

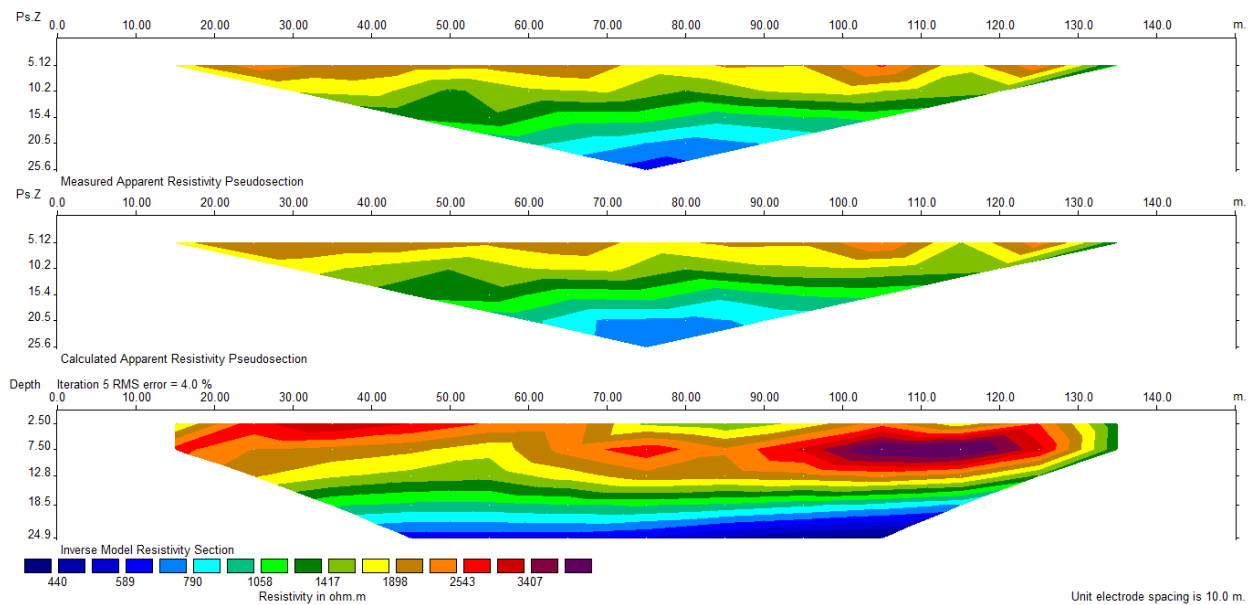


Figure 20 : Pseudo-section de la résistivité du sous-sol

La méthode électromagnétique

La méthode TDEM est une méthode électromagnétique de sondage géophysique (Descloitres M. et al., 2006). Elle permet de sonder le sous-sol grâce à l'induction électromagnétique produite par la coupure brusque d'un champ magnétique statique établi en surface grâce à une boucle de câble déployée à la surface dans laquelle on a fait circuler un courant électrique (figure 21, en rouge). La différence de flux crée une induction dans le sol, sous forme de boucle de courant (en bleu) qui crée à son tour un champ secondaire enregistré soit par la même boucle de câble en surface (dispositif coïncident) soit par une boucle de câble plus petite placée au centre de la boucle d'émission (dispositif central). Le champ secondaire est décroissant dans le temps. Plus le temps considéré est grand, plus l'information obtenue est profonde. L'étude de la forme de sa décroissance se traduit par une courbe de sondage reliant la résistivité apparente (en ordonnées) au temps (en abscisses) de façon analogue aux sondages électriques à courant continu. Cette courbe est étudiée et inversée pour reconstituer la variation de la résistivité en fonction de la profondeur. Une explication plus détaillée de la méthode de prospection électromagnétique TDEM est donnée dans la thèse de Descloitres M. en 1998.

On connaît déjà que la plaine d'Antananarivo est formée de dépôts d'alluvions stratifiés horizontalement (Rakotondrainibe, 2010). La méthode TDEM est très sensible aux terrains conducteurs et à la position de leurs toits et les définit de façon meilleure que les

sondages électriques. En revanche, les terrains résistants (supérieurs à 500 $\Omega.m$) sont mal définis (Descloitre M. et al., 2006). Les données de panneaux électriques réalisés dans la plaine ont montré que la résistivité du sous-sol est inférieure à 600 $\Omega.m$. En plus, La formation argileuse empêche les lignes de courant d'aller en profondeur. On a alors choisi d'appliquer la méthode EM pour étudier la structure de la plaine des basses altitudes.

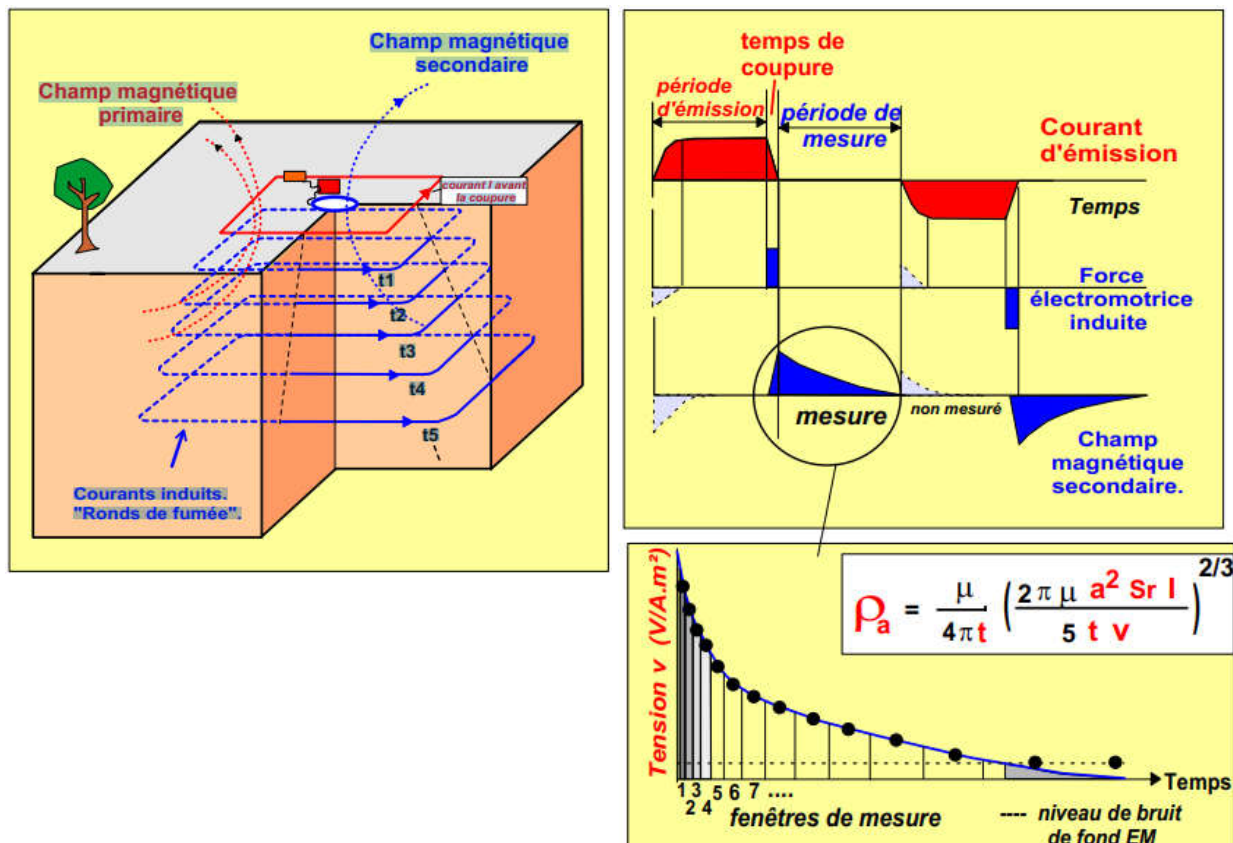


Figure 21 : Principe du TDEM (Descloitre M. et al., 2007)

On sonde le sol en étudiant les variations de champ magnétique secondaire en fonction du temps. La résistivité apparente dépend du temps t , de la surface d'émission a^2 , de la surface de réception S_r , du courant d'injection I et du voltage V dans le récepteur.

Choix de la taille de la boucle à utiliser pour le sondage TDEM

Pour le choix de la taille de la boucle à utiliser, on a fait cinq sondages TDEM en un même point avec trois tailles de boucle différentes. Une option dans le « setting » permet de choisir l'intensité de courant à 1A ou 4A. Ceux-ci ont été effectués lors du paramétrage avant le lancement du sondage TDEM (Cf. figure 22).

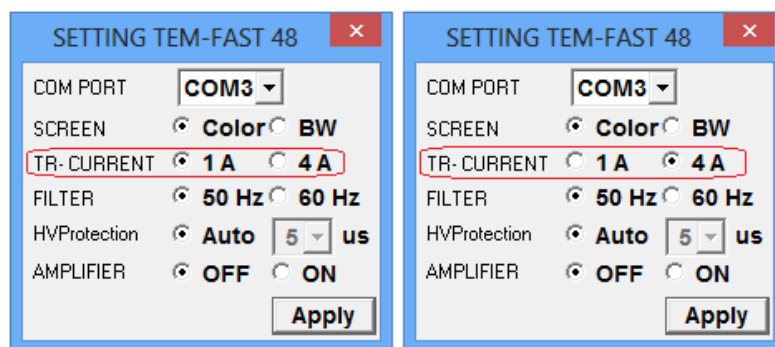


Figure 22: Choix de l'intensité du courant d'injection lors du paramétrage

La figure 23 suivante montre les résultats obtenus ainsi que les informations pour chaque taille de la boucle. On a remarqué que la variation de l'intensité de courant, pour la même taille de la boucle émetteur-récepteur, n'affecte pas la forme de la courbe obtenue, cas des courbes utilisant la taille de la boucle 50mX50m (courbes colorées en vert et bleu) et des courbes utilisant la taille 100mX100m (courbes colorées en marron et magenta). On a essayé aussi de varier l'intensité du courant d'émission avant coupure pour les boucles de taille 50m X 50m et 100m X 100m. On a pu constater que la période d'émission est plus longue pour une boucle de taille plus grande.

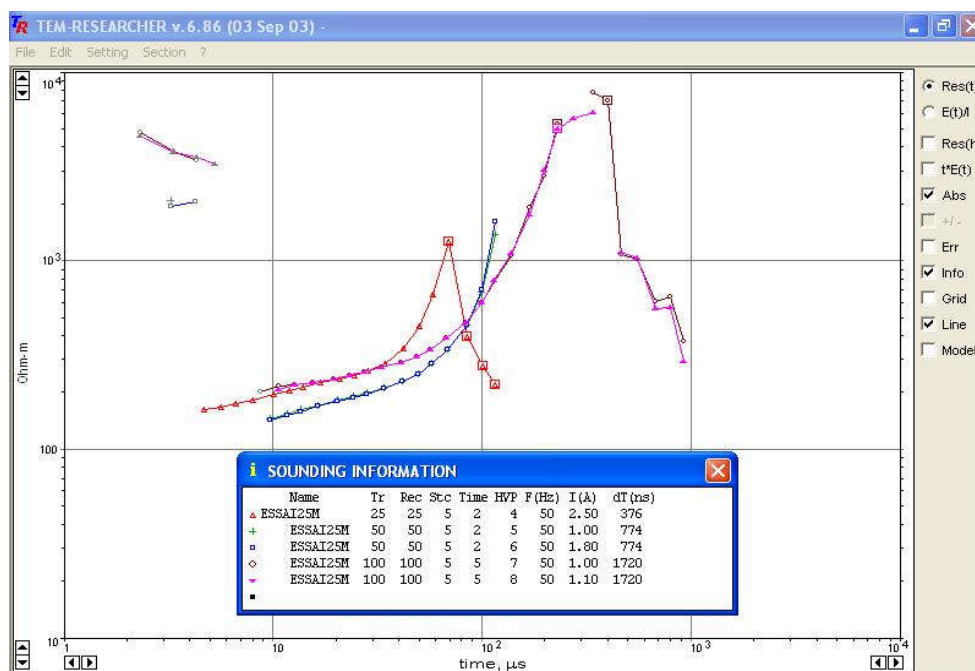


Figure 23 : Résultats des sondages TDEM utilisant le boucle dispositif coïncidant de tailles différentes (25m x 25m, courbe en rouge; 50m x 50m courbe en bleu et vert; et 100m x 100m courbe en marron et magenta)

Le tableau 3 montre les valeurs des résistivités obtenues en fonction du temps correspondant aux trois boucles de tailles différentes.

Pour mieux caler les valeurs de résistivités obtenues par sondage TDEM, une interprétation conjointe avec les données du panneau électrique et du sondage de reconnaissance réalisés sur le même point (figure 24 et 25) a été faite.

Tableau 3 : Résultats issus des sondages TDEM utilisant différentes tailles de boucle E-R.

Taille de la boucle; Time-Range; Stacks		25X25 (mXm); 2; 5	50 X 50 (m X m); 2; 5		100 X 100 (m X m); 5; 5		
Channel	Time	Res[Ohm-m] (I=1.0 A) ; deff=4μs	Res[Ohm-m] (I=1.0 A) ; deff=5μs	Res[Ohm-m] (I=1.8 A); deff=6μs	Res[Ohm-m] (I=1.0 A); deff=7μs	Res[Ohm-m] (I=1.1 A); deff=8μs	
1	4.06	99999.99	1385.69	1490.85	1963.05	1879.46	Période d'émission
2	5.07	144.94	1585.9	99999.99	1949.76	1922.19	
3	6.07	151.15	99999.99	99999.99	1989.32	2087.8	
4	7.08	160.25	99999.99	99999.99	99999.99	2097.23	
5	8.52	171.83	99999.99	99999.99	99999.99	99999.99	
6	10.53	185.96	126.8	129.77	151.43	99999.99	
7	12.55	197.35	137.51	139.71	170.64	165.1	Période de mesure
8	14.56	207.92	146.74	148.97	181	179.71	
9	17.44	219.06	158.27	160.09	192.38	191.53	
10	21.46	231.75	170.87	172.25	208.09	207.65	
11	25.49	243.94	181.48	182.47	222.94	222.33	
12	29.5	257.83	190.49	191.25	236.1	235.37	
13	35.28	284.67	204.2	204.62	252.74	252.62	
14	43.3	343.84	223.86	224.29	274.93	274.29	
15	51.4	450.76	247.86	247.86	298.27	298.39	
16	59.41	670.04	280.59	280.04	328.26	328.03	
17	70.95	-1275.25	337.63	336.92	376.87	376.87	
18	87.07	-399.76	458.76	458.98	461.51	459.49	
19	103.16	-279.55	707	680.71	591.19	587.75	
20	119.22	-219.77	1616.09	1396.2	765.17	775.46	
21	142.33				1060.27	1089.83	
22	174.54				1907.45	1759.56	
23	206.71				2835.95	3064.48	
24	238.83				-5371.28	-5033.95	
25	285.04				11668.08	5775.26	
26	350				7919.49	6189.97	Bruit de fond EM

27	413.83				-7228.62	11477.76	
28	478.06				1096.99	1123.41	
29	570.47				1029.62	1049.61	
30	699.41				613.24	560.88	
31	828.06				656.3	573.05	
32	956.53				377.53	294.74	

Stacks: c'est le nombre de fois de réalisation de mesure, compris entre 1 et 20. Il permet de calculer une déviation standard ou erreur.

deff (ou encore HVP): c'est la durée de la coupure de la protection HVP. La valeur $deff = 6\mu s$ est compatible avec une boucle de 50m X 50m. Les points ("channels") pour lesquels le "Time" sera inférieur à cette valeur seront grisés dans Temres.

Parmi les différents tailles des boucles qui ont fait l'objet d'essai, seule la boucle 50m X 50m ne présente pas de forme de signal bruité. En effet, la boucle de 25m X 25m est sensible à la formation superficielle et donc il se peut que le signal soit perturbé par la formation résistante en surface qui se présente sur la coupe de l'imagerie 2D de la résistivité (cf. figure 24). Et pour la boucle de taille 100m X 100m, on remarque aussi que le signal commence à être bruité lorsqu'on pénètre un peu plus en profondeur. Ceci explique que la taille de boucle 100m X 100m dépasse largement le toit du substratum rocheux.

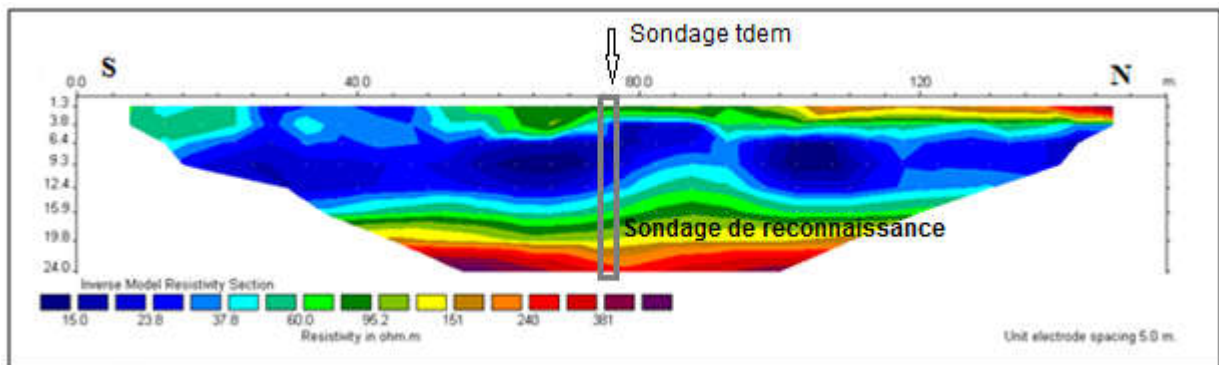


Figure 24 : Résultat du panneau électrique dont le centre se trouve au point de mesure de sondage TDEM

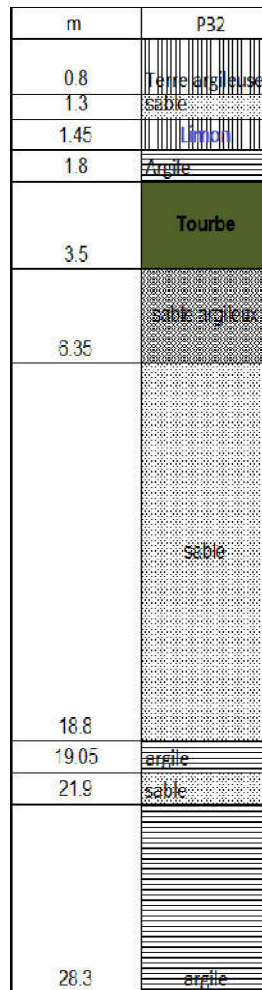


Figure 25: Log de sondage de reconnaissance (Rakotondrainibe , 2010)

La comparaison des valeurs de la résistivité affichées par le tableau 1 avec la gamme de valeur de la résistivité apparente du sous-sol par la technique du panneau électrique et du log de sondage de reconnaissance effectué par Rakotondrainibe en 2010 nous amène à l'observation suivante :

Pour les trois tailles de boucle utilisées, la valeur de la résistivité est en moyenne égale à 143 Ω m. Ce qui correspond d'abord, si on regarde la coupe géoélectrique, à la couche qui se trouve à environ 20 mètres de profondeur (Cf. figure 24) puis à la couche sableuse probablement aquifère dont le toit se trouve à 19 mètres selon le log de sondage de reconnaissance (Cf. figure 25).

La boucle de taille 25m X 25m se limite à la détection de la couche de résistivité égale à 670 Ω m. Le log de forage n'a pas atteint la profondeur de la formation ayant cette valeur de résistivité mais on peut dire aussi que cette valeur ne correspond pas non plus à la formation du substratum rocheux. Ce qui veut dire que la profondeur voulue, estimée à 50 mètres, n'est pas atteinte en utilisant la boucle de taille 25m X 25m. La valeur de la résistivité

du substratum, correspondant au toit de la roche saine, devrait être supérieure à 1000 $\Omega.m$ si on se réfère à la valeur de la résistivité des roches (Mabrouk D., 2015).

L'utilisation de la taille de boucle 50m X 50m et 100m X 100m ont permis d'atteindre la couche résistante en affichant la valeur de la résistivité supérieure à 1500 $\Omega.m$ (Cf. tableau 1, 2^{ème} et 3^{ème} colonne).

Nous avons donc décidé d'utiliser la taille de boucle 50m X 50m pour deux raisons :

- la valeur de la résistivité mesurée est assez élevée pour dire que le toit du substratum résistant est atteint
- l'utilisation de la taille de la boucle 100m X 100m n'était pas facile pour problème d'accès au site.

La profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation en sondage TDEM est estimée entre 0,5 et 1,5 fois la taille de la boucle (Descloîtres, 1998). Pour notre cas ici, les résultats expérimentaux (Cf. tableau 1) confrontés avec le log de sondage de reconnaissance montrent une profondeur d'investigation approximativement égale au côté de la boucle. Ce qui correspond bien à l'objectif qu'on veut atteindre d'où le choix de la taille de la boucle 50m X 50m.

MATERIELS UTILISES

Pour la méthode de prospection électrique en courant continu, on a utilisé un résistivimètre IRIS Instruments, le Syscal R2, équipé d'accessoires permettant la mise en œuvre de sondage électrique, de un trainé ou encore de panneau électrique à 32 électrodes (cf. figure 26). Le système est doté aussi du logiciel SYSCAL utilities (PROSYS et ELECTRE II) permettant la création et transfert de séquences de mesure dans le résistivimètre et aussi le transfert de données du résistivimètre vers l'ordinateur de traitement. L'inversion et le traitement des données ont été exécutés avec le logiciel RES2DINV 3.49.

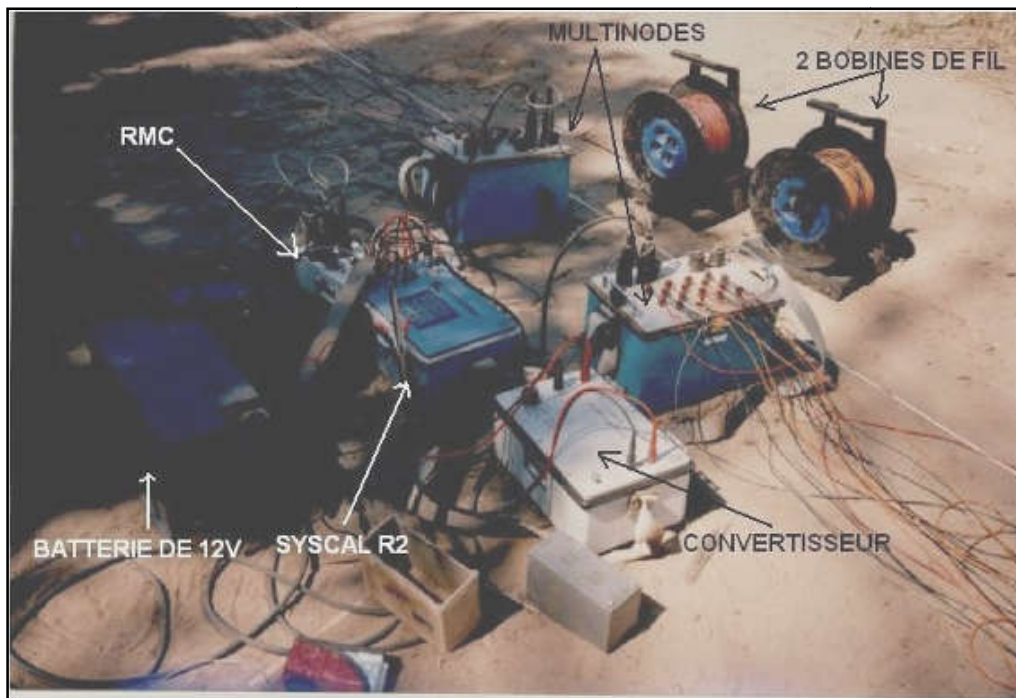


Figure 26 : Le résistivimètre SYSCAL R2 et ses accessoires

Pour la méthode EM, on a utilisé l'appareil TEM-FAST 48 avec un dispositif à boucle coïncident, i.e. une seule câble sert à la fois de boucle émetteur et boucle récepteur (cf. figure 27). L'appareil est équipé de logiciel de base permettant le contrôle de la mesure sur le terrain, l'aperçu immédiat du résultat de mesure in-situ sous forme de courbe de résistivité et enfin la qualité du signal (existence ou non de bruit pendant les mesures).



Figure 27 : Appareil de mesure sondage TDEM, Le TEM-FAST 48

III-3 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats des mesures géophysiques et leurs interprétations seront présentées et développées dans ce paragraphe.

III-3.1 PLAN DE MASSE ET MISE EN ŒUVRE

Pour manque de temps et de moyens financiers, le nombre de mesures géophysiques a été limité. Les résultats ainsi obtenus ne permettaient pas de faire un modèle commun pour toute la zone d'étude. Par contre, ils sont fiables et suffisants pour représenter les différentes structures géomorphologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude. On a alors considéré les deux formations principales qui caractérisent la zone d'étude et la zone d'étude a été classifiée en deux catégories. La classification a été basée sur deux critères à savoir : les hautes altitudes qui sont caractérisées plus souvent par une couverture latéritique d'épaisseur variable (Rakotondraompiana S., et al., 2003; Grillot J. C. et al, 1987), et les basses altitudes qui sont caractérisées par les dépôts alluvionnaires d'origine lacustre. Des campagnes géophysiques ont été alors menées sur ces deux types de terrain (hautes altitudes et basses altitudes).

Pour les basses altitudes, 21 mesures de SE (figure 28) ont été effectuées dans la plaine alluvionnaire de la zone d'étude pour estimer la profondeur du substratum rocheux. La répartition de ces 21 SE n'est pas régulière pour toute la zone d'étude, mais ils représentent bien presque la totalité des plaines des basses altitudes, sauf pour la plaine à côté d'Ambohitrimanjaka (figure 29). En effet, cette partie fera l'objet d'étude électromagnétique.

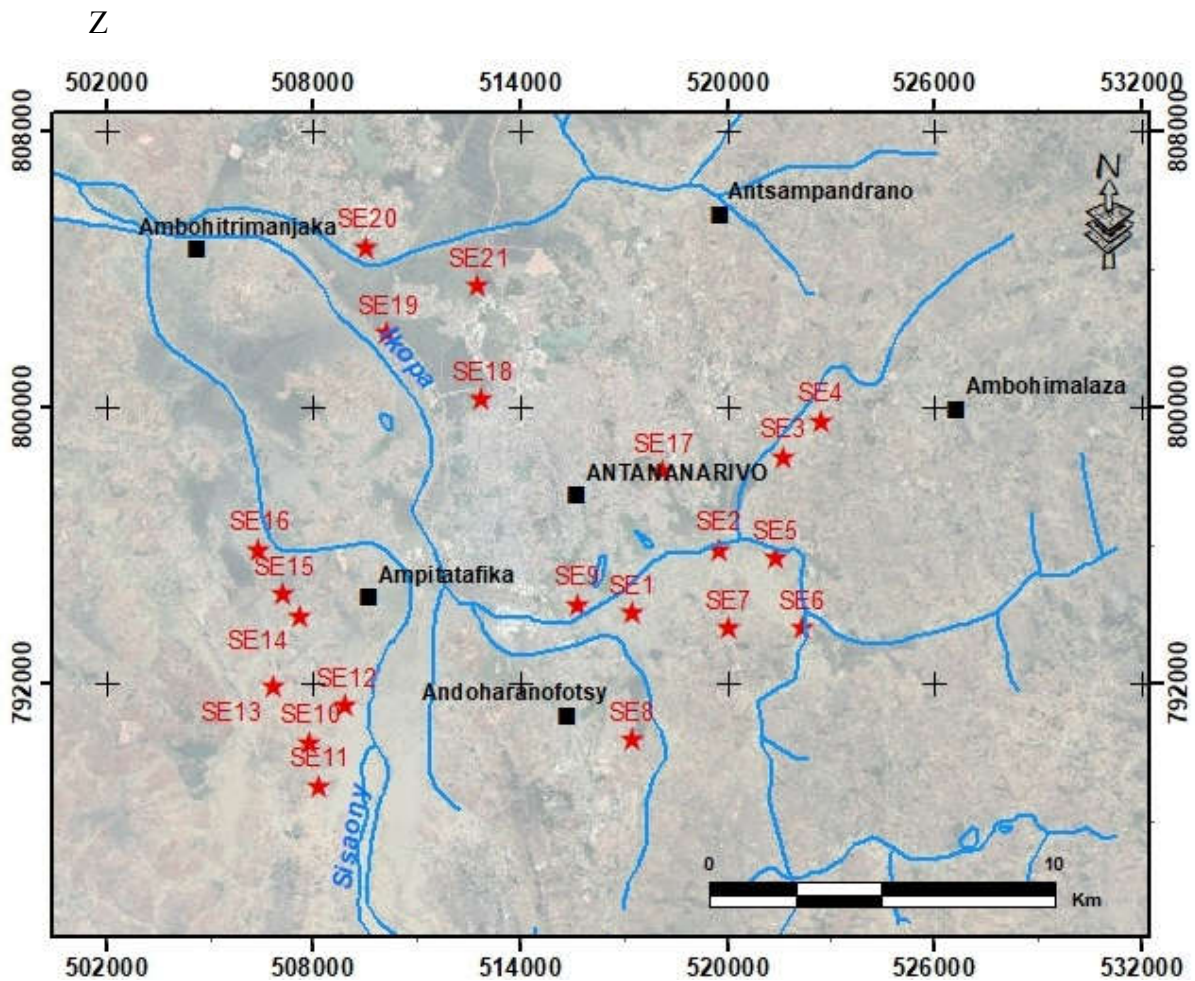


Figure 28 : Répartition spatiale des 21 sondages électriques (en points rouges)

Ensuite, la plaine du côté d'Ambohitrimanjaka (site 1) a été choisie pour faire 40 sondages TDEM (figure 29). Les 40 sondages TDEM sont répartis assez régulièrement. Le pas des mesures est à peu près de 500 m et la distance entre les profils de 500m. Le choix de ce site (site 1) est basé sur le fait des données de sondage de reconnaissance à proximité de ce site, issues du rapport de Rakotondrainibe en 2010, relatif au projet d'aménagement hydrologique de la plaine d'Antananarivo, sont disponibles.

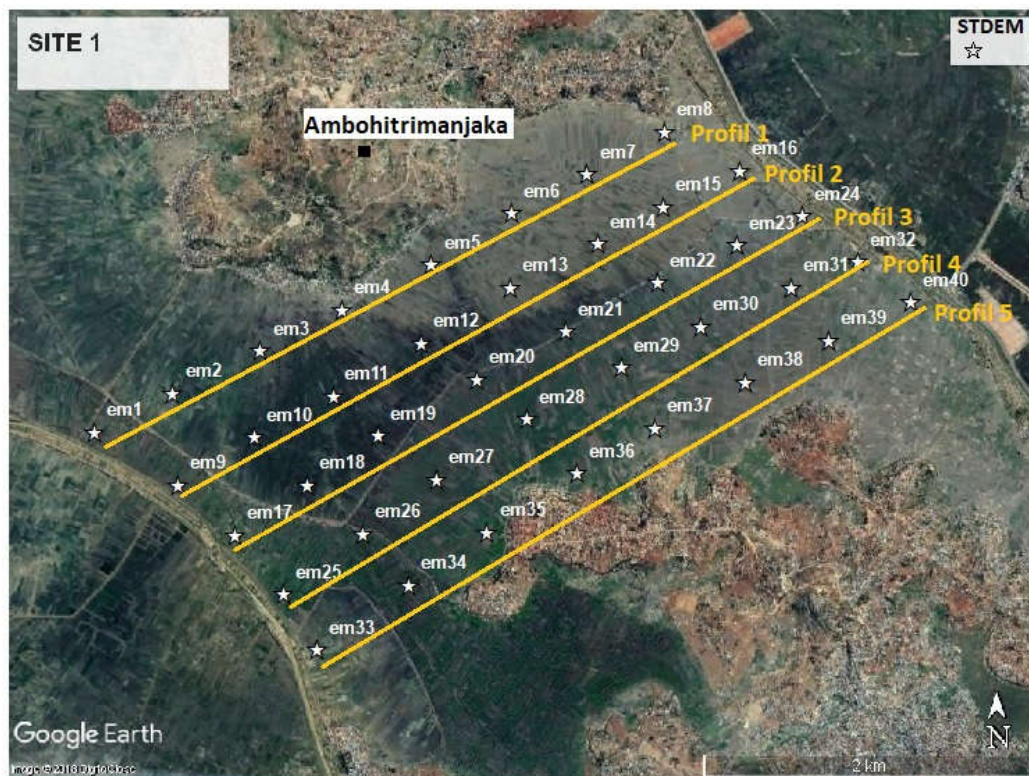


Figure 29 : La répartition des sondages TDEM et les cinq profils

Pour les hautes altitudes, on dispose de données issues des rapports d'études hydrogéophysiques de la société SGDM. Il existe également des données issues des prospections géophysiques réalisées par les chercheurs consultants de l'IOGA. Quelques données de prospection géophysiques sur des sites privés sont aussi présentées ici pour comprendre la structure de la nappe d'altération en zone de hautes altitudes. La répartition spatiale de ces données est montrée par la figure 30.

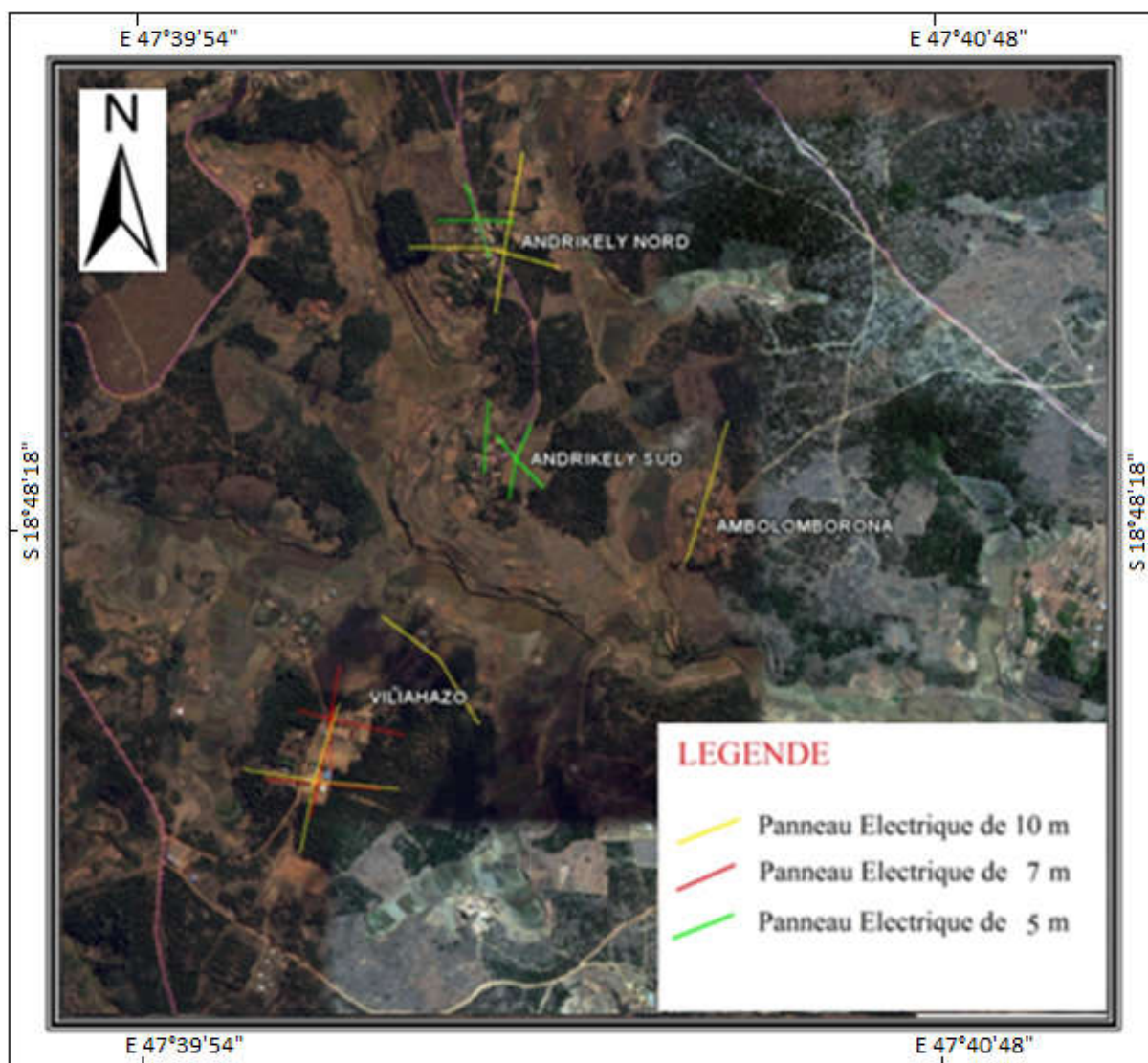


Figure 30 : Plan de masse des profils ITE en terrains de haute altitude

Des données issues d'un projet de construction de la gare routière à ByPass Ambohimambola ont été prises pour voir l'aspect hydrogéologique en relief résiduel et se trouvant dans une zone de transition entre hautes altitudes et basses altitudes. Au total, 15 profils d'ITE (notés P1 à P15 Cf. figure 31) ont été réalisés dans ce site de By-pass Ambohimambola.



Figure 31 : Plan de masse des 15 profils d'ITE en zone de transition entre hautes altitudes et basses altitudes.