en surface, d'ordre décimétrique (Figure 8). Ces modelés rappellent les doline, figures typiques en domaine karstique issu de processus de dissolution à différentes échelles comme l'explique les schémas de la Figure 9.



Figure 8: Dépression en surface visible dans le secteur de Taranake

Les dolines sont souvent associées à des cavités an profondeur, anciennes ou récentes, provoqués par l'effet de dissolution des formations calcaires par l'eau. Ces modelés ont été étudiés par le consortium Primary Water Technologies / BushProof pour le compte de l'UNICEF lors d'un projet pilote d'étude des eaux souterraine dans deux secteurs du sud de Madagascar. Alors que la première hypothèse avancée était celle de maars d'origine volcanique, le forage de reconnaissance a mis a en lumière l'absence de roches volcaniques mais des cavités ayant plutôt pour origine la dissolution de formations calcaires. La foration étant très difficile en raison d'éboulements, l'ouvrage n'avait alors pas été poursuivi au-delà de 90 m et non équipé, ce qui n'a pas permis de caractériser la ressource en eau disponible.



La surface fissurée des calcaires absorbe l'eau de pluie et l'achemine radialement vers des fissures verticales qui englobent les eaux plus profondément. L'écoulement radial dissout les calcaires et forme un creux en entonnoir.

Si les calcaires sont couverts de terrains (p.ex. sol épais), des vides se forment par dissolution et soutirage au sommet des bancs rocheux. La couverture finit par s'affaisser et forme des creux caractéristiques qui vont continuer de s'agrandir

Figure 9: Formation des principaux types de doline. En a, doline de dissolution et en b, doline de suffosion (ISSKA, 2017)

Les habitants de Taranake ont l'habitude de creuser des réservoirs dans le sol (Figure 11), dans les sables légèrement consolidés, de 2 à 4 m de profondeur, qui leur permettent de stocker l'eau de pluie durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Les sites où sont réalisés ces ouvrages se situent en dehors des dolines, et le fond est de nature plus imperméable. Le fond des réservoirs, trop durs pour poursuivre un creusement plus profond, est constitué de grés très indurés, avec parfois une cimentation calcaire (calcarénites) mais pas systématiquement (Figure 10 A). En revanche, des roches à forte dominante calcaire, réagissant fortement à l'acide chlorhydrique, peuvent se trouver sous ce même sable légèrement induré (Figure 10 B).

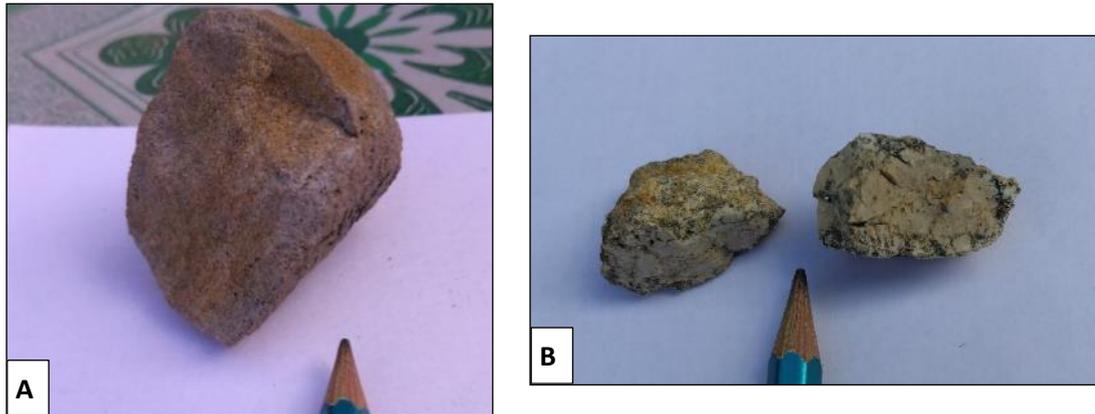


Figure 10: A) Calcarénites présentes sous les sables indurés à Taranake et B) Roche calcaire mise en évidence sous ces mêmes sables, d'épaisseur de 1 à 3 m

Il est ainsi possible que sous les formations sédimentaires de surface, qui peuvent par endroit avoir un caractère imperméable, se trouve des formations à très forte porosité, dont les vides pourraient contenir de l'eau, soit de façon permanente soit temporairement. Dans le second cas, les volumes d'eau s'infiltreraient plus en profondeur, probablement dans la partie altérée du socle ou dans le réseau fissuré. Ces modelés ont donc dans tous les cas un intérêt hydrogéologique.



Figure 11: Réservoir creusé à la main pour stocker l'eau pluviale

6.2.2. Ambatomainty

La population d'Ambatomainty et des villages environnant, situés de part et d'autre de la frontière Androy/Anosy, a l'habitude de parcourir 10 km (seulement pour le trajet aller) pour aller chercher de l'eau au niveau du fleuve Mandraré. Ce secteur bénéficie également d'une clinique mobile et de la distribution d'eau par water trucking toutes les deux semaines depuis avril 2021.

Les diverses observations géologiques et géomorphologiques montrent d'un premier abord des grés ferrugineux, parfois érodés, qui peuvent être mobilisés sous forme de petits blocs et recompressés. Des cavités d'origine naturelles apparaissent dans ces grés et sont surcreusées et par les habitants pour obtenir des citernes naturelles qui vont se remplir lors des évènements pluvieux (Figure 12 et Figure 13). Des baobabs évidés à l'intérieur sont également utilisés pour le stockage de l'eau.



Figure 12: Réservoir creusé à la main dans les grés ferrugineux proche d'Ambatomainty



Figure 13: réseau de cavités à proximité du village de Ambatomainty

Par ailleurs, les observations géologiques menées dans les environs d'Ambatomainty ont mis en évidence plusieurs croûtes calcaires en surface, de quelques centaines de mètres carrés et d'épaisseur d'ordre décimétrique. Néanmoins, une formation calcaire d'au moins 15 m de puissance (Figure 14), avec un contact avec les grés ferrugineux a été découvert à moins de 3 kilomètres du village principal d'Ambatomainty. Tout comme à Taranake, les formations calcaires présentant de telles épaisseurs présentent un intérêt hydrogéologique en raison de leur aptitude à se dissoudre (karstification) et à présenter ainsi une forte porosité.

Durant la phase de prospection par géophysique électrique, faisant suite à ces premières observations, il a également été mis en évidence, au sein du talweg où furent réalisés les tomographies, la présence d'une formation calcaire recouvert par les grès ferrugineux précédemment décrits. Plusieurs évènements de dépôts sédimentaires d'origine calcaires, ou issus de phénomènes de dissolution et précipitation sont donc survenus durant le dépôt des sédiments à l'origine des grès ferrugineux.



Figure 14: Formation calcaire à proximité de Ambatomainty

Tout comme à Taranake, aucune fracture d'origine tectonique n'est visible au sein des différentes roches observées.

6.2.3. Botreoke

Le fokontany de Botreoke présente une population supérieure à 2000 habitants selon les données de 2016. Une école est présente dans le fokontany. Les principaux villages se situent à une distance comprise entre 15 et 20 km de Ambovombe, où se situent les points d'eau les plus proches en saison sèche. Un temps de marche de 5h minimum est ainsi nécessaire pour obtenir de l'eau, que les habitants vont devoir acheter. Pour cette raison, une partie de la population fait le déplacement à pied jusqu'à Ifotaka, à environ 10h de marche juste pour l'aller. Le remplissage d'un bidon de 20 l atteint ainsi 3000 AR dans le secteur de Botreoke...

Tout comme à Ambatomainty, des cavités issues de la dissolution puis du creusement manuel, sont présent au sein des formations gréseuses. Ces cavités sont parfois reliées entre elles formant ainsi des réservoirs naturels de plusieurs dizaines de mètres cube sur un seul site (Figure 15 et Figure 16). Une habitante nous a expliqué que ces réservoirs mettent plusieurs mois à être réalisés, après avoir découvert un site favorable, qui peut parfois être mis en évidence en observant les fourmis !



Figure 15: Chaos gréseux proche du village principal de Botreoke



Figure 16: Processus de dissolution et surcreusement des grés ferrugineux dans le secteur de Botreoke

6.3. SECTEUR JAFARO

6.3.1. Magnevotse Anaramiteraka

Le village Anaramiteraka, dans le fokontany de Magnevotse, regroupe environ 120 ménages. Les habitants ont ici l'habitude de se servir soit d'un puits d'eau salé (Figure 17), d'une conductivité de $6710 \mu\text{S}/\text{cm}$, situé au milieu du village et profond de 14 m, soit d'un forage avec une PMH IndiaMark III, située à 300 m du hameau principale. Ce dernier, d'une profondeur de 15 m, a été réalisé en 1994.



Figure 17: Puits salé de Anaramiteraka

Les formations présentes sont essentiellement des gneiss migmatitiques, avec des minéraux de tailles millimétriques, présentant des filons de quartz intrusifs. On distingue la présence de biotite, phlogopite, quartz, pyroxène, grenats (de taille parfois centimétrique), ainsi que des veines de calcite néoformées. Ces observations concordent avec les données de la carte géologique au 500 000^e où les formations en places sont décrites comme des gneiss schistosé graphitiques et gneiss intermédiaires rubané. D'après la carte au 100 000^e – Feuille de Jafaro - ces gneiss contiennent également du graffite et la présence de cipolin, roche métamorphique calcaire, est mentionnée.

Des croûtes calcaires, réagissant très fortement à l'attaque à l'acide chlorhydrique, recouvrent ces formations par endroits (Figure 18).



Figure 18: Croûte calcaire surplombant les migmatites, entre Anaramiteraka et Andahivozaka

Les fractures mesurées en surface sont majoritairement d'orientation N137 et N156 (Figure 19) et les migmatites présentes des pendages de 40° vers le Nord-Ouest avec des orientation globalement N60 et N85. Les mesures et les directions des pendages des roches métamorphiques de la commune de Jafaro sont compilées et visibles sur la Figure 40.

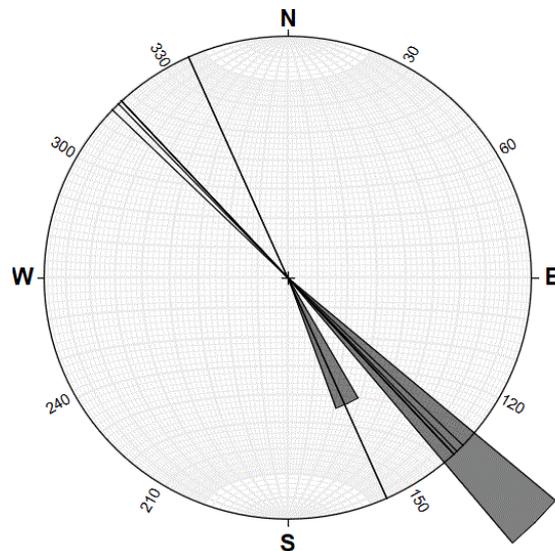


Figure 19: Orientations des principales fractures mesurées sur Magnevoitse et Andahivozaka, n=7

6.3.2. Andahivozaka Haut

A environ 3,5 km à l'Est de Magnevoitse, le hameau de Andahivozaka Haut regroupe près de 700 habitants. Le secteur dispose de six puits creusés, d'une profondeur de 15 à 20 m. Un des principaux puits du hameau principal, d'une profondeur de 18 m, présente une conductivité de 1364 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et permet d'alimenter toute l'année une soixante de ménages. Bien que cet ouvrage semble n'être jamais complètement sec, les habitants nous ont informé qu'il devient le seul utilisable en saisons sèche alors que la production est très faible et qu'il ne suffit pas à satisfaire l'ensemble de la population.

La population présente affirme que l'eau est « douce » sur l'ensemble des puits.

Le contexte géologique et tectonique est très similaire à celui visible sur Magnévoitse, avec des pendages très marqués sur les migmatites affleurantes (Figure 20), et l'ensemble des mesures de fracture sont ainsi été regroupées pour constituer la rosace directionnelle de la Figure 19 et la Figure 40B. Il est important de noter que les faciès lithologiques très variés des gneiss migmatitiques (Figure 21 et Figure 22) peuvent avoir des processus d'altération différentes et donc influencer la circulation des eaux souterraines, en modifiant la perméabilité du milieu selon les différents litages de la roche.



Figure 20: Migmatites affleurantes à Andahivozaka haut, avec pendage vers le Nord-Ouest



Figure 21: Zone de contact entre deux lithologies différentes, l'une riche en amphiboles l'autre très riche en quartz, au sein des migmatites de Andahivozaka haut

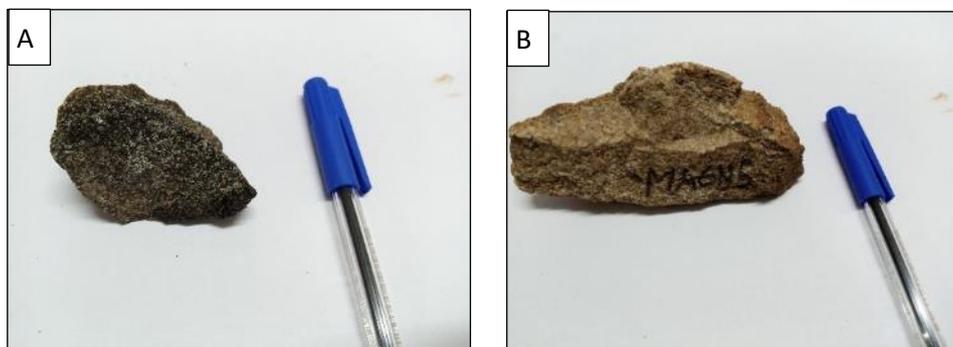


Figure 22: A) Faciès à amphibolite des roches migmatitiques et B) faciès psammitique de la même roche. Les deux échantillons ont été prélevés à moins de 10 cm l'un de l'autre

6.3.3. Ambanditse

Le fokontany d'Ambanditse est le plus peuplé de la commune de Jafaro, avec une population évaluée à près de 1900 habitants. Ce fokontany est bordé côté Ouest par la rivière Menambovo, qui est une des principales sources d'alimentation en eau de la population. Ce cours d'eau peut néanmoins disparaître en saison sèche et les habitants sont amenés à creuser le sable pour récupérer de l'eau souterraine de la nappe alluviale dans les zones où les dépôts sédimentaires sont le plus épais.

Cette rivière, d'une conductivité de 1348 $\mu\text{S}/\text{cm}$ proche du village de Ambanditse III lors de notre visite en avril 2022, présente une forte salinité en saison sèche et ne peut plus être consommée d'après la population...

Ambanditse Chef-lieu

Seulement un forage équipé d'une PMH (Figure 23), situé au niveau du chef-lieu du fokontany, permet d'alimenter en eau tous les villages du secteur en saison sèche. Ce puits très sollicité, qui approvisionne l'essentiel de l'année 250 ménages, se trouve être la principale source d'approvisionnement de plus de 400 foyers durant cette période critique. Cet ouvrage, où l'eau produite présente une conductivité de 1681 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ne suffit pas à assurer les besoins de tous durant une partie de l'année, selon la population. L'école principale de Ambanditse, détruite par le cyclone Batsirai et reconstruite avec des matériaux de fortune, ne dispose d'aucun accès à l'eau en dehors de la rivière Menambovo située à environ 1 km.



Figure 23: PMH du chef-lieu du fokontany de Ambanditse (village Anatake)

Ambanditse III

Le village de Ambanditse III, composés d'environ 150 ménages, est situé à 600 mètres de la rivière Menambovo et les investigations en bordure du cours d'eau ont permis de mettre en évidence différents éléments en lien avec la circulation des eaux souterraines. Des sables roux grésifiés, cartographiés sur la carte au 100 000^e Kerimosa-Beloha (Besairie 1974) superposent des migmatites altérées (Figure 24). Une légère réaction à l'acide chlorhydrique permet de mettre en évidence une cimentation calcaire de ces formations gréseuses. Au sein des migmatites, des veines de calcites (Figure 25), réagissant fortement à l'acide, sont également mises en évidence.

Comme il l'a déjà été suggéré, ces observations peuvent trouver leurs origines dans des dépôts de calcaires lacustre ou marins anciens, qui après dissolution, auraient pu affecter d'autres formations géologiques sous forme de veines en précipitant dans des fissures existantes ou sous forme de ciments dans des dépôts sédimentaires sous-jacents.



Figure 24: Migmatites surmontées de sables grésifiés à cimentation calcaire



Figure 25: Veines et plaquage de calcite visibles proche de Amanditse III

Des fractures d'origine tectonique bien marquées sont visibles au sein des migmatites et présentent globalement une orientation N60, comme le résume la rosace directionnelle de la Figure 26 A. Il a également été observé des veines de Quartz dont les orientations sont plutôt perpendiculaires à la fracturation (Figure 26 B). Ces dernières traduisent probablement des événements tectoniques anciens dont les fissures associées ont connu des précipitations siliceuses. Il a aussi été observé la présence d'oxyde de fer, apparemment de type hématite, sous forme de plaquage et de veines centimétriques dans les fissures de la roche.

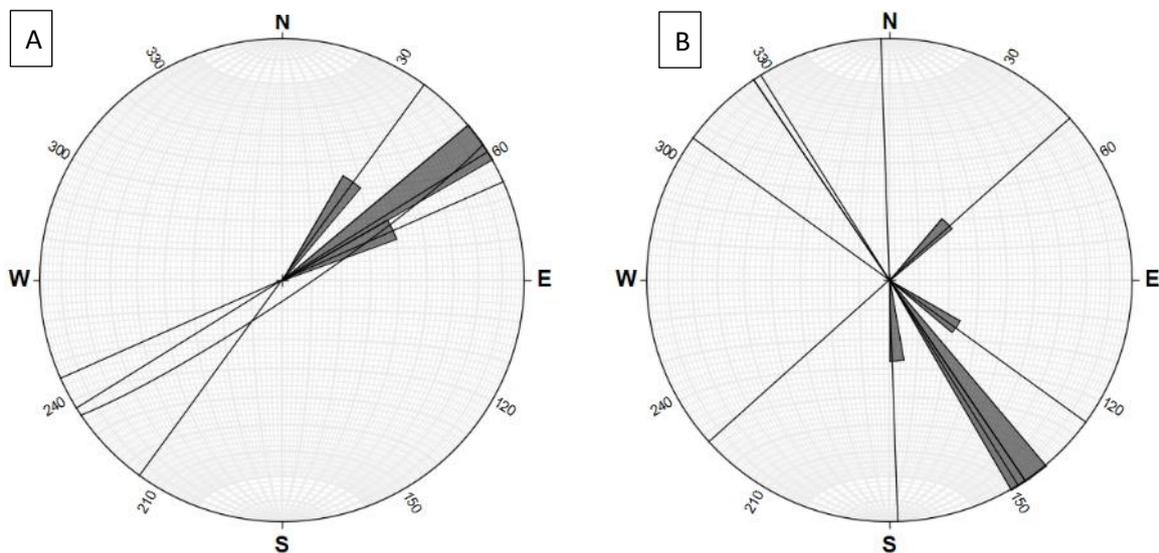


Figure 26: A) Rosaces directionnelles de la fracturation mesurée au niveau de Amanditse III (n=4) et B) des veines de Quartz (n=6)

Les éléments décrits ci-dessus traduisent des circulations d'eaux souterraines à différentes périodes géologiques, dans différents contextes physico-chimiques.

Par ailleurs, il a été mis en évidence que la minéralisation de l'eau de la rivière en surface est différente de celle de la nappe d'accompagnement contenue dans les alluvions du lit du cours d'eau. Le niveau statique de la nappe fût mis à jour en creusant seulement de 40 cm les sables alluvionnaires le 21 avril 2022 (Figure 27). La conductivité mesurée était de 1018 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tandis que celle de la rivière était de 1348 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et le pH était légèrement plus acide dans la nappe alluvionnaire (pH=8,0) que dans la rivière (pH=8,6).

Mais d'après les habitants de Anatake, qui ont l'habitude de s'approvisionner en eau dans la rivière Menambovo, le cours d'eau a sa salinité qui augmente du Nord au Sud, et cette eau peut devenir « très salée » en saison sèche.



Figure 27: Mesures physico-chimiques de l'eau de la nappe alluviale de la rivière Menambovo

Anatake

Toujours dans le fokontany de Ambanditse, le village de Anatake regroupe plus de 160 ménages dépendant d'un seul puits. Cet ouvrage, d'une profondeur de 25 m, présente une conductivité de 1715 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et ne se tarit jamais d'après les habitants. En revanche ce puits peut être insuffisant en saison sèche en raison de sa faible production à cette période. Les habitants couvrent alors leurs besoins avec l'eau de la rivière Menambovo, à environ 4 km, ou la nappe alluviale associée.

Un des habitants explique que au sein de la rivière, le passage d'une eau « douce » à « salée » est bien démarqué, et montre avec son bras une ligne Est-Ouest marquant une zone plus douce au Nord et plus salée au Sud.

6.3.4. Antanivelo

Les limites administratives fournies par le gouvernement malgache sur le secteur ne délimitent pas le Fokontany de Antanivelo mais l'inclut dans le fokontany de Ankobo. Ce dernier est en fait divisé en 7 fokontany différents, qui eux même regroupe différents villages.

Anzamani

Le village de Antanivelo Anzamanoï regroupe entre 150 et 200 familles qui dépendent d'un unique puits de 10 m de profondeur (Figure 42). Celui-ci ne permet pas de produire suffisamment d'eau pour tous les habitants présents. Le puisage se fait essentiellement le matin, après une nuit de recharge naturelle. Les prélèvements sont rationnés à 1 bidon par jour et par famille. Les personnes présentes expliquent qu'ils ont ainsi moins de 5l/personne/jour. L'eau prélevée le 22 avril présentait une conductivité de 1415 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec un pH de 7,88. Sans ce puits, les habitants vont se fournir à la rivière Menambovo, nécessitant 5h de marche aller/retour.

La plupart des enfants sont ici non scolarisés en raison de la distance trop grande vers les écoles les plus proches (Beabobo et Anzanabo). Lorsque l'on pose la question de la raison pour laquelle un village a été créé ici, les habitants expliquent que la présence d'arbustes permet de nourrir et de faire de l'ombre au bétail.



Figure 28: Puits de Antanivelo Anzamanoï

L'ensemble du village se trouve sur des formations très riches en Quartz (Figure 29), altérées, et une imposante pegmatite de Quartz rose d'environ 800 m² est visible en surface à quelques centaines de mètres du hameau principal. L'orientation de cet objet géologique et les fractures présentes sont globalement N65, ce qui est cohérent avec les mesures faites dans le secteur de Ambanditse.



Figure 29: Quartzite altérée avec veines d'Oxyde de Fer à Anzamani

Antanivelo Chef-lieu

Le chef-lieu d'Antanivelo regroupe 120 ménages dans le village principal mais l'on compte plus de 180 habitations en tenant compte des autres villages situés à moins de 2 kilomètres. La population a l'habitude de creuser dans le lit de la rivière juste à côté pour subvenir à ses besoins. Il peut arriver qu'en saison sèche très marquée même la nappe alluviale se tarit, et les habitants descendent plus en aval pour trouver des zones de « creux » dans le lit du cours d'eau. L'eau de surface présente en avril 2022 était relativement douce avec $422 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Ce site permet d'observer clairement les gneiss migmatitiques de la région (Figure 30 A) ainsi qu'une couche calcaire de plus d'un mètre d'épaisseur recouvrant par endroit les migmatites. Cette couche se présente sous forme de conglomérats (Figure 30 B) avec des morceaux de quartz émoussés et des galets de roches variées. Il est remarquable de constater également des veines et des plaquages de calcites au sein des migmatites. Ces derniers pourraient être issus de la dissolution et de la précipitation des formations calcaires sus-jacentes.

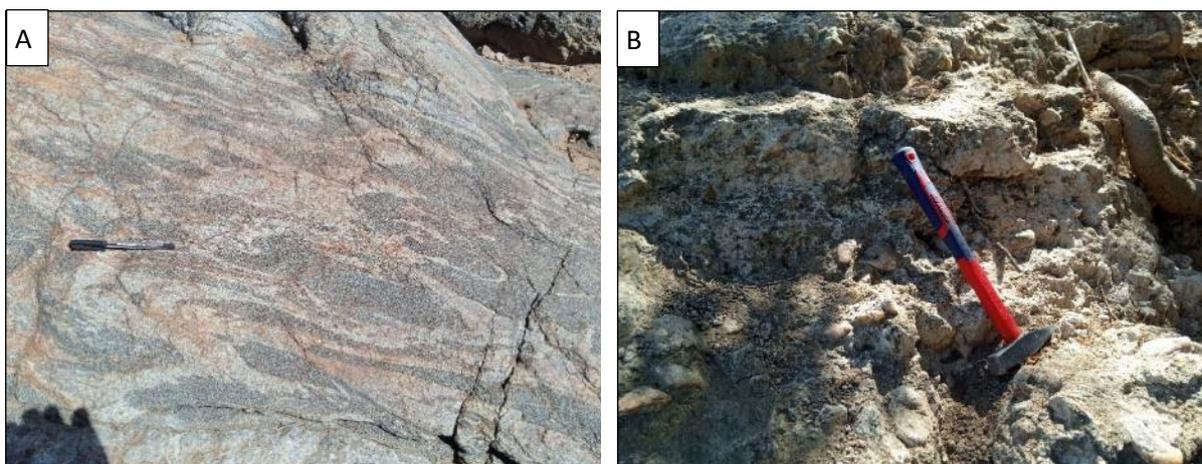


Figure 30: A) Gneiss Migmatitiques et B) Formations calcaires détritiques au niveau de Antanivelo Chef-Lieu

De nombreuses fractures sont également visibles sur le même site en bordure de rivière. Les directions mesurées sont regroupées sur la Figure 31. Tout comme évoqué pour les autres secteurs d'études, les

pendages des gneiss migmatitiques étant cohérents sur toute la commune de Jafaro, toutes les mesures sont regroupées et mises en lumière sur la Figure 40.

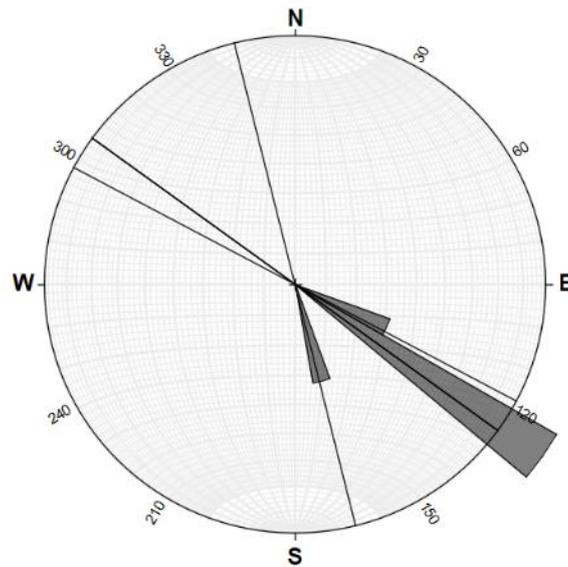


Figure 31: Rosace directionnelle des fractures majeures relevées sur Antanivelo Chef-Lieu (n=5)

De nombreuses mines, anciennes et récentes, ont été repérées dans le secteur d'Antanivelo. Elles se présentent sous la forme de galeries horizontales partant de puits pouvant faire plus de 10 m de profondeur. Le minerai extrait est le corindon (famille minérale dont fait partie le saphir) et le grenat. Bien que ces exploitations puissent être lucratives, les communautés locales ont obtenu leur fermeture, en raison des problèmes de sécurité associés à cette activité. Par ailleurs il est important de noter que ce type de mines favorise souvent le rejet d'Arsenic, présent naturellement dans ce type de roches, dans les cours d'eau environnant.

6.3.5. Ankobo I

Le village de Ankobo I possède la principale école du secteur sud-Ouest de la commune de Jafaro, qui regroupe plus de 300 enfants. Il est important de noter qu'une grande partie des enfants de la commune ne sont pas scolarisés en raison de la distance trop grande entre leur foyer et l'école la plus proche (souvent 2h à 3h de marche). Les enseignants et les élèves s'approvisionnent ici en eau en creusant dans les alluvions du cours d'eau à proximité de l'école (Figure 32). L'eau est douce avec une conductivité de 358 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Des fractures, d'orientation globalement N110, ont pu être observées sur les berges de la rivière à proximité.



Figure 32: Alluvions et affleurement de migmatites à 200 m de l'école de Ankobo I

La population présente dans un rayon de 1,5 km autour de l'école se compose d'environ 170 foyers (source OSM). Un forage avait été réalisé à 800 m de l'établissement en 2008 mais a apparemment été vandalisé. D'une profondeur de 16 m, on ignore s'il était vraiment productif.

Le directeur souhaiterait également qu'un projet de barrage, de type « sand dam », voit le jour à proximité du village où se trouve l'école. Il a déjà ciblé un resserrement du lit mineur du cours d'eau, entre les des deux rives rocheuses, où un tel projet pourrait se réaliser selon lui.

6.3.6. Ambari

Ambari Centre

Le fonkatany de Ambari, officiellement inclus dans celui de Magnevoise, comporte également une école, au sein du village de Ambari Centre. L'établissement, détruit par le cyclone batsiraï, est de taille nettement plus petite que celui de Ankobo I. Les élèves présents assistent au cours sous un tamarin. Environ 400 habitants vivent dans Ambari Centre et se fournissent en eau dans un puits busé de 16 m de profondeur présent dans le village (Figure 33). La production du puits est en revanche tellement faible qu'ils doivent parfois aller puiser de l'eau dans une carrière de saphir à 3 km du hameau.



Figure 33: Puits de Ambari Centre

Ambari Marolava

Les hameaux de Ambari Marolava regroupent près de 100 familles selon les informations locales. Les habitants dépendent d'un seul puits équipé d'une PMH, qui produit une eau plutôt salée avec 3320 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En saison sèche marquée, ce point d'eau ne suffit pas à subvenir aux besoins de tous les foyers. L'école la plus proche se trouve à Ambari Centre, à environ 5 km de marche. Il est à noter qu'un Comité de gestion de Point d'Eau fonctionne ici, d'après les habitants, avec une cotisation mensuelle, qui permet la réparation de la PMH si besoin.

6.4. CHOIX DES SITES SUR JAFARO

L'étape de caractérisation des besoins, couplés aux observations géologiques et hydrogéologiques, s'est faite dans les fokontanys les plus peuplés et n'ayant pas d'accès à l'eau à proximité. Différents paramètres sont donc rentrés en jeu pour sélectionner les sites où sera poursuivi l'étude hydrogéologique :

- Nombres de familles bénéficiaires
- Présence d'une école
- Nouveaux points d'eau déjà prévus par MSF
- Contexte hydrogéologique favorable ou défavorable

Le besoin d'un nouveau point d'eau, surtout en saison sèche, étant présent partout, le choix ne fût pas aisé. Le fokontany de Ambanditse et ses nombreux villages et la présence d'une école paraît être une priorité, mais un projet de réalisation de deux forages au jetting dans ce secteur justifie de ne pas le sélectionner parmi les trois sites retenus pour la suite des investigations. Le secteur de Andahivozaka Haut, proche de Magnevotse, présente une forte densité de population sans accès à l'eau et a ainsi été retenu. Il en est de même pour le fokontany de Antanivelo, qui regroupe un nombre important de villages. A Ankobo I, la présence de l'école, accueillant de nombreux élèves venant de différents fokontanys a été un élément majeur dans la décision de le sélectionner comme site bénéficiant d'investigations plus poussées.

Les différentes observations et mesures in-situ, présentés dans le paragraphe précédent, couplées aux études des images satellites, ont permis de préciser dans quelle zone il est préférable de poursuivre l'étude hydrogéologique, au sein des sites sélectionnés.

7. RECHERCHE DE LINEAMENTS – STRUCTURES TECTONIQUES

7.1. MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

En plus des différentes observations réalisées sur le terrain, une des étapes essentielles de la prospection hydrogéologique est l'étude des différentes données satellitaires. Les accidents tectoniques, les contacts entre différentes formations géologiques, les déformations de la roche et les intrusions filoniennes de quartz ou volcaniques sont autant de cibles hydrogéologiques qui peuvent être détectées par les images satellites, qu'elles soient du domaine visible ou invisible.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé dans cette étude provient du MNT mondial issu des données radar de la NASA, d'une résolution de 30 m, mis à disposition en accès libre par les Etats-Unis depuis 2014 (Figure 34).

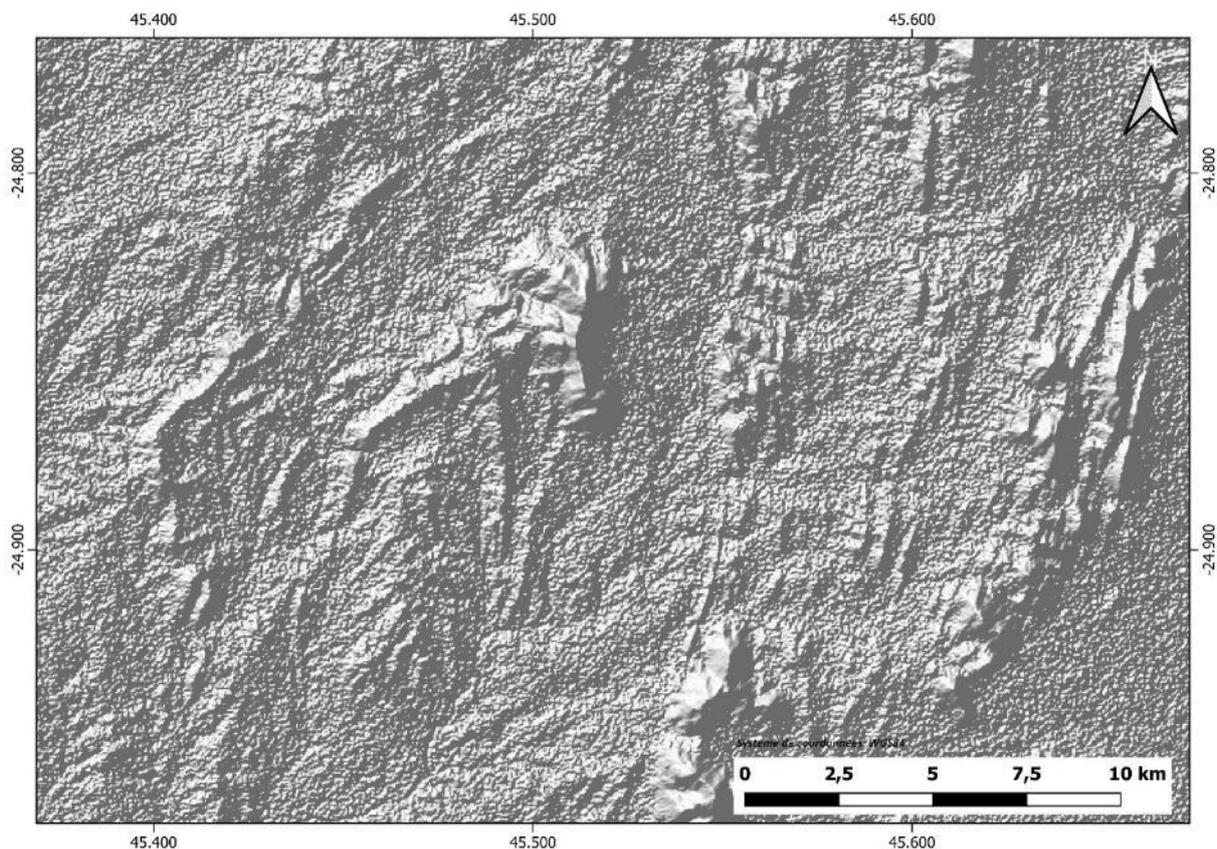


Figure 34 : Extrait du Modèle Numérique de Terrain dans le secteur de Jafaro (Source : NASA)

Ce type de données permet de connaître l'altitude en tout point, de mettre en évidence la présence de bas-fonds, de montagnes, et ainsi de mieux comprendre les écoulements en surface mais également d'éventuelles zones de recharges des eaux souterraines. Par ailleurs les structures filoniennes et les différents types de roches présentent des degrés d'altérations et d'érosion différentes, ce qui peut également être mis en évidence avec ce type de données. Il en est de même pour les accidents tectoniques (failles), qui ont pu déformer ou favoriser l'altération des formations géologiques affectées. Ces derniers, tout comme les filons, aboutiront à des structures linéaires pouvant être détectées.

7.2. IMAGES SATELLITES DOMAINE VISIBLE

Les images satellites du domaine du visible permettent également de mettre en lumière des linéaments, mais d'origine végétale. Il peut s'agir d'espèces d'arbres différentes ou présentant une meilleure croissance, liées aux circulations d'eau souterraines. Celles-ci peuvent être influencées par la présence de failles (Figure 35), de filons, ou le contact entre deux formations géologiques différentes. La Figure 36 met en lumière des linéaments de végétation qui sont liés à la déformation de la roche et aux différentes lithologies présentes sur la commune de Andalatanosy.

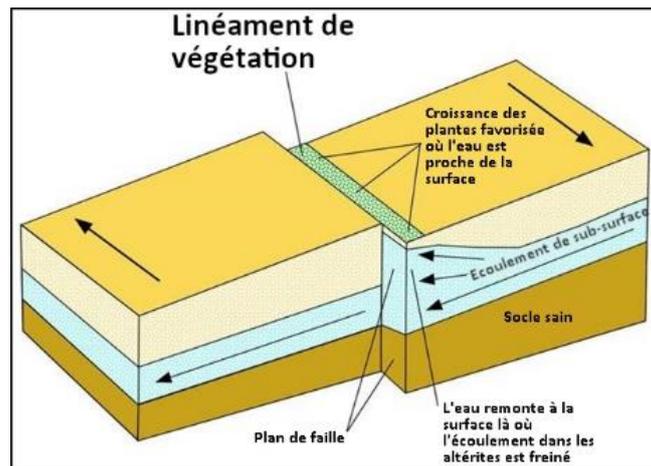


Figure 35 : Formation d'un linéament de végétation à partir d'un accident tectonique (source : epod.usra.edu)

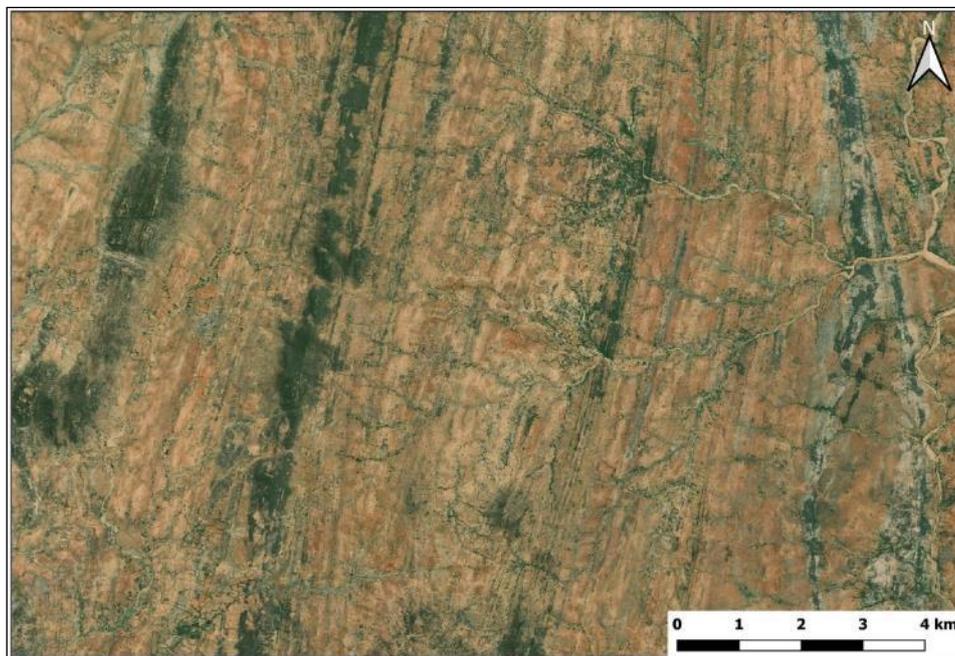


Figure 36 : Linéaments de végétation visibles sur une image satellite dans le secteur de Andalatanosy (Source : Maxar Premium)

7.3. IMAGES SATELLITES RADAR

La compréhension du fonctionnement hydrogéologique des secteurs étudiés passe par la prise en compte de toutes les informations existantes. On peut également s'appuyer sur des données plus récentes, comme les images radars acquises par de nouvelles technologies. Le satellite Sentinel 1A mis en orbite en 2014 est équipé d'un module radar, le SAR (Synthetic Aperture Radar), permettant l'acquisition de données de la surface terrestre avec une résolution de 10 m, quelques soient les conditions météorologiques. Ce module est conçu pour apprécier, entre autres, la rugosité de l'extrême surface terrestre.

Ces données peuvent ainsi aider à délimiter les zones à rugosité constante, pouvant être révélatrices d'une géologie identique. De la même manière, des discontinuités telles que les failles majeures et les filons peuvent ainsi ressortir sous forme de linéaments. La Figure 37 montre un exemple d'interprétation issue des données acquises à l'Ouest du secteur de Taranake, avec une polarisation de type VH (transmission verticale et réception horizontale). Des linéaments bien marqués, d'orientation N30 à N40 et N105 sont ainsi déterminés dans cette zone.

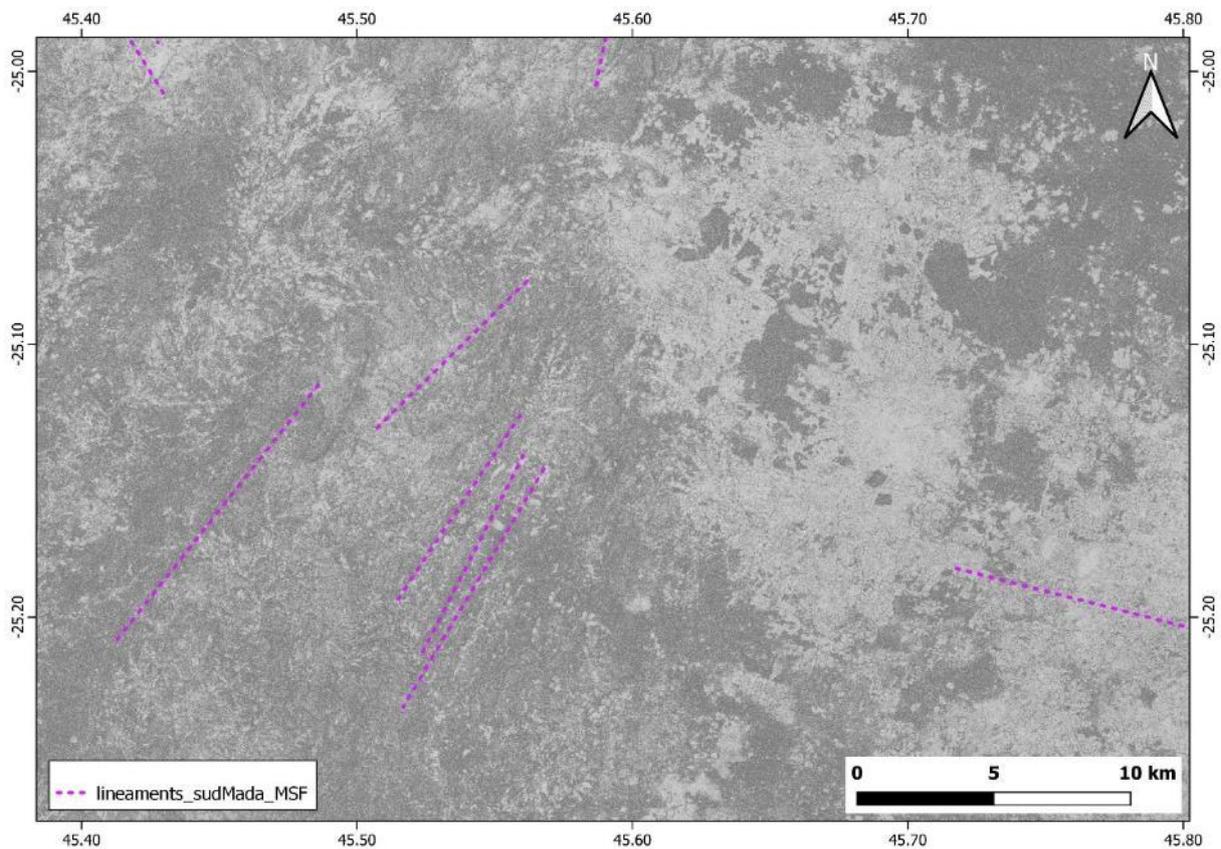


Figure 37: Linéaments issus des images Sentinel sur le secteur de Sihanamaro/Tsihombe (Source : ESA)

7.4. MESURES DE LA DEFORMATION TECTONIQUE IN-SITU

Le contexte géologique général de la commune de Jafaro a permis l'observation et la mesure directe de nombreuses fractures dans la roche, ainsi que celle des différents litages lithologiques liés à la déformation de celle-ci (Figure 38), et également des filons intrusifs de Quartz. Ces mesures ont pour intérêts de mieux comprendre ce qui contrôle la circulation de l'eau dans le sous-sol, et ainsi contribuer

à positionner et surtout orienter les profils géophysiques sur les structures géologiques intéressantes pour cette étude.

Cette étape importante de l'étude hydrogéologique n'était pas réalisable sur les sites Ambatomainty, Taranake et Botreoke, en raison de la couverture sédimentaire qui masque ces différents éléments.



Figure 38: Litages lithologiques marquant les migmatites sur le Fokontany de Antanivelo

Les fractures sont les principales structures drainantes au sein du socle rocheux et constituent ainsi les objets les plus importants pour la recherche d'eau souterraine dans ce milieu. A l'échelle de la commune, il a ainsi été mis en évidence deux grandes familles de fractures d'orientation N60 et N135 (Figure 39). Tandis que la première n'avait pas été mise en évidence par l'analyse des images satellite et photos aériennes, la seconde correspond à des directions de linéaments déjà mis en lumière et également aux accidents tectoniques régionaux affichés sur la carte géologique au 1 :500 000 (Figure 1).

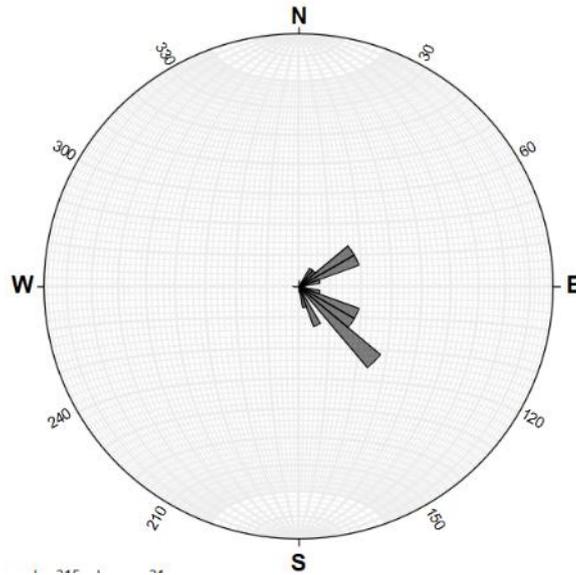


Figure 39: Rosace directionnelle des fractures mesurées sur la commune de Jafaro (24 mesures)

Les roches métamorphiques en place, principalement des gneiss schistosés et des migmatites, présentent des litages lithologiques très marqués de taille métrique à décimétrique. Ces structures sont globalement orientées N60 et présentent un pendage vers le nord-ouest de 38° en moyenne (Figure 40).

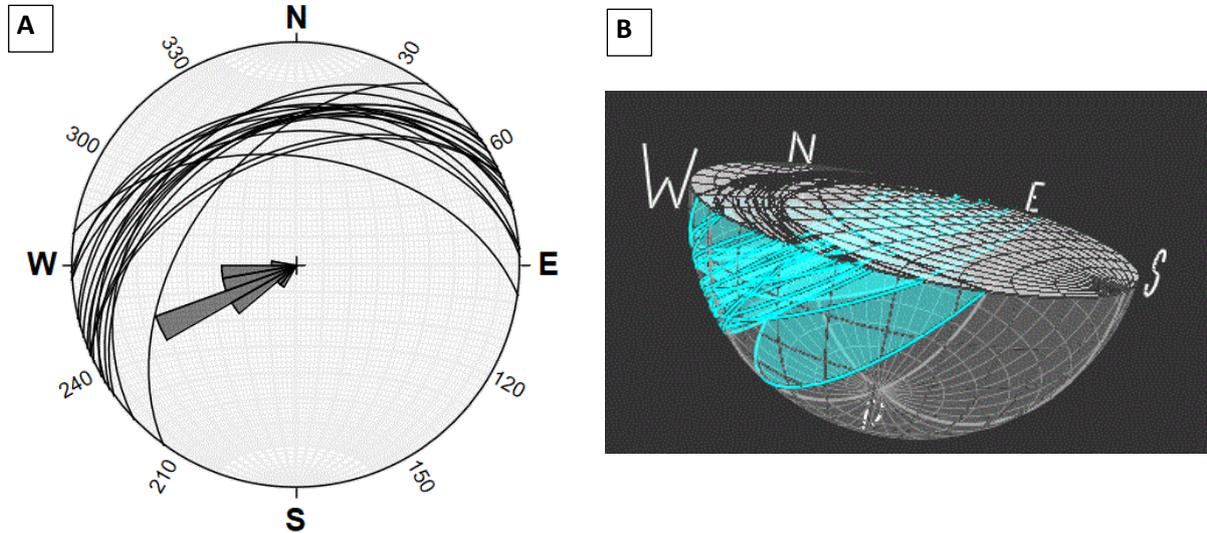


Figure 40: A) Rosace directionnelles et B) Stéréogramme 3D des plans de litage des migmatites et gneiss schistosés sur la commune de Jafaro (19 mesures)

De nombreuses veines de Quartz ont par ailleurs été observés, principalement sur le fokontany de Ambanditse, et présentent une orientation générale N150 (Figure 41).

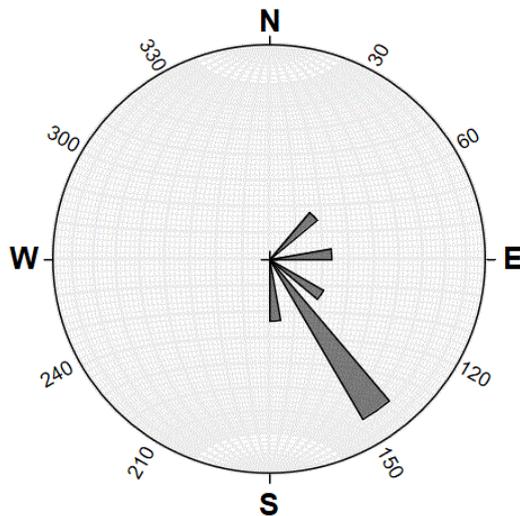


Figure 41 : Rosace directionnelle des filons de Quartz mesurés sur la commune de Jafaro (7 mesures)

L'ensemble des observations de terrain citées ci-dessus, couplés aux analyses de photos aériennes et des différentes images satellites, a permis le positionnement des profils de géophysiques électriques. Comme pour les premiers sites, ils sont orientés le plus perpendiculairement possible aux structures drainantes supposés, afin de localiser le plus précisément possible les cibles hydrogéologiques pour de futurs forages.

8. CHOIX DU POSITIONNEMENT DES PROFILS ELECTRIQUES

8.1. AMBATOMAINTY

Suite aux différentes observations de terrain et après étude des linéaments pouvant être mis en lumière à l'aide des différentes photos aériennes et images satellites, deux tomographies de résistivité électriques ont été placés entre 800 et 1600 m du village principal et à 500 m d'un autre village à proximité (Figure 42). Les linéaments issus de l'analyse du MNT et des données *Sentinel* montrent notamment des structures linéaires d'orientation N38 dans ce secteur. Les panneaux électriques sont donc placés le plus perpendiculairement possible à ces structures. Afin de pouvoir interpréter le signal électrique, une autre tomographie de calage a aussi été positionné sur un contact entre une formation calcaire affleurante et une formation gréseuse située à moins de 2 km des tomographies souhaitées pour l'implantation d'un forage. L'objectif de cette tomographie de calage est de pouvoir relier les données de résistivité mesurées à une réalité géologique.

Suite à la découverte d'un lieu de culte au niveau de la tomographie AMB1 lors de l'installation du dispositif, il a été décidé de réaliser une extension de AMB2 afin d'avoir un panneau électrique s'étalant sur un linéaire de 500 m.

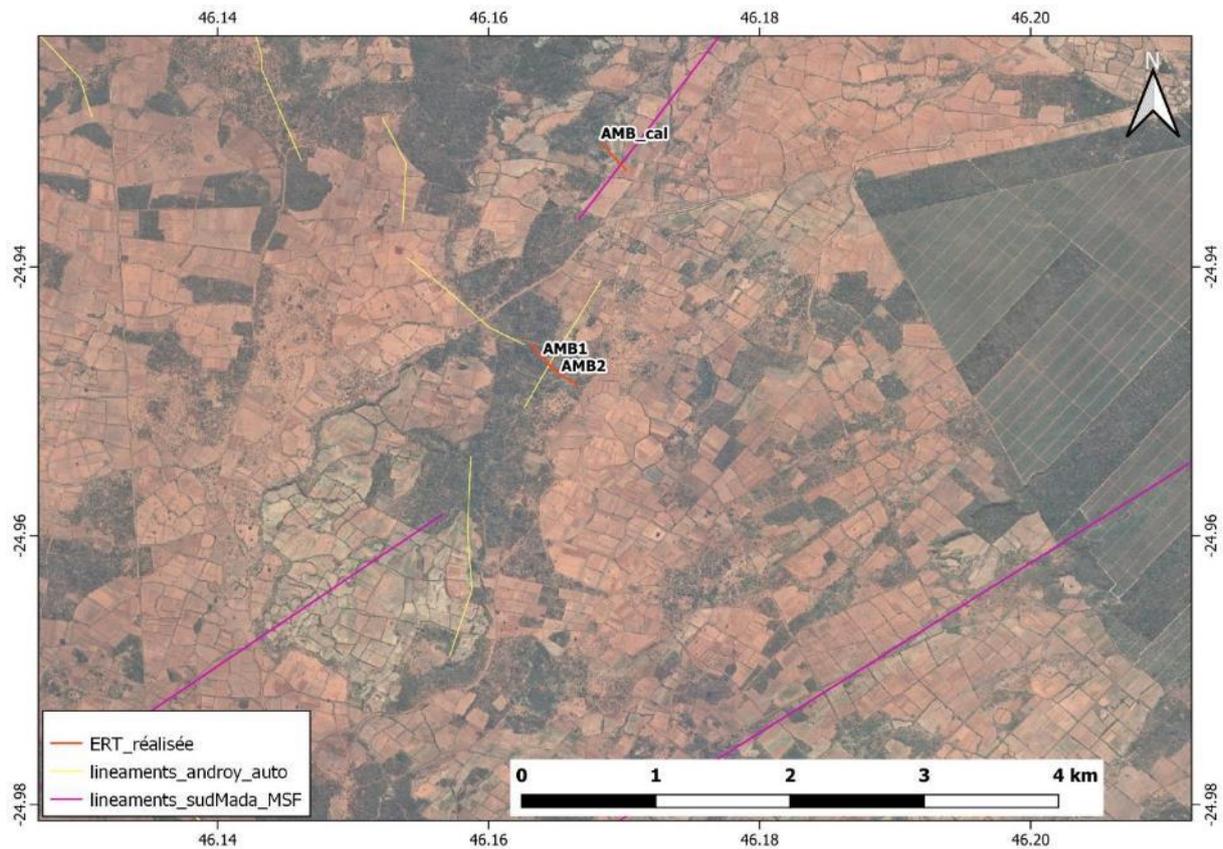


Figure 42 : Positionnement des tomographies électriques sur le secteur d'Ambatomainty. L'ERT Amb_cal est une tomographie de calage

8.2. TARANAKE

Le site de Taranake présente la particularité d'avoir des figures géomorphologiques typiques des milieux karstiques : les dolines (cf. § 8.2). La distribution spatiale de ces dolines, renseignées au GPS sur le terrain et à l'aide des images satellites de GoogleEarth, montre une orientations globalement N110 (Figure 43), qui correspond également à l'orientation majeure des linéaments mis en évidence par les données satellitaires. Les tomographies ont donc été positionnées au niveau de dolines et aussi perpendiculairement à cette orientation (Figure 44). Les centre des panneaux se situent ici à 500 et 700 m de distance du village principal.

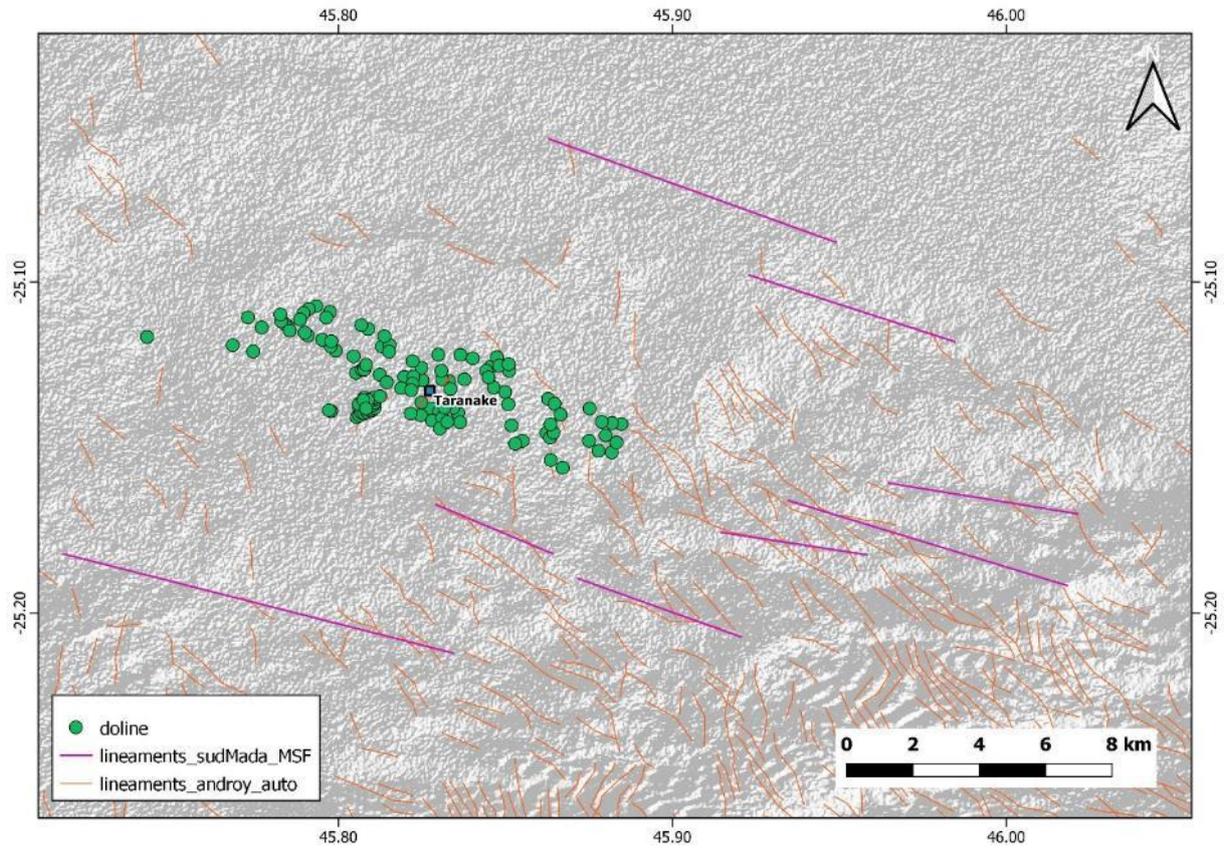


Figure 43: Répartition des dolines et des linéaments sur le secteur de Taranake

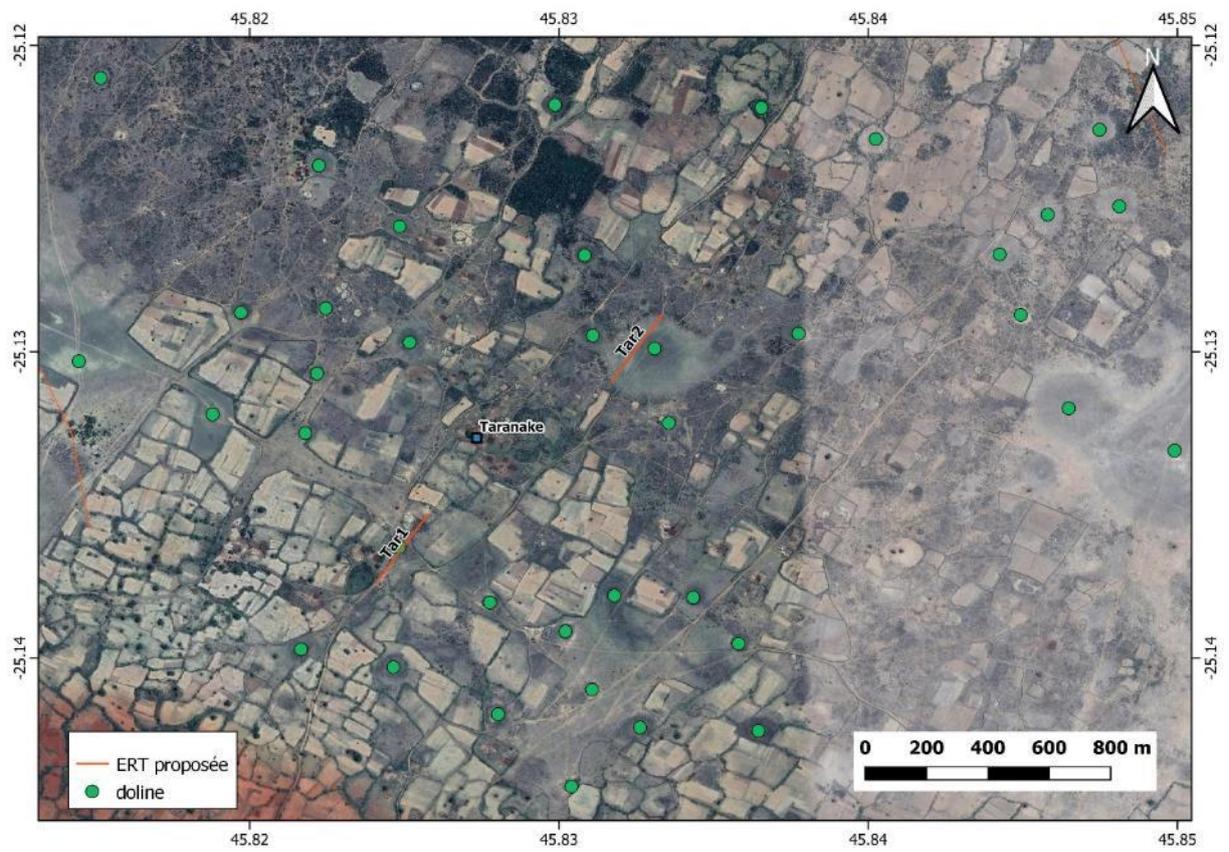


Figure 44: Positionnement des tomographies électriques sur le secteur de Taranke

8.3. BOTREOKE

A 12 km du village principal de Betroeke se situe un forage d'une profondeur de 180 m, abandonné en raison d'une salinité trop élevée selon les habitants. Cet ouvrage, apparemment réalisé par la JICA il y a plus de 30 ans, se révèle être un point de calage pour interpréter le signal électrique dans cette zone. La profondeur de l'ouvrage dépassant les 160 m, il a été décidé de réaliser également, en plus d'une tomographie de calage, un sondage électrique verticale (SEV) à proximité du forage existant. L'avantage du SEV est d'atteindre une profondeur d'investigation plus grande, mais selon une même verticale.

A partir des structures linéaires identifiées par analyse du MNT et des linéaments de végétation, les deux tomographies destinées à l'implantation d'un forage ont été positionnés selon une orientation N25 dans des secteurs éloignés de 400 et 1000 m par rapport au village principal (Figure 45).

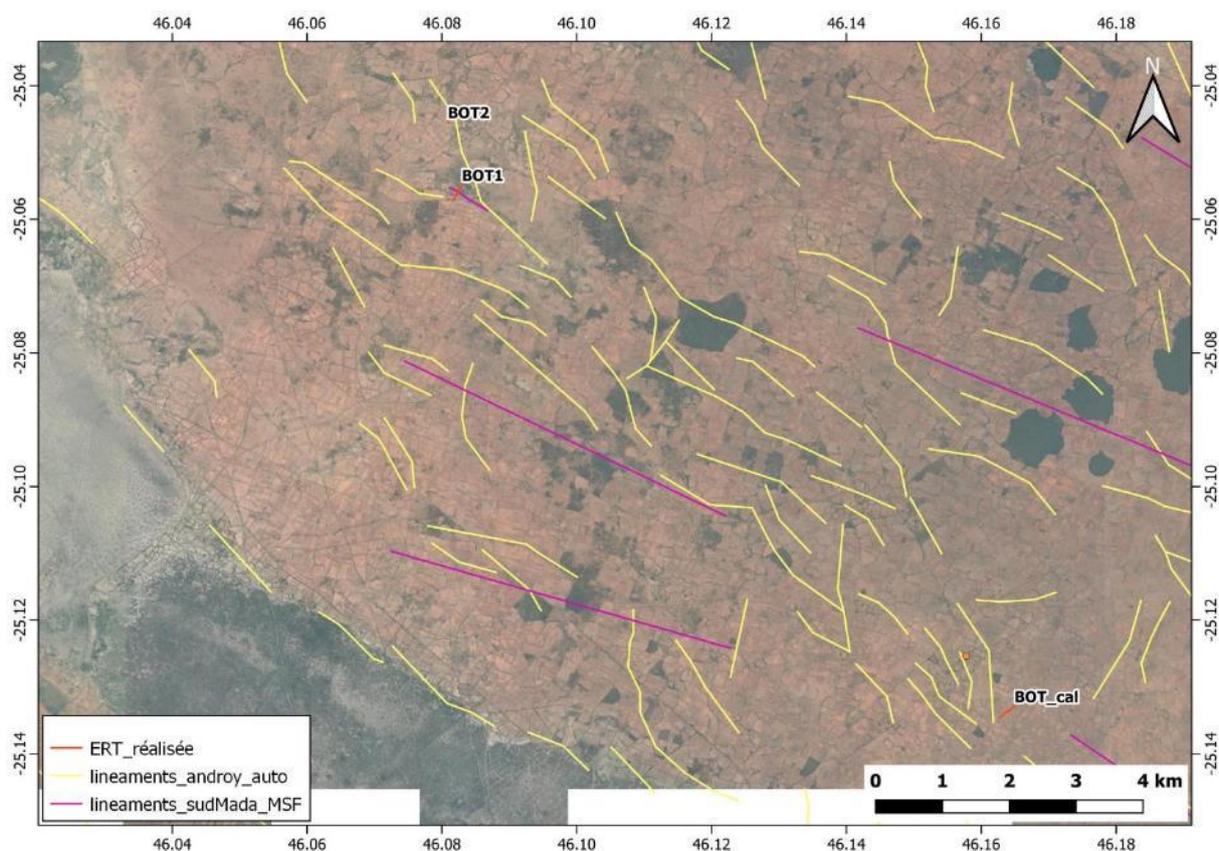


Figure 45 : Positionnement des tomographies électriques sur le secteur de Botreoke. L'ERT Bot_cal est une tomographie de calage

8.4. ANDAHIVOZAKA HAUT

Sur Andahivozaka Haut les tomographies ont été positionné et orientés en fonction des principaux linéaments mis en évidence et des mesures in-situ des fractures tectoniques. Un lieu de culte a néanmoins influencé l'orientation de MAG1. Ainsi la première tomographie est orientée N62, pseudo-perpendiculairement à un alignement végétal ainsi qu'aux fractures mesurées à proximité, et dans un

creux topographique (Figure 46). Le panneau électrique MAG2 d'orientation N134 et recoupe un linéament observé sur le MNT.

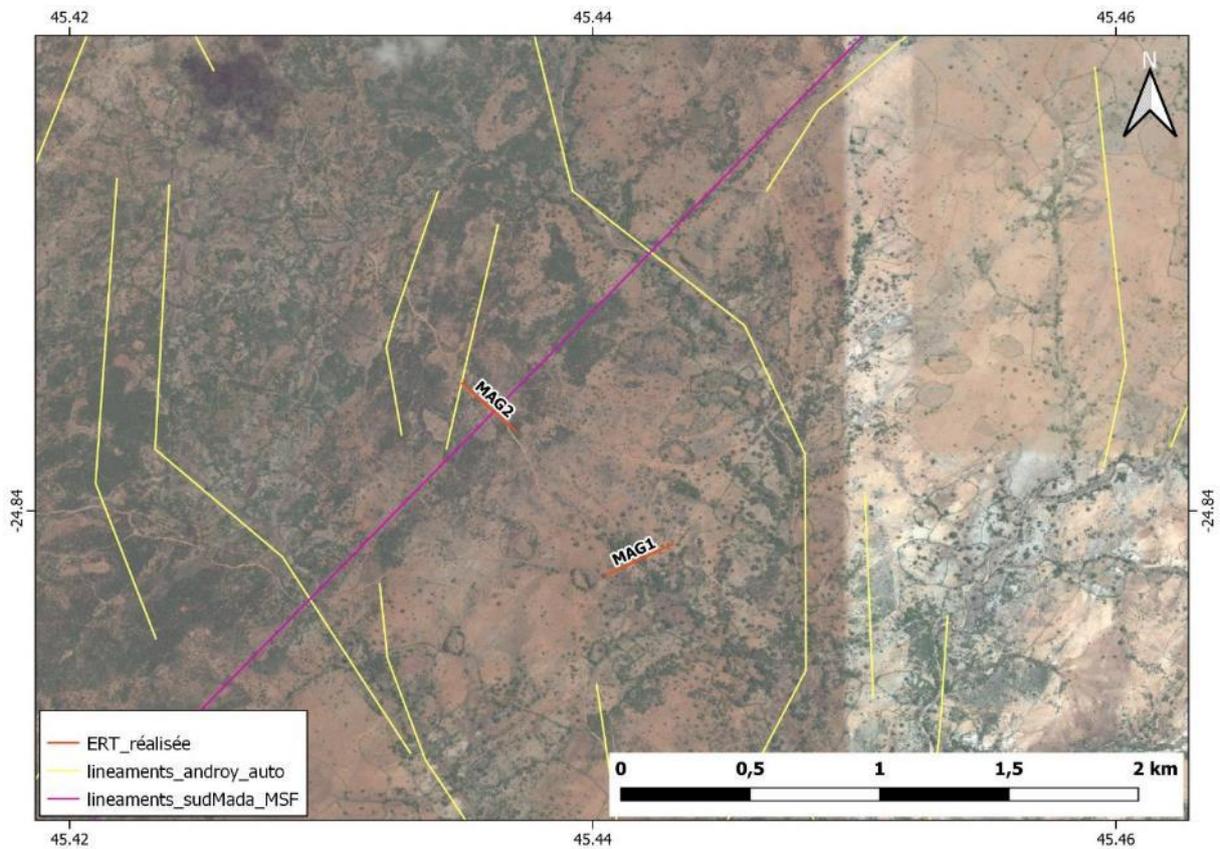


Figure 46: Positionnement des tomographies électriques sur le secteur de Andahivozaka Haut

8.5. ANTANIVELO

Sur Antaniveilo, les fractures mesurées in-situ sont cohérentes avec l'orientation du linéament principal mis en évidence par l'analyse des images Sentinel, avec une orientation N120. Deux tomographies ont ainsi été positionné pseudo-perpendiculairement à cet axe, pour mettre en évidence les accidents tectoniques supposés dans la zone. Vu la répartition de la population et les indices mis en évidence, les deux tomographies ANK1 et ANK2 ont été positionné l'un à la suite de l'autre sur un même axe (Figure 47). Par ailleurs la rivière temporaire à proximité est partiellement une zone de recharge du réseau fracturé sous-jacent.

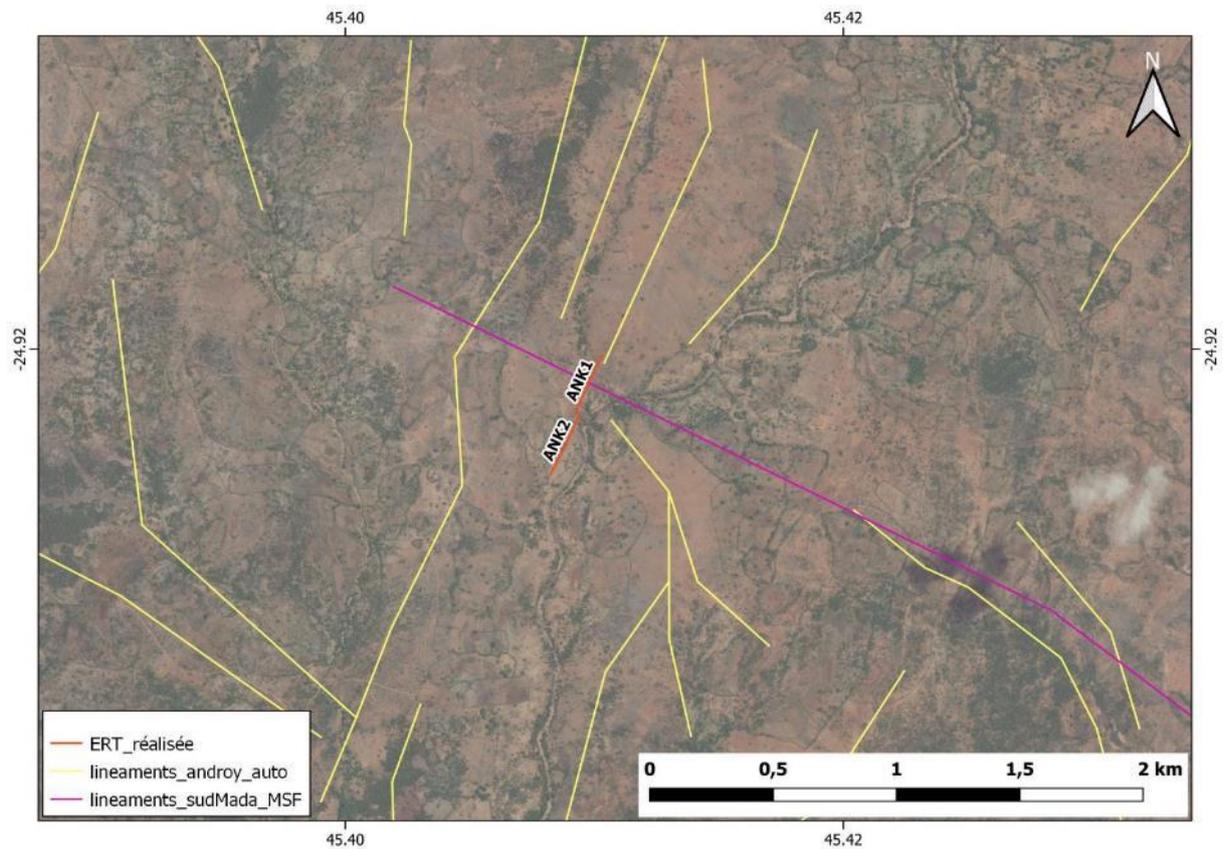


Figure 47: Positionnement des tomographies électriques sur le secteur de Antanivelo

8.6. ANKOBO I

Sur Ankobo I, proche de l'école, il a été mis en évidence une fracturation tectonique, visible in-situ sur les berges de la rivière, d'orientation N110 tandis qu'un linéament de végétation mis en lumière grâce à GoogleEarth présente une orientation N36. Les tomographies ANK3 et ANK4 ont ainsi été positionné et orienté perpendiculairement à aux structures supposées liés à ces entités. Un lieu de culte présent au niveau de ANK4 a influencé son orientation. Par ailleurs, lors de la dernière visite de terrain dans ce secteur, le directeur a informé qu'une personne ayant un don pour trouver de l'eau avait annoncé qu'il était possible d'avoir un point d'eau dans le secteur de ANK4 !

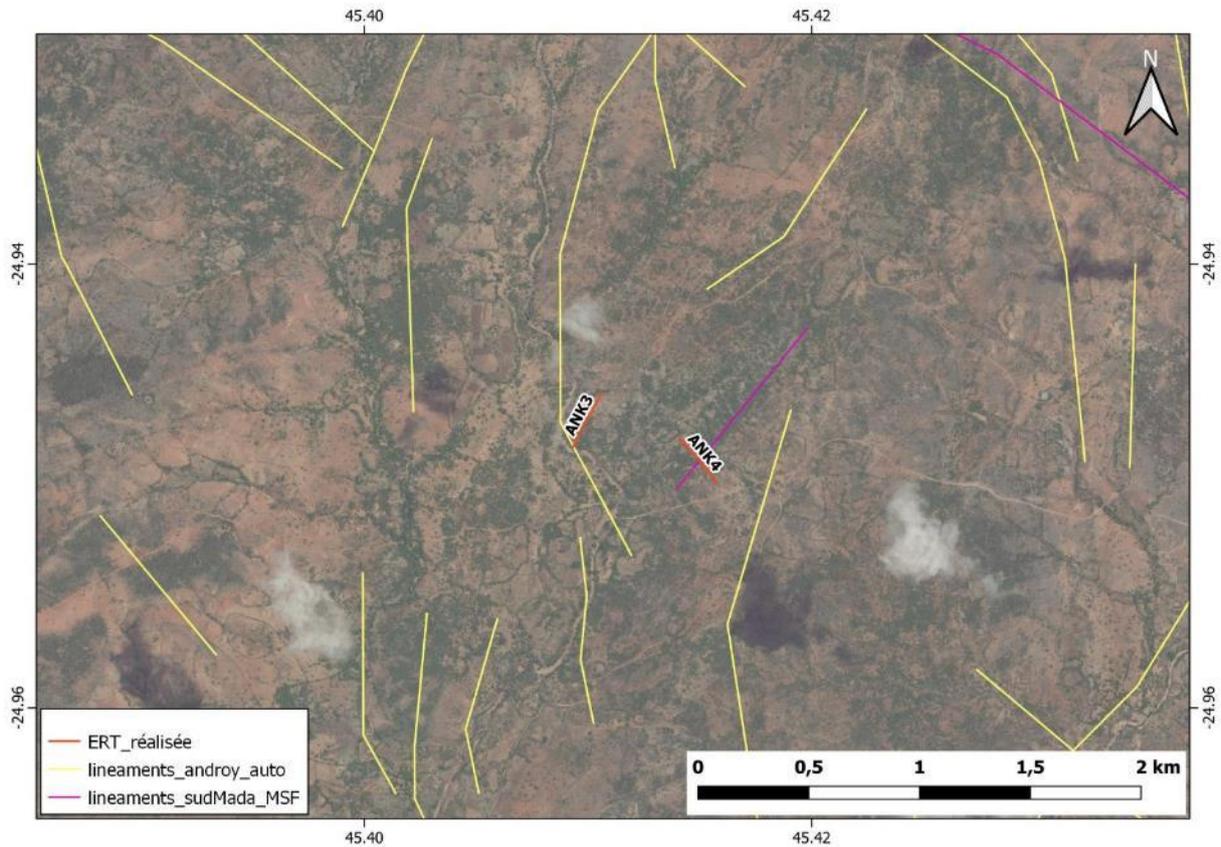


Figure 48: Positionnement des tomographies électriques sur le secteur de Ankobo I

9. REALISATION DES TOMOGRAPHIES DE RESISTIVITE ELECTRIQUE

9.1. METHODE D'ACQUISITION

La prospection électrique implique la détection d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. Le principe de base consiste à injecter un courant continu I grâce à deux électrodes A et B, et de mesurer la différence de potentiel V grâce à deux électrodes de mesures, couramment appelées M et N (Figure 49).

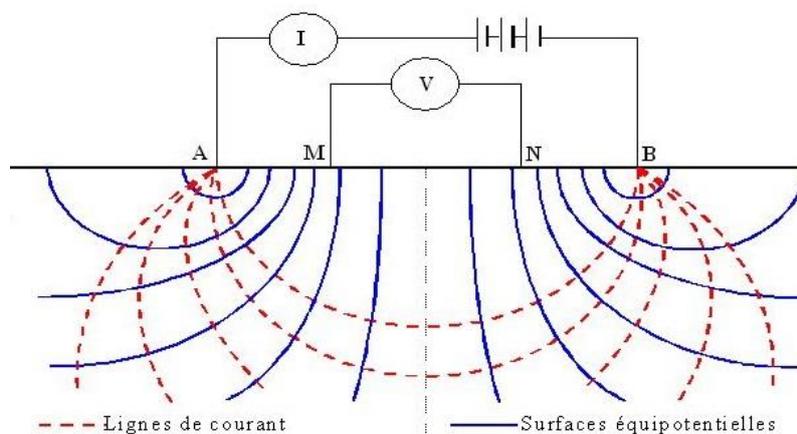


Figure 49: Principe de la mesure de résistivité électrique du sous-sol

L'écartement des électrodes A et B va déterminer la profondeur d'injection des lignes de courant. En faisant varier le positionnement et l'écartement des électrodes d'injections, ainsi que des électrodes de mesures, on va pouvoir obtenir un nuage de points de mesure au sein d'une section de forme trapézoïdale (Figure 50). Il s'agit d'une tomographie électrique.

La méthodologie proposée dans cette prospection s'appuie sur cette technique de tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography), avec 60 électrodes, ayant une distance inter-électrode de 5 m ($a=5$ sur la Figure 50). Les levés mesurent la résistivité électrique du sous-sol. C'est la méthode la plus utilisée dans la recherche hydrogéologique car chaque gamme de valeur de résistivité obtenue aura une correspondance géologique supposée.

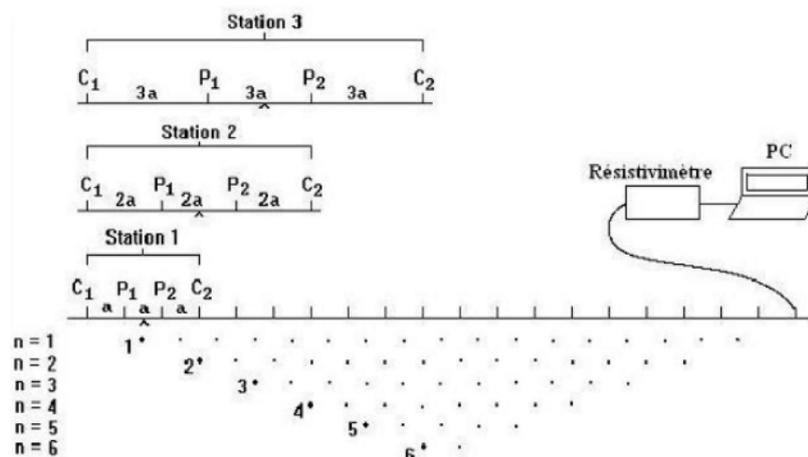


Figure 50: Principe d'acquisition en tomographie électrique (Loke, 2004)

Configurations d'acquisition

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en ce qui concerne l'amplitude du signal, la profondeur d'investigation et la résolution. Les dispositifs utilisés dans le cadre de cette étude sont présentés ci-dessous.

- Le dispositif **dipôle-dipôle** donne une très bonne résolution des terrains de sub-surface et pour les discontinuités verticales. Il est moins sensible aux effets latéraux (structures parallèles au profil, ravines ou crêtes parallèles au profil) que le dispositif Wenner-Schlumberger. Par contre, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation peut être moins importante que celle atteinte par le dispositif Wenner-Schlumberger.
- Le dispositif **Wenner-Schlumberger** est beaucoup plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte grâce à un meilleur rapport signal/bruit.
- Le dispositif **pôle-pôle** est quant à lui utilisé pour investiguer à plus grande profondeur, mais se trouve être plus sensible au bruit que les deux dispositifs précédents, et bénéficie d'une résolution médiocre.

La configuration Wenner-Schlumberger sera utilisée pour investiguer les structures superficielles, tandis que celle en pôle-pôle sera utilisé pour les structures en profondeur, notamment pour le domaine sédimentaire dans le cadre de ces travaux. Concernant la recherche d'eau en aquifère de

socle, le dispositif dipôle-dipôle sera utilisé pour mettre en lumière d'éventuels couloirs de fractures, souvent disposés de façon verticale. Le dispositif Wenner-Schlumberger sera dans tous les cas utilisé quel que soit le contexte géologique.

Les lignes de courant étant déformées en fonction de la géométrie utilisée, il est nécessaire de recalculer la résistivité obtenue, afin d'obtenir une résistivité vraie à partir de la résistivité apparente. Le modèle géoélectrique s'obtient ensuite par inversion des données expérimentales en utilisant le logiciel d'inversion Res2Dinv de Loke et al. Cette opération est détaillée en Annexe 2 et les données brutes de résistivité apparente sont présentées en Annexe 3. Le matériel utilisé pour l'acquisition est le système WGMD-4 de GOLD avec ces accessoires à 60 électrodes (Figure 51 et Figure 52 A). Afin d'avoir une meilleure injection du courant dans le sol et donc un meilleur signal de résistivité mesuré, de l'eau salée fût déversé sur chacune des électrodes (Figure 52 B).



Figure 51: Matériel d'acquisition WGMD-4 de GOLD (MSF 2022)

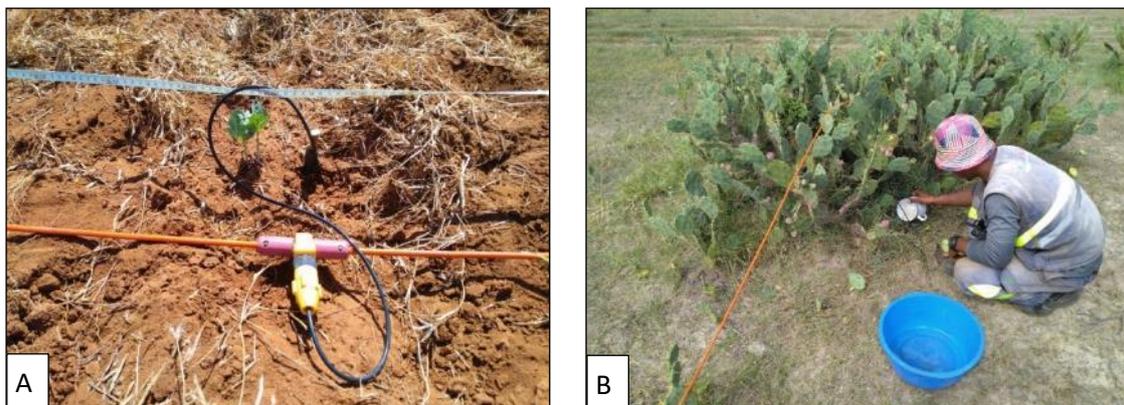


Figure 52: A) Connecteur avec électrode et B) Arrosage de l'électrode avec de l'eau salée (MSF 2022)

9.2. RESULTATS

9.2.1. Ambatomainty

La tomographie de calage sur Ambatomainty a permis de caractériser le signal électrique des formations calcaires et gréseuses visibles à l’affleurement dans le secteur (Figure 53). Les faibles résistivités, entre 2 et 10 ohm.m, plus profondes, sont supposées être des formations argileuses mais ne sont pas visibles en surface. Il en est de même pour le socle, que l’on suppose compte tenu des gammes de résistivités mais qui n’est pas visible sur le terrain.

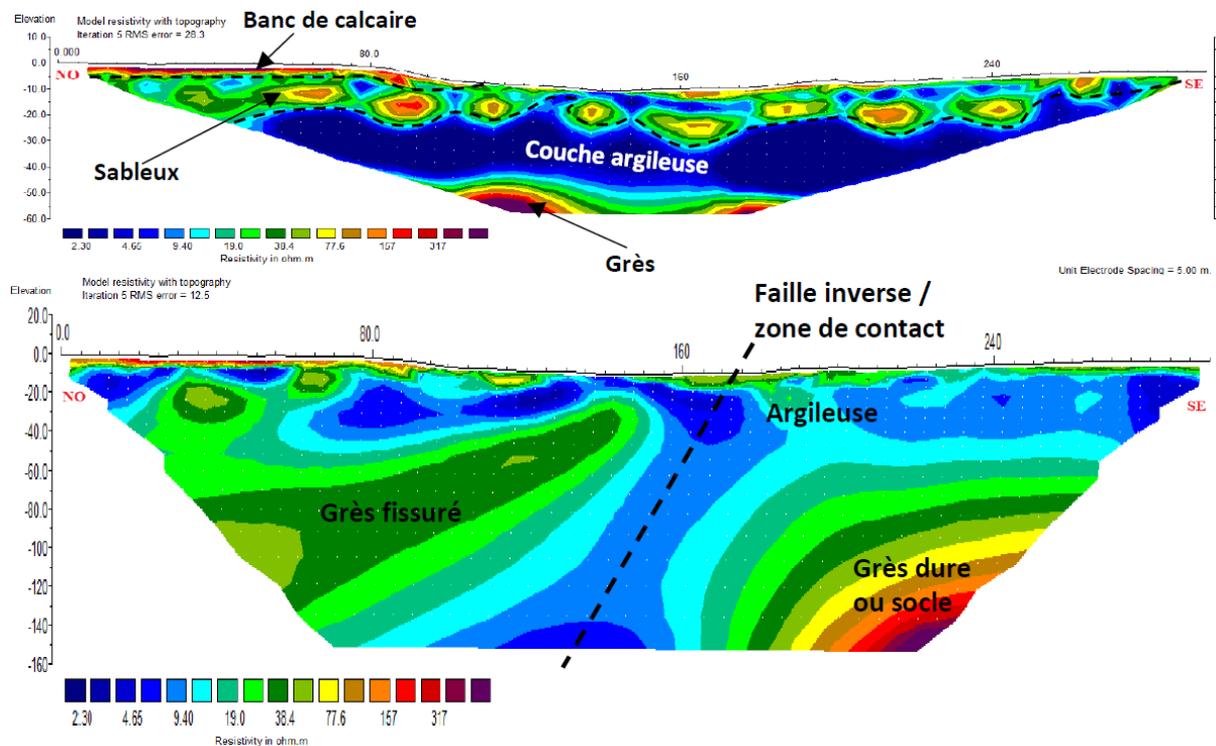


Figure 53: Tomographie de calage sur le secteur de Ambatomainty

Sur les tomographies imbriquées AMB_1 et AMB_2 (Figure 54) on peut distinguer des formations sédimentaires déposées de façon hétérogène sur un socle dont l’altération se trouverait à une profondeur de 130 m. Celui-ci semble s’approfondir et ne devient plus visible sur les panneaux électriques au niveau des abscisses 240 et 350. Ce type d’anomalie peut traduire la présence de couloirs de fractures à l’origine de l’approfondissement du socle sain. Le centre de ces structures étant souvent constitué d’altération très argileuse (Lachassagne et al. 2011) les cibles hydrogéologiques se trouvent en périphérie de celles-ci. De plus ces éléments confortent l’analyse du modèle numérique de terrain où un linéament a été mis en évidence à ce niveau. Le point de forage est ainsi positionné à l’abscisse 325, afin de vérifier la présence d’eau dans la partie fissurée du socle supposé entre 130 et 150 m.

Par ailleurs, une zone de plus forte résistivité sur les premières dizaines de mètres au niveau du point 160 traduit probablement une couche sableuse d’environ 40 d’épaisseur. Cet aquifère potentiel présente ainsi comme une seconde cible, et un forage en cet endroit pourrait aussi aller jusqu’à l’altération du socle qui semble se dessiner à 150 m de profondeur.

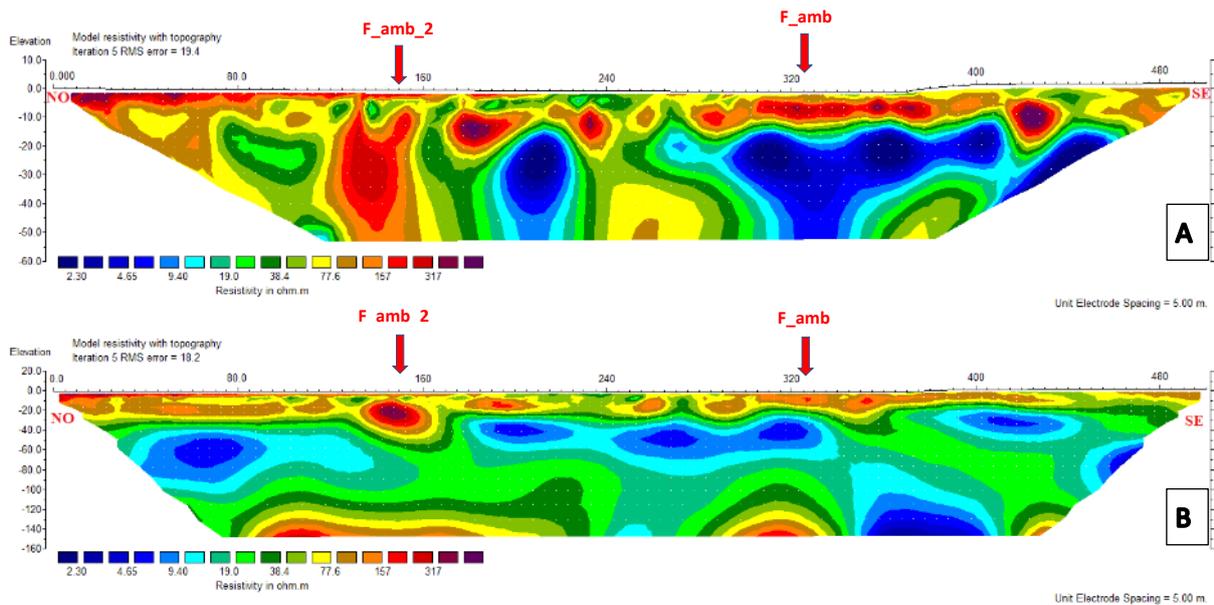


Figure 54: Tomographies imbriquées AMB_1 et AMB_2 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Pôle-Pôle en B) et proposition de forage

9.2.2. Botreoke

Proche du village de Tseredreo, la tomographie de calage a permis de caractériser le signal électrique des formations sableuse et gréseuses de cette zone d'étude (Figure 55). La présence d'eau mis en lumière par un forage de 180 m réalisé il y a une cinquantaine d'année, suppose que des sables fins aquifères entre 25 m et 120 m, se superposent à une lentille argileuse permettant d'éviter que l'eau s'infilte plus en profondeur (Figure 55).

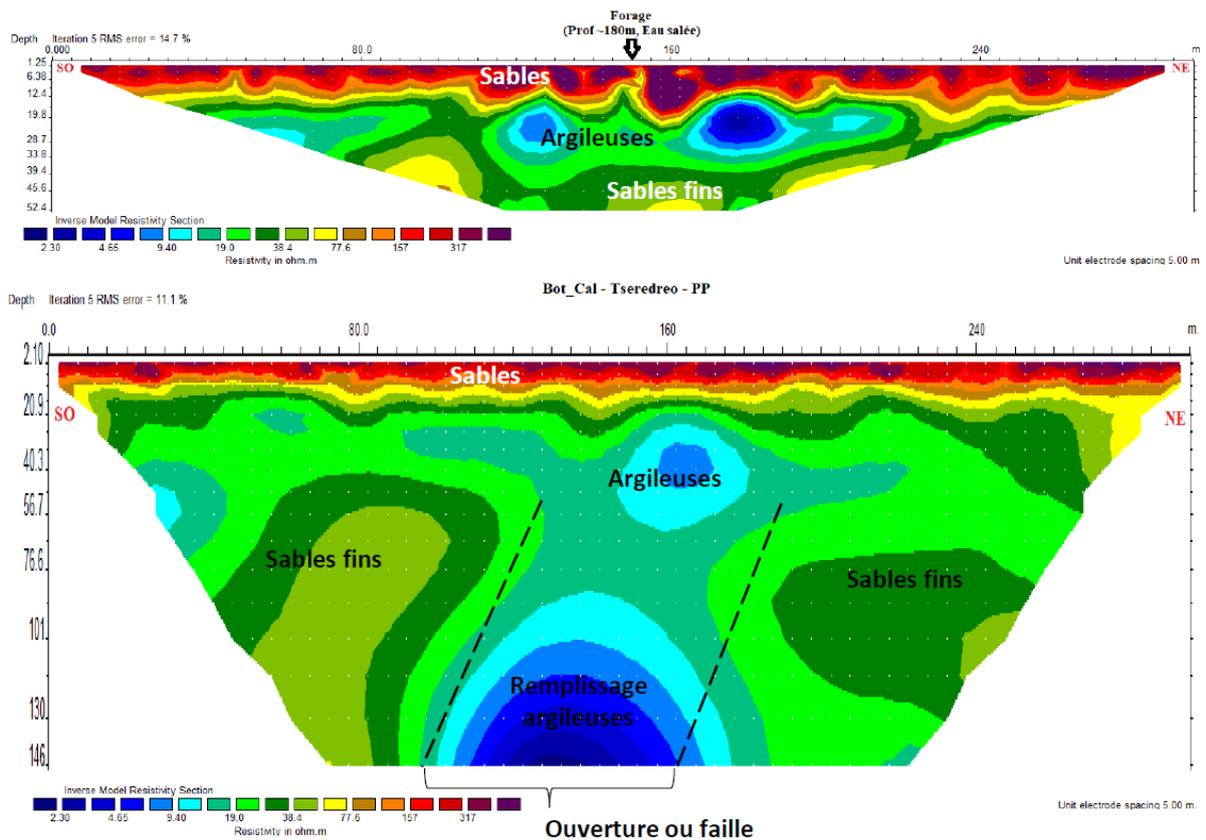


Figure 55: Tomographie de calage sur le secteur de Botreoke

Au niveau de Botreoke, la tomographie BOT_1 met en évidence un puissant dépôt sédimentaire, probablement sableux, d'au moins 150 m d'épaisseur. Le linéament végétal mis en évidence par image satellite pourrait être en lien avec le léger plissement de ces couches visibles vers l'abscisse 160 (Figure 56 B). En plus de cette anomalie, la présence de sables plus grossier à l'abscisse 190 contribue à définir un point de forage en cet endroit. En revanche la tomographie BOT_2 (Figure 57) ne met pas en lumière de cible hydrogéologique particulière.

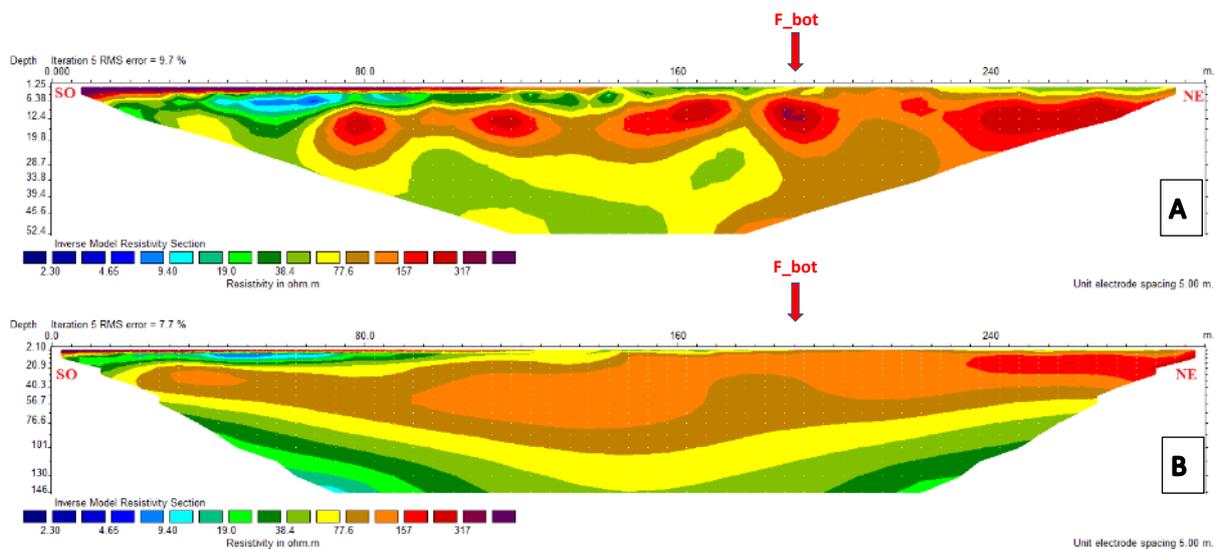


Figure 56: Tomographie BOT_1 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Pôle-Pôle en B) et proposition de forage

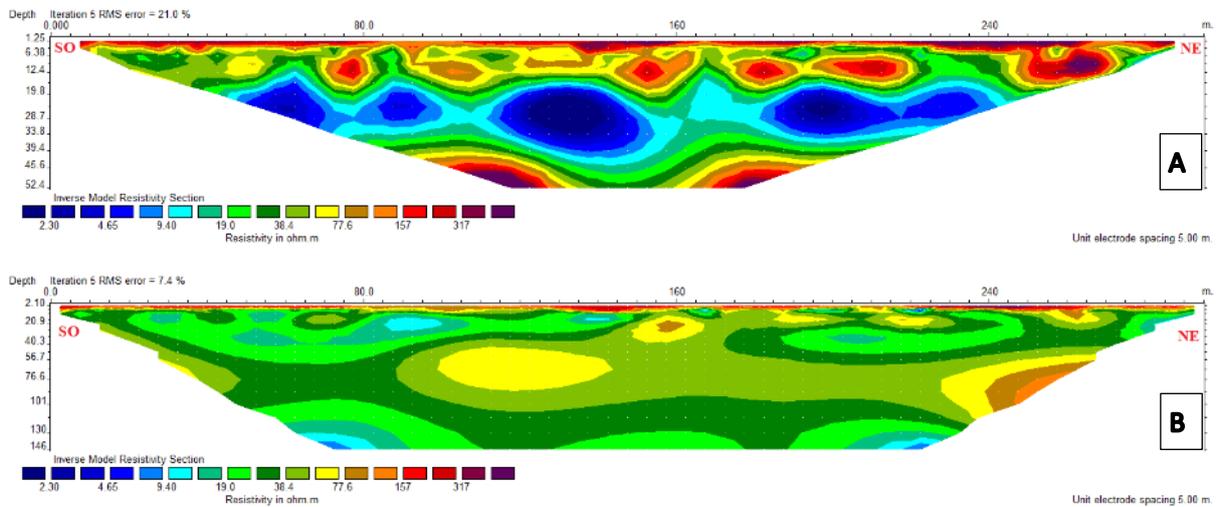


Figure 57: Tomographie BOT_2 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Pôle-Pôle en B)

9.2.3. Taranake

Sur Taranake, les tomographies ont été placées au niveau des dolines précédemment décrites (cf. §8.2). La première doline investiguée par la géophysique électrique se trouve mise en lumière sur le panneau TAR_1 entre l'abscisse 140 et 240 m (Figure 58 A). Elle est également très visible sur les données brutes qui se trouvent en Annexe 4, où une zone d'effondrement de forme conique apparaît.

Une structure similaire, de plus grande ampleur, apparaît sur la tomographie TAR_2 qui s'étend sur toute la largeur de la doline (Figure 59_B). D'importantes formations sableuses se dessinent entre 30 et 130 m, et une diminution de la résistivité plus en profondeur laisse supposer que le milieu est plus argileux, ou bien que de l'eau est présente au sein de la porosité de ces sédiments. Dans le premier cas, le massif argileux pourrait également constituer le mur d'un aquifère et permettre ainsi la présence d'un horizon saturé juste au-dessus. Une proposition de forage est ainsi définie au point d'abscisse 208 sur cette tomographie.

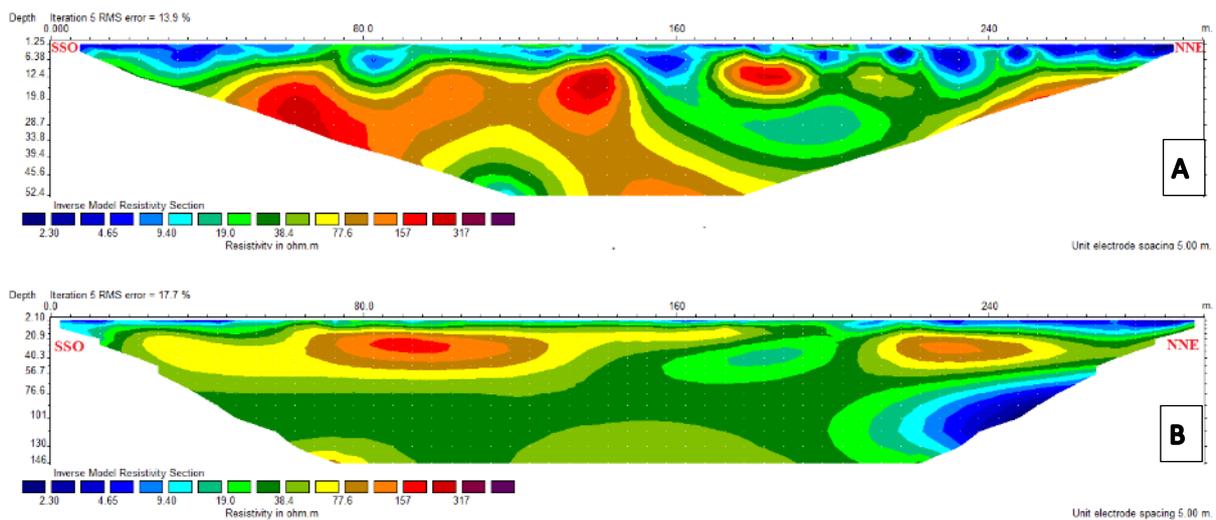


Figure 58: Tomographie TAR_1 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Pôle-Pôle en B)

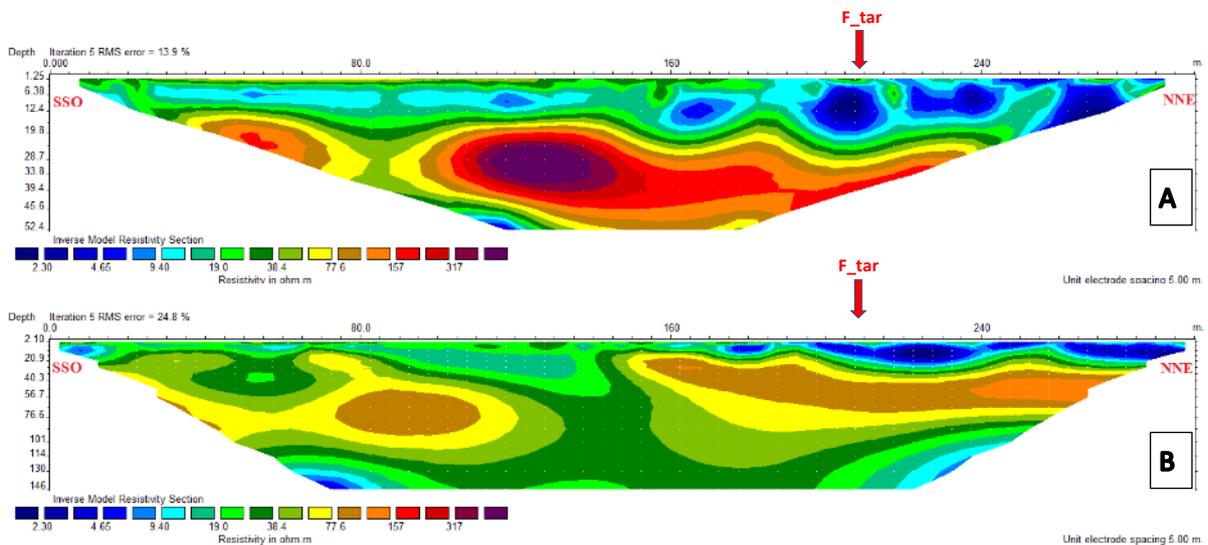


Figure 59: Tomographie TAR_2 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Pôle-Pôle en B) et proposition de forage

9.2.4. Andahivozaka Haut

Sur le secteur de Andahivozaka, le profil MAG1 (Figure 60) a pu mettre en évidence une zone fracturée dans les migmatites en place, au niveau de l'abscisse 165, à proximité d'un linéament végétal visible par image satellite. On peut observer une très forte conductivité qui traduit probablement la présence d'eau minéralisée après 25 m de profondeur. Une proposition de forage, d'une profondeur de 40 m, est donc définie en ce point et il conviendra d'être très vigilant lors de la foration afin de capter une eau qui soit acceptable pour la consommation. Une autre zone semblant témoignée d'une altération marquée se situe au niveau de l'abscisse 85 entre 30 et 45 m, et constitue une seconde cible hydrogéologique.

Sur la tomographie MAG2 (Figure 61) les différentes variations de résistivité sont probablement dû au pendages des migmatites qui sont composés de deux lithologies bien différentes (cf. § 7). Bien qu'une structure verticale pouvant être liée à une fracture se devine sous la station 140, aucune cible hydrogéologique pertinente n'apparaît sur ce panneau.

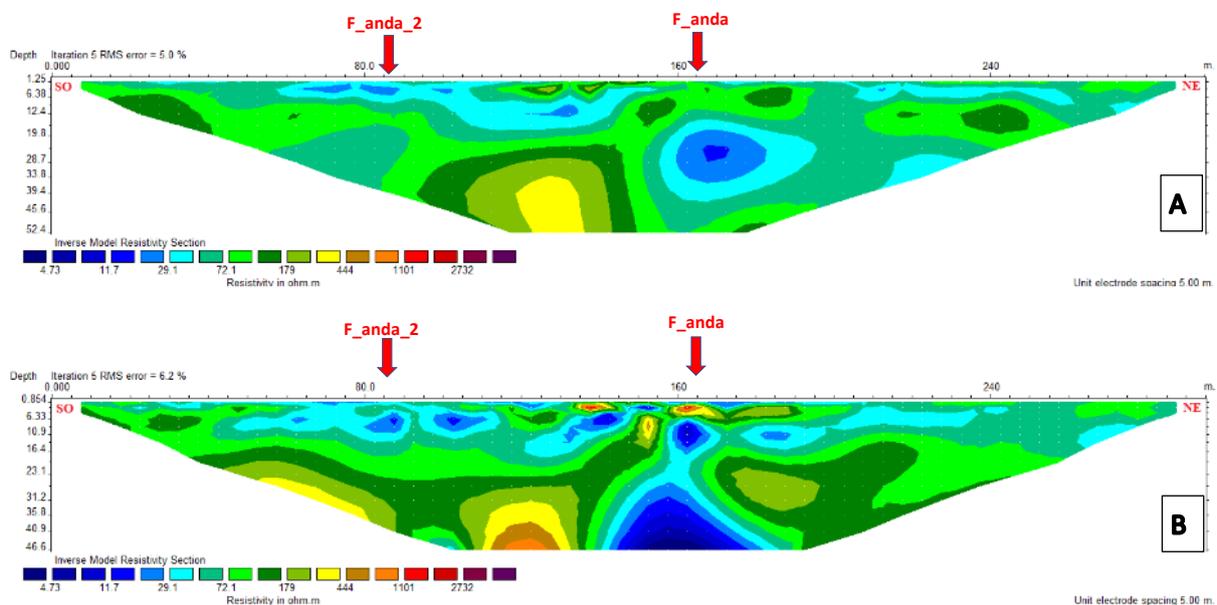


Figure 60: Tomographie MAG1 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Dipôle-Dipôle en B) et proposition de forage

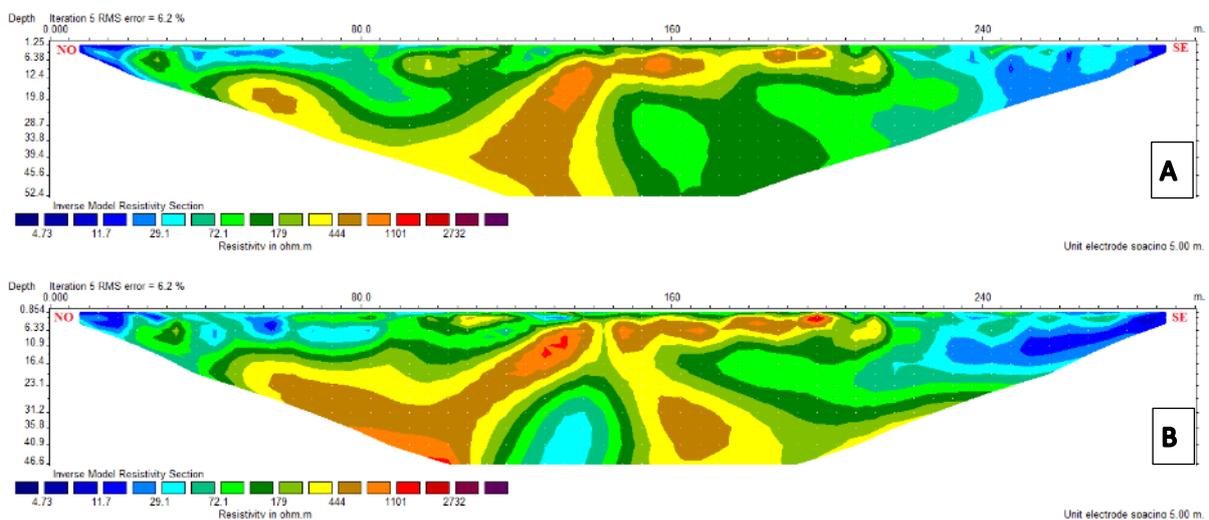


Figure 61: Tomographie MAG2 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Dipôle-Dipôle en B)

9.2.5. Antanivelo

Proche d'Antanivelo chef-lieu, l'important linéament qui avait été mis en évidence grâce aux données Sentinel semble apparaître au centre du profil ANK1 (Figure 62), et se situe au niveau du lit d'un affluent de rivière. Il est ainsi proposé un point de forage au point d'abscisse 165, d'au moins 40 m de profondeur, pour pouvoir atteindre la partie fissurée et altérée de la roche sous-jacente, marquée ici par une résistivité plus faible.

Sur le panneau électrique ANK2, on observe au niveau de l'abscisse 90 une zone de faible résistivité pouvant correspondre à un épaissement de la partie altérée de la roche (Figure 63). Avec la configuration électrique dipôle-dipôle il semblerait même qu'une zone fracturée se trouve en cet endroit. Une seconde cible intéressante est donc mise en lumière dans ce secteur et une deuxième proposition de forage est donc définie ici, avec une profondeur de 35 m minimum, dans le cas où les résultats du premier ne seraient pas satisfaisants.

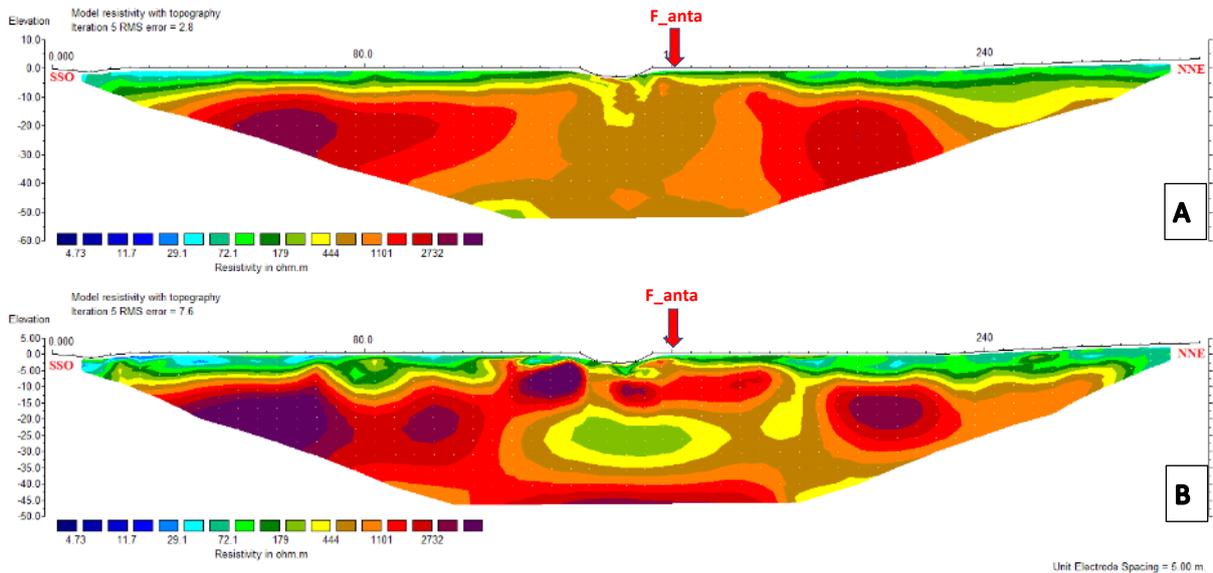


Figure 62: Tomographie ANK1 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Dipôle-Dipôle en B) et proposition de forage

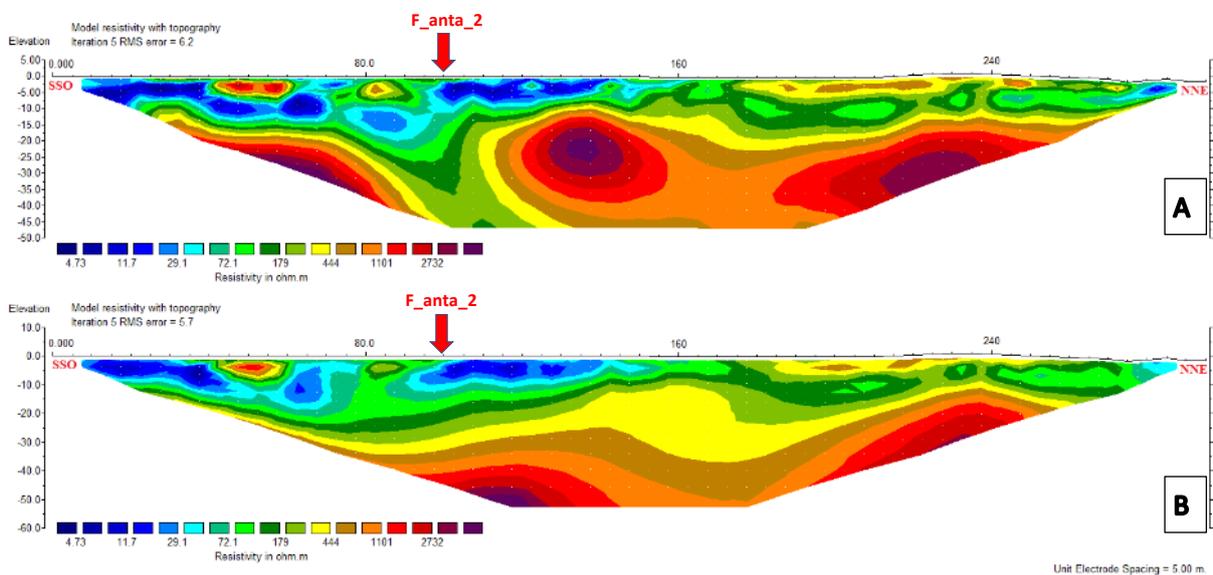


Figure 63: Tomographie ANK2 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Dipôle-Dipôle en B) et proposition de forage

9.2.6. Ankobo I

Sur le secteur d'Ankobo I, le profil ANK3 (Figure 64) ne présente pas de structures fracturées mais montre un épaissement du profil d'altération, avec une résistivité relativement faible, qui pourrait traduire la présence d'eau. Une zone d'intérêt se trouve ainsi au niveau de la station 155, entre 20 et 35 m de profondeur.

Le panneau électrique ANK4 présente en l'abscisse 115 un net approfondissement du socle. (Figure 65) sain situé à proximité du linéament de végétation mis en évidence par image satellite. Cette anomalie pourrait ainsi traduire un couloir de fracture et se trouve être la cible la plus intéressante du secteur de Ankobo I. Une proposition de forage est ainsi positionnée ici avec une profondeur de 40 m.

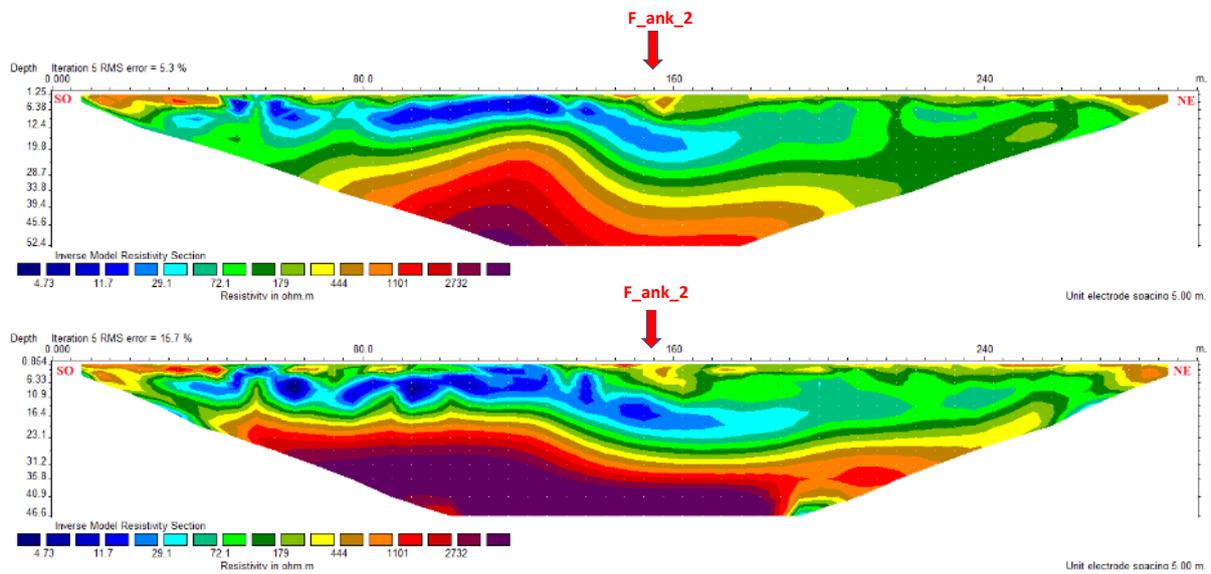


Figure 64: Tomographie ANK3 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Dipôle-Dipôle en B)

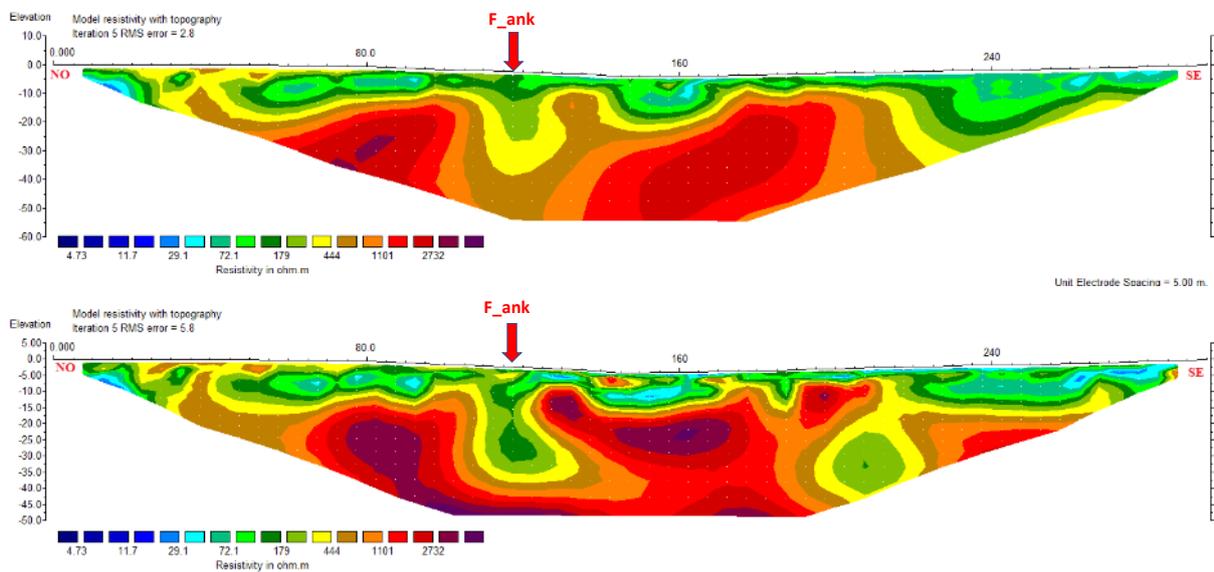


Figure 65: Tomographie ANK4 avec un dispositif WS en A) et un dispositif Dipôle-Dipôle en B) et proposition de forage

10. RECAPITULATIF DES FORAGES POSITIONNES

A l'aide du logiciel SIG, les positions des cibles sont recalculés pour pouvoir ensuite placer physiquement sur le terrain un marquage permettant l'installation du matériel de forage (Tableau 1).

Nom du forage	Localité	Commune	Latitude	Longitude	Profondeur estimée
F_amb	Ambatomainty	Ifotaka	-24,94788	46,16513	150 m
F_bot	Botroeke	Ambovombe	-25,05572	46,0825	170 m
F_tar	Taranake	Sihanamaro	-25,12941	45,83289	170 m
F_anda	Andahivozaka	Jafaro	-24,84181	45,44194	40 m
F_anta	Antanivelo	Jafaro	-24,92135	45,40978	40 m
F_ank	Ankobo I	Jafaro	-24,94857	45,41472	40 m

Tableau 1: Tableau récapitulant la position des principales cibles hydrogéologiques en vue de la réalisation des futurs forages

Comme plusieurs cibles hydrogéologiques ont été détecté sur la plupart des zones étudiées, la position d'un second point de forage pour ces secteurs est résumé dans le Tableau 2 . La cible secondaire pourra être explorée dans le cas où la première s'est révélée infructueuse.

Nom du forage	Localité	Commune	Latitude	Longitude	Profondeur estimée
F_amb_2	Ambatomainty	Ifotaka	-24,94679	46,16405	150 m
F_anda_2	Andahivozaka	Jafaro	-24,84210	45,44120	40 m
F_anta_2	Antanivelo	Jafaro	-24,92423	45,40868	40 m
F_ank_2	Ankobo I	Jafaro	-24,94697	45,41003	40 m

Tableau 2: Tableau récapitulant la position des secondes cibles hydrogéologiques

11. BIBLIOGRAPHIE

- Aurouze J.** (1957) – Notice explicative sur la carte hydrogéologique du Sud de Madagascar à l'échelle du 1 :500 000, Service Géologique Tananarive
- Aurouze J.** (1959) – Hydrogéologie du Sud de Madagascar. Thèse. Université de Paris, série A 3391 ordre 4263
- Bergeron G.** (1995) - Programme d'hydraulique villageoise : 150 points d'eau dans le Sud de Madagascar. Rapport de fin de travaux. BRGM. N° 1976 MDB/SGN/95, 40 pages.
- Brisset N., Aertgeerts G., Lhotelin M.** (2018) – Etude hydrogéologique pour la recherche d'eau potable sur les secteurs de Gotali, Bassin Mine d'Or et Charvein, commune de Mana. Rapport final. BRGM/RP-68139-FR, 78 p., 51 fig., 2 tab., 2 annexes
- Brisset N., Dewandel B., Joseph B., Cotinet R., Lhotelin M., Ouerghi Y., Longueville F.** (2019) – Prospection hydrogéologique sur Papaïchton. Sondages de reconnaissance SRP1, SRP2, SRP3, SRP4 et forages de reconnaissance PAP1 et PAP2. Rapport de fin de travaux. Rapport final. BRGM/RP-68833-FR, 140 p., 71 fig., 7 tab., 3 ann.
- Carte géologique de Madagascar 1 :500 000** – feuille n°11 Ampanihy, 12 Tolanaro. Ministère de l'Energie et des Mines, Projet de Gouvernance des Ressources Minérales. Mars 2008
- Carte géologique au 1:100 000** – feuille de Jafaro , série Henrie Besairie, 1974
- Carte géologique au 1:100 000** – feuille de Fotadrevvo – Bekily, J. Aurouze, 1952
- Holland, M. et Witthüser, K.T.** (2011). Evaluation of geologic and geomorphologic influences on borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of Limpopo Province, South Africa. s.l. : Hydrogeology Journal, 2011. pp. 1065–1083.19 .
- JICA** (2006) - Etude sur l'approvisionnement en eau potable, autonome et durable dans la région du sud de la république de Madagascar. Rapport final
- Lachassage P., Wyns R., Dewandel B.** (2011) - The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. Terra Nova, doi: 10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x
- Loke, M. H.** (2004). Tutorial 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys (Revised Edition, 128 p)
- Monteleone** (2018) - Observations hydrogéologiques de l'aquifère quaternaire d'Ambovombe, Région Androy. BushProof
- OMS** (2017), Directive de qualité pour l'eau de boisson, 4^e édition intégrant le premier additif
- Rabemanana V.** (2002) - Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle: cas de la région de l'Androy. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI
- Serele C., Pérez-Hoyos A., Kayitakire F.** (2019) Mapping of groundwater potential zones in the drought-prone areas of south Madagascar using geospatial techniques.
- UNICEF** (2018), Projet pilote *Exploration et production de ressources en eau souterraine alternatives* - Ambondro - Région Androy, Madagascar., Phases 1 et 2 – Exploration, Janvier 2018
- UNICEF** (2018), Projet pilote *Exploration et production de ressources en eau souterraine alternatives* - Ambondro - Région Androy, Madagascar., Phases 3, 4 & 5 – Production, Décembre 2018

Wyns R. (2015) – Géologie de la surface (0-100 m): impact des paléo-altérations sur les propriétés des roches. Support de cours, BRGM FORMATION, 198 p.

Sites internet

Images satellites :

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-overview/geophysical-measurements>

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

Santé eau potable :

<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-sodium.html>

Annexes

Annexe1 : Mesures in-situ de déformations tectoniques et métamorphiques

Fokontany	Nom	direction (N magnet.)	direction (N geo.)	Pendage (en °)	Categorie	Latitude	Longitude
Anzamani	ANK2_1	44	70	90	fracture	-24,92012	45,38589
Anzamani	ANK2_2	42	68	90	fracture	-24,92012	45,38589
Anzamani	ANK2_3	36	62	90	fracture	-24,92012	45,38589
Anzamani	ANK2_4	30	56	90	fracture	-24,92012	45,38589
Anzamani	ANK2_5	14	40	76	fracture	-24,92012	45,38589
Ankobo I	ANK4_1	34	60	38	litage	-24,94632	45,40926
Ankobo I	ANK4_2	38	64	38	litage	-24,94632	45,40926
Ankobo I	ANK4_3	82	108	90	fracture	-24,94632	45,40926
Ankobo I	ANK4_4	86	112	90	fracture	-24,94632	45,40926
Ankobo I	ANK4_5	86	112	90	fracture	-24,94632	45,40926
Antanivelo	ANK7	60	86	90	veine Qtz	-24,92149	45,40969
Antanivelo	ANK8_1	28	54	40	litage	-24,92283	45,40720
Antanivelo	ANK8_2	10	36	50	litage	-24,92283	45,40720
Antanivelo	ANT1_1	32	58	30	litage	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_10	100	126	90	fracture	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_11	92	118	90	fracture	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_12	140	166	90	fracture	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_2	30	56	38	litage	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_3	20	46	32	litage	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_4	40	66	48	litage	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_5	48	74	32	litage	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_6	45	71	36	litage	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_7	82	108	60	litage	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_8	100	126	90	fracture	-24,92341	45,40939
Antanivelo	ANT1_9	100	126	90	fracture	-24,92341	45,40939
Ambanditse III	BAN1_1	30	56	84	fracture	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_10	22	48	90	veine Qtz	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_2	40	66	90	fracture	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_3	10	36	90	fracture	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_4	32	58	90	fracture	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_5	152	178	90	veine Qtz	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_6	120	146	90	veine Qtz	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_7	122	148	90	veine Qtz	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_8	100	126	90	veine Qtz	-25,03135	45,32114
Ambanditse III	BAN1_9	120	146	90	veine Qtz	-25,03135	45,32114
Magnevotse	MAGN1	50	76	30	litage	-24,85024	45,41251
Magnevotse	MAGN2	40	66	35	litage	-24,84994	45,41201
Magnevotse	MAGN3	60	86	40	litage	-24,84346	45,42970
Andahivozaka haut	MAGN4_1	72	98	50	litage	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN4_2	108	134	90	fracture	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN4_3	130	156	90	fracture	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN4_4	111	137	90	fracture	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN4_5	111	137	90	fracture	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN4_6	130	156	90	fracture	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN4_7	111	137	90	fracture	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN4_8	110	136	90	fracture	-24,84114	45,43896
Andahivozaka haut	MAGN5_1	40	66	50	litage	-24,84256	45,43913
Andahivozaka haut	MAGN5_2	42	68	38	litage	-24,84256	45,43913
Andahivozaka haut	MAGN5_3	60	86	30	litage	-24,84256	45,43913
Andahivozaka haut	MAGN6	62	88	34	litage	-24,84015	45,44150

Annexe2 : Réaction d'échantillons de roche après attaque à l'acide chlorhydrique

Fokontany	Village	Echantillon	Attaque au HCl	Latitude	Longitude
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB1	-	-24,94429	46,15897
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB2	+	-24,93938	46,16602
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB3	-	-24,93939	46,16602
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB4	++	-24,93034	46,16862
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB5	-	-24,94588	46,15643
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB6	-	-24,94588	46,15643
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB7	-	-24,94589	46,15643
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB8	++	-24,96196	46,14224
Ambatomainty	Ambatomainty	AMB9	++	-24,94850	46,16571
Botreoke	Botreoke	BOT1	++	-25,02551	46,09584
Botreoke	Botreoke	BOT2	-	-25,04703	46,09044
Botreoke	Botreoke	BOT3	++	-25,04520	46,08307
Botreoke	Botreoke	BOT4	++	-25,04521	46,08308
Taranake	Taranake	TAR1	+	-25,12868	45,83074
Taranake	Taranake	TAR2	-	-25,13621	45,82948
Magnevotse	Anamiteraka	MAGN2	++	-24,84994	45,41201
Magnevotse	Anamiteraka	MAGN3	++	-24,84346	45,42970
Ambanditse	Ambanditse III	BAN1	++	-25,03135	45,32114
Ankobo	Antanivelo	ANK1	-	-24,91642	45,38877
Ankobo	Antanivelo	ANT1	++	-24,92341	45,40939
Elomaka	Elomaka	ELO1	+	-25,05429	46,55788
Elomaka	Elomaka	ELO2	-	-25,05481	46,55540

- : Aucune réaction + : Réaction modérée ++ : Réaction forte

Annexe3 : Principe de la méthode du panneau électrique

Figure A3 - 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu	61
Figure A3 - 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant,	62
Figure A3 - 3 : Configuration dipôle-dipôle.....	63
Figure A3 - 4 : Configuration de Schlumberger.....	63
Figure A3 - 5 : Configuration de Wenner.....	63
Figure A3 - 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner.....	64
Figure A3 - 7 : Résultats complets (en images) d'une inversion.....	65
Figure A3 - 8 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.....	65

La tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes «panneau électrique» ou «tomographie électrique» sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (figure A1 - 1).

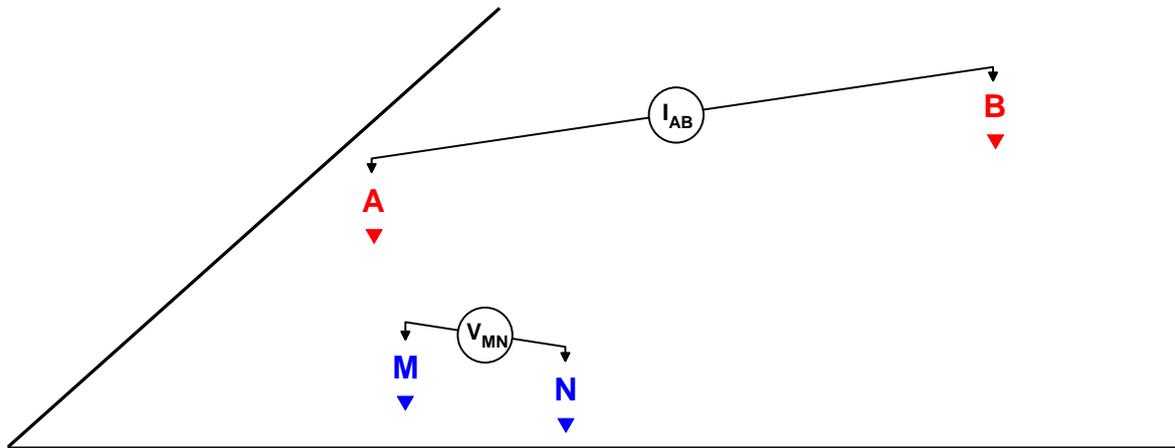


Figure A3 - 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté I , de la mesure de la différence de potentiel ΔV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (figure A2 - 2) :

$$K = 2\pi \times \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1}$$

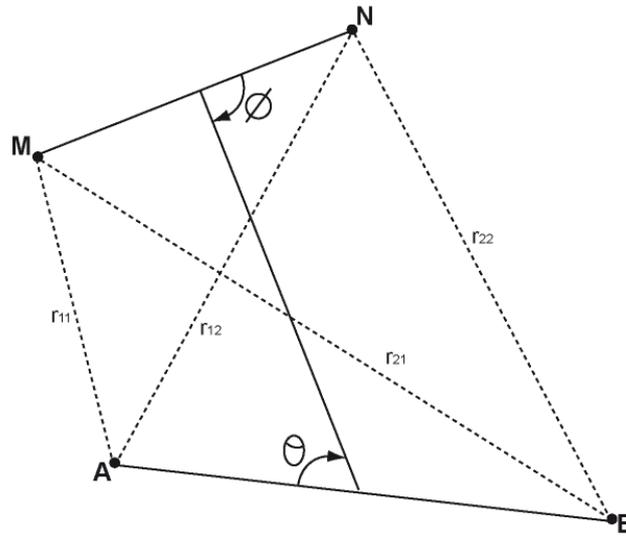


Figure A3 - 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant,

M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \vartheta, \Phi < \pi$)

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure ΔV . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant).

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (figure A2 - 3).

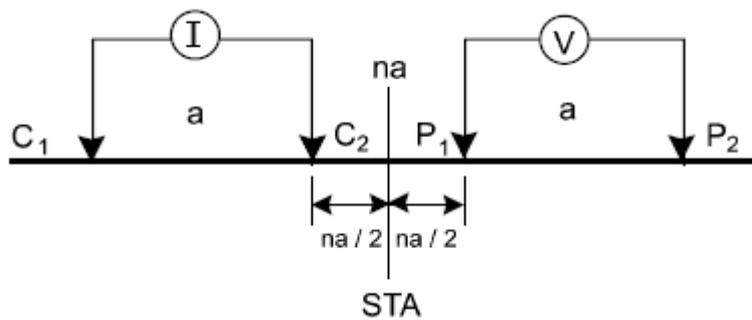


Figure A3 - 3 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte grâce à un meilleur rapport signal/bruit (figure A2 - 4).

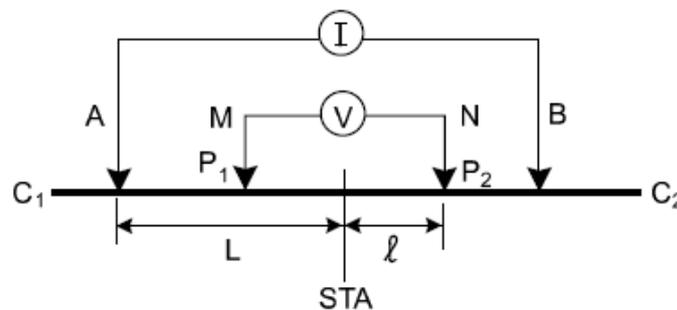


Figure A3 - 4 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (figure A2 - 5).

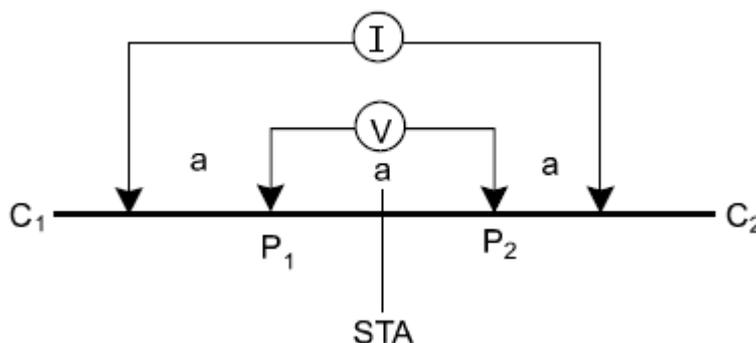


Figure A3 - 5 : Configuration de Wenner

Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol.

Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (figure A2 - 6).

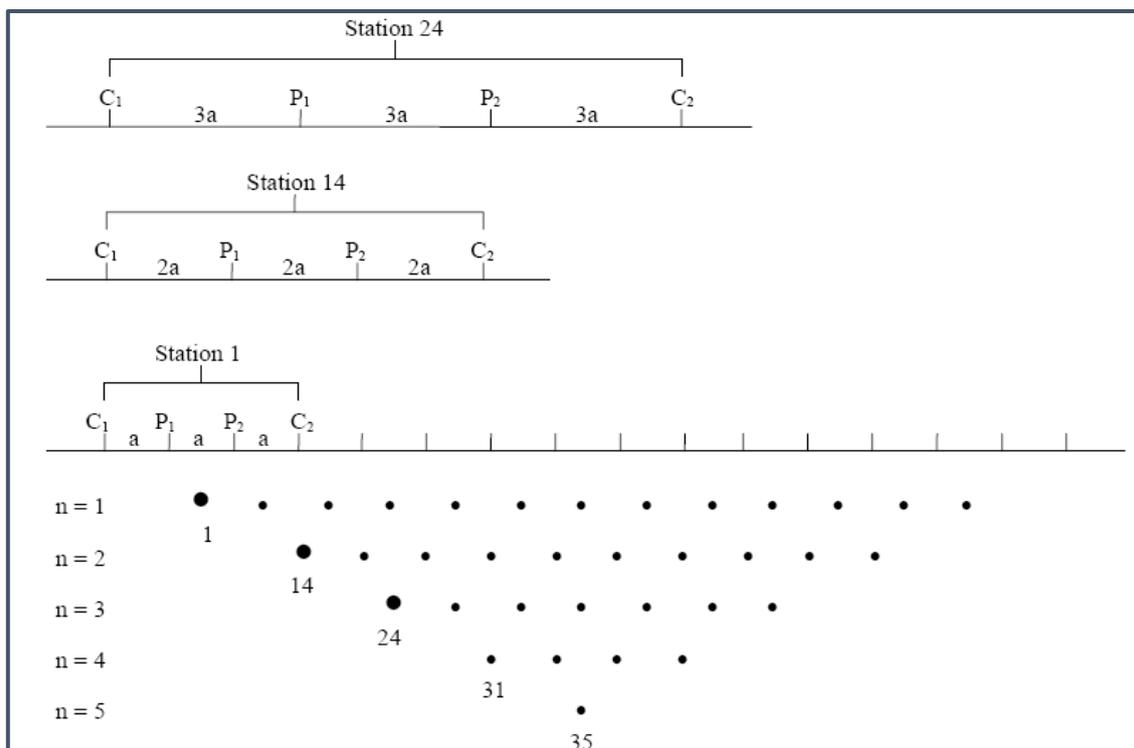


Figure A3 - 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

Traitement et inversion des données

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (figure A2 - 7). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (figure A2 - 8).

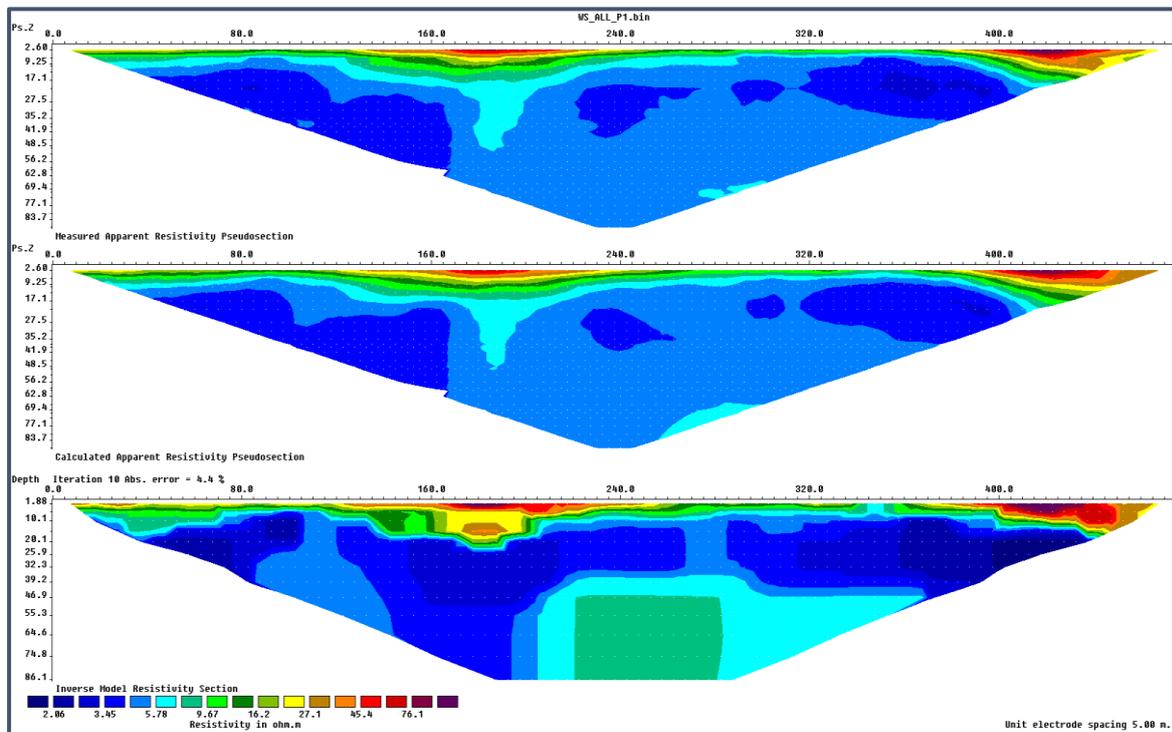


Figure A3 - 7 : Résultats complets (en images) d'une inversion.

Nota : Sur la figure précédente, figurent : en haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées, en bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion et au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La section de résistivité « vraie » (illustration du bas de la figure A2 - 7), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

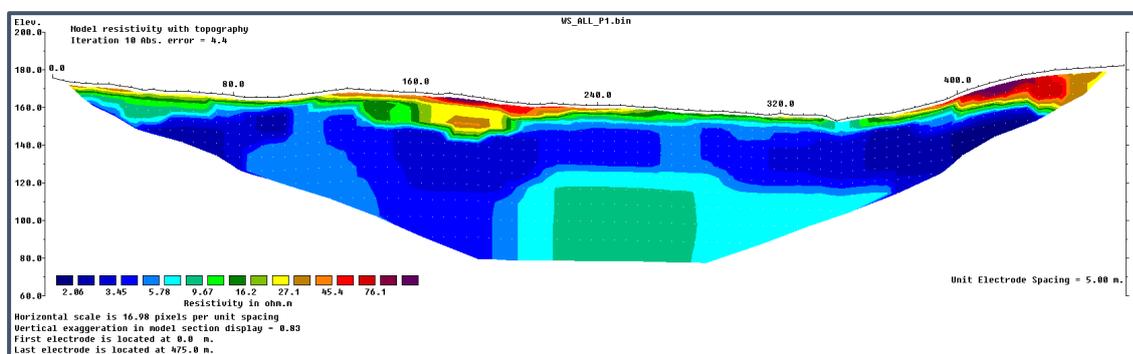


Figure A3 - 8 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information « à priori ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

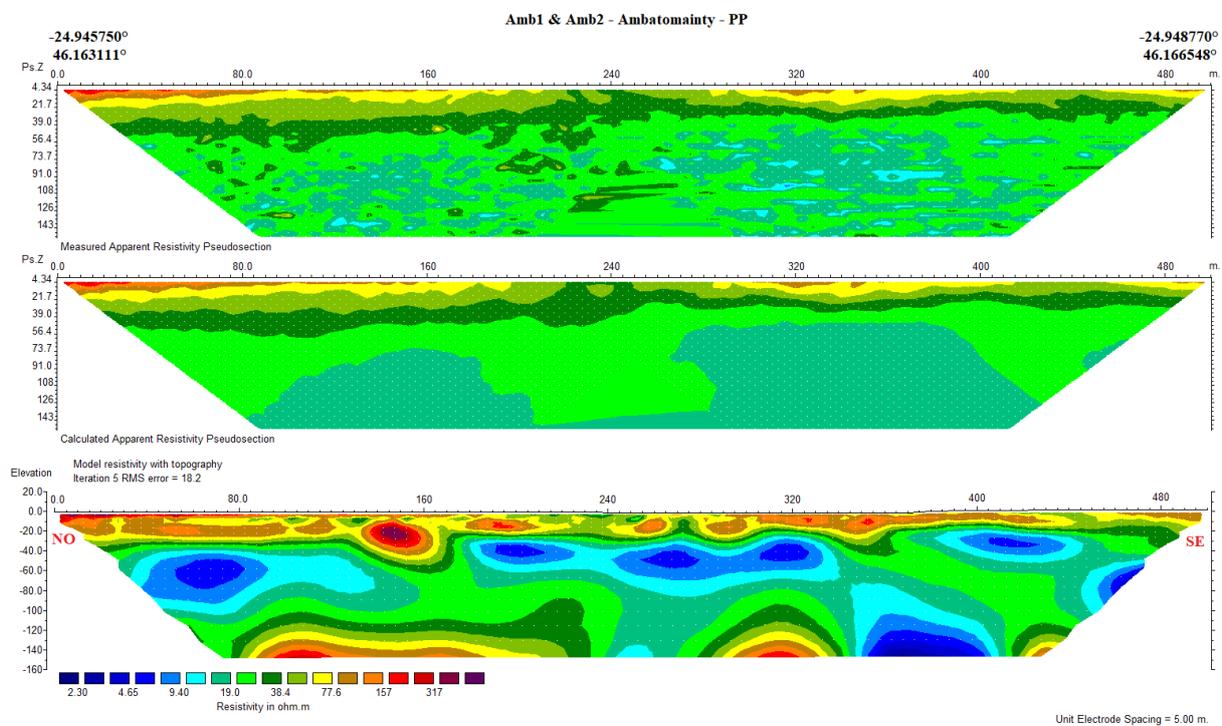
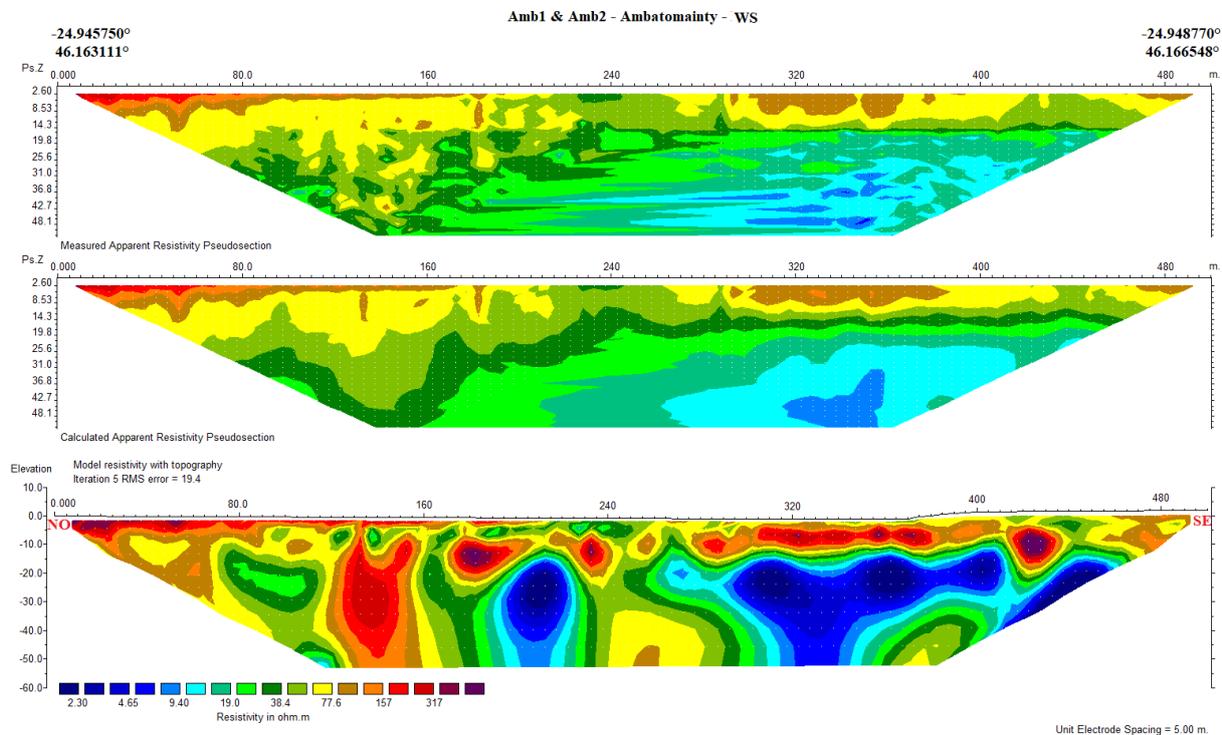
Applications

La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

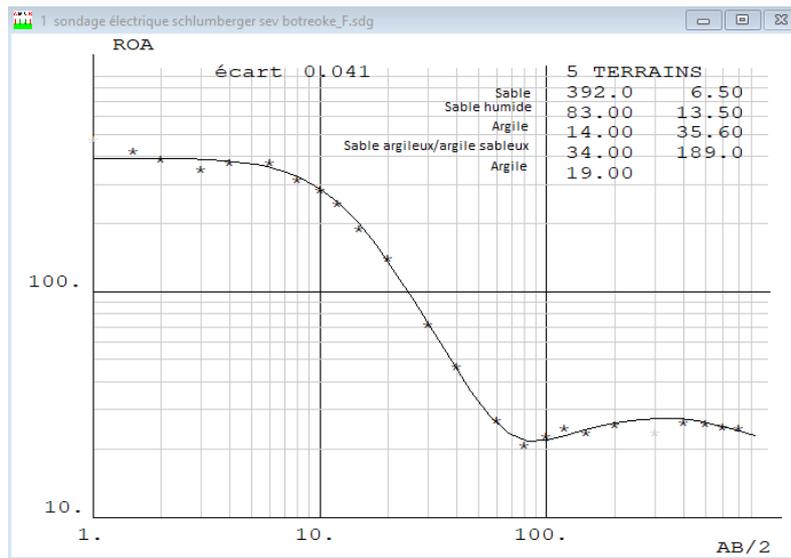
- Hydrogéologie (épaisseur d'aquifère), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier
- Volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermales
- Géologie : identification de contact géologique ou tectonique
- Environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère
- Risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain
- Dans le domaine minier (associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés
- En archéologie pour l'identification de structures enterrées
- Risques naturels : recherche de cavité en proche surface
- Géotechnique : qualité de fondations

Annexe4 : Données brutes des Tomographies de Résistivité Electrique

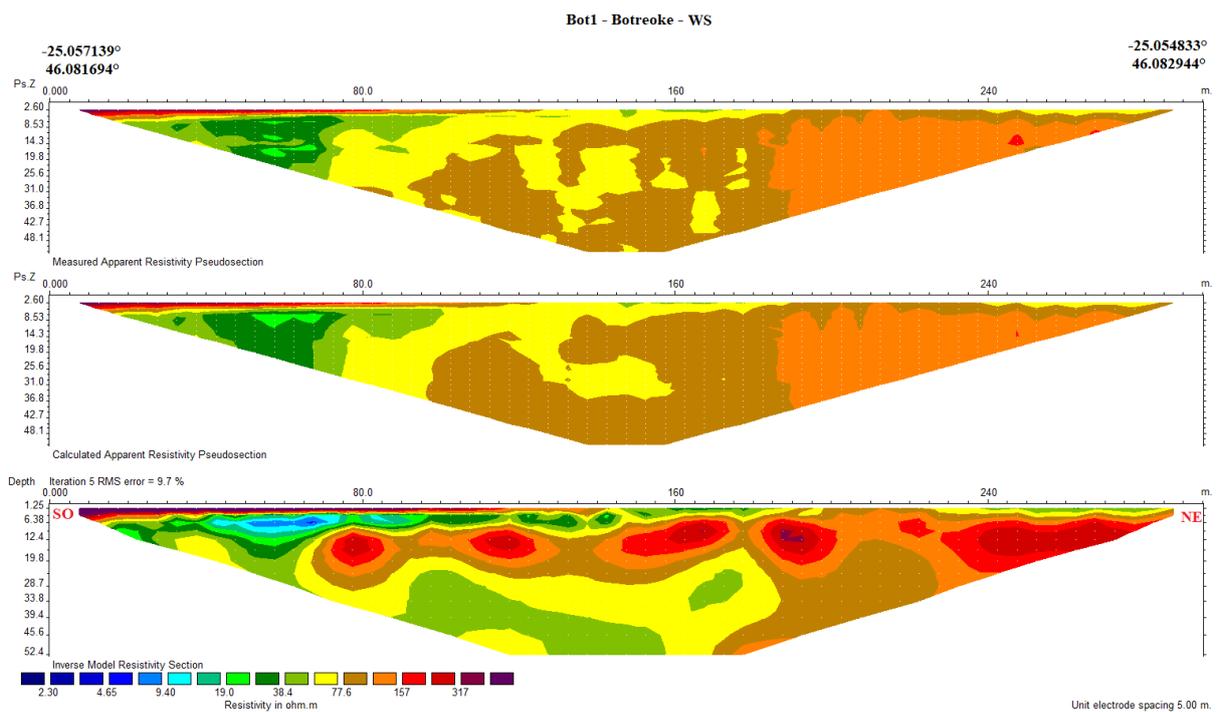
Ambatomainty – AMB1 et AMB2 imbriqués



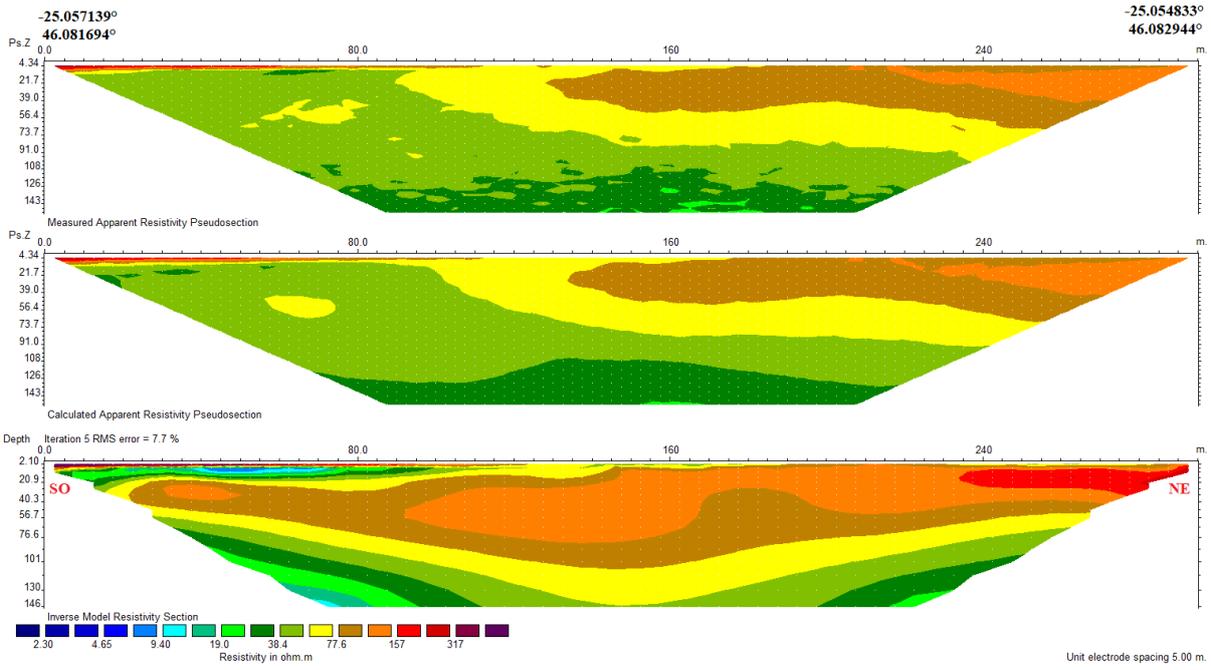
Botroke – SEV Tseredreo



Botroke – BOT 1

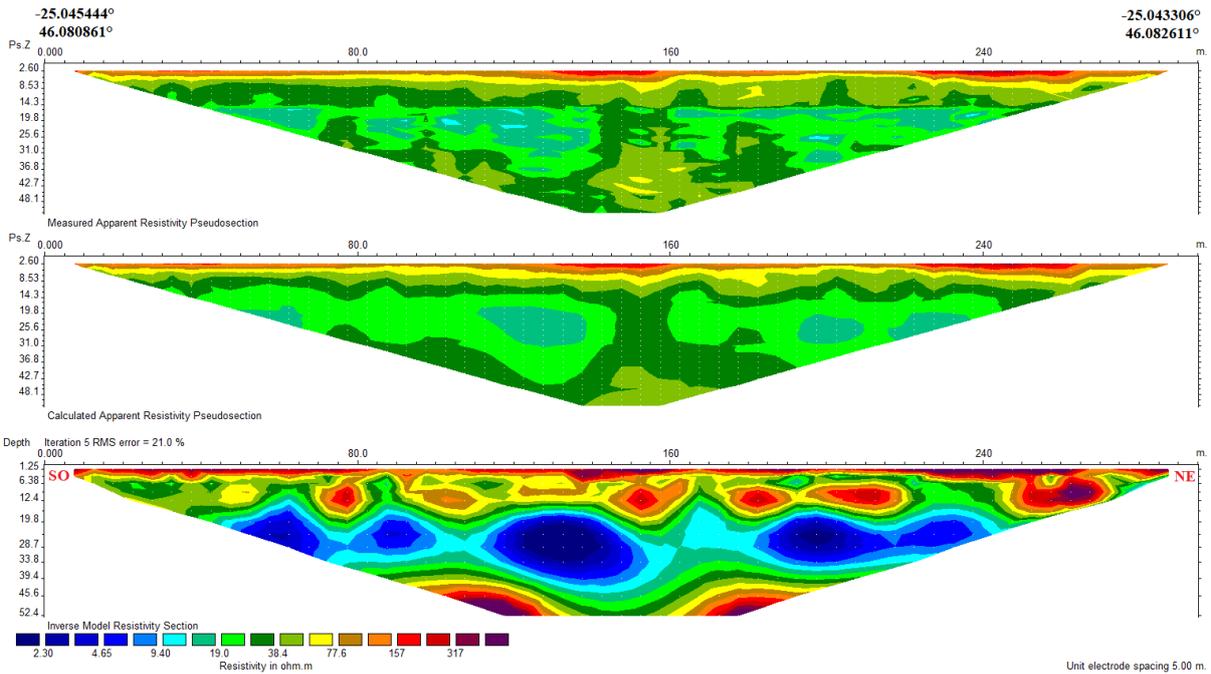


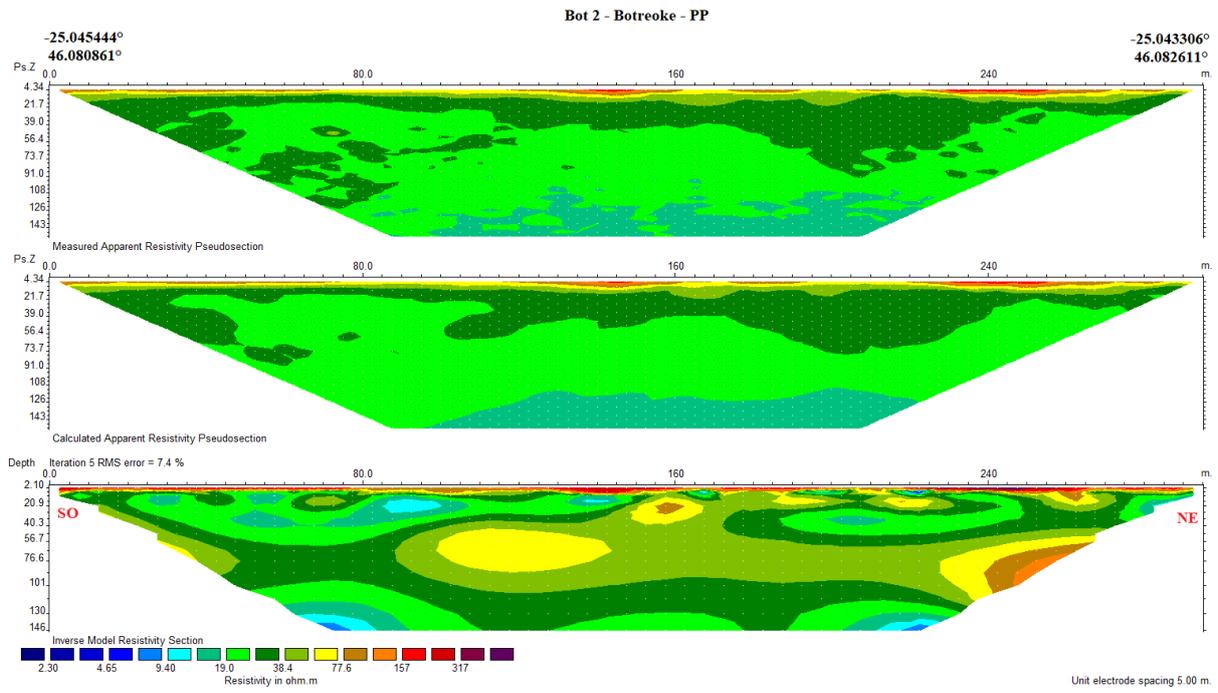
Bot1 - Botreoke - PP



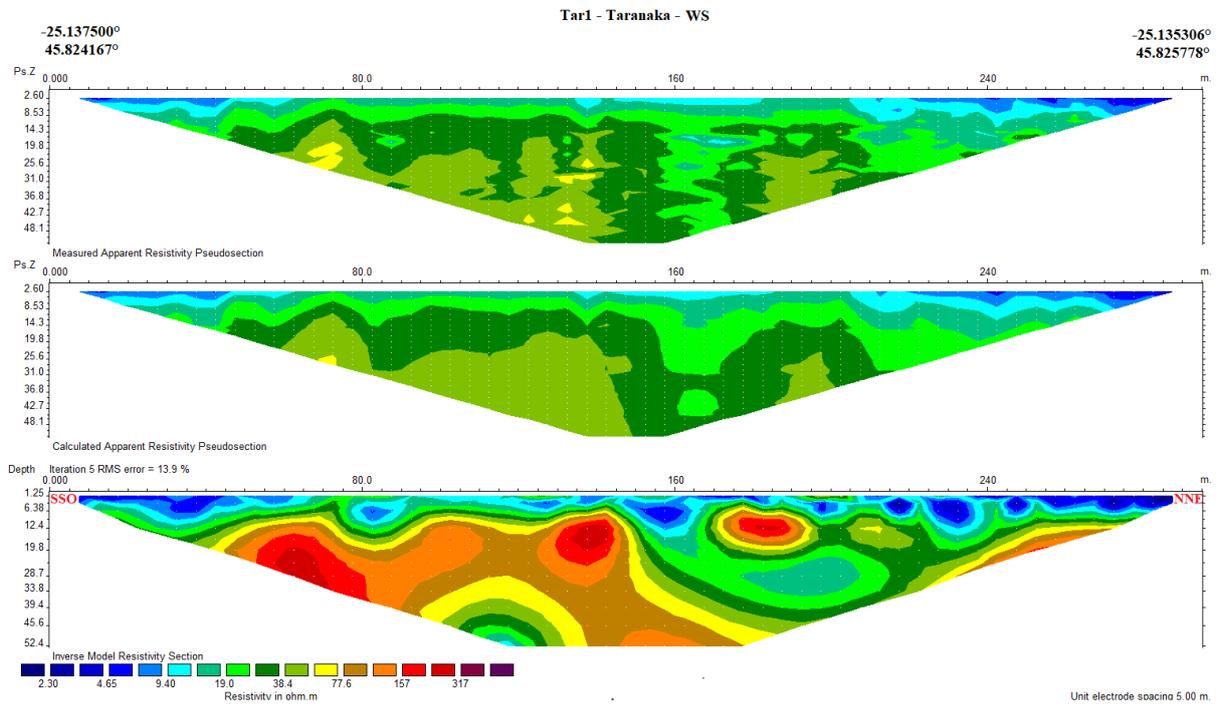
Botreoke - BOT_2

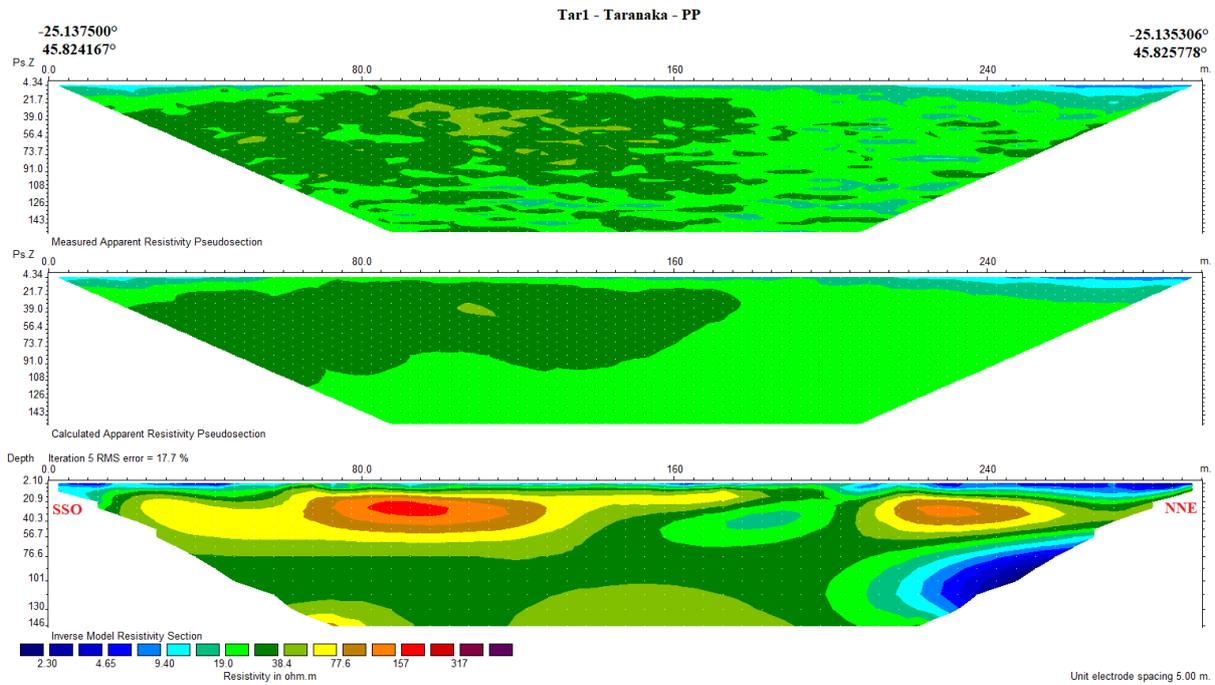
Bot 2 - Botreoke - WS



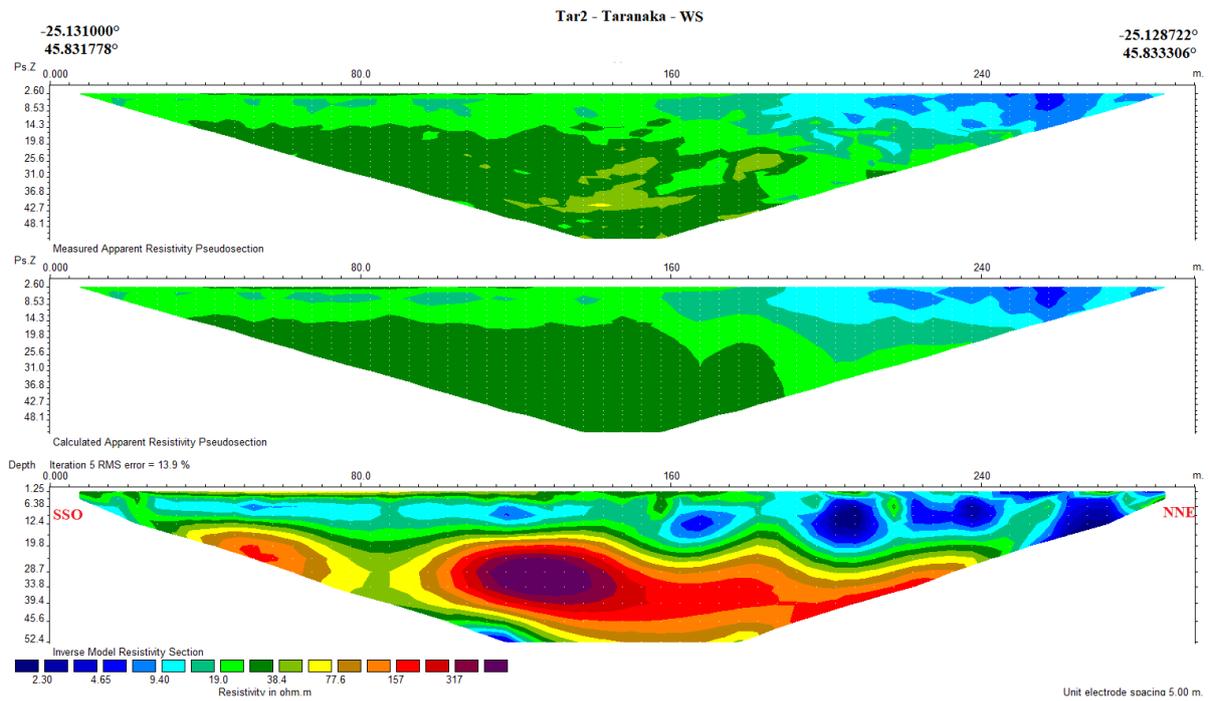


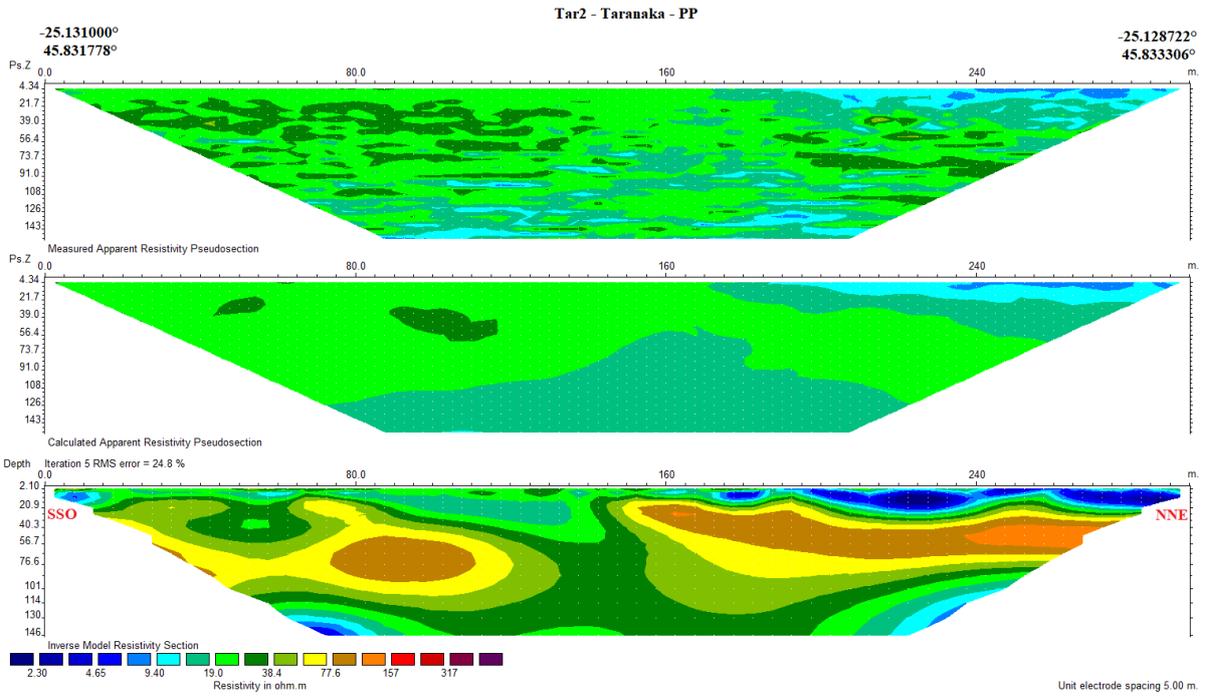
Taranake – TAR_1



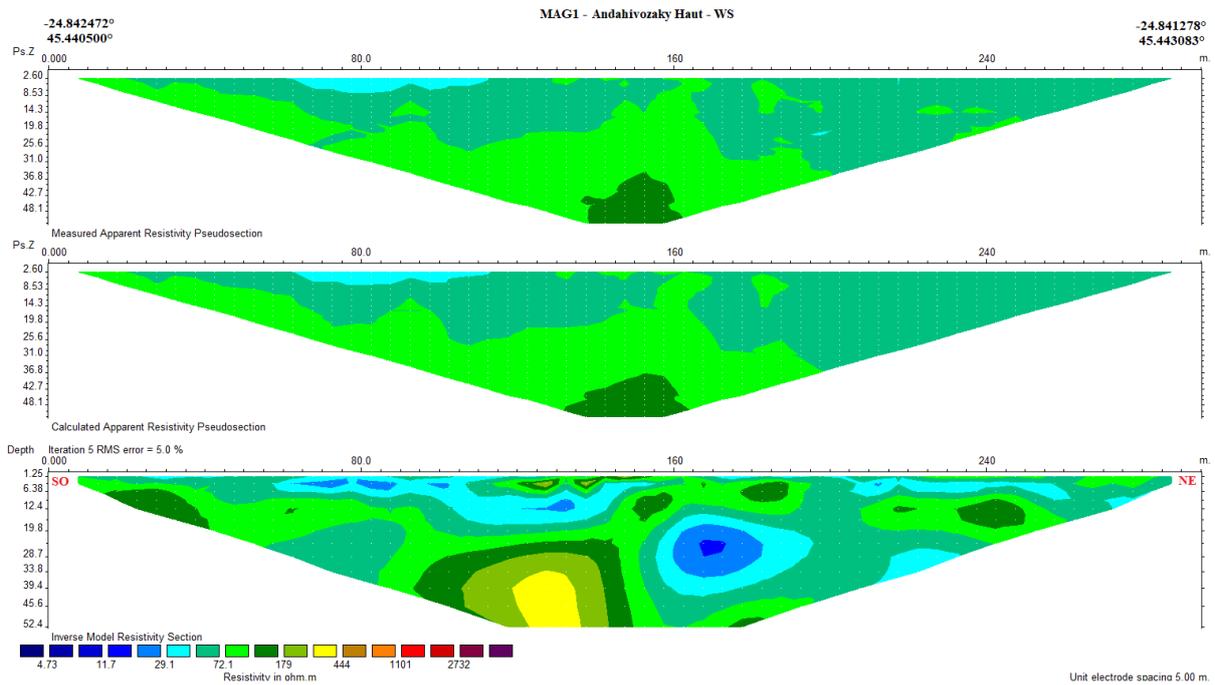


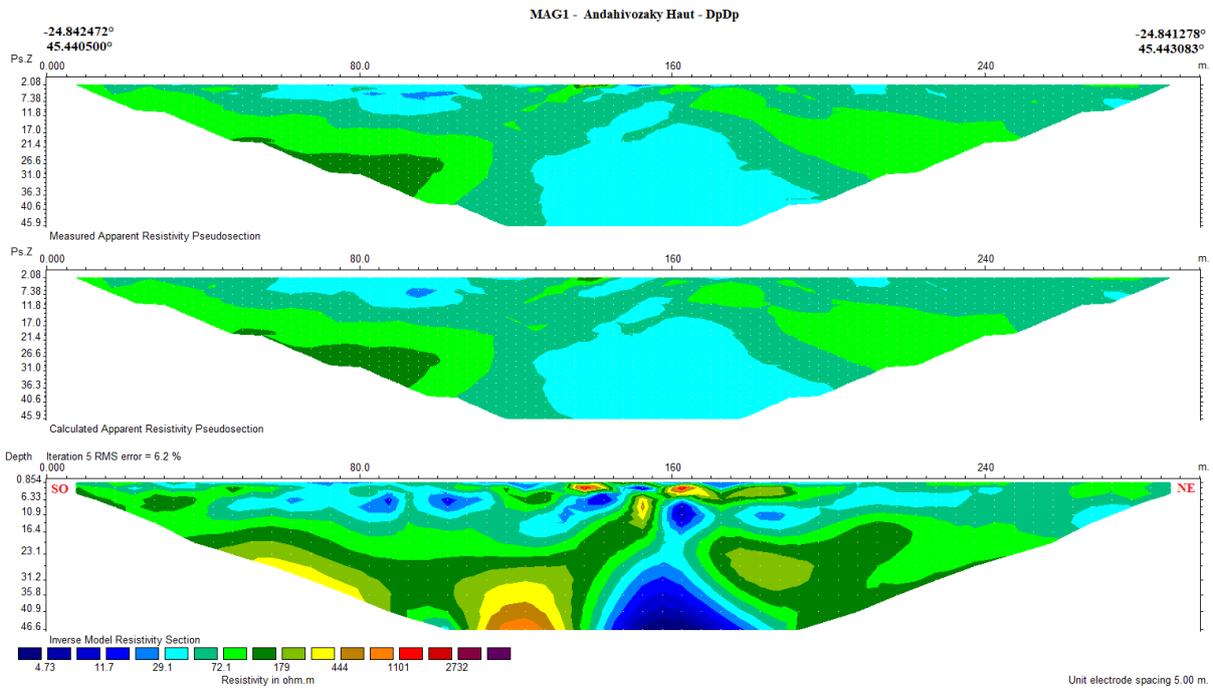
Taranaka – TAR 2



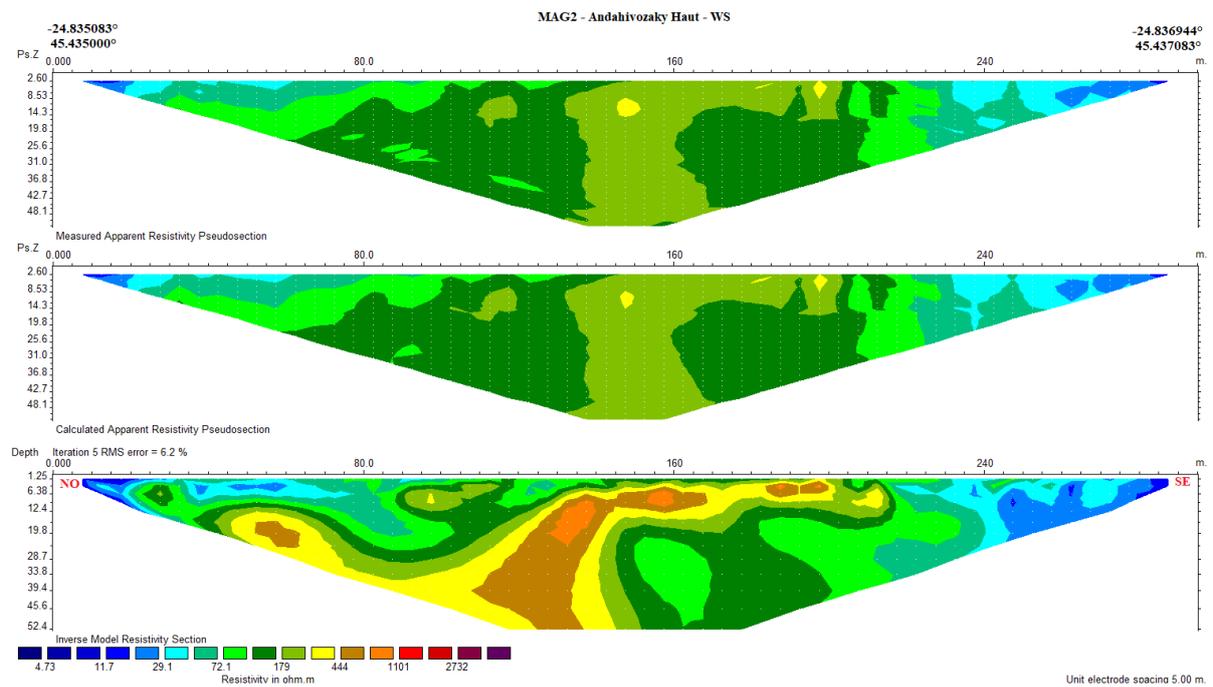


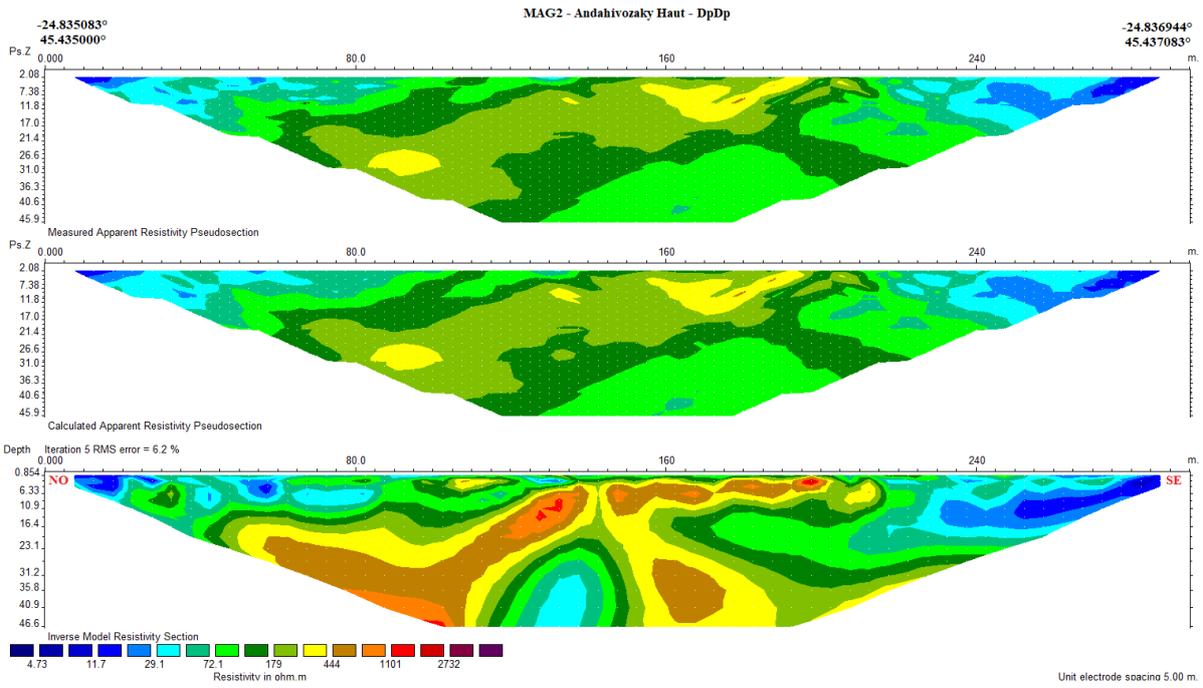
Andahivozaka Haut – MAG 1



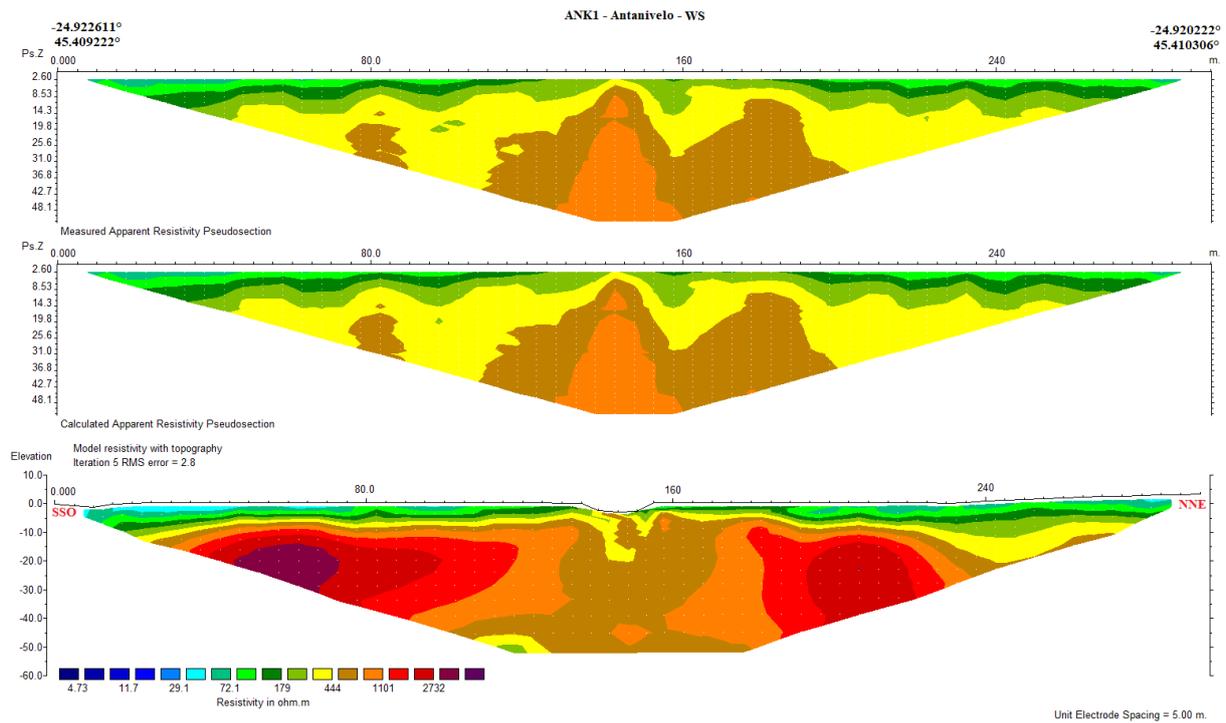


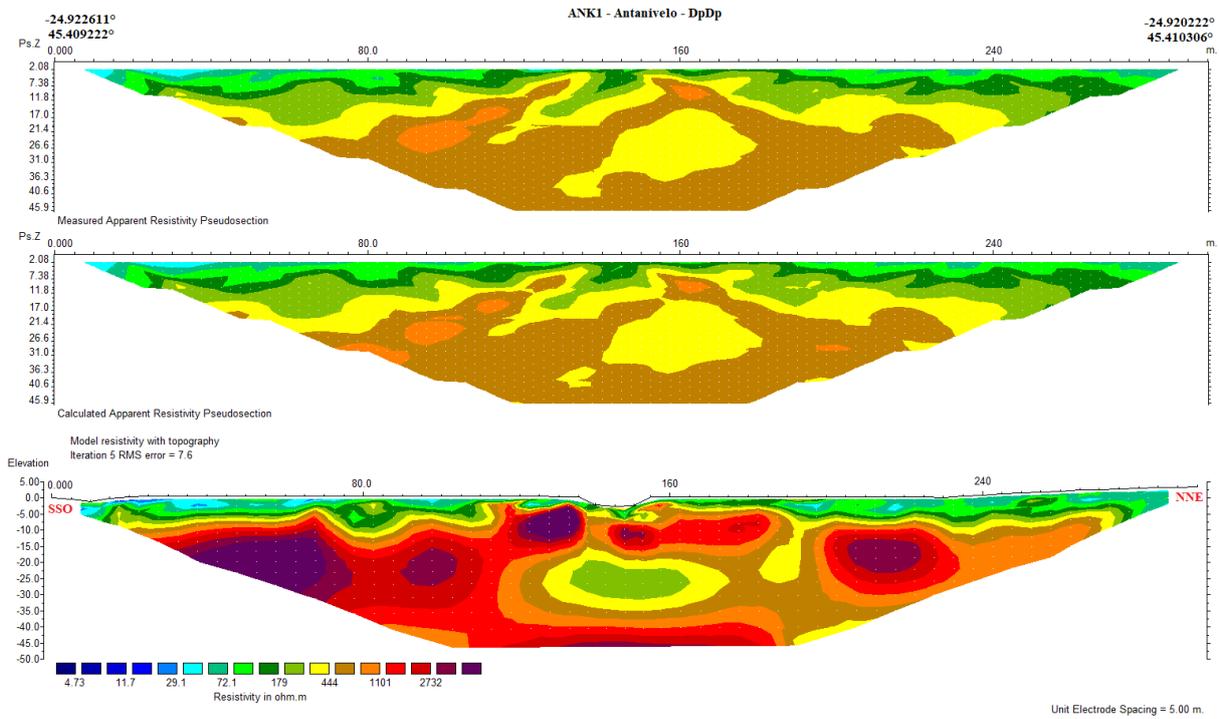
Andahivozaka Haut – MAG 2



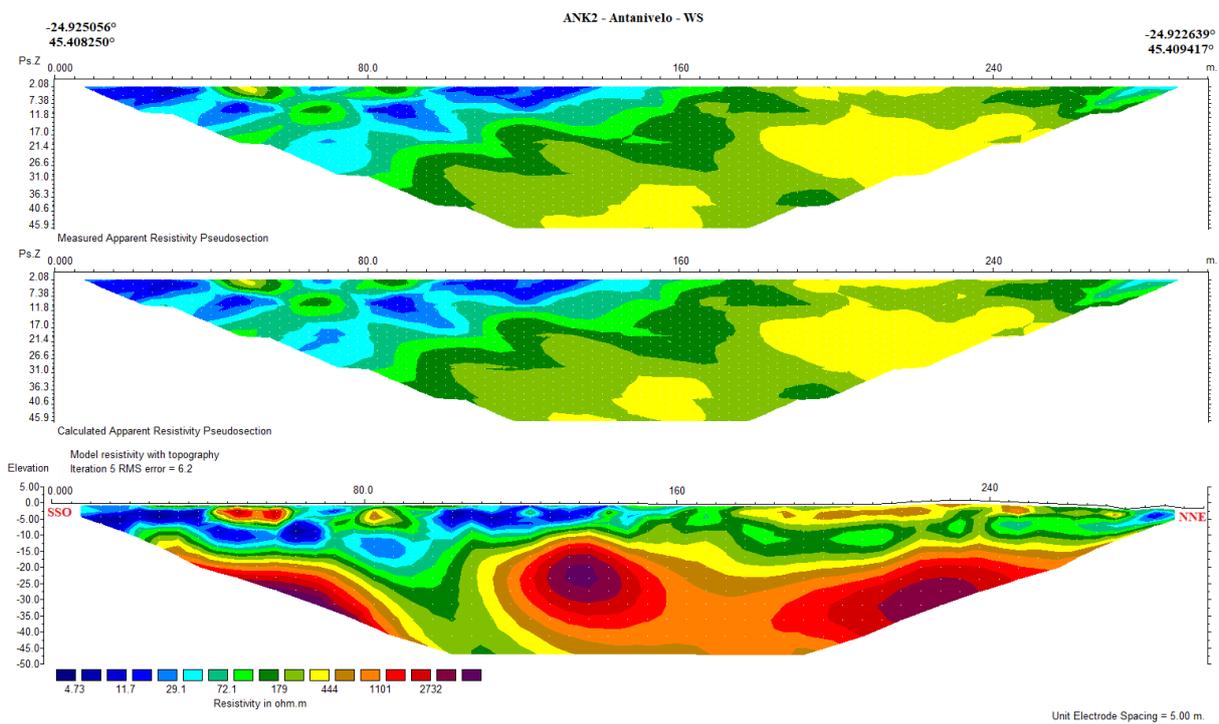


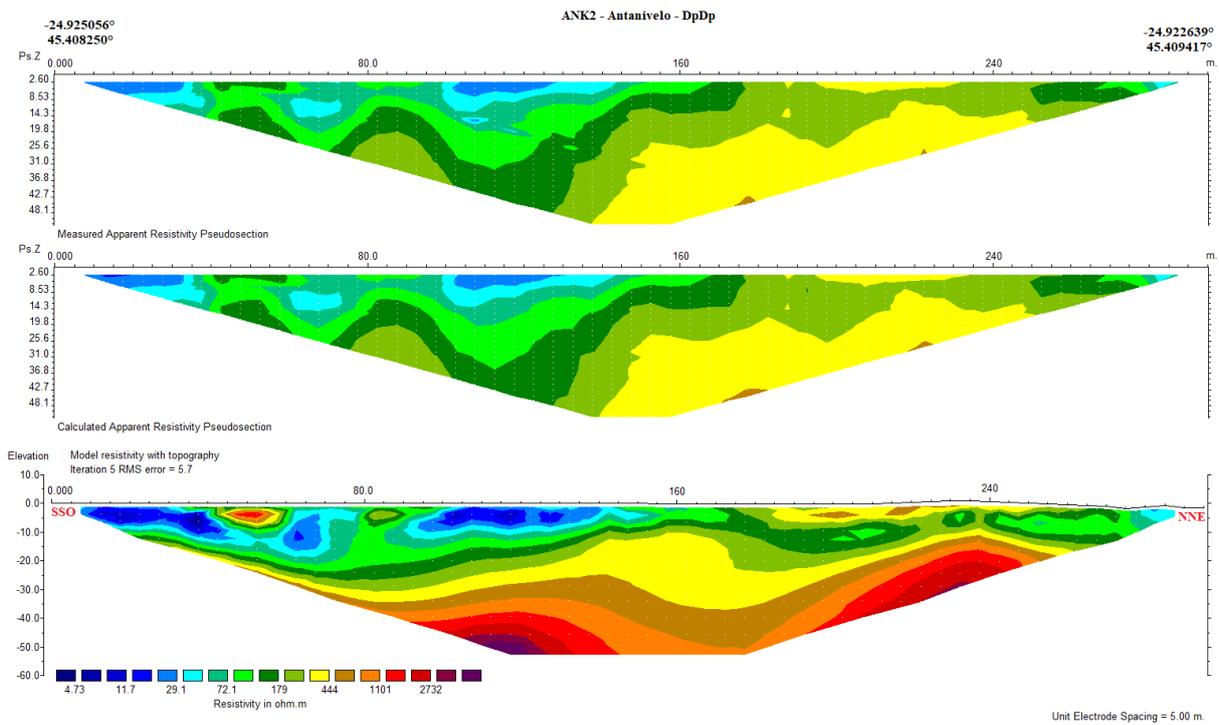
Antanivelo – ANK 1



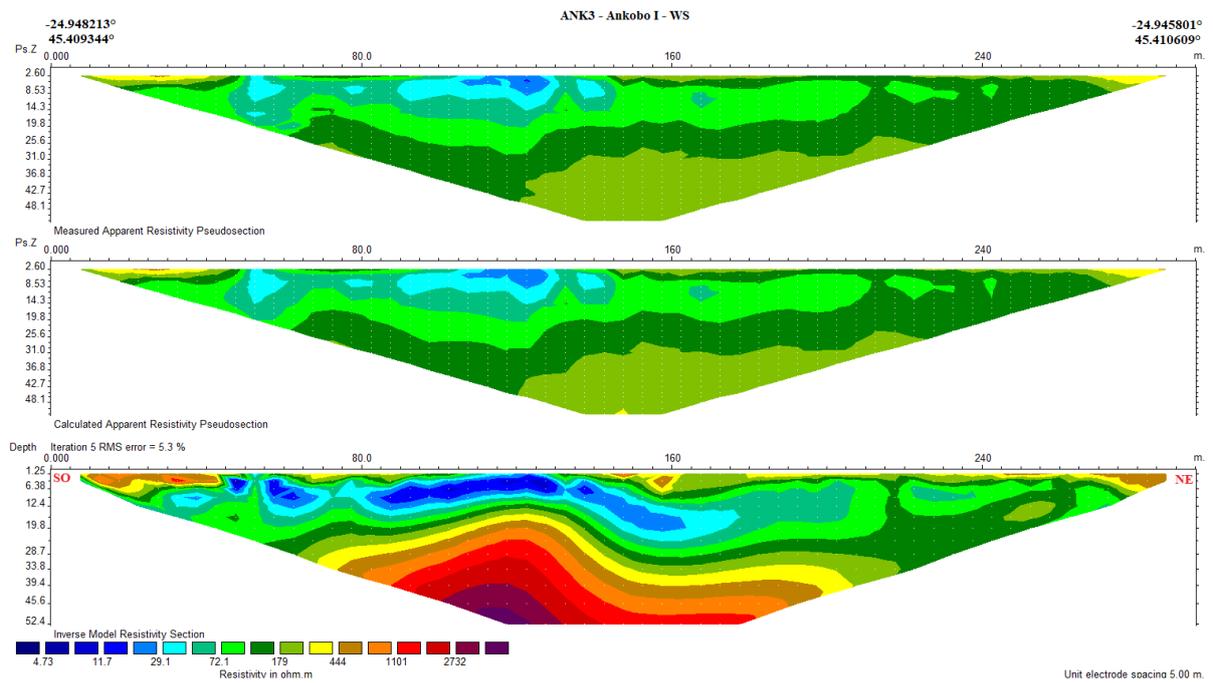


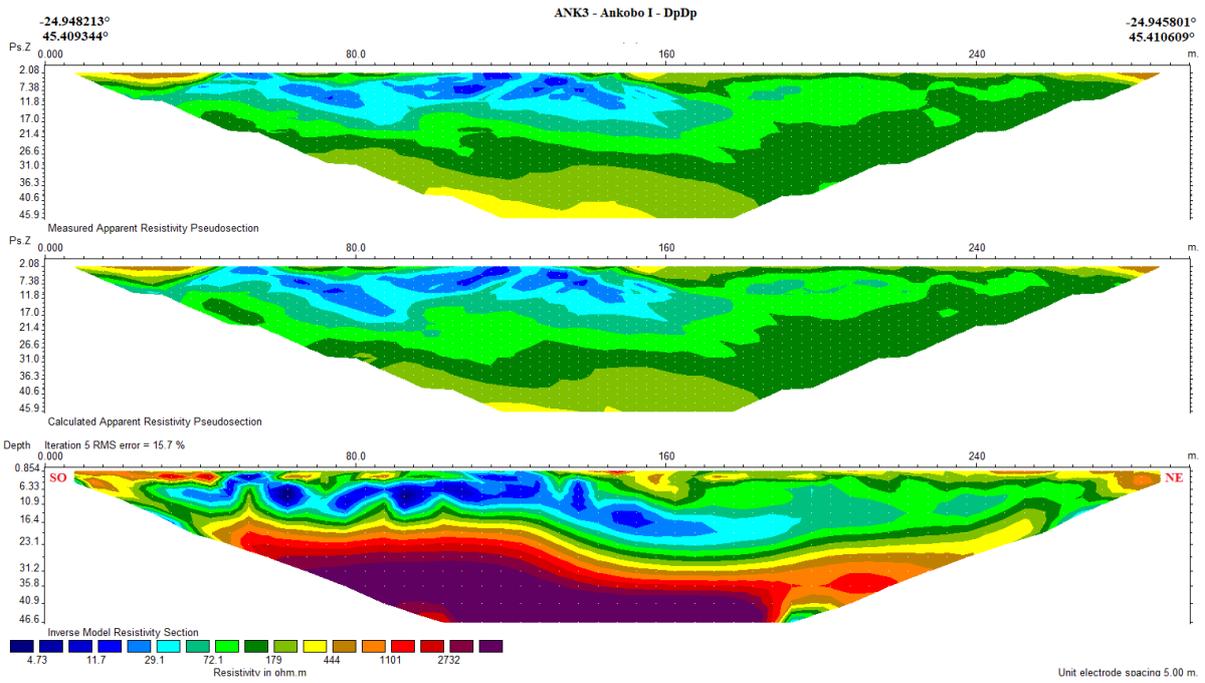
Antanivelo – ANK 2



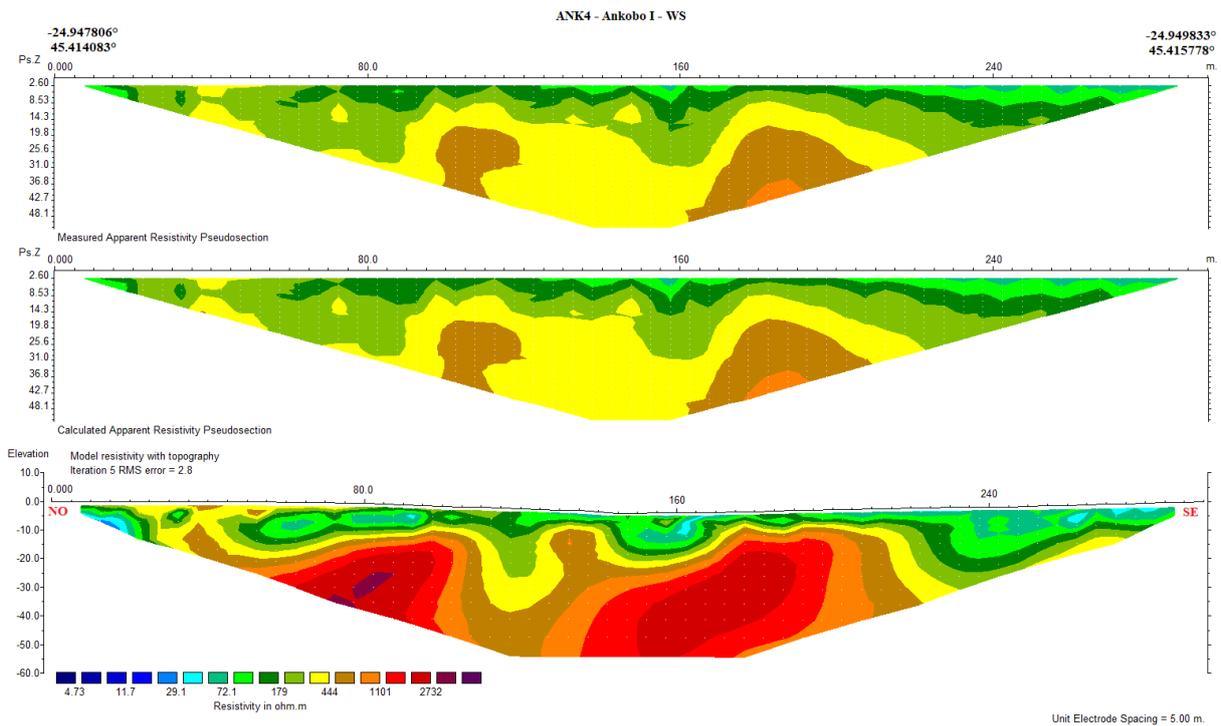


Ankobo I – ANK 3

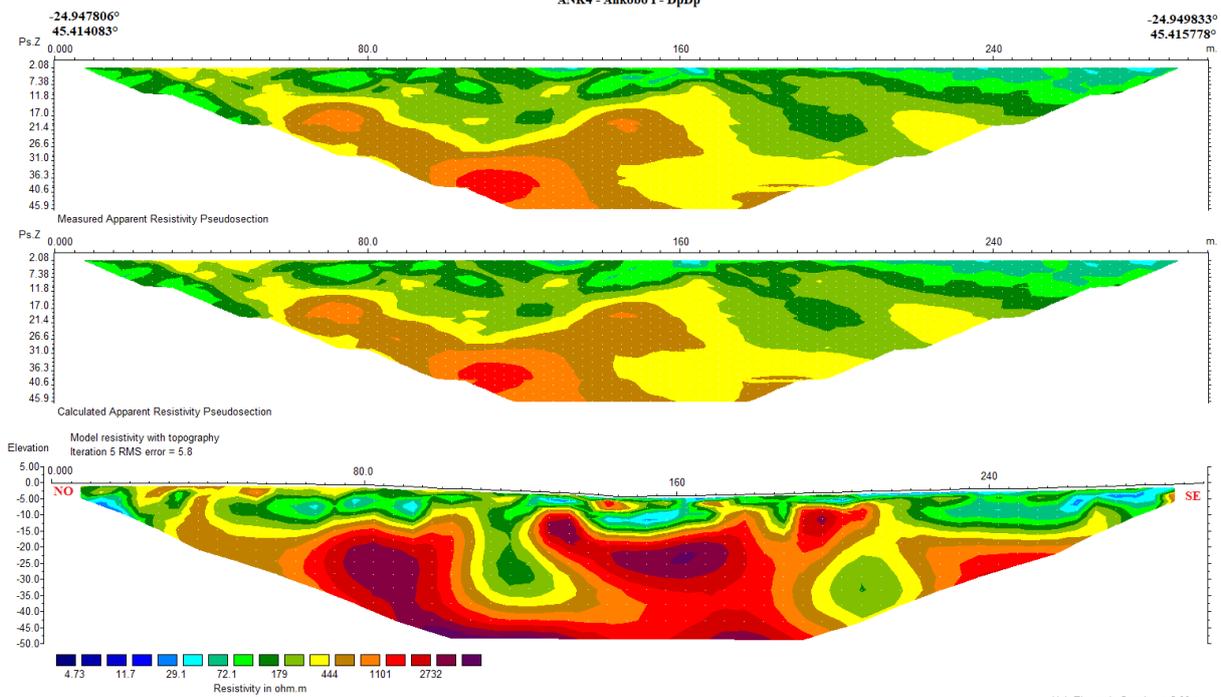




Ankobo I – ANK 4



ANK4 - Ankobo I - DpDp



Annexe5 : Couches vecteurs créées pour cette prospection

Linéaments :

Les linéaments présents dans le fichier shape joint « lineaments_sudMada_MSJ.rar » sont issus de l'analyse du Modèle Numérique de Terrain, des images satellites Sentinel 1A, des photos aériennes GoogleEarth et Maxar Premium.

De nombreux linéaments issus d'un traitement automatique du MNT par un algorithme, développé par Serele en 2019 (UNICEF), ont également été utilisés dans cette étude. Ces données sont propriétaires de l'UNICEF.

Dolines :

Les dolines présentes dans le fichier shape joint « dolines.rar » est un inventaire non exhaustif des dolines mise en évidence sur la commune de Sihanamar et Analamary