

Union des Comores

**Ministère de la Production, de l'Environnement,  
de l'Energie, de l'Industrie et de l'Artisanat  
Direction Générale de l'Energie, des Mines et de  
l'Eau (DGEME)**

Convention de financement AFD N° CKM 1068 01 X



## **Projet pilote de gestion du service public de l'eau en milieu rural sur l'île de Grande Comore (GECEAU)**

Rapport de Monsieur Garo Joelson - Géophysicien  
mission du 25 octobre au 20 décembre 2014

Version 1



HDV40108D

Janvier 2015



# Informations qualité

## Contrôle qualité

Version	Date	Rédigé par	Visé par :
1	30/01/2015	S. Garo Joelson	G. Dutriez

## Destinataires

Envoyé à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
Said Ahmed Cheikh Salah-Eddine	Directeur Général (DGEME)	31/01/2015
Maurizio Travella	Assistant technique à la DGEME (ANTEA)	31/01/2015

Copie à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
Kartoibi Kambi	Chargé de Projets (AFD)	31/01/2015
Margaux Chinal	Chargée de Projets (AFD)	31/01/2015
Said Ahmed Othman	Directeur Technique (DGEME)	31/01/2015
Mahmoud Amadah	Ingénieur projet GECEAU	31/01/2015
Said Antoissi	Ingénieur projet GECEAU	31/01/2015

# Table des matières

1.	Introduction .....	1
1.1	Objectifs du projet GECEAU .....	1
1.2	Objectifs et résultats attendus de l'étude .....	1
2.	Contexte hydrogéologique .....	3
2.1	Le domaine littoral .....	3
2.2	Le domaine d'altitude .....	3
3.	Géophysique .....	4
3.1	Méthode d'investigation .....	4
3.2	Technique de mesure sur terrain .....	5
3.3	Résultats et interprétations des données .....	5
3.3.1	Calage d'interprétation .....	7
3.3.2	Secteur HELENDJE .....	10
3.3.3	Secteur IVEMBENI .....	11
3.3.4	Secteur CHAMLE .....	13
3.3.5	Secteur BATSA .....	15
3.3.6	Secteur OUSSIVO .....	17
3.3.7	Secteur HAHAYA .....	19
3.3.8	Secteur INANE .....	20
3.3.9	Secteur MIDJENDJENI .....	22
3.3.10	Secteur MALE .....	24
3.3.11	Secteur CHOUANI .....	25
3.3.12	Secteur DJAHADJOU .....	27
3.3.13	Secteur MOHORO .....	29
3.3.14	Secteur OUELA .....	31
3.3.15	Secteur CHEZANI .....	33
3.3.16	Secteur MTSANGADJOU .....	35
4.	Conclusion .....	38

## Liste des annexes

**Annexe 1 : Planning de la mission**

**Annexe 2 : Photos de la zone d'étude**

**Annexe 3 : Plans de masse des points d'implantation**

**Annexe 4 : Les méthodes géophysiques pour la recherche en hydrogéologie**

**Annexe 5 : Résultats des sondages électriques et électromagnétiques**

## Liste des figures

Figure 1 - Appareils de mesures électromagnétique et électrique .....	4
Figure 2 - Répartition spatiale des secteurs d'études .....	6
Figure 3 - Plan de masse des travaux géophysiques au niveau du puits à CHAMLE .....	7
Figure 4 - Coupe géoélectrique au niveau du puits à CHAMLE .....	7
Figure 5 - Calage d'interprétation entre la coupe litho stratigraphique d'un puits et coupe géoélectrique à CHAMLE.....	9
Figure 6 - Plan de masse des mesures géophysiques à HELENDJE .....	10
Figure 7 - Coupes géoélectriques n°1 et n°2 à HELENDJE .....	10
Figure 8 - Coupe géoélectrique n° 3 à HELENDJE .....	11
Figure 9 - Plan de masse des mesures géophysiques à IVEMBENI .....	12
Figure 10 - Trois coupes géoélectriques réalisées à IVEMBENI .....	12
Figure 11 - Plan de masse des mesures géophysiques à CHAMLE .....	13
Figure 12 - Coupes géoélectriques n°1 et n°3 à CHAMLE .....	14
Figure 13 - Coupe géoélectrique n° 2 à CHAMLE .....	15
Figure 14 - Plan de masse des mesures géophysiques à BATSA .....	15
Figure 15 - Coupes géoélectriques 1 et 2 réalisées à BATSA .....	16
Figure 16 - Coupe géoélectrique n°3 réalisée à BATSA.....	17
Figure 17 - Plan de masse des mesures géophysiques à OUSSIVO .....	17
Figure 18 - Coupe géoélectrique n°1 réalisée à OUSSIVO .....	18
Figure 19 - Coupe géoélectrique n°2 réalisé à OUSSIVO .....	18
Figure 20 - Plan de masse des mesures géophysiques à HAHAYA .....	19
Figure 21 - Coupe géoélectrique n°1 réalisée à HAHAYA.....	19
Figure 22 - Coupe géoélectrique n°2 réalisée à HAHAYA.....	20
Figure 23 - Plan de masse des mesures géophysiques à INANE .....	20
Figure 24 - Coupes géoélectriques n°1 et n°2 à INANE .....	21
Figure 25 - Coupe géoélectrique n° 3 à INANE .....	21
Figure 26 - Plan de masse des mesures géophysiques à MIDJENDJENI .....	22
Figure 27 - Coupes géoélectriques n°1 MIDJENDJENI .....	22
Figure 28 - Coupe géoélectrique n°2 MIDJENDJENI .....	23
Figure 29 - Coupe géoélectrique n° 3 à MIDJENDJENI .....	23
Figure 30 - Plan de masse des mesures géophysiques à MALE .....	24
Figure 31 - Coupes géoélectriques 01 et 02 réalisées à MALE .....	24
Figure 32 - Coupe géoélectrique n°3 réalisé à MALE.....	25

Figure 33 - Plan de masse des mesures géophysiques à CHOUANI.....	25
Figure 34 - Coupe géoélectrique n°1 CHOUANI.....	26
Figure 35 - Coupe géoélectrique n°2 CHOUANI.....	26
Figure 36 - Coupe géoélectrique n°3 à CHOUANI.....	27
Figure 37 - Plan de masse des mesures géophysiques à DJAHADJOU .....	27
Figure 38 - Coupe géoélectrique n°1 à DJAHADJOU .....	28
Figure 39 - Coupe géoélectrique n°2 à DJAHADJOU .....	28
Figure 40 - Coupe géoélectrique n°3 à DJAHADJOU .....	28
Figure 41 - Plan de masse des mesures géophysiques à MOHORO .....	29
Figure 42 - Coupes géoélectriques 1 et 2 réalisées à MOHORO .....	30
Figure 43 - Coupe géoélectrique n°3 réalisée à MOHORO .....	31
Figure 44 - Plan de masse des mesures géophysiques à OUELA .....	31
Figure 45 - Coupes géoélectriques n°1 et n°2 à OUELA .....	32
Figure 46 - Coupe géoélectrique n° 3 à OUELA.....	33
Figure 47 - Plan de masse des mesures géophysiques à CHEZANI.....	34
Figure 48 - Coupes géoélectriques n°1 et n°3 à CHEZANI.....	34
Figure 49 - Coupes géoélectriques n°2 à CHEZANI .....	35
Figure 50 - Plan de masse des mesures géophysiques à MTSANGADJOU.....	35
Figure 51 - Coupes géoélectrique n°1 et n°3 réalisées à MTSANGADJOU .....	36
Figure 52 - Coupes géoélectriques n°2 à MTSANGADJOU .....	36
Figure 53 - Plan de masse des points proposés à HELENDJE .....	55
Figure 54 - Plan de masse des points proposés à IVEMBENI .....	55
Figure 55 - Plan de masse des points proposés à CHAMLE .....	56
Figure 56 - Plan de masse des points proposés à BATSA .....	56
Figure 57 - Plan de masse d'un point proposé à OUSSIVO.....	57
Figure 58 - Plan de masse d'un point proposé à HAHAYA.....	57
Figure 59 - Plan de masse des points proposés à INANE .....	58
Figure 60 - Plan de masse des points proposés à MIDJENDJENI .....	58
Figure 61 - Plan de masse des points proposés à MALE .....	59
Figure 62 - Plan de masse d'un point proposé à CHOUANI .....	59
Figure 63 - Plan de masse d'un point proposé à DJAHADJOU.....	60
Figure 64 - Plan de masse d'un point proposé à MOHORO.....	60
Figure 65 - Plan de masse des points proposés à OUELA.....	61
Figure 66 - Plan de masse d'un point proposé à CHEZANI .....	61
Figure 67 - Plan de masse d'un point proposé à MTSANGADJOU .....	62

Figure 68 - Principe d'un sondage électrique avec le dispositif Wenner Alpha .....	66
Figure 69 - Fonction de sensibilité pour un dispositif Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipôle-dipôle (Marescot L, 2000-2008) .....	68
Figure 70 - Représentation du panneau électrique et niveaux d'acquisition des données .....	70
Figure 71- Forme du courant dans la boucle d'émission .....	70
Figure 72 - Principaux dispositifs de mesure en TDEM (d'après Descloitres en 1998, modifié)...	71
Figure 73- Forme du signal (fem) en fonction du temps.....	72
Figure 74 - Principe et diagramme temporel d'un sondage TDEM, (Descloitres M., 1998, modifié) .....	74

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Tableau donnant les valeurs moyennes de résistivités des différentes formations géologiques et leurs propriétés électriques .....	8
Tableau 2 - Tableau Récapitulatif des points d'eaux proposés .....	39
Tableau 3 - Paramètres de la loi d'Archie pour différents types de roches, modifié Descloitres (1998).....	65
Tableau 4 - Profondeur d'investigation pour les dispositifs Wenner $\alpha$ , $\beta$ , et $\gamma$ Roy et Apparao (1972) et Edwards (1977).....	67

## Acronymes et abréviations

<b>AEP</b>	Alimentation en Eau Potable
<b>AFD</b>	Agence Française de Développement
<b>APD</b>	Avant-Projet Détaillé
<b>APS</b>	Avant-Projet Sommaire
<b>BP</b>	Branchement Privé
<b>BF</b>	Borne Fontaine
<b>BAfD</b>	Banque Africaine de Développement
<b>CGE</b>	Comité de Gestion de l'Eau
<b>DGEME</b>	Direction Générale de l'Energie, des Mines et de l'Eau
<b>GECEAU</b>	Projet pilote de gestion du service public de l'eau en milieu rural sur l'île de Grande Comore
<b>HSF</b>	Hydraulique Sans Frontières
<b>ID</b>	Initiative Développement
<b>PAEPA</b>	Programme Alimentation en Eau Potable et Assainissement (BAD)
<b>PAGEC</b>	Programme d'Appui à la Gestion Communautaire (fin. AFD)
<b>UCEA</b>	Union des Comités de l'Eau d'Anjouan
<b>UCEM</b>	Union des Comités de l'Eau de Mohéli
<b>UE</b>	Union européenne
<b>RESEAU</b>	Projet de Renforcement des Services de l'EAU (fin. AFD)
<b>SAGE</b>	Service d'Appui à la Gestion de l'Eau
<b>SPE</b>	Service Public de l'Eau
<b>TDEM</b>	Time Domain Electromagnetics
<b>SE</b>	Sondage Electrique
<b>Fn (n = {1,2})</b>	Piquet (point proposé)

# 1. Introduction

## 1.1 Objectifs du projet GECEAU

Le projet vise à améliorer les conditions de vie et de santé des populations de l'île de Grande Comore par un accès pérenne à l'eau potable. Les objectifs spécifiques sont :

- Mobiliser des ressources en eau souterraine (670 m<sup>3</sup>/j) et pluviales,
- Améliorer le taux d'accès à l'eau potable des populations des régions de Mitsamiouli et du Hambou, soit environ 30 000 habitants,
- Mettre en place un service public de l'eau potable complet, durable et accessible à tous dans un esprit d'équité sur l'île de Grande Comore.

La maîtrise d'œuvre du projet a été confiée au Groupement EGIS-ID-SECMO. Ses missions s'articulent autour des composantes suivantes :

- 3 Composantes « Travaux »
  - Eaux souterraines,
  - Réseaux d'AEP,
  - Impluvium pilote.
- Une Composante « Accompagnement »

La composante « Accompagnement » a principalement pour objectif d'assurer la pérennisation des investissements par la mise en place d'un service de l'eau potable durable.

## 1.2 Objectifs et résultats attendus de l'étude

L'étude de la ressource en eaux souterraines fait appel à une approche multidisciplinaire mettant en œuvre des études géologique, hydrogéologique et géophysique. Elle a pour but de mettre en évidence la disponibilité et le comportement de ces ressources en profondeur.

A l'issue des études géologique et hydrogéologique qui ont été menées dans les différentes zones d'intervention, une étude hydro-géophysique a été réalisée pour vérifier et préciser les points d'implantation hydrogéologique sur les zones d'interventions.

Il s'agit de confirmer ou d'infirmer, par les techniques de prospection électrique et électromagnétique, les zones d'implantation des forages déterminées à l'issue des études hydrogéologique. L'objectif est donc de déterminer, pour chaque site, la résistivité des sols en profondeur et de vérifier les potentialités aquifères. Près de la côte, il convient d'identifier la position du biseau salé au sein de l'aquifère de base.

Les travaux de prospection ont été réalisés avec les techniques du sondage électrique (SE) et du panneau électrique, qui font partie de la méthode électrique, la plus appropriée à la recherche d'eau souterraine. Elles ont été complétées par la technique du sondage TDEM (Time Domain Electromagnetics), qui fait partie des méthodes électromagnétiques.

Le sondage électrique et le sondage STDEM permettent l'investigation verticale (investigation à 1-D suivant la profondeur) du sous-sol et servent à déterminer la profondeur de la cible hydrogéologique : le premier a une haute résolution jusqu'à une cinquantaine de mètres en général et le second au-delà. La technique du panneau électrique permet une investigation à 2-D, latérale et en profondeur, pour laquelle sa résolution décroît rapidement.

Des explications détaillées concernant ces techniques (appareils utilisés, techniques de mesure, collecte, traitements des données) et leur interprétation sont développées aux §3.2 et 3.3.

Le compte rendu de la mission fait l'objet du présent rapport.

Le planning de la mission est joint en annexe 1.

## 2. Contexte hydrogéologique

Les grandes lignes du contexte hydrogéologique de la Grande Comore peuvent se décomposer en deux domaines hydrogéologiques : le domaine littoral et le domaine d'altitude.

### 2.1 Le domaine littoral

La zone du domaine littoral est définie, de manière arbitraire, comme la zone de prospection et de captage de la nappe profonde par forage. Cette zone est pratiquement limitée aux terrains situés en dessous de la courbe de niveau 300 m. Il est à noter que, pour l'essentiel, la zone d'intervention de la présente étude appartient à ce domaine littoral.

L'aquifère dans ce domaine présente une nappe en équilibre avec l'océan (rapport hydrogéologique de M. Cruchet, nov 2014). Il y a donc un risque d'intrusion marine dans certains endroits. Sur la limite aval, l'interface avec la mer correspond à une limite à potentiel imposé ; en revanche, le contrôle des débits reste aléatoire. Les émergences en mer observées par télédétection infrarouge montrent que les eaux douces apparaissent aussi bien à la surface de l'océan que jusqu'à plus d'une dizaine de mètres en profondeur ; elles sont diffuses ou localisées, sans qu'il soit possible de définir une relation simple entre émergences et contexte structural. A l'amont, l'estimation des flux d'alimentation se heurte au problème de l'absence de concordance entre les bassins versants superficiels et souterrains (rapport LGR, 2012).

### 2.2 Le domaine d'altitude

Dans le domaine d'altitude, des nappes superficielles existent, développées dans les horizons d'altération des formations anciennes ou dans les dépôts pyroclastiques fins associés aux cônes stromboliens. Ces nappes superficielles alimentent les rares sources recensées sur les plateaux.

Ce sont ces nappes perchées et de base qui constituent les principales cibles de la présente intervention géophysique.

## 3. Géophysique

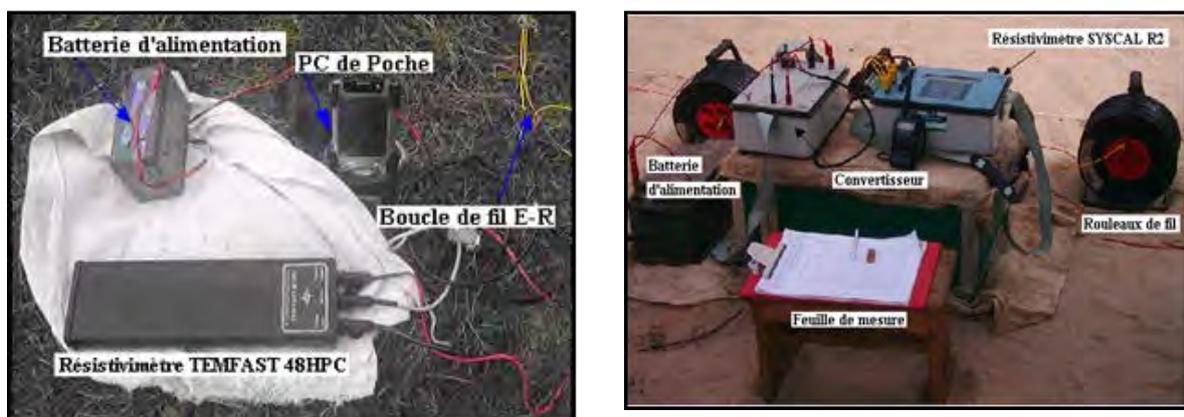
### 3.1 Méthode d'investigation

Les méthodes de prospection électrique et électromagnétique ont été utilisées. Des techniques de sondage électrique, sondage TDEM et panneau électrique ont été mises en œuvre dans les différentes zones d'intervention pour déterminer le comportement en profondeur de la structure de la cible hydrogéologique. Nous développons en annexe 4 ces différentes techniques.

Durant la campagne de prospection, nous avons utilisé deux matériels :

- SYSCAL R2 Iris Instrument, pour la prospection de sondage et panneau électrique ;
- TEMFAST 48HPC pour la réalisation de sondages électromagnétiques.

La figure 1 montre les photos de matériels de prospection utilisés durant la campagne.



**Figure 1 - Appareils de mesures électromagnétique et électrique**

Les appareils de mesure en prospection électrique sont constitués par un résistivimètre **SYSCAL R2**, un convertisseur, quatre rouleaux de fil et une batterie pour le sondage électrique et on a utilisé 4 boîtes de multinodes avec un RCM et des câbles pour le système multi-électrode (panneau électrique). Le convertisseur est alimenté par une batterie de 12V pouvant être montée à 100V, 200V, 400V ou 800V, tension principalement utilisée par le résistivimètre SYSCAL R2 pendant la réalisation des mesures. Deux rouleaux de fil sont utilisés pour injecter le courant (connectés aux électrodes A et B) et deux autres pour mesurer la différence de potentiel (connectés aux électrodes M et N). Chaque rouleau de fil est lié directement au résistivimètre SYSCAL R2. L'exécution des mesures, le choix du dispositif sont effectués manuellement à partir des commandes dans le résistivimètre SYSCAL R2 pour le sondage électrique et automatiquement pour la réalisation du panneau électrique.

En ce qui concerne le STDEM, l'appareil de mesure est le **TEMFAST**. Il est accompagné d'un ordinateur de poche commandant la réalisation des mesures, des boucles émettrices et réceptrices de fil, une batterie 12V. Le TEMFAST est alimenté par une batterie 12V. Les boucles émettrices-réceptrices (fil) sont connectées au TEMFAST. La boucle émettrice-réceptrice coïncidente, de dimension 50mx50m a été utilisée durant la campagne de STDEM.

## 3.2 Technique de mesure sur terrain

La technique de prospection géophysique préconisée pour les investigations de terrains est la mesure de la résistivité apparente du sol par la réalisation de panneaux électriques (trois panneaux sur chaque zone d'implantation favorable identifiée). Cette méthode permet de vérifier la présence éventuelle d'une invasion saline de la nappe de base.

Elle aboutit, après traitement des données à une coupe 2D de la résistivité des sols, sur la zone étudiée.

En premier lieu, il convient de déterminer les caractéristiques des terrains verticalement au droit de la zone d'investigation, jusqu'à la profondeur de forage souhaitée (150 m pour les forages profonds et 80 m pour les forages d'exploration de la nappe perchée). Pour cela, **un sondage électrique complété par un sondage électromagnétique** est réalisé sur le site proposé.

Dans un deuxième temps, **3 panneaux électriques** sont mis en œuvre sur chaque site afin de déterminer les variations de résistivité latéralement. Les panneaux sont installés :

- soit parallèlement aux courbes de niveau topographiques ;
- soit perpendiculairement aux courbes de niveaux, c'est-à-dire dans le sens de la pente.

L'implantation des travaux géophysiques est adaptée à la configuration de chaque site, en fonction des possibilités d'accès et de l'occupation du sol.

Compte tenu de l'objectif principal qui est d'identifier la position du biseau salé, 2 panneaux parallèles à la côte sont positionnés entre la mer et le site proposé. Ils sont calés vers les altitudes + 60 m et + 100 m. Ces panneaux permettent de repérer les intrusions d'eaux marines depuis la côte vers l'intérieur de l'île.

Le troisième panneau est disposé perpendiculairement aux 2 premiers panneaux, dans la zone la plus favorable, la moins exposée aux intrusions d'eaux marines.

## 3.3 Résultats et interprétations des données

Durant la campagne de prospection trois techniques de prospection ont été utilisées dans le cadre de cette étude: le panneau électrique (ERT), le sondage électrique (SE) et le sondage électromagnétique temporel (STDEM). Elles consistent à caractériser des propriétés différentes du sous-sol par les mesures de ses différentes résistivités apparentes. Leur utilisation combinée permet d'obtenir une information complète de la structure du sous-sol jusqu'à une profondeur relativement grande.

Ces techniques permettent l'évaluation de la structure de la nappe aquifère existante sur les zones d'intervention. Ainsi, dans le but de mettre en évidence les zones où une présence d'eau souterraine est probable en exploitant le contraste du paramètre physique résistivité, l'étude géophysique est indispensable pour la recherche hydrogéologique, afin de déterminer l'emplacement le plus approprié des forages à implanter.

Quarante-six (46) panneaux électriques, quinze (15) sondages électriques et vingt-deux (22) STDEM ont été effectués. Les travaux de prospection sur terrain ont débuté le 30/10/14 et se sont achevés le 12/12/14. La figure 2 présente l'emplacement des secteurs d'étude.

Les résultats d'interprétation des données se présentent en 1D pour les sondages électrique et électromagnétique et en 2D pour la coupe géoélectrique ou panneau électrique. Le principe est de présenter les résultats des mesures et leur interprétation après la campagne de prospection, afin de mettre en évidence les résultats attendus.



**Figure 2 - Répartition spatiale des secteurs d'études**

En tenant compte de la recommandation de l'hydrogéologue (Marc Cruchet), des sondages électriques et sondage TDEM avec trois panneaux électriques ont été implantés dans chaque secteur. Les deux premiers panneaux électriques ont été installés parallèlement à la courbe de niveau topographique, afin de mettre en évidence l'évolution d'intrusion marine à la nappe de base et le troisième a été mis en place perpendiculairement selon les résultats de deux précédents. Les sondages (électrique et TDEM) sont implantés au point probable de l'implantation de l'ouvrage pour mettre en évidence la litho-stratigraphique géoélectrique du sous-sol.

### 3.3.1 Calage d'interprétation

Un calage d'interprétation est une étape primordiale dans l'interprétation des données géophysiques. L'objectif est de mettre en évidence la corrélation entre la coupe litho-stratigraphique d'un puits ou d'un forage et la coupe de résistivité électrique du sous-sol.

Ainsi, un panneau électrique de longueur de ligne 441 m a été implanté au niveau du puits au village de CHAMLE. Le plan de masse suivant montre l'emplacement du panneau électrique réalisé (figure 3).

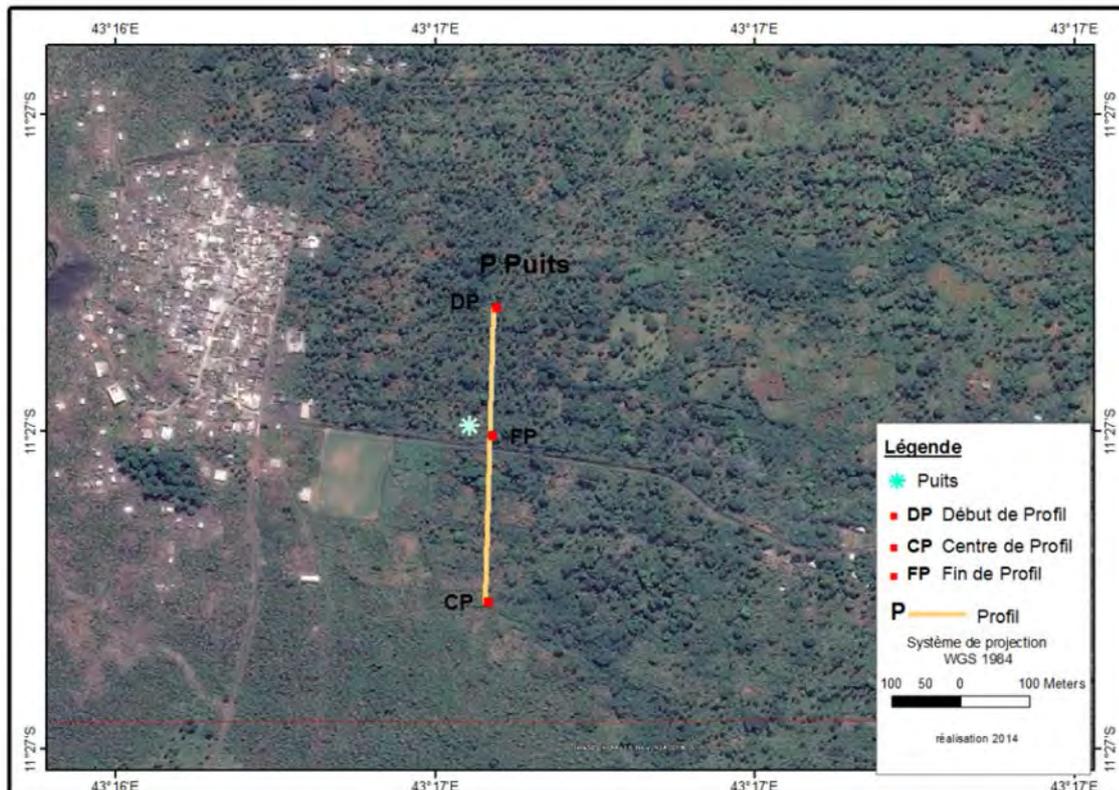


Figure 3 - Plan de masse des travaux géophysiques au niveau du puits à CHAMLE

Le puits ONU28 de profondeur 63 m est situé sur une terrasse volcanique-constituée de sables fins à grossiers, à éléments de basalte altéré, de coulées de basalte et de scories. Le puits se trouve à une altitude aux alentours de 65 m et est repéré par les coordonnées géographiques suivantes : lat. 11°27'0.39"S ; long 43°16'47.59"E. Le panneau électrique a une distance inter-électrode de 7 m et suit la direction Nord-Sud, dont la profondeur atteinte est de l'ordre de 75 m. Le résultat en pseudo-section issu du panneau électrique est présenté dans la figure 4.

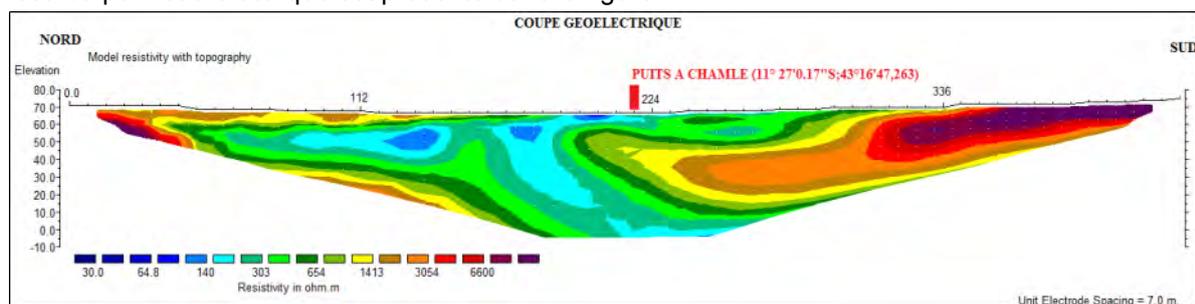


Figure 4 - Coupe géoélectrique au niveau du puits à CHAMLE

Le résultat du panneau électrique présente deux formations bien distinctes, composées d'une formation conductrice de résistivité électrique inférieure à 400  $\Omega\text{m}$  (couleur bleue à verte olive) et d'une formation résistante dont la résistivité est supérieure à 400  $\Omega\text{m}$  (couleur verte à violet).

La formation résistante domine la partie Sud de ce profil. Elle apparaît dans la partie Nord et s'enfonce de plus en plus en profondeur vers le Sud de ce profil.

La formation conductrice s'intercale entre les deux formations résistantes, au centre du panneau. Elle s'enfuit jusqu'à environ 40 m de profondeur.

La structure géoélectrique au niveau du puits (figure 4) montre l'alternance des formations conductrice et résistante. La formation résistante se trouve de 15 m à 40 m de profondeur et la formation conductrice se trouve au-dessus et au-dessous de cette dernière. Aussi, on remarque la décroissance progressive de la valeur de résistivité en dessous du niveau de la mer au niveau de ce puits. Cette décroissance progressive de la valeur de résistivité en profondeur indique la présence d'eau saumâtre ou d'eau salée.

Le calage d'interprétation entre la structure litho-stratigraphique du puits et la structure géoélectrique au niveau de ce puits est présenté dans la figure 5.

L'étude comparée des couches lithologiques issues du forage avec les horizons électriques décelés sur le modèle obtenu par panneau électrique permet d'établir des corrélations entre eux. Les résultats obtenus par panneau électrique et les coupes litho-stratigraphiques correspondantes ont conduit aux observations suivantes :

- la cible hydrogéologique a une valeur de résistivité comprise entre 100 et 300  $\Omega\text{m}$  ;
- l'alternance de coulées de basalte, basalte dur et compact, scorie, pouzzolane et sable correspond à la formation résistante dont la valeur de résistivité est supérieure à 400  $\Omega\text{m}$ .

La formation conductrice de résistivité inférieure à 60  $\Omega\text{m}$  se trouvant parfois en dessous du niveau de la mer correspond à l'eau salée et/ou eau saumâtre.

Ces résultats servent de référence à l'interprétation de toutes les coupes géoélectrique en 1D et à 2D réparties dans les secteurs d'intervention proches de la mer. Celles-ci peuvent être résumées dans le tableau 1 ci-dessous.

**Tableau 1 - Tableau donnant les valeurs moyennes de résistivités des différentes formations géologiques et leurs propriétés électriques**

Formation géologique	Résistivité électrique	Propriété électrique
Couverture récente, coulé de lave, basalte dur, compact, bloc de basalte, scorie, pouzzolane, etc.)	Supérieure à 400 $\Omega\text{m}$	Niveau résistif
Cible hydrogéologique (scorie, sable fin à grossier, pouzzolane)	Comprise entre 60 à 400 $\Omega\text{m}$	Niveau moyennement résistif parfois intercalé de niveau faiblement résistif et moyennement conducteur,
<u>Substratum</u> Eau salée et/ou saumâtre	Inférieure à 60 $\Omega\text{m}$	Niveau conducteur

COUPE GEOELECTRIQUE

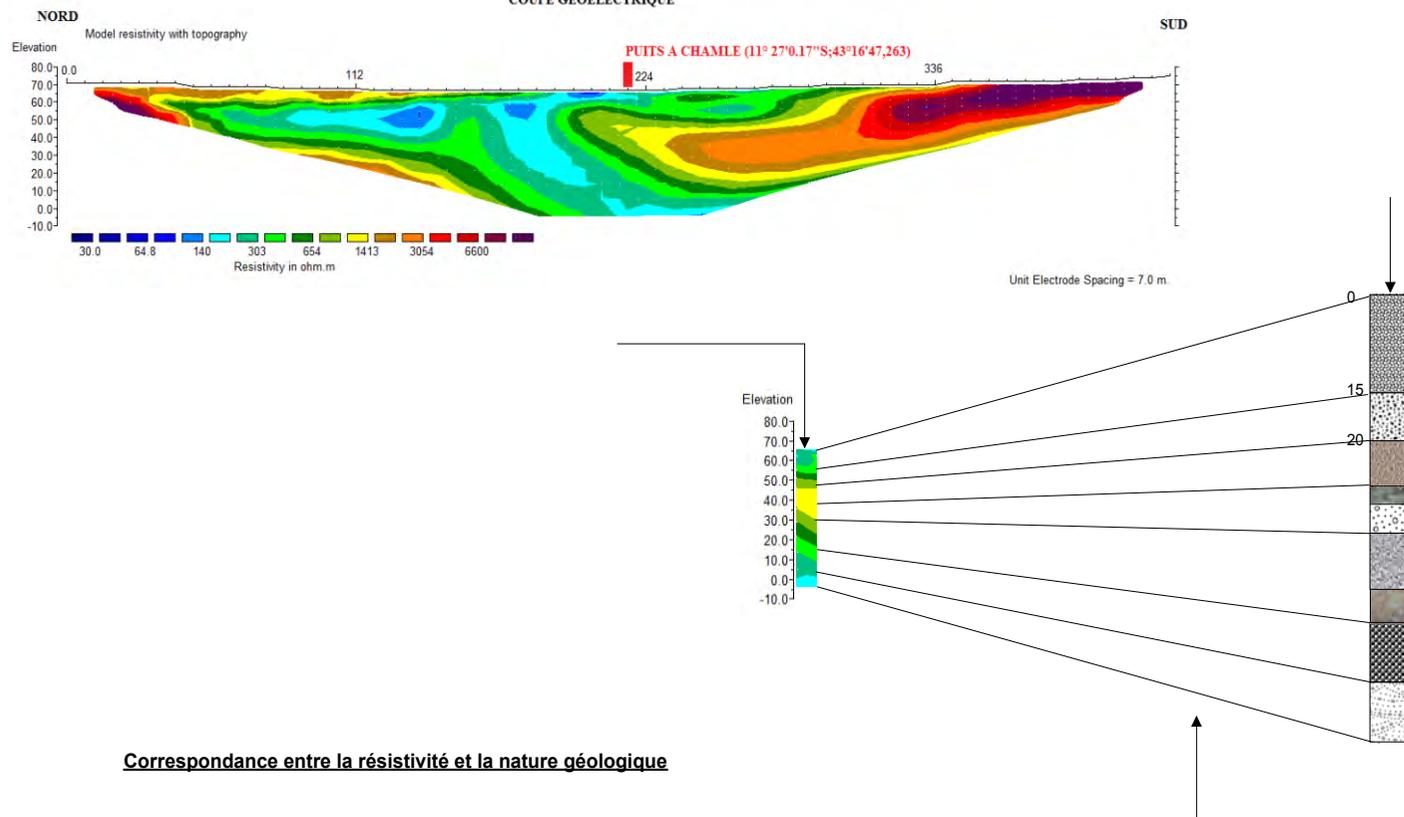


Figure 5 - Calage d'interprétation entre la coupe litho stratigraphique d'un puits et coupe géoélectrique à CHAMLE

### 3.3.2 Secteur HELENDJE

Dans ce secteur, trois panneaux électriques (utilisant le dispositif Wenner) ayant chacun une longueur de ligne de 671 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis d'un sondage électrique dont la distance maximale AB est égale 1 000 m et d'un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure 6 montre le plan de masse correspondant aux travaux réalisés.

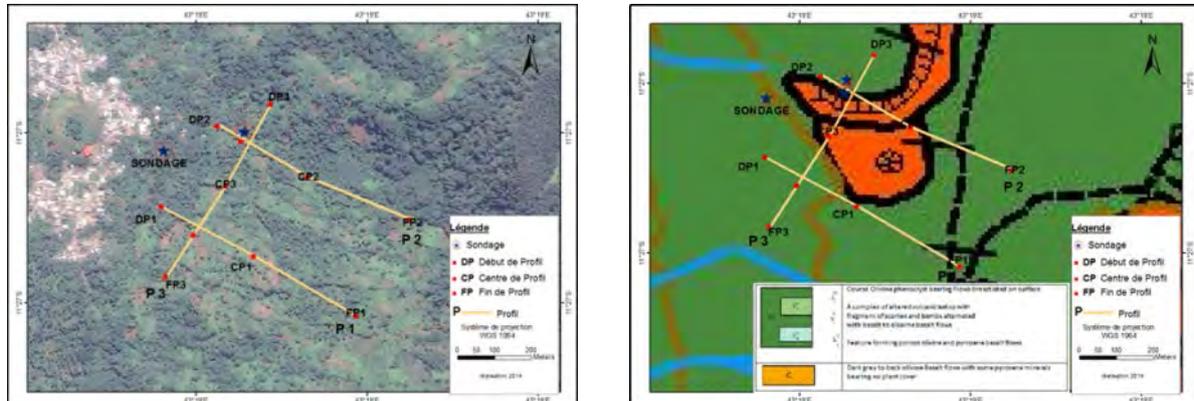


Figure 6 - Plan de masse des mesures géophysiques à HELENDJE

Selon ce plan de masse, les profils n°1 et n°2 sont pseudo-parallèles et suivent la direction NO – SE. Le troisième profil coupe ces deux premiers profils dans le bas fond en suivant la direction NE – SO. Les profils n°1 et n°2 ont des résultats presque similaires. Cela veut dire que les coupes géoélectriques résultantes présentent des continuités des formations sous-jacentes (figure 7).

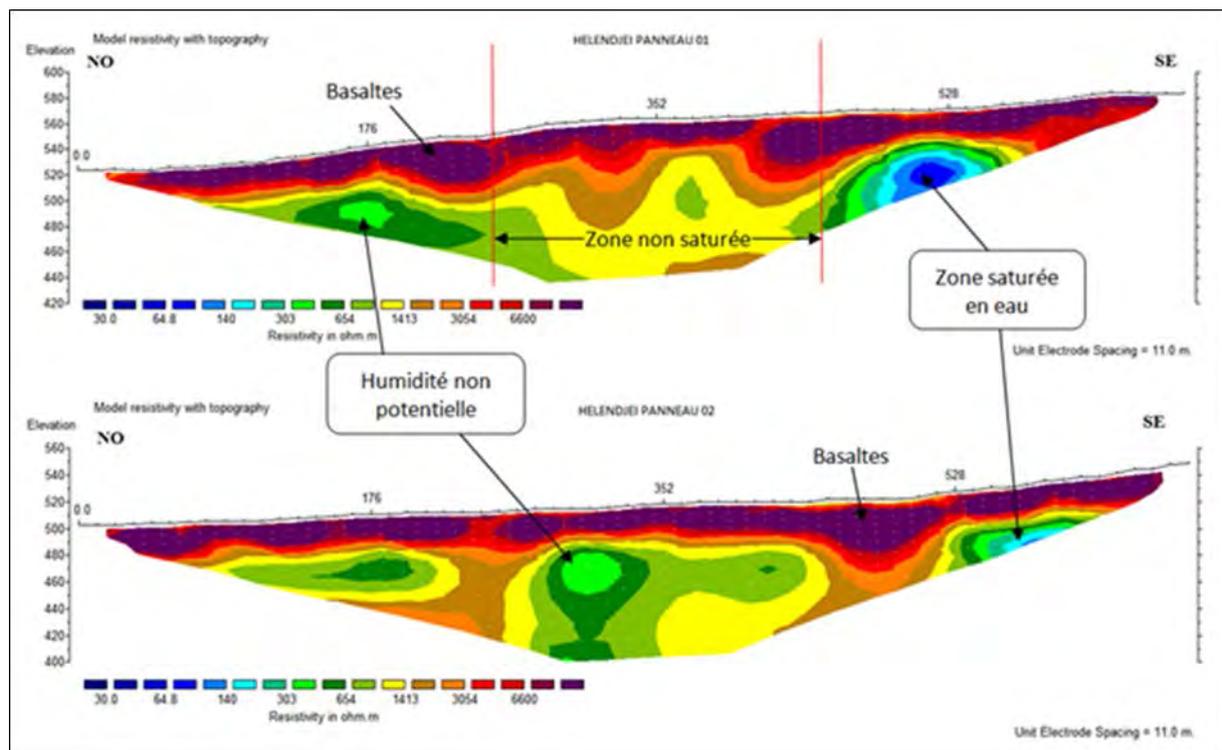


Figure 7 - Coupes géoélectriques n°1 et n°2 à HELENDJE

Ces deux panneaux électriques mettent en exergue les formations suivantes : d'abord, la formation superficielle et très résistante ( $\rho > 1\,400\ \Omega\text{m}$ ), qui correspondrait aux affleurements basaltiques secs. Elle a une puissance moyenne de 30 m et apparaît tout au long des profils. De plus, il y existe une formation de résistivité comprise entre 600 et 1 400  $\Omega\text{m}$ , qui pourrait être classée comme étant une zone non saturée sous-jacente ou une coulée récente en altération. On observe également la présence d'une formation moyennement résistante ayant une valeur de résistivité  $400\ \Omega\text{m} < \rho < 600\ \Omega\text{m}$ . Compte tenu de cette gamme de valeurs de résistivité, la formation présenterait une humidité in situ mais ne pouvant pas être exploitée par un forage d'eau. Elle correspondrait à des coulées basaltiques peu fissurées. Enfin, on observe la formation conductrice de résistivité inférieure à 400  $\Omega\text{m}$  dans la partie SE des deux coupes, qui correspondrait à une zone saturée en eau et/ ou argileuse.

Etant donné que cette cible a été détectée en amont de la zone de prospect (supérieure à 520 m d'altitude), et en admettant qu'elle se dirige vers le bas fond, nous avons essayé de détecter un exutoire prometteur dans le bas fond de la zone en réalisant le troisième profil, qui est perpendiculaire aux deux premiers, et qui suit donc une direction NE – SO (figure 8).

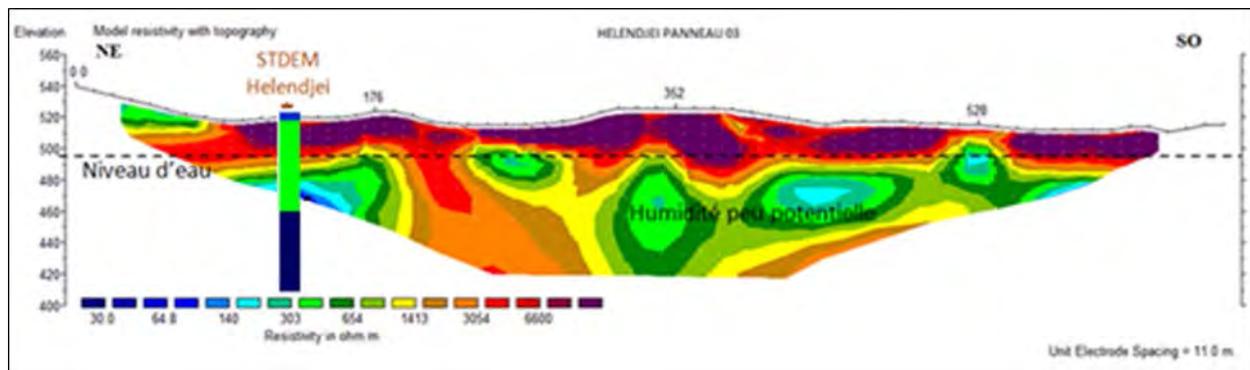


Figure 8 - Coupe géoélectrique n° 3 à HELENDJE

La présente coupe géoélectrique met en évidence les mêmes formations que celles observées dans les deux coupes précédentes. La formation qui correspondrait à une coulée basaltique peu fissurée a été observée du centre vers la fin du profil. Elle pourrait indiquer une humidité ou des nappes perchées peu potentielles. Pourtant, là où les sondages ont été réalisés, il existe une formation à faible valeur de résistivité qui pourrait être notre cible pour un forage d'eau. **Sa profondeur est estimée à 80 m.**

En outre, un sondage TDEM a été implanté à l'intersection des deux linéaments, qui pourrait être une zone potentielle du point de vue hydrogéologique. Le résultat du sondage (en annexe 5) montre que la cible hydrogéologique, de résistivité environ 163  $\Omega\text{m}$ , se trouve à plus de 50 m de profondeur.

Compte tenu des résultats observés dans ce secteur, deux points d'implantation sont proposés (cf. plan en annexe 3) :

- **F1, ayant des coordonnées géographiques 11°26'31.89"S ; 43°19'4.26"E, avec une profondeur estimée de 80 m ;**
- **F2, repéré par les coordonnées géographiques 11°26'31.50"S ; 43°18'57.17"E, dont la profondeur est estimée à 100 m.**

### 3.3.3 Secteur IVEMBENI

Trois panneaux électriques utilisant le dispositif Wenner ont été réalisés. Ils ont chacun une longueur de ligne de 671 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m. Etant donné que les résultats n'étaient pas très prometteurs, nous avons ensuite réalisé un sondage électrique de longueur de ligne

AB est égale à 800 m et un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m. La figure 9 montre le plan de masse correspondant.

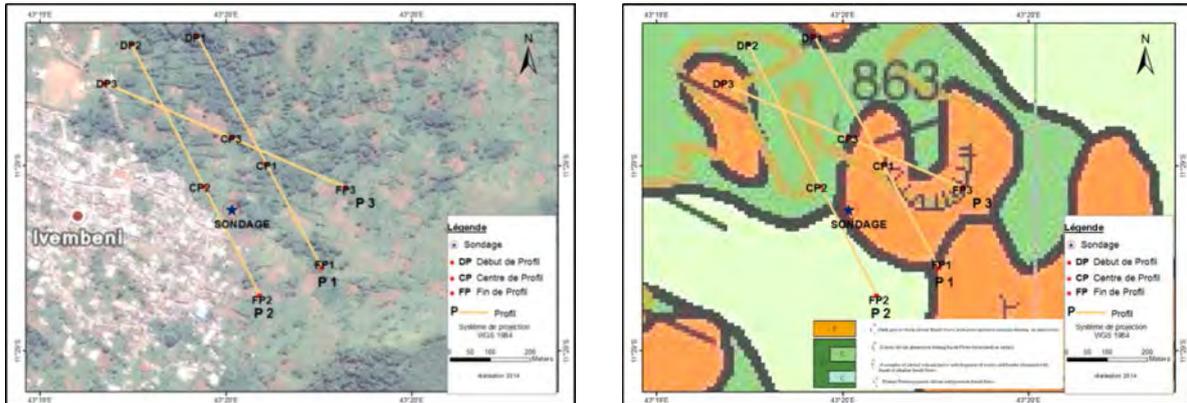


Figure 9 - Plan de masse des mesures géophysiques à IVEMBENI

Les deux premiers profils de direction NNO – SSE sont parallèles, tandis que le troisième profil coupe ces deux premiers profils en suivant la direction ONO – ESE. Les trois panneaux montrent l'existence d'une épaisse formation superficielle très résistante de résistivité supérieure à 1 400  $\Omega$ m. Elle pourrait avoir une puissance de 80 m à l'ouest et s'amincit en allant vers l'est. Géologiquement, elle correspondrait à la formation stratifiée de scories d'IVEMBENI (probablement non saturée). Au-delà de 80 m de profondeur, on note une diminution progressive de la résistivité. (Figure 10).

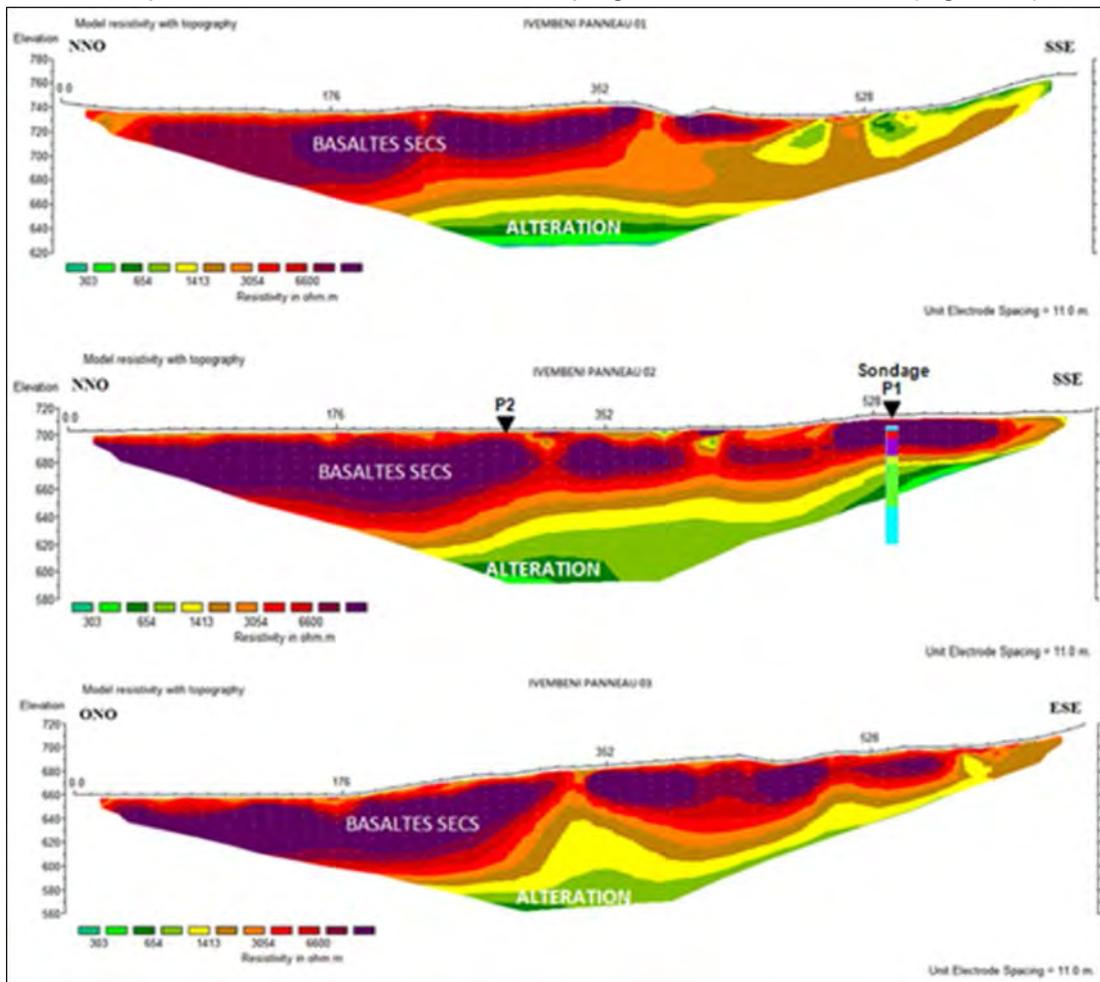


Figure 10 - Trois coupes géoélectriques réalisées à IVEMBENI

En tenant compte de la géométrie des formations sous-jacentes, l'existence d'une nappe perchée à moins de 80 m de profondeur semble peu probable. Pourtant, la tendance des valeurs de résistivité qui diminue progressivement en profondeur au-delà de 80 m est prometteuse et il est donc plausible d'atteindre une nappe profonde à environ 120 m de profondeur (figure 10, milieu). Nous avons donc réalisé le sondage électrique et le STDEM afin de mettre en évidence l'existence d'une nappe profonde dans la zone (cf. résultats en annexe 5).

Deux points d'implantation sont proposés (cf. plan en annexe 3) :

- **F1, de coordonnées 11°28'42.99"S ; 43°19'41.24"E, avec une profondeur estimée de 120 m**
- **F2, de coordonnées 11°28'48.51"S ; 43°19'45.40"E, avec une profondeur estimée de 120m.**

### 3.3.4 Secteur CHAMLE

Comme pour tous les sites d'intervention, trois panneaux électriques de dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 671 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis d'un sondage électrique de longueur de ligne AB égale à 800 m et d'un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure 11 montre le plan de masse correspondant.

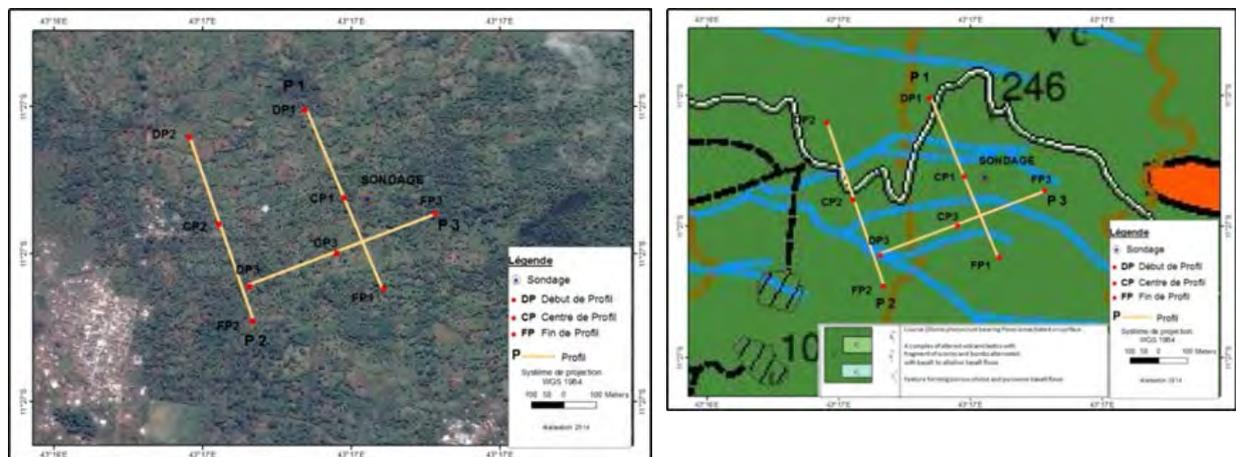


Figure 11 - Plan de masse des mesures géophysiques à CHAMLE

Selon ce plan de masse, les deux premiers profils sont parallèles. Le troisième et le premier profil se croisent pour bien confirmer la cible observée dans la coupe géoélectrique n°1. Ils sont représentés ensemble pour mieux observer leur cohérence à l'endroit où ils se croisent (figure 12).

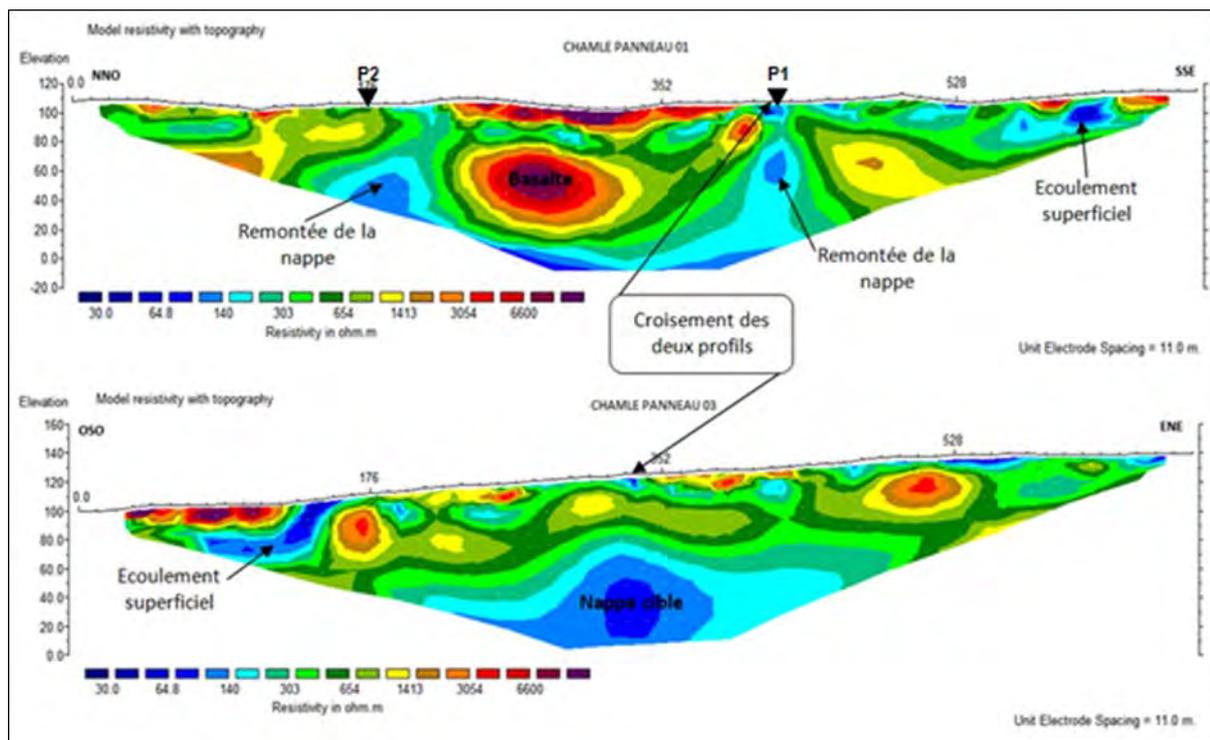


Figure 12 - Coupes géoélectriques n°1 et n°3 à CHAMLE

Dans le premier panneau (panneau n° 01- figure 12, haut), on note la présence d'une formation conductrice de résistivité 140  $\Omega$ m en moyenne au niveau de l'abscisse 418 m. Afin de vérifier cette observation, le panneau 3 a été réalisé perpendiculairement à ce premier profil et centré à cet endroit même. La coupe géoélectrique issue de ce panneau n°3 (figure 12, bas) confirme l'existence d'une formation conductrice à cet endroit.

Des sondages électrique et électromagnétique ont été implantés à la dix-septième électrode (en abscisse  $x = 176$ m) et à la trente-huitième électrode (en abscisse  $x = 418$  m). L'interprétation détaillée de ces sondages est présentée en annexe 5. Nous avons superposé les logs de résistivité sur la coupe géoélectrique. La décroissance progressive des valeurs de résistivité dans les coupes obtenues conduisent à la présence d'une formation conductrice intéressante en profondeur. La cible hydrogéologique a une valeur de résistivité aux alentours de 100  $\Omega$ m. Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 11 m. Les résultats des sondages mettent en exergue la présence d'une formation très conductrice de résistivité inférieure à 4  $\Omega$ m, signifiant la présence d'eau salée en profondeur (plus de 120 m de profondeur).

Comme le secteur CHAMLE se trouve à 1km à l'Est de la côte, nous avons réalisé le profil n°2 parallèlement à la côte, pour vérifier l'intrusion marine (figure 13).

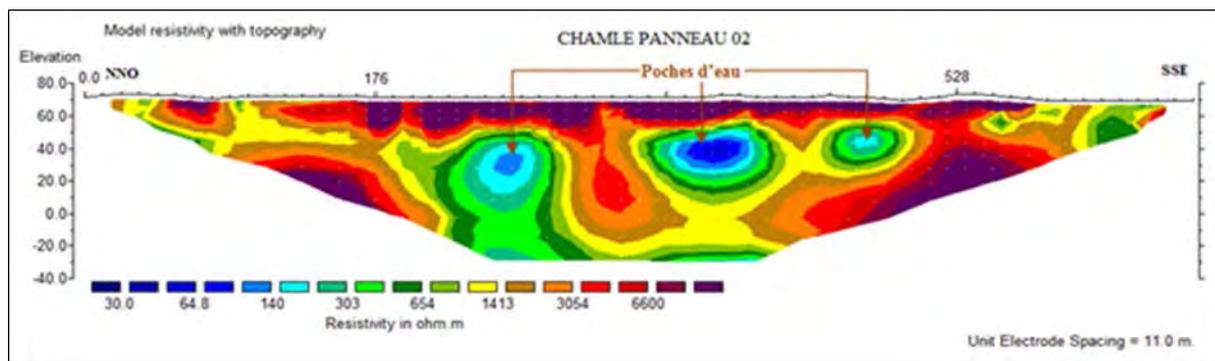


Figure 13 - Coupe géoélectrique n° 2 à CHAMLE

Compte tenu de la gamme de résistivité, l'intrusion marine est moins probable à CHAMLE car la faible valeur de résistivité est due seulement à la présence des formations conductrices à environ 50 m de profondeur (élévation +20 m). La coupe géoélectrique montre aussi la diminution de la valeur de résistivité à partir de l'élévation -20 m. En effet, plus la profondeur augmente, plus la valeur de résistivité diminue. Cela confirmerait la présence d'une nappe profonde mentionnée dans les deux autres coupes géoélectriques (Figure 12).

Ainsi, nous proposons deux points d'implantation (cf. plan en annexe 3) :

- F1, de coordonnées géographiques 11°26'42.32"S ; 43°17'0.37"E avec une profondeur estimée de 120 m environ.
- F2, de coordonnées géographiques 11°26'35.90"S ; 43°16'57.59"E avec une profondeur estimée de 120 m environ.

### 3.3.5 Secteur BATSA

Trois panneaux électriques (utilisant le dispositif Wenner) ayant chacun une longueur de ligne de 732 m et une profondeur d'investigation d'environ 150 m, suivis d'un sondage électrique et un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure 14 montre le plan de masse correspondant.

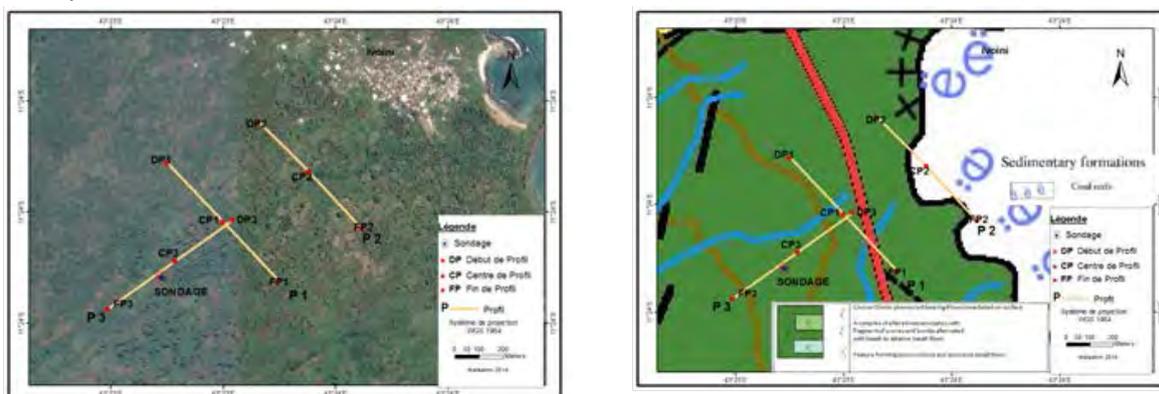


Figure 14 - Plan de masse des mesures géophysiques à BATSA

Les deux premiers profils de direction NO – SE sont parallèles et le troisième profil forme un T avec le premier profil, dans la partie occidentale de la zone (figure 14). D'après la carte géologique volcano-tectonique des Comores, Batsa se trouve dans des formations constituées de coulées récentes et anciennes fréquemment recouvertes d'un important nappage de pyroclastites. Les deux profils n°1 et n°2 réalisés (figure 15) mettent en évidence l'existence de ces couches de pyroclastites. Cependant,

l'objectif est d'atteindre la nappe profonde en équilibre avec l'océan à environ 150 m de profondeur, d'après une estimation hydrogéologique.

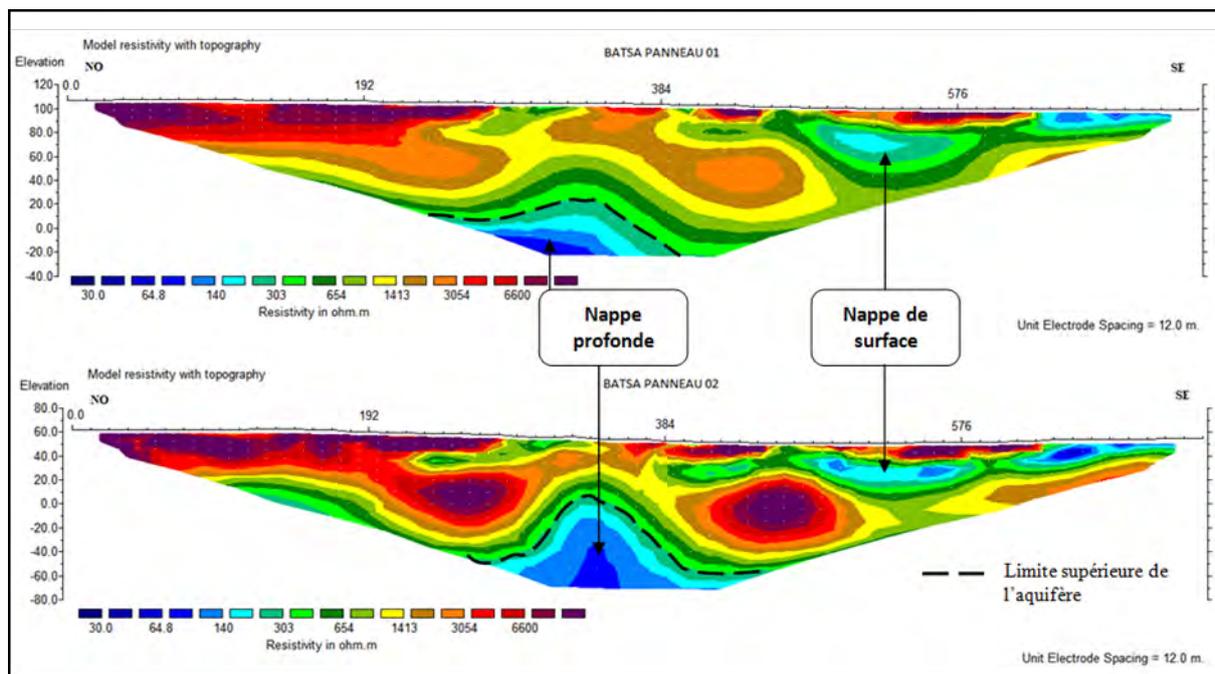


Figure 15 - Coupes géoélectriques 1 et 2 réalisées à BATSA

Ces deux coupes géoélectriques montrent l'existence d'une épaisse formation hétérogène et résistante de la surface jusqu'à environ 100 m de profondeur. Elle a une valeur de résistivité supérieure à 1 000  $\Omega\text{m}$  et pourrait correspondre à des coulées peu/non altérées. Au niveau du centre de chaque profil (surtout dans le second), on observe l'existence d'une formation à faible valeur de résistivité. Elle a une valeur de résistivité comprise entre 100 et 200  $\Omega\text{m}$ .

Le troisième panneau a été réalisé dans le but d'obtenir des informations supplémentaires dans la zone. Le résultat met en exergue trois formations distinctes. D'abord, la formation superficielle très résistante, de résistivité supérieure à 3 000  $\Omega\text{m}$ , qui correspondrait à des coulées récentes. Ensuite, on rencontrerait une formation de résistivité comprise entre 1 000 et 3 000  $\Omega\text{m}$ , qui se trouve directement en dessous de la formation précédente. Cette formation s'enfuit jusqu'à environ 80 m de profondeur. Finalement, une formation conductrice, de résistivité comprise entre 300 et 1000  $\Omega\text{m}$ , s'intercale dans la formation précédente au milieu du profil. Cette formation correspondrait à une altération sous-jacente mais sa valeur de résistivité est encore trop élevée pour la définir en tant que nappe exploitable. Cependant, les sondages implantés au centre du profil (cf. résultats en en annexe 3) confirment la présence de nappe profonde à plus de 140 m de profondeur.

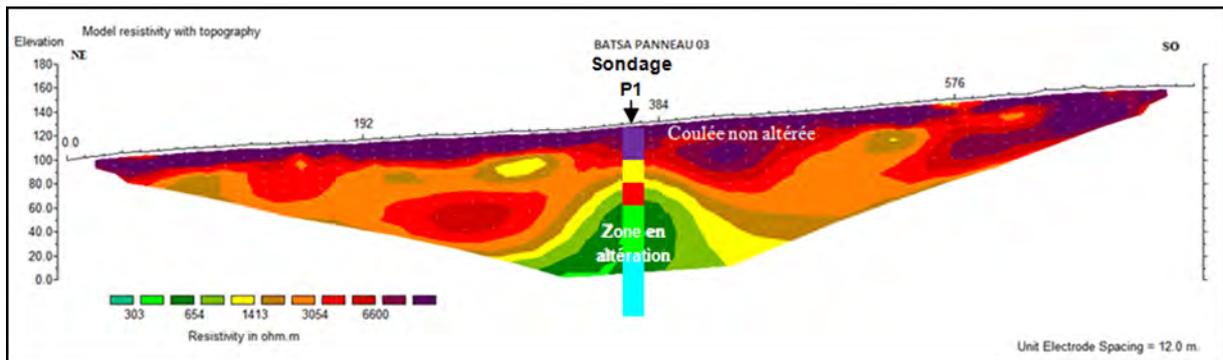


Figure 16 - Coupe géoélectrique n°3 réalisée à BATSA

Ainsi, on peut en déduire que plus on descend vers l'est, plus l'altération en profondeur est intéressante hydrogéologiquement dans cette zone et plus on monte en altitude, plus la profondeur d'ouvrage augmente.

Deux points d'implantation sont proposés ((cf. plan en annexe 3) :

- F1, ayant des coordonnées géographiques 11°23'54.32"S ; 43°23'6.34"E, avec une profondeur estimée de 160 m ;
- F2, repéré par les coordonnées géographiques 11°23'43.13"S ; 43°23'11.58"E, dont la profondeur est estimée à 130 m.

### 3.3.6 Secteur OUSSIVO

Dans le secteur OUSSIVO, deux panneaux électriques de dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 732 m et un sondage électrique combiné avec le sondage TDEM ont été réalisés afin de mettre en évidence le comportement hydrogéologique de ce secteur. La figure 17 montre le plan de masse des travaux géophysique effectués.

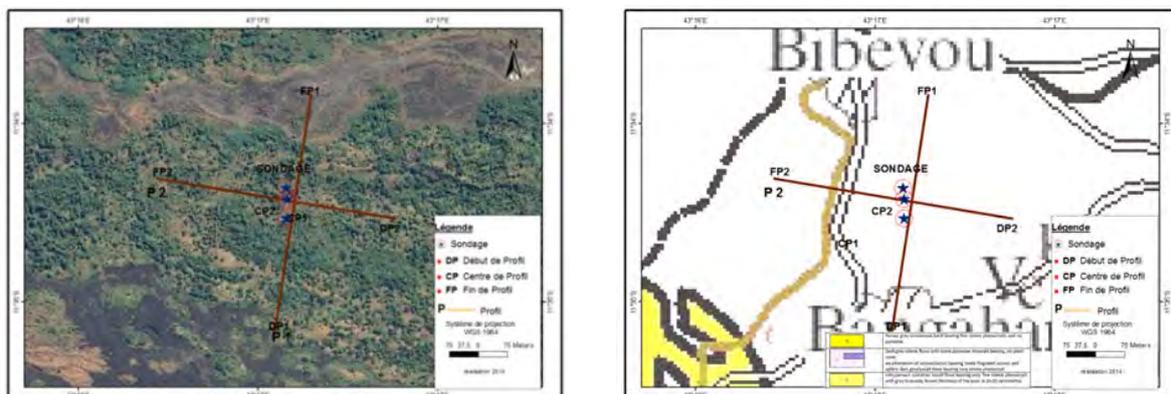


Figure 17 - Plan de masse des mesures géophysiques à OUSSIVO

La zone d'intervention se trouve sur une coulée basaltique récente qui est recouverte de broussailles. Le premier panneau électrique coupe le versant (ligne d'écoulement) ayant sensiblement la direction Ouest-Est, tandis que le troisième panneau suit la direction du linéament afin de suivre l'évolution de la structure hydrogéologique et de la nappe en profondeur. La figure 18 montre le résultat en coupe du premier profil électrique.

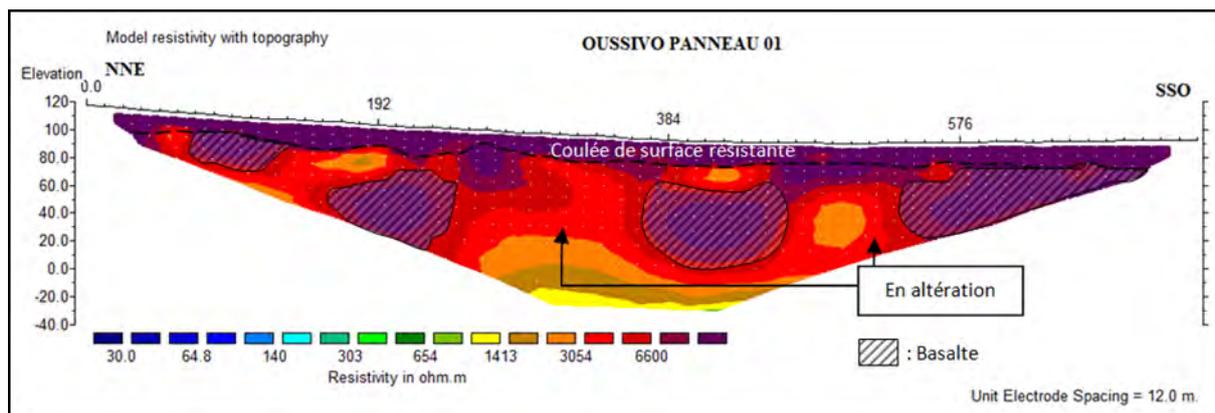


Figure 18 - Coupe géoélectrique n°1 réalisée à OUSSIVO

Cette coupe met en évidence la décroissance progressive de la valeur de la résistivité en profondeur. Elle montre la dominance de la formation résistante de résistivité supérieure 1400  $\Omega$ m jusqu'à 80 m de profondeur. Ce profil ne permet pas de détecter notre cible hydrogéologique. Nous avons donc réalisé le deuxième panneau électrique, de direction sensiblement Est-Ouest, pour détecter notre cible hydrogéologique et obtenir des informations supplémentaires dans la zone. Le centre de mesure a été implanté aux coordonnées géographiques 11°34'41.32"S ; 43°16'56.89"E.

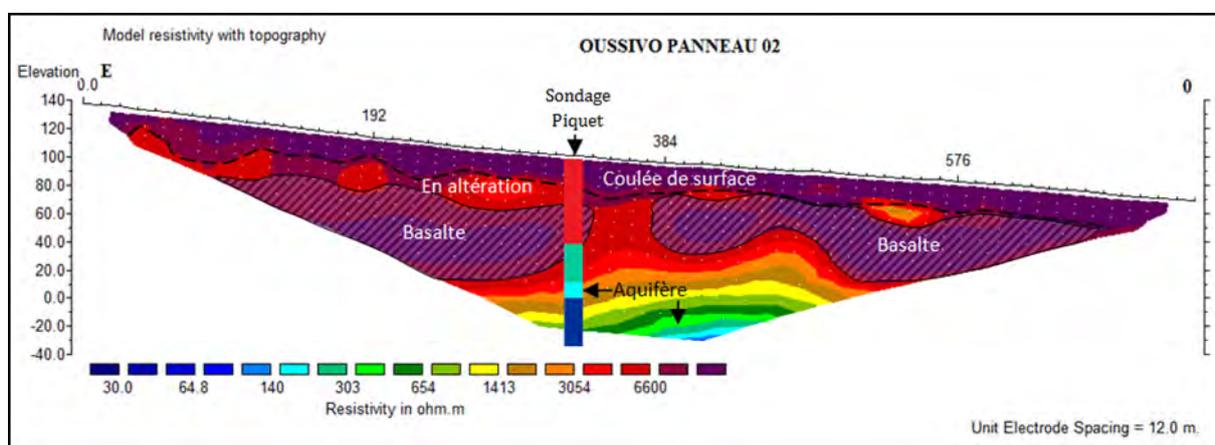


Figure 19 - Coupe géoélectrique n°2 réalisé à OUSSIVO

D'après cette coupe (figure 19), la formation résistante superficielle, de résistivité supérieure à 1400  $\Omega$ m, est toujours bien mise en évidence le long du profil. Elle détecte la formation moyennement résistante, de résistivité approximative 300  $\Omega$ m, à plus de 140 m de profondeur. Ainsi, cette coupe confirme l'existence de la nappe profonde lorsqu'on descend de plus en plus en profondeur, compte tenu de la décroissance progressive de la valeur de résistivité. Pour confirmer cette constatation, un sondage électrique combiné avec un sondage TDEM a été implanté à la trente-quatrième électrode de ce deuxième profil. Le résultat en coupe du sondage est présenté en annexe 5. Il présente la formation faiblement résistante, de résistivité 150  $\Omega$ m et d'épaisseur environ 12 m, qui correspond à notre cible hydrogéologique (nappe profonde) et se trouve à plus de 140 m de profondeur. Compte tenu des résultats obtenus sur les panneaux électriques et les sondages implantés, un point d'implantation est proposé (cf. plan en annexe 3) :

- **F1, de coordonnées 11°34'36.54"S ; 43°16'46.87"E, avec une profondeur estimée de 150 m.**

### 3.3.7 Secteur HAHAYA

La zone d'intervention se trouve dans la formation volcanique récente formée par des coulées de basalte. A cause des difficultés d'accès dans cette zone, l'implantation des électrodes sur les panneaux électriques proposés, deux panneaux seulement ont été réalisés. Les directions ont été adaptées aux accès possibles pour la réalisation des mesures géophysiques. La photo 6 en annexe 2 montre l'aperçu de la géologie de surface à Hahaya et la figure 20 présente le plan de masse des travaux géophysiques effectués.

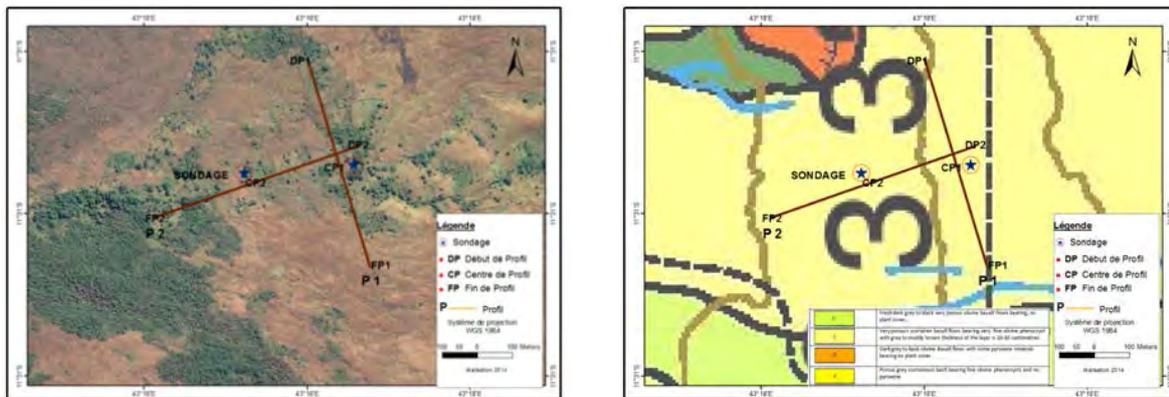


Figure 20 - Plan de masse des mesures géophysiques à HAHAYA

Le premier panneau électrique, de longueur 671 m dont la profondeur d'investigation est de l'ordre de 120 m, a été implanté suivant la direction NNO-SSE. La figure 21 montre le résultat en coupe du panneau électrique.

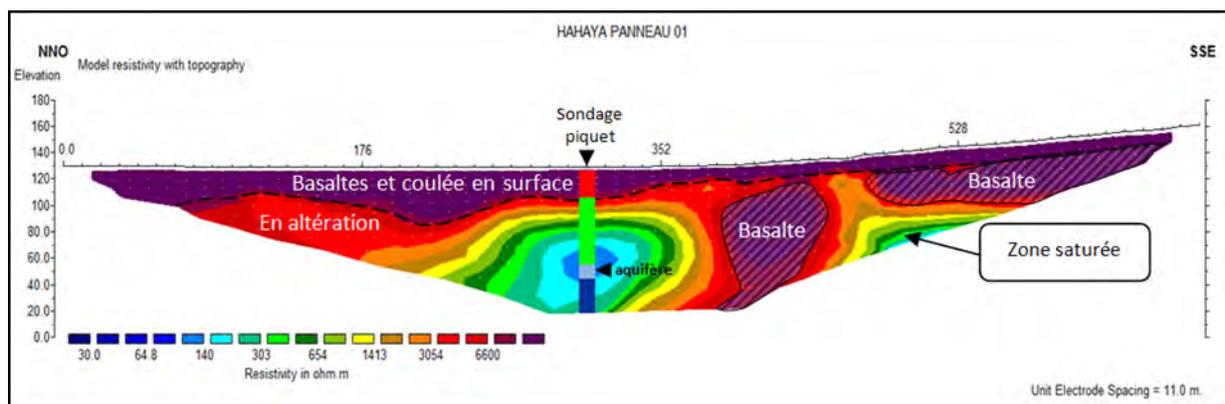


Figure 21 - Coupe géoélectrique n°1 réalisée à HAHAYA

Cette première coupe géoélectrique présente toujours une épaisse formation résistante, de résistivité supérieure à 3 000  $\Omega\text{m}$  jusqu'à environ 60 m de profondeur, qui pourrait correspondre à des coulées récentes. Des formations faiblement résistantes, de résistivité comprise entre 100 et 350  $\Omega\text{m}$ , ont été observées à l'aplomb de la trentième électrode et de la quarante-huitième électrode (en abscisse  $x = 330$  m, et  $x = 528$  m) de ce profil. Elles se trouvent à plus de 50 m de profondeur.

Afin de vérifier la structure verticale et l'épaisseur de la cible, un sondage électrique combiné avec le sondage TDEM devait être implanté à l'aplomb de la zone potentielle mais, compte tenu de l'inaccessibilité à la réalisation des mesures, les sondages ont été déplacés à la trente-quatrième électrode (en abscisse  $x = 374$  m).

Le résultat du sondage présente un comportement ascendant en profondeur (cf. résultat en annexe 5). Cette observation indique que la cible hydrogéologique de résistivité autour de 120 Ωm repose sur une formation résistante qui pourrait correspondre au basalte dur.

Un autre panneau électrique (panneau n°2- Figure 22) a été implanté à la vingt-neuvième électrode, afin de vérifier l'extension de la cible en question. Le panneau électrique suit la direction NE-SW (direction probable d'écoulement des eaux souterraines dans ce secteur).

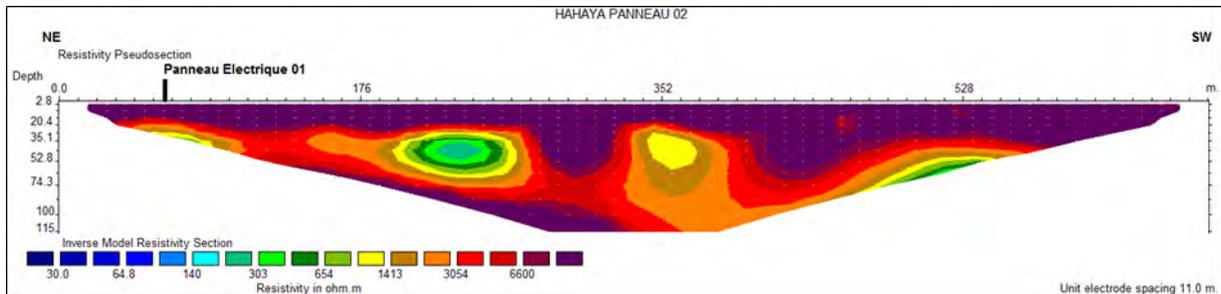


Figure 22 - Coupe géoélectrique n°2 réalisée à HAHAYA

Un point d'implantation est proposé (cf. plan en annexe 3):

- F1, de coordonnées 11°30'54.51"S ; 43°18'2.67"E ayant une profondeur estimée de 130 m.

### 3.3.8 Secteur INANE

Comme pour tous les sites d'intervention, trois panneaux électriques de dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 671 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis d'un sondage électrique et un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La photo 7 en annexe 2 montre l'aperçu de la zone d'étude et les travaux géophysiques effectués alors que la figure 23 montre le plan de masse correspondant.

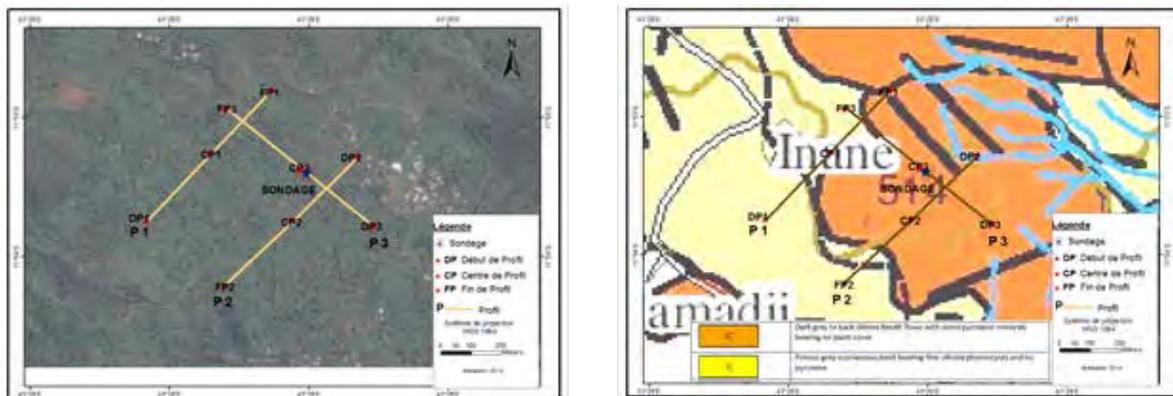


Figure 23 - Plan de masse des mesures géophysiques à INANE

Les profils n°1 et n°2 sont parallèles et ont suivi la direction NE – SO. Le troisième profil coupe les deux premiers dans la partie NE et en suivant la direction SE – NO, afin de mettre en évidence une formation conductrice prometteuse observée dans les deux coupes géoélectriques issues des panneaux n°1 et n°2 (Figure 24).

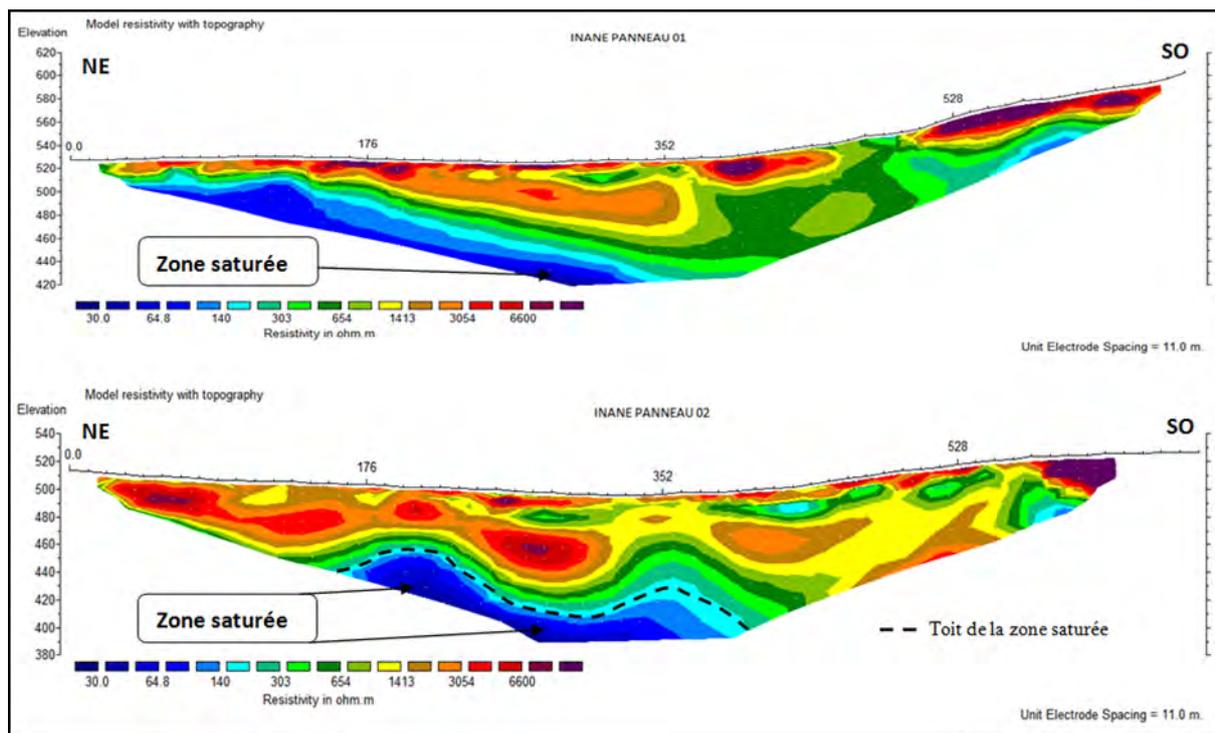


Figure 24 - Coupes géoélectriques n°1 et n°2 à INANE

Ces deux coupes mettent en évidence l'existence d'une formation conductrice de résistivité 30 à 140  $\Omega\text{m}$  à environ 80 m de profondeur. En tenant compte de sa valeur de résistivité, elle pourrait être assimilée à une cible hydrogéologique intéressante. Ainsi, nous avons réalisé un troisième profil (Figure 25) qui a croisé à la fois les profils n°1 et n°2 pour vérifier l'extension latérale de cette formation conductrice dans la zone.

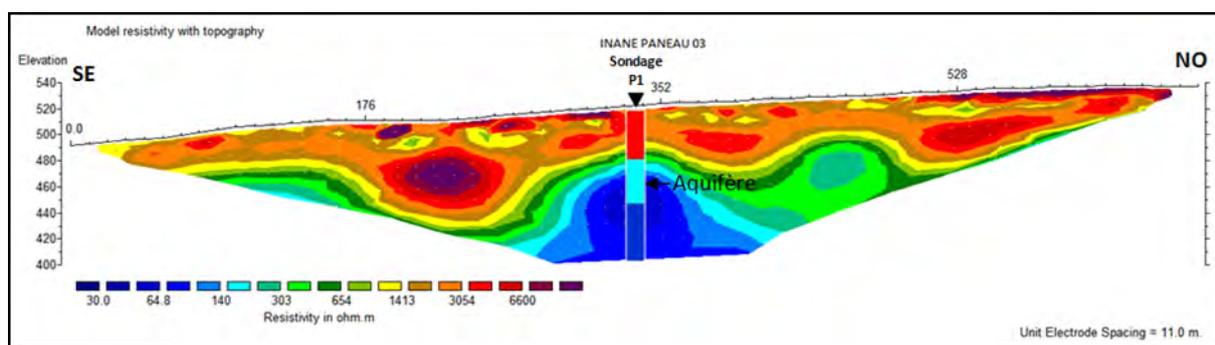


Figure 25 - Coupe géoélectrique n° 3 à INANE

D'après cette coupe présentée dans la figure 25, la formation conductrice observée dans les deux coupes précédentes persiste. En outre, les sondages SE et STDEM réalisés confirment bien ce résultat (cf. résultats en annexe 5).

Deux points d'implantation sont proposés (cf. plan en annexe 3) :

- F1, au centre de ce troisième profil, de coordonnées  $11^{\circ}53'20.68''\text{S}$  ;  $43^{\circ}28'14.22''\text{E}$ , avec une profondeur estimée de 80 m ;
- F2, au centre du deuxième profil, de coordonnées  $11^{\circ}53'24.24''\text{S}$  ;  $43^{\circ}28'15.55''\text{E}$  ayant une profondeur estimée de 80 m.

### 3.3.9 Secteur MIDJENDJENI

Trois panneaux électriques de dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 671 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis d'un sondage électrique de longueur de ligne AB est égale à 800 m et d'un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure 26 montre le plan de masse correspondant.

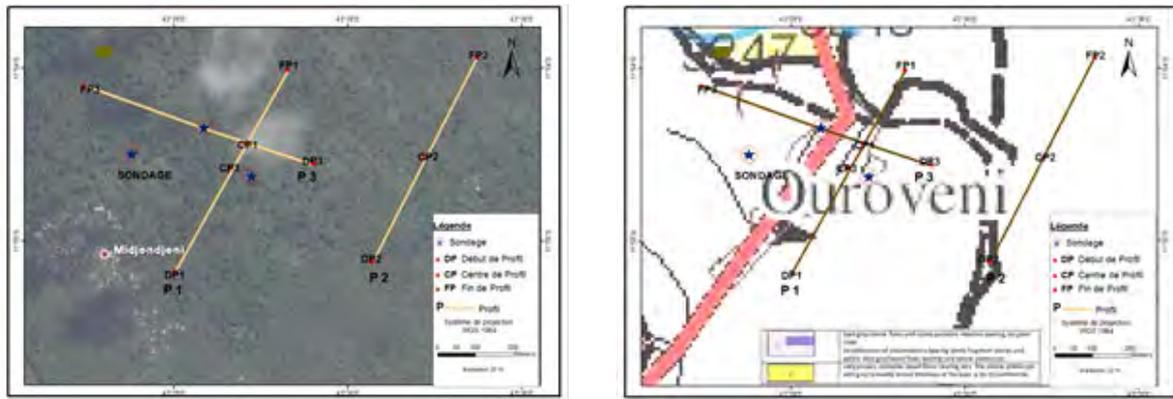


Figure 26 - Plan de masse des mesures géophysiques à MIDJENDJENI

Midjendjeni présente une unité géologique de surface de caractère « aa » ; d'où la valeur de résistivité élevée de la formation superficielle observée dans les trois coupes géoélectriques. Le premier panneau a été réalisé juste au nord du village, en suivant la direction SSO – NNE. La figure 27 ci-dessous montre la coupe géoélectrique issue de ce panneau n°1.

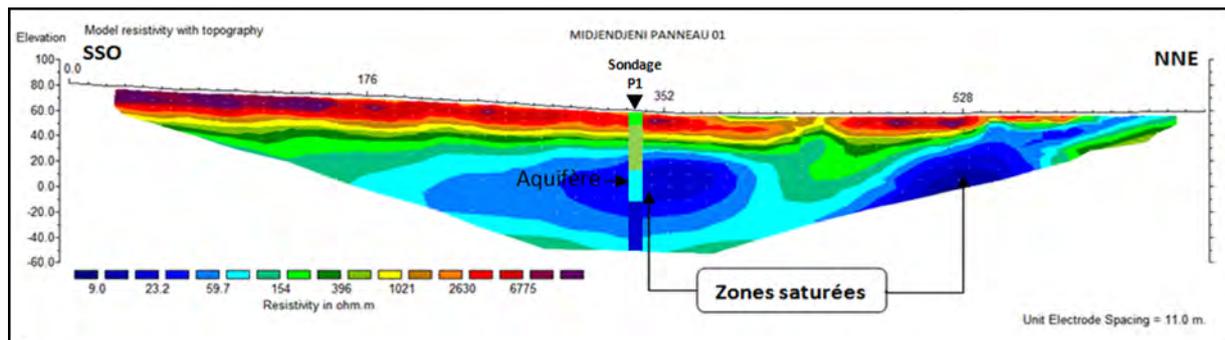


Figure 27 - Coupes géoélectriques n°1 MIDJENDJENI

D'après la présente coupe géoélectrique n°1 de la figure 27, juste en-dessous de la couverture superficielle et à environ 40 m de profondeur, il existe une formation conductrice ayant une faible valeur de résistivité (de 9 à 50  $\Omega$ m). Cette formation pourrait correspondre à une nappe qui est en équilibre avec l'océan. De plus, elle se trouve à une élévation 0 (~ niveau de la mer). Or le secteur de MIDJENDJENI se trouve à proximité de la ligne côtière. Ainsi, l'influence marine sur la nappe souterraine pourrait être élevée. D'où la réalisation d'un deuxième profil (figure 28), parallèlement au premier profil mais un peu plus en aval (à une élévation 60 m).

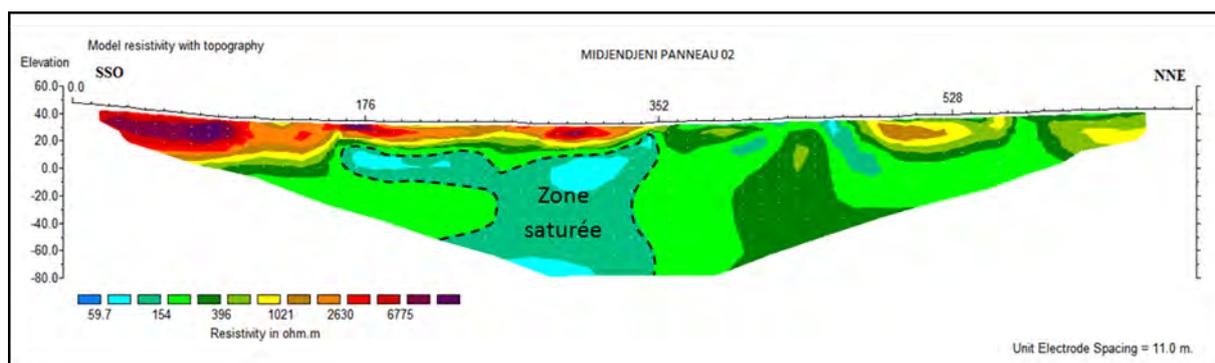


Figure 28 - Coupe géoélectrique n°2 MIDJENDJENI

En tenant compte de la gamme de résistivité de la coupe géoélectrique du panneau 02 (Figure 28) ( $> 50 \Omega\text{m}$ ), l'intrusion marine est moins probable dans la zone. Pourtant, nous avons décidé de réaliser un troisième profil suivant la colline en amont du profil n°1 afin de s'éloigner de la ligne côtière. En plus, un affleurement d'eau douce y a été observée (Figure 27). Ce profil n°3 a suivi la direction perpendiculaire au premier profil (Figure 28).

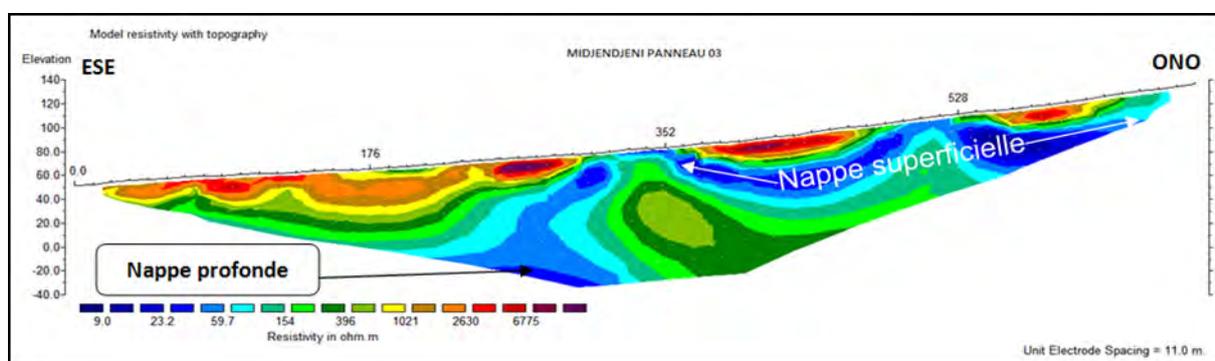


Figure 29 - Coupe géoélectrique n° 3 à MIDJENDJENI

Le résultat en coupe du panneau électrique se présente dans la figure 29. On observe, un affleurement d'eau douce dans la partie ONO de ce profil.

Deux types de nappe pourraient être mis en évidence dans cette coupe géoélectrique. Le premier est caractérisé par une formation conductrice en dessous de la couverture superficielle entre les abscisses 176 m et 330 m, à environ 60 m de profondeur. Elle correspondrait à celle qui a été observée dans la coupe géoélectrique n°1 (Figure 29), qui serait en équilibre avec l'océan. Le deuxième correspond à la nappe superficielle, à partir de l'abscisse 352 m vers la fin du profil. Cette formation repose sur une formation résistante, de résistivité moyenne de  $396 \Omega\text{m}$  (couleur verte) et ayant une puissance moyenne de 15 m. Enfin, les résultats des sondages (cf. annexe 5). confirment bien la présence de cette formation conductrice sous-jacente même si on s'éloigne des profils électriques implantés.

Deux points d'implantation sont proposés (cf. plan en annexe 3) :

- F1, ayant des coordonnées géographiques  $11^{\circ}54'38.67''\text{S}$  ;  $43^{\circ}29'19.93''\text{E}$ , avec une profondeur estimée de 120 m ;
- F2, repéré par les coordonnées géographiques  $11^{\circ}54'37.57''\text{S}$  ;  $43^{\circ}29'11.20''\text{E}$ , dont la profondeur est estimée à 120 m.

### 3.3.10 Secteur MALE

Trois panneaux électriques ayant chacun une longueur de ligne de 732 m ont été réalisés dans ce site. Les deux premiers panneaux ont utilisé le dispositif Wenner, tandis que le troisième panneau a utilisé le dispositif Wenner-Schlumberger. Ensuite, un sondage électrique de longueur de ligne est égal à 800 m et un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure 30 montre le plan de masse correspondant.

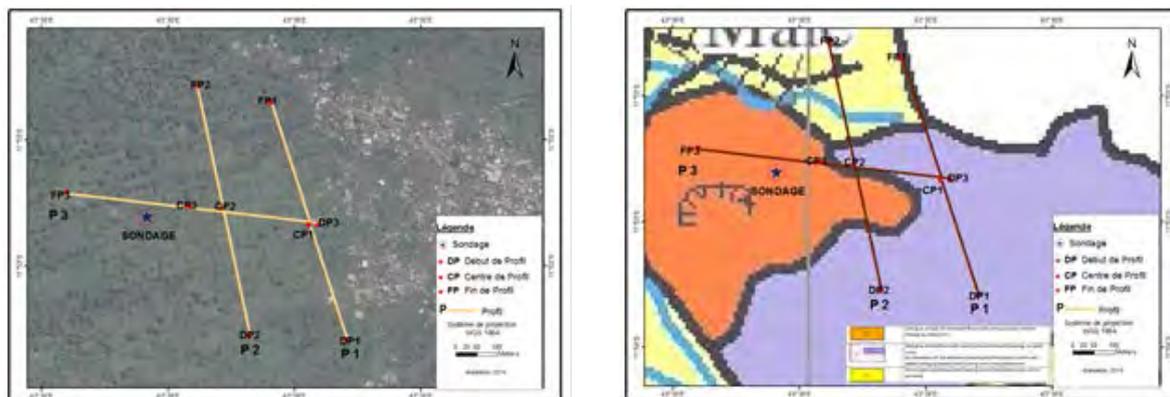


Figure 30 - Plan de masse des mesures géophysiques à MALE

Les deux premiers profils de direction SSE – NNO sont parallèles et distants de 150 m environ, tandis que le troisième profil est perpendiculaire au profil n°2 (figure 30). D'après la carte géologique volcano-tectonique de Comores, MALE possède une géologie des unités du massif du M'BADJINI. Les deux profils 1 et 2 mettent en évidence l'existence d'une épaisse formation résistante, de résistivité allant de 300  $\Omega$ m à 3 000  $\Omega$ m. Cette formation a une puissance moyenne de 60 m (Figure 31).

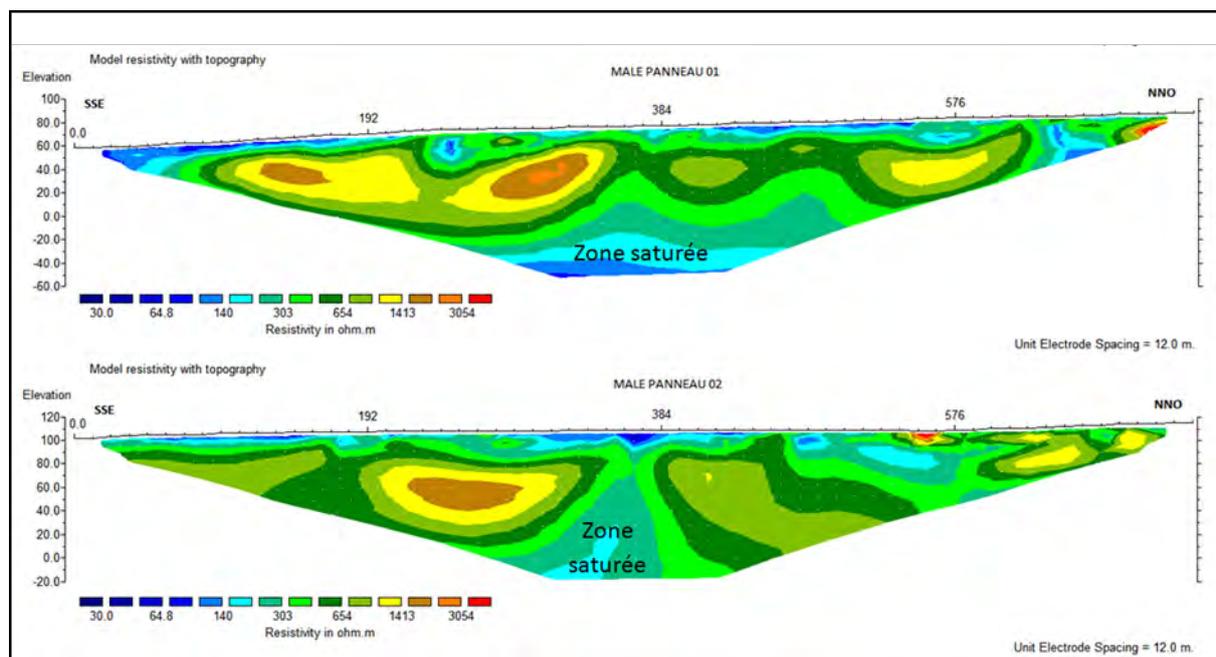


Figure 31 - Coupes géoélectriques 01 et 02 réalisées à MALE

Elle est suivie directement d'une formation conductrice, qui pourrait être notre cible hydrogéologique sous-jacente. Afin de vérifier l'extension latérale de cette formation conductrice, un troisième panneau

a été réalisé. Il est perpendiculaire au panneau n°2 en son milieu. Nous avons utilisé le dispositif Wenner-Schlumberger pour pouvoir augmenter la profondeur d'investigation.

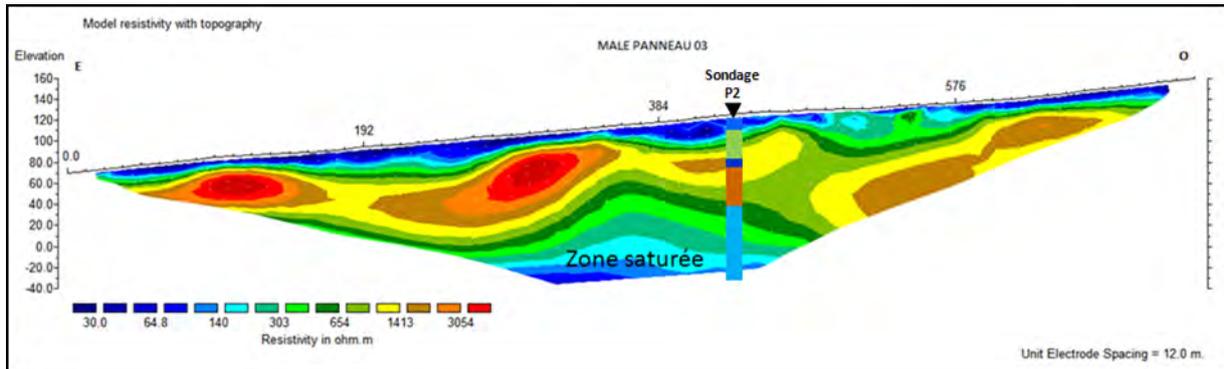


Figure 32 - Coupe géoélectrique n°3 réalisé à MALE

La formation correspondrait à une nappe en profondeur qui est bien mise en évidence dans cette coupe géoélectrique. Elle a une valeur résistivité inférieure à 140 Ωm.

Deux points d'implantation sont proposés (cf. plan en annexe 3) :

- F1, ayant des coordonnées géographiques 11°53'15.36"S ; 43°30'4.37"E, avec une profondeur estimée de 120 m ;
- F2, repéré par les coordonnées géographiques 11°53'15.71"S ; 43°29'59.78"E, dont la profondeur est estimée à 140 m.

En outre, les résultats des sondages (cf. annexe 5) réalisés sont conformes au résultat de panneau réalisé.

### 3.3.11 Secteur CHOUANI

Trois panneaux électriques de dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 671 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis d'un sondage électrique et de trois sondages TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure 33 montre le plan de masse correspondant. La zone d'intervention se trouve dans la forêt. On note que les sondages TDEM effectués n'arrivent pas à injecter le signal à cause de l'existence des d'effets superparamagnétiques. Les résultats des sondages sont présentés en annexe 5.

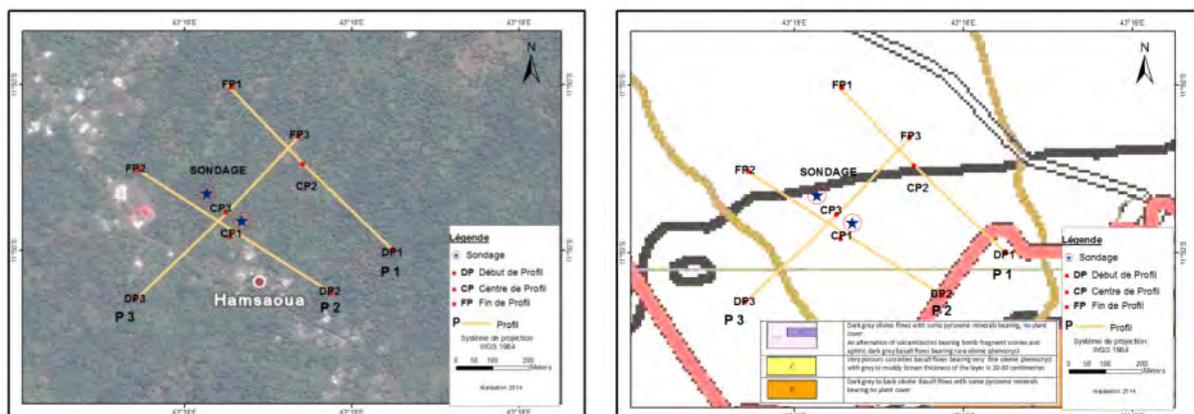


Figure 33 - Plan de masse des mesures géophysiques à CHOUANI

Ce plan de masse montre que les profils n°1 et n°2 sont pseudo parallèles en suivant la direction SE – NO. Pour mieux vérifier l’extension latérale de la formation assimilée comme aquifère observée dans les deux premiers profils, nous avons réalisé un troisième profil, suivant la direction perpendiculaire à celle de ces deux premiers profils.

Les trois coupes obtenues montrent l’existence d’une épaisse couche résistance en termes de résistivité. Elle a une puissance moyenne de 100 m. Cette formation correspondrait à la coulée récente, avec une géologie de surface de caractère « aa ». En outre, la valeur de résistivité commence à diminuer à partir du mur de cette formation. Nous avons réalisé le premier panneau à une altitude de 100 m environ et nous avons observé que la formation en profondeur pourrait constituer notre cible hydrogéologique en profondeur.

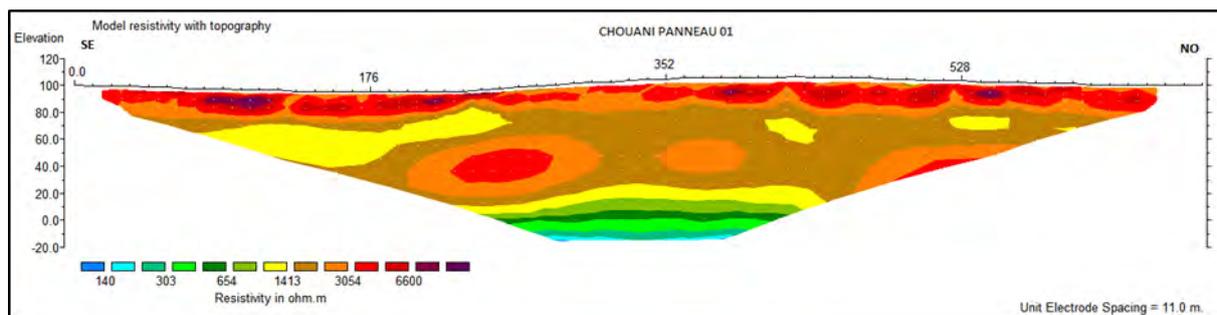


Figure 34 - Coupe géoélectrique n°1 CHOUANI

A partir de l’élévation +20 m, la valeur de résistivité décroît. Mais, pour mieux confirmer la décroissance de la valeur de résistivité en profondeur, nous avons décidé de réaliser un deuxième profil un peu en aval (figure 35).

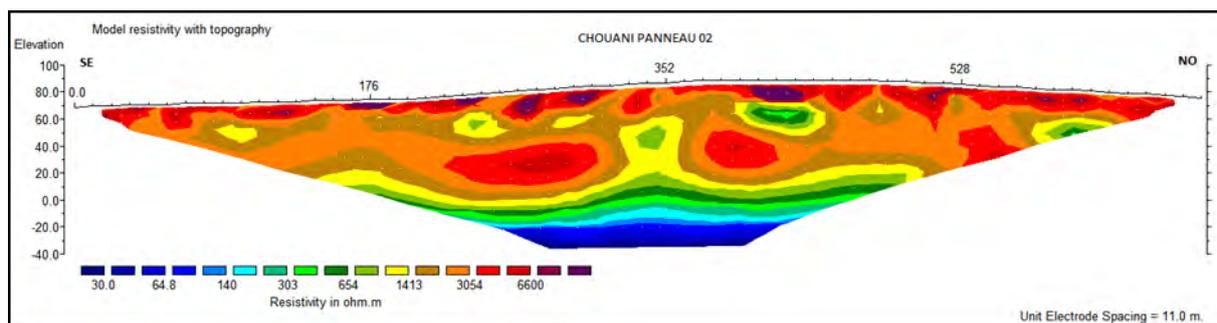


Figure 35 - Coupe géoélectrique n°2 CHOUANI

Selon cette coupe géoélectrique, la valeur de résistivité diminue toujours avec l’élévation et elle décroît jusqu’à la valeur de 30  $\Omega$ m à partir de l’élévation -20 m. Pourtant, la formation à 30  $\Omega$ m de valeur de résistivité **présenterait une nappe saumâtre dans une telle zone**. La formation qui pourrait être notre cible hydrogéologique est celle qui possède une valeur de résistivité au voisinage de 100  $\Omega$ m. Ainsi, il s’agit de la formation qui se trouve entre l’élévation -20 m et -10 m dans cette coupe. Finalement, la troisième coupe ci-après confirme l’extension de cette cible en profondeur dans la direction croisée.

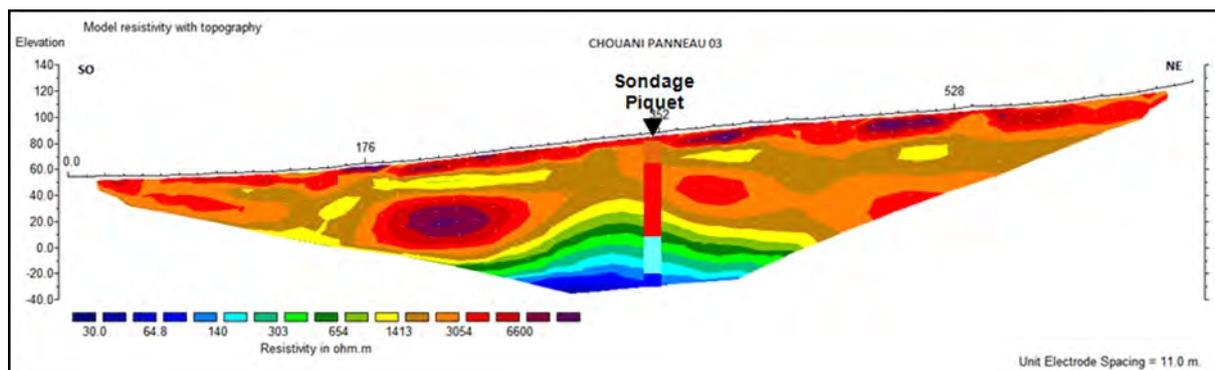


Figure 36 - Coupe géoélectrique n°3 à CHOUANI

La formation assimilée comme aquifère est toujours mise en évidence. En plus, la présente coupe met en exergue la tabularité des formations sous-jacentes suivant l'horizontale. Ainsi, la tomographie électrique est capable de prouver les dépôts des coulées laviques en forme de strate et de distinguer la variation de ces couches volcaniques suivant la profondeur selon leur contraste de résistivité.

Un point d'implantation est proposé (cf. plan en annexe 3) :

- **pour exploiter la nappe profonde dans ce secteur, il est recommandé de forer jusqu'à une élévation d'environ -20 m. La profondeur varie avec l'altitude où le forage sera implanté. Nous avons fait une implantation au point de coordonnées 11°49'56.56"S; 43°17'33.71"E, donc à une profondeur estimée de 100 m.**

### 3.3.12 Secteur DJAHADJOU

Trois panneaux électriques de dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 671 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis d'un sondage électrique et d'un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure 37 montre le plan de masse correspondant. Les résultats des sondages sont présentés en annexe 5.

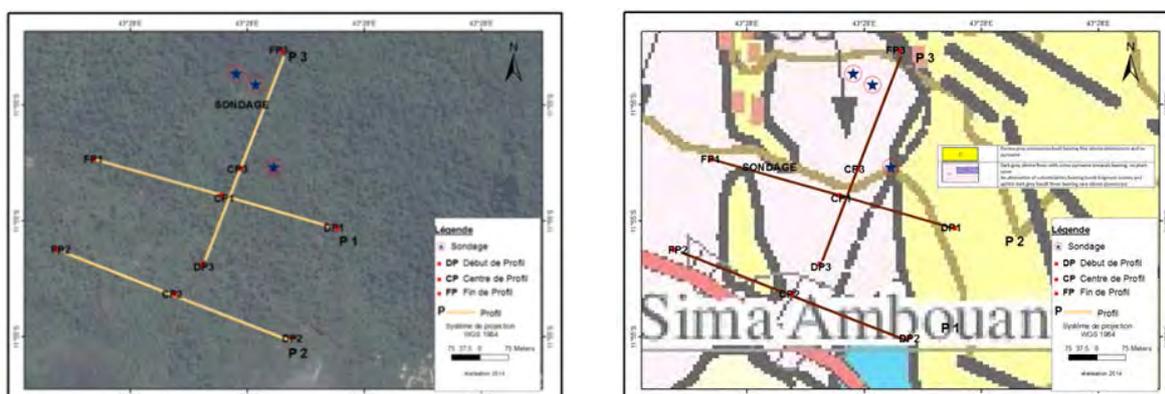


Figure 37 - Plan de masse des mesures géophysiques à DJAHADJOU

Ce plan de masse montre que les profils n°1 et n°2 sont parallèles et suivent la direction ESE – ONO. Le troisième profil coupe le profil n°1 dans la direction SSO – NNE. Il a pour but de vérifier la possibilité d'implanter un point de forage au moins à une altitude +140 m par crainte d'influence marine sur la nappe, vu que les deux premiers profils ont été réalisés à une altitude inférieure à 100 m.

Les trois coupes obtenues (Figures 38, 39 et 40) montrent l'existence d'une épaisse couche résistance, en termes de résistivité. Cette couche a une puissance moyenne de 50 m. Ainsi, cette formation correspondrait à la coulée récente ayant une géologie de surface de caractère « aa ». En

outre, la valeur de résistivité commence à diminuer à partir du mur de cette formation. Nous avons réalisé le premier panneau à une altitude de 100 m environ et nous avons observé que la formation en profondeur pourrait constituer notre cible hydrogéologique en profondeur ( $\rho \sim 140 \Omega\text{m}$ ).

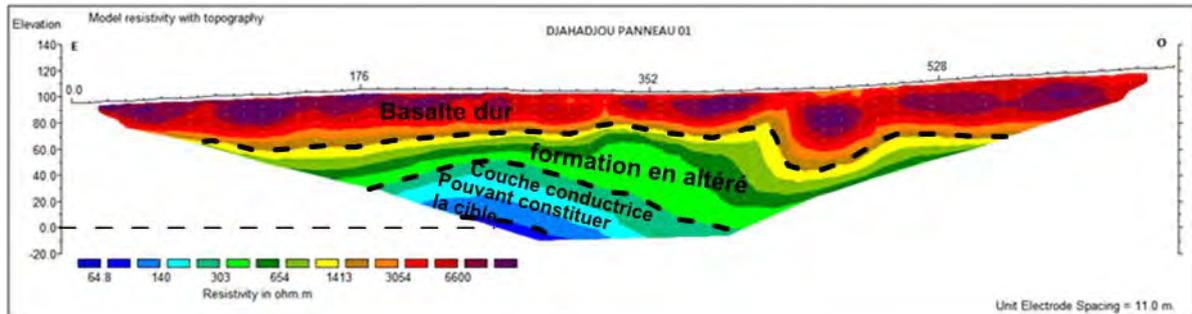


Figure 38 - Coupe géoélectrique n°1 à DJAHADJOU

Selon la présente coupe géoélectrique la valeur de la résistivité des formations sous-jacentes diminue avec l'altitude. Et cette valeur peut descendre jusqu'à  $64 \Omega\text{m}$  à une altitude  $-20 \text{ m}$ . Pour vérifier l'influence marine sur la nappe, nous avons réalisé le profil n°2 suivant à une altitude  $50 \text{ m}$  (Figure 39).

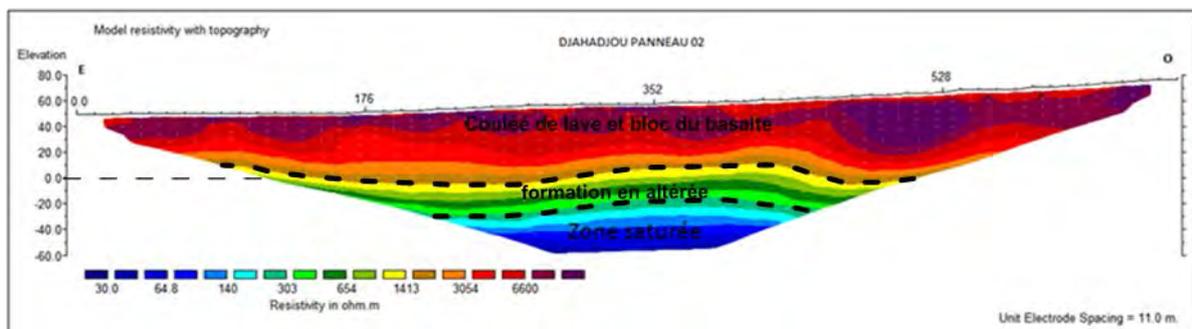


Figure 39 - Coupe géoélectrique n°2 à DJAHADJOU

Cette coupe géoélectrique montre que la valeur de résistivité de la formation, assimilée à une nappe en profondeur avec l'altitude, pourrait diminuer jusqu'à  $30 \Omega\text{m}$  (figure 39). Ainsi, nous avons réalisé le panneau n°3 ci-dessous suivant le flanc de la colline in situ.

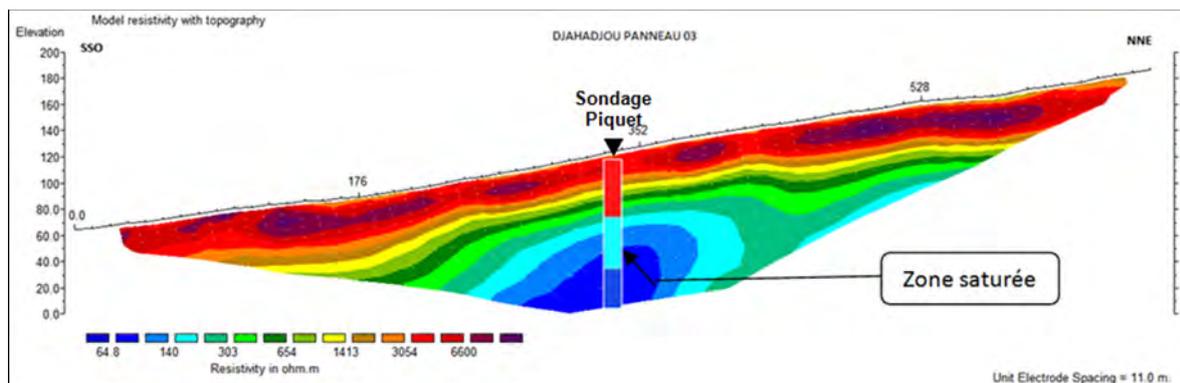


Figure 40 - Coupe géoélectrique n°3 à DJAHADJOU

Les mêmes formations que celles observées dans les deux coupes précédentes apparaissent dans la présente coupe.

Un point d'implantation est proposé (cf. plan en annexe 3):

- **F1, de coordonnées 11°54'47.80"S ; 43°27'47.90"E au centre du profil n°3 et avec une profondeur estimée de 120 m.**

### 3.3.13 Secteur MOHORO

Le secteur MOHORO se trouve dans la partie Est de la Grande Comore. Il est couvert par la formation volcanique relativement récente. La zone se trouve à environ 1,5 km de la côte-est et elle est couverte de broussailles. Des laves volcaniques composées des blocs du basalte se trouvent à la surface du sol. Suite à la recommandation de l'hydrogéologue, trois panneaux électriques (utilisant le dispositif Wenner) ayant chacun une longueur de ligne de 732 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis d'un sondage électrique et un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés, afin de mettre en évidence la structure hydrogéologique de la zone d'étude et de déterminer le point favorable à l'implantation d'un forage d'eau. La figure 41 montre le plan de masse correspondant.

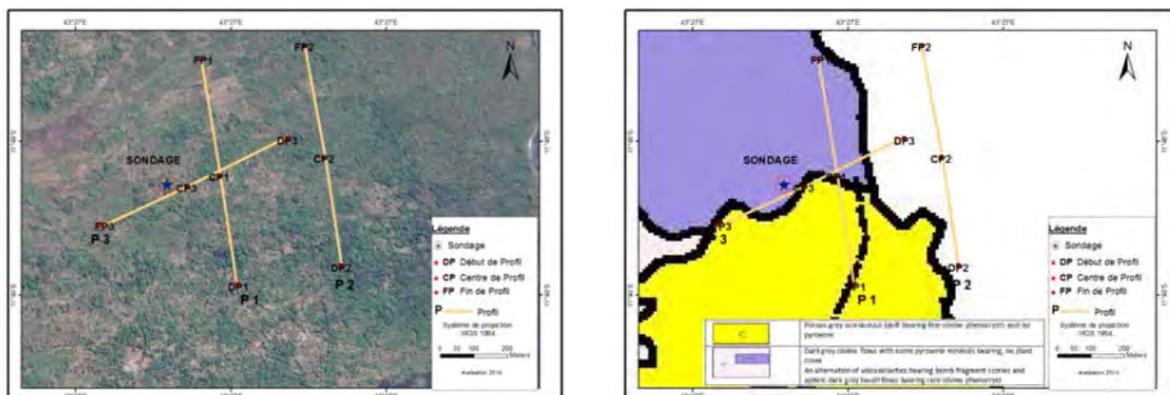


Figure 41 - Plan de masse des mesures géophysiques à MOHORO

Les deux premiers profils de direction presque S – N, sont quasiment parallèles et suivent la courbe de niveau topographique et le troisième profil coupe le centre du premier panneau et suit la direction NE-SO (figure 41).

Les deux profils n°1 et n°2 réalisés (figure 42), mettent en évidence l'existence de nappes superficielles peu potentielles, mais notre objectif est d'atteindre la nappe profonde en équilibre avec l'océan, à environ 150 m de profondeur, d'après une estimation hydrogéologique.

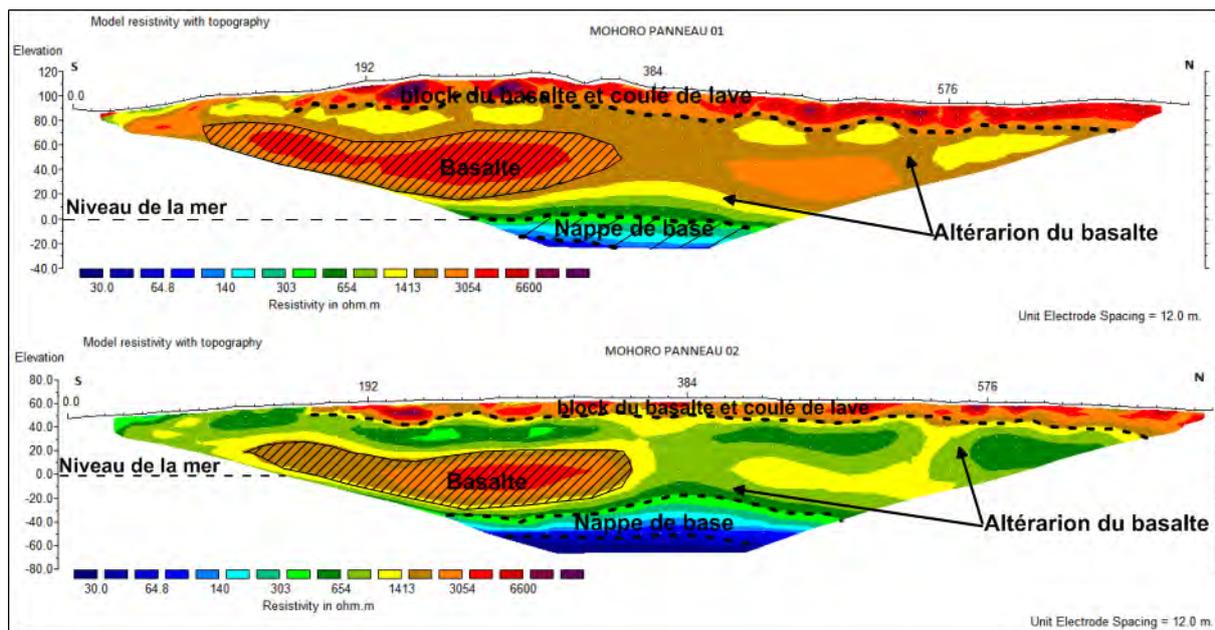


Figure 42 - Coupes géoélectriques 1 et 2 réalisées à MOHORO

Ces deux coupes géoélectriques montrent l'existence d'une épaisse formation hétérogène et résistante, de la surface jusqu'à environ 20 m de profondeur. Cette formation a une valeur de résistivité supérieure à 3 000  $\Omega\text{m}$  et pourrait correspondre à des coulées basaltiques et de blocs du basalte. L'alternance du basalte altéré, de scorie ou pouzzolane etc., de couleur jaune et marron, dont les valeurs de résistivité sont comprises entre 600  $\Omega\text{m}$  et 3 000  $\Omega\text{m}$  apparaît le long de ces deux profils, jusqu'à environ 100 m de profondeur pour le premier panneau et jusqu'à 60 m de profondeur pour le deuxième. La cible hydrogéologique (nappe profonde) a une valeur de résistivité comprise entre 60  $\Omega\text{m}$  et 300  $\Omega\text{m}$  et se trouve en dessous du niveau de la mer. Elle apparaît jusqu'à -20 m d'altitude dans le premier profil (panneau n°1) et à -40 m dans le deuxième profil (panneau n°2).

Le troisième panneau a été réalisé dans le but d'obtenir des informations supplémentaires dans la zone et aussi pour déterminer l'évolution d'intrusion marine si on monte en altitude et si on éloigne la côte. Le résultat en coupe se présente dans la figure 43.

D'une manière générale, il met en exergue trois formations distinctes. D'abord, la formation superficielle très résistante, de résistivité supérieure à 3 000  $\Omega\text{m}$  de couleur violet qui correspondrait à des coulées basaltiques récentes de la colline. Son épaisseur est de l'ordre de 20 m. Ensuite, on observe une formation de résistivité comprise entre 1 000 et 3 000  $\Omega\text{m}$ , qui se trouve directement en dessous de la formation précédente et qui s'enfuit jusqu'à environ 80 m de profondeur. Finalement, une formation conductrice, de résistivité comprise entre 60 et 300  $\Omega\text{m}$ , d'épaisseur environ 20 m constituant notre cible. Cette formation correspondrait à la nappe profonde dans ce secteur. En outre, les sondages électrique et TDEM implantés en abscisse  $x = 396$  m ou aux trente-quatrième électrodes confirment cette présence de nappe profonde à 140 m de profondeur si on monte en altitude (cf. résultats des sondages en annexe 5).

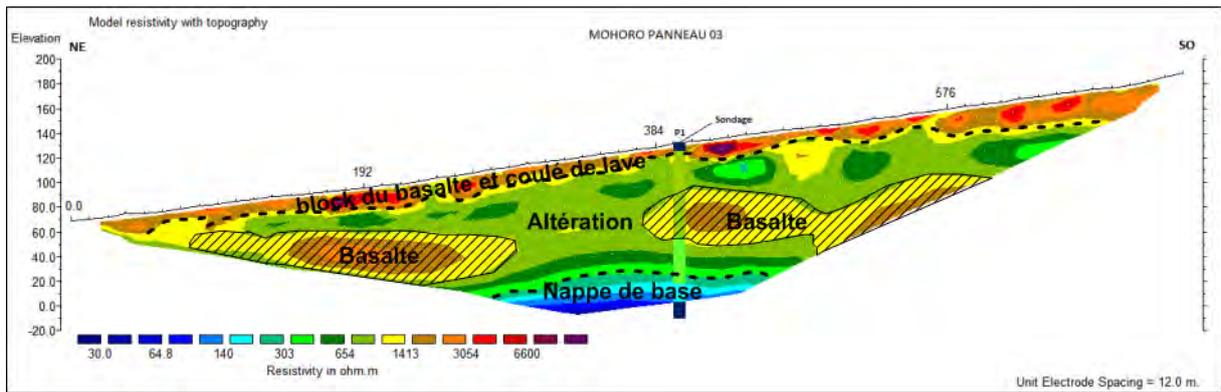


Figure 43 - Coupe géoélectrique n°3 réalisée à MOHORO

Ainsi, on peut en déduire la profondeur de l'ouvrage, qui augmente en fonction de l'altitude de cette zone. Plus on monte en altitude, plus la profondeur d'ouvrage augmente.

Un point d'implantation est proposé (cf. plan en annexe 3) :

- F1, de coordonnées géographiques 11°48'35.06"S; 43°27'9.94"E, avec une profondeur de l'ouvrage estimée à 140 m.

### 3.3.14 Secteur OUELA

De même que dans le secteur précédent, trois panneaux électriques dont toutes les électrodes sont réarrangées en dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 732 m et une profondeur d'investigation d'environ 120 m, suivis de des sondages (électrique et TDEM de boucle 50 m x 50 m) ont été réalisés. La figure 44 montre le plan de masse des travaux accomplis.

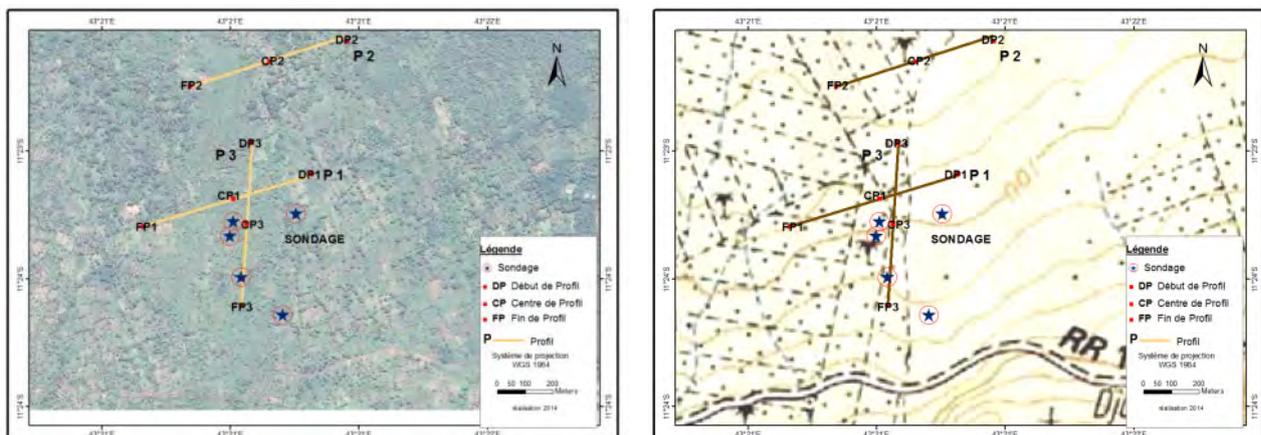


Figure 44 - Plan de masse des mesures géophysiques à OUELA

Selon le résultat de l'étude hydrogéologique, les profils n°1 et n°2 sont pseudo-parallèles distants de 450 m afin, d'une part, de déterminer les variations de résistivité latéralement et, d'autre part, de repérer les intrusions d'eau marines depuis la côte vers l'intérieur de l'île.

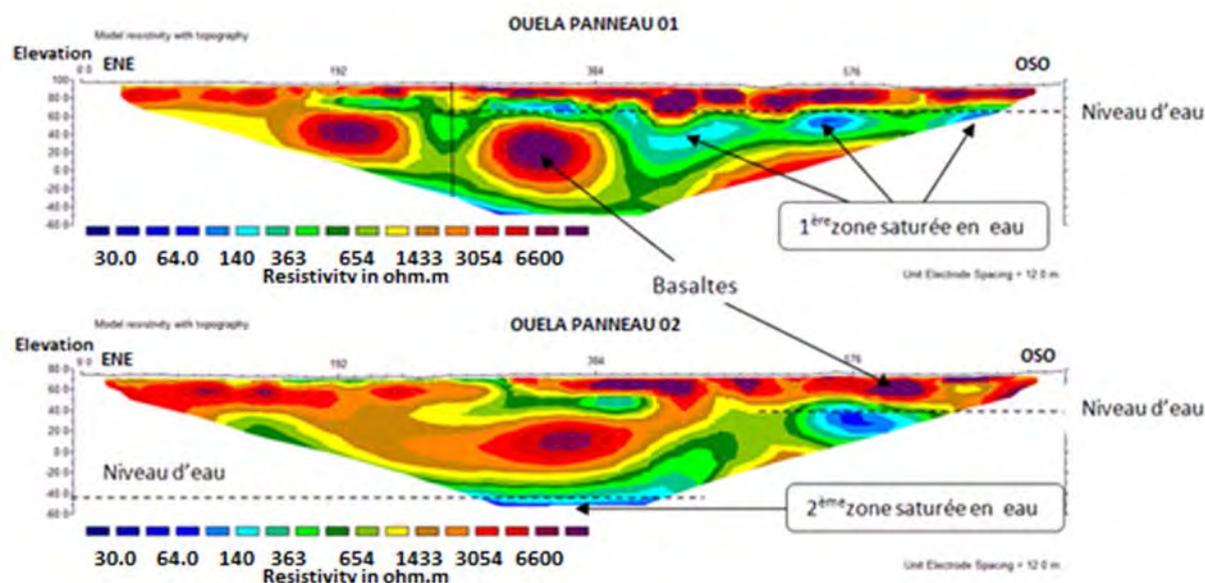


Figure 45 - Coupes géoélectriques n°1 et n°2 à OUELA

Ces deux coupes présentent l'existence de deux formations, à savoir :

- D'abord, la couverture résistante, de résistivité supérieure à 1 400  $\Omega\text{m}$  ; elle apparait presque tout au long du profil, avec une puissance moyenne de 25 m. Compte tenu des affleurements in situ, cette formation correspondrait à des alluvions et des basaltes secs.
- Puis, une formation conductrice de résistivité comprise entre 75  $\Omega\text{m}$  et 200  $\Omega\text{m}$ , qui pourrait être notre cible hydrogéologique. Primo, elle est piégée entre des basaltes en phase d'altération (1ère zone saturée en eau) de couleur bleu en général ; le résultat de l'étude hydrogéologique (estimation de la cible à plus de 100 m) ainsi que la géométrie de la dite cible ne nous permettent pas de conclure que cette formation est une cible potentielle. Secundo, elle repose sur une formation résistante qui se trouve à environ 60 m de profondeur dans la moitié OSO du profil n°1. Tertio, cette formation réapparaît à plus de 140 m de profondeur sur les deux profils quasiment parallèles ; sa continuité latérale en profondeur est donc bien vérifiée. Il semble donc plus favorable d'exploiter cette 2ème zone saturée en eau, compte tenue de la gamme de valeurs de résistivité, et de l'hypothèse hydrogéologique.

On remarque que plus en descend en profondeur, plus la valeur de résistivité diminue, ce qui veut dire qu'à une certaine profondeur, la nappe devient saumâtre. Nous avons donc mis en œuvre un sondage TDEM afin de pouvoir détecter la profondeur de l'interface eau douce/eau saumâtre et de prévoir l'intrusion marine (cf. résultats des sondages en annexe 5).

Le troisième profil de direction N-S et les deux sondages ont été réalisés pour percevoir l'extension latérale et verticale de la cible.

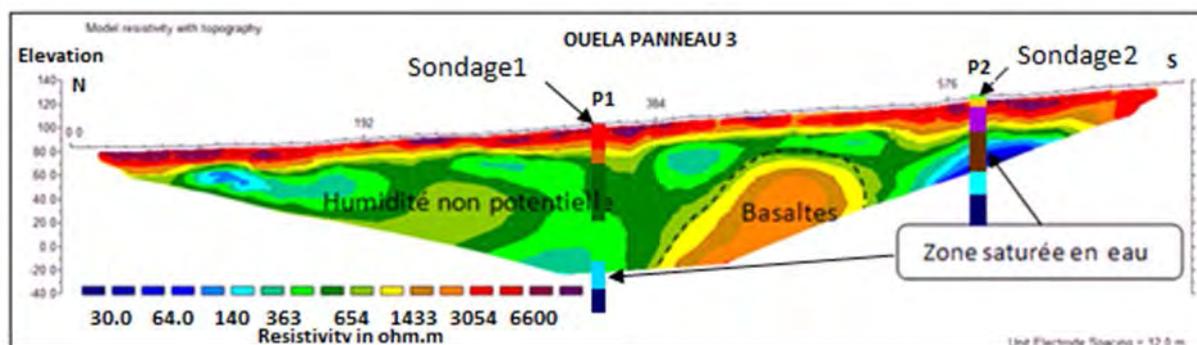


Figure 46 - Coupe géoélectrique n° 3 à OUELA

La présente coupe géoélectrique met en évidence les mêmes formations que celles observées dans les deux coupes précédentes :

- la formation résistante superficielle d'environ 10 m d'épaisseur qui est présente tout le long du profil,
- la formation peu fissurée (couleur verte),
- et la formation cible conductrice, moins profonde à l'extrême sud de ce profil et plus profonde au centre.

La présente coupe est dominée par des formations récentes peu fissurées, qui pourraient receler une humidité et/ou des nappes perchées peu potentielles. Pourtant, à l'endroit où les deux sondages ont été réalisés, existe une formation à faible valeur de résistivité (75  $\Omega$ m – 300  $\Omega$ m) qui pourrait être notre cible : le sondage n°1 indique que cette dernière se situe entre 110 m et 130 m de profondeur environ et le sondage n°2 informe que la nappe est moins profonde, de l'ordre de 80 m de profondeur. Au-delà de cette profondeur maximale, la nappe pourrait être contaminée par l'intrusion marine.

Deux points d'implantation sont proposés, là où le sondage électrique combiné avec le sondage TDEM a été réalisé (cf. plan en annexe 3) :

- **F1, ayant des coordonnées géographiques 11°23'23.59"S; 43°21'16.92"E, avec une profondeur estimée de 140 m ;**
- **F2, repéré par les coordonnées géographiques 11°23'30.33"S; 43°21'16.53"E, dont la profondeur est estimée à 80 m.**

### 3.3.15 Secteur CHEZANI

Comme pour tous les autres les sites d'intervention, trois panneaux électriques de dispositif Wenner, ayant chacun une longueur de ligne de 732 m et une profondeur d'investigation d'environ 150 m, suivis d'un sondage électrique et d'un sondage TDEM de boucle 50 m x 50 m ont été réalisés. La figure ci-dessous montre l'aperçu de la zone d'étude, les travaux géophysiques et le plan de masse correspondant.

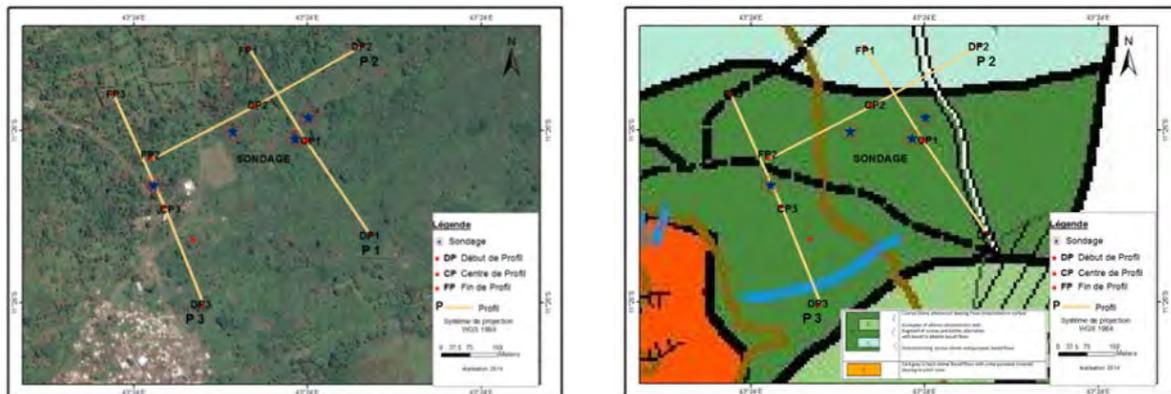


Figure 47 - Plan de masse des mesures géophysiques à CHEZANI

Les deux profils, panneau n°1 et panneau n°3, de direction NNO–SSE sont parallèles et distants de 340 m, tandis que le deuxième et le premier panneau se coupent à leurs abscisses respectives 460 m et 576 m, pour bien confirmer la cible observée dans la coupe géoélectrique n°1. Les trois panneaux montrent l'alternance des formations résistantes ( $> 1\,400\ \Omega\text{m}$ ) - conductrices ( $300 < \rho < 900\ \Omega\text{m}$ ) en allant de la surface jusqu'en profondeur.

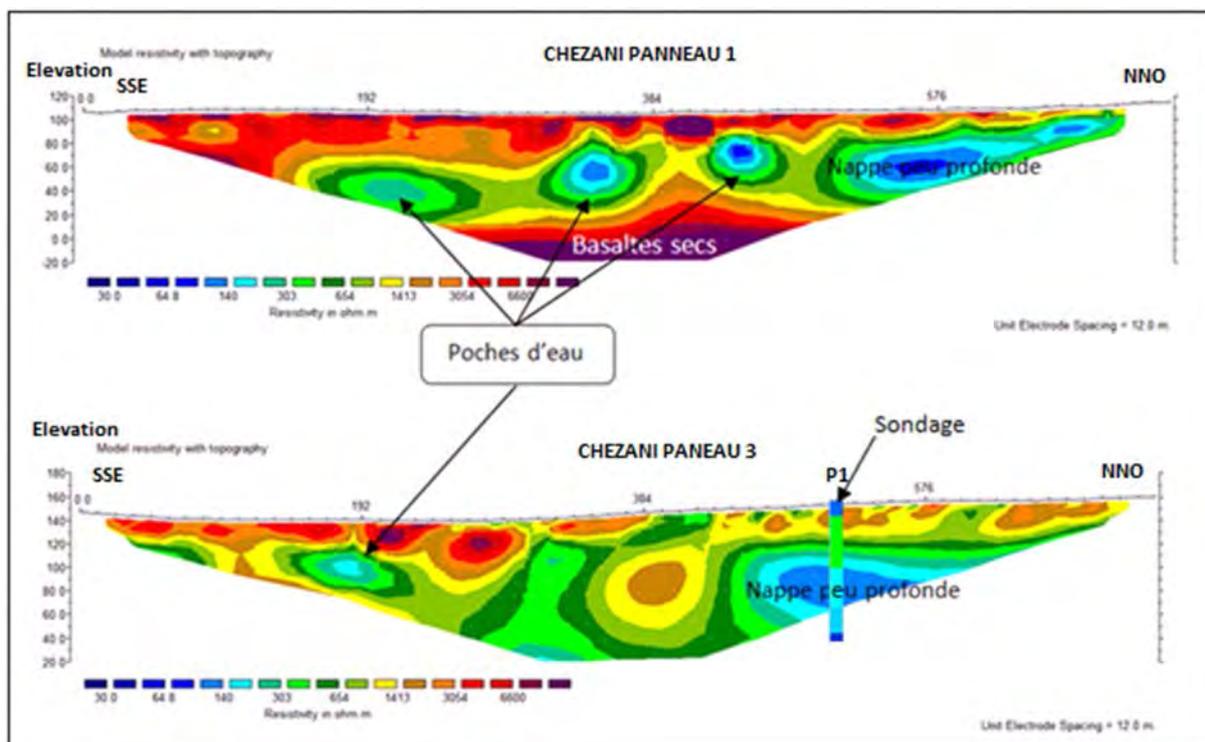


Figure 48 - Coupes géoélectriques n°1 et n°3 à CHEZANI

Les deux coupes mettent en exergue l'existence des formations conductrices qui pourraient être assimilées à la nappe peu profonde, en tenant compte de la variation des valeurs de résistivité (100 à  $250\ \Omega\text{m}$ ). Selon le panneau électrique n°1 (Figure 48, haut), ces formations conductrices se reposent sur un horizon résistant. Le profil 2 illustre sa continuité dans la direction NE-SO.

En outre, le résultat du sondage (cf. résultats en annexe 5) montre que la cible hydrogéologique, de résistivité environ  $150\ \Omega\text{m}$  se trouve à plus de 60 m de profondeur. Elle repose directement sur une formation conductrice. Ainsi, pour vérifier cette observation, le troisième profil a été réalisé

perpendiculairement à ces deux profils et centré à l'abscisse 576 m du panneau n°1. La coupe géoélectrique issue de ce panneau 3 est représentée dans la figure 49.

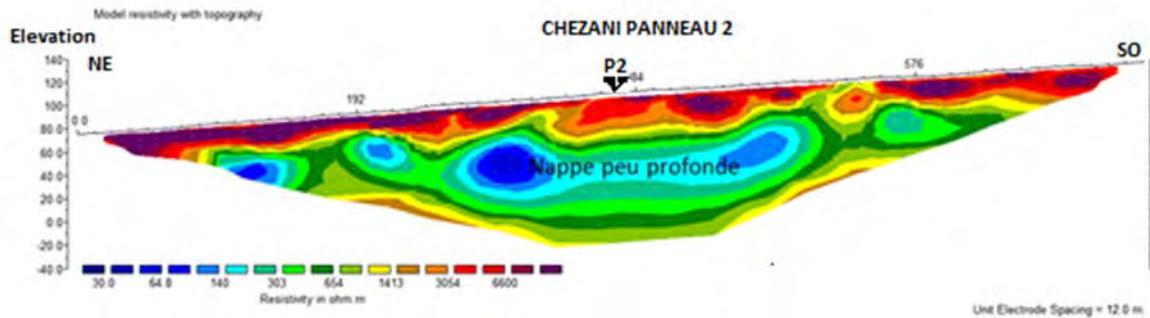


Figure 49 - Coupes géoélectriques n°2 à CHEZANI

La coupe met en évidence l'existence de formations conductrices qui commencent à apparaître, en dessous de la formation superficielle résistante, à plus de 25 m de profondeur. Ces formations se trouvent de part et d'autre du centre de ce profil et se sont interconnectées entre elles. La présente coupe montre aussi l'augmentation progressive de la valeur de résistivité à une certaine profondeur. Plus cette dernière augmente, à partir d'environ 80 m de profondeur, plus la valeur de résistivité augmente. Cela pourrait confirmer la présence du basalte sec mentionnée dans la coupe géoélectrique 1 (Figure 49). En définitive, deux points d'implantation ont été proposés (cf. plan en annexe 3) :

- F1 ayant des coordonnées géographiques 11°25'31.94"S ; 43°23'45.42"E, avec une profondeur estimée de 110 m ;
- F2, repéré par les coordonnées géographiques 11°25'31.50"S; 43°18'57.17"E dont la profondeur est estimé à 80 m.

### 3.3.16 Secteur MTSANGADJOU

Sur ce site, toujours trois panneaux électriques utilisant système multi-électrodes ont été mis en œuvre. La distance inter électrodes est de 12 m et la profondeur d'investigation est de l'ordre de 150 m. La figure 50 montre le plan de masse correspondant.

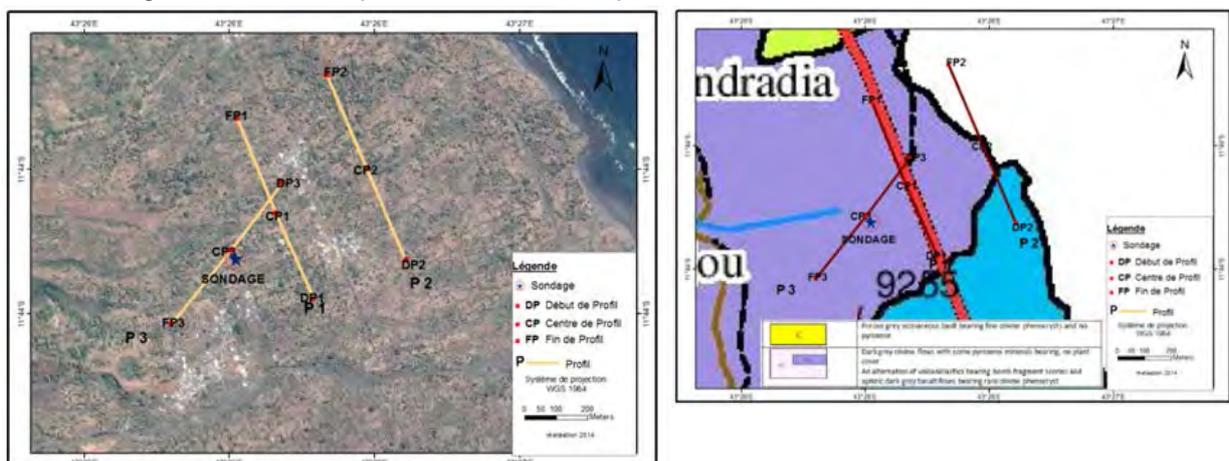


Figure 50 - Plan de masse des mesures géophysiques à MTSANGADJOU

D'après ce plan de masse, les profils 1 et 2 sont quasiment parallèles, distants d'environ 400 m, suivant la direction NNO-SSE, pour essayer de voir la continuité des formations, tandis que le troisième profil a été placé un peu plus à l'ouest et il a suivi la direction NE-SO. Ce dernier profil se croise avec le profil n°1. Les trois panneaux montrent l'existence d'une épaisse formation très résistante, de résistivité supérieure à 1 400  $\Omega\text{m}$ . Elle pourrait avoir une puissance moyenne de 80 m mais s'amincit en allant vers le NNO selon le profil n°2. Géologiquement, elle correspondrait à une formation stratifiée du basalte compact, scories. S'ensuit la formation moins résistante, marquée par la diminution progressive de la valeur de résistivité lorsqu'on pénètre de plus en plus en profondeur.

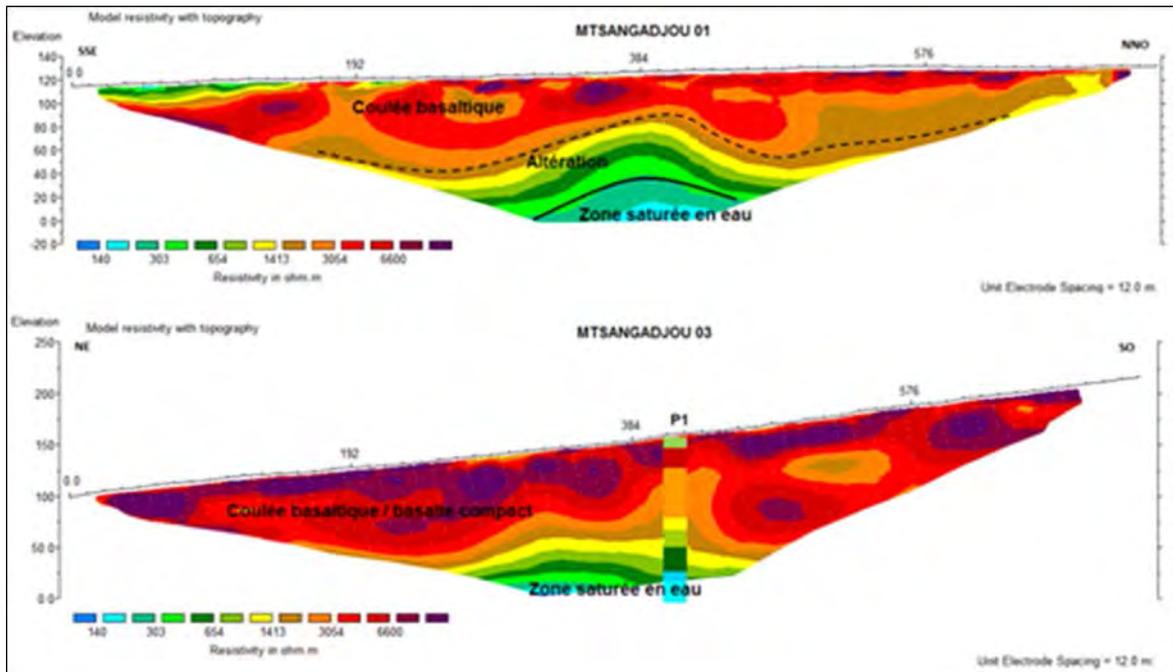


Figure 51 - Coupes géoélectrique n°1 et n°3 réalisées à MTSANGADJOU

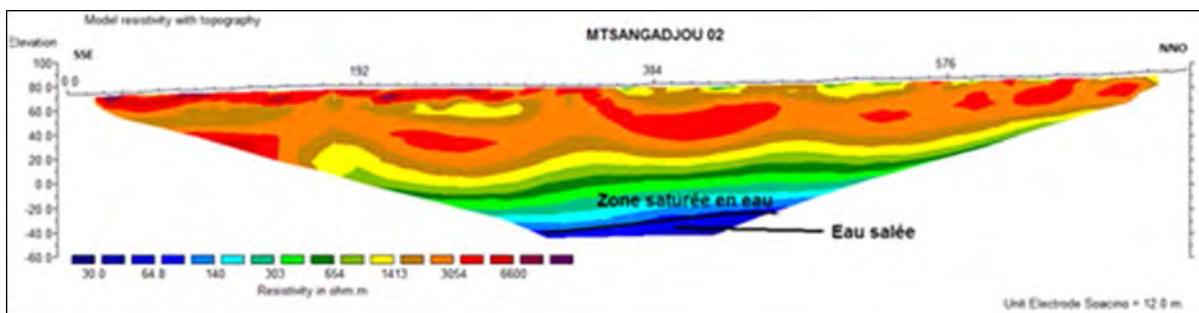


Figure 52 - Coupes géoélectriques n°2 à MTSANGADJOU

Les coupes géoélectriques résultantes nous montrent l'homogénéité des formations sous-jacentes dans toutes les directions du site Mtsangadjou. Compte tenu de la décroissance progressive de la valeur de résistivité en allant de plus en plus en profondeur, et en complément avec la gamme de valeurs de résistivité qui pourrait atteindre la valeur favorable à la circulation d'eau ( $75 < \rho < 250 \Omega\text{m}$ ) (cf. figure 52 profil n°2), la nappe profonde, prédite hydrogéologiquement, a été mise en évidence par ces trois profils à plus de 100 m de profondeur. Plus on s'éloigne du bas versant (profil2), plus la profondeur de la nappe augmente et peut atteindre jusqu'à plus de 150 m (cas du centre du profil 3). Aussi, un sondage électrique et un sondage TDEM ont été réalisés à l'abscisse 396 m du profil 3. Le résultat montre que la cible hydrogéologique se trouve à plus de 140 m de profondeur au point P1 (cf.

résultat en annexe 5). La décroissance progressive de la valeur de résistivité citée ci-dessus permet aussi d'une autre manière de prévoir l'apparition de l'interface eau douce/ eau de mer à plus de 120 m de profondeur pour les endroits proches du profil 2.

Un point d'implantation est proposé (cf. plan en annexe 3) :

- **F1, de coordonnées 11°43'39.26"S; 43°26'0.57"E, avec une profondeur estimée de 150 m.**

## 4. Conclusion

Les différentes études menées ont permis de choisir les points d'implantation de forage par approche hydro-géophysique dans 15 villages repartis dans l'île de la Grande Comore.

L'utilisation des méthodes géophysiques, dont les méthodes électrique et électromagnétique ont permis de mettre en évidence l'extension latérale et verticale de la cible hydrogéologique au point proposé à l'issue des résultats des études des caractéristiques hydrogéologiques détaillées dans la zone d'intervention.

Les caractéristiques des forages proposés sont présentées dans le tableau 2 ci-après.

**Tableau 2 - Tableau Récapitulatif des points d'eaux proposés**

N°	Secteur	Prioritaire	Latitude	Longitude	Profondeur Estimée (m)	Géomorphologie	Ouvrage	Observations
1	HELENDJE	F1	11°26'31.89"S	43°19'4.26"E	80	Terrasse	Forage	Accès possible
		F2	11°26'31.50"S	43°18'57.17"E	100	Terrasse		Accès possible
2	IVEMBENI	F1	11°28'42.99"S	43°19'41.24"E	120	Terrasse	Forage	Accès possible
		F2	11°28'48.51"S	43°19'45.40"E	120	Terrasse		Accès possible
3	CHAMLE	F1	11°26'42.32"S	43°17'0.37"E	120	Terrasse	Forage	Accès possible
		F2	11°26'35.90"S	43°16'57.59"E	120	Terrasse		Accès possible
4	BATSA	F1	11°23'54.32"S	43°23'6.34"E	160	Plateau	Forage	Accès possible
		F2	11°23'43.13"S	43°23'11.58"E	130	Plateau		Accès possible
5	OUSSIVO	F1	11°34'36.54"S	43°16'46.87"E	150	Versant	Forage	Accès possible
6	HAHAYA	F1	11°30'54.51"S	43°18'2.67"E	130	Plateau	Forage	Accès possible
5	INANE	F1	11°53'20.68"S	43°28'14.22"E	80	Plateau	Forage	Accès possible
		F2	11°53'24.24"S	43°28'15.55"E	80	Plateau		Accès possible
6	MIDJENDJENI	F1	11°54'38.67"S	43°29'19.93"E	120	Versant	Forage	Accès possible
		F2	11°54'37.57"S	43°29'11.20"E	120	Plateau		Accès possible
7	MALE	F1	11°53'15.36"S	43°30'4.37"E	120	Versant	Forage	Accès possible
		F2	11°53'15.71"S	43°29'59.78"E	140	Versant		Accès possible
8	CHOUANI	F1	11°49'56.56"S	43°17'33.71"E	100	Versant	Forage	Accès possible
9	DJAHADJOU	F1	11°54'47.80"S	43°27'47.90"E	120	Plateau	Forage	Accès possible
10	MOHORO	F1	11°48'35.06"S	43°27'9.94"E	140	Versant	Forage	Accès possible
11	OUELA	F1	11°23'23.59"S	43°21'16.92"E	140	Plateau	Forage	Accès possible
		F2	11°23'30.33"S	43°21'16.53"E	80	Plateau		Accès possible
12	CHEZANI	F1	11°25'31.94"S	43°23'45.42"E	110	Plateau	Forage	Accès possible
		F2	11°26'31.50"S	43°18'57.17"E	80	Plateau		Accès possible
13	MTSANGADJOU	F1	11°43'39.26"S	43°26'0.57"E	150	Versant	Forage	Accès possible

## Références bibliographiques

- ACF, 2013. « Etudes d'implantation géologiques et hydrogéologiques en vue de la réalisation de 16 points d'eau modernes dans 3 communes du district de Betioky Atsimo, région Atsimo Andrefana, Madagascar. » Action contre la faim Madagascar : 13 Août 2013, 141 p.
- Archie, G. E. 1942. « The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics ». Transactions of American Institute of Mining Metallurgical Engineers 146: 54-62.
- Bachelery, Patrick, et Jean Coudray. 1993. « Carte volcanologique de la Grande Comore au 1/50 000 ème, avec notice explicative, 39 p. »
- Barker, R. D. 1989. « Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays ». GEOPHYSICS 54 (8) (août): 1031-1037. doi:10.1190/1.1442728.
- Cordier, Emmanuel, Julie Lézé, et Jean-Lambert Join. 2013. « Natural tidal processes modified by the existence of fringing reef on La Reunion Island (Western Indian Ocean): Impact on the relative sea level variations ». Continental Shelf Research 55 (mars 1): 119-128. doi:10.1016/j.csr.2013.01.016.
- Daessle, et Join. 1988. « Cliché de salinité des nappes souterraines de la côte ouest de l'île de La Réunion ». BRGM/88-REU-005.
- Daessle, M. 1988. « Pogramme Départemental de Recherche en Eau 1986- Les moyens de captage des eaux souterraines en milieu volcanique insulaire ». BRGM/88-REU-029. BRGM.
- Descloitres, Marc. 1998. « Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM): application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Réunion) ». Paris: Université Paris 6. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010014382>.
- Edmundo P. G., Guérin R., 2004. « Equivalence et profondeur d'investigation en panneau électrique. » DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, 38 p.
- Garo J. S., 2012. « Approche multidisciplinaire de l'étude hydrogéologique du bassin d'ambovombe androy dans l'extrême sud de Madagascar. » Thèse de Doctorat de 3eme cycle en Sciences Physiques, Université d'Antananarivo, 235 p.
- GECEAU, 2013. « Tests methodologiques en geophysique en vue de l'implantation de forages d'eau sur l'île de la grande comore. » Projet GECEAU. CKM 1068 – GECEAU.
- GECEAU, 2014. « Projet pilote de gestion du service public de l'eau en milieu rural sur l'île de Grande Comore (GECEAU). » Rapport de Monsieur Marc Cruchet Hydrogéologue –mission n°1 du 15 octobre au 27 octobre 2014, 41 p.
- Hoareau, Johan. 2009. « Utilisation d'une approche couplée hydrogéophysique pour l'étude des aquifères - Applications aux contextes de socle et côtier sableux. » Université Joseph-Fourier - Grenoble I. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00470297>

- JICA, 2005. « Etude de l'approvisionnement en eau potable d'Ambovombe Androy. » Rapport principal, 178 p.
- Join, Jean-Lambert, J.-B. Pomme, Jean Coudray, et M. Daessle. 1988. « Caractérisation des aquifères basaltiques en domaine littoral. Impact d'un récif corallien. » *Hydrogéologie* (2): 107-115.
- Kirsch, Reinhard, éd. 2008. *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*. 2nd ed. 2009. Springer.
- Marescot, Laurent. 2006. « An introduction to electrical imaging. » *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 90.1: 23-40.
- McDougall. 1971. « The geochronology and evolution of the young volcanic island of Réunion, Indian Ocean. » *Geochim. and Cosmochim. Acta*, (35): p. 261-288.
- Milsom, John. 1989. *Field Geophysics, Geological Society of London Handbook*. John Wiley Edition. Open University Press.
- Nabighian, Misac N. 1988. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory*. SEG Books.
- Rabemanana V., 2002. « Origine et Caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy (Sud de Madagascar). » Thèse de doctorat en Sciences de la terre, Université de Paris 6, 204 p.
- Revil, A., M. Karaoulis, T. Johnson, et A. Kemna. 2012. « Review: Some Low-frequency Electrical Methods for Subsurface Characterization and Monitoring in Hydrogeology ». *Hydrogeology Journal* 20 (4) (juin 1): 617-658. doi:10.1007/s10040-011-0819-x.
- Reynolds, John M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley.
- Roy, A. 1972. « Depth of Investigation in Wenner, Three-Electrode and Dipole-Dipole Dc Resistivity Methods\* ». *Geophysical Prospecting* 20 (2): 329-340. doi:10.1111/j.1365-2478.1972.tb00637.x.
- Roy, A., et A. Apparao. 1971. « Depth of Investigation in Direct Current Methods ». *Geophysics* 36 (5) (janvier 10): 943-959.
- Savin, C., M. Ritz, J-L Join, et P. Bachelery. 2001. « Hydrothermal system mapped by CSAMT on Karthala volcano, Grande Comore Island, Indian Ocean. » *Journal of Applied Geophysics* 48: 143-152.
- Schlumberger. 1979. *Log Interpretation Charts*. Schlumberger.
- Spies, Brian R. 1989. « Depth of Investigation in Electromagnetic Sounding Methods ». *Geophysics* 54 (7) (janvier 7): 872-888. doi:10.1190/1.1442716.

# ANNEXES

---

## Annexe 1 : Planning de la mission

---

Samedi 25 octobre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arrivée Aéroport de Moroni 09H20</li> <li>- Accueil au bureau d'Egis eau Moroni</li> <li>- Discussion avec l'hydrogéologue Marc Cruchet</li> </ul>
Dimanche 26 octobre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bureau de Moroni : Calage des zones de prospection géophysique avec Marc Cruchet. Définition des termes de référence des travaux géophysiques</li> </ul>
Lundi 27 octobre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matinée bureau Moroni</li> <li>- Visite de la DGME</li> <li>- Définition des termes de référence des travaux géophysiques</li> <li>- Ramener Mr Marc Cruchet à l'Aéroport Moroni</li> </ul>
Mardi 28 Novembre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matinée achat des accessoires des matérielles géophysiques (batterie, marteaux, etc.....)</li> <li>- Travaux de prospection géophysique au niveau du puits ONU 28 à CHAMLE (réalisation des sondages électrique et électromagnétique)</li> </ul>
Mercredi 29 au Vendredi 31 octobre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prospection géophysique sur terrain au secteur OUSSIVO</li> </ul>
Samedi 01 Novembre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matinée visite de lieu du secteur HAHAYA</li> <li>- Après-midi récupération des autres matérielles géophysiques à l'Aéroport de Moroni</li> </ul>
Dimanche 02 Novembre 2014	<p>Bureau de Moroni :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Repérage et définition des directions de profils géophysiques dans les secteurs OUSSIVO, HAHAYA, CHAMLE sur l'image satellite et image google earth</li> <li>- Préparation des matérielles géophysiques pour les travaux su terrain</li> </ul>
Lundi 03 au Mardi 04 Novembre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prospection géophysique sur terrain au secteur HAHAYA</li> </ul>
Mercredi 05 au Jeudi 06 Novembre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prospection géophysique sur terrain au secteur CHAMLE</li> </ul>
Vendredi 07 au Samedi 08 Novembre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prospection géophysique sur terrain au secteur IVEMBENI</li> </ul>
Dimanche 09 Novembre 2014	<p>Bureau de Moroni :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Repérage et définition des directions de profils géophysiques dans les secteurs HELENDJE, OUELA, BATSA sur l'image satellite et image google earth</li> <li>- Vérification et entretien des matérielles géophysiques pour les travaux sur terrain</li> </ul>
Lundi 10 au Mardi 11 Novembre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prospection géophysique sur terrain au secteur HELENDJE</li> </ul>
Mercredi 12 au Samedi 15 Novembre 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prospection géophysique sur terrain au secteur OUELA</li> </ul>

Dimanche 16 Novembre 2014	Bureau de Moroni : - Repérage et définition des directions de profils géophysiques dans les secteurs BATSA, CHEZANI, MTSANGADJOU sur l'image satellite et image google earth - Entretien des matérielles géophysiques
Lundi 17 au Mardi 18 Novembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur BATSA
Mercredi 19 au Jeudi 20 Novembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur CHEZANI
Vendredi 21 au Samedi 22 Novembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur MTSANGADJOU
Dimanche 23 Novembre 2014	Bureau de Moroni : - Repérage et définition des directions de profils géophysiques dans les secteurs INANE, MALE, MIDJENDJENI sur l'image satellite et image google earth - Préparation des exposées (comité de pilotage)
Lundi 24 au Mardi 25 Novembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur INANE
Mercredi 26 au Jeudi 27 Novembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur MALE - Réunion du comité de pilotage (exposé)
Vendredi 28 au Samedi 29 Novembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur MIDJENDJENI
Dimanche 30 Novembre 2014	Bureau de Moroni : - Repérage et définition des directions de profils géophysiques dans les secteurs MOHORO, DJAHADJOU, CHOUANI sur l'image satellite et image google earth - Traitement des données (panneau électrique et sondage TDEM)
Lundi 01 au Mardi 02 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur MOHORO
Mercredi 03 au Jeudi 04 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur DJAHADJOU
Vendredi 05 au Samedi 06 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur CHOUANI
Dimanche 07 Novembre 2014	Bureau de Moroni : - Traitement et interprétation des données
Lundi 08 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur OUSSIVO (Réalisation des panneaux électriques)
Mardi 09 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain au secteur HAHAYA (Réalisation des panneaux électriques et un sondage STDEM)
Mercredi 10 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain panneau électrique au niveau du puits ONU 28 CHAMLE et un SE et un STDEM à IVEMBENI

Jeudi 11 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain : Réalisation des sondages à HELENDJE
Vendredi 12 Décembre 2014	- Prospection géophysique sur terrain : Réalisation des sondages à MTSANGADJOU
Samedi 13 au 15 Lundi Décembre 2014	Bureau de Moroni : - Traitement et interprétation des données
Mardi 16 Décembre 2014	Bureau de Moroni : - Préparation d'exposé
Mercredi 17 Décembre 2014	Bureau DGEME : - Présentation de quelques résultats obtenus devants les membres de la DGEME, de l'AFD, etc...
Jeudi 18 au Vendredi 19 Décembre 2014	- Préparation des bagages (matériels géophysique), emballage et mise des bagages en fret
Samedi 20 Décembre 2014	Matinée bureau Moroni - Visite de la DGME - Paiement des taxes des bagages en fret au COM'AIR à l'aéroport MORONI - Retour à Madagascar - Arrivée 21H 50

## Annexe 2 : Photos de la zone d'étude

---



**Photo 1** : Aperçu des travaux géophysiques à HELENDJE



**Photo 2** : Aperçu des travaux géophysiques à IVEMBENI



**Photo 3** : Aperçu des travaux géophysiques à CHAMLE





**Photo 4** : Aperçu des travaux géophysiques à BATSA



**Photo 5** : Aperçu des travaux géophysiques à OUSSIVO



**Photo 6** : Aperçu des travaux géophysiques à HAHAYA



Photo 7 : Aperçu des travaux géophysiques à INANE



Photo 8 : Aperçu des travaux géophysiques à MIDJENDJENI



Photo 9 : Aperçu des travaux géophysiques à MALE





**Photo 10 : Aperçu des travaux géophysiques à CHOUANI**



**Photo 11: Aperçu des travaux géophysiques à DJAHADJOU**



**Photo 12 : Aperçu des travaux géophysiques à MOHORO**



**Photo 13** : Aperçu des travaux géophysiques à OUELA



**Photo 14** : Aperçu des travaux géophysiques à CHEZANI



**Photo 15** : Aperçu des travaux géophysiques à MTSANGADJOU

## Annexe 3 : Plans de masse des points d'implantation

---

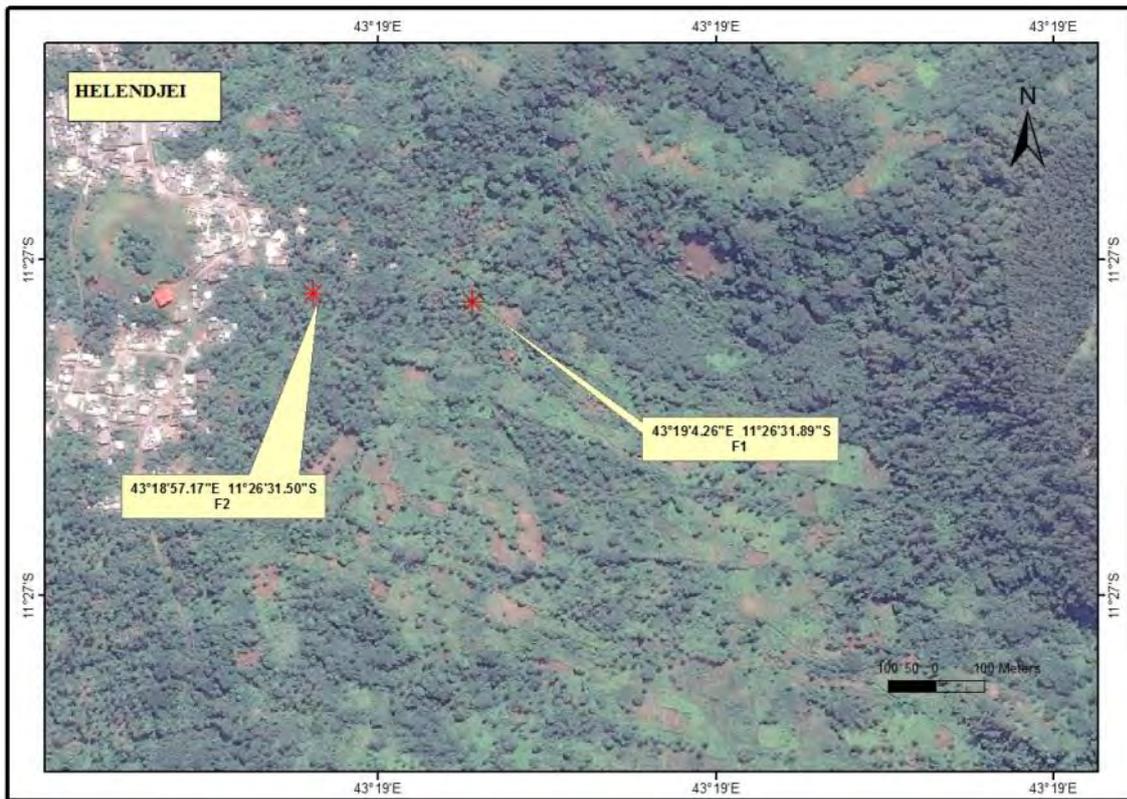


Figure 53 - Plan de masse des points proposés à HELENDJEI



Figure 54 - Plan de masse des points proposés à IVEMBENI

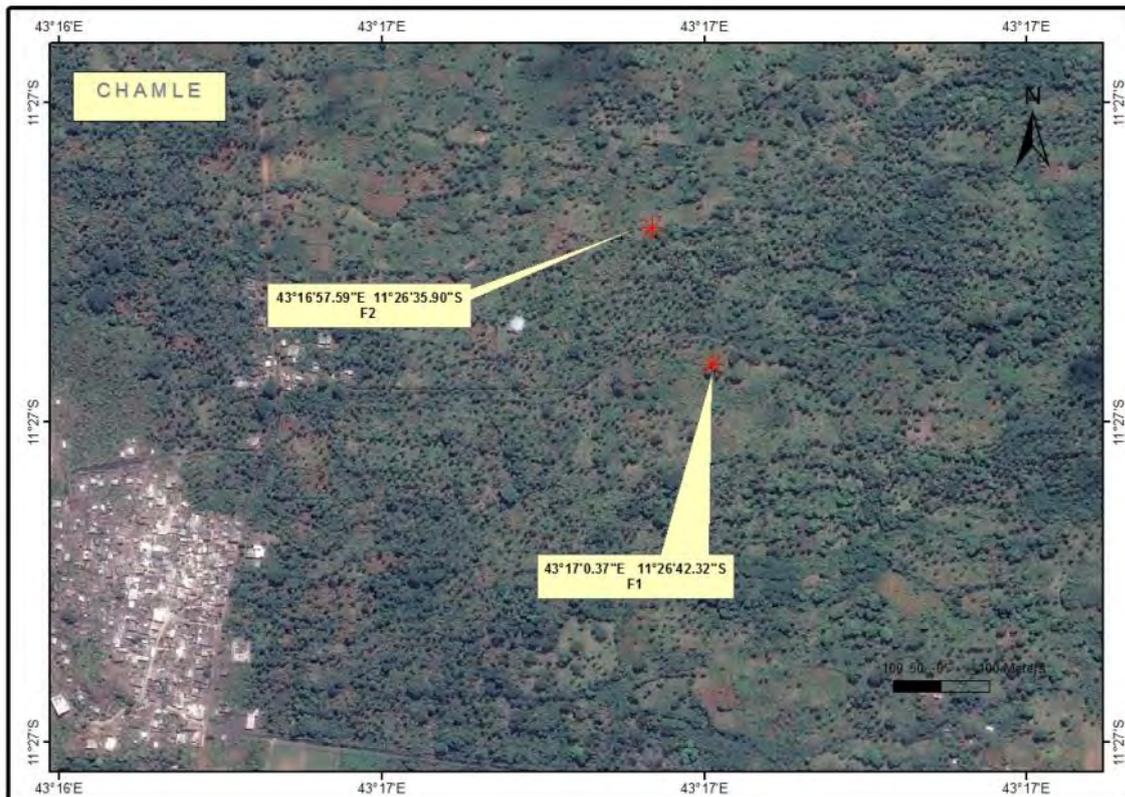


Figure 55 - Plan de masse des points proposés à CHAMLE

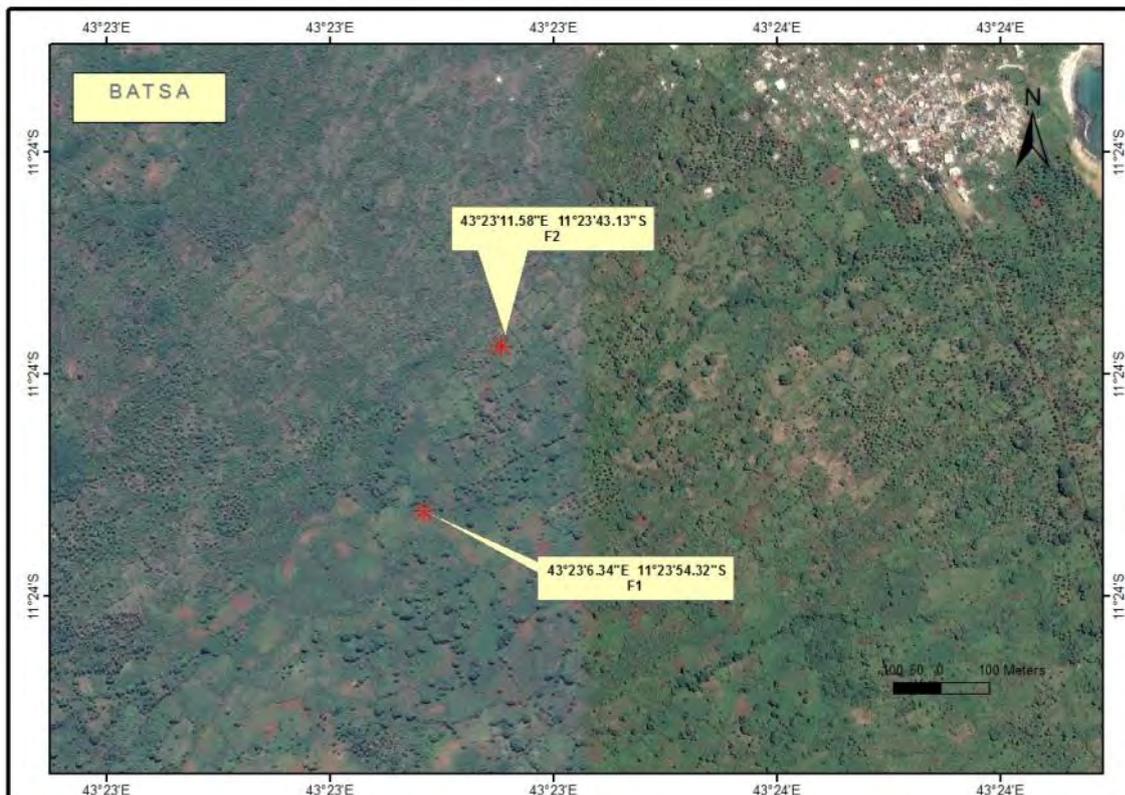


Figure 56 - Plan de masse des points proposés à BATSA



Figure 57 - Plan de masse d'un point proposé à OUSSIVO

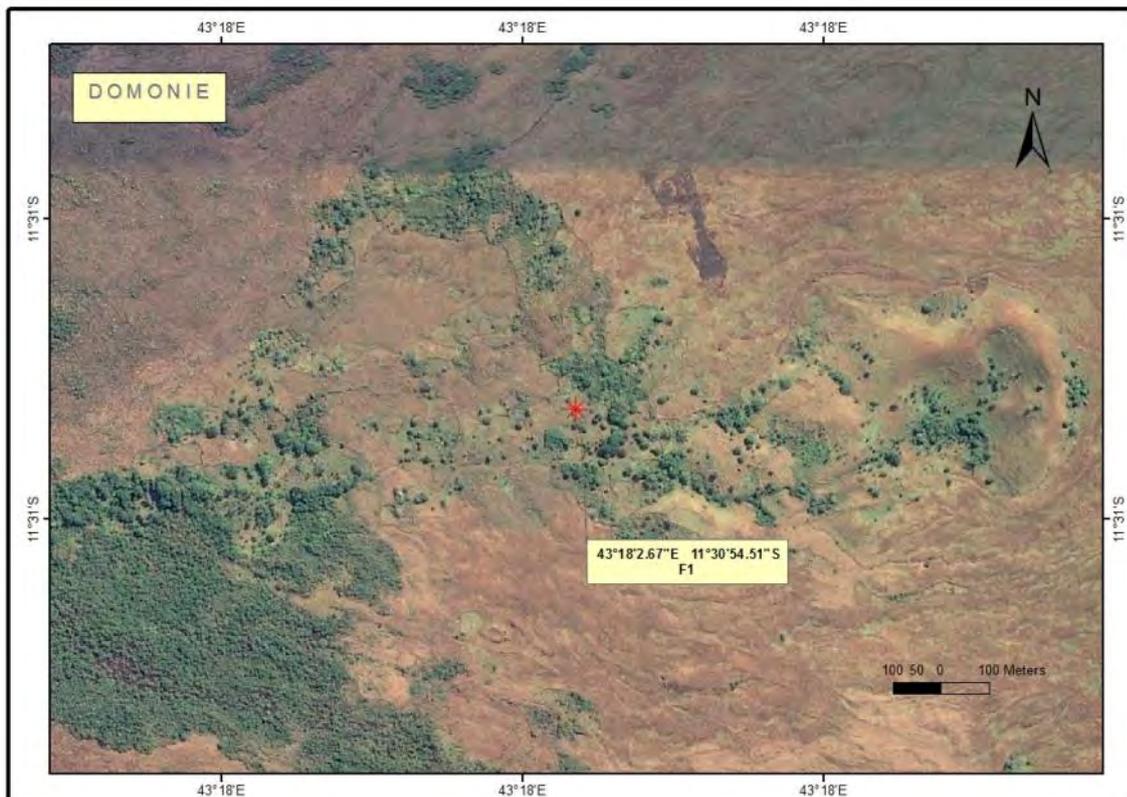


Figure 58 - Plan de masse d'un point proposé à HAHAYA

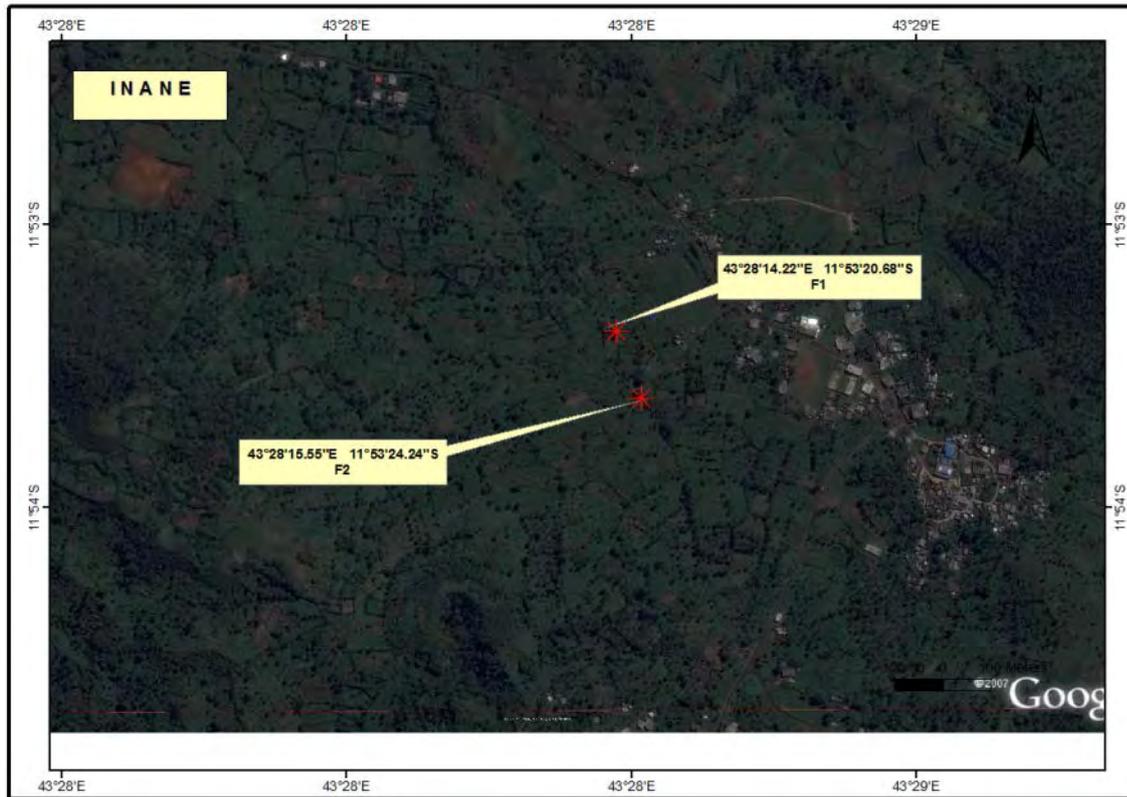


Figure 59 - Plan de masse des points proposés à INANE

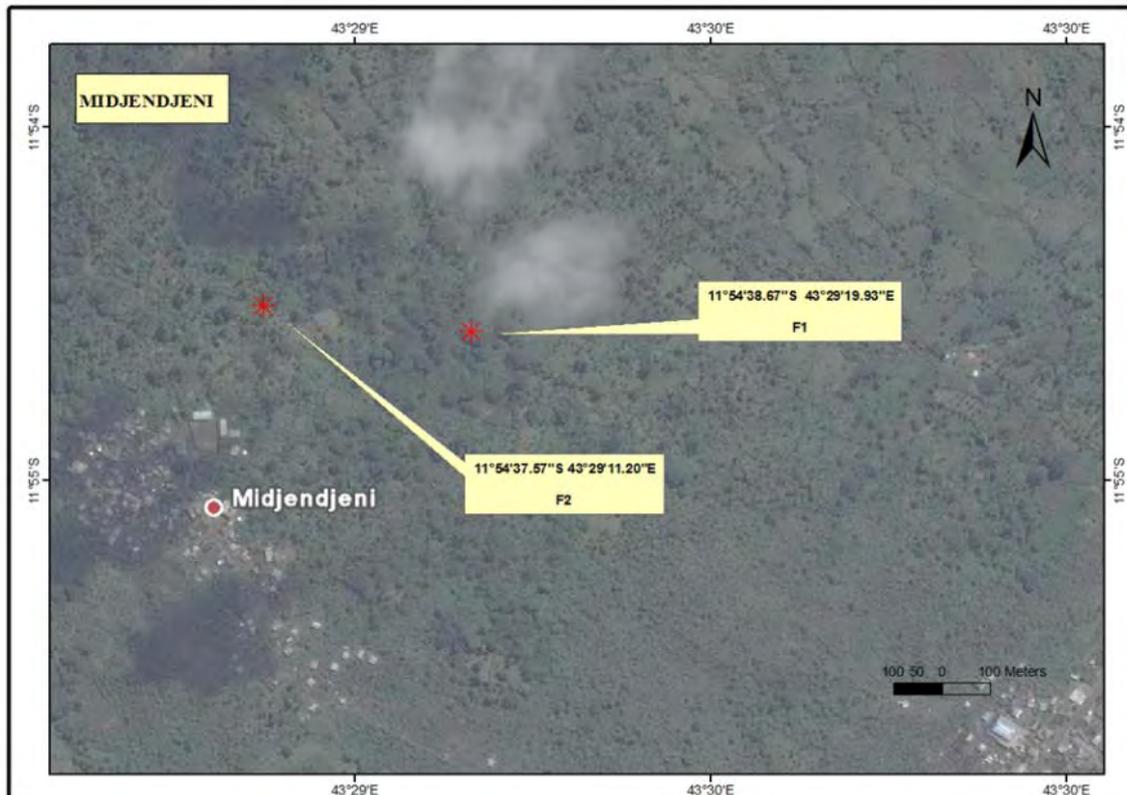


Figure 60 - Plan de masse des points proposés à MIDJENDJENI

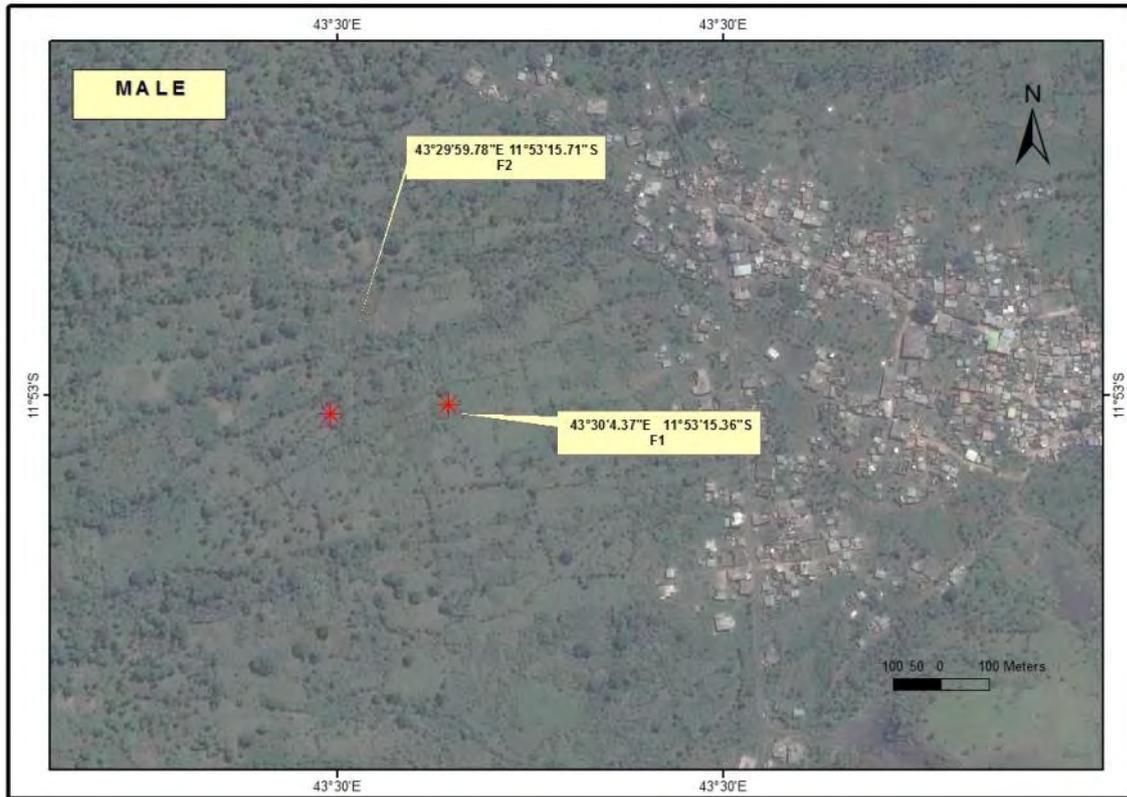


Figure 61 - Plan de masse des points proposés à MALE



Figure 62 - Plan de masse d'un point proposé à CHOUANI



Figure 63 - Plan de masse d'un point proposé à DJAHADJOU



Figure 64 - Plan de masse d'un point proposé à MOHORO

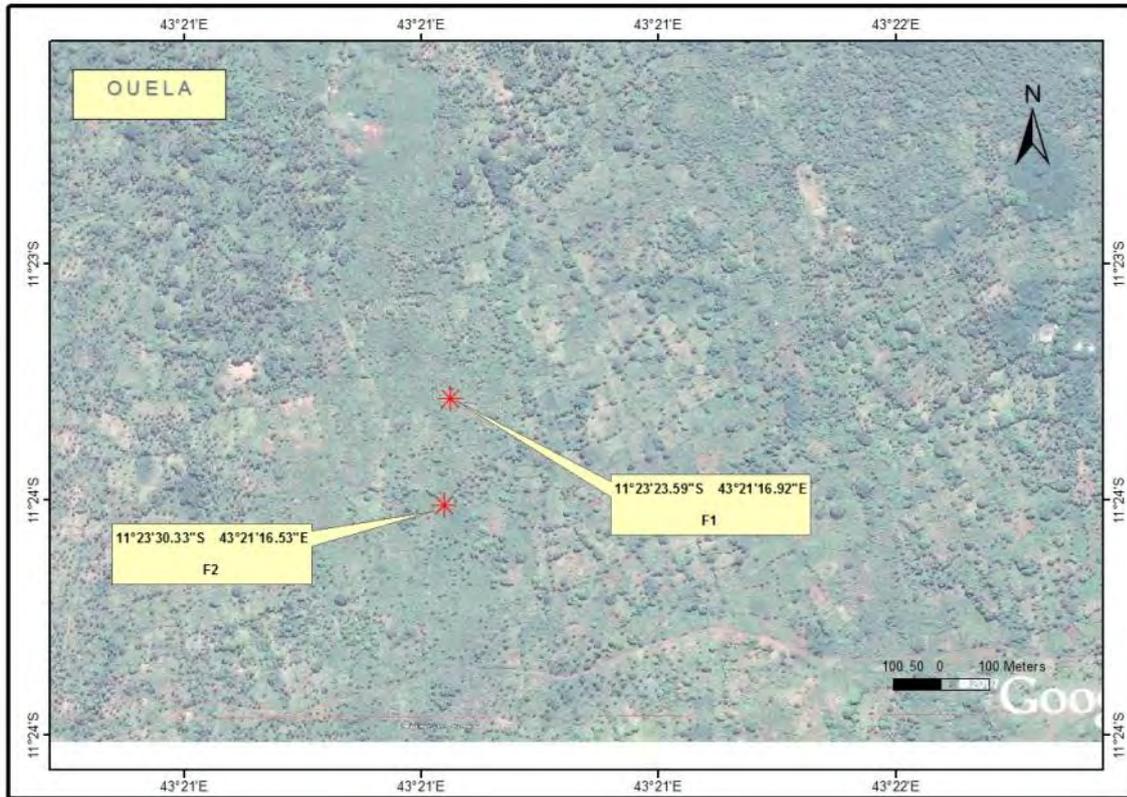


Figure 65 - Plan de masse des points proposés à OUELA



Figure 66 - Plan de masse d'un point proposé à CHEZANI

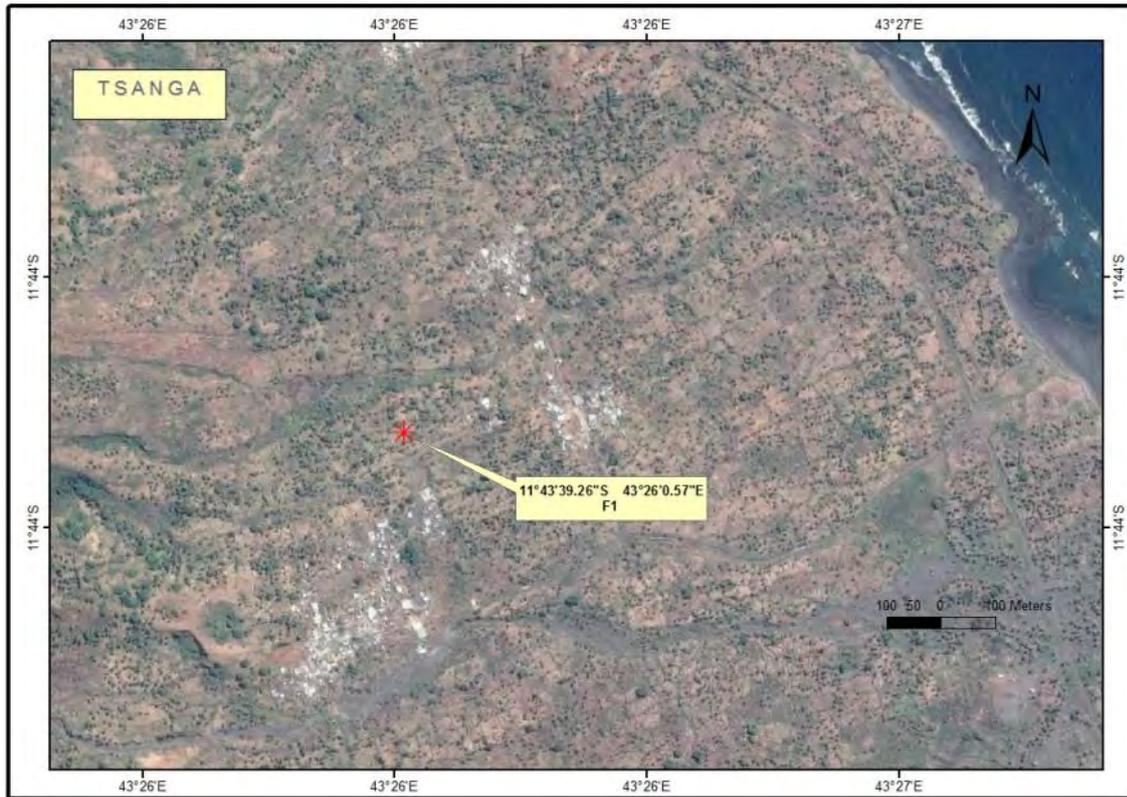


Figure 67 - Plan de masse d'un point proposé à MTSANGADJOU

## **Annexe 4 : Les méthodes géophysiques pour la recherche en hydrogéologie**

---

Les méthodes géophysiques, connues par la mesure des paramètres physiques tels que la résistivité, la susceptibilité magnétique, la densité... etc., du sous-sol présentent des intérêts pour l'étude de sa structure. L'application de ces méthodes contribue à réaliser des images virtuelles par la considération de ces paramètres en tenant compte du processus de modélisation.

L'étude hydrogéologique requiert non seulement l'utilisation de méthodes classiques (pluviométrie, piézométrie, lithologie, hydrodynamique...), mais également de méthodes d'investigation modernes faisant appel à la géophysique. Ces techniques permettent l'évaluation du volume des aquifères et des réserves d'eau. Ainsi, dans le but de mettre en évidence les zones où une présence d'eau souterraine est probable en exploitant le contraste du paramètre physique résistivité, l'étude géophysique est indispensable pour la recherche hydrogéologique, afin de déterminer l'emplacement le plus approprié des forages à implanter et obtenir le moindre coût à leur réalisation. Deux méthodes géophysiques sont les plus adaptées à l'étude hydrogéologique, à savoir les méthodes électriques et électromagnétiques, qui présentent un lien étroit entre le paramètre résistivité électrique et les aquifères.

#### 4.1 Résistivité électrique et paramètres descriptifs des roches

La résistivité électrique d'un matériau, exprimée en  $\Omega\text{m}$ , représente sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. Elle représente l'inverse de la conductivité électrique  $\sigma$ , exprimée en  $\text{S/m}$ . Pour cette raison, la circulation de courant électrique dans le sous-sol s'effectue principalement par conduction électrolytique à travers l'eau d'imbibition de ces formations (à travers la porosité matricielle des roches sédimentaires ou la porosité de fracture des roches fracturées). En présence de matériaux fins (comme les argiles), la circulation de courant peut s'effectuer par conduction surfacique, due à la présence d'une double couche électrique et d'interactions à l'interface entre les particules solides et la phase liquide. Ainsi, la résistivité électrique d'une formation ne contenant pas de minéraux conducteurs dépend majoritairement de la quantité d'eau présente, de la façon dont cette eau est distribuée à travers la formation et de sa minéralisation (**Mc Neill, 1980**). La loi d'Archie généralisée (1942) synthétise l'influence des différents paramètres du milieu sur la valeur de la résistivité de la formation  $\rho_f$  (en  $\Omega\text{m}$ ) pour des milieux sédimentaires ne contenant pas d'argile :

$$\rho_f = a \frac{\rho_w \Phi^{-m}}{S_w^n} \quad (1)$$

où  $\rho_w$  représente la résistivité électrique de l'eau d'imbibition (en  $\Omega\text{m}$ ),  $\Phi$  la porosité de la roche,  $m$  le facteur de cimentation, le coefficient de saturation, la saturation de la roche et  $n$  l'exposant de saturation (tous sans dimension). La valeur de  $m$  varie notamment avec la forme, la taille, le type de grains et de pores, l'anisotropie, la tortuosité, la compaction, et les propriétés isolantes de la cimentation (**Ransom, 1984; Salem et Chilingarian, 1999; Kirsch, 2006**). Le paramètre  $a$  est une constante traduisant l'influence des minéraux constitutifs de la matrice sur la circulation du courant (**Kirsch, 2006**). Ainsi, en zone saturée, lorsque la matrice est constituée de minéraux parfaitement isolants, alors  $a = 1$  et (**Worthington, 1993**) :

$$\rho_f = \rho_w \Phi^{-m} \quad (2)$$

De nombreux auteurs ont travaillé à l'échelle de l'échantillon pour estimer les valeurs possibles des paramètres  $a$  et  $m$  en milieu saturé pour différents contextes géologiques (**Archie, 1942; Jackson et al., 1978; Keller, 1988**). Quelques-unes de ces valeurs sont présentées dans le tableau 3. D'après

l'équation (II-1), un type de roche peut présenter différentes valeurs de résistivité, notamment en fonction de sa porosité, de la minéralisation de son eau d'imbibition et de la présence de minéraux conducteurs. L'interprétation d'une mesure de résistivité électrique en termes de géologie ou de qualité d'eau doit donc être contrainte par des informations relatives au contexte géologique du milieu étudié.

**Tableau 3 - Paramètres de la loi d'Archie pour différents types de roches, modifié Descloitres (1998)**

Formation	Porosité (%)	m	a	Référence
Sable non consolidé	12 - 40	1,3	-	Archie (1942)
Grès	12 - 35	1,8-2,0	-	
Sable à grains ronds	-	1,4	-	Jackson et al. (1978)
Sable à fragments de coquilles	-	1,85	-	
Sédimentaire modérément cimentée	18 - 35	1,72	0,62	
Sédimentaire fortement cimentée	5 - 25	1,95	0,62	
Cristalline ou métamorphique	≤ 4	1,58	1,40	

L'utilisation de la loi d'Archie (équation I) suppose également que l'on soit capable de définir la valeur de ses différents paramètres. Ainsi, pour estimer la minéralisation de l'eau d'imbibition  $\rho_w$  à partir de  $\rho_f$  en utilisant l'équation II-1, il faut fixer les valeurs des paramètres m et  $\Phi$ . Certains auteurs préfèrent à la loi d'Archie l'utilisation de modèles de fractales afin d'estimer les propriétés pétrophysiques des roches (**Zadorozhnaya, 2007**). Certains auteurs se sont intéressés plus particulièrement aux liens entre les paramètres hydrodynamiques des formations (perméabilité K et la transmissivité T) et leur résistivité électrique mais le résultat de mesure de ses paramètres dépend du contexte géologique. D'autres limitations à l'utilisation de ce paramètre « résistivité électrique » résident dans la façon dont ce paramètre est mesuré.

#### 4.2 La méthode électrique

Les méthodes électriques en courant continu ont été développées dès 1911 par **Schlumberger**. Elles mesurent la résistivité électrique du sous-sol. Leur principe consiste à injecter un courant électrique dans le sol à l'aide de deux électrodes métalliques dites de courant ou d'injection. Deux autres électrodes dites de potentiel ou de mesure sont utilisées pour mesurer la différence de potentiel produite par ce courant à une certaine distance des électrodes d'injection. Il existe alors une relation reliant la résistivité vraie  $\rho$  du sous-sol supposé homogène à  $\Delta V$  et I.

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I} \quad (3)$$

où K est un coefficient géométrique (en m) dépendant de la disposition des électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N). Différents arrangements géométriques ou « dispositifs » sont possibles pour ces électrodes, chacun présentant une certaine sensibilité à la façon dont varie la résistivité au sein du milieu étudié (**Parasnis, 1986 ; Loke, 2004**). La profondeur d'investigation du sous-sol varie selon les dispositifs utilisés. Plus l'écartement des électrodes est important, plus la mesure concerne des terrains profonds. Cette augmentation de la profondeur s'accompagne toutefois d'une baisse de résolution, qui peut être conséquente pour les terrains profonds. Le sol peut rarement être considéré comme homogène et dans ce cas la résistivité mesurée est dite apparente. La résistivité apparente  $\rho_a$  est une pondération des résistivités des diverses roches intéressées par la mesure. Elle dépend de la géométrie de la configuration. La résistivité apparente de sous-sol peut alors s'écrire :

$$\rho_a = \frac{k}{I} \Delta V \text{ avec } k = 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (4)$$

#### 4.2.1 Sondage électrique

Le sondage électrique consiste à déterminer la variation de la résistivité électrique en fonction de la profondeur des terrains prospectés en surface à l'aide d'un dispositif quadripôle. Le dispositif fondamental est composé généralement de quatre électrodes et d'un appareil qui permet d'injecter le courant électrique et de mesurer la différence de potentiel (ddp) en résultant. Les différentes mesures fournissent alors une courbe de sondage de la résistivité apparente en fonction des dimensions du dispositif. Cette courbe est ensuite inversée en considérant que les variations de résistivité électrique dans le terrain étudié ne se font qu'en une dimension (hypothèse 1D valable surtout pour les formations sédimentaires) pour obtenir la variation de résistivité en fonction de la profondeur (**Parasnis, 1986**).

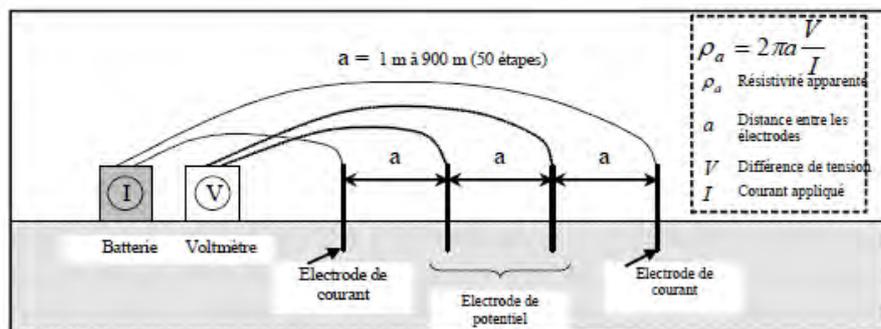


Figure 68 - Principe d'un sondage électrique avec le dispositif Wenner Alpha

Cette technique efficace, et simple à mettre en place, fournit une information en profondeur à partir d'une interprétation 1D des mesures. Elle est donc très sensible aux variations latérales de résistivité du sous-sol, qui ne sont pas prises en compte lors de l'interprétation. Elle n'est donc réservée qu'aux terrains tabulaires ne présentant pas de variations de résistivité significatives à l'horizontale dans la zone étudiée. Pour étudier les milieux à deux (ou trois) dimensions, le panneau électrique (ou le couplage de plusieurs panneaux) est plus approprié.

#### 4.2.2 Profondeur d'Investigation

En 2004, **Edmundo et Guérin**, ont développé dans leur travail le concept de la profondeur d'investigation. Le concept de la « profondeur d'investigation » (Depth Of Investigation - DOI) dans la prospection électrique fut introduit par Schlumberger, initiateur des méthodes électriques. **Evjen (1938)** l'a défini comme la profondeur dans le sous-sol à laquelle une couche de faible épaisseur exprime sa contribution maximale au signal total mesuré en surface. **Roy et Apparao (1971)** puis **Roy (1972)** ont calculé les contributions d'un milieu homogène et isotrope au signal mesuré (différence de potentiel) à partir d'une solution de la fonction de sensibilité ou dérivée de Frechet (**McGillivray and Oldenburgh, 1990**) pour plusieurs dispositifs. Les valeurs de la contribution individuelle de chaque couche de faible épaisseur à différentes profondeurs dans le sous-sol où l'ensemble constitue un milieu homogène sont intégrées et représentées par une courbe en fonction de la profondeur  $z$  appelée courbe de la **profondeur d'investigation caractéristique (PIC)**. Cette courbe est normalisée par rapport à la géométrie du type du dispositif (agencement des 4 électrodes utilisé) et donne une

courbe (NPIC) où la profondeur  $z$  sera fonction de la distance  $L$  entre les deux électrodes extrêmes du dispositif. **Edwards (1977)** puis **Barker (1989)**, ont montré que la **profondeur effective d'investigation  $ze$**  proposée par **Edwards (1977)**, semble être la manière la plus robuste d'estimer une valeur de la profondeur d'investigation. La profondeur effective  $ze$  (ou profondeur médiane) fut proposée de façon intuitive à partir des résultats obtenus par Roy et **Apparao (1971)**. Cette profondeur est celle à laquelle la portion de terrain située au-dessus de cette limite, a la même influence que la portion de terrain située au-dessous.

**Tableau 4 - Profondeur d'investigation pour les dispositifs Wenner  $\alpha$ ,  $\beta$ , et  $\gamma$  Roy et Apparao (1972) et Edwards (1977)**

Dispositifs	Profondeur d'investigation (d'après Roy, 1972)		Profondeur d'investigation effective (d'après Edwards, 1977)	
	$z/a$	$z/L$	$ze/a$	$ze/L$
<b>Wenner <math>\alpha</math></b>	0,321	0,107	0,519	0,173
<b>Wenner <math>\beta</math></b>	0,300	0,100	0,417	0,139
<b>Wenner <math>\gamma</math></b>	0,345	0,115	0,594	0,198

On peut donc déterminer la profondeur d'investigation maximale atteinte pour chaque dispositif utilisé en faisant la multiplication entre l'écartement maximum  $a$  entre deux électrodes consécutives, ou la distance maximale  $L$  entre les électrodes extrêmes, et le paramètre profondeur montré dans le tableau 4. Par exemple, dans le cas du dispositif Wenner  $\alpha$ , si l'écartement maximum entre deux électrodes consécutives est  $a_{\max} = 300\text{m}$  ( $L_{\max} = 900\text{m}$ ), la profondeur d'investigation atteinte d'après la définition de Edwards est  $ze = 0,519 \times 300 = 155,7\text{m}$ .

#### 4.2.3 Sensibilité du dispositif

Le choix du dispositif d'électrodes en prospection électrique en courant continu dépend principalement de l'objectif à atteindre. Il est souvent difficile de déterminer, a priori, quel est le meilleur dispositif électrique à utiliser lors d'une prospection. **Marescot (2004)** dans son travail montre que les propriétés d'un dispositif donné peuvent toutefois être étudiées en évaluant la sensibilité de la mesure en un point par rapport à une variation des propriétés électriques du terrain. Chaque dispositif a ses avantages et inconvénients liés à son diagramme de sensibilité. Le diagramme de sensibilité représente la contribution de chaque élément du sous-sol à la mesure. La figure 69 présente les diagrammes de sensibilité pour différentes configurations d'électrodes (**Dahlin et Zhou, 2004**). En ce qui concerne le dispositif Wenner, les contours des valeurs de la sensibilité sont quasiment horizontaux à l'aplomb du centre du dispositif. Ceci implique que le dispositif Wenner présente une bonne résolution verticale. Le dispositif Wenner présente l'avantage d'avoir une plus grande ligne MN ce qui facilite la mesure de la différence de potentiel  $\Delta V$  d'où son importance. En regardant sur les contours de la fonction de sensibilité du dispositif dipôle-dipôle axial, nous constatons par contre que ce dispositif est très sensible à l'aplomb des deux dipôles et que les contours de cette fonction sont essentiellement verticaux. Ceci implique que ce dispositif est très sensible aux changements horizontaux de la résistivité et idéal pour détecter des structures verticales. De plus, la sensibilité se concentre uniquement sous les dipôles lorsque la distance entre ceux-ci augmente.

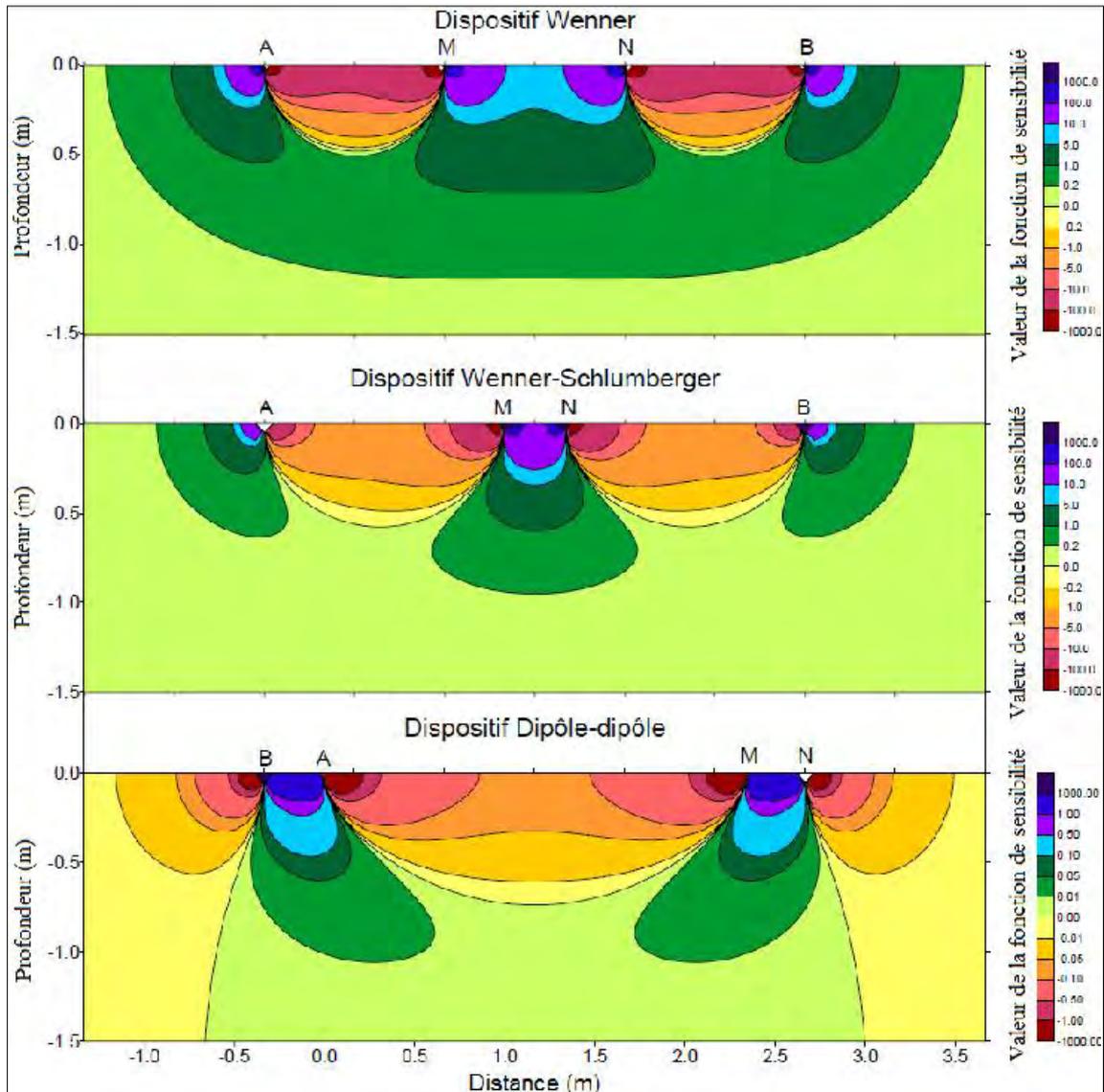


Figure 69 - Fonction de sensibilité pour un dispositif Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipôle- dipôle (Marescot L, 2000-2008)

#### 4.2.4 Interprétation des mesures

En prospection électrique, l'interprétation des données est présentée soit qualitativement ou quantitativement. L'interprétation qualitative de résultat de sondage consiste à déterminer la variation en profondeur de résistivité apparente de sous-sol, suivant la longueur de ligne AB pour mettre en évidence les variations en profondeur des valeurs de résistivité. Un autre type d'interprétation qualitative est l'analyse typologique des courbes de sondages ( $\rho_i f(AB/3)$ ) pour comprendre non seulement le changement latéral de la résistivité mais aussi pour les caractéristiques possibles de la zone à prospector (Parasnis, 1986). L'interprétation quantitative de sondage consiste à définir, à l'aide d'un procédé d'inversion, un modèle de structure du sol (résistivité en fonction de la profondeur) qui peut reproduire les données mesurées. En d'autres termes, il s'agit de convertir les résistivités apparentes obtenues avec les mesures réalisées à la surface du sol en résistivités « vraies » du sous-sol sous la forme d'un modèle mathématique de structure du sol. Cette opération est aujourd'hui effectuée de manière routinière par des logiciels spécialisés pour les sondages. Elle fournit l'épaisseur des couches et les profondeurs des structures. Le calcul d'inversion se fait évidemment sur micro-

ordinateur en utilisant le programme QWSELN, nouvelle version du logiciel de l'UMR Sisyphé de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris, France). La solution définie par ce processus d'inversion n'est pas unique : lors de l'interprétation d'un sondage électrique, plusieurs modèles de structure du sol (résistivité/épaisseur) différents peuvent reproduire aussi bien une même série de mesures. Cette indétermination est illustrée en premier lieu par la notion d'équivalence, qui est particulièrement forte dans le cas où une couche conductrice fine est située entre deux couches résistantes (**Chandra et al., 1987; Gouasmia et al., 2006**). Dans ce cas, seul le rapport  $\Delta z/\rho_i$  de cette couche (la conductance longitudinale) pourra être déterminé. De la même manière, pour une formation résistante fine située entre deux formations conductrices, seule la résistance transversale  $\Delta z, \rho$  sera définie. Il existera donc une infinité de couples  $(\Delta z_i ; \rho_i)$  permettant de caractériser ces couches. L'estimation de la résistivité des terrains profonds est également sujette à une certaine indétermination, due à un manque de résolution en profondeur. Toutes ces solutions équivalentes ne sont toutefois que des solutions mathématiques : certaines peuvent être très différentes, voire complètement aberrantes par rapport à la structure réelle du terrain étudié. La sélection du modèle « correct » parmi ces solutions nécessite donc des connaissances *a priori* sur le terrain étudié, ou l'acquisition d'informations complémentaires permettant de contraindre cette interprétation. L'indétermination peut également être illustrée par la notion de suppression, qui masque les terrains ne présentant pas un contraste de résistivité suffisant par rapport aux formations avoisinantes. De manière générale, lorsqu'on ne dispose pas d'information *a priori*, on cherche à définir le modèle résistivité/épaisseur le plus simple possible pour interpréter des mesures. Si l'on dispose d'informations provenant d'un log de forage par exemple, celles-ci doivent obligatoirement être prises en compte dans l'interprétation. Ces techniques nous permettent donc de définir les valeurs des résistivités vraies et les épaisseurs des couches interprétées, et conduisent à la réalisation de coupes géoélectriques et à la représentation de la distribution spatiale des épaisseurs possibles de l'aquifère et du toit du substratum.

#### 4.2.5 Panneau électrique

Le panneau électrique est une technique utilisée pour avoir une imagerie par tomographie électrique à 2D du sous-sol. Il correspond à la conjonction de la technique de sondage et trainée électrique. En effet, l'imagerie électrique 2D a été mis au point dans le but d'obtenir un modèle de sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement.

##### 4.2.5.1 Principe

Comme nous avons mentionné précédemment, le panneau électrique permet de réaliser une imagerie à deux dimensions. Les mesures pour cette technique nécessitent plusieurs électrodes qui sont placées le long d'un profil d'une distance constante  $a$ .

La technique consiste à faire des profils multiples en augmentant régulièrement l'espacement  $a$ . Chaque point de mesure se trouve à l'aplomb du dispositif avec une distance proportionnelle à la distance inter-électrodes  $a$ . on parle de niveaux d'acquisition  $n$ .

Si l'espacement entre l'électrode augmente, la profondeur d'investigation augmente aussi. On peut alors représenter les résistivités apparentes mesurées sous forme de pseudo-sections qui reflètent qualitativement la variation spatiale de la résistivité apparente. Plusieurs dispositifs peuvent être utilisés pour construire cette pseudo-section. Cependant, il est fonction de la structure à imagé, le bruit de fond et la sensibilité du dispositif. Dans notre cas, nous avons pris le dispositif Wenner.

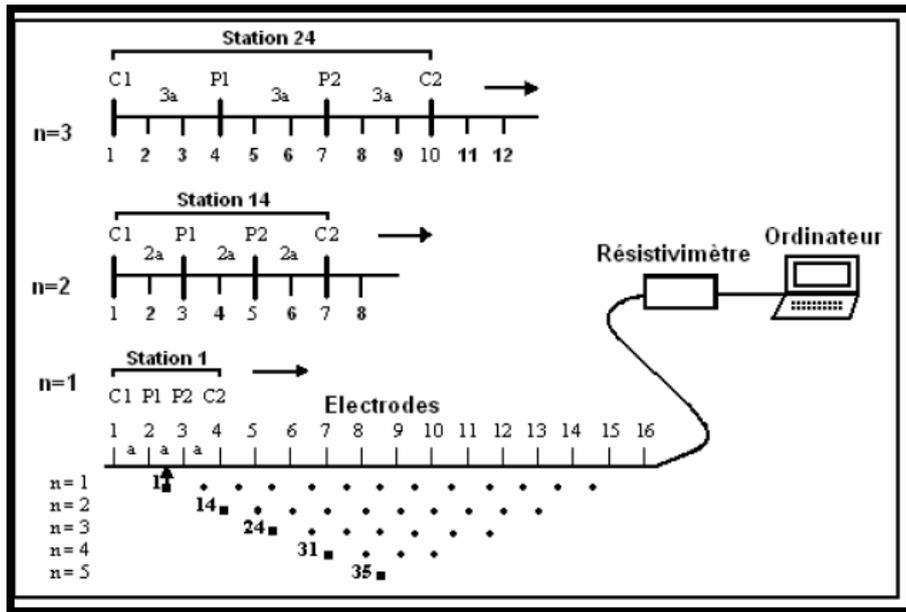


Figure 70 - Représentation du panneau électrique et niveaux d'acquisition des données (Source : Manuel de RES2DINV)

### 4.3 Le sondage électromagnétique en domaine temporel

Le TDEM (Time Domain Electromagnetism) est le terme classique utilisé dans les pays anglo-saxons pour désigner les méthodes électromagnétiques temporelles. Une des techniques en TDEM que l'on a utilisée dans notre travail est le sondage électromagnétique temporel.

#### 4.3.1 Principes généraux

La méthode TDEM utilise le plus souvent comme signal-source un courant de forme carrée (Figure 71). On peut constater qu'à chaque second quart de période, le courant est coupé brusquement durant le quart de période suivant pour être de nouveau injecté dans un sens opposé. La mesure s'effectue pendant l'arrêt de l'émission, c'est-à-dire en l'absence de champ primaire initial. On choisit d'inverser périodiquement le sens du courant d'injection de manière à contrôler le zéro relatif du signal.

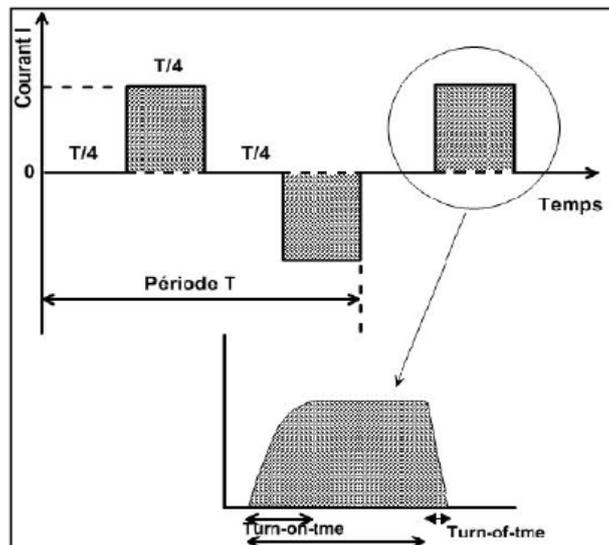


Figure 71- Forme du courant dans la boucle d'émission

Lorsqu'on injecte un tel courant dans un câble (dans la boucle émettrice), la forme idéale serait celle d'un créneau parfait : la montée et la descente devraient être instantanées. En effet la dérivée par rapport au temps de la coupure instantanée d'un signal infiniment long se traduit par un Dirac, générateur en domaine fréquentiel d'une infinité de fréquences. On définit le temps de montée du signal à sa valeur nominale par le « turn-on-time » et le temps que met le courant à s'annuler par le « turn-off-time ».

#### 4.3.2 Les dispositifs Emetteur-Récepteur

Plusieurs types de configurations de boucles émettrice-réceptrice (Figure 72) peuvent servir à la réalisation des mesures électromagnétiques telles que le dispositif à boucles coïncidentes, le dispositif central, les dispositifs avec « offset ». Les émetteurs sont généralement des grandes boucles carrées disposées horizontalement au sol. Elles pourraient être circulaires, mais cela est plus difficile à réaliser sur terrain. Dans la plupart des programmes de calcul, elles sont traitées comme si elles étaient circulaires de même surface (**Descloîtres, 1998**). Cependant si on s'écarte de la géométrie carrée, cette approximation ne sera plus correcte.

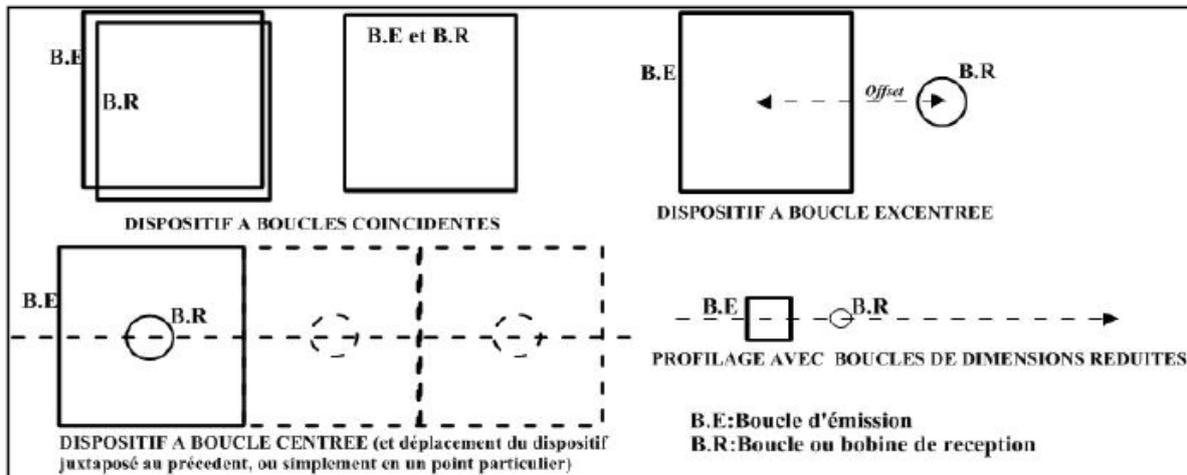
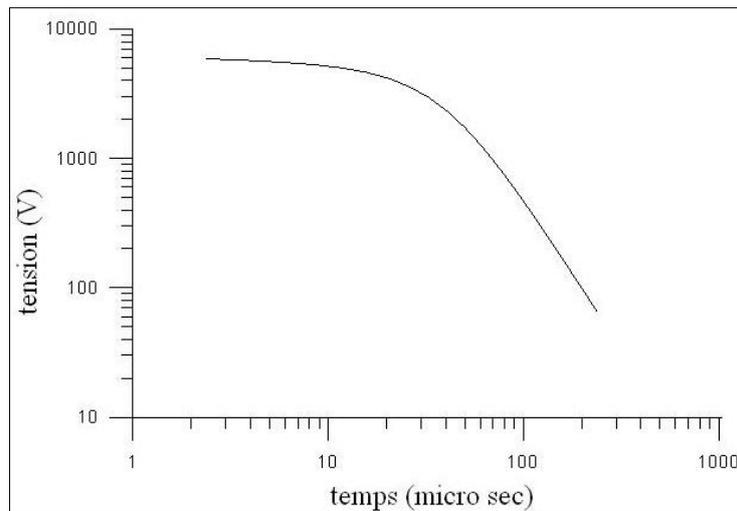


Figure 72 - Principaux dispositifs de mesure en TDEM (d'après Descloîtres en 1998, modifié)

Les récepteurs les plus courants sont soit des grandes boucles horizontales, soit des boucles de petites dimensions considérées comme des dipôles. Ces derniers présentent l'avantage de pouvoir être manipulés facilement : les mesures de plusieurs composantes du champ magnétique secondaire seront ainsi facilitées. Les dipôles électriques sont plus rarement utilisés. Dans notre cas nous nous intéressons au dispositif à boucles coïncidentes que nous avons utilisé durant la réalisation de la prospection « STDEM » dans notre zone d'étude. Ainsi nous développons dans ce qui suit la caractéristique des boucles coïncidentes. **Dispositifs à boucles coïncidentes**

Pour décrire la forme du signal mesuré, nous nous intéressons à la mesure de la dérivée du champ magnétique  $B$  par rapport au temps  $t$  par une bobine d'induction. Ce dipôle est orienté selon trois directions perpendiculaires  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . Dans notre cas, l'application de la méthode TDEM ne mesure que la composante verticale du champ secondaire. Les composantes  $X$  et  $Y$  sont nulles. La forme de la décroissance dépend de la conductivité du milieu. La figure 73 montre la forme du signal (f.e.m.) en fonction du temps pour un demi-espace homogène. Lorsque le terrain ne sera plus tabulaire, ces composantes ne seront plus nulles. **Descloîtres (1998)** a présenté dans son travail l'importance de dispositif des boucles émettrice-réceptrice coïncidentes. Les dispositifs à boucles coïncidentes où un seul câble est utilisé à la fois comme émetteur et récepteur, présentent des avantages comme celui d'avoir une grande surface de réception, ce qui amplifie le signal du champ secondaire, ou celui de

n'avoir qu'un seul câble à disposer au sol. Par contre ils présentent le désavantage d'être plus sensibles aux effets magnétiques (**Buselli, 1982**).



**Figure 73- Forme du signal (fem) en fonction du temps**

En général, l'opérateur dispose d'une grande variété de configurations possibles pour lesquelles il s'agit d'adapter au problème posé mais souvent la profondeur d'investigation est bien supérieure à la dimension de la boucle. **Descloitres (1998)** dans sa thèse sur l'application de STDEM à l'étude d'aquifères sur le volcan de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Reunion) a montré que si on utilise une boucle de 200m de côté avec un courant d'intensité de 20A, la profondeur d'investigation est de l'ordre de 600m lorsque les premiers terrains sont résistants ( $>1\ 000\Omega\text{m}$ ). On peut ainsi obtenir une profondeur d'investigation élevée et ce fait est un des principaux avantages de la méthode TDEM par rapport aux sondages électriques à courant continu.

#### 4.3.3 Principe de mesure en STDEM

Les sources de champ électromagnétique induisant des courants sont obtenues à partir d'une bobine dans laquelle le courant électrique à caractéristique connue circule (**Fitterman, 1987; Spies et Frischknecht, 1991**). Ce courant est interrompu brutalement à intervalles réguliers. Selon la loi de Faraday, des courants induits apparaissent dans le sous-sol après la coupure. Ces courants induits produisent un champ magnétique secondaire dont les variations ( $\partial B / \partial t$ ) peuvent être enregistrées grâce à une boucle réceptrice qui peut être la même boucle que la boucle émettrice (dispositif coïncident) ou qui peut être une boucle plus petite placée soit au centre de la boucle d'émission (dispositif central), soit écartée du centre (dispositif offset). Une force électromotrice (f.e.m.) est engendrée par ce champ en forme d'impulsion dans le terrain et cette force électromotrice induite dans le sous-sol, produit des courants analogues aux courants de Foucault. Ceux-ci se propagent à travers le terrain et leur amplitude décroît avec le temps, produisant en surface un champ magnétique décroissant, qui est mesuré par la bobine réceptrice. L'analyse de la décroissance de ce champ pendant le temps où le champ primaire est coupé permet d'obtenir une courbe de la résistivité apparente en fonction du temps.

$$\rho_a = \frac{\mu_0}{4t} \left( \frac{2\mu L^2 SI}{5tV} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$\rho_a$  = résistivité apparente en  $\Omega m$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ , perméabilité magnétique

$t$  = temps d'injection en secondes

$L$  = longueur du côté de la boucle d'émission en m

$S$  = surface équivalente de la bobine de réception

$I$  = courant injecté en Ampère

$V$  = tension dans la bobine réception au temps  $t$ ,

Le principe est fondé sur la mesure de la dérivée de ce champ magnétique secondaire par rapport au temps  $t$  ( $\delta B / \delta T$ ) et la mesure s'effectue pendant l'arrêt de l'émission, c'est-à-dire en l'absence du champ primaire. 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 au sondage électrique à courant continu. La profondeur d'investigation maximale est liée à la taille de la boucle émettrice ;

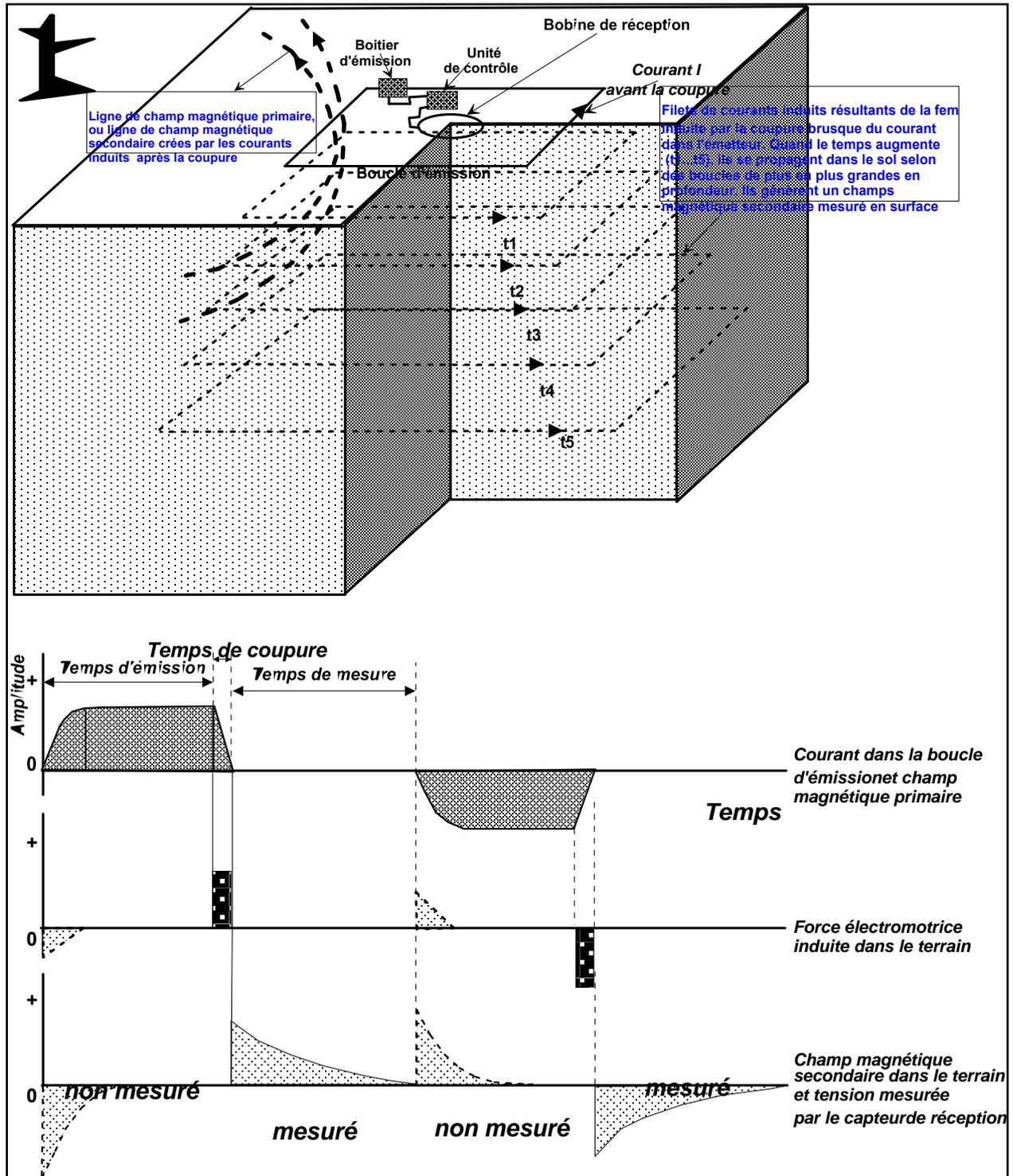


Figure 74 - Principe et diagramme temporel d'un sondage TDEM, (Descloitres M., 1998, modifié)

#### 4.3.4 Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation dans les méthodes géophysiques est définie comme la profondeur à laquelle la méthode, pour un terrain et une configuration donnée, détectera le terrain le plus profond et le caractérisera. En TDEM, cette profondeur sera limitée si le transitoire est plus faible que le bruit de fond. Cette profondeur dépend en premier lieu du temps pendant lequel le signal est enregistré dans la boucle de réception. Il ne suffit pas de mesurer le plus longtemps possible pour augmenter cette

profondeur d'investigation. La limite d'investigation d'un sondage TDEM est donc liée au temps pendant lequel ce signal mesuré est interprétable : le temps pendant lequel l'amplitude du signal est supérieure à celle du bruit. Pour caractériser cela, on utilise le rapport "signal sur bruit", ou SNR (Signal to Noise Ratio), qui exprime le rapport entre l'information utile de la mesure (Signal) et celle du bruit qui l'accompagne.  $SNR = \text{Signal}/\text{Bruit}$  La valeur de ce paramètre renseigne sur la quantité d'informations disponibles devant le bruit et permet de comparer les différents sondages réalisés sur un même site. Une valeur élevée traduit un niveau de signal fort devant le niveau de bruit et donc un signal mesurable plus longtemps. Inversement, une valeur faible traduit une quantité d'information plus faible. De manière générale, on cherchera toujours à maximiser la valeur de ce rapport.

#### 4.3.5 Effets polarisation provoquée et superparamagnétique

Des processus électrochimiques peuvent se produire au moment du passage du courant électrique dans le sous-sol dont les caractéristiques et l'intensité dépendent des propriétés physiques et chimiques des roches. C'est le phénomène de polarisation provoquée. L'effet de la polarisation provoquée traduit la faculté de certaines roches à se polariser sous l'action d'un champ électrique puis à se dépolier lorsqu'on interrompt brusquement ce champ. Les causes sont bien évidemment dues à la présence des minéraux conducteurs disséminés au sein d'une formation résistante. Comme les minéraux argileux par exemple, présentant des charges en surface, qui peuvent ralentir les progressions des ions contenus dans l'eau. En pratique, cet effet se manifeste de manière très claire par l'apparition des points négatifs en milieu ou à la fin de la courbe (**Fils et al., 1989 ; Elliot, 1991 ; El-Kaliouby et al., 1995**). Et un autre effet se manifeste aussi lors des mesures. C'est l'effet qui se produit sous l'action des corps magnétiques ou de minéraux ferromagnétiques dans le sous-sol. Sur la courbe, il se manifeste par une distorsion des courbes de « SE » en TDEM.

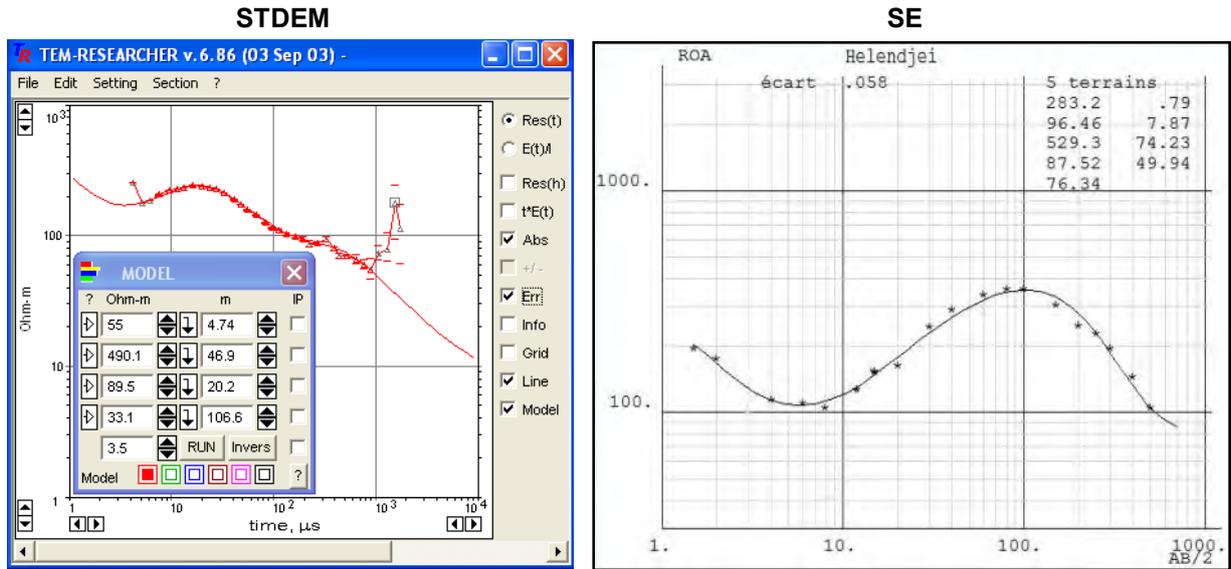
#### 4.3.6 Interprétation des mesures

L'interprétation des mesures TDEM permet d'obtenir une distribution de la résistivité électrique en fonction de la profondeur à partir d'une procédure d'inversion. Le détail des équations utilisées est traité notamment par **Nabighian et Macnae (1991)**. Les interprétations ont été traitées avec le logiciel TEMRES. Ce programme réalise le calcul des réponses TDEM pour des milieux tabulaires en utilisant les procédures de calcul décrites par **Anderson (1979)**. Les calculs directs se basent sur une approximation de dipôle équivalent proposé par **Stoyer (1990)**. L'inversion des données est réalisée par la méthode de moindres carrés en utilisant l'algorithme de calcul de « ridge regression » décrit par **Inman (1975)**. Les paramètres de résistivité et d'épaisseur du modèle de départ sont fixés par l'utilisateur. A la suite de l'inversion, des calculs d'équivalence permettent d'estimer les variations possibles des épaisseurs et des résistivités autour de la solution obtenue par l'inversion. Une des limites de cette méthode est qu'elle ne permet pas de caractériser les premiers terrains sous le dispositif d'émission/réception : en effet, les premières inductions se produisent dans le proche sous-sol alors que le courant primaire n'est pas totalement nul dans la boucle d'émission. L'interprétation des mesures ne concerne que les enregistrements réalisés après disparition complète du courant primaire : l'information des premiers terrains est ainsi perdue, Cette « épaisseur aveugle » varie avec le « temps de coupure » (Figure IV-4), qui varie selon la configuration du sondage : la taille de la bobine, l'intensité du courant injecté et l'appareil utilisé. **Spies et Frischknecht (1991)**, montre que cette méthode présente un inconvénient pour pouvoir caractériser le terrain résistant. Et elle ne pourrait pas aussi résoudre la résistivité de certaines couches superficielles ni celle des terrains profonds résistants, mais permettra de définir la résistivité du sable saturé d'eau salée et la position de l'interface eau saumâtre/eau salée avec grande précision dans le cas où elle est utilisée pour étudier

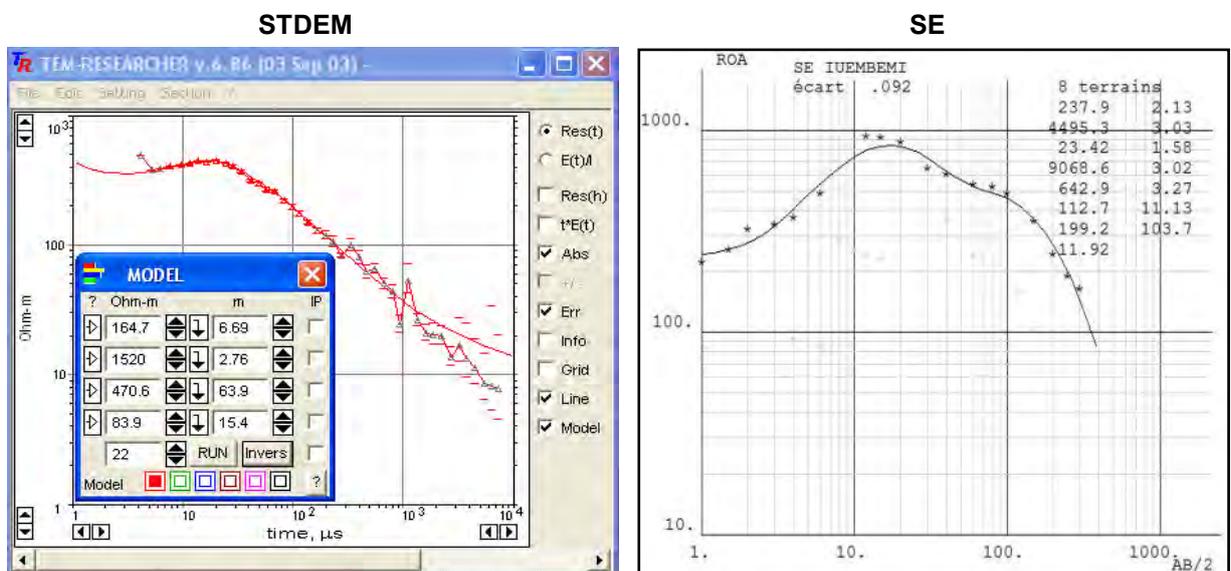
un milieu côtier (**Fitterman et Stewart, 1986**). Les méthodes électriques et électromagnétiques par mesure de la résistivité électrique de sous-sol, permettent ainsi d'obtenir des informations sur la structure géologique et parfois sur les paramètres hydrodynamiques des réservoirs ainsi que sur la conductivité de l'eau (et donc sur la qualité de l'eau). Ainsi, elles sont considérées comme des outils d'investigation profonde complémentaire en hydrogéologie, apportant de ce fait des données indispensables sur la géométrie du réservoir potentiel et sur sa nature lithologique. Ces deux méthodes présentent chacune des avantages et inconvénients. La méthode électrique en courant continu en tant que méthode d'investigation rapide de la structure géologique ou hydrogéologique, maîtrise bien la résolution latérale et verticale (profondeur d'investigation). Cette méthode est peu coûteuse et elle est mieux adaptée à la recherche peu profonde. On arrive à détecter avec une bonne précision les paramètres géoélectriques des formations peu profondes se trouvant généralement en dessous de 100m (**Boudoukha, 2008**). Au-delà de 100m, les couches de faibles épaisseurs ne sont pas décelables et nécessitent une bonne connaissance géologique du terrain. Mais comme elle nécessite toujours un contact électrique avec le sol (implantation d'électrode) des difficultés de manipulation se présentent en milieu boisé ou en milieu urbain. Les méthodes électromagnétiques présentent plusieurs avantages: elles permettent de localiser et de décrire les formations conductrices (position du toit, valeur de résistivité) avec plus de précision que les méthodes de courant continu ; elles sont peu sensibles aux variations latérales superficielles de résistivité, ce qui permet son utilisation sur des terrains présentant de telles caractéristiques ; l'absence de contact entre les bobines et le sol permet de travailler facilement sur des terrains très résistants, ou très durs en surface (sable sec, rochers), là où les méthodes électriques (pour lesquelles il est nécessaire de planter des électrodes dans le sol) sont plus limitées ; la mise en œuvre du sondage électromagnétique est plus simple et la mesure plus rapide que pour un sondage électrique équivalent. Néanmoins, elle présente également quelques inconvénients tels que la mesure sur les premiers mètres du sol est très limitée (épaisseur aveugle) et varie en fonction du temps de coupure de l'instrument utilisé (la première mesure n'a pas lieu au même moment pour tous les instruments); les terrains résistants sont moins bien contraints qu'avec les méthodes en courant continu : la méthode distingue difficilement un terrain résistant et un terrain très résistant (entre 1000 et 10 000 $\Omega$ m par exemple). Il est donc quasi impossible de décrire des formations résistantes avec cette méthode. Compte tenu de ces caractéristiques, l'utilisation simultanée de la méthode électrique en courant continu et la méthode électromagnétique temporelle produira certainement des informations complémentaires pour notre travail.

## Annexe 5 : Résultats des sondages électriques et électromagnétiques

---

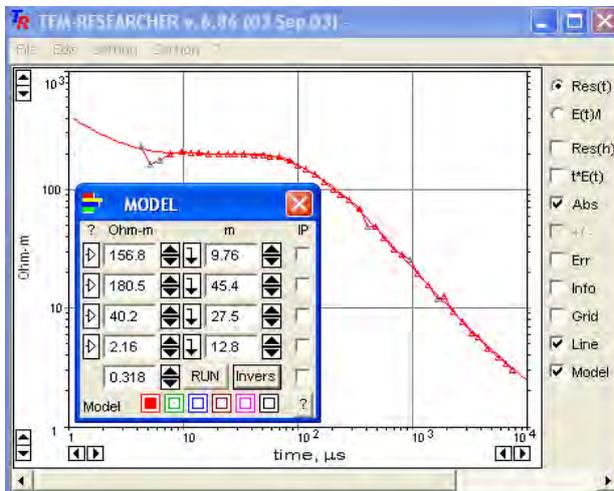
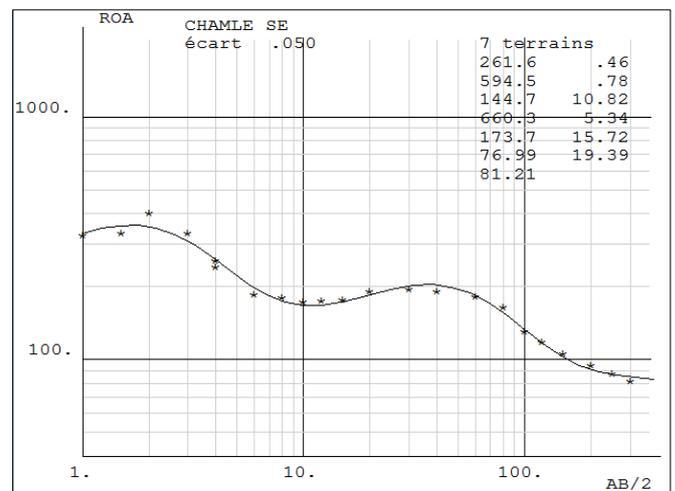
**Secteur HELENDJE**

**Modèle conjoint**

Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
277	0.8	0 – 0.8
96	8	0.8 – 8.8
619	58	8.8 – 66.8
90	20.2	87
33	-	-

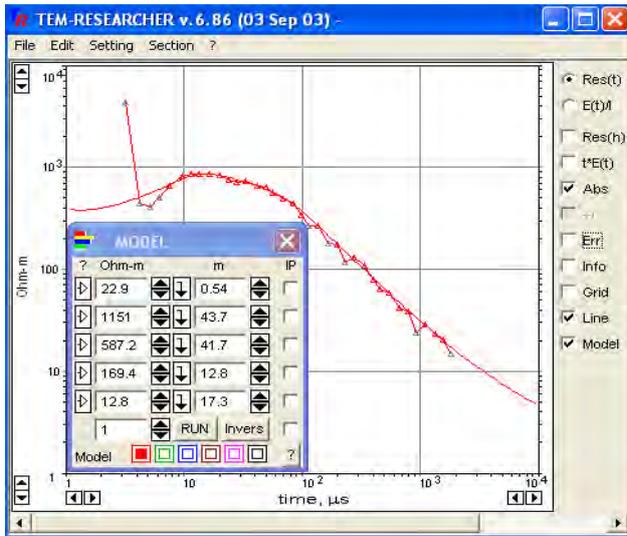
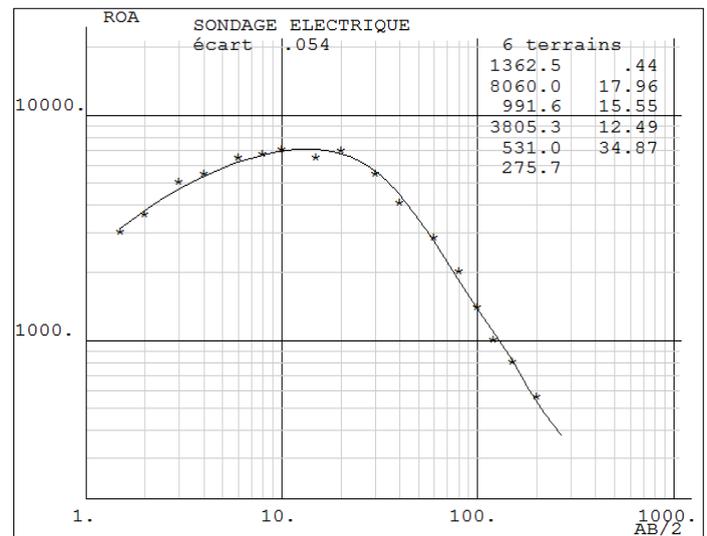
**Secteur IVEMBENI**


**Modèle conjoint**

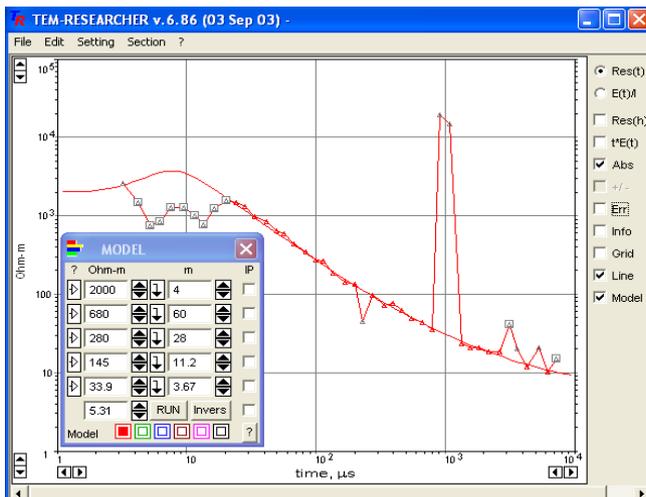
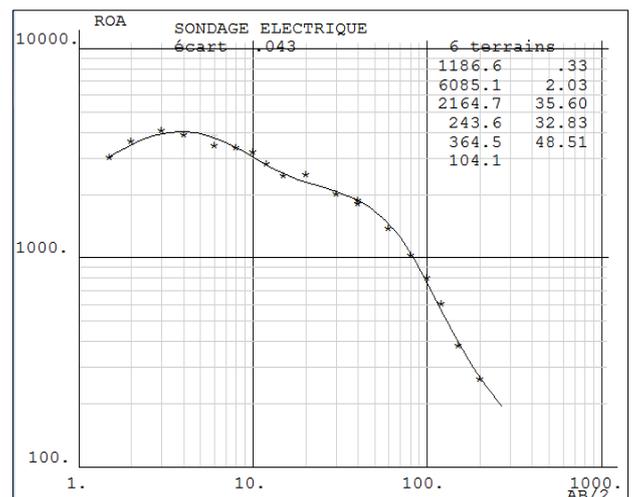
Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
206	1	0 – 1
649	1	1 – 2
246	1	2 – 3
1052	16	3 – 19
59	4	19 – 23
2415	13	23 – 36
471	64	36 – 100
84	15	100 – 115
22		

**Secteur CHAMLE**
**STDEM**

**SE**

**Modèle conjoint**

Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
262	0.5	0 - 0.5
594	1	0.5 – 1.5
145	11	1.5 – 12.5
660	5	12.5 – 17.5
157	16	17.5 – 33.5
181	45	33.5 – 78.5
40	28	78.5 - 106
2	-	

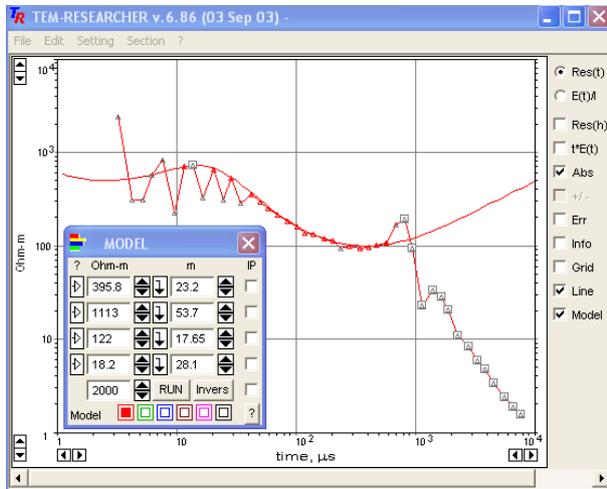
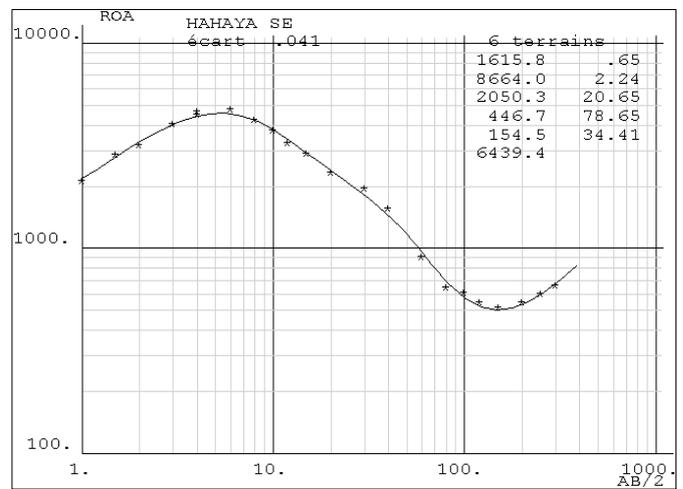
**Secteur BATSA**
**STDEM**

**SE**

**Modèle conjoint**

Résistivité ( $\Omega$ m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
1363	0.5	0 - 0.5
8060	18	0.5 - 18.5
992	16	18.5 - 34.5
3805	13	34.5 - 47.5
1151	44	47.5 - 91.5
587	42	91.5 - 133.5
169	13	133.5 - 146.5
13	Eau saumâtre	

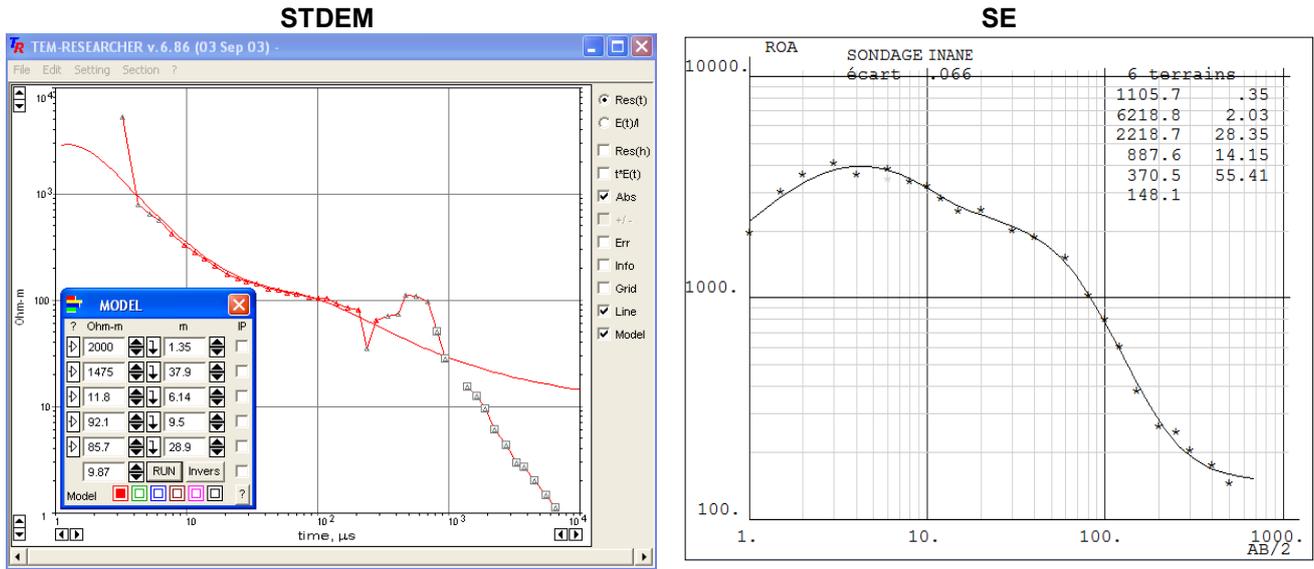
**Secteur OUSSIVO**
**STDEM**

**SE**


**Modèle conjoint**

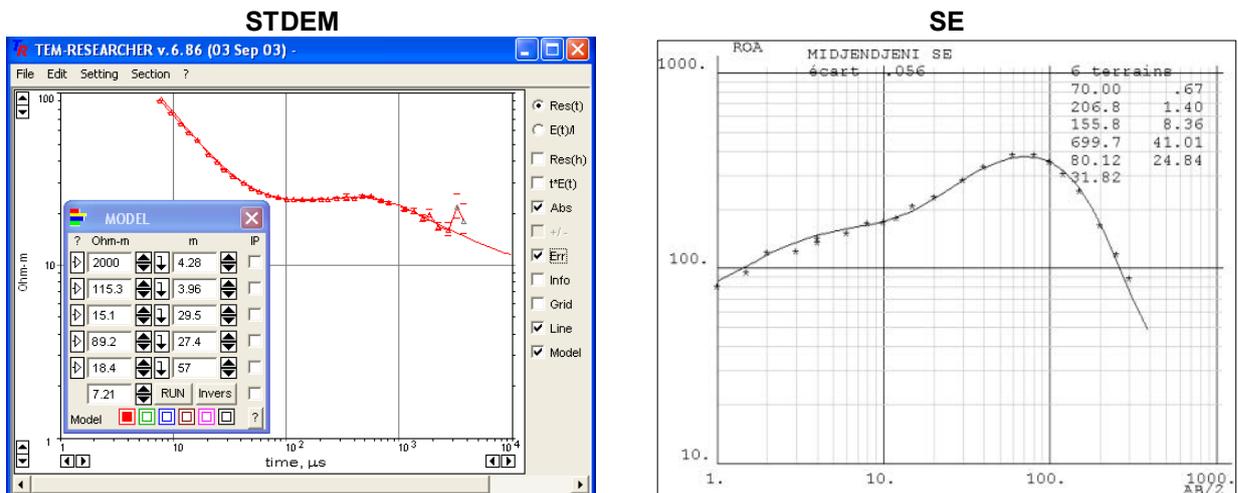
Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
1187	0.5	0 – 0.5
6085	2	0.5 – 2.5
2164	35	2.5 – 37.5
680	60	37.5 – 97.5
280	28	97.5 – 125.5
145	11	125.5 – 136.5
34	-	-

**Secteur HAHAYA**
**STDEM**

**SE**

**Modèle conjoint**

Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
1616	0.7	0 – 0.7
8664	2	0.7 – 2.7
2050	21	2.7 – 23.7
447	79	23.7 – 102.7
122	18	102.7 – 120.7
18	28	120.7 – 148.7
6439	-	-

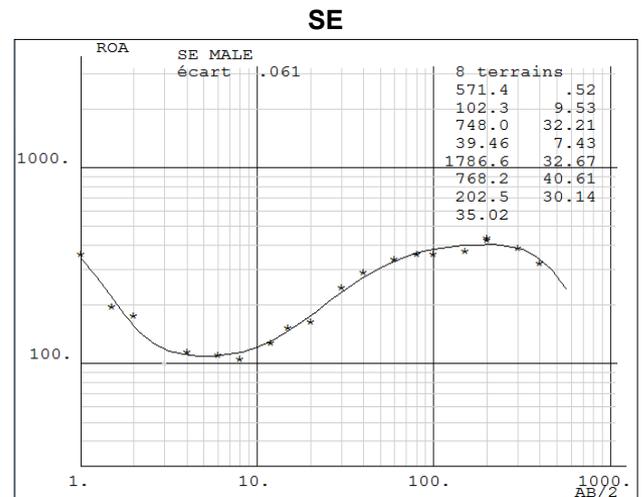
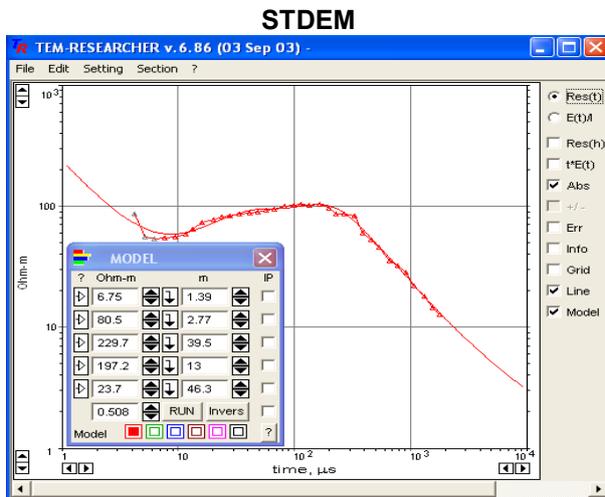
**Secteur INANE**

**Modèle conjoint**

Résistivité ( $\Omega$ m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
1106	0.5	0 – 0.5
6219	2	0.5 – 2.5
2218	28	2.5 – 30.5
888	14	30.5 – 44.5
12	6	44.5 – 50.5
92	10	50.5 – 60.5
86	29	60.5 – 99.5
9		

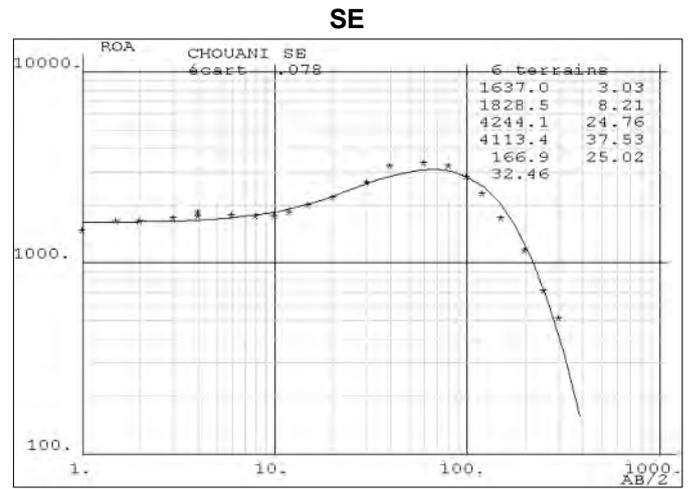
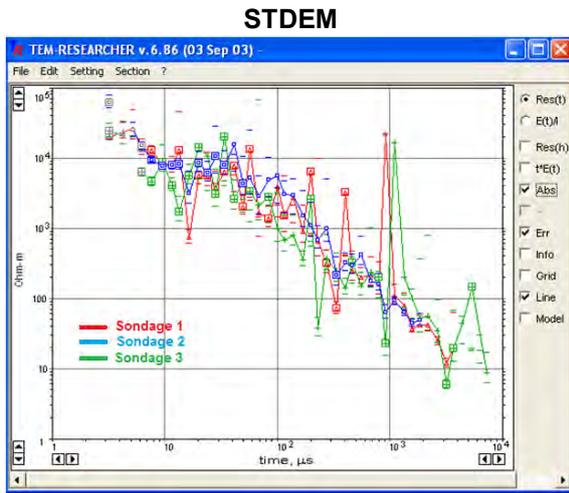
**Secteur MIDJENDJENI**


**Modèle conjoint**

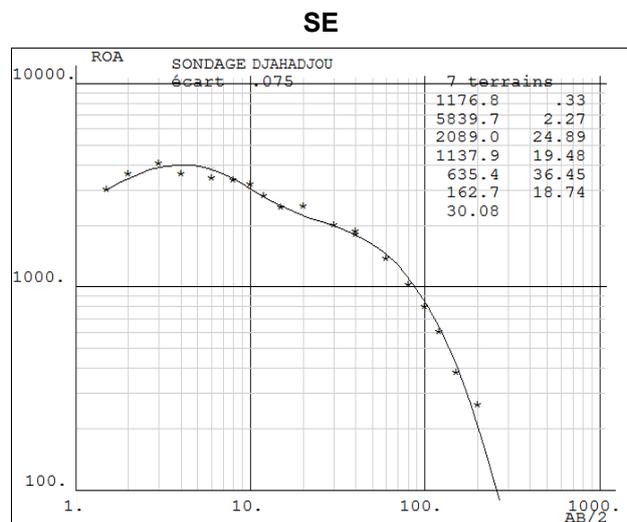
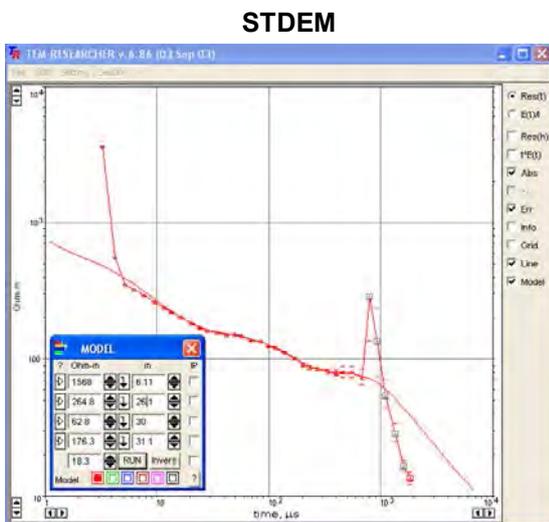
Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
70	1	0 – 1
207	1	1– 2
156	8	2 – 10
700	41	10 – 51
115	4	51– 55
15	30	55 – 85
89	27	85 – 112
18		

**Secteur MALE**

**Modèle conjoint**

Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
571	0.5	0 – 0.5
102	10	0.5 – 10.5
748	32	10.5 – 42.5
39	7	42.5 – 49.5
1787	33	49.5 – 82.5
768	41	82.5 – 123.5
230	19	123.5 – 142.5
197	13	142.5 – 155.5
24	-	-

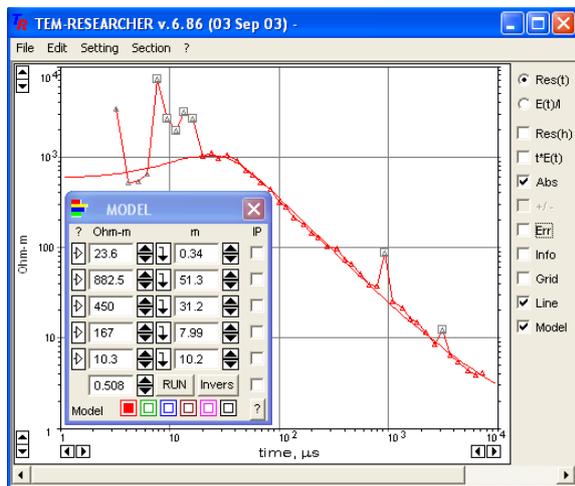
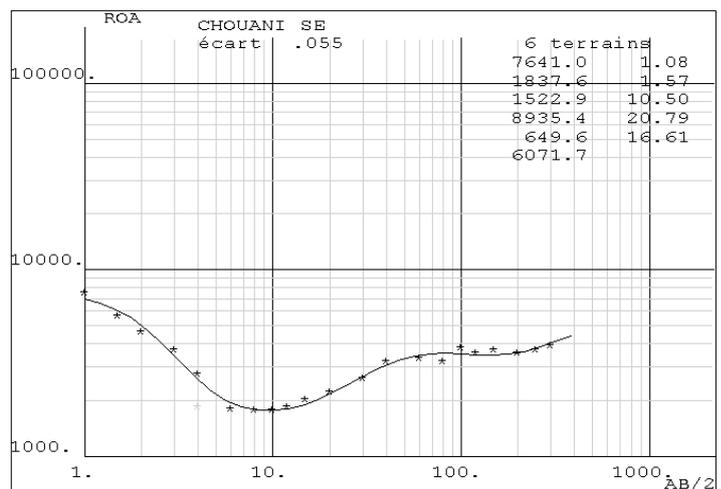
**Secteur CHOUANI**

**Modèle**

Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
1637	3	0 – 0.5
1829	8	0.5 – 10.5
4244	25	10.5 – 42.5
4113	38	42.5 – 49.5
170	25	49.5 – 82.5
32		

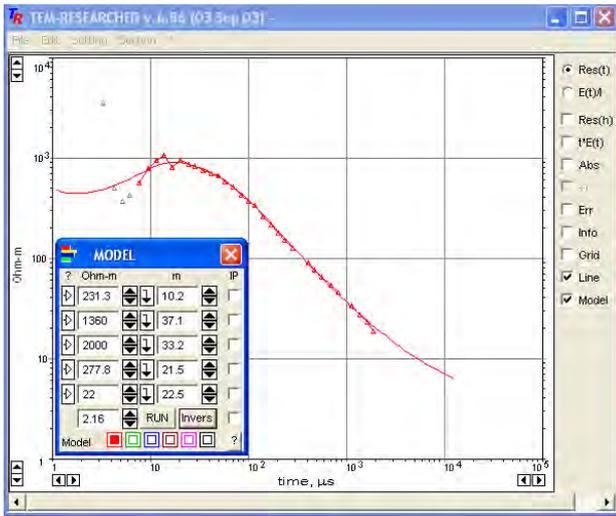
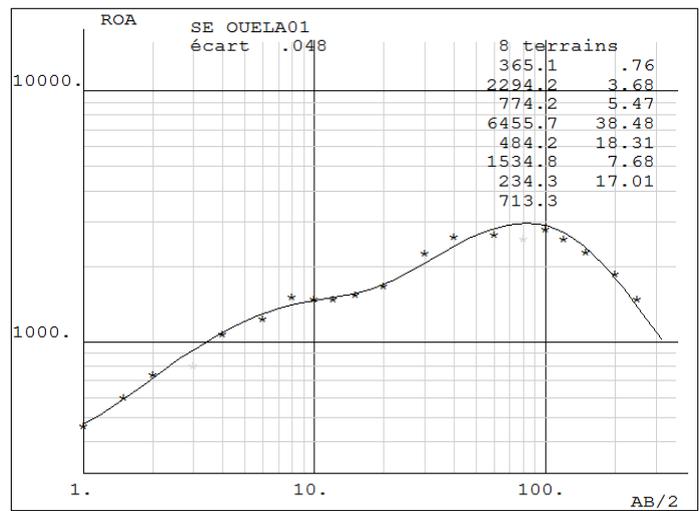
**Secteur DJAHADJOU**


**Modèle conjoint**

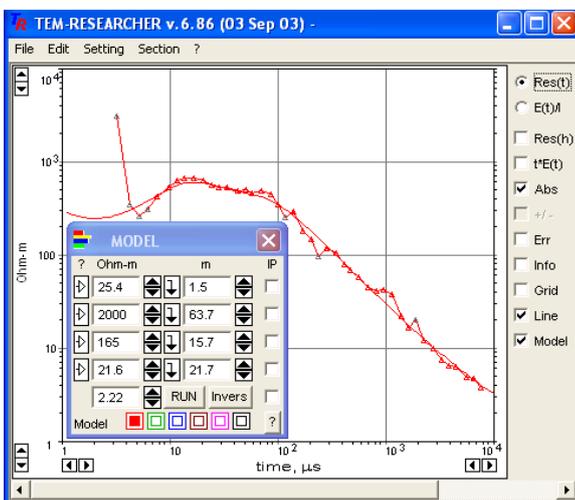
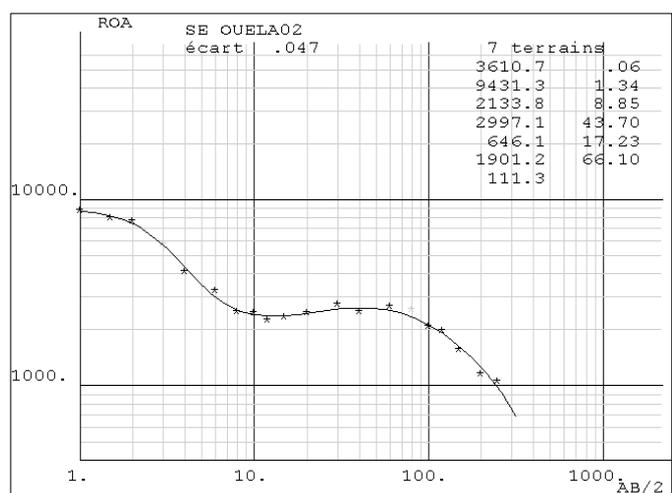
Résistivité (Ωm)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
1177	0.5	0 – 0.5
5840	2	0.5 – 2.5
2089	25	2.5 – 27.5
1138	19	27.5 – 46.5
265	26	46.5 – 73.5
63	30	73.5 – 103.5
176	31	103.5 – 134.5
18		

**Secteur MOHORO**
**STDEM**

**SE**

**Modèle conjoint**

Résistivité (Ωm)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
7641	1	0 – 1
1838	2	1 – 3
1523	11	3 – 14
8935	21	14 – 35
650	17	37 - 52
883	51	52 – 103
4500	31	103– 134
167	8	134 – 142
10		

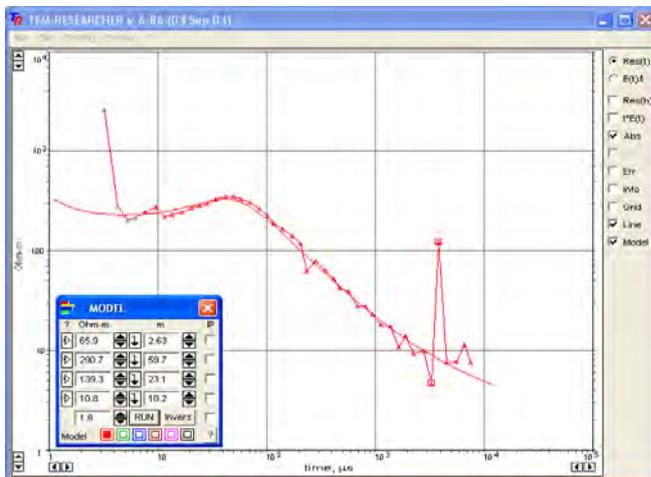
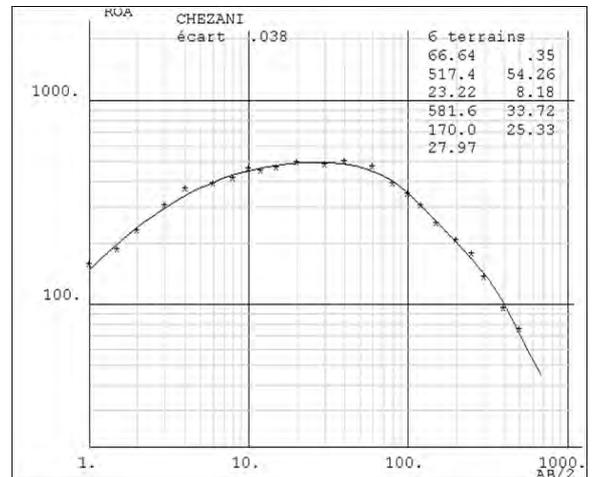
**Secteur OUELA**
**STDEM 1**

**SE 1**

**Modèle conjoint**

Résistivité (Ωm)	Épaisseur (m)	Profondeur (m)
367	1	0 - 1
2316	4	1 - 5
773	5	5 - 10
6172	38	10 - 48
475	18	48 - 66
1113	8	66 - 74
278	17	74 - 91
22	-	-

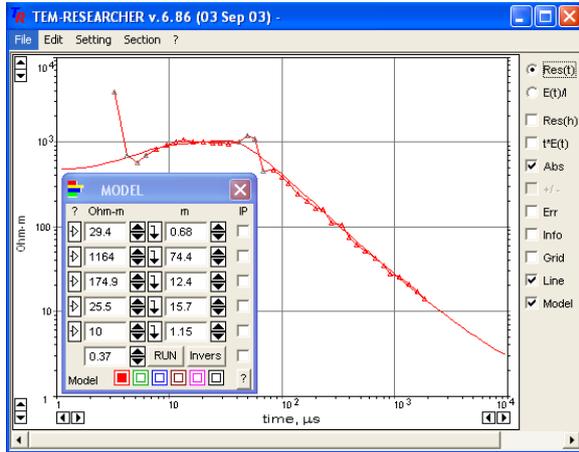
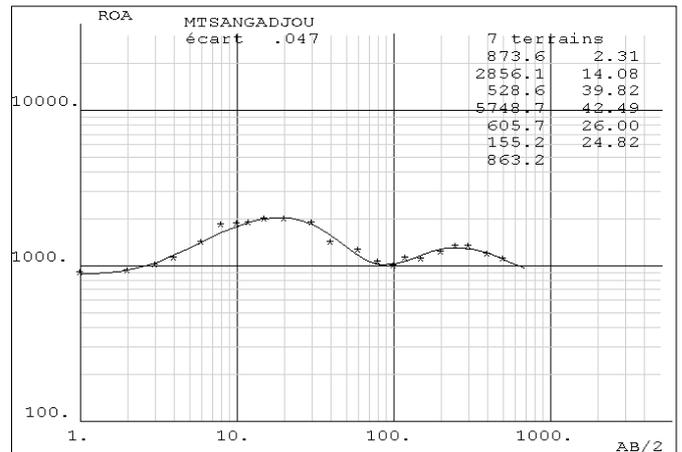
**STDEM 2**

**SE 2**


**Modèle conjoint**

Résistivité (Ωm)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
9431	1	0 – 1
2134	9	1 – 10
2997	44	10 – 54
646	17	54 – 71
1901	66	71 - 137
165	16	137 - 153
22	21	153 - 174
2		

**Secteur CHEZANI**
**STDEM**

**SE**

**Modèle conjoint**

Résistivité (Ωm)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
67	0.5	0 – 0.5
517	54	0.5 – 54.5
23	8	54.5 – 62.5
581	34	62.5 – 96.5
139	23	96.5 – 119.5
11	-	-

**Secteur MTSANGADJOU**
**STDEM**

**SE**

**Modèle conjoint**

Résistivité (Ωm)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
874	2	0 – 2
2856	14	2 – 16
529	40	16 – 56
5749	42	56 – 98
606	26	98 – 124
175	12	124 - 136
25	16	136 - 152
10	-	-