

Document public

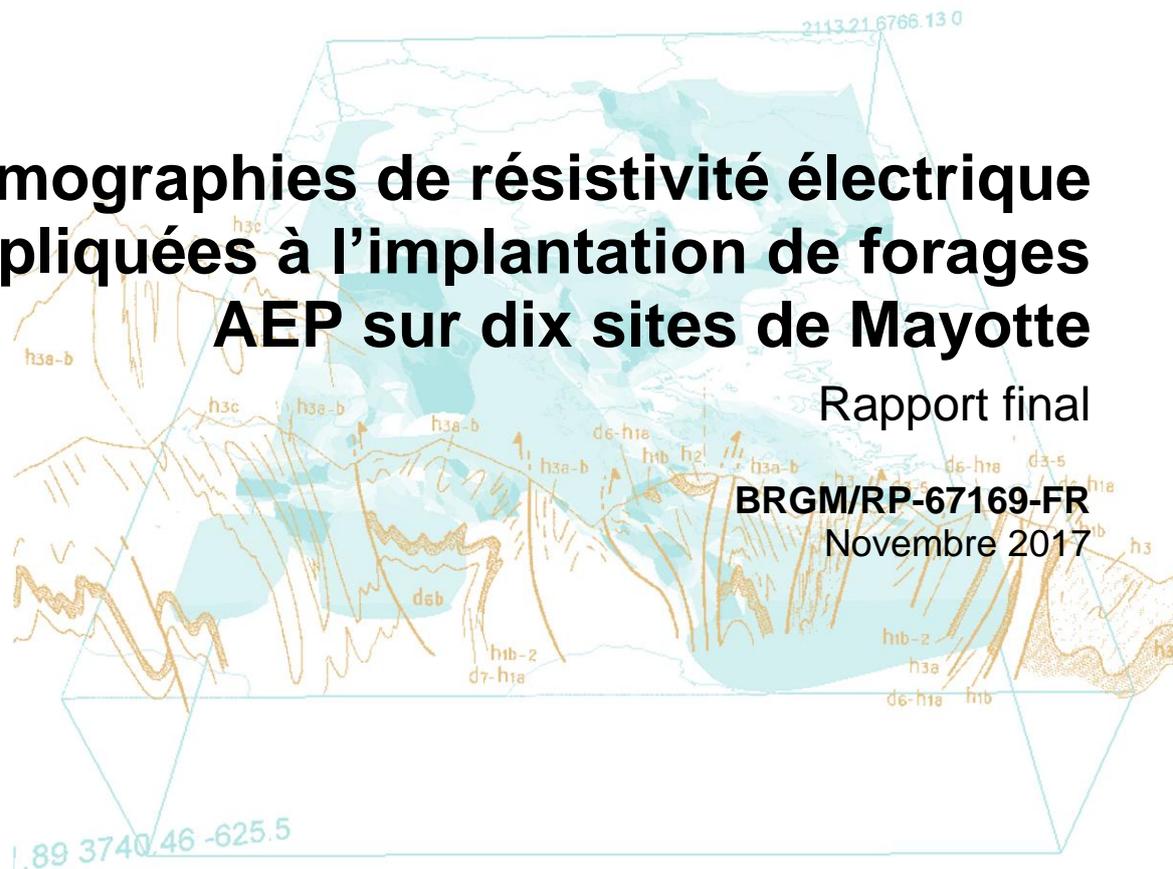


Tomographies de résistivité électrique appliquées à l'implantation de forages AEP sur dix sites de Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-67169-FR

Novembre 2017



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Tomographies de résistivité électrique appliquées à l'implantation de forages AEP sur dix sites de Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-67169-FR
Novembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2017-AP17MAY014

J-M. Baltassat , B. Maurice, P-A Reninger
avec la collaboration de G. Dectot, S. Eddam et M Parizot

Vérificateur :

Nom : DeParis J.
Fonction : Expert géophysicien
Date : 28 novembre 2017

Signature :



Approbateur :

Nom : Tronel F.
Fonction : Directeur Régional
Date : 05 décembre 2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Panneau électrique, hydrogéologie, altérite, basalte, Mayotte

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Baltassat J-M, Maurice B., Reninger P-A (2017) – Tomographies de résistivité électrique appliquée à l'implantation de forages AEP sur 10 sites à Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-67169-FR, 71 p., 32 ill., 4 tabl., 14 ann..

Synthèse

Dans un souci de performance et d'augmentation des probabilités de réussite du sixième programme de forages hydrogéologique, le Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte (SIEAM) souhaite approfondir la connaissance du sous-sol dans les zones sélectionnées lors d'études antérieures pour l'implantation des futurs forages. Pour répondre à ce besoin, le BRGM a proposé de mener une campagne de prospection hydrogéologique à partir d'outils géophysiques pour préciser l'emplacement de 10 nouveaux forages destinés à la production d'eau pour la consommation humaine.

Onze tomographies de résistivité électrique ont été réalisées sur les dix zones présélectionnées sur la base d'études antérieure du BRGM. Les tomographies ont été réalisées avec un dispositif de 96 électrodes espacées de 10 m le long d'un profil de 950 m et ont été mesurées selon les configurations dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger. Ces tomographies au sol ont été implantées puis interprétées grâce à une analyse conjointe du modèle de résistivité résultant de la couverture héliportée par électromagnétisme transitoire (AEM ou héliTEM) pour assurer la caractérisation la plus performante des zones cibles. Les données de tomographie sont de bonne qualité et se prêtent à une interprétation fiable.

Après examen des résultats des tomographies au sol complétée par la vision plus globale du modèle AEM, 1 à 3 forages d'exploration sont proposés par zone avec des profondeurs de 80 à 150 m. Ils visent prioritairement des formations électriquement résistantes définissant à leurs limites (cas d'une coulée de lave unique) des niveaux potentiellement aquifères (zone fracturée, scoriacée, ...) ou une succession de coulées avec les mêmes caractéristiques aquifères potentielles.

Certaines de ces propositions de forage visent des aquifères ayant déjà montré des potentiels aquifères intéressants lors de forages antérieurs (généralement non exploités) comme sur les zones 1 (Mbouini), 2 (Mronabeja), 3 (Brandelé), 6 (Bouyouni-Méresse). D'autres en revanche ciblent des aquifères non encore reconnus et testés par forage mais qui sont potentiellement intéressants notamment par leur extension géographique tel qu'imaginé par le modèle AEM (zone4=Coconi, zone8=Mrowalé).

L'interprétation conjointe des données héliTEM/résistivité électrique apporte principalement les compléments d'information suivants :

- Indication sur l'extension des formations de résistivité présentant un intérêt hydrogéologique, notamment en dehors de la zone d'investigation par tomographie.
- Mise en évidence de formations ayant échappé à l'investigation par tomographie électrique du fait d'une profondeur d'investigation insuffisante. En particulier, les données HéliTEM permettent de situer le substrat conducteur des cibles d'intérêt dans les zones où les tomographies sont trop peu pénétrantes.
- Précision sur la position de l'invasion salée par rapport à la zone d'intérêt.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. TENEUR DES TRAVAUX GEOPHYSIQUES PROPOSES	9
1.2.1. Révision des données existantes	11
1.2.2. Acquisitions de nouveaux profils de tomographie de résistivité électrique	11
2. Mesures et moyens mis en oeuvres	13
2.1. TRAVAUX REALISES	13
2.1.1. Méthodologie d'implantation des tomographies électriques :	13
2.1.2. Personnel	16
2.1.3. Calendrier	16
2.1.4. Equipement	17
2.1.5. Conditions d'exécution	17
2.2. MISE EN OEUVRE	17
2.2.1. Mise en place des électrodes sur les panneaux électriques	17
2.2.2. Configuration d'acquisition des panneaux électriques	18
2.2.3. Paramètres d'acquisition	18
2.2.4. Positionnement des mesures	18
2.3. ANALYSE QUALITE	19
2.3.1. Filtrage des données	19
2.4. INVERSION/MODELISATION	20
2.5. INTERPRETATION	21
2.5.1. Interprétation géologique	21
2.5.2. Utilisation conjointe des données HéliTEM	22
2.5.3. Implantation des forages hydrogéologiques	23
3. Résultats	25
3.1. MBOUINI : ZONE 1	25
3.2. MRONABEJA : ZONE 2	29
3.3. BANDRELE : ZONE 3	33
3.4. COCONI : ZONE 4	38
3.5. MIRERENI : ZONE 5	43
3.6. BOUYOUNI MERESSE : ZONE 6	47

3.7. MITSANI : ZONE 7	53
3.8. MROWALE : ZONE 8	55
3.9. COMBANI : ZONE 9	59
3.10. ANKETABE : ZONE 10	63
4. Synthèse des résultats : proposition d'implantation de forages.....	67
5. Conclusion	69
6. Bibliographie.....	71

Liste des illustrations

Illustration 1 - Aquifère type des environnements volcaniques de Mayotte montrant l'occurrence des principales venues d'eau (mesures micromoulinet) provenant de niveaux fissurés et scoriacés situés aux limites de coulées de laves massives.a : M'tsangamouji, b : Tsaranano (d'après Lachassagne et al. 2014).	14
Illustration 2 - Implantation des zones d'étude sur fond de la carte IGN au 1/25000 (les traits violets indiquent les profils ERT existants).....	15
Illustration 3 - Succession typique des unités de résistivité R1-C2-R3 observés à Mayotte pour le profil d'altération d'une formation volcanique (coulée de lave typiquement) sur des formations anciennes très altérées se manifestant par un conducteur (C1). Coupe d'altération par Audru et al. 2010 modifiée par Nelhig et al. 2013.....	22
Illustration 4 - Localisation des investigations et des forages recommandés (Fz1-2, Fz1-2, Fz2-1, Fz2-2) en résultat de la présente étude sur le site de Mbouini et Mronabeja. ..	26
Illustration 5 - Synthèse des investigations sur le site de Mbouini. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	27
Illustration 6 - Profils HéliTEM recoupant le site de Mbouini	28
Illustration 7 - Synthèse des investigations sur le site de Mronabeja. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	30
Illustration 8 - Profils HéliTEM recoupant le site de Mronabeja.	31
Illustration 9 - Forages existant sur le site de Mronabeja.....	33
Illustration 10 - Carte d'implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz3-1, Fz3-2, Fz3-3) sur la zone de Bandrelé.....	35
Illustration 11 - Synthèse des investigations réalisées sur la zone de Bandrelé. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	36
Illustration 12 - Profils HéliTEM recoupant les tomographies P3 et P3 bis.	37

Illustration 13 - Plan d'implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz4-1, Fz4-2) sur la zone 4. La zone bleutée cerne l'extension de la cible R1, R2 des forages.	39
Illustration 14 - Synthèse des observations sur la zone 4 (Investigations ERT de 2017). Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	40
Illustration 15 - Synthèse des observations sur la zone 4 (rapport BRGM/RP RP-66923-FR). Investigations ERT de 2012 et 2016. Les propositions de forage de 2016 pour le projet de développement agricole sont figurées par des rigs rouges.	41
Illustration 16 - Profils HéliTEM recoupant le profil P4.	42
Illustration 17 - Carte d'implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz5-1, Fz5-2) sur la zone de Mirerini.	44
Illustration 18 - ERT P5 réalisé Synthèse des investigations sur la zone de Mirerini. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	45
Illustration 19 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P5.	46
Illustration 20 - Implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz6-1, Fz6-2, Fz6-3, Fz6-4) sur les zones 6 et 7.	49
Illustration 21 - Synthèse des observations sur la zone 6. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	51
Illustration 22 - Profils héliTEM recoupant la zone 6.	52
Illustration 23 - Synthèse des observations sur le site 7. En haut coupe HéliTEM P23H, en bas coupe ERT P7. P23H est subparallèle à P7. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	54
Illustration 24 - Carte de localisation des investigations et du forage recommandé en résultat de la présente étude (Fz8-1) sur la zone de Mrowale.	56
Illustration 25 - Synthèse des observations sur la zone de Mrowale. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	57
Illustration 26 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P8.	58
Illustration 27 - Carte de localisation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz9-1) sur la zone de Dembéni.	60
Illustration 28 - Synthèse des observations sur la zone de Dembéni. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	61
Illustration 29 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P9.	62
Illustration 30 - carte de localisation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz10-1, Fz10-2) sur la zone d'Anketabe.	64
Illustration 31 - Synthèse des observations sur la zone d'Anketabe. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.	65
Illustration 32 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P8.	66

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Caractéristiques des 10 sites présélectionnés par les travaux du rapport BRGM/RP-63837-FR.</i>	10
<i>Tableau 2 : Caractéristiques géographiques des 10 zones étudiées par tomographie électrique dans le cadre de la présente étude.</i>	11
Tableau 3 – Résumé des paramètres qualité des tomographies électriques (DD= dipôle-dipôle ; WS= Wenner-Schlumberger).....	20
Tableau 4 : Propositions d'implantation de forages.	67

Liste des Annexes

NB : Compte tenu de leur nombre important et pour faciliter leur lecture, les annexes de ce rapport sont reportées dans un second volume.

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Aujourd'hui, la production d'eau destinée à la consommation humaine à Mayotte est assurée par l'exploitation de trois ressources distinctes :

- Les eaux superficielles pour 78% ;
- Les eaux souterraines pour 20% ;
- La désalinisation de l'eau de mer pour 2%.

A juin 2017, 21 forages exploitent les eaux souterraines et prélèvent un volume annuel d'environ 1.6 million de m³.

En 2012, sur la base des hypothèses de projection prises sur la croissance démographique, l'évolution de l'équipement des ménages mahorais et des performances du réseau d'adduction d'eau, le Schéma Directeur d'Alimentation en Eau du SIEAM prévoyait une augmentation de la demande en eau de l'ordre de 90% jusqu'en 2032 et un taux de croissance annuel de 3,3% en moyenne.

En 2014, la Société Mahoraise des Eaux, unique exploitant par délégation de service publique du SIEAM, a observé une croissance réelle de la demande en eau de 4,5 %. En 2015, cette augmentation a atteint les 8.5%. Au dernier trimestre 2016, c'est une augmentation annuelle de la consommation de 9.7% qui est enregistrée.

Face à ce constat, le SIEAM se voit dans l'obligation de modifier son programme de sollicitation de la ressource en eau en (i) accélérant le calendrier de réalisation d'ouvrage et (ii) en révisant à la hausse le nombre de ces derniers.

Pour cela, le SIEAM envisage de doubler le nombre de forages initialement prévus pour la 6^{ème} campagne de forage avec un total de 10 ouvrages.

Cette 6^{ème} campagne fait l'objet d'une convention de recherche et développement partagée entre le BRGM et le SIEAM signée en 2013. Cette convention prévoit entre autre, d'accompagner le SIEAM dans la réalisation de 5 forages destinés à renforcer la production d'eau potable. Dans un souci de performance et d'augmentation des probabilités de réussite de cette campagne, le SIEAM souhaite approfondir la connaissance du sous-sol dans les zones projetées pour l'implantation des futurs forages. Un accroissement des connaissances permettra également d'affiner le positionnement des futurs ouvrages en réduisant, dans la mesure du possible, les distances de ces derniers aux réseaux existant et en limitant les linéaires d'accès à créer.

Pour cela le BRGM a proposé de mener une campagne de prospection hydrogéologique à partir d'outils géophysiques pour préciser l'emplacement de 10 nouveaux forages destinés à la production d'eau pour la consommation humaine.

1.2. TENEUR DES TRAVAUX GEOPHYSIQUES PROPOSES

En 2011, dans le cadre de la mise à jour de la carte géologique, Mayotte a fait l'objet d'un levé géophysique hélicopté par électromagnétisme en domaine transitoire (AéroElectroMagnétique AEM, également dénommé HéliTEM dans ce rapport). Le modèle AEM permet une imagerie de l'environnement géologique et hydrogéologique global de l'île et à l'échelle des bassins versants.

Il est utilisé pour cibler les aquifères potentiels, définir leur structure générale et implanter au mieux les investigations complémentaires à réaliser. En 2014, un premier travail de synthèse (BRGM/RP-63837-FR) avait conduit à sélectionner 10 sites favorables (cf. *Tableau 1*) sur la base des études hydrogéologiques détaillées concernant les secteurs N-O (BRGM/RP-59550-FR) et Centre et Sud (BRGM/RP-61757-FR) et incluant l'analyse du modèle AEM et des contrôles au sol par tomographie de résistivité électrique (« Electrical Resistivity Tomography » en anglais, ERT). Le présent travail vise à affiner et compléter les propositions de 2014. Notons que le modèle AEM utilisé dans la présente étude est celui obtenu en 2010 suite au levé. Un modèle plus contrasté et résolu pourrait être calculé aujourd'hui, mais ce travail conséquent ne rentrerait pas dans le cadre de ce projet.

L'étude se décompose en 3 étapes :

- 1) Révision du contexte à partir du rapport BRGM/RP-63837-FR, du modèle de résistivité de Mayotte (modèle AEM) et des données de tomographie de résistivité électrique (« Electrical Resistivity Tomography » en anglais, ERT) existantes. Proposition d'investigations complémentaires par ERT
- 2) Acquisition de nouveaux profils de tomographie électrique sur chacun des sites définis dans le rapport BRGM/RP-63837-FR.
- 3) Interprétation des profils tomographiques dans leur environnement hydrogéologique en prenant en compte les informations du modèle AEM.

Dénomination	Commune	Profondeur (m)	Probabilité de productivité	Accès	Foncier
Ouroveni F3 ou	Ouangani	150	++	+++	+++
Ouroveni F4	Ouangani	150	++	++	+
Mronabéja F3	Kani-Kéli	150	+++	+++	+
Ylang Ylang F1	Mtsamboro	100 - 120	+++	+	+++
Bouyouni-Méresse F2	Bandraboua	140	++	++	+++
Mrowalé F1	Tsingoni	120	+++	++	+
Bandrélé F2	Bandrélé	150	+	++	+++
Ankétabé F1	Mtsangamouji	150	+++	+	+
Mandani F1	Tsingoni	125	++	++	+
Mbouini F1	Kani-Kéli	120 - 150	++	++	+
Mitséni F1	Bandraboua	150	+	+++	+

Tableau 1 : Caractéristiques des 10 sites présélectionnés par les travaux du rapport BRGM/RP-63837-FR.

1.2.1. Révision des données existantes

L'essentiel du travail de compilation des données existantes avait déjà été réalisé dans le rapport précité mais il restait néanmoins à proposer les implantations des profils de tomographie électrique en prenant en compte les données existantes, notamment géophysiques.

Les sites d'Ouoveni (commune d'Ouangani) et d'Ylang-Ylang (commune de Mtsamboro) avait déjà fait l'objet de complément d'investigation par ERT en 2016 dans le cadre d'une étude similaire à la présente mais visant le développement agricole pour le compte de la Chambre d'Agriculture, de la Pêche et de l'Aquaculture de Mayotte (CAPAM). La caractérisation de ces sites est à ce jour, considéré comme suffisante. En conséquence, ces sites sont retirés de la sélection et remplacés par deux nouveaux sites qui n'ont à ce jour pas été étudiés en détail. Il s'agit des sites de Miréréni sur la commune de Combani et de Dembéni sur la commune du même nom.

Le Tableau 2 rassemble les caractéristiques des différents sites finalement retenus pour les investigations complémentaires par tomographie électrique dans le présent projet.

1.2.2. Acquisitions de nouveaux profils de tomographie de résistivité électrique

Les nombreuses expériences BRGM d'exploration géophysiques de Mayotte depuis 2000, ont montré l'intérêt des tomographies électriques pour obtenir l'imagerie haute définition nécessaire à l'implantation des forages hydrogéologiques. Ainsi, 1 à 2 tomographies électriques par site sont envisagées tel que présenté dans le tableau suivant.

Pour atteindre une profondeur d'investigation d'environ 150 m avec une résolution adaptée, les profils tomographiques seront composés de 96 électrodes espacées de 10 m soit 950 m de long. Les configurations quadripôle dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger sont mesurées pour une meilleure résolution des discontinuités horizontales comme verticales et garantir la profondeur d'investigation.

N°	Site	Coordonnées en RGM04 UTM 38s		Commune	Tomographies réalisées
		X (m)	Y (m)		
1	Mbouini	514 926	8 564 592	Kani-Kéli	1
2	Mronabéja	513 781	8 565 598	Kani-Kéli	1
3	Bandrélé	520 357	8 573 116	Bandrélé	2
4	Miréréni			Combani	1
5	Mandani	517 096	8 586 635	Tsingoni	1
6	Bouyouni-Méresse	514 153	8 590 990	Bandraboua	1
7	Mitséni	516 454	8 590 973	Bandraboua	1
8	Mrowalé	512 750	8 586 867	Tsingoni	1
9	Dembeni			Dembeni	1
10	Ankétabé	509 921	8 590 751	Mtsangamouji	1

Tableau 2 : Caractéristiques géographiques des 10 zones étudiées par tomographie électrique dans le cadre de la présente étude.

2. Mesures et moyens mis en oeuvre

2.1. TRAVAUX REALISES

Les onze tomographies de résistivité électrique mises en œuvre sur dix zones présélectionnées ont toutes les mêmes caractéristiques. Elles sont composées de 96 électrodes espacées de 10 m pour une longueur totale de 950 m. Une tomographie était généralement suffisante sur chaque zone. La zone de Bandréle fait exception : une nouvelle tomographie recoupe perpendiculairement une tomographie existante, réalisée en 2012 et une deuxième tomographie complète cette dernière afin d'étendre les investigations en direction du bourg de Bandréle.

2.1.1. Méthodologie d'implantation des tomographies électriques :

Le choix des implantations des tomographies électriques au sol a été arrêté après un travail préparatoire examinant les résultats de la synthèse de 2014 (rapport BRGM/RP-63837-FR), les données géologiques (forage et carte géologique au 1/30000), hydrogéologiques (rapports BRGM/RP-59550-FR, 61757-FR, 51498-FR principalement) et géophysiques existantes (données HéliTEM et de tomographies au sol existantes).

La procédure a consisté à rassembler tous les éléments géologiques, géophysiques et hydrogéologiques disponibles :

- Données de résistivité extraites du modèle HéliTEM du secteur étudié selon le bassin versant hydrogéologique présumé incluant les cibles visées.
- Sections de résistivité issues du modèle AEM (rapport BRGM/RP-61803-FR) et interprétations hydrogéologiques, prélevées dans les rapports ou publications des études précédentes recoupant les zones présélectionnées (rapport BRGM/RP-59550-FR, 61757-FR, 60035-FR, 63837-FR).
- Sections de résistivité issues des tomographies électriques au sol réalisées dans de précédentes études (rapports BRGM/RP-59550-FR, 61757-FR, 51498-FR, 50428-FR).
- Logs des forages proches des zones concernées.

Ces données sont rassemblées et analysées afin de définir des cibles géophysiques d'intérêt sur la base des faciès géoélectriques observés et en fonction du contexte hydrogéologique tel que décrit par Vittecoq et al (2014). Les cibles aquifères d'intérêt typiques des milieux volcaniques sont illustrées dans les résultats des forages de M'Tsangamouji et Tsrarano tirés de Lachassagne et al. (2014) et de l'expérience BRGM sur l'île de Mayotte. Ce sont (cf. Illustration 1) des coulées de lave massive plus ou moins altérées et fissurées dans leur ensemble et présentant des niveaux bréchiques et/ou scoriacés à leur limite inférieure et/ou supérieure. Ces dernières interfaces présentent généralement la meilleure productivité et sont la cible des forages. L'imagerie de résistivité correspondante est une série qui comprend de haut la succession suivante : conducteur (séries anciennes altérées ou volcano-sédimentaire), résistant (coulée ou série de coulées laviques), conducteur (altération de la coulée ou formation volcano-sédimentaire).

Des discontinuités verticales limitant ces séries peuvent représenter des zones fracturées/fissurées particulières (failles, limite de coulées, ...) offrant une potentialité complémentaire de conductivité hydraulique intéressante. Il faut alors éviter les zones très conductrices qui sont l'indice d'une argilisation importante et d'une faible productivité.

L'empilement de séries alternativement résistantes et conductrices offre ainsi les conditions *a priori* les plus favorables car elles présument de la répétition de potentielles zones productives aux limites des zones résistantes (représentant souvent, dans le contexte de Mayotte, des coulées laviques).

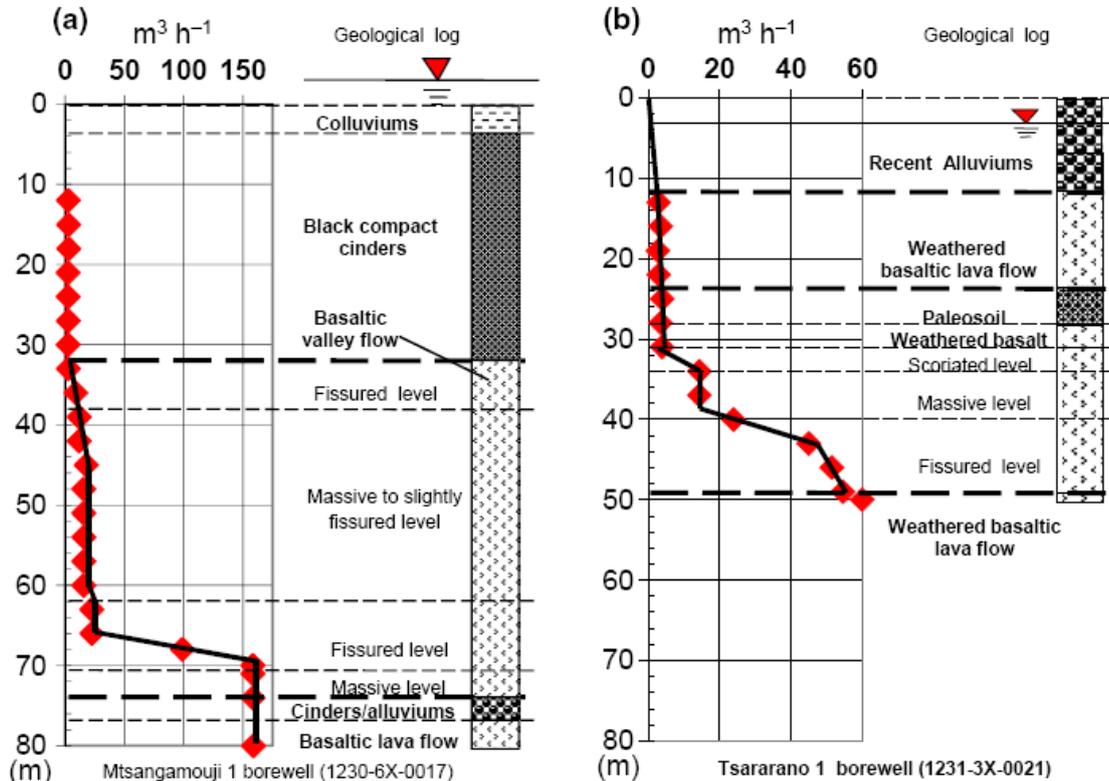


Illustration 1 - Aquifère type des environnements volcaniques de Mayotte montrant l'occurrence des principales venues d'eau (mesures micromoulinet) provenant de niveaux fissurés et scoriacés situés aux limites de coulées de laves massives. a : M'tsangamouji, b : Tsaranano (d'après Lachassagne et al. 2014).

D'une manière générale, les profils de sondage 1D extraits suivant les lignes de vol offrent, grâce à une plus grande densité de données, une meilleure définition latérale que les profils interpolés selon les directions d'intérêt (extrait des rapports et publications). En outre, l'analyse est plus efficace sur une série de profils sériés que le long de quelques profils d'orientation variée extraits suivant les structures d'intérêt. Le travail avec une série de profils sériés est donc à privilégier même si les extraits de rapport gardent tout leur intérêt notamment pour les interprétations qui en ont été proposées et pour aider à la compréhension des distributions complexes de résistivités quand il n'est pas aisé de faire le lien entre deux lignes parallèles.

Les implantations des profils de tomographie électrique réalisés sont figurées sur l'illustration 2. Ils ont globalement été implantés de manière à cibler et recouper transversalement les aquifères d'intérêt et compléter, voire vérifier les informations déjà disponibles grâce aux tomographies au sol, aux levés héliportés et aux forages existants

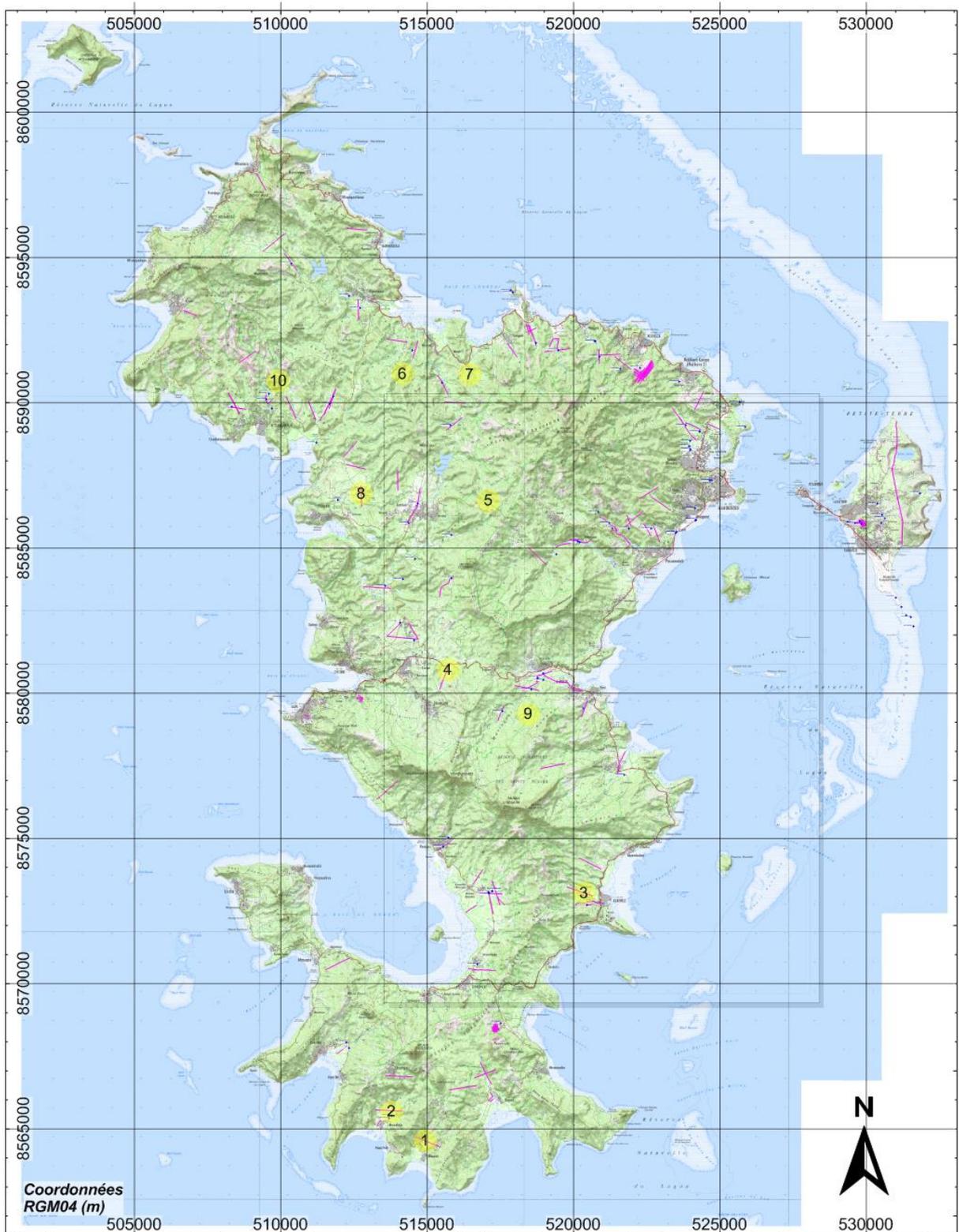


Illustration 2 - Implantation des zones d'étude sur fond de la carte IGN au 1/25000 (les traits violets indiquent les profils ERT existants).

2.1.2. Personnel

L'équipe d'intervention géophysique était composée de :

- 1 ingénieur géophysicien spécialiste des méthodes électriques : J-M Baltassat,
- 1 technicien spécialiste de l'acquisition des données électriques : B. Maurice,

Ils étaient assistés par 3 puis 4 manœuvres locaux engagés auprès de l'association d'insertion Tifaki Hazi. Les travaux préalables de débroussaillage ont été réalisés sous la responsabilité de l'antenne BRGM de Mayotte sous la responsabilité de Sara Eddam ou Grégoire Dectot, tous deux ingénieurs VSC avec deux manœuvres.

2.1.3. Calendrier

Les investigations par tomographie électrique se sont déroulées du 26/06 au 11/07/2017, hors mise en place et replis de l'équipe de géophysicien et du matériel. Le détail du déroulement des opérations est donné en Annexe 3.

Les travaux de débroussaillage avaient été réalisés préalablement du 12 au 23/06/2017 pour 8 zones sur les 10. Le débroussaillage des 2 derniers sites (zone 4 et 9) pendant la campagne de géophysique par une équipe séparée conduite par Sara Eddam ou Grégoire Dectot avec deux manœuvres.

Les onze profils ERT ont été réalisés en 13 jours. Le lundi 10/07/2017 a été consacré à la mesure d'une tomographie électrique sur le site de la prise d'eau de l'usine de dessalement située à Petite-Terre, travail réalisé hors du cadre du présent projet pour répondre à une demande expresse de la SIEAM en profitant de la mobilisation du personnel compétent et du matériel électrique sur site (les résultats préliminaires de ces mesures sont présentés en Annexe 14).

Malgré le débroussaillage préalable, le gain de productivité semble faible par rapport à la campagne de 2016 pendant laquelle le débroussaillage était effectué par l'équipe géophysique lors de son intervention (12 profils en 15 jours +2.5 jours de débroussaillage supplémentaires).

Les conditions de végétation, d'accès, de relief et la couverture forestière sont les paramètres qui impactent le plus les temps de réalisation des tomographies électriques. Un rendement d'une tomographie électrique par jour peut être tenu sur une période d'environ 10 jours de travail pour des profils peu végétalisés ou débroussaillés, offrant plusieurs accès (au moins trois répartis en différents endroits du profil) et avec une couverture forestière parsemée permettant un levé GPS sur au moins 70 % du tracé.

Ce rendement n'a pas pu être tenu pour la campagne 2017. Plusieurs profils ont nécessité plus d'un jour de travail et ce malgré que les relevés topographiques n'aient pas été réalisés de manière optimale (cf. plus bas). Cette situation est imputable notamment au fait que les profils les plus faciles à implanter avaient été utilisés lors des précédentes investigations.

A l'avenir, considérant notamment que les relevés topographiques doivent être prévus par distance-mètre laser (au moins 2 heures de mesures pour 96 électrodes) dans les conditions de Mayotte, il convient de prévoir 1.5 j par tomographie électrique comprenant 96 électrodes séparées de 10 m.

2.1.4. Equipement

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 12 flûtes de 8 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 mètres sur 950 m. L'énergie permettant d'alimenter l'injecteur de courant provenait d'une batterie externe (12V, 70 Ah). L'espacement inter-électrodes de 10 m a été choisi afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et l'obtention d'une profondeur d'investigation maximale d'environ 150 m.

Le matériel utilisé comprend :

- 1 Résistivimètre SYSCAL Pro (convertisseur interne DC/DC de 250 W),
- 12 flûtes de 8 traces, intertrace de 10 m,
- 96 électrodes,
- 96 cordons,
- 6 massettes,
- 2 batteries de voiture 70 Ah,
- 10 connecteurs de flûtes,
- 1 GPS différentiel Trimble GEOXH7000,
- 2 véhicules tout terrain.

2.1.5. Conditions d'exécution

Le travail a été rendu difficile par les conditions d'accès dans des terrains parfois escarpés qui ont conduit à des journées de travail longues avoisinant généralement 10 heures.

Durant la période d'acquisition, la météo était favorable, avec quelques précipitations éparses certains jours.

2.2. MISE EN OEUVRE

Le principe de la méthode du panneau électrique est présenté en Annexe 1.

2.2.1. Mise en place des électrodes sur les panneaux électriques

La mise en place des électrodes n'a pas présenté de difficulté majeure avec des résistances de prise¹ le plus souvent peu élevées, comprises entre 0.3 et 5 kOhm. Des résistances de prise élevées sont toutefois rencontrées par endroit, dans les zones où la partie supérieure du profil d'altération affleure tel que P1, P4, P5 et P8. Dans ces conditions, les résistances de prise les plus élevées sont comprises entre 7 et 11 kOhm (sans possibilité d'amélioration) et impactent défavorablement la qualité des tomographies en particulier en configuration dipôle-dipôle. Les données correspondantes seront filtrées si nécessaire, lors du traitement des données.

¹ La résistance de prise est la résistance (R) des terrains (effet majoritaire à proximité de l'implantation de l'électrode) selon la loi d'Ohm ($U=RI$) ; quand la résistance augmente, l'intensité, I transmise dans le sol diminue et le signal mesuré diminue en proportion. Pour compenser, on peut augmenter la tension, U mais dans les limites de performance de l'équipement utilisé.

2.2.2. Configuration d'acquisition des panneaux électriques

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en ce qui concerne l'amplitude du signal, la profondeur d'investigation et la résolution.

La configuration dipôle-dipôle (DD) offre une bonne résolution des terrains de sub-surface et des discontinuités verticales. Elle est moins sensible aux effets latéraux que le dispositif Wenner-Schlumberger. Par contre, le rapport signal/bruit décroît rapidement en fonction de la longueur du dispositif et donc de la profondeur d'investigation. Pour les sites les plus conducteurs recouverts par des terrains de surfaces résistants (limitant le courant d'émission), la profondeur d'investigation est réduite par rapport au dispositif Wenner-Schlumberger

La configuration Wenner-Schlumberger (WS) est beaucoup plus intégrante et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution des horizons de sub-surface est sensiblement plus faible et celle des structures en général, plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 150m pour un dispositif de 950 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit.

Nous avons utilisé un dispositif Wenner-Schlumberger réciproque (WSR) qui est équivalent au Wenner-Schlumberger classique mais permet d'optimiser les séquences de mesure en utilisant les dix canaux d'acquisition du Syscal Pro et ainsi réduire le temps d'acquisition d'au moins moitié. Tous les panneaux électriques ont été réalisés avec les mêmes configurations d'électrode et séquences de mesure DD et WSR.

2.2.3. Paramètres d'acquisition

Sur tous les panneaux électriques et pour l'ensemble des configurations, les paramètres d'acquisition ont été les suivants :

- Durée des créneaux d'injection : 0.5 s
- Nombre de cycle de mesures : 3 à 6 (3 si $Q < 0.5\%$, 6 si $Q > 0.5\%$) pour les configurations Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle
- Seuil de Déviation standard : $Q = 0.5\%$
- Voltage d'injection : 400 V.

2.2.4. Positionnement des mesures

Les profils de mesures sont localisés grâce à un levé DGPS avec un GPS Trimble Geo7X associé à une antenne externe de type Tornado. Ce récepteur permet de capter les satellites GPS ainsi que les satellites GLONASS (en moyenne entre 13 et 18 satellites, dans les conditions favorables). Les valeurs obtenues sont corrigées en post-traitement, à l'aide des éphémérides IGN de la station MAYG (Annexe 12). Ce post-traitement permet d'aboutir à une précision en X, Y de l'ordre de 10 cm (dans les conditions optimales d'utilisation).

La précision sur les levés altimétriques (Z) est fonction de la couverture végétale et du relief. Tous les profils présentent une couverture végétale parfois importante qui a gêné les mesures DGPS. L'expérience de la campagne de 2016 (Rapport BRGM/RP-66923-FR) avaient montré que les mesures de l'altitude mais aussi de localisation X, Y peuvent être affectées d'une erreur incompatible ou au moins gênante par rapport à l'objectif d'implantation des forages hydrogéologiques.

Des tentatives ont été faites (sur les premiers profils réalisés c.a.d P7 et P6) de lever la topographie par distance-mètre laser avec inclinomètre (équipement True-Pulse) mais il s'est avéré que le temps nécessaire à l'acquisition d'un profil complet atteignait au minimum 2 heures. Considérant que ce délai rendait pratiquement impossible la réalisation d'une tomographie par jour (même en conditions de terrain favorable) et était de ce fait difficilement compatible avec le planning de la mission, ces mesures ont été abandonnées.

Les 9 autres profils, ont en conséquence été levés au DGPS malgré les imprécisions attendues dans les zones couvertes. Les valeurs de Z qui paraissent aberrantes (par rapport au MNT à 5 m de Mayotte) sont rejetées et sont remplacées par les valeurs du MNT à 5 m (cf. Annexe 4). Dans certains cas, la localisation X, Y a été également corrigée à partir des informations terrain.

2.3. ANALYSE QUALITE

2.3.1. Filtrage des données

Le filtrage des données a été réalisé grâce au logiciel X2IPI de l'Université de Moscou après export du fichier de données au format .txt en sortie de Prosys. Le détail des paramètres de filtrage est présenté dans les Annexes 5 et 6. Les panneaux de résistivité apparente après ce filtrage et les résultats d'inversion de ces panneaux sont présentés dans les Annexes 7 et 8.

Pour le WSR, le filtrage a été réalisé selon le paramètre de qualité, Q et le niveau de voltage, V tels que $Q < 1$ à 5 % suivant les cas et/ou $V > 0.3$ mV : les enregistrements en dehors de ces critères sont rejetés. La procédure est ensuite complétée par une édition manuelle conduisant à éliminer les points aberrant résiduels. Les profils P6 et P10 n'ont pas été filtrés (sauf édition manuelle des points aberrant) et les profils P1, P2 et P10 n'ont été filtrés que sur Q ($Q < 3$ %). Les mesures WSR sont globalement de très bonne qualité avec un taux de conservation des mesures après filtrage compris entre 95 et 100 % sauf les profils P4 (84%), P5 (91 %) et P9 (64%).

Les configurations DD sont beaucoup plus affectées par le bruit (du fait d'une atténuation plus forte du signal en profondeur dans cette configuration) et le filtrage, réalisé selon les paramètres $Q < 5$ % et $V > 0.3$ mV, est un peu moins sévère que celui appliqué pour le WSR. Les taux de conservation sont très variables, compris entre 50 et 92 %. Les plus fortes valeurs correspondent aux conditions les plus favorables : terrain raisonnablement conducteur en surface et plutôt résistant en profondeur. Les plus faibles valeurs correspondent à des situations défavorables (terrain très résistants en surface associés à des terrains très conducteurs en profondeur) sur tout ou partie du profil. Dans ce cas, le filtrage élimine les mesures correspondant aux plus grandes distances émetteur-récepteur et la profondeur d'investigation est réduite généralement entre 100 et 150 m (65 m sur P5) contre près de 200 m en WSR. Le taux de mesures conservées n'est alors pas typiquement représentatif de la qualité de mesure sur le jeu de donnée résiduel dont les mesures sont globalement de bonne qualité et le coefficient d'ajustement est un indicateur qualité plus pertinent. L'inversion conjointe des configurations DD et WSR permet de compenser grâce au WSR la perte d'investigation du DD tout en bénéficiant de la bonne résolution du DD pour la tranche supérieure.

Le profil P9 a été mesuré le dernier jour de mission après les investigations sur le site de Petite Terre où le dispositif de mesure a été en partie recouvert par la marée montante avant d'avoir pu être démobilisé. Suite à cette immersion, certaines connexions de flûtes utilisées pour le profil P9 ont perdu leur isolation. Cela a occasionné des artefacts de mesure sur la tomographie P9 en WSR comme en DD. La tomographie WSR a pu être filtrée pour obtenir un résultat fiable mais avec une investigation limitée en profondeur en particulier sur sa partie orientale. La tomographie DD n'a pas été valorisée car inexploitable.

Tomographie	Dispositif quadripôle	% de mesures conservées après filtrage	Coefficient d'ajustement du résultat d'inversion (%)
P1	WSR	98	1.9
P1	DD	92	4.3
P2	WSR	97	1.6
P2	DD	64	5.7
P3	WSR	99	3.6
P3	DD	71	9.3
P3bis+P2012	WSR	100	3.0
P3bis+P2012	DD	73	5.1
P4	WSR	83	8.5
P4	DD	50	16.0
P5	WSR	91	8.6
P5	DD	48	13.7
P6	WSR	99	2.4
P6	DD	58	10.0
P7	WSR	98	3.6
P7	DD	67	8.4
P8	WSR	96	4.3
P8	DD	63	10.5
P9	WSR	64	4.9
P10	WSR	95	2.9
P10	DD	65	8.9

Tableau 3 – Résumé des paramètres qualité des tomographies électriques (DD= dipôle-dipôle ; WS= Wenner-Schlumberger)

2.4. INVERSION/MODELISATION

Les paramètres utilisés pour l'inversion des données de tomographie avec le logiciel RES2DINV64 sont listés dans l'Annexe 13. Les inversions ont été réalisées en mode « blocky » (Loke 2001, correspond au paramètre « Robust » dans le logiciel RES2DINV) qui est particulièrement adapté pour bien résoudre les limites entre faciès de résistivités contrastées telles qu'attendues entre coulées basaltiques massives peu altérées et les séries volcaniques plus ou moins altérées. Le mode « blocky » permet une définition plus précise des interfaces entre les compartiments de résistivités contrastés tout en offrant une régularisation bien adaptée aux niveaux de bruit élevés ou aux « outliers » (Loke et al. 2003, Seaton et Burbey 2002). Les artefacts 3D dus à la complexité du milieu volcanique (limite de coulée, etc ...) sont en effet susceptibles de générer des outliers qui seront mieux traités par l'inversion 2D en mode « blocky ».

Les coefficients d'ajustement (entre la réponse du modèle calculé en résultat d'inversion et les valeurs mesurées), sont généralement compris entre 1.6 et 4.9 pour les configurations WSR indiquant ainsi une bonne qualité de donnée en accord avec les taux élevés de conservation de mesure. Les profils P4 et P5 font exception avec des valeurs à 8.5 et 10.6 correspondant à un faible niveau de signal imputable à des résistances de prises élevées. Les coefficients

d'ajustement de 4.3 à 10.5 obtenus généralement en dipôle-dipôle rendent compte de la qualité des données résiduelles après filtrage. Les valeurs plus élevées ont les mêmes causes qu'en WSR.

Les résultats d'inversion présentés dans l'Annexes 8 montrent les variations de résistivité en pleine échelle. Une même échelle de couleur (limitée entre 2 et 1000 Ohm.m) qui permet une comparaison aisée des résultats des différentes tomographies a été appliquée à l'ensemble des tomographies présentées dans le chapitre résultat. Cette gamme qui également été utilisée dans le rapport de 2016 pour la CAPAM (BRGM/RP-66923-FR couvre l'ensemble des variations observées sur les différentes tomographies et permet une imagerie adaptée aux différentes conditions de l'île.

La bonne qualité globale des données et les bons indicateurs d'inversion permettent de présenter des résultats fiables des tomographies réalisées sur tous les sites.

2.5. INTERPRETATION

2.5.1. Interprétation géologique

L'interprétation est basée sur l'identification d'unité de résistivité se développant sous des formes géométriques variées (analogues à des couches, lentilles, blocs, compartiments, ...), caractérisées par des résistivités relativement uniformes à l'intérieur de leurs limites et présentant un contraste de résistivité marqué avec leur environnement. Les limites d'unité sont définies au maximum de gradient entre deux plages de résistivité relativement uniformes. Ces limites peuvent correspondre aux toits ou bases de coulées ou d'autres formations volcaniques ou volcano-sédimentaires et d'une manière plus générale aux limites de ces formations ou à d'anciennes surfaces topographiques. Les limites latérales de ces unités, relevées comme des discontinuités verticales, peuvent être la marque de structures tectoniques (failles, fissures, ...), de morphologies fossiles (ancienne falaise, vallon, front de coulée, ...) ou de structures volcaniques (bord de caldera, effondrement sectoriel, ...).

Il est possible que des couches trop peu épaisses et/ou présentant un contraste de résistivité insuffisant par rapport à leur environnement ne soient pas imagées (principe de suppression, Parasnis, 1986). Il est également possible que des imageries géo-électriques différentes rendent compte d'une même configuration géologique tout en satisfaisant également bien le jeu de données (principe d'équivalence). Les limites des unités géophysiques peuvent par ailleurs ne pas correspondre à des limites géologiques (absence de contraste de propriété géo-électrique entre deux formations géologiques).

Les séries volcaniques de Mayotte présentent généralement des profils d'altération bien développés qui se manifestent en imagerie de résistivité par une succession résistant-conducteur-résistant, R-C-R (Illustration 3). Chaque fois que les conditions s'y prêtaient, ce schéma d'interprétation a été tenté.

La comparaison, lors d'études antérieures, avec les forages montre que les limites R1-C1 et R1-C2 de l'illustration 3 correspondent généralement assez bien avec les bases et sommets de coulées massives qui sont des zones potentiellement productives hydrauliquement car fracturées, scoriacées ou marquent le passage à un niveau volcano-sédimentaire poreux. La limite C2-R2 est moins bien définie et semble s'établir à l'intérieur des isaltérites (cf. tomographie traversant les padza de Mtsangamouji dans RP-59550) ou à la base des allotérites (Prognon et al 2012). Elle est analogue à une même limite conducteur-résistant (C-R) observée au sommet

du profil d'altération des granites (Parizot 2012). Pour ces milieux basaltiques ou granitiques dont les produits d'altération sont essentiellement argileux, il est surprenant d'avoir un sommet de profil très résistant (plus de quelques centaines d'Ohm.m) et épais (il peut atteindre plusieurs dizaines de m en milieu basaltique comme granitique). Cette observation est également confirmée par l'analyse à plus petite échelle des modèles de résistivité héliporté (Prognon et al, 2012). Elle est également analogue à une même limite C-R observée au sommet du profil d'altération des péridotites (profil d'altération sans argiles, Robineau et al. 2007, Baltassat et al 2012) où elle correspond au passage à un niveau composé essentiellement d'hydroxydes de tailles micrométriques. Des études plus poussées incluant des analyses minéralogiques et des mesures en laboratoires sont nécessaires pour expliquer cette limite de résistivité. En attendant, cette limite est interprétée, dans l'environnement de Mayotte, comme le sommet du profil d'altération à composante ferrallitique dont la résistivité élevée est à imputer à une augmentation de la teneur en hydroxyde de fer et une diminution de la teneur en argile.

La succession R-C-R peut également correspondre à la succession de deux coulées de laves et une intercalation volcano-sédimentaire plus ou moins altérée qui est une disposition également fréquente à Mayotte ou à toute autre successions de formations volcaniques ou volcano-sédimentaires résistantes et conductrices. Par exemple, des cinérites observées sur plusieurs sites de Mayotte présentent une résistivité élevée comparable à des coulées de lave.

L'interprétation géologique de ces séries R-C-R n'est donc pas univoque et l'utilisation d'informations extérieures à la géophysique (log de forage, carte géologique, ...) est nécessaire pour calibrer et préciser les interprétations.

Faciès de résistivité

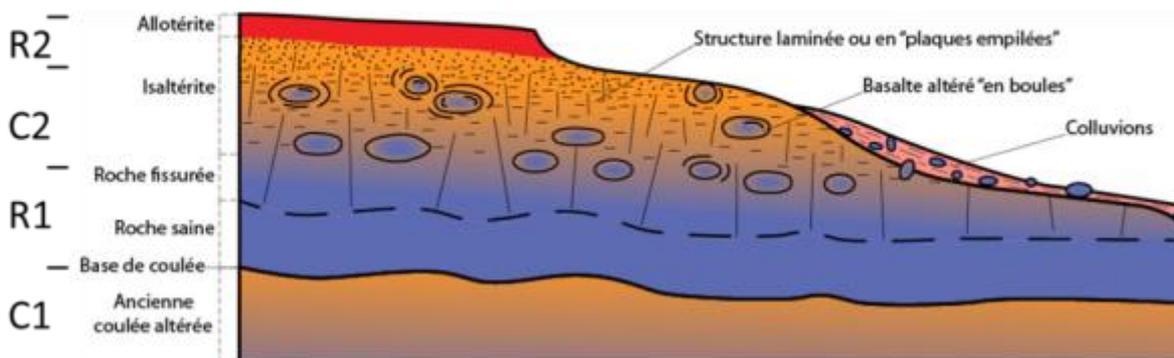


Illustration 3 - Succession typique des unités de résistivité R1-C2-R3 observés à Mayotte pour le profil d'altération d'une formation volcanique (coulée de lave typiquement) sur des formations anciennes très altérées se manifestant par un conducteur (C1). Coupe d'altération par Audru et al. 2010 modifiée par Nelhig et al. 2013.

2.5.2. Utilisation conjointe des données HéliTEM

Le modèle de résistivité de Mayotte obtenu à partir des données HéliTEM couvre l'ensemble de l'île et fournit une imagerie détaillée et significative des aquifères étudiés (Vittecoq et al. 2014). Ce modèle contribue donc naturellement aux travaux d'implantation de forages hydrogéologiques qui sont l'objet de ce rapport. Nous avons déjà vu comment les données HéliTEM sont utilisées pour l'implantation des profils de tomographie électrique au paragraphe 2.1.1.

Les tomographies ERT apportent un niveau de définition plus élevé par rapport au modèle HéliTEM et permettent en particulier de préciser les discontinuités latérales qui sont généralement définies avec une résolution insuffisante dans le modèle HéliTEM qui résulte de sondages 1D inversés selon un modèle tabulaire. On peut aussi considérer que les tomographies ERT apportent un niveau de définition correspondant à une échelle intermédiaire entre les données de forage et les données héliportées.

L'utilisation des données HéliTEM pour contribuer à l'interprétation des tomographies au sol et à l'implantation des forages hydrogéologiques, nous conduit à esquisser une méthodologie alliant les deux méthodes géophysiques pour cette application. Cette méthodologie comporte les différentes tâches suivantes :

- Sur chaque zone comportant des forages ou des affleurements significatifs : calibration des tomographies au sol et des résultats HéliTEM sur les données de forages (lithologie) et évaluation de la précision de détermination des informations géologiques à partir des données géophysiques.
- Révision/optimisation des procédures/paramètres d'inversion ERT et /ou HéliTEM si nécessaire (en fonction de l'évaluation réalisée lors de tâche précédente) pour améliorer la précision de détermination, avec l'aide de la modélisation si nécessaire.
- Application de la procédure/ paramètres optimisés sur tout ou partie de l'étude et réévaluation de la précision de détermination.

Les informations de calibration obtenues au niveau des forages peuvent être synthétisées sous forme de tableau mettant en correspondance les informations géologiques (profondeur, lithologie, niveau piézométrique...) et géophysiques (résistivité, profondeur, ...). Ces informations sont destinées à être archivées, utilisées voire modifiées (au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données) pour l'étude des mêmes zones ou d'autres zones dans les mêmes conditions géologiques.

Nous recommandons de poursuivre le développement de cette méthodologie dans les futurs projets utilisant les méthodes de tomographie électrique et d'héliTEM afin de la préciser et de l'optimiser. En particulier, il conviendra de traiter en détail chaque site de forage permettant une comparaison significative entre tomographies au sol et données HéliTEM avec des forages. Il est également recommandé de prévoir des diagraphies (au moins résistivité et gamma naturel) dans tous les nouveaux forages de Mayotte afin d'affiner le passage d'échelle entre forage et tomographie au sol qui reste souvent problématique.

2.5.3. Implantation des forages hydrogéologiques

L'implantation des forages hydrogéologiques sur un profil ERT ou une série de profils ERT suit les règles principales suivantes :

- Cibler les séries résistantes les plus épaisses représentant potentiellement une succession de niveaux aquifères selon le modèle hydrogéologique décrit en 2.1.1. et le modèle géophysique décrit en 2.5.1.
- Eviter les discontinuités verticales marquées par des résistivités trop faibles traduisant de probables terrains colmatés par des argiles
- Localisation en aval des bassin-versant hydrogéologiques .

3. Résultats

Ce chapitre présente les interprétations conjointes des données Héli TEM et des tomographies au sol pour chacun des 10 zones présélectionnées par le SIEAM. Les zones sont présentées suivant leur numéro d'ordre, sans indiquer une quelconque priorité.

3.1. MBOUINI : ZONE 1

L'implantation des investigations réalisées sur les zones 1 et 2 est figurée sur l'illustration 4 et en Annexe 9.

La tomographie P1 (Illustration 5) montre une importante unité résistante R1 ($40 < \rho < 140$ Ohm.m) passant latéralement à une unité encore plus résistante R1' ($100 < \rho < 500$ Ohm.m). Le substratum conducteur, C1 des niveaux résistants R1 et R1' est mal défini par les tomographies électriques du fait d'une profondeur d'investigation insuffisante. Les profils HéliTEM (Illustration 6), plus pénétrant définissent le toit de C1 vers -100 m d'altitude et corrélativement une épaisseur des niveaux R1 et R1' atteignant au moins 80 à 100 m.

Le résistants R1, R1' sont recouvert par une couverture C2, C3 ($7 < \rho < 25$ Ohm.m) d'épaisseur variable. Dans la partie E de P1, le conducteur C2' est plus marqué ($3 < \rho < 15$ Ohm.m) et surmonté par un résistants R2 ($60 < \rho < 320$ Ohm.m). L'ensemble R1'-C2'-R2 est interprété comme le profil d'altération des formations laviques R1' surmontées selon le schéma présenté au paragraphe 2.5.1. par la partie inférieure du profil, conductrice (C2') et la partie supérieure, résistante (R2) qui affleure au sommet du profil sous la forme de Padza². Dans la partie ouest recoupant le fond de la vallée alluviale, C2 et C3 sont localement séparés par une intercalation résistante R2' dont les caractéristiques (résistivité et épaisseur) l'apparentent au résistants R2 de la partie E. Dans ce cas, le conducteur C3 surmontant plus ou moins directement le conducteur C2 peut être interprété comme des dépôts alluviaux surmontant la série altérée où la partie supérieure du profil d'altération a pu être conservée (entre les abscisses 420 et 520 m) ou par place érodé (entre 120 et 420 m). Ces séries alluviales seraient alors généralement peu favorables car leur caractère conducteur indique une teneur en argile significative.

La structuration verticale, apparente des unités résistants R1, R1' en général et particulièrement marquée au NE du profil P1 est à mettre sur le compte de la proximité du centre effusif voisin au N, ses laves différenciées et visqueuses (phonolites) et un gisement en dôme (Mont Choungui) plutôt qu'en coulées étendues³.

Par analogie avec les résultats des forages 12316X0031 et X0032 de la vallée voisine de Mronabeja (cf. 3.2.), où les basaltes et les laves à quartz présentent de bonnes caractéristiques aquifères et se manifestent par des niveaux résistants en ERT, nos recommandations de forages d'exploration hydrogéologique (Fz1-1 et Fz1-2, Illustration 4 et Illustration 5) ciblent les niveaux résistants R1 et R1' sur la zone de MBouini.

Les forages devront être descendus à au moins 100-130 m pour recouper l'ensemble des niveaux résistants R1, R1'.

² Dénomination locale des terrains incultes résultant de l'érosion des profils d'altération

³ Par opposition, les structures globalement tabulaires observées le plus souvent à l'échelle des profils ERT, à Mayotte rend compte de coulées basaltiques étendues

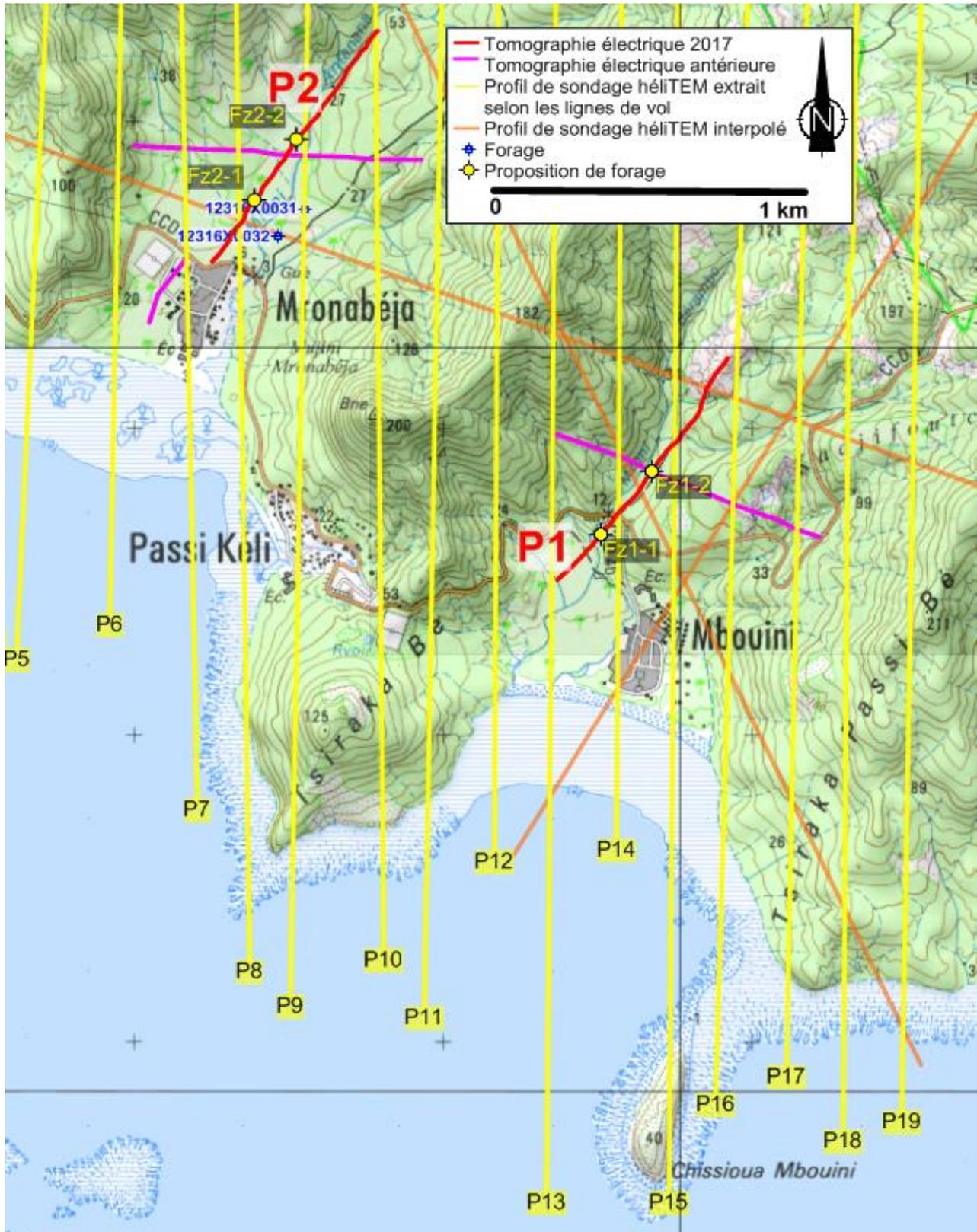


Illustration 4 - Localisation des investigations et des forages recommandés (Fz1-2, Fz1-1, Fz2-1, Fz2-2) en résultat de la présente étude sur le site de Mbouini et Mronabeja.

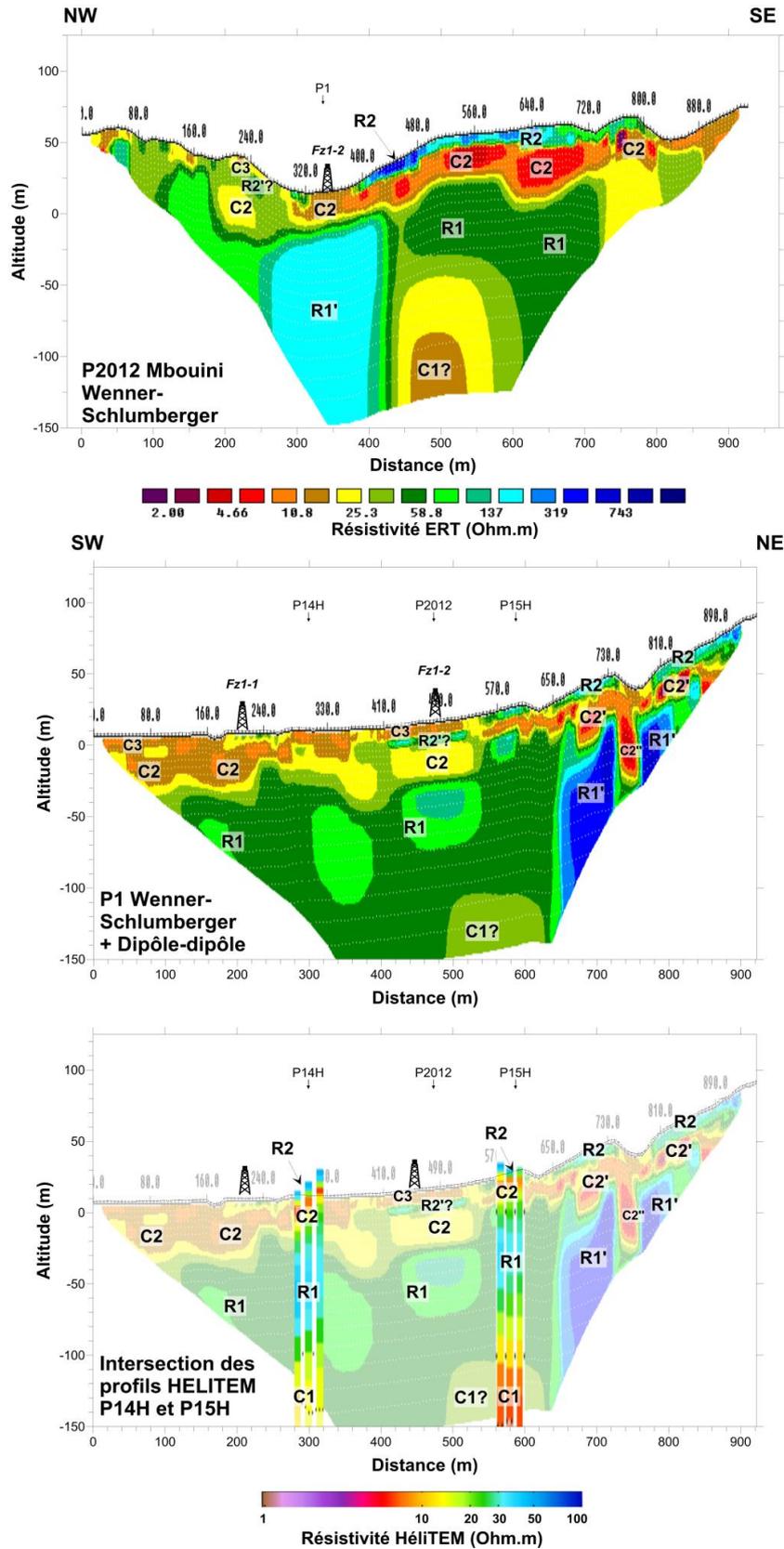


Illustration 5 - Synthèse des investigations sur le site de Mbouini. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

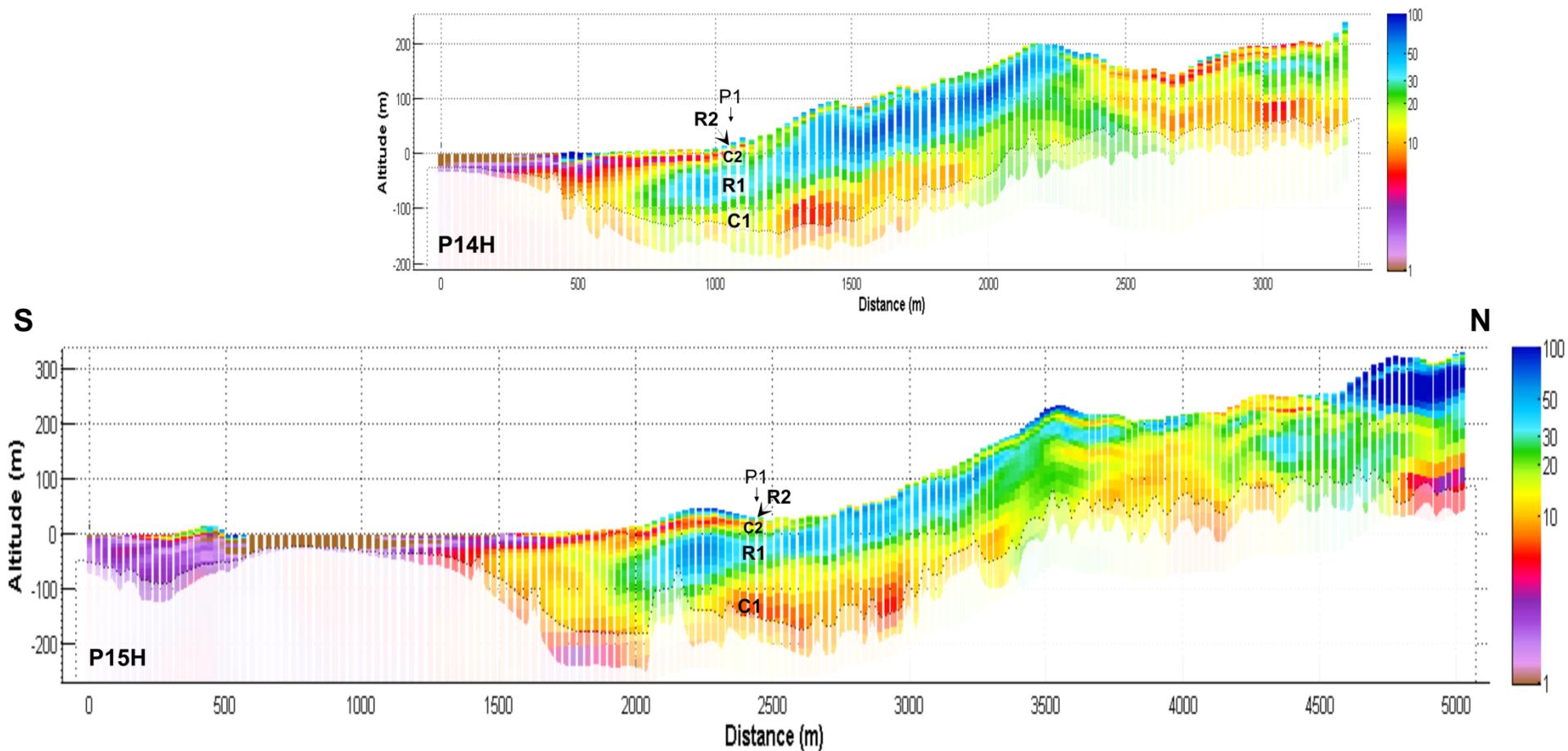


Illustration 6 - Profils HéliTEM recoupant le site de Mbouini

3.2. MRONABEJA : ZONE 2

La zone de Mronabeja (repose sur un substratum relativement résistant R1 ($40 < \rho < 140$ Ohm.m) présentant une structuration plutôt verticale et des variations latérale vers un faciès plus conducteur R1' ($15 < \rho < 60$ Ohm.m) (cf. Illustration 7). Comme sur la zone précédente, les variations latérales et la structuration verticale sont attribuables à un gisement en dôme de laves différenciées et visqueuses (phonolites) à proximité de centre effusifs, au N (Mont Choungui) et au S (Mujini Mronabeja) du profil. Des laves différenciées (« laves à quartz ») sont d'ailleurs décrites dans les deux forages de la zone (12316X0031 et 0032, cf. Illustration 8). Pour compléter le paysage, l'allure particulièrement hachée (R3, C3) de l'extrémité est du profil P2 pourrait être l'image de dykes observés par ailleurs à l'affleurement dans la région.

L'épaisseur de l'unité R1 n'est pas définie par ERT du fait d'une investigation insuffisamment profonde mais les profils HéliTEM indiquent une épaisseur d'environ 125 m (sur P10H) et plus (Illustration 8).

Le substrat R1, R1' est surmonté par un conducteur C2 ($2 < \rho < 15$ Ohm.m) qui est attribué par référence aux forages à des séries alluviales et altérées, à composante argileuse et limoneuse. La couverture R2 de 10 m d'épaisseur peut être attribuée soit au sommet du profil d'altération (sur les sommets en particulier) soit à un niveau alluvionnaire (en fond de vallée en particulier, cf. P2012, Illustration 7).

Les forages existants montrent que les séries laviques (basaltes, « laves à quartz »), plus ou moins altérées (Illustration 9) et correspondant au résistant R1, R1' (Illustration 8) sont productives avec des transmissivités comprises entre 10^{-4} et $5 \cdot 10^{-4}$ m²/s. L'analyse globale du modèle de résistivité issu des investigations héliportées montre par ailleurs que ces séries résistantes constituent le remplissage d'une paléo-vallée pouvant drainer les eaux souterraines (rapport BRGM/RP63837, Vittecoq et al. 2014).

En conséquence, les unités R1 et R1' sont les cibles privilégiées des forages proposés à l'issue de cette étude et en accord avec les études précédentes. Les forages proposés Fz2-1 et Fz2-2 ciblent les formations R1 et R1' où la couverture C2 est la plus réduite. Ils devront être descendus à au moins 150 m pour recouper l'ensemble des niveaux résistants R1, R1'.

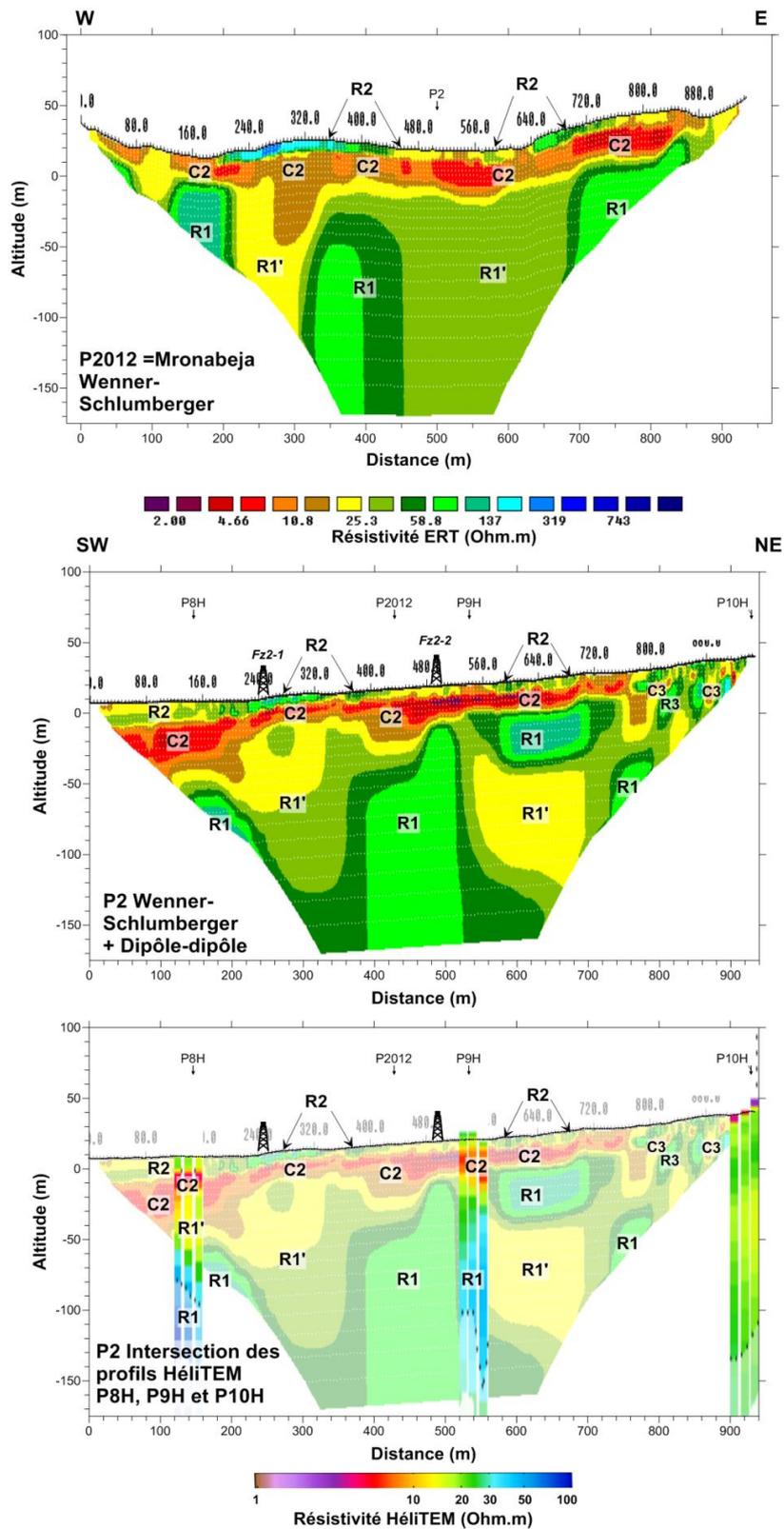


Illustration 7 - Synthèse des investigations sur le site de Mronabeja. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

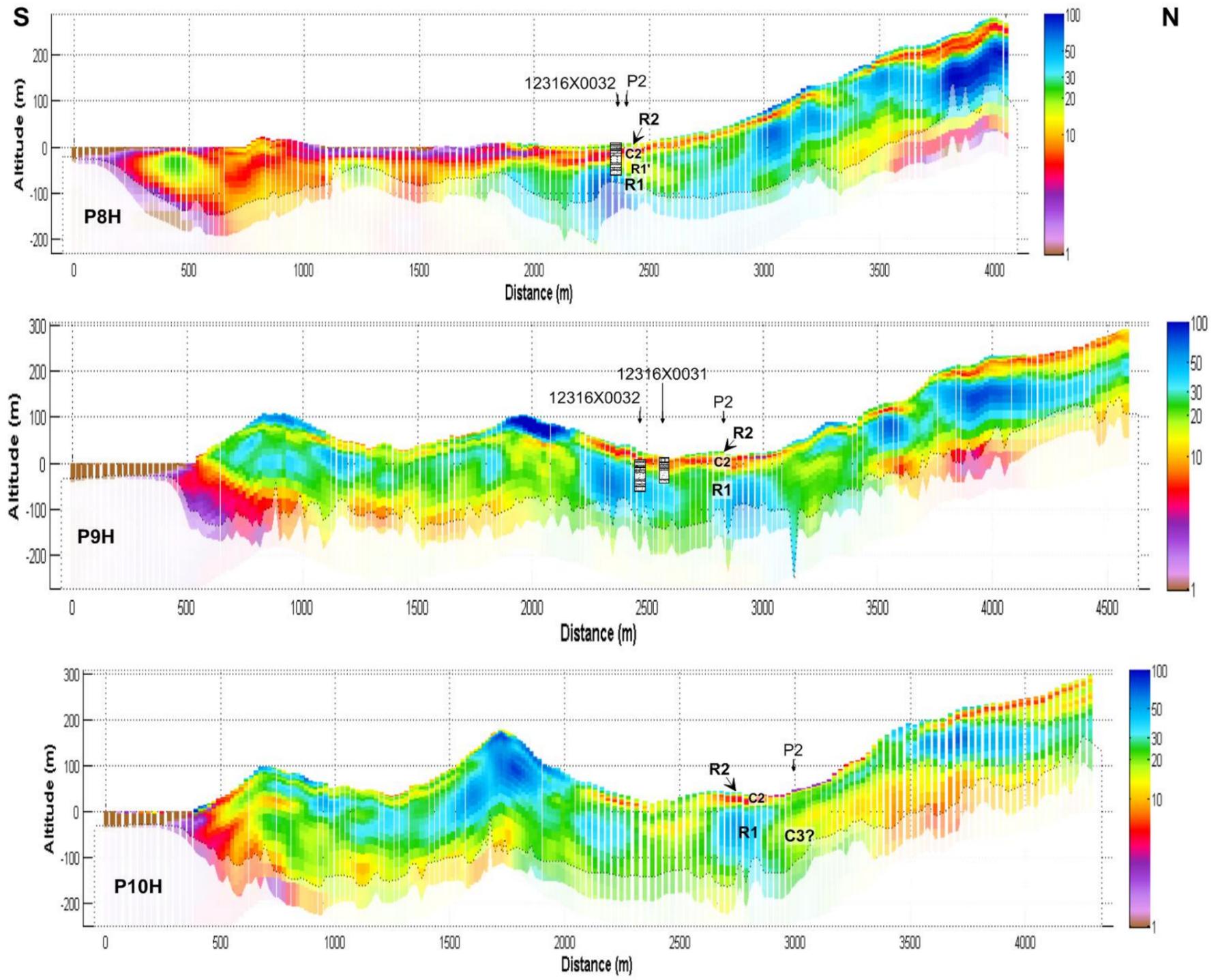


Illustration 8 - Profils HéliTEM recoupant le site de Mronabeja.

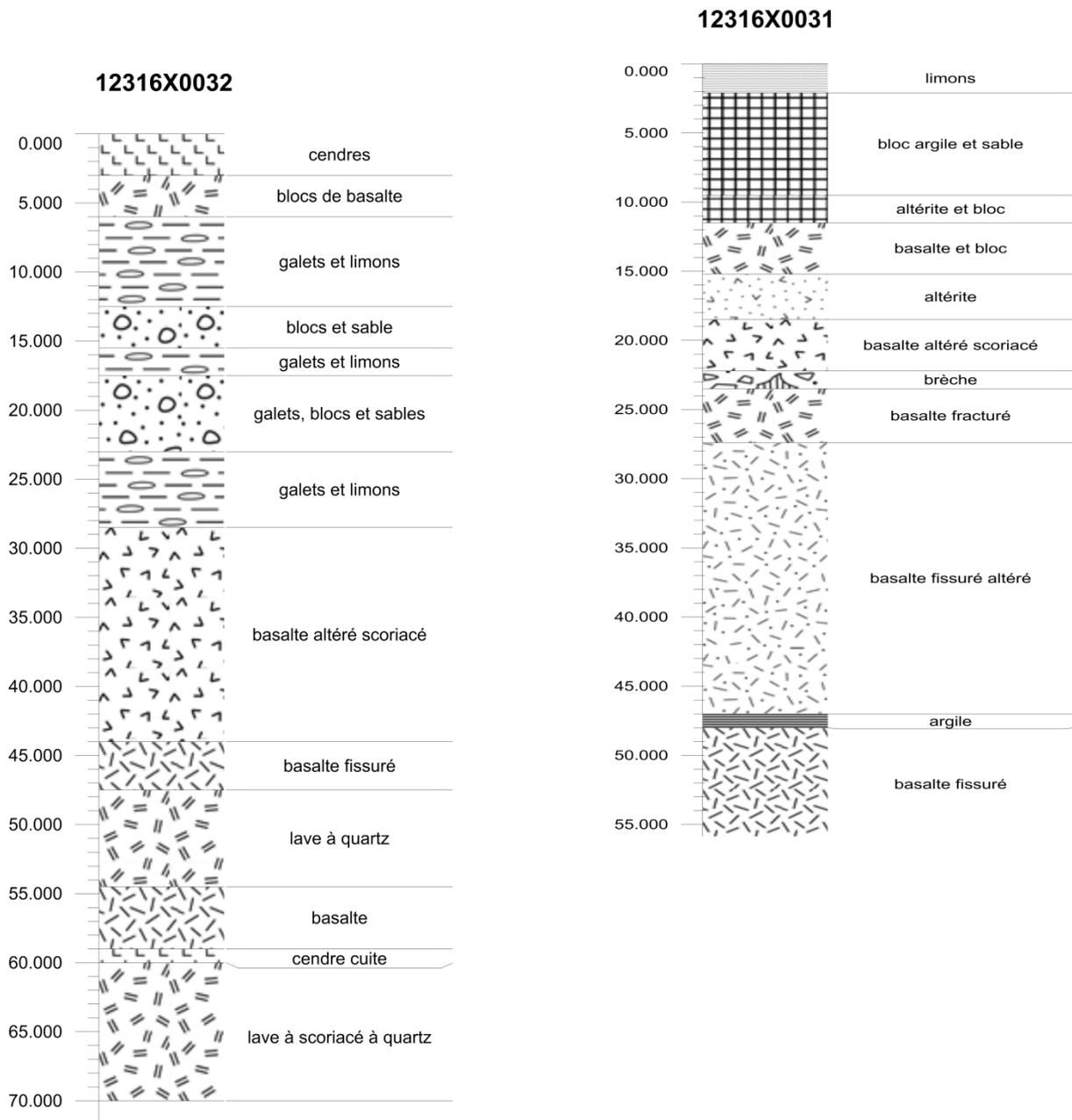


Illustration 9 - Forages existant sur le site de Mronabeja.

3.3. BANDRELE : ZONE 3

La localisation des investigations sur la zone 3 est présentée sur l'illustration 10 et en Annexe 9.

La tomographie P3 (Illustration 11) montre une structure complexe avec des unités résistantes R2 et R3 ($100 < \rho < 700 \text{ Ohm.m}$) remplissant un système de paléo-vallées creusées dans un substrat conducteur C1 ($3 < \rho < 25 \text{ Ohm.m}$). Le conducteur C1 repose lui-même sur le résistant R1 ($25 < \rho < 100 \text{ Ohm.m}$).

La tomographie P2012 (prolongé par P3bis) qui est perpendiculaire à la précédente indique que le remplissage R2, R3 est limité principalement entre les abscisses 500 et 800 (voire 900) m. Elle montre également des passages latéraux entre C1 et R1. Ce dernier ne serait donc pas typiquement le substrat de C1.

Les unités R2 et R3 sont attribuées à des coulées laviques récentes reposant sur une unité plus ancienne, altérée (C1). Le niveau conducteur C2 intercalé entre R2 et R3 est attribué au profil d'altération de R2 ou à des séries volcano-sédimentaires.

Le forage 12313X0033 implanté à l'extrémité S de P3 et sur le profil de P2002 montre (rapport BRGM/RP-52104) des niveaux productifs aux limites et à l'intérieur des formations (laves et brèches pyroclastiques peu altérées) correspondant au résistants R1, R1'.

Le mur du résistant R2 défini par HéliTEM (Illustration 12) est significativement moins profond (50 m) que celui défini par ERT (80 m). Une telle différence a déjà été observée dans une situation similaire (conducteur peu marqué entre deux résistants) sur un site étudié en 2016 à Mayotte (BRGM/RP RP-66923-FR). Etudier la cause de cet écart nécessiterait des travaux de modélisation qui ne rentrent pas dans le cadre du présent projet.

Les forages proposés visent les unités résistantes R3, R2, R2' et R1, R1'.

Fz3-3 vise la paléo-vallée là où elle apparaît la plus profonde sur le profil P2012+P3bis. Toutefois l'extension latérale des unités R2, R2' pourrait être réduite et limiterait ainsi l'intérêt de l'aquifère qu'elles porteraient.

Les deux autres forages proposés (Fz3-1 et Fz3-2) visent la formation R1 par analogie à la situation productrice du forage 12313X0033. Fz3-1 se trouve en position aval le long du profil P2012+P3bis et Fz3-2 en dehors de la zone d'investigation ERT, dans un vallon accessible où les profils HéliTEM indiquent une extension probable du résistant R1 vers les pentes du massif du Mlima Bénara à l'ouest.

Les forages Fz3-1 à Fz3-3 doivent être descendus à 130-150 m afin de recouper la plus grande épaisseur des séries R1, R2.

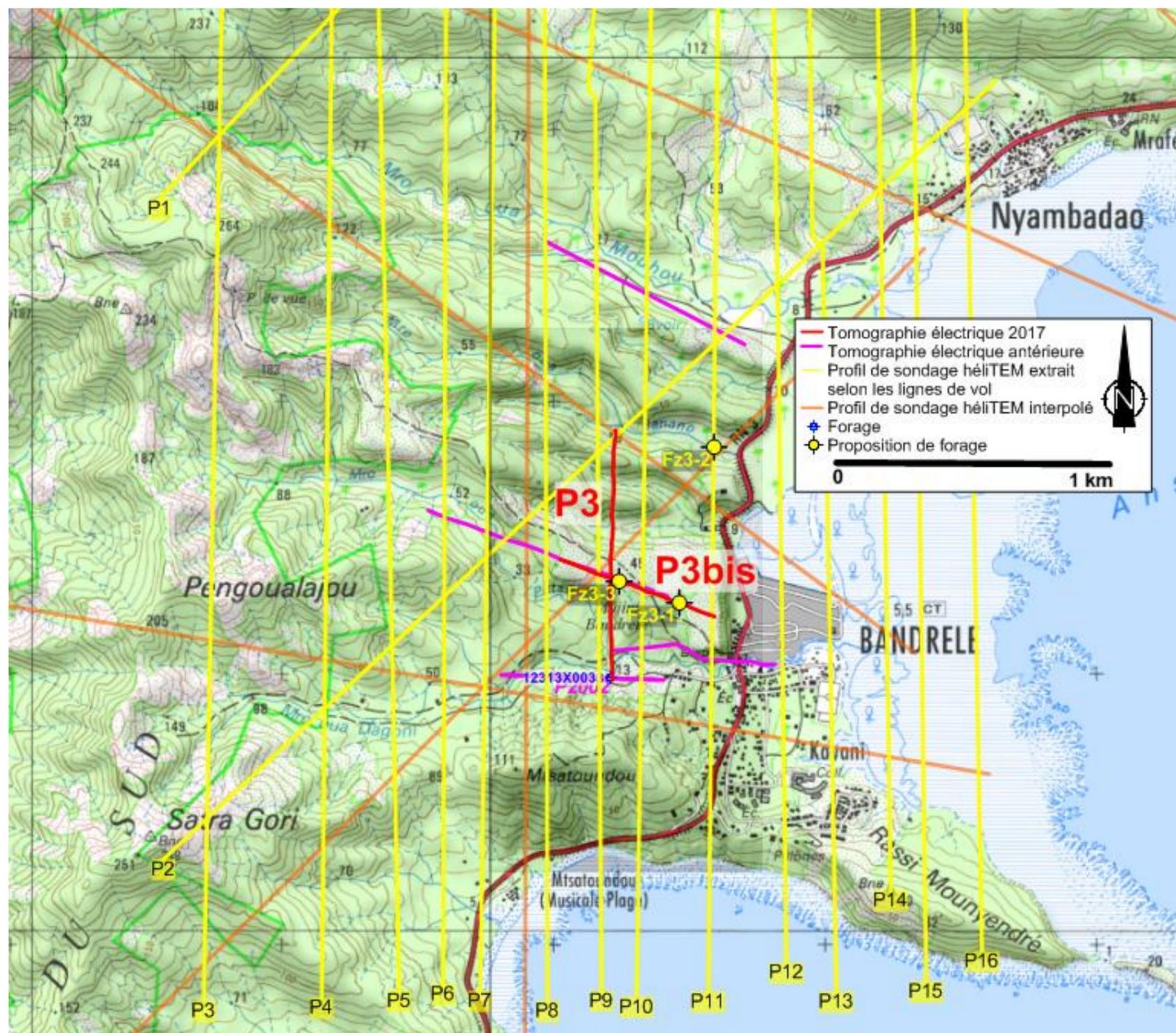


Illustration 10 - Carte d'implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz3-1, Fz3-2, Fz3-3) sur la zone de Bandrelé.

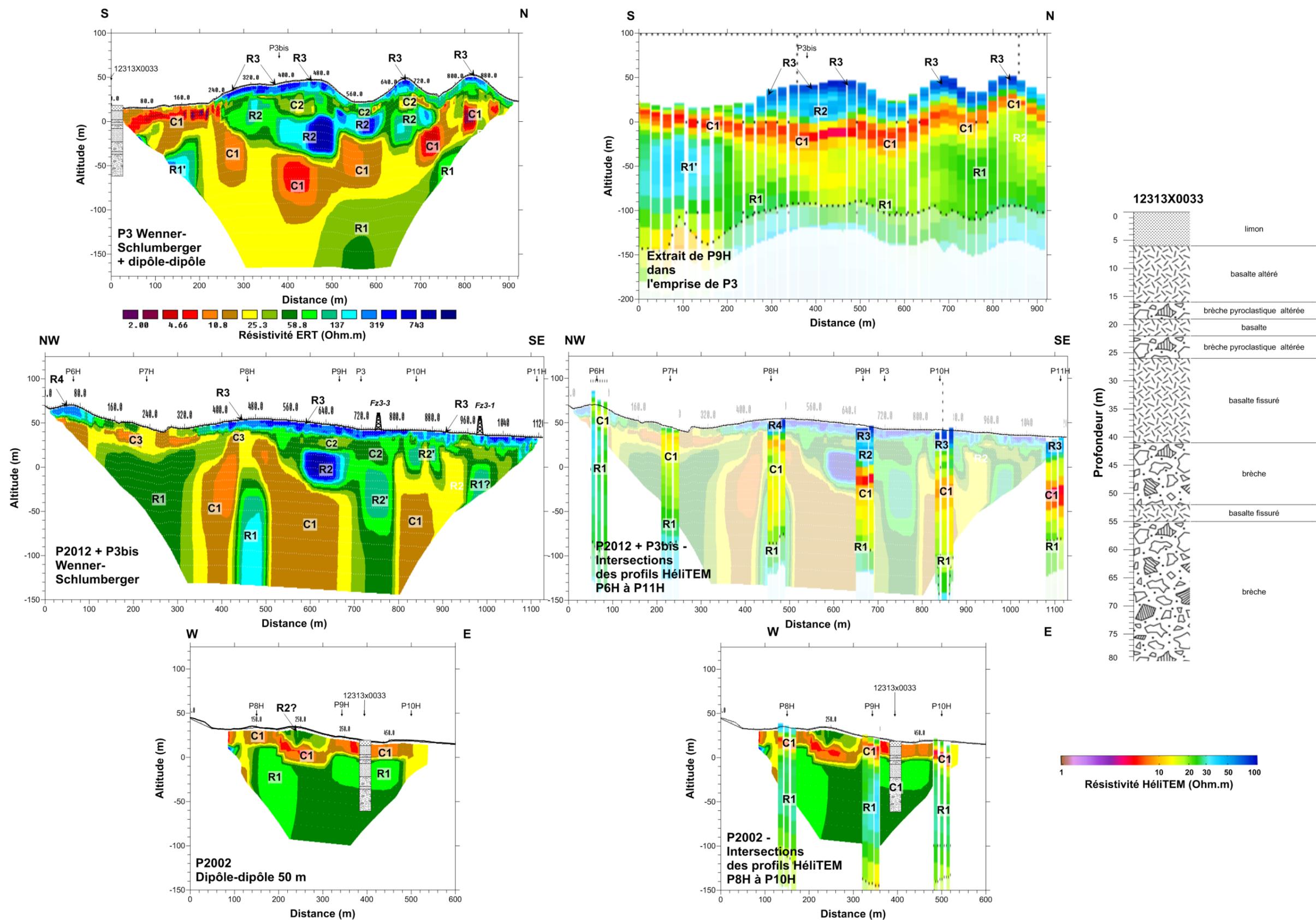


Illustration 11 - Synthèse des investigations réalisées sur la zone de Bandrelé. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

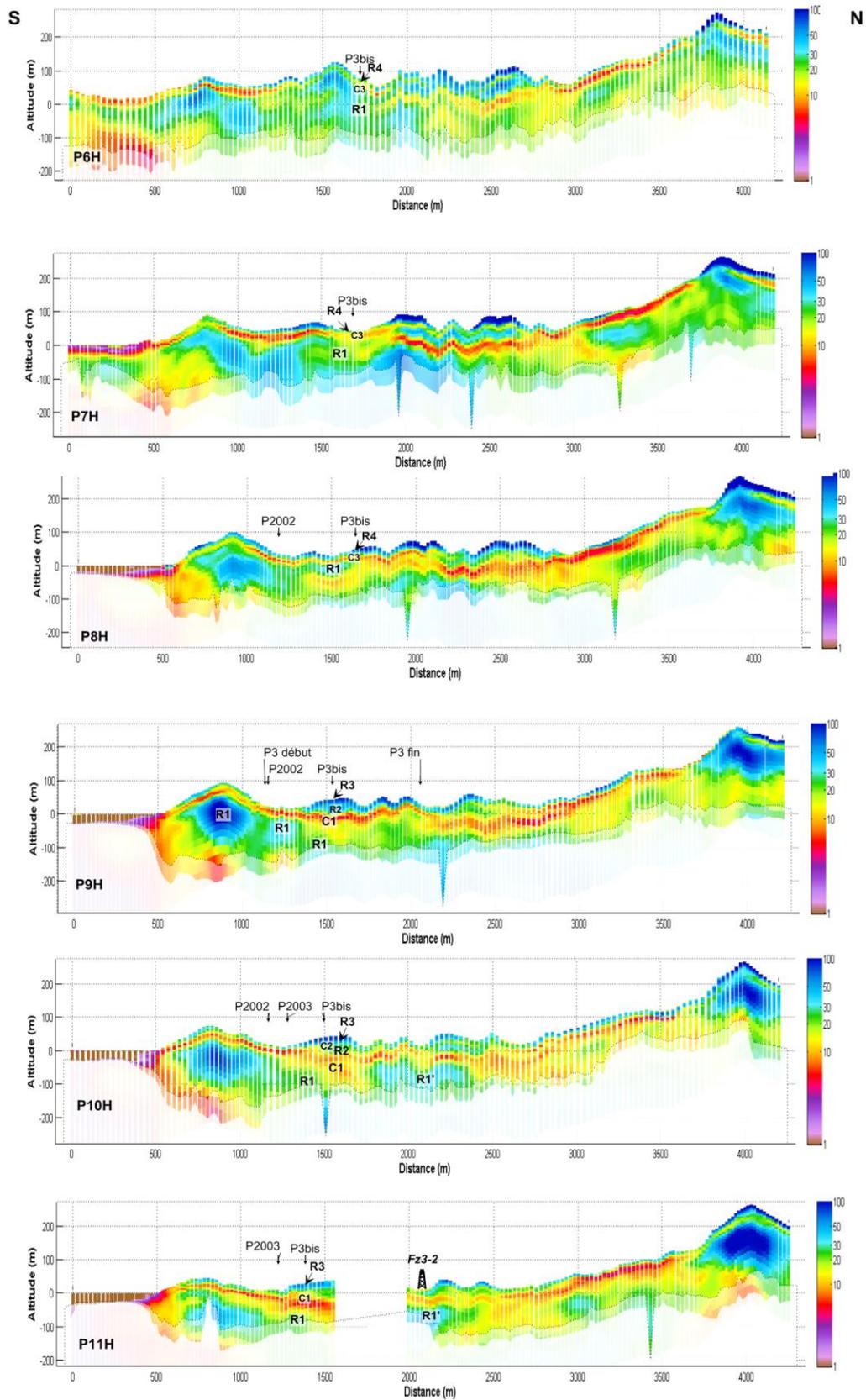


Illustration 12 - Profils HéliTEM recoupant les tomographies P3 et P3 bis.

3.4. COCONI : ZONE 4

La localisation des investigations sur la zone 4 est présentée sur l'illustration 13 et en Annexe 9.

La tomographie P4 (Illustration 14) montre sur un substratum conducteur C1 ($\rho < 20 \text{ Ohm.m}$), des unités résistantes discontinues R1 ($40 < \rho < 230 \text{ Ohm.m}$) et R2 ($60 < \rho < 500 \text{ Ohm.m}$) correspondant aux unités respectivement de mêmes noms mises en évidence sur les tomographies de 2012 et 2016 (Illustration 15). Sur P4 la distribution des résistivités est assez hétérogène, complexe par rapport aux tomographies de 2012 et 2016. Cela s'explique par la position de P4 en limite d'extension des unités R1 et R2 telles que mises en évidence sur les profils de 2012 et 2016 qui sont, par opposition, bien tabulaires. Les unités R1 et R2 situées latéralement par rapport au profil P4 créent des artefacts « latéraux, 3D » qui ne sont pas résolus par l'inversion 2D ; ces effets latéraux se manifestent par les blocs conducteurs ou résistants fréquemment interrompus par des discontinuités verticales.

Alors qu'ils sont bien différenciés par les tomographies de résistivité (P4 de 2017 ainsi que sur les tomographies de 2012 et 2016) notamment par leur différence d'altitude au toit, les résistants R1 et R2 semblent généralement confondus sur les coupes héliTEM (Illustration 16) où ils sont identifiés par la seule dénomination R1. Les coupes HéliTEM permettent néanmoins de cerner la zone de plus grand développement en épaisseur et profondeur des résistants R1 et R2 ensembles (zone bleutée sur l'illustration 13). Le résistant R1 qui s'étend préférentiellement à l'ouest pourrait être la continuité des affleurements de lave basique observées dans les vallées du Mro Oua Coconi et du Mroni Rouaka à des altitudes conformes avec un faible pendage est de l'ensemble. Le conducteur C2 et le résistant R3 sont alors interprétés comme le profil d'altération de la coulée R1. C'est dans cette zone que nous recommandons d'implanter les forages hydrogéologiques car ils permettront de recouper la plus grande puissance du résistant R1 qui représente une formation a priori favorable. Cette zone est limitée à 1 km² mais le résistant R1 se développe au-delà vers le nord au-delà la RN2 et à l'ouest (avec toutefois une puissance plus réduite) pour un bassin global estimé à quelques km².

Les deux sites de forages recommandés sur le profil P4 (Illustration 13 et Illustration 14), visent à recouper la superposition de R1 avec R2'' (Fz4-1) ou R2 (Fz4-2). R2'' apparaît comme une coulée basaltique en continuité potentielle de R2 ou présentant un développement voisin le long d'une paléo-vallée SSW-NNE et se manifeste dans la morphologie actuelle par une colline de même orientation signant ainsi une inversion de relief. Les forages devront être descendus, d'après les données de résistivité, à 130-150 m pour atteindre la base de R1.

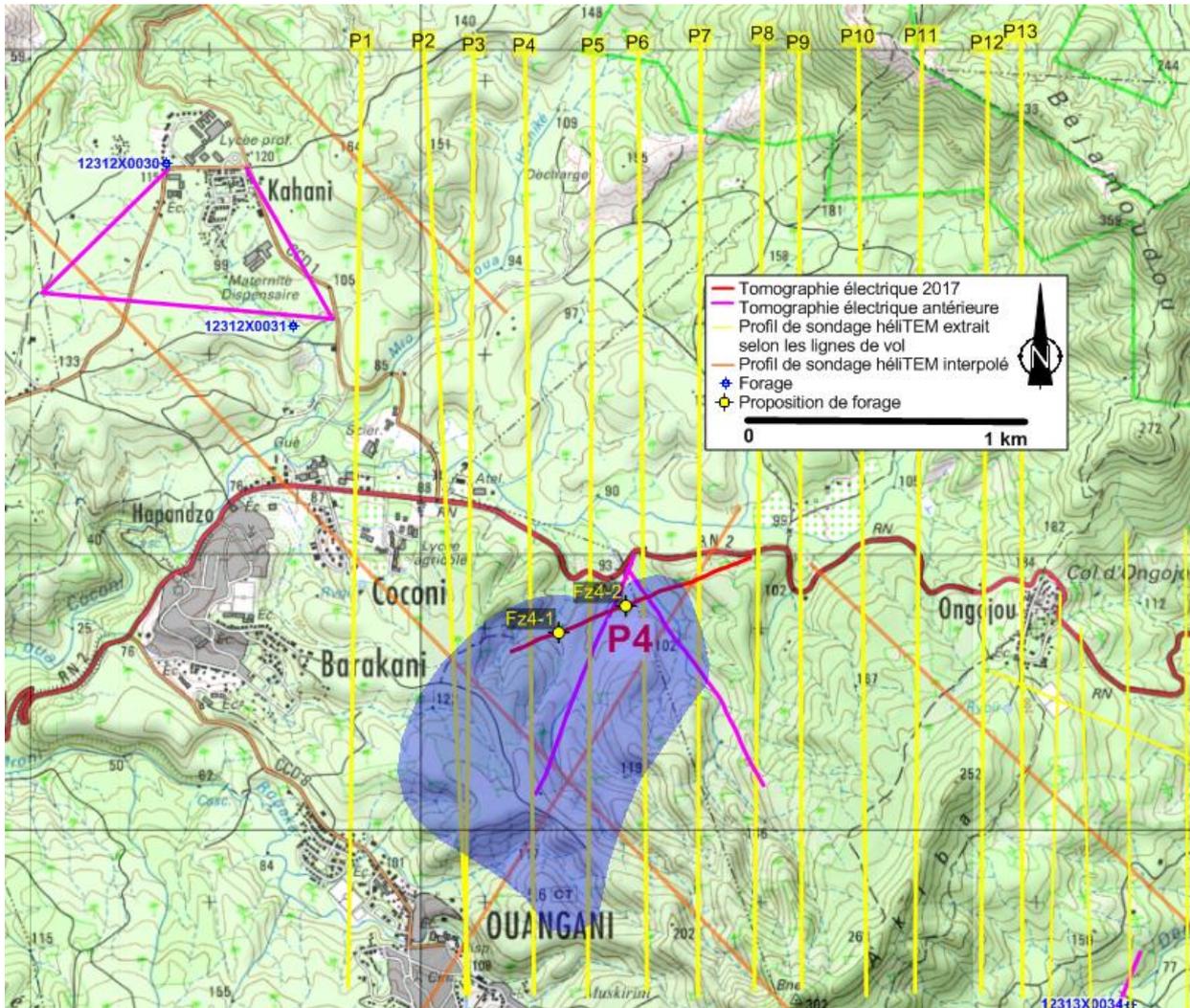


Illustration 13 - Plan d'implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz4-1, Fz4-2) sur la zone 4. La zone bleutée cerne l'extension de la cible R1, R2 des forages.

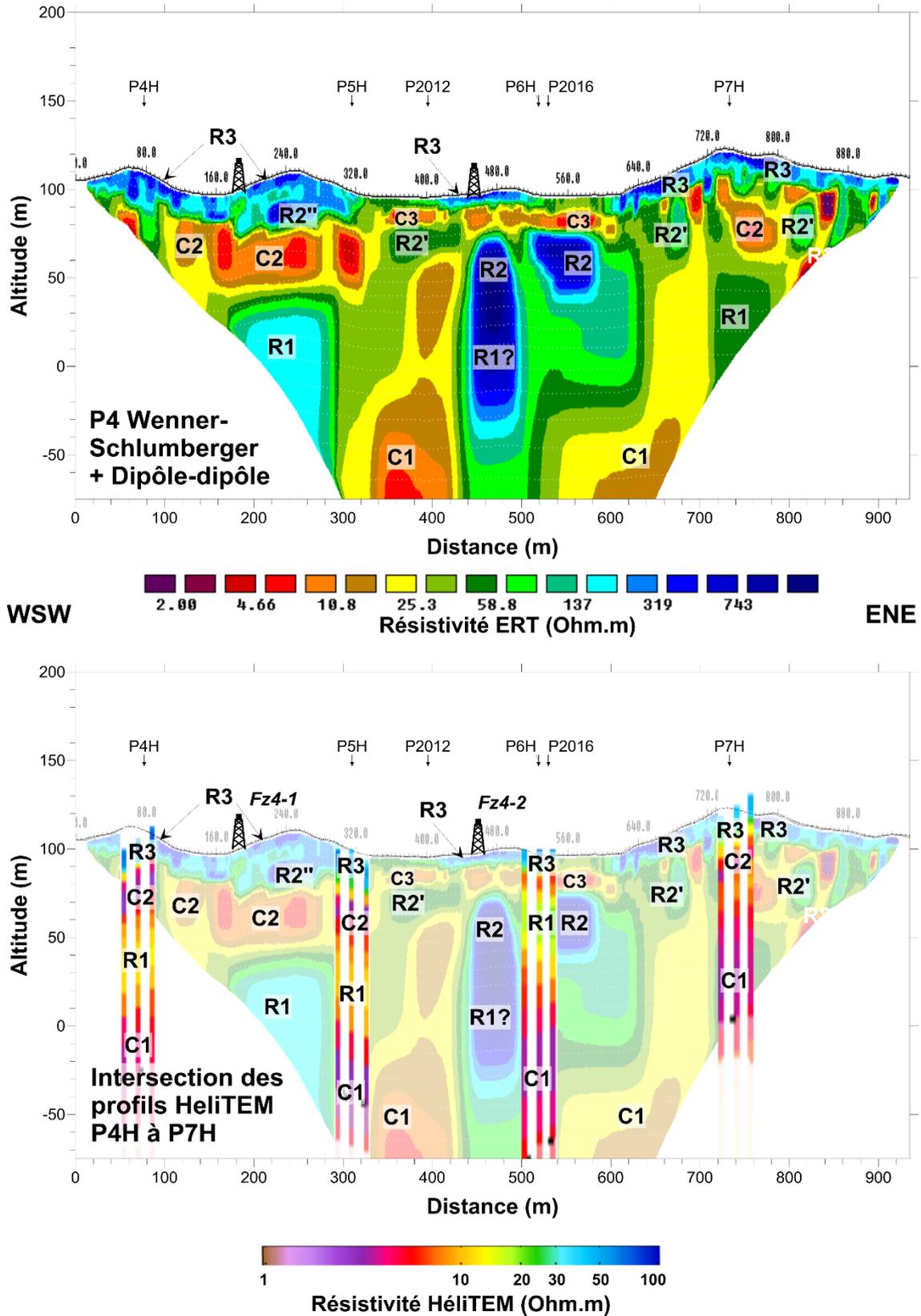


Illustration 14 - Synthèse des observations sur la zone 4 (Investigations ERT de 2017). Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

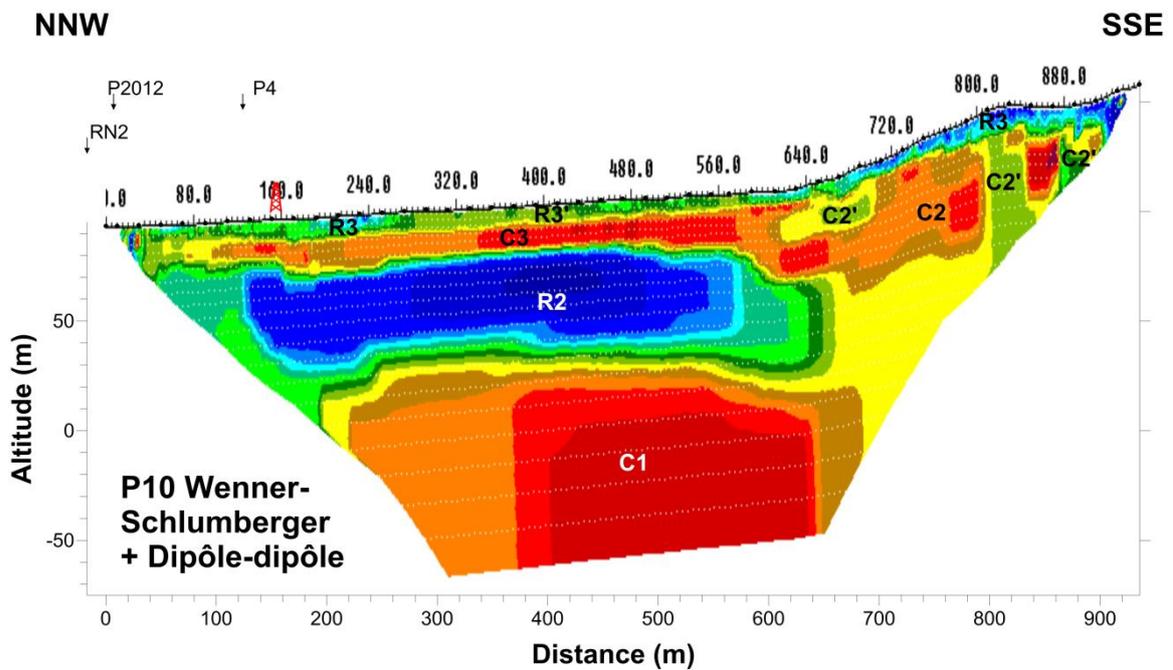
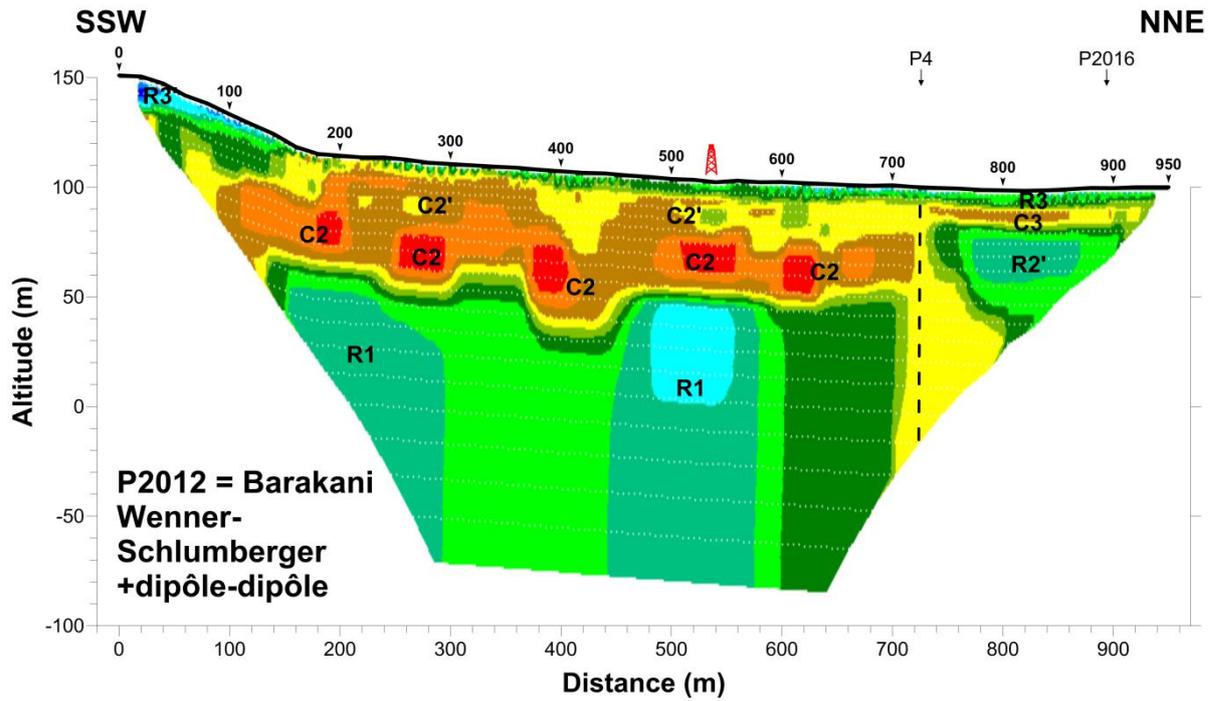


Illustration 15 - Synthèse des observations sur la zone 4 (rapport BRGM/RP RP-66923-FR). Investigations ERT de 2012 et 2016. Les propositions de forage de 2016 pour le projet de développement agricole sont figurées par des rîgs rouges.

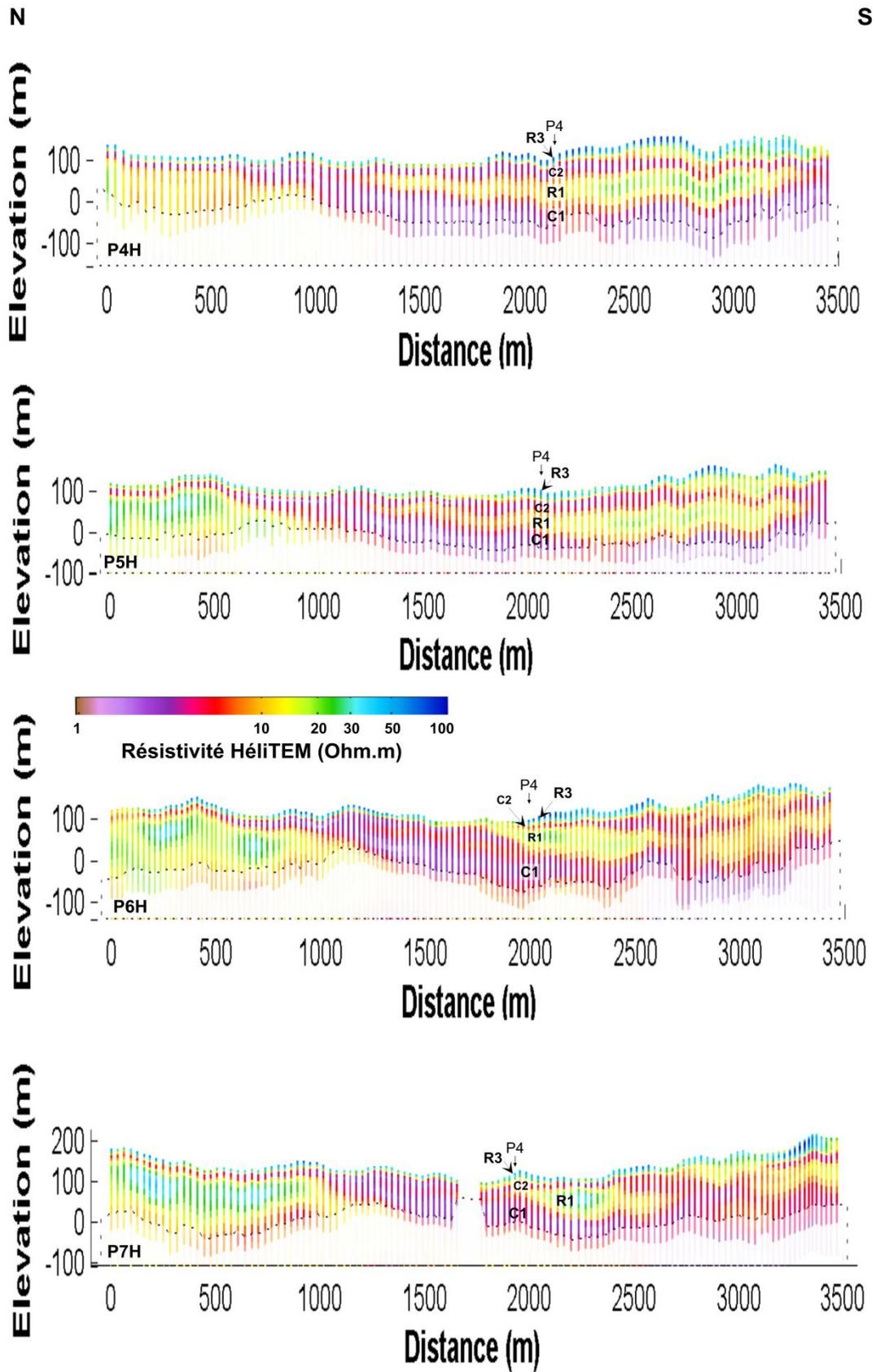


Illustration 16 - Profils HéliTEM recoupant le profil P4.

3.5. MIRERENI : ZONE 5

La localisation des investigations sur la zone 5 est présentée sur l'illustration 17 et en Annexe 9.

La tomographie P5 (Illustration 18) montre sur sa partie occidentale une structure profonde hachée par de nombreuses discontinuités verticales limitant les unités conductrices, C1 et résistantes, R1.

Dans la partie orientale, on observe une structure plus simple avec un substrat conducteur C1 ($5 < \rho < 25$ Ohm.m) surmonté par une unité résistante R2 ($150 < \rho < 750$ Ohm.m) de 30 à 50 m d'épaisseur. R2 est recouvert par un conducteur C2' ($5 < \rho < 60$ Ohm.m) dont l'épaisseur augmente sous le relief et lui-même surmonté par un résistants R4 ($150 < \rho < 750$ Ohm.m) d'épaisseur assez constante (10 à 15 m). La série R2-C2'-R4 peut être interprété comme le profil d'altération des coulées laviques R2.

L'examen des profils héliTEM (Illustration 19) indique que le profil P5 est implanté à la limite des deux séries résistantes R1 et R2. Comme pour le profil P4, cette situation explique les discontinuités verticales marquées affectant la partie occidentale de la tomographie.

Les propositions de forages (Fz5-1 et Fz5-2) visent la zone centrale du profil, point bas topographique ainsi que la plus grande épaisseur et la profondeur minimale des unités R1, R1' qui expriment potentiellement la coalescence des séries résistantes R1 et R2 et sont, de par leur résistivité élevées, des cibles hydrogéologiques favorables en référence au schéma présenté en 2.5.1.

La faible continuité des unités R1 et la couverture potentiellement insuffisante du seul profil P5 pour couvrir la structure probablement 3D du massif peut conduire à des imprécisions sur les limites des blocs résistants et conducteurs et par suite à une implantation imprécise des forages hydrogéologiques sur les cibles visées dans cette zone 5. Les forages devront être descendus à au moins 100 m pour recouper la majeure partie des unités résistantes R1, R1'.

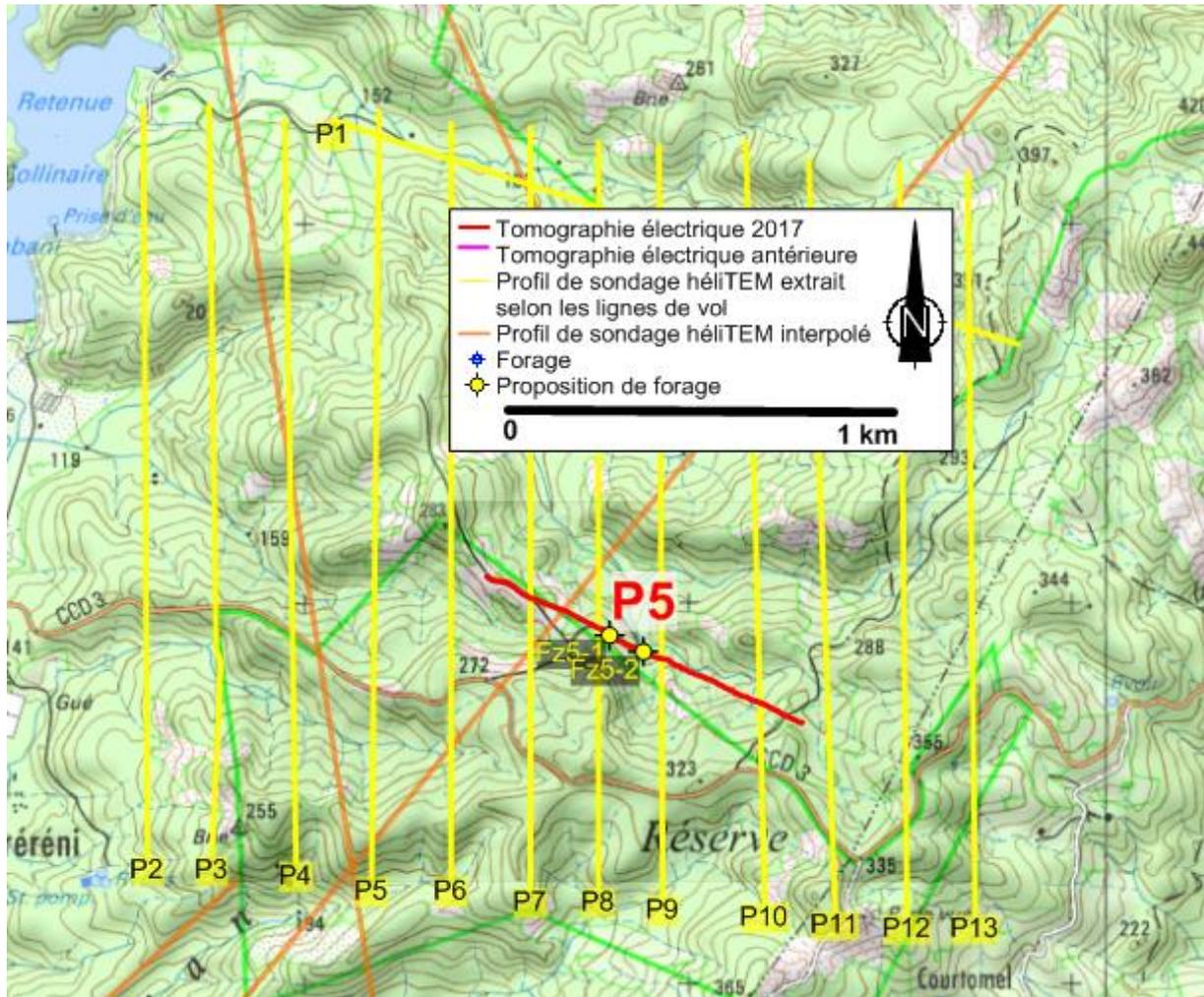


Illustration 17 - Carte d'implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz5-1, Fz5-2) sur la zone de Mirerini.

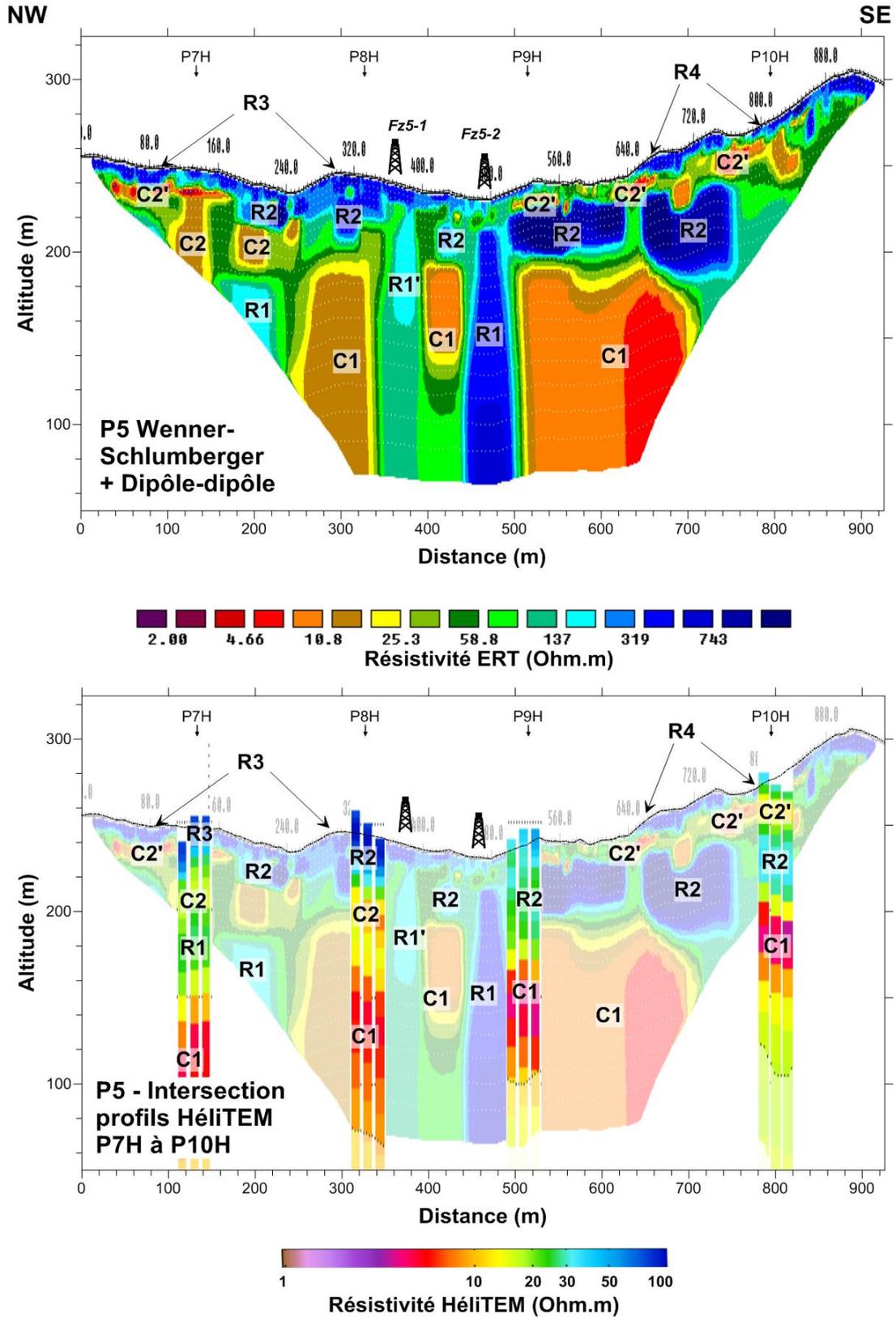


Illustration 18 - ERT P5 réalisé Synthèse des investigations sur la zone de Mirereni. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

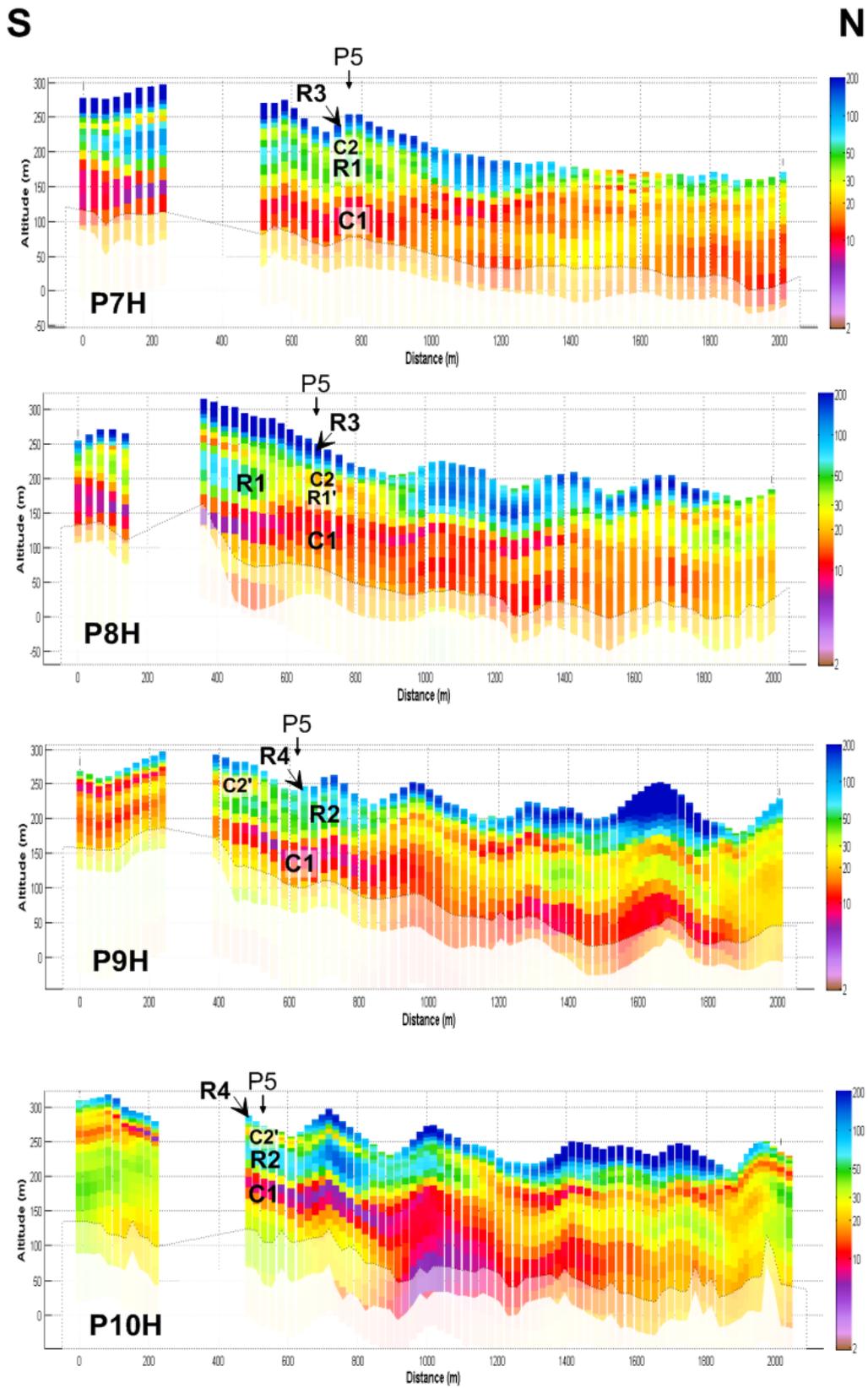


Illustration 19 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P5.

3.6. BOUYOUNI MERESSE : ZONE 6

Les implantations des investigations sur la zone 6 sont présentées sur l'illustration 20 et en Annexe 9. La tomographie électrique P6 (Illustration 21) met en évidence, sur un substrat conducteur C1 ($\rho < 40 \text{ Ohm.m}$, surtout apparent sur la tomographie de 2011 et sur les profils HéliTEM, Illustration 22), un résistif R1 ($100 < \rho < 500 \text{ Ohm.m}$) dont l'épaisseur dépasse 100 m.

Dans la partie SW de la zone, sous le relief, R1 est surmonté par un conducteur C2 ($5 < \rho < 20 \text{ Ohm.m}$) atteignant 30-40 m d'épaisseur. Dans la partie NE et sur le profil de 2001, C2 est réduit à 10-20 m et recouvre un résistif R2 qui par place surmonte R1 par l'intermédiaire de C1' ou s'agglomère à R1 (vers les abscisses 550-600 m). L'intercalation en écharpe de C1' vers les abscisses 400-500 m est un possible effet latéral et montre une complexité de l'agencement des deux niveaux R1 et R2 qui est, par ailleurs, bien illustrée sur les profils HéliTEM séries P11, P12 et P13 (Illustration 22).

A l'extrémité NNE (P2001), on distingue encore un résistif R4 qui vient en surface ; sa continuité avec R2 est possible mais n'est pas évidente sur le profil de 2001 alors que les profils HéliTEM montrent une épaisseur plus réduite (que l'ERT) et une continuité avec R3.

En HéliTEM, on trouve une disposition comparable et l'investigation plus profonde et plus étendue permet de mieux observer le substrat C1 sur la majeure partie de la zone étudiée. Le résistif R1 est bien exprimé sur P11H et P12H (Illustration 22) et en particulier sur P12H où il atteint sa plus grande épaisseur. La complexité des imbrications entre R1 et R2 est apparente avec R1 bien développé sur P11H et P12H, puis moins développé sur P13H et P14H alors que R2 est mieux marqué.

C1 est attribué aux systèmes volcaniques anciens profondément altérés constituant le substrat de séries volcaniques plus récentes où peuvent être distinguées différentes coulées et inter-coulées. D'après le profil HéliTEM P7H et la carte géologique au 1/30000 (cf. Annexes 2 et 9), le résistif R2 est à rapprocher des laves saines ou peu altérées observées à l'affleurement au niveau de la cascade de Bouyouni, 1 km à l'est. Sur la base de résistivités semblables, on propose d'interpréter le résistif R1 comme une coulée ou une série de coulées laviques peu ou pas altérées.

Les variations d'épaisseur de C2 nous invitent à distinguer deux séries altérées R1-C2-R3 pour la partie sud-ouest du profil P6 et R2-C2-R3 pour la partie nord-est. R2 serait plus récent, surmonte R1, par endroit et montre une altération moins évoluée (C2 moins épais). C2 représenterait la partie basale de l'altération argileuse et conductrice alors que R3 représenterait la partie supérieure bien développée sous le relief (partie sud-ouest de P6).

Par référence au modèle d'aquifère volcanique proposé en 2.5.1. et au forage 12306X0046 dont les niveaux productifs (transmissivité de $6.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, cf. BRGM/RP-52481-FR) sont dans les laves altérées, les cibles hydrogéologiques d'intérêt sont les résistifs R1 et R2 dans les zones où ils sont les plus développés (Illustration 21). Nous proposons deux points de forage hydrogéologique FZ6-1 dans la zone de plus grand développement de R1 et FZ6-2 où la superposition de R2 et R1 est attendue. Ils devront descendre à 130-150 m de profondeur pour atteindre la base de R1.

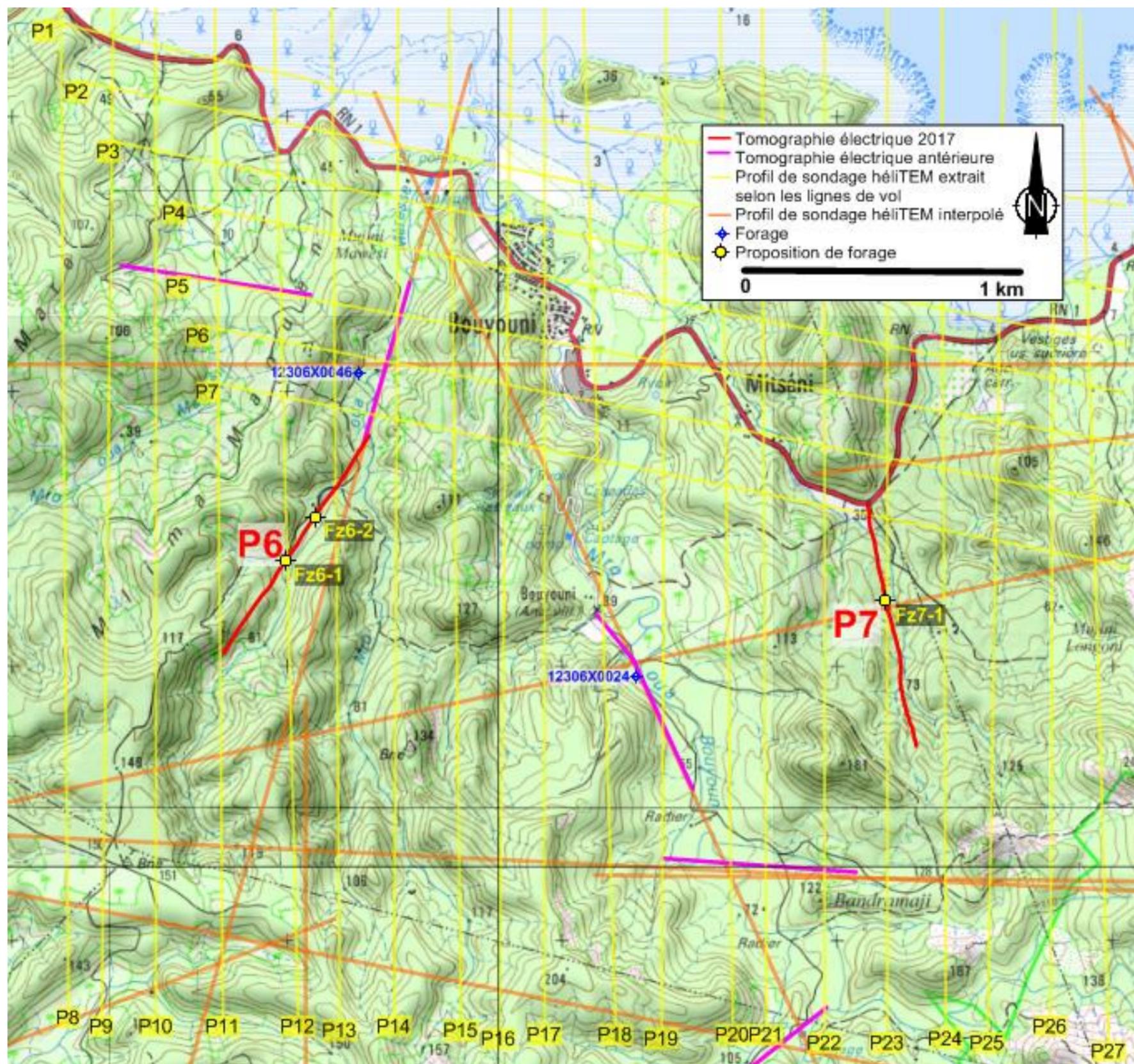


Illustration 20 - Implantation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz6-1, Fz6-2, Fz6-3, Fz6-4) sur les zones 6 et 7.

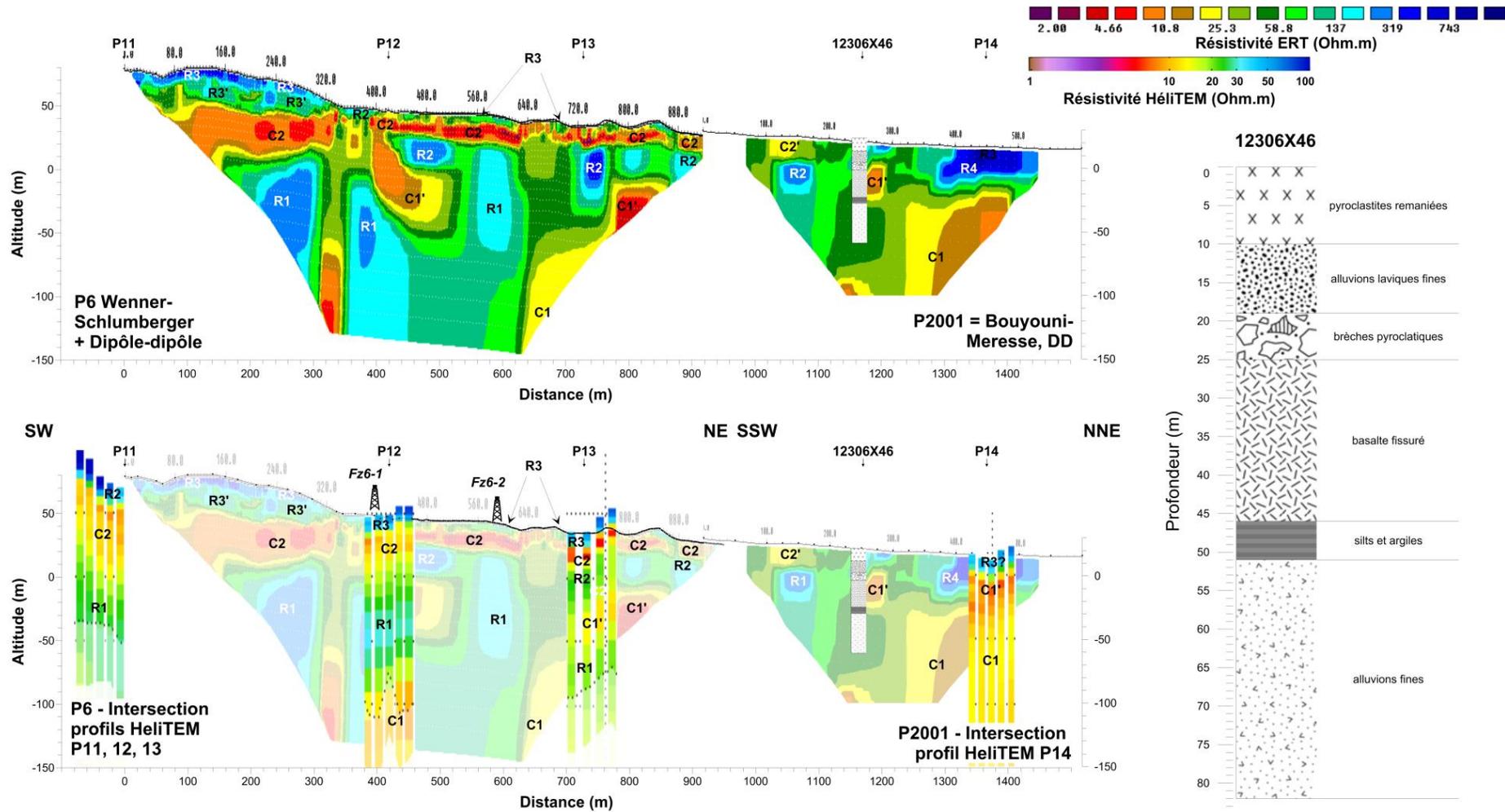


Illustration 21 - Synthèse des observations sur la zone 6. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

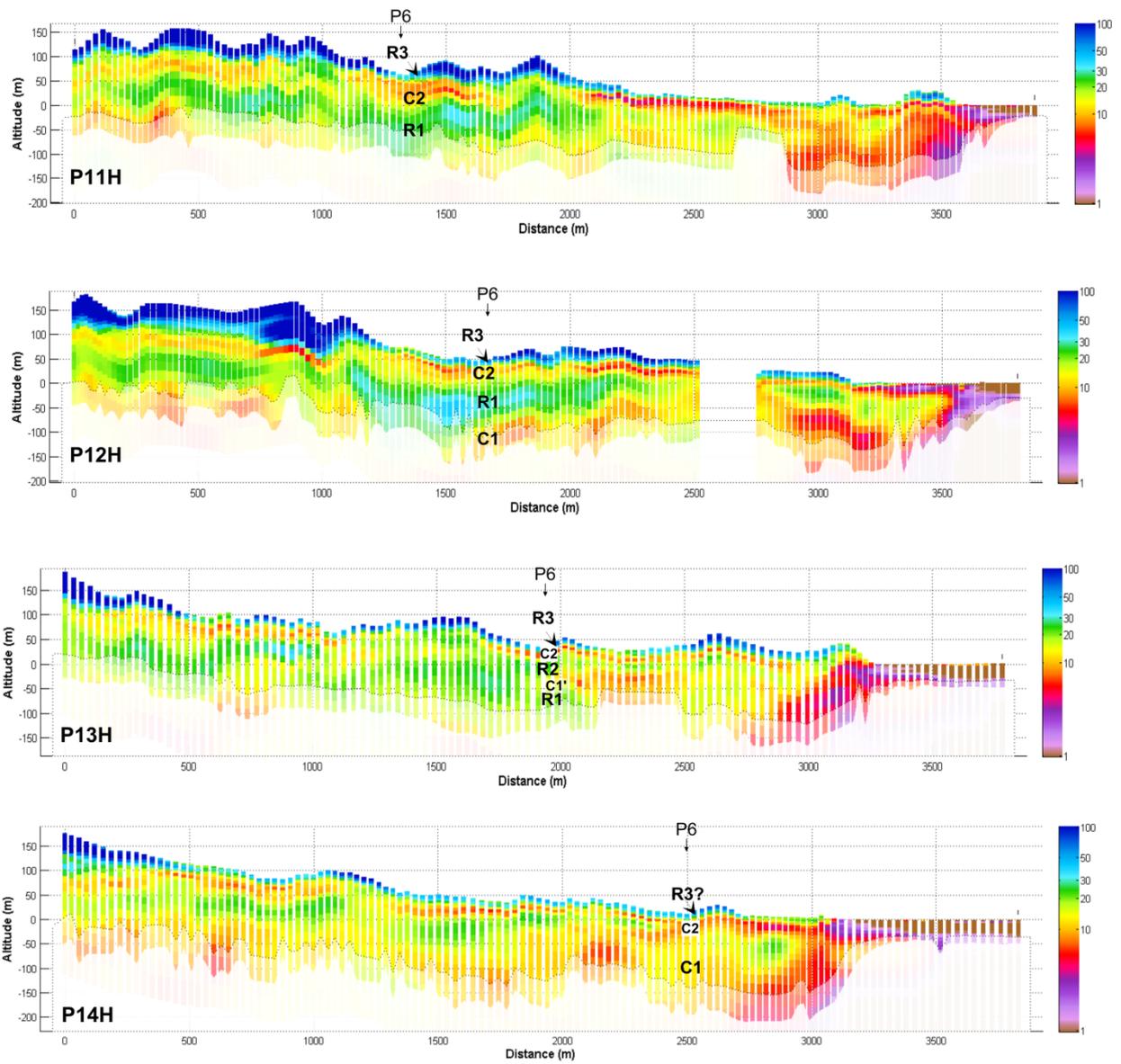


Illustration 22 - Profils héliTEM recoupant la zone 6.

3.7. MITSANI : ZONE 7

Les implantations des investigations sur la zone 7 sont présentées sur l'illustration 20 et en Annexe 9.

La tomographie électrique P7 (Illustration 23) montre un substrat résistant R1, peu marqué ($20 < \rho < 60$ Ohm.m) surmonté par un conducteur épais C2-C2' qui recèle manifestement des niveaux plus résistants intercalés (cf. vers les abscisses 320, 400 et 500 m). Le conducteur supérieur C2, de 20 à 30 m d'épaisseur, est plus marqué en ERT ($5 < \rho < 15$ Ohm.m) mais l'ensemble C2-C2' ressort en un seul niveau conducteur C2 en HéliTEM (Illustration 23).

C2 est surmonté par le résistant R2 attribué à une coulée de lave pas ou peu altérée ($130 < \rho < 500$ Ohm.m) elle-même surmontée par son profil d'altération C3-R3 en accord avec les affleurements observés dans la ravine. C3 ($5 < \rho < 25$ Ohm.m) représente la partie basse du profil d'altération et R3 sa partie supérieure. L'observation sur le terrain de venues d'eau au toit de R2, fissuré montre que ces niveaux drainent les altérites qui les surmontent. Il est donc aussi possible que la teneur en eau contribue au changement de résistivité observé dans le profil d'altération entre C3 et R3.

La cohérence générale des résultats HéliTEM et ERT dans cet environnement globalement tabulaire mais néanmoins complexe avec des variations d'épaisseur significatives et une topographie marquée est remarquable (Illustration 23).

Nous proposons de cibler le résistant R1 dans la zone de son maximum d'épaisseur tel que montré par le profil HéliTEM P23H et en visant aussi de recouper les résistants intercalés, les mieux marqués en ERT, dans l'ensemble C2-C2'. Le forage devra descendre à 150 m afin d'atteindre la base de la cible R1.

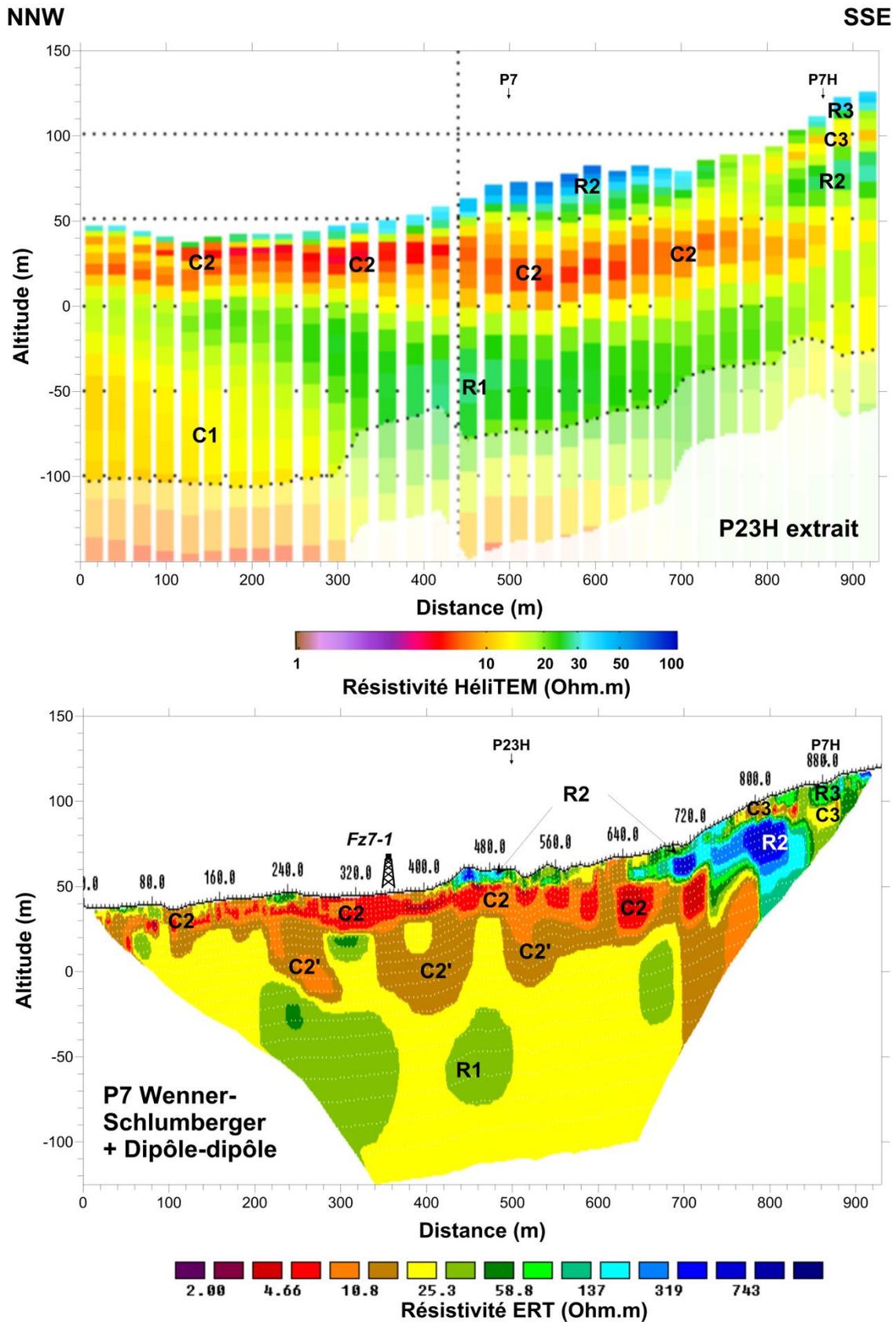


Illustration 23 - Synthèse des observations sur le site 7. En haut coupe HéliTEM P23H, en bas coupe ERT P7. P23H est subparallèle à P7. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

3.8. MROWALE : ZONE 8

Les implantations des investigations sur la zone 8 sont présentées sur l'illustration 24 et en Annexe 9.

La zone 8 se situe à la limite entre deux domaines géologiques (cf. extrait de la carte géologique en Annexe 9):

- Au nord, les larges séries volcaniques se développant à l'ouest sur le versant est du Massif du Digo,
- Au sud, la couverture de cinérite du plateau de Combani.

La tomographie P8 (Illustration 25) montre une structure globalement tabulaire avec la succession suivante, de bas en haut :

- Un substrat conducteur C1 ($\rho < 40 \text{ Ohm.m}$) mal défini sur P8 car en limite d'investigation mais bien apparent sur les sections HéliTEM (Illustration 26).
- Une unité résistante R1 ($60 < \rho < 300 \text{ Ohm.m}$) de 60 à 80 m d'épaisseur.
- Une unité résistante C2 ($5 < \rho < 40 \text{ Ohm.m}$) de 15 à 30 m d'épaisseur pouvant s'approfondir localement (près de 50 m d'épaisseur autour de l'abscisse 750 m).
- Une couverture résistante R2 dont la base est quasiment horizontale et s'épaississant sous les reliefs.

La carte géologique au 1/30000 (cf. Annexe 9), montre à la faveur de l'abaissement topographique en bord de mer, un ensemble constitué d'une série de laves basaltiques surmontée par ses altérites (isaltérites et allotérites) qui recouvrirait toute la région à l'ouest du Mlima Digo. Cet ensemble est, par son altimétrie, compatible avec la série R1-C2-R2 observée au nord du profil P2011, qui est, par conséquent, interprétée comme le profil d'altération d'une série de coulées laviques dont la base s'établit vers -50 m d'altitude.

La partie sud du profil P2011 (Illustration 25, en haut) se situe dans le domaine des cinérites d'après la carte géologique et le résistants R2 observé dans ce secteur pourrait correspondre aux cinérites altérées telles qu'observées en 2016 sur le Plateau de Combani et confirmée par les forages locaux (rapport 12306X0009 et 10, cf. BRGM/RP-66923-FR). Les cinérites et la partie supérieure du profil d'altération se manifestent donc par les mêmes résistivités et ne peuvent être distinguées sur les tomographies électriques et les profils HéliTEM.

Sur le profil P8, le résistants R2 peut, selon ce schéma, correspondre soit à la partie supérieure du profil d'altération des séries laviques, soit aux cinérites altérées. Le conducteur C2, en revanche, correspond plus certainement à la partie inférieure du profil d'altération des coulées laviques qui a été par ailleurs échantillonné dans le forage 12306X0013 situé à 300 m à l'ouest du profil P8.

La proposition de forage (Fz8-1) vise la série de coulées laviques peu altérée représentée par le niveau résistants R1 là où elle est la plus proche de la surface c'est-à-dire en fond de vallée à l'intersection entre les deux profils. Le forage devra être descendu à au moins 120 m de profondeur pour dépasser les niveaux altérés qui apparaissent peu productifs dans le forage 12306X0013 et atteindre la base du niveau résistants R1.

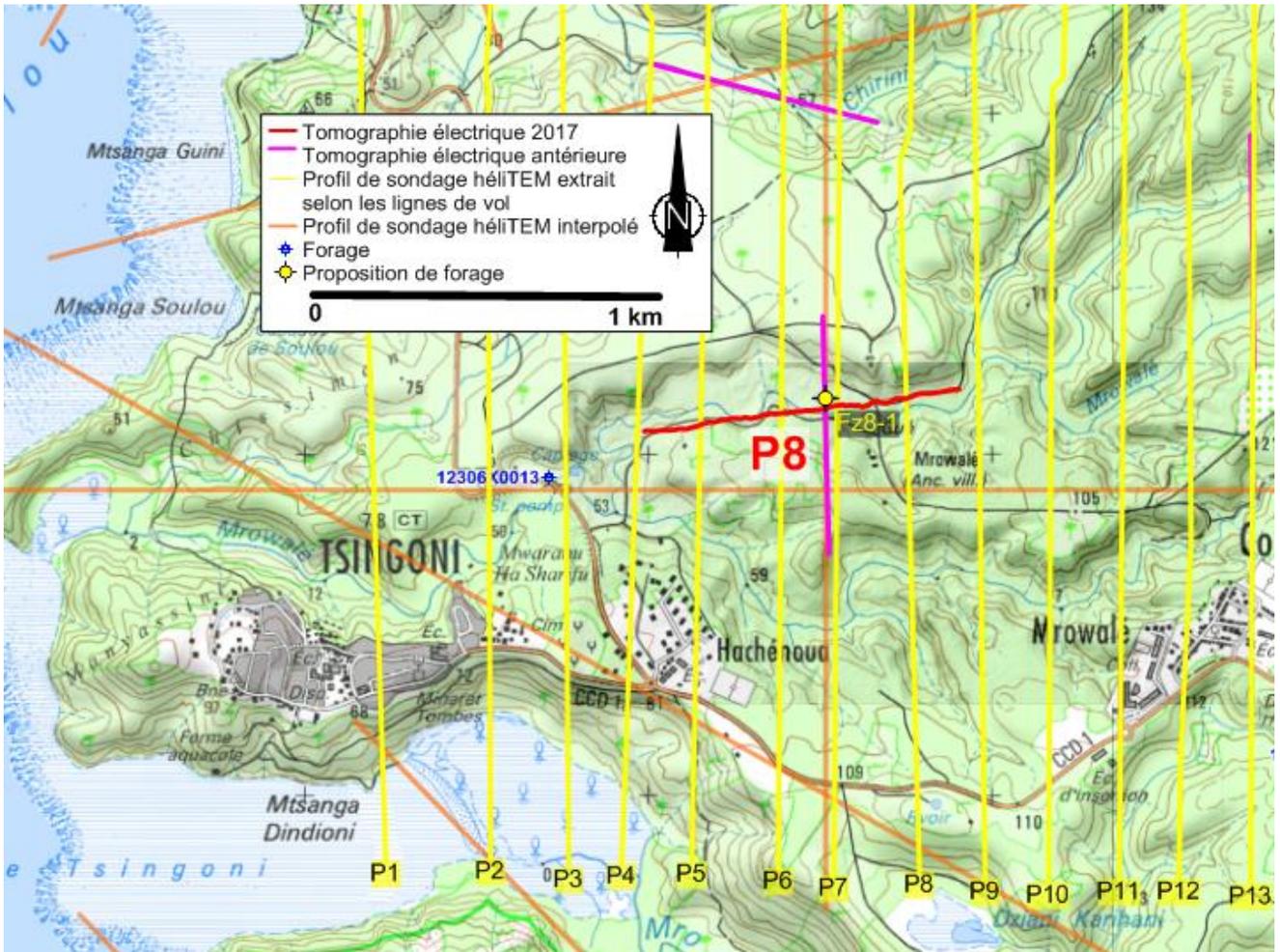


Illustration 24 - Carte de localisation des investigations et du forage recommandé en résultat de la présente étude (Fz8-1) sur la zone de Mrowale.

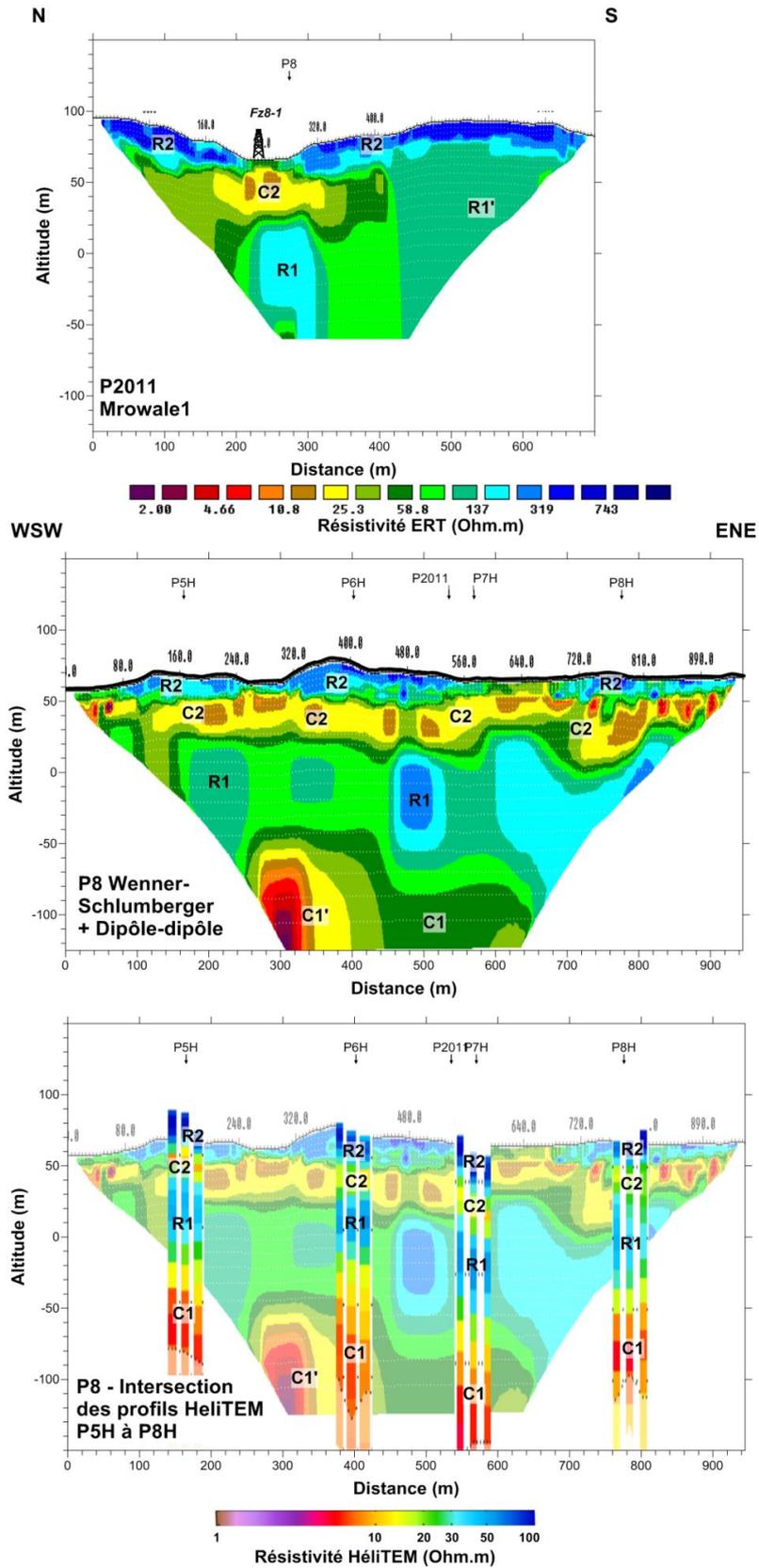


Illustration 25 - Synthèse des observations sur la zone de Mrowale. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

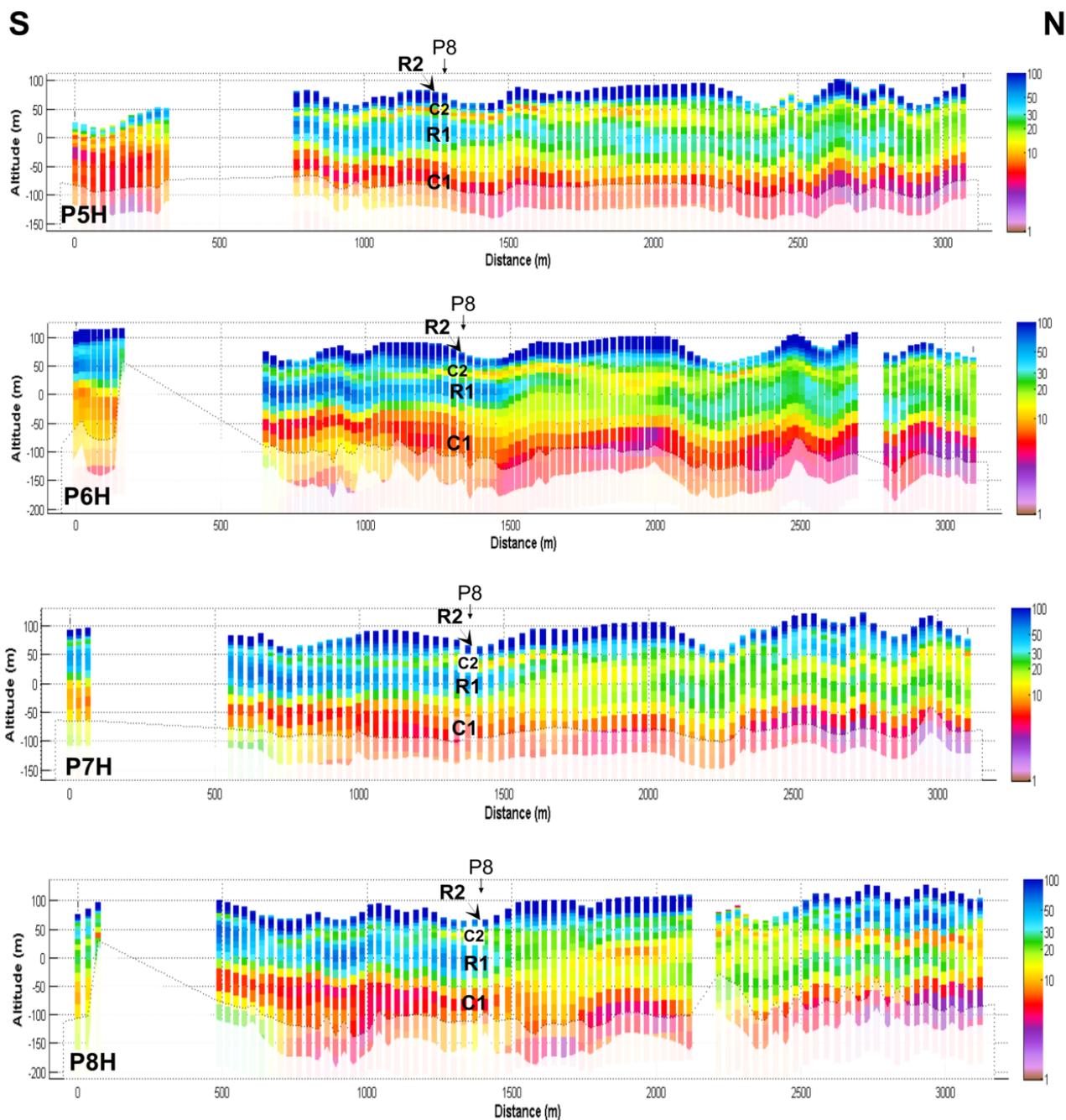


Illustration 26 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P8.

3.9. COMBANI : ZONE 9

Les implantations des investigations sur la zone 9 sont présentées sur l'illustration 27 et en Annexe 9.

La tomographie P9 (Illustration 28) présente une structure relativement uniforme avec trois niveaux, soit de bas en haut :

- Le substrat résistant R1 ($5 < \rho < 15 \text{ Ohm.m}$) dont la base n'est pas atteinte en ERT et dont le toit présente une surface irrégulière. Les profils héliTEM (Illustration 29) montrent que R1 a une épaisseur d'environ 50 m et repose sur un conducteur C1. On observe aussi sur ces sections que R1 est potentiellement en relation avec des séries résistantes descendant des sommets avoisinants au sud en particulier dans la partie centrale du profil P8.
- Une couverture conductrice C2 ($5 < \rho < 15 \text{ Ohm.m}$) d'épaisseur irrégulière et affleurant sur la plus grande partie du profil
- Une couverture résistante R2 ($100 < \rho < 500 \text{ Ohm.m}$) qui recouvre C2 dans la partie centrale du profil.

En l'absence de calage, l'unité C2 est interprétée comme la frange altérée d'une série de coulées de laves représentée par R1. La situation de R2 à mi-pente invite à l'interpréter comme des dépôts de pente (éboulis voire mouvement de terrain) provenant du démantèlement des formations résistantes constituant le sommet du profil d'altération et visibles sur les hauts topographiques dominant la zone d'étude (cf. profils héliTEM),

La proposition de forage Fz9-1 cible le résistant R1 dans la zone où il est le plus superficiel et où il apparaît en connexion avec les séries résistantes descendant des reliefs avoisinant. Le forage devra être descendu de manière à recouper la totalité de la série résistante R1 soit environ 100 m si l'on se réfère aux profils HéliTEM. Toutefois cette profondeur pourrait être sous-estimée et, par mesure conservatoire, il est raisonnable d'envisager un approfondissement à 130 m.

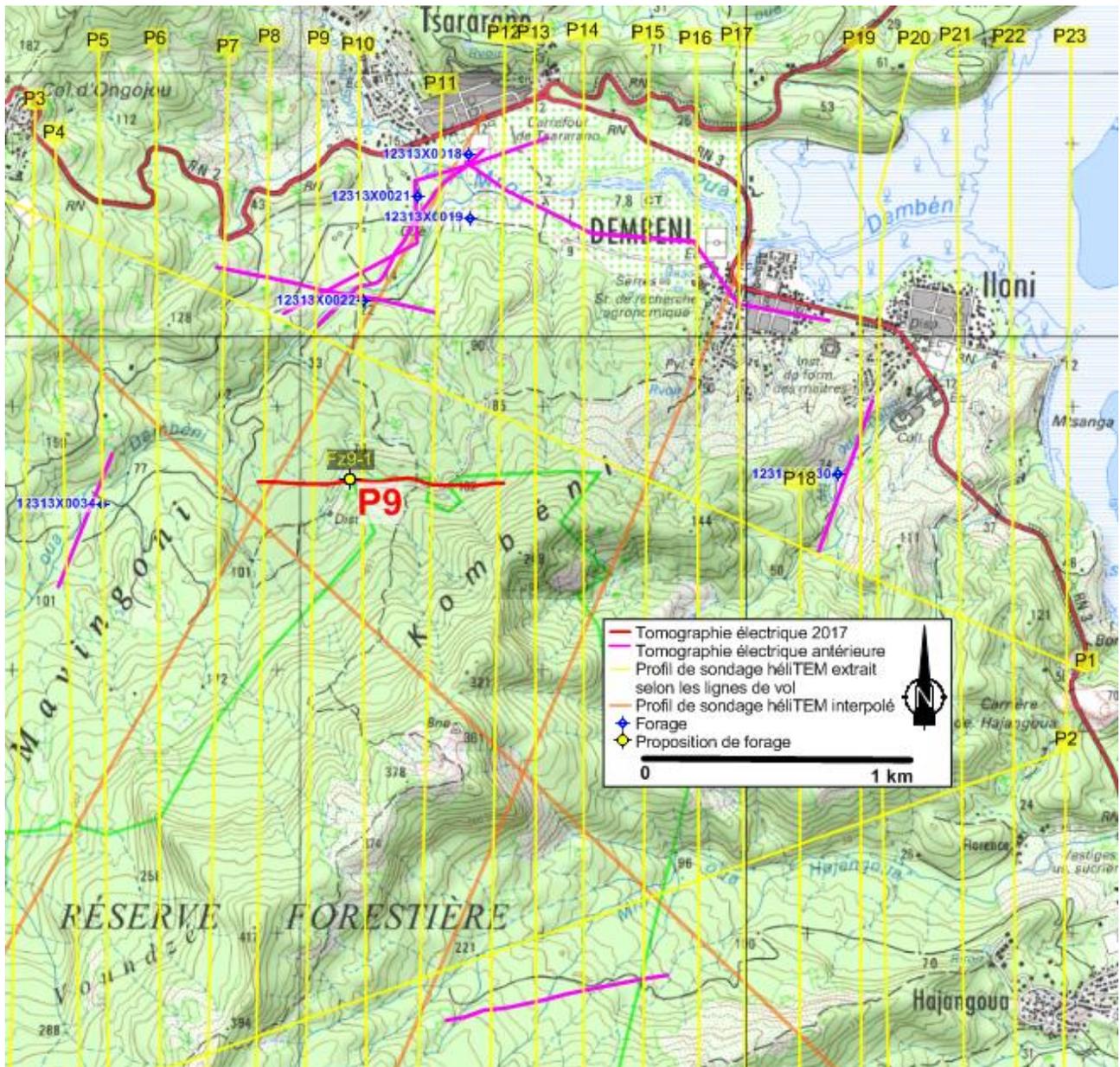


Illustration 27 - Carte de localisation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz9-1) sur la zone de Dombeni.

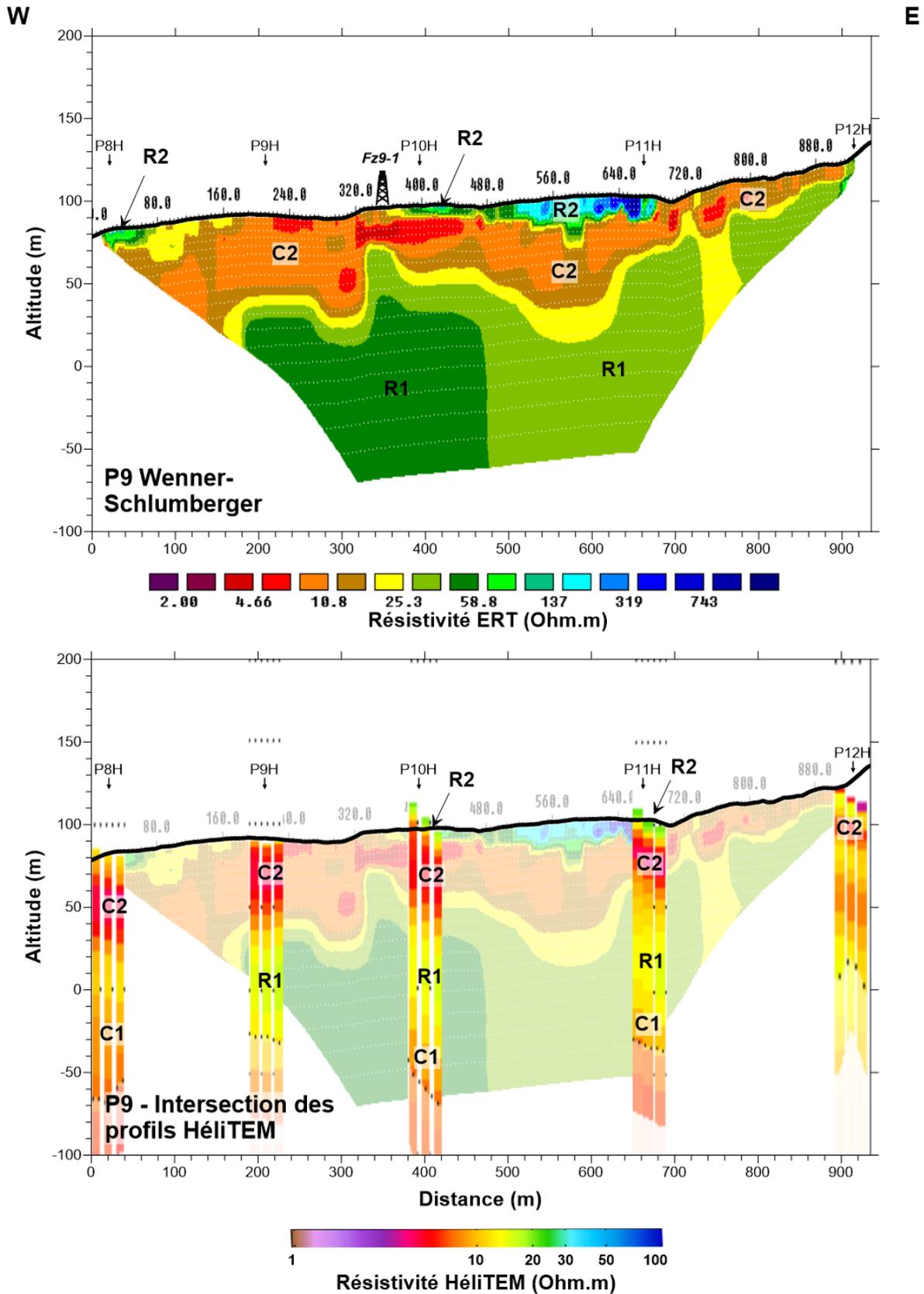


Illustration 28 - Synthèse des observations sur la zone de Dembény. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

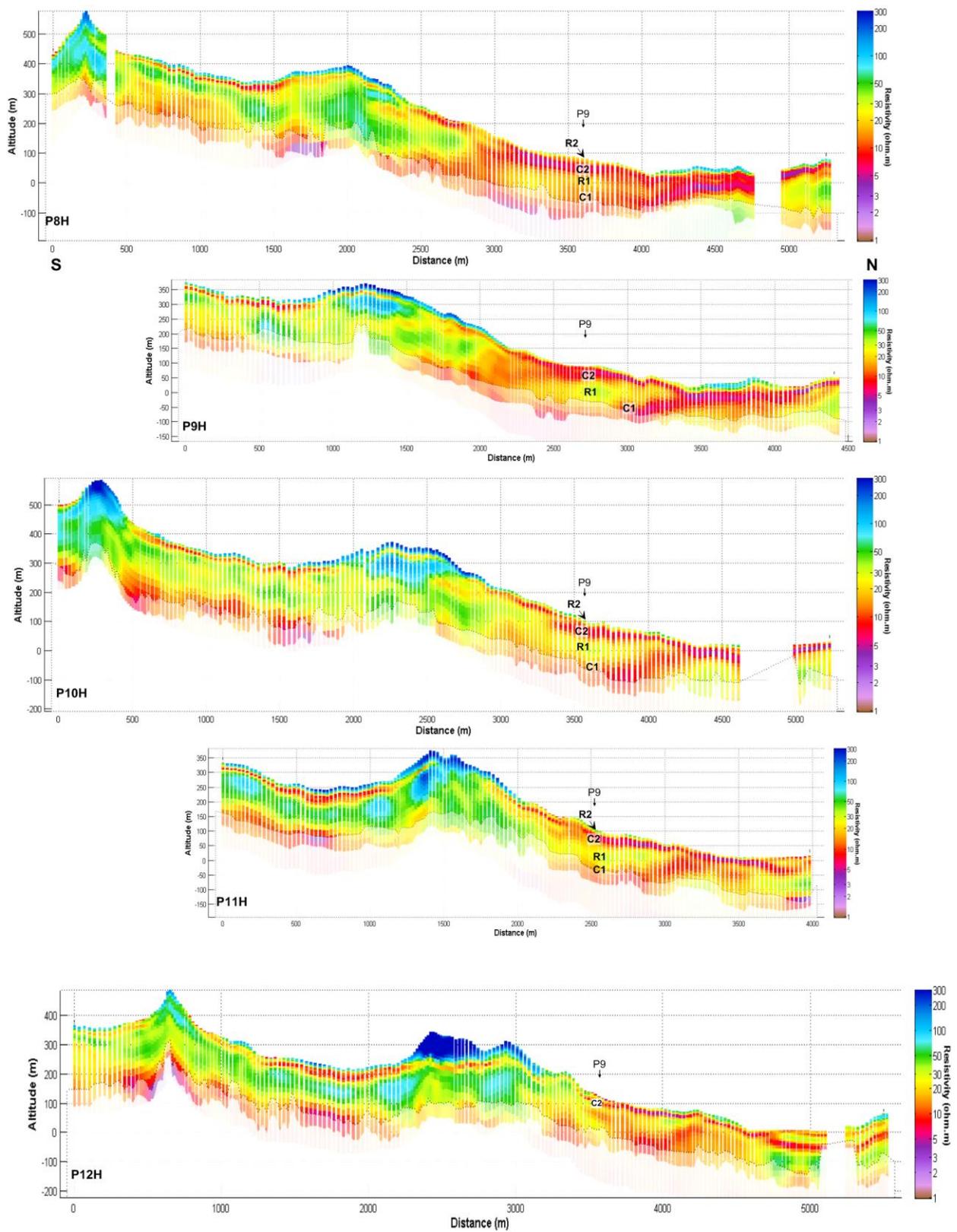


Illustration 29 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P9.

3.10. ANKETABE : ZONE 10

Les implantations des investigations sur la zone 10 sont présentées sur l'illustration 30 et en Annexe 9. Le profil P10 est situé dans le prolongement d'un profil réalisé en 2001 (Profil Boungoumouhe, Rapport BRGM/RP-51498-FR). Les données numériques du profil de 2001 n'ont pu être retrouvées ; aussi les résultats correspondant à ce profil sont présentés sous la forme de sections de résistivité extraites du rapport précité avec une échelle de couleur différente des autres sections présentées dans le présent rapport.

La structure générale de la tomographie P10 (Illustration 31) peut être ramenée une succession de 4 couches, soit de bas en haut :

- Un substrat résistant R1 ($60 < \rho < 500$ Ohm.m) dont le toit s'approfondit au nord-ouest (altitude -50 m) et remonte au sud-est (altitude 50 m env.). Sa base n'est pas atteinte en ERT mais pourrait s'établir vers -80,-100 m d'altitude d'après les profils HéliTEM (Illustration 32). R1 est recoupé par de nombreuses discontinuités dans la partie orientale du profil mais ces discontinuités pourraient imager un contact latéral comme observé sur d'autres profils de cette étude (P4 et P5).
- Une épaisse (60 m) unité conductrice, C1 ($3 < \rho < 40$ Ohm.m) recouvre le substrat R1 et arrive à l'affleurement dans la partie orientale du profil.
- Une couche résistante marquée, R2 ($140 < \rho < 1000$ Ohm.m) et épaisse (50 m) recouvre C1 dans la partie ouest du profil.
- Au-dessus de R2 la succession C2, R3 d'épaisseur réduite (10-15 m pour chaque couche) constitue les reliefs les plus élevés.

Les résistivités élevées et homogènes ainsi que la morphologie de la base de la couche R2 invitent à l'attribuer à une série de coulées laviques récentes mises en place dans une paléo-dépression topographique. La succession C2-R3 est alors interprétée comme l'altération de cette série.

De la même manière, la succession R1-C1 peut être décomposée respectivement en une série de coulées plus anciennes et son importante frange d'altération. Le résistant R4 serait alors le résidu ou le produit de démantèlement de la partie supérieure du profil d'altération de cette série.

Les propositions de forages visent les unités interprétées comme des séries laviques là où elles sont les plus épaisses et les plus proches de la surface. Fz10-1 vise le résistant R1 malgré que son toit soit à près de 100 m de profondeur. Cette proposition fait l'hypothèse de niveaux aquifères intercalés dans le conducteur C1 mais non révélés par la tomographie (car leur épaisseur est insuffisante, principe de suppression). Le forage devra être descendu à 150 m pour recouper au moins 50 m de l'unité R1. Une implantation alternative pourrait viser R1 vers l'abscisse 750 m où cette unité remonte à 60-70 m d'altitude mais cette option n'a pas été retenue en première hypothèse du fait de sa situation en limite d'investigation de la tomographie. Fz10-2 vise R2 et devra être descendu à 90 m de profondeur pour atteindre la base de la série.

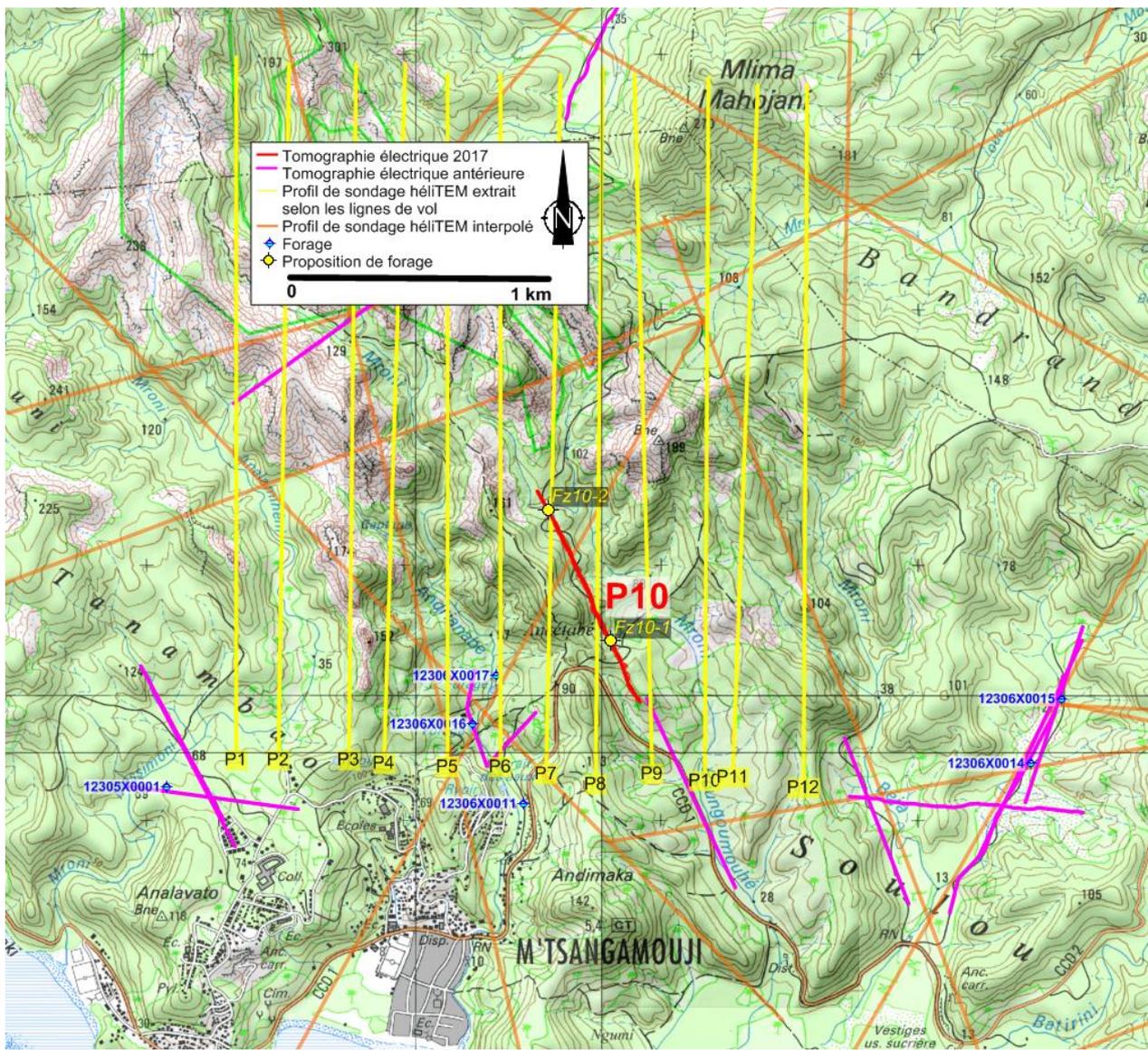


Illustration 30 - carte de localisation des investigations et des forages recommandés en résultat de la présente étude (Fz10-1, Fz10-2) sur la zone d'Anketabe.

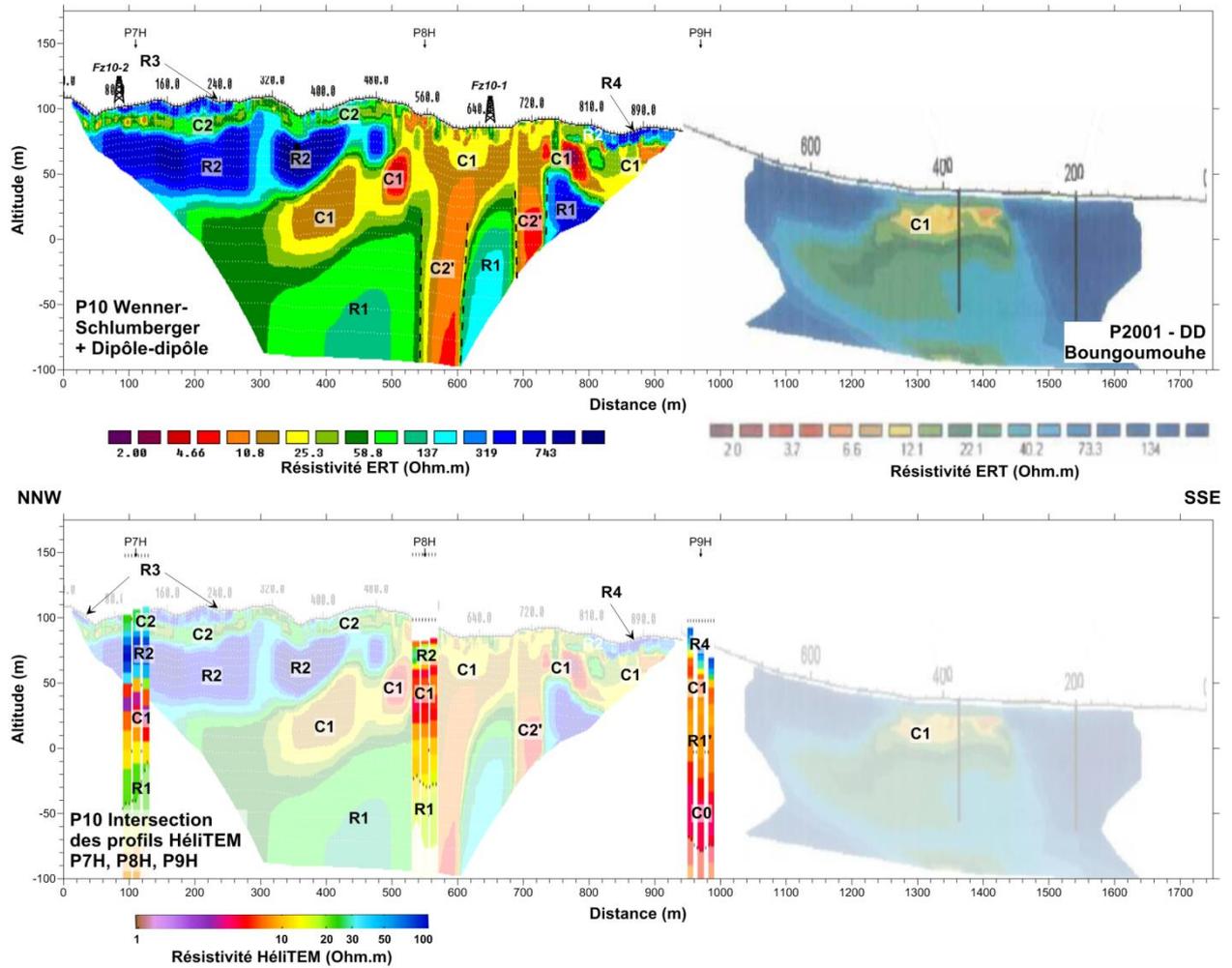


Illustration 31 - Synthèse des observations sur la zone d'Anketahe. Les discontinuités verticales sont représentées par les traits discontinus verticaux. Les rigs noirs situent les propositions d'implantation de forage.

NNW

SSE

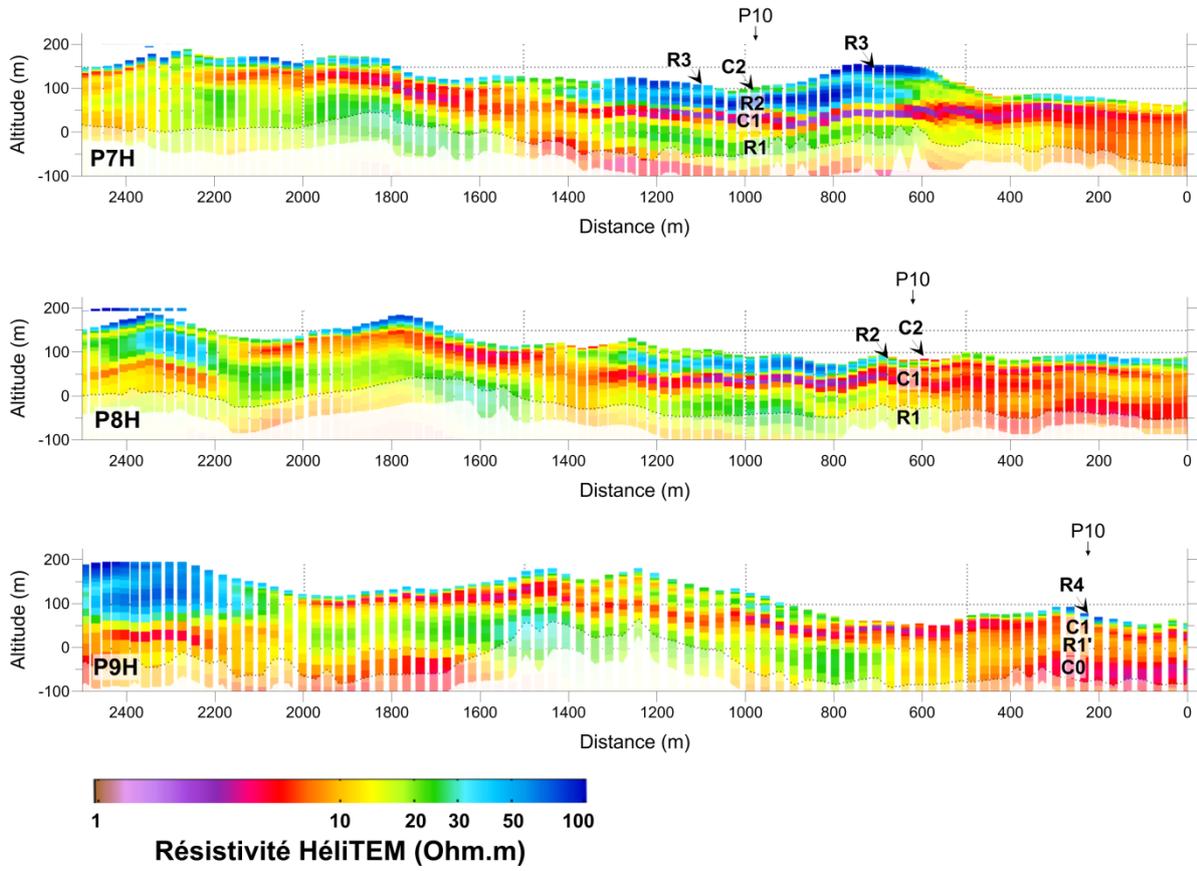


Illustration 32 - Profils HéliTEM recoupant la tomographie P8.

4. Synthèse des résultats : proposition d'implantation de forages

Le tableau suivant résume les propositions d'implantation de forage obtenues par l'interprétation des données acquises en 2017 complétées par les données HéliTEM et ERT existantes.

Secteur géographique (Zone)	Position d'implantation de forage			Prof. forage (m)	Ref. cadastre	Commune	Dist. à la piste (m)
	Nom	X RGM 04 (m)	Y (m)				
Mbouini (Zone 1)	Fz1-1	514744.1	8564388.1	100-130	AZ8	Kani Kéli	70
	Fz1-2	514911.4	8564596.6	100-130	AX8-AX9	Kani Kéli	180
Mronabeja (Zone 2)	Fz2-1	513622.3	8565481.5	150	AT29	Kani Kéli	215
	Fz2-2	513758.0	8565680.0	150	AN33	Kani Kéli	455
Bandrelé (zone 3)	Fz3-1	520695.7	8572993.7	130-150	AL689	Bandrelé	150
	Fz3-2	520823.5	8573566.6	130-150	AK2	Bandrelé	95
	Fz3-3	520474.2	8573072.5	130-150	AB110	Bandrelé	280
Coconi (Zone 4)	Fz4-1	515499.6	8580720.9	130-150	AE106	Ouangani	190
	Fz4-2	515742.4	8580818.5	130-150	AE55	Ouangani	85
Miréréni Combani (Zone 5)	Fz5-1	517029.8	8586650.9	100	AN41	Tsingoni	0
	Fz5-2	517118.2	8586607.6	100	AN41	Tsingoni	30
Bouyouni	Fz6-1	514224.2	8591113.5	130-150	BM43	Brandaboua	30
Méresse (Zone 6)	Fz6-2	514333.3	8591274.3	130-150	BM8	Brandaboua	30
Mitséni (Zone 7)	Fz7-1	516409.4	8590967.2	150	BO8	Brandaboua	140
Mrowalé (Zone 8)	Fz8-1	512749.0	8586898.7	120	AE34	Tsingoni	25
Dembéni (Zone 9)	Fz9-1	518507.0	8579456.3	100-130	AK27	Dembéni	?
Ankétabé (Zone 10)	Fz10-1	509790.2	8590951.4	150	AI230-AI5	M'tsangamouji	0
	Fz10-2	510034.7	8590436.7	150	AI4	M'tsangamouji	655

Tableau 4 : Propositions d'implantation de forages.

5. Conclusion

Onze tomographies de résistivité électrique ont été réalisées sur dix zones présélectionnées pour leur intérêt hydrogéologique en vue d'une exploitation pour la consommation humaine sur la base d'étude BRGM antérieures.

Ces tomographies au sol ont été implantées puis interprétées grâce à une analyse conjointe du modèle de résistivité AEM de Mayotte (obtenu par géophysique héliportée) pour assurer l'investigation la plus performante des zones cibles. Les données de tomographie sont de bonne qualité et se prêtent à une interprétation fiable.

Après examen des résultats des tomographies au sol complétée par la vision plus globale du modèle AEM, 1 à 3 forages d'exploration sont proposés par zone avec des profondeurs de 80 à 150 m. Ils visent prioritairement des formations électriquement résistantes définissant à leurs limites (cas d'une coulée de lave unique) des niveaux potentiellement aquifères (zone fracturée, scoriacée, ...) ou une succession de coulées avec les même caractéristiques aquifères potentielles.

Certaines de ces proposition de forage visent des aquifères ayant déjà montré des potentiels aquifères intéressants lors de forages antérieurs (généralement non exploités) comme sur les zones 1 (Mbouini), 2 (Mronabeja), 3 (Brandelé) , 6 (Bouyouni-Méresse). D'autres en revanche ciblent des aquifères non encore reconnus et testés par forage mais qui sont potentiellement intéressants notamment par leur extension géographique tel qu'imaginé par le modèle AEM (zone4=Coconi, zone8=Mrowalé).

L'interprétation conjointe des données HéliTEM apporte principalement les compléments d'information suivants :

- Précision sur la position de l'invasion salée par rapport à la zone d'intérêt.
- Indication sur l'extension des formations de résistivité présentant un intérêt hydrogéologique, notamment en dehors de la zone d'investigation par tomographie.
- Mise en évidence de formations ayant échappé à l'investigation par tomographie électrique du fait d'une profondeur d'investigation insuffisante.

Les profils HéliTEM ont ainsi permis à différentes reprises de situer le substrat conducteur constituant la base des cibles aquifères. La comparaison précise des résultats des deux méthodes sur chaque profil a permis de bien illustrer leur cohérence globale validant ainsi indépendamment les deux approches. On observe toutefois un écart sur les profondeurs obtenues, peu significatives dans les 50-75 premiers mètres mais qui augmente en profondeur et en particulier dans le cas d'une succession résistant-conducteur-résistant où le conducteur est peu marqué. L'étude et la réduction de cette disparité de résolution des deux méthodes est une voie d'amélioration méthodologique qui n'a pu être traitée dans le présent rapport mais mériterait un développement dédié.

Remarque : les implantations proposées dans ce rapport sont uniquement basées sur la l'interprétation des données géophysiques au droit des zones présélectionnées par le SIEAM. Toutes autres considérations ou contraintes (faisabilité réglementaire, interférences AEP, périmètre protection, nature du foncier, zone protégées...) n'ont pas été prise en compte pour l'établissement de nos propositions.

6. Bibliographie

- Auken E. and Hydrogeophysics Group, 2011. SkyTEM Survey Mayotte 2010. Report Number 2010-10-01, 150p.
- Baltassat J-M, Reninger P-A, Maurice B. (2017) – Tomographies de résistivité électrique appliquée à l'implantation de forages agricoles sur 11 sites à Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-66923-FR, 234 p., 30 ill., 3 tabl., 10 ann.
- Baltassat J.M., P. Maurizot et J. Perrin (2012) – Méthodologie géophysique appliquée à la localisation et la caractérisation des vides souterrains d'origine pseudo-karstique du site de Goro (Nouvelle-Calédonie) – Etape 1 : Synthèse bibliographique, sélection des méthodes et des sites expérimentaux, BRGM/RC-60933-FR, 134 p., 64 ill., 3 annexes.
- Bonnier j., Jossot O., Lachassagne P., Mouron R. (2003) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte – Campagne 2001-2003, Rapport BRGM/RP-52481-FR, 32 p., 12 fig., 4 ann.
- Coulomb R., Parizot M. (2014) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines de Mayotte – 6ème campagne de forage de Mayotte. Propositions d'implantations. Rapport final. BRGM/RP-63837-FR, 82 p., 27 ill., 11 tbl., 3 ann., 1 CD.
- Coulomb R. avec la collaboration de V. Petit et A. Gutierrez. (2014) – Mise en évidence de nouvelles ressources en eau souterraine à Mayotte. 5ème campagne de forages. Forage d'Ouroveni F3 – 12306X0183. Rapport de fin de travaux et demande de prélèvement. Rapport final. BRGM/RP-63418-FR, 108 p., 38 ill., 4 ann.
- Frissant N., Lachassagne P., Miehe J.M., Eucher G., Petit V., Mouron R., coll. Barthélemy L. (2006) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Campagne 2006-2007. Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et radon. Proposition d'implantation des sondages de reconnaissance. Rapport BRGM/RP-55322-FR, 138 p., 41 ill. et 6 ann.
- Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Castillo C., Deparis J., Baltassat J.M., François B., Pinson S., Gourcy L., Winckel A., et Allier D. (2012) Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteur Nord-Ouest. Rapport final BRGM/RP-59550-FR. 424 p., 258 ill., 7 ann.
- Jaouën T., Vittecoq B., Castillo C., Deparis J., Lions J. avec la collaboration de Gourcy L., Allier D. et Pinson S. (2013) Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteurs Centre et Sud. Rapport final BRGM/RP-61757-FR. 320 p., 148 ill. et 8 ann.
- Jourdain T., Lachassagne P., Lebon D., Miehe J.M., Mouron R. (2002) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte campagne 2001-2002 - Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et radon - Propositions d'implantation des sondages de reconnaissance - Rap. BRGM/RP-51498-FR- 2002 MAY 01, 115 p., 33 fig., 6 tab., 4 ann.
- Lachassagne P., Maurillon N., Mouron R. (2002) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2001-2003) – Forage de Combani (1230 6X-0038). Compte rendu des travaux – Principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. –Rapport BRGM/RP-52054-FR – 2002 MAYOTTE 09, 29 p., 8 fig., 5 ann.
- Patrick Lachassagne, Bertrand Aunay, Nicolas Frissant, Maud Guilbert and Arnauld Malard (2014) - High-resolution conceptual hydrogeological model of complex basaltic volcanic islands: a Mayotte, Comoros, case study Terra Nova, Vol 26, No. 4, 307–321

Lacquement F., Nehlig P., Bernard J. (2013) – Carte géologique de Mayotte à 1/30 000, BRGM/RP-61803-FR.

Nehlig P., Lacquement F., Bernard J., Caroff M., Deparis J., Jaouen T., Pelleter A.-A., Perrin J., Prognon C., Vittecoq B. (2013) – Notice de la carte géologique de Mayotte, BRGM/RP-61803-FR, 135 p., 45 ill., 1 ann.

Mauroux B. (1992) – Programme des forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte. R35165 REU 4S 92.

Parizot M. (2012) - Finalisation des prospections hydrogéologiques sur les sites du bourg de Cacao et du Mont Mahury R Communes de Roura et de Rémire-Montjoly R Guyane. Rapport final BRGM/RP-61197-FR. 52 p., 18 fig.

Petit V., Eucher G. (2004) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte - Campagne 2004 - Forage 1230-6X-0012 (Ourouvéni 02). BRGM/RP-53472-FR, 61 p., 11 illustrations, 4 ann.

RICORDEL-PROGNON C., J. DEPARIS, F. LACQUEMENT, P.NEHLIG, J. BERNARD (2012) - Study of surficial weathering profiles using helicopter borne transient electromagnetic: a case study in Mayotte volcanic island, IGC congress 2012.

ROBINEAU B., JOIN J.L., BEAUVAIS A., PARISOT J-C., SAVIN C., Geoelectrical imaging of a thick regolith developed on ultramafic rocks : groundwater influence. Australian Journal of Earth Sciences, 54 (773-781), 2007.

Vittecoq B., Jaouen T., Deparis J. (2011) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines de Mayotte – 5ème campagne de forage à Mayotte. Révision des implantations. BRGM/RP-60035-FR.

Vittecoq B., Deparis J., Violette S., Jaouen T., Lacquement F., 2014, Influence of successive phases of volcanic construction and erosion on Mayotte Island's hydrogeological functioning as determined from a helicopter-borne resistivity survey correlated with borehole geological and permeability data, Journal of Hydrology 509, pp519-538.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale de Mayotte

Immeuble « Le Jacaranda » n° 5

1, lotissement « Les Trois Vallées »

BP 363, Kawéni - 97600 Mamoudzou - France

Tél. : 02 69 61 28 13

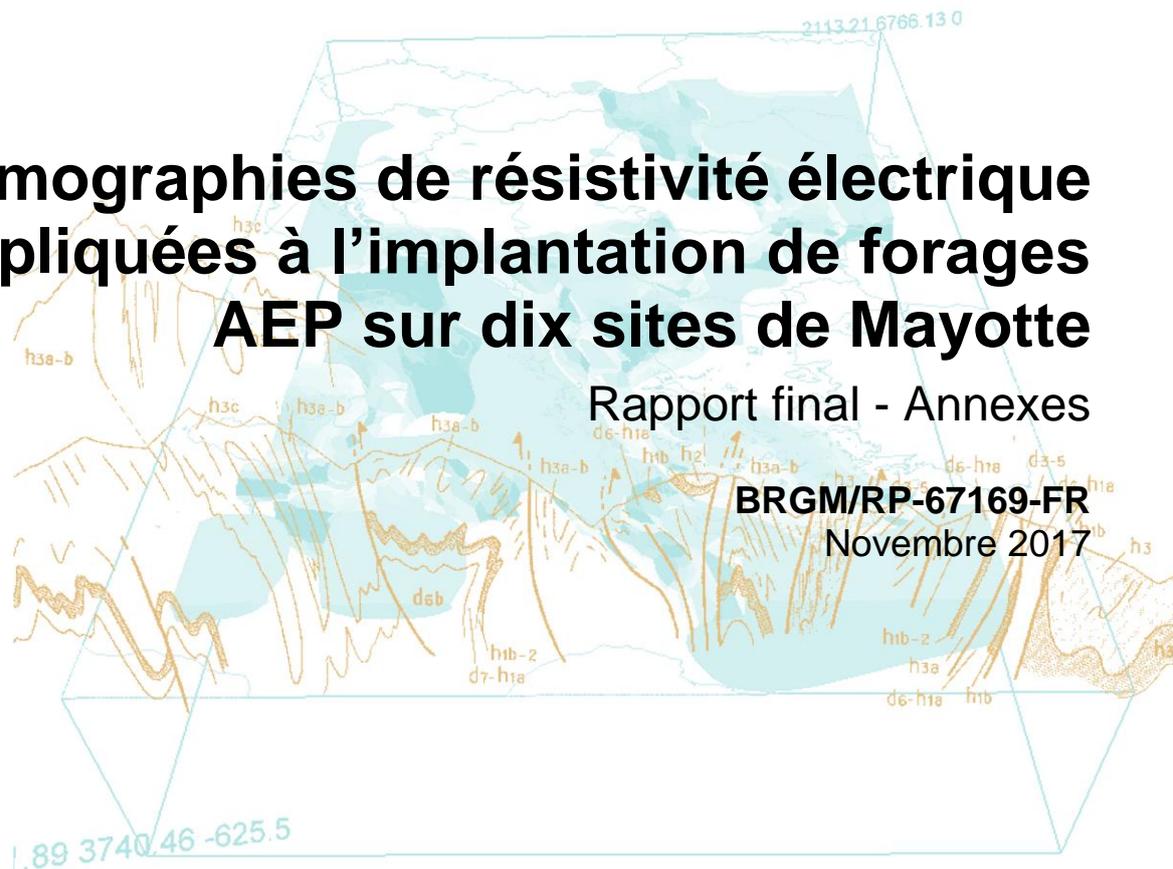


Tomographies de résistivité électrique appliquées à l'implantation de forages AEP sur dix sites de Mayotte

Rapport final - Annexes

BRGM/RP-67169-FR

Novembre 2017



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Tomographies de résistivité électrique appliquées à l'implantation de forages AEP sur dix sites de Mayotte

Rapport final - Annexes

BRGM/RP-67169-FR

Novembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2017-AP17MAY014

J-M. Baltassat, B. Maurice et P-A Reninger

Avec la collaboration de
S. Eddam, G. Dectot et M. Parizot

Vérificateur :

Nom : J. DeParis

Fonction : expert géophysicien

Date : 28 novembre 2017

Signature :



Approbateur :

Nom : F. Tronel

Fonction : Directeur BRGM/DATI

Date : 05 décembre 2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Panneau électrique, hydrogéologie, altérite, basalte, Mayotte

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Baltassat J-M, Maurice B., Reninger P-A (2017) – Tomographies de résistivité électrique appliquée à l'implantation de forages AEP sur 10 sites à Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-67169-FR, 71 p., 32 ill., 4 tabl., 14 ann..

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans un souci de performance et d'augmentation des probabilités de réussite du sixième programme de forages hydrogéologique, le Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte (SIEAM) souhaite approfondir la connaissance du sous-sol dans les zones sélectionnées lors d'études antérieures pour l'implantation des futurs forages. Pour répondre à ce besoin, le BRGM a proposé de mener une campagne de prospection hydrogéologique à partir d'outils géophysiques pour préciser l'emplacement de 10 nouveaux forages destinés à la production d'eau pour la consommation humaine.

Onze tomographies de résistivité électrique ont été réalisées sur les dix zones présélectionnées sur la base d'études antérieure du BRGM. Les tomographies ont été réalisées avec un dispositif de 96 électrodes espacées de 10 m le long d'un profil de 950 m et ont été mesurées selon les configurations dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger. Ces tomographies au sol ont été implantées puis interprétées grâce à une analyse conjointe du modèle de résistivité résultant de la couverture héliportée par électromagnétisme transitoire (AEM ou héliTEM) pour assurer la caractérisation la plus performante des zones cibles. Les données de tomographie sont de bonne qualité et se prêtent à une interprétation fiable.

Après examen des résultats des tomographies au sol complétée par la vision plus globale du modèle AEM, 1 à 3 forages d'exploration sont proposés par zone avec des profondeurs de 80 à 150 m. Ils visent prioritairement des formations électriquement résistantes définissant à leurs limites (cas d'une coulée de lave unique) des niveaux potentiellement aquifères (zone fracturée, scoriacée, ...) ou une succession de coulées avec les mêmes caractéristiques aquifères potentielles.

Certaines de ces propositions de forage visent des aquifères ayant déjà montré des potentiels aquifères intéressants lors de forages antérieurs (généralement non exploités) comme sur les zones 1 (Mbouini), 2 (Mronabeja), 3 (Brandelé), 6 (Bouyouni-Méresse). D'autres en revanche ciblent des aquifères non encore reconnus et testés par forage mais qui sont potentiellement intéressants notamment par leur extension géographique tel qu'imaginé par le modèle AEM (zone4= Coconi, zone8=Mrowalé).

L'interprétation conjointe des données héliTEM/résistivité électrique apporte principalement les compléments d'information suivants :

- Indication sur l'extension des formations de résistivité présentant un intérêt hydrogéologique, notamment en dehors de la zone d'investigation par tomographie.
- Mise en évidence de formations ayant échappé à l'investigation par tomographie électrique du fait d'une profondeur d'investigation insuffisante. En particulier, les données HéliTEM permettent de situer le substrat conducteur des cibles d'intérêt dans les zones où les tomographies sont trop peu pénétrantes.
- Précision sur la position de l'invasion salée par rapport à la zone d'intérêt.

Liste des annexes

Annexe 1 Principe de la méthode de tomographie de résistivité électrique	7
Annexe 2 Profils HéliTEM extrait du modèle AEM de Mayotte pour chaque zone étudiée	15
Annexe 3 Agenda des réalisations	41
Annexe 4 Topographie des profils.....	45
Annexe 5 Synthèses des paramètres de traitement des tomographies dipôle-dipôle.....	53
Annexe 6 Synthèses des paramètres de traitement des tomographies Wenner-Schlumberger.....	57
Annexe 7 Données des tomographies électriques dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger.....	61
Annexe 8 Résultats d'inversion des tomographies électriques.....	75
Annexe 9 Implantation des investigations sur fond de carte géologique de Mayotte au 1/300000.....	97
Annexe 10 Légende de la carte géologique au 1/30000.....	107
Annexe 11 Proposition de forage hydrogéologique sur les 10 zones - Coordonnées RGM04.....	111
Annexe 12 Station MAYG du réseau GNNS	115
Annexe 13 Paramètres utilisés pour l'inversion avec le logiciel RES2DIN64	119
Annexe 14 Compte-rendu préliminaire des investigations géoélectriques réalisées sur le site de captage de l'usine de dessalement de Petite-Terre (Mayotte).....	123

Annexe 1

Principe de la méthode de tomographie de résistivité électrique

A.1. PRINCIPE DE LA METHODE

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

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

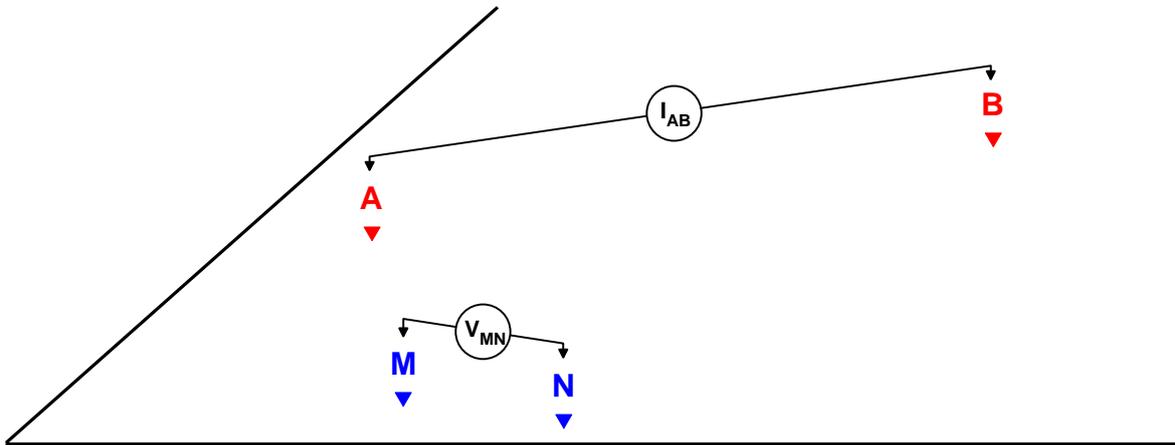


Illustration 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu

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

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

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

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

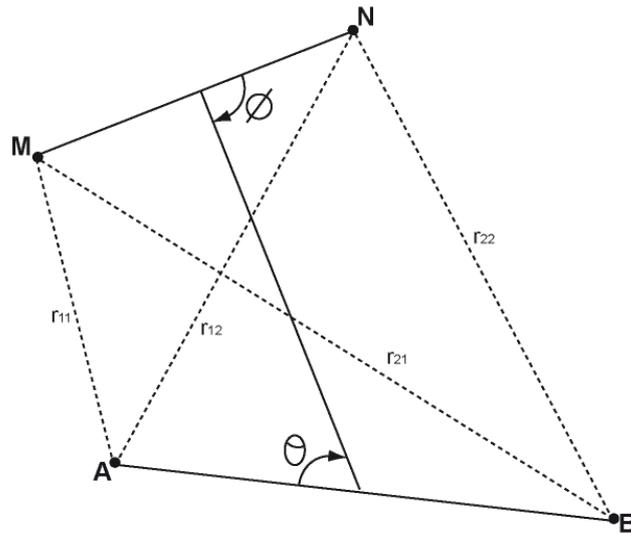


Illustration 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \Phi < \pi$)

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

A.2. DISPOSITIFS D'ELECTRODES / CONFIGURATIONS D'ACQUISITION

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

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

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

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

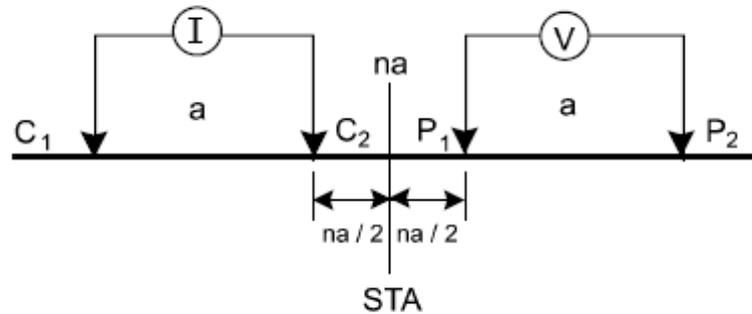


Illustration 3 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux par rapport au profil de mesure. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80m pour un dispositif de 500 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit (Illustration 4).

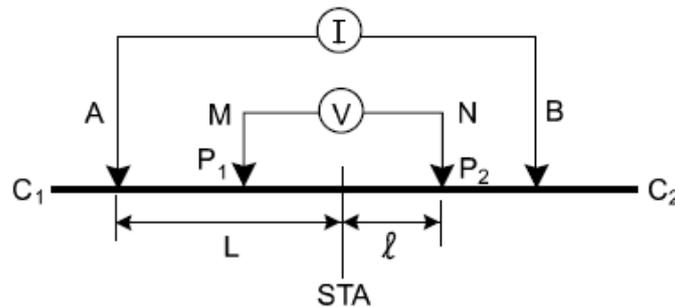


Illustration 4 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif pôle-dipôle (Illustration 5) allie une bonne résolution avec une bonne profondeur d'investigation. Il nécessite néanmoins de mettre en place et maintenir une électrode lointaine (au moins 5 à 10 fois le plus grand écartement).

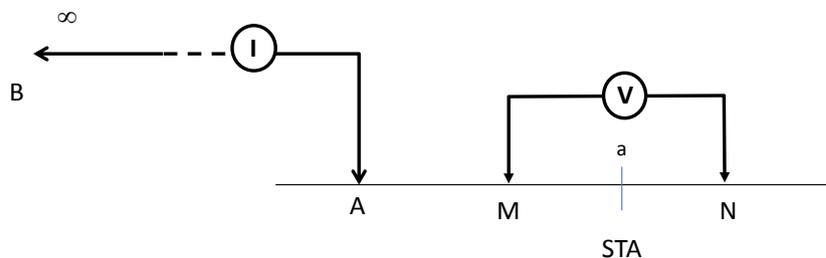


Illustration 5 : Configuration pôle-dipôle

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (Illustration 6).

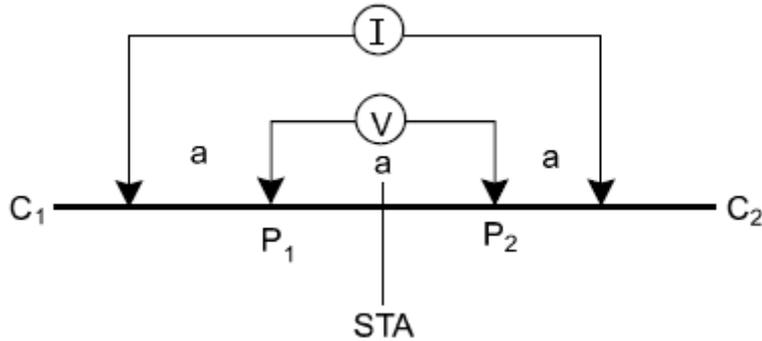


Illustration 6 : Configuration Wenner

A.3. CONSTRUCTION D'UNE PSEUDO-SECTION DE RESISTIVITE APPARENTE

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une pseudo-profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (Illustration 7).

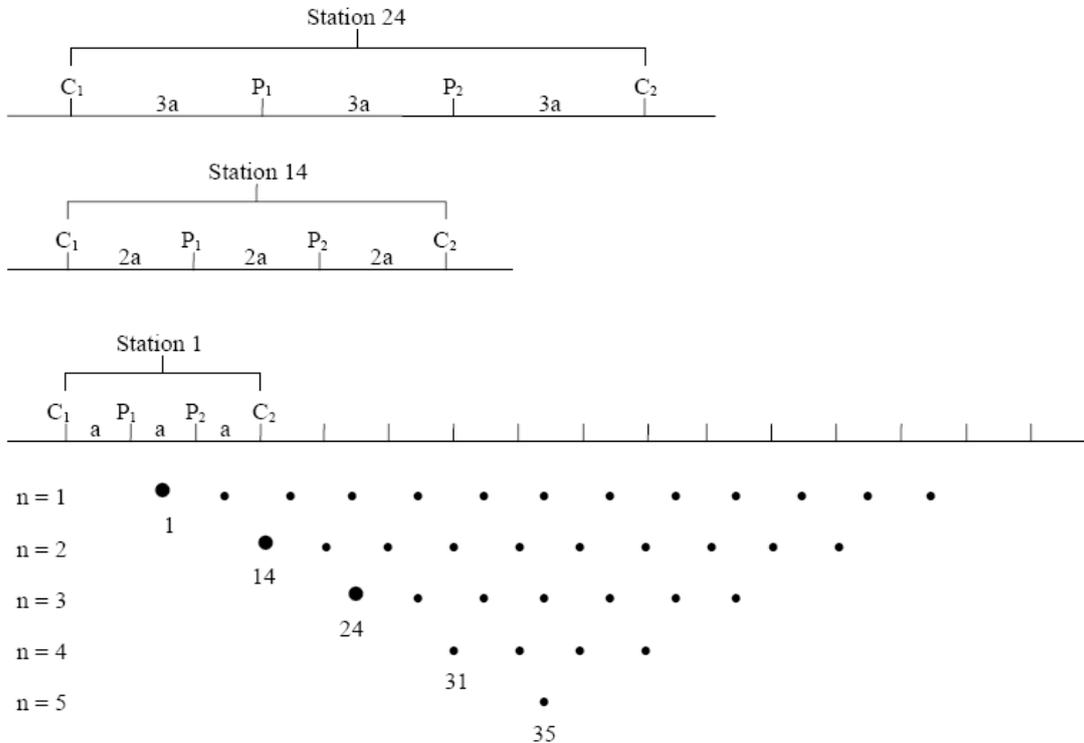


Illustration 7 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

A1.4. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNEES

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (Illustration 8). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (Illustration 9).

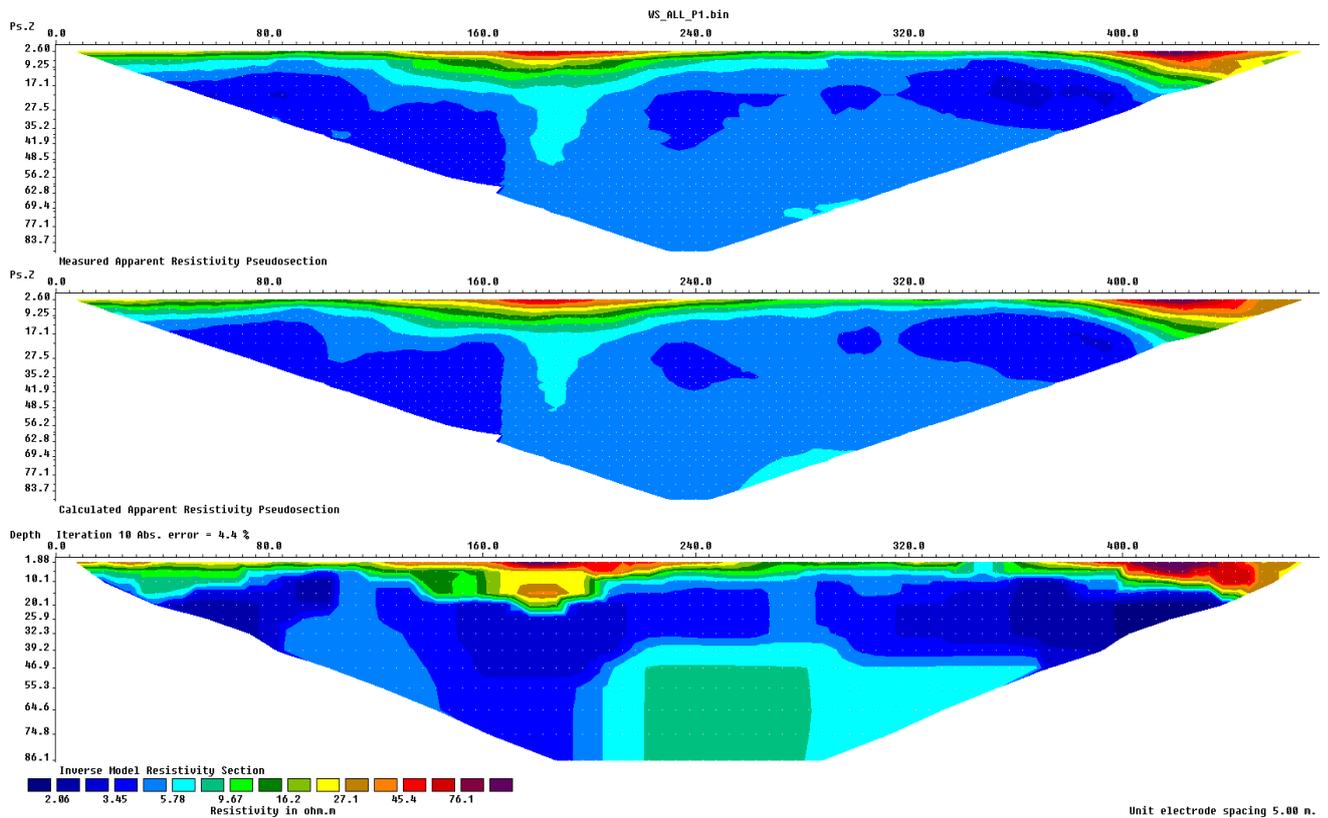


Illustration 8 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La pseudosection de résistivité « vraie » (illustration du bas de l'illustration 8), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe (section) semblable à celle de résistivité apparente – présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

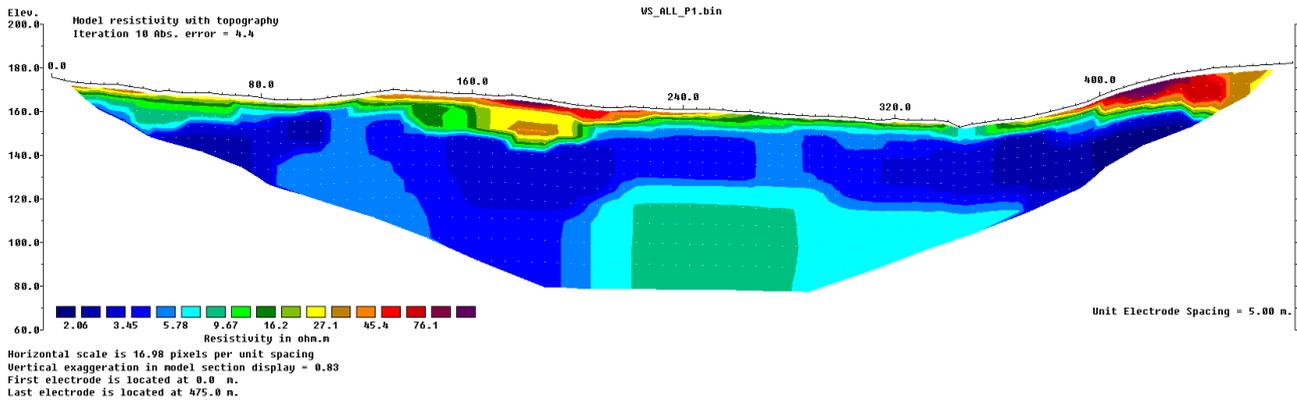


Illustration 9 - Résultat de l'inversion de la Illustration 8 avec la topographie.

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

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

A1.5. APPLICATIONS

La tomographie électrique s'applique d'une manière générale à caractériser les milieux présentant un contraste de résistivité par rapport à leur environnement dans les limites de la résolution de la méthode. La résistivité du sous-sol dépend de sa teneur en fluide, de la résistivité de ce fluide et de sa minéralogie (en particulier de sa teneur en argile). Le paramètre résistivité est ainsi généralement un bon descripteur de la géologie et un bon indicateur des propriétés hydrogéologiques du sous-sol.

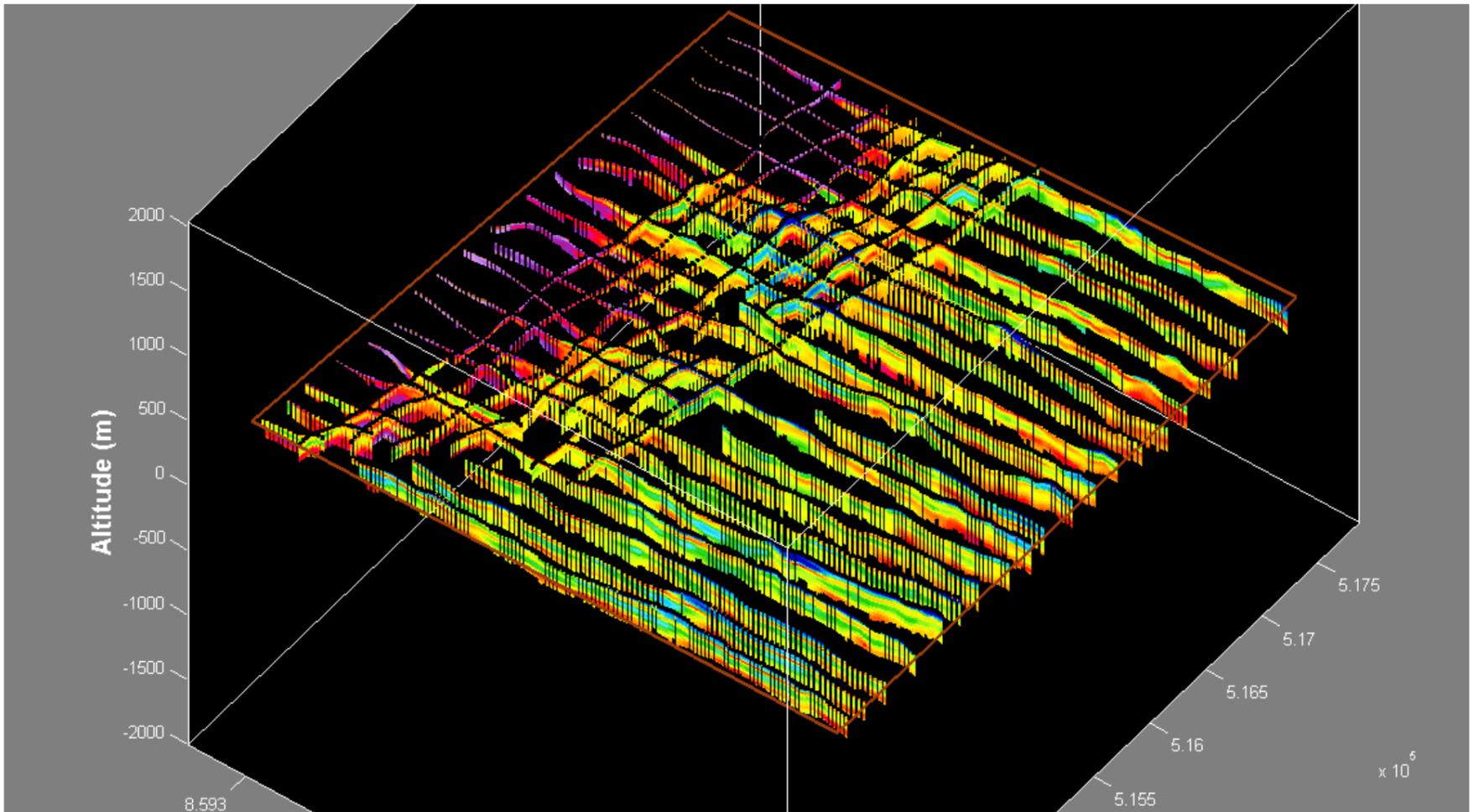
La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

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

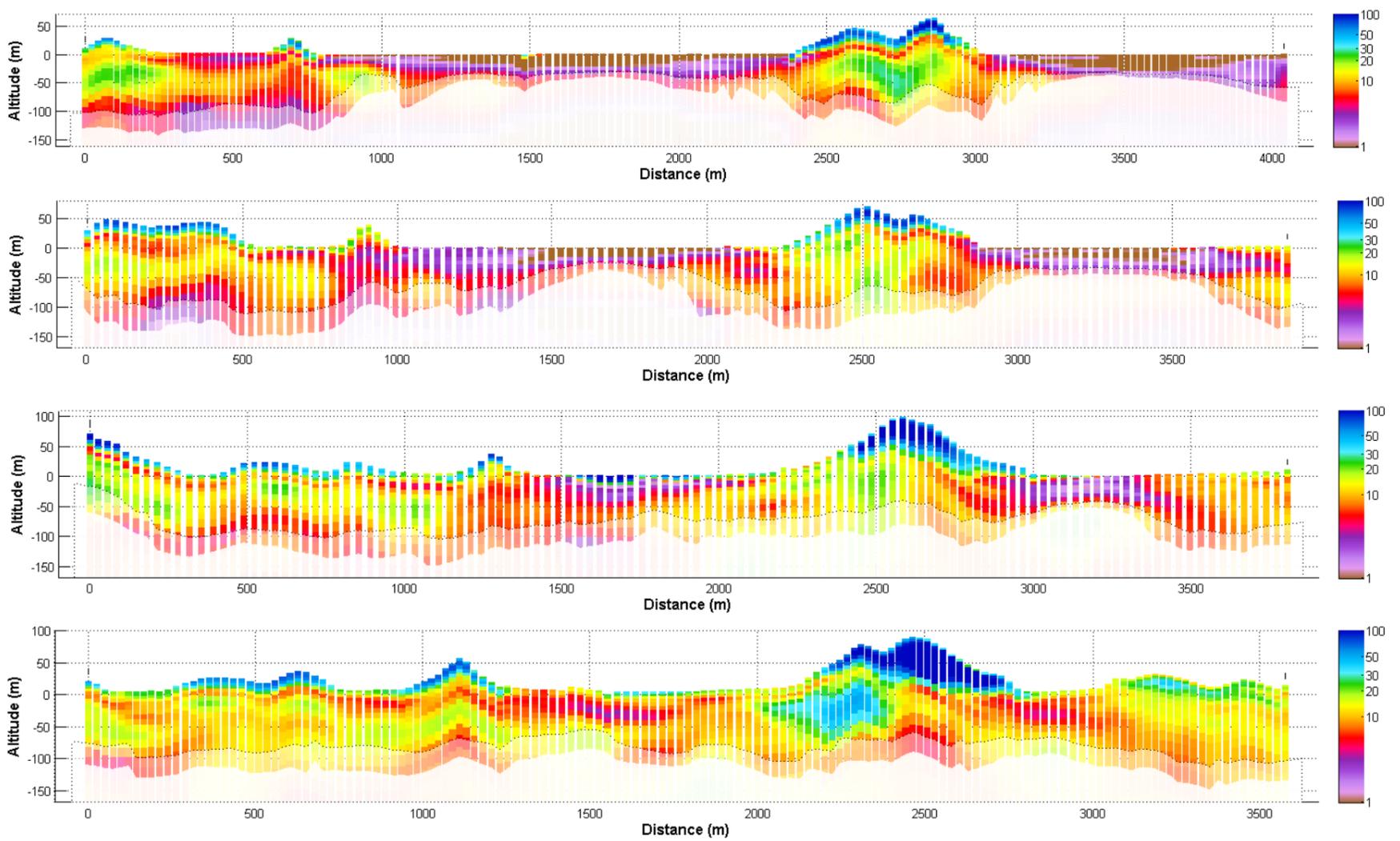
Annexe 2

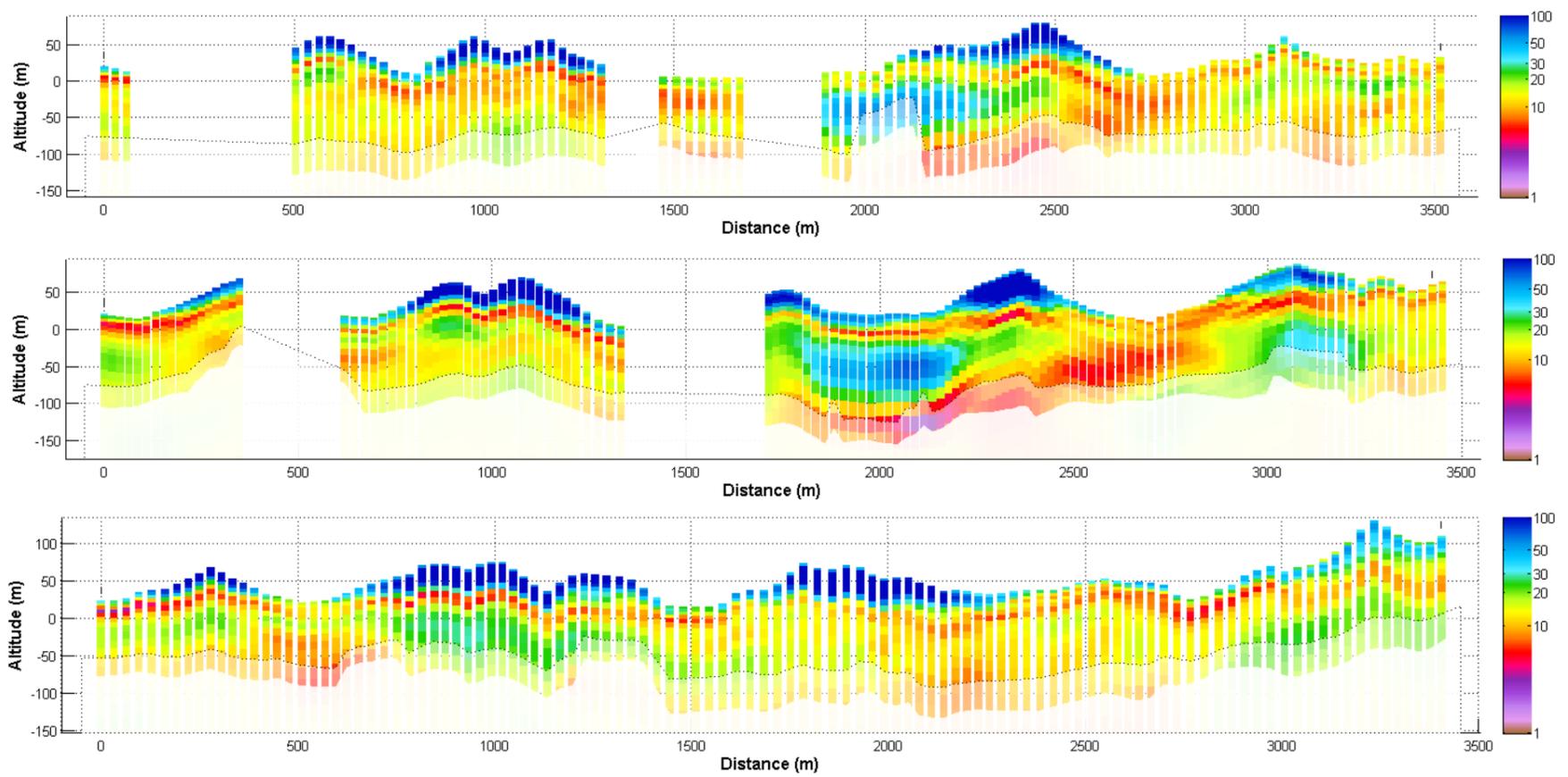
Profils HéliTEM extrait du modèle AEM de Mayotte pour chaque zone étudiée

Zone de BOUYOUNI (6 et 7)

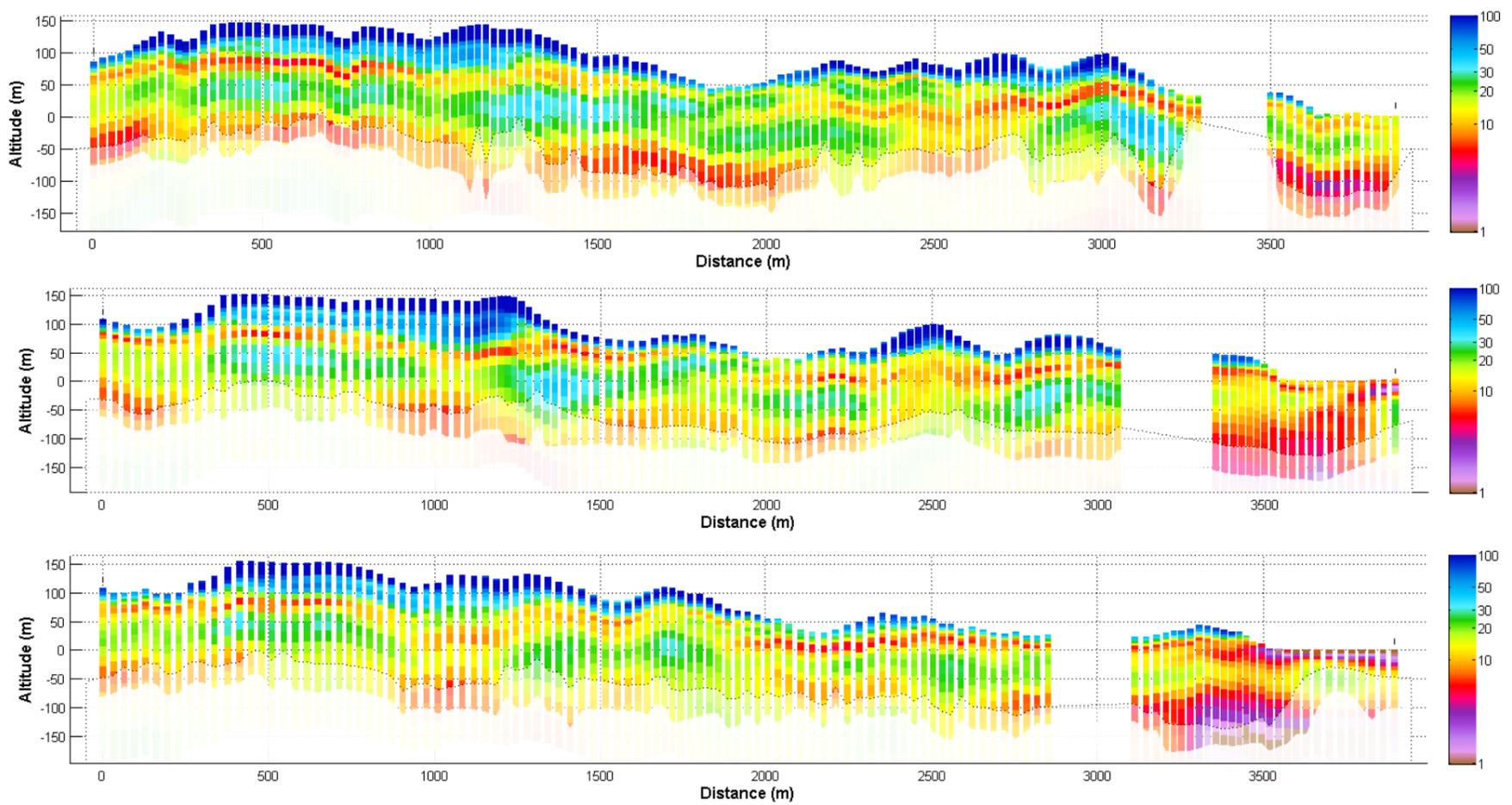


P1 à P7, de haut en bas, ouest à gauche

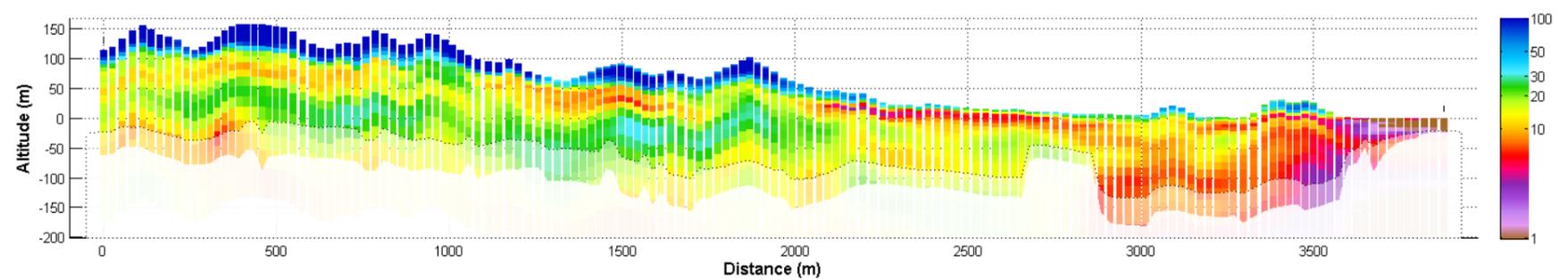


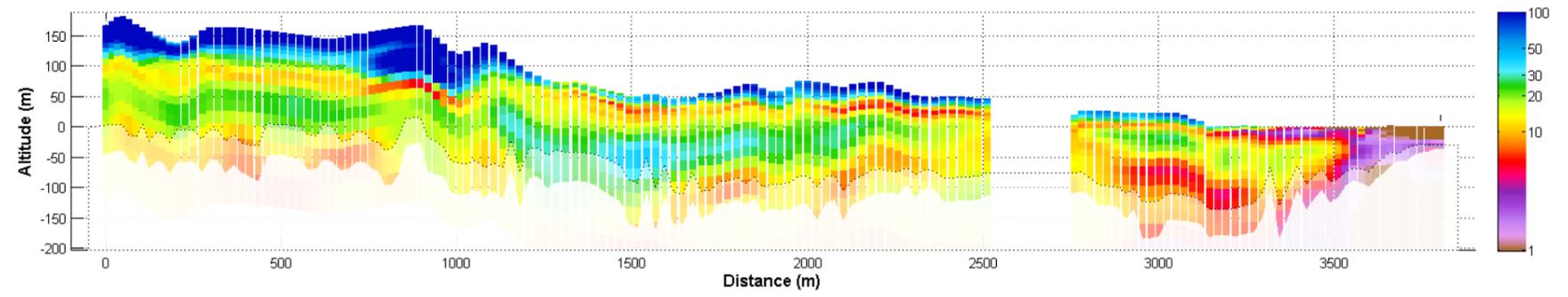


P8 P27, de haut en bas, sud à gauche

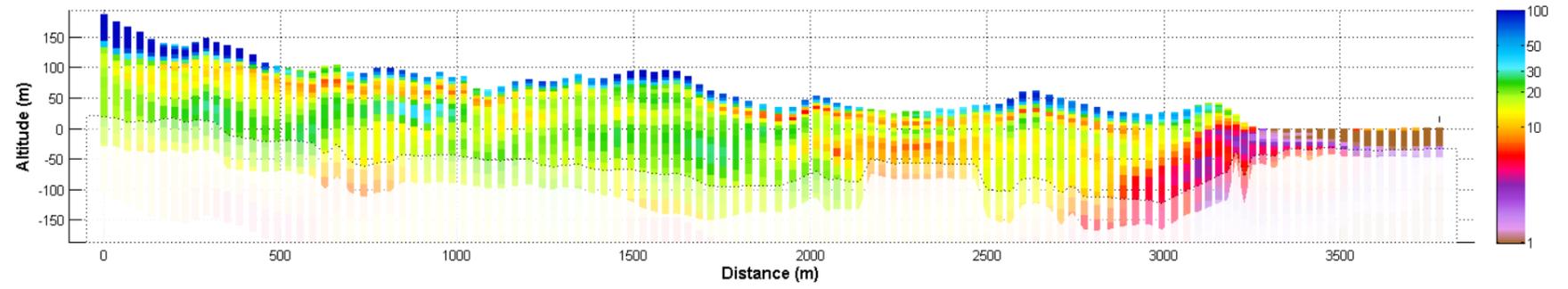


P11

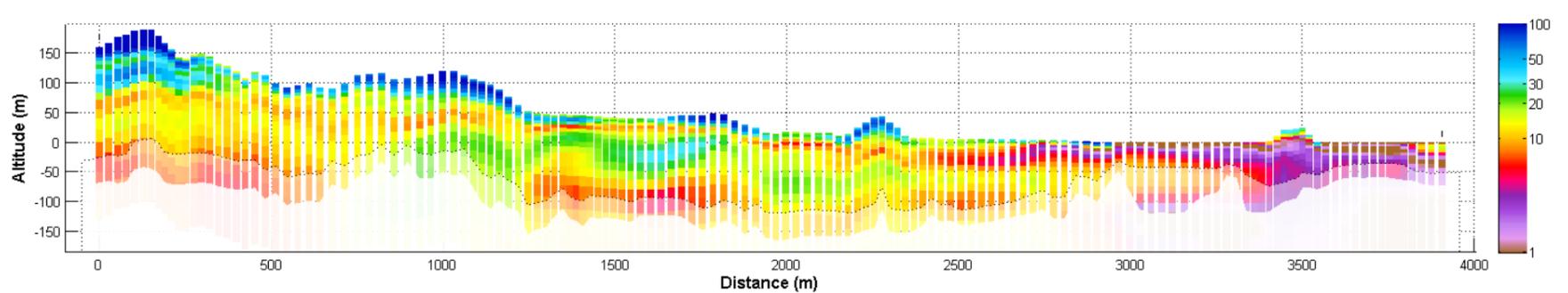
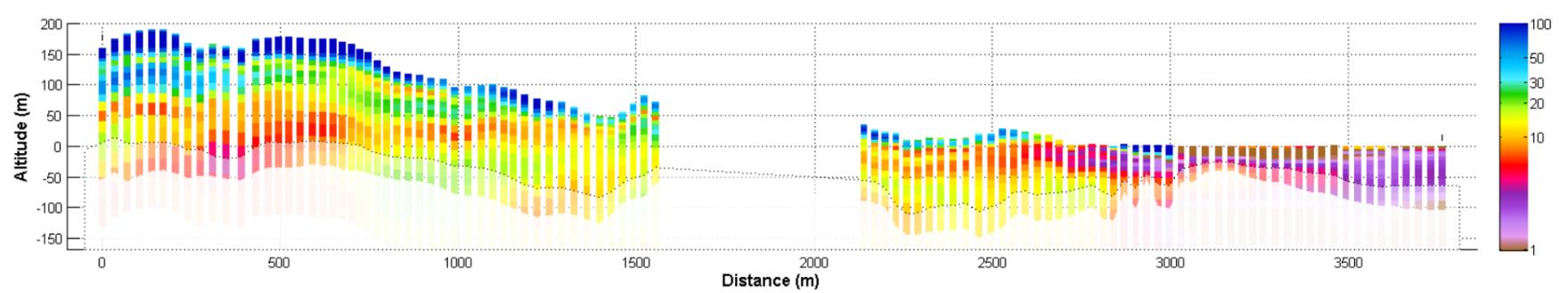
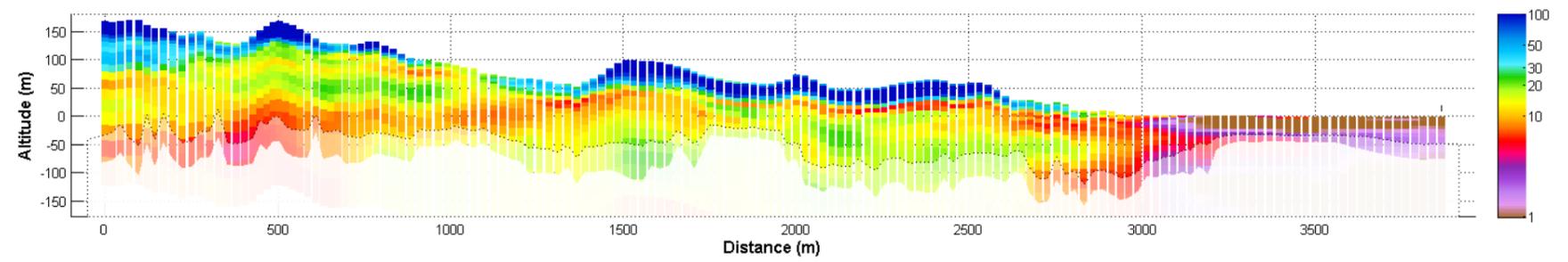
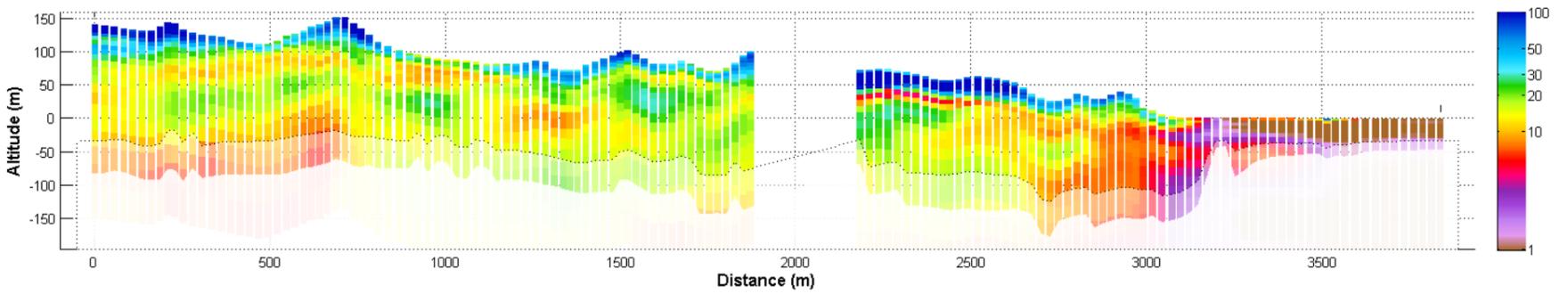
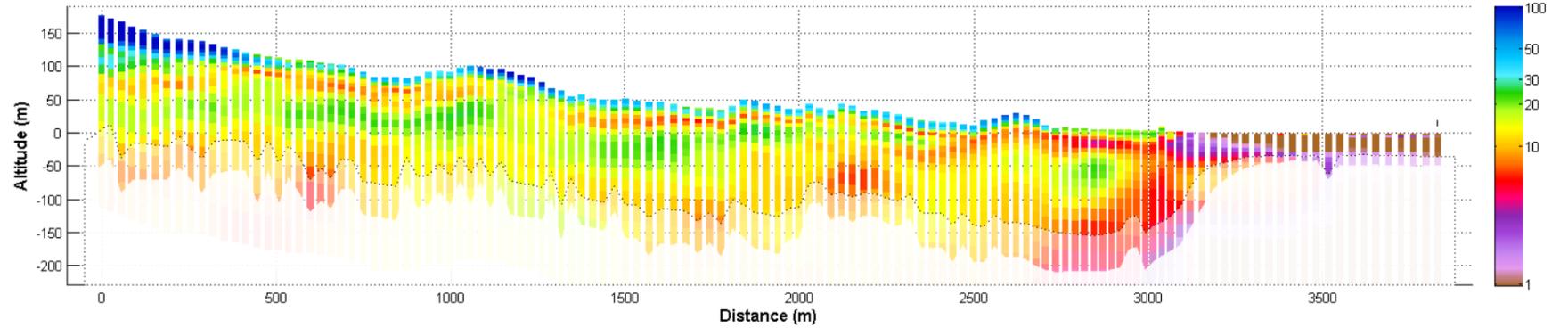


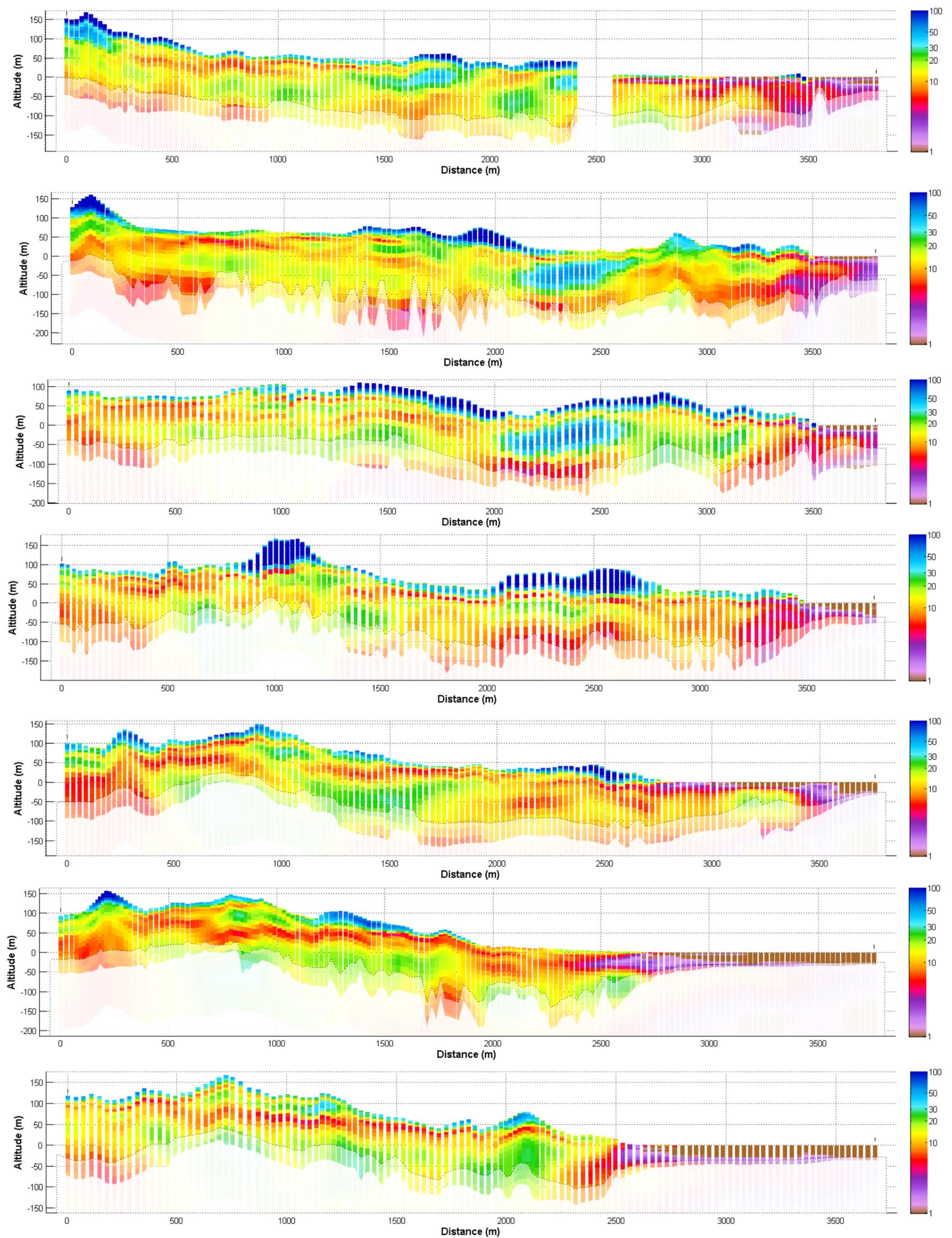


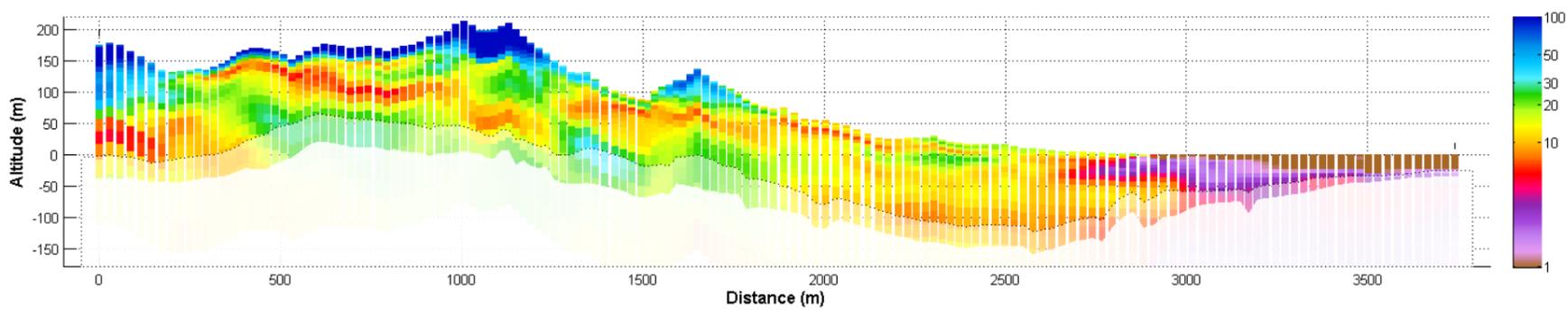
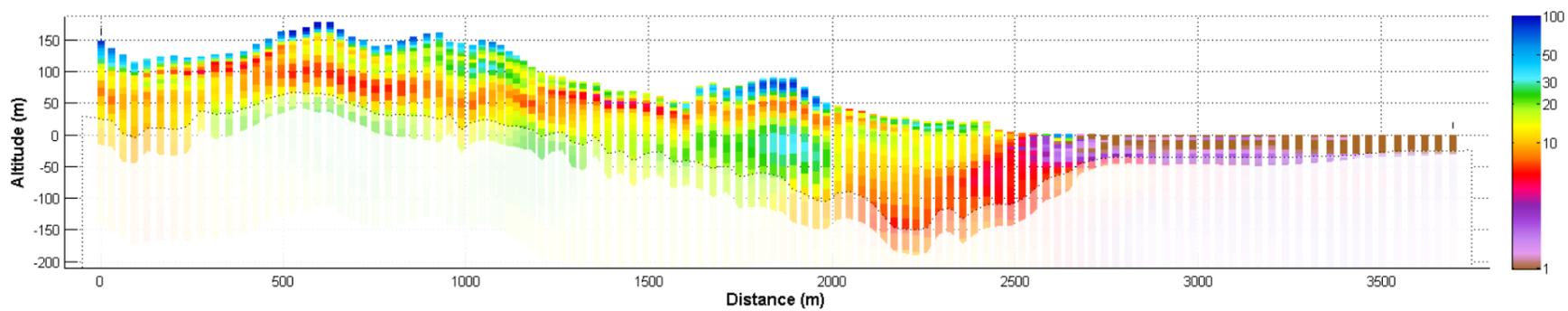
P13



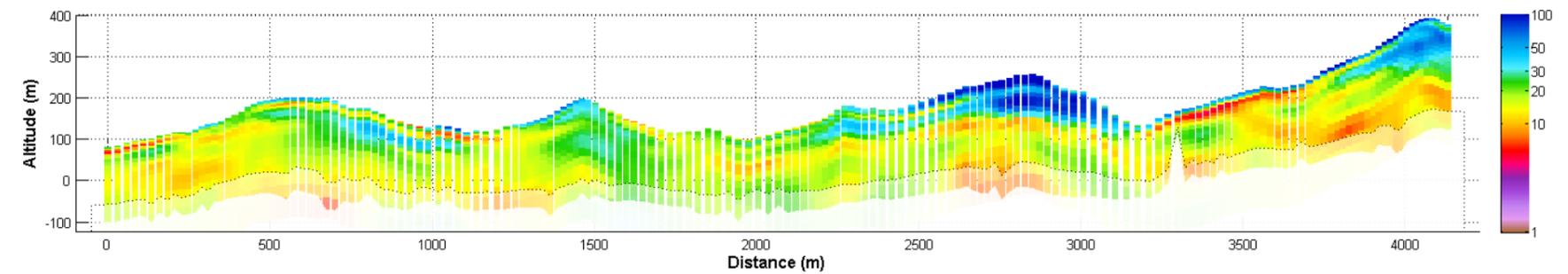
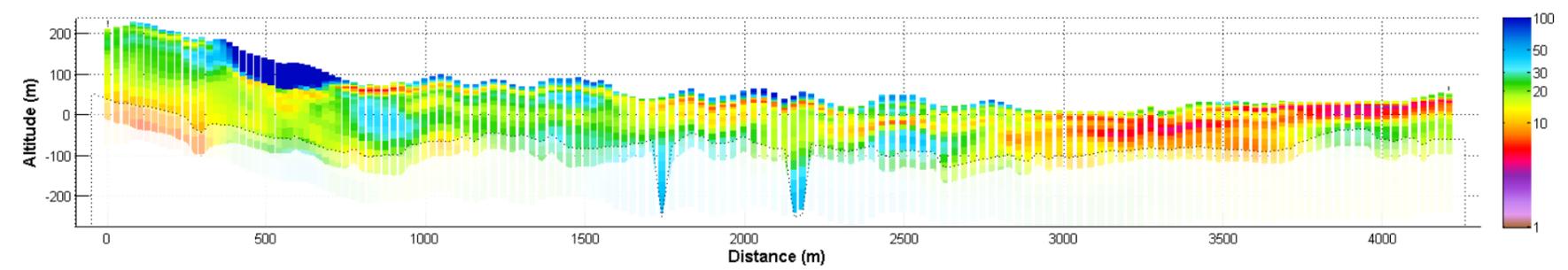
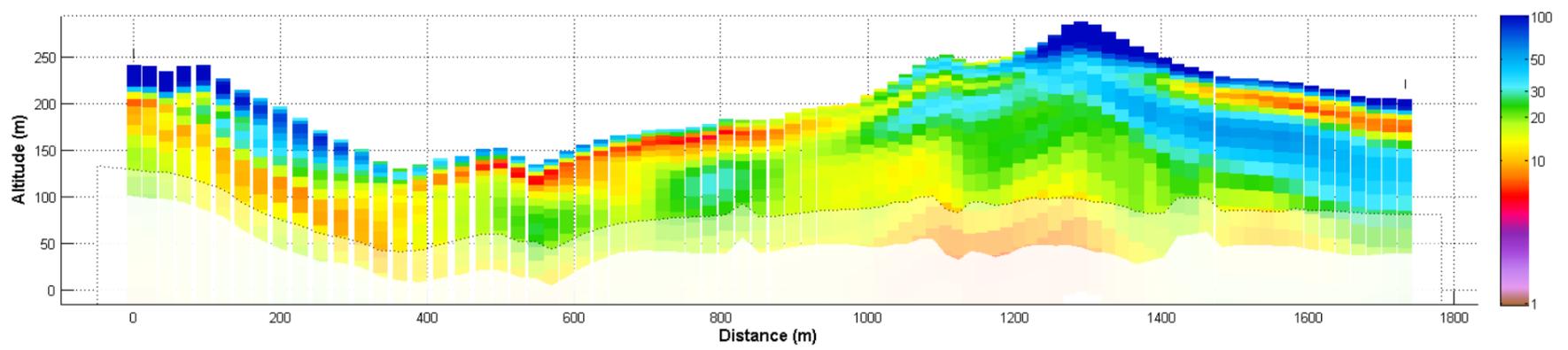
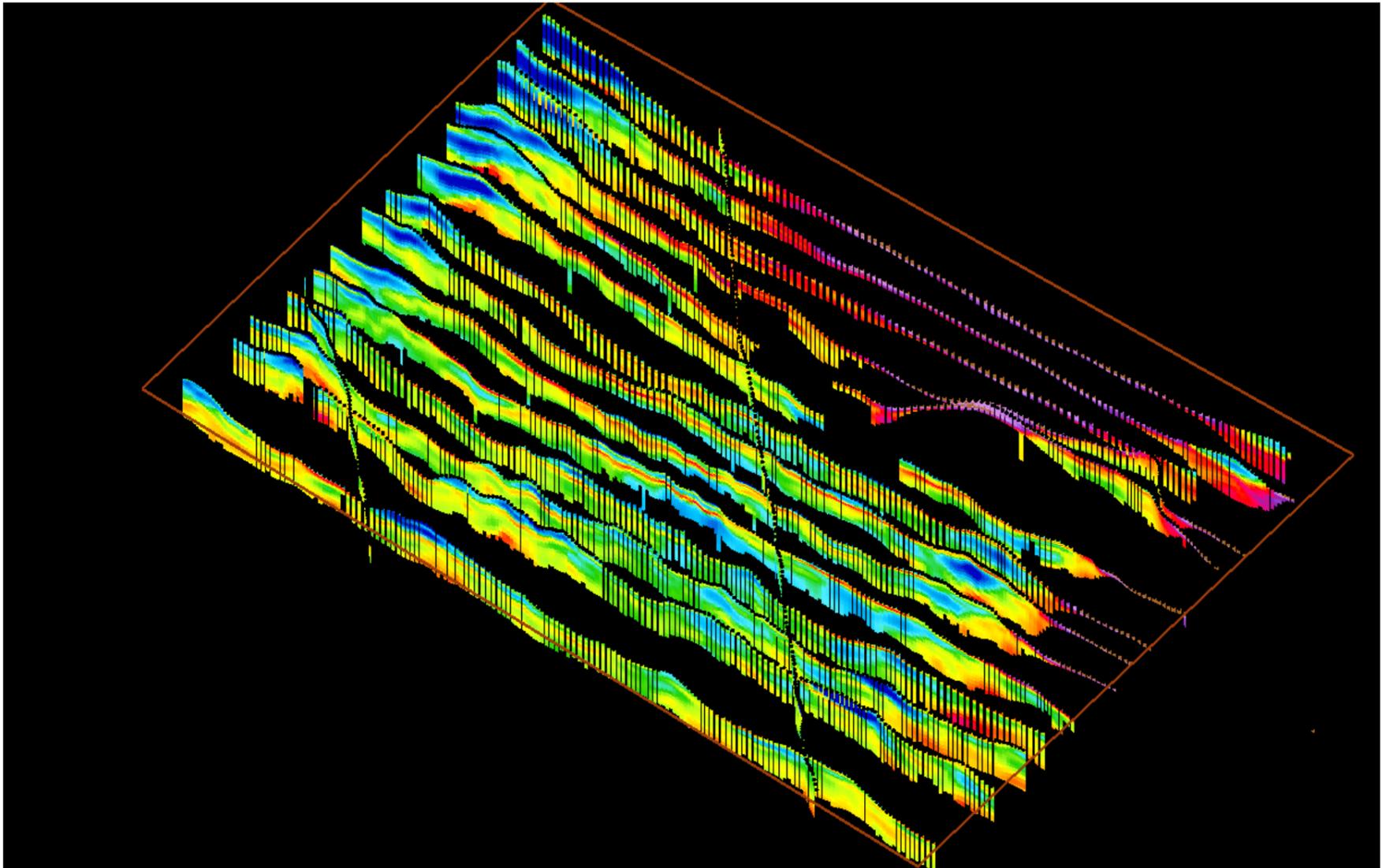
P14

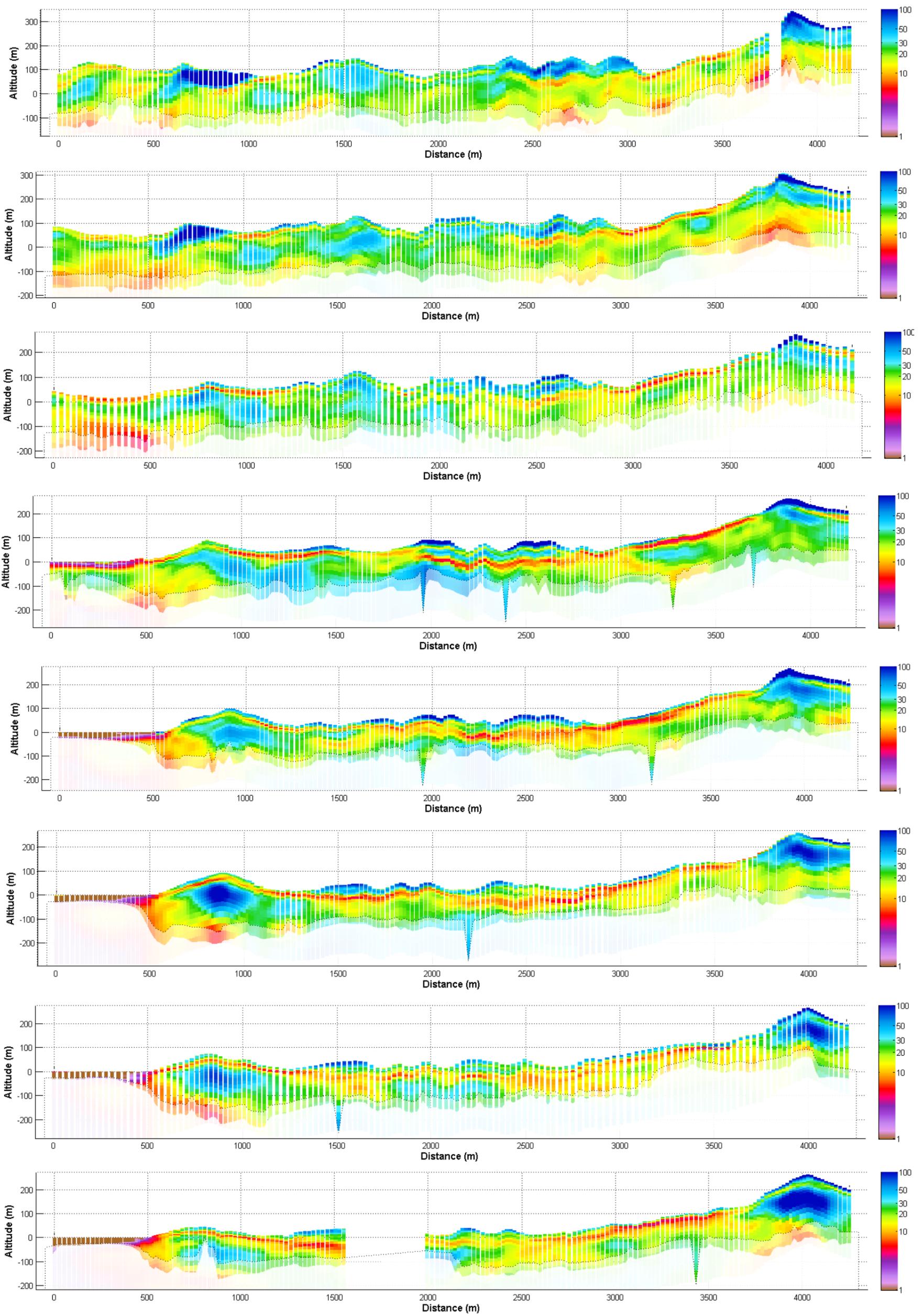


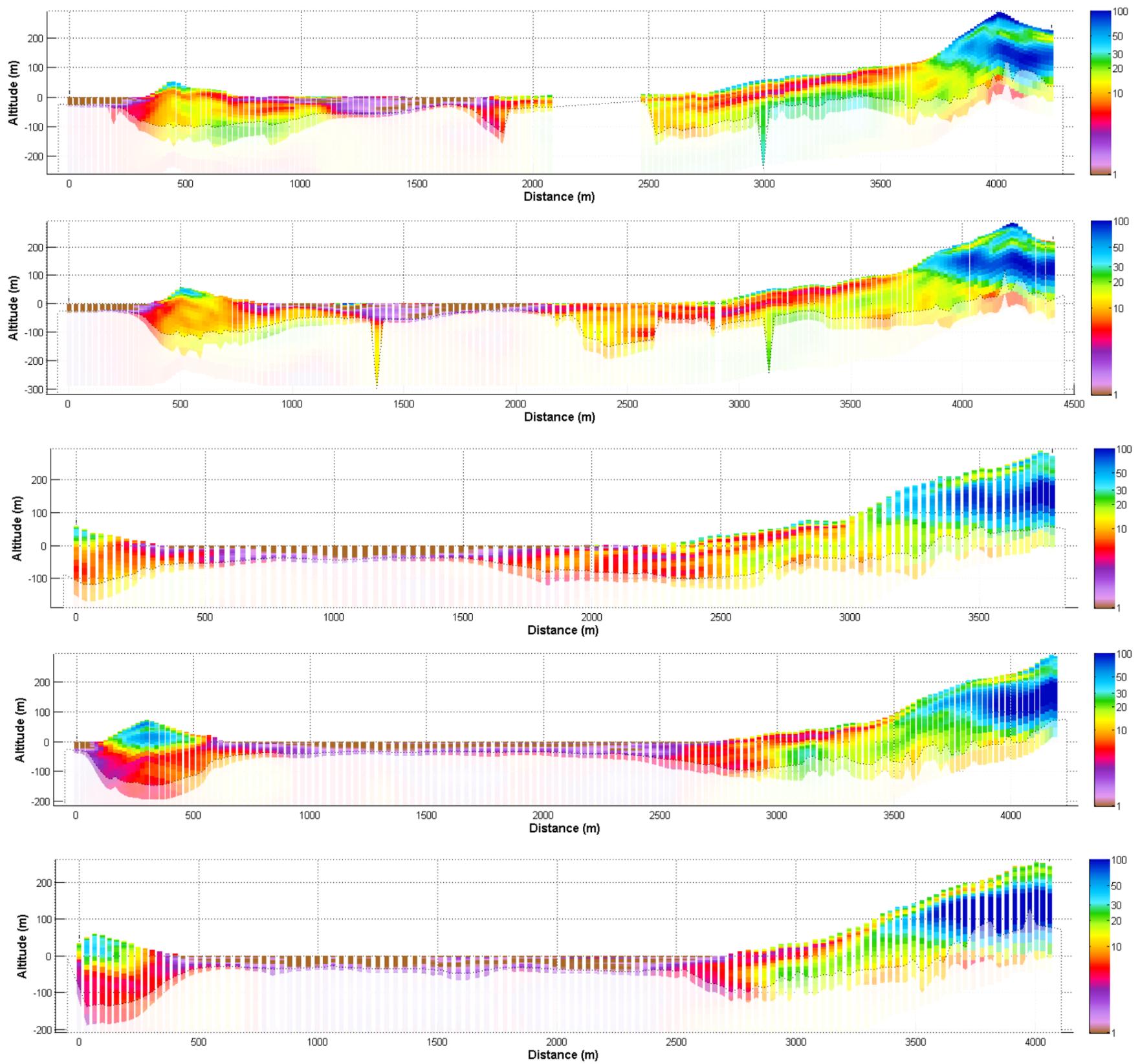




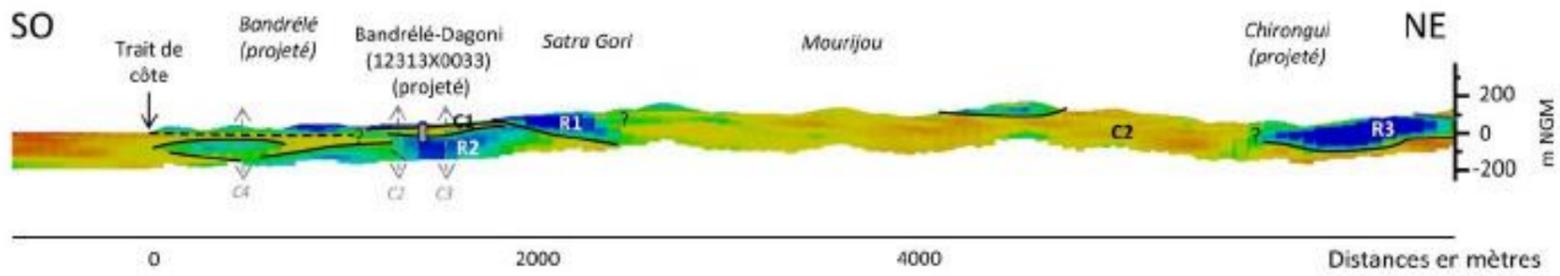
Zone de BANDRELE (3)



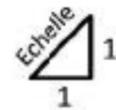
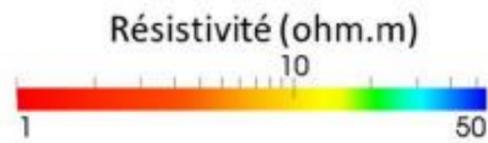
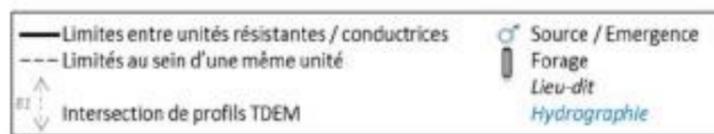
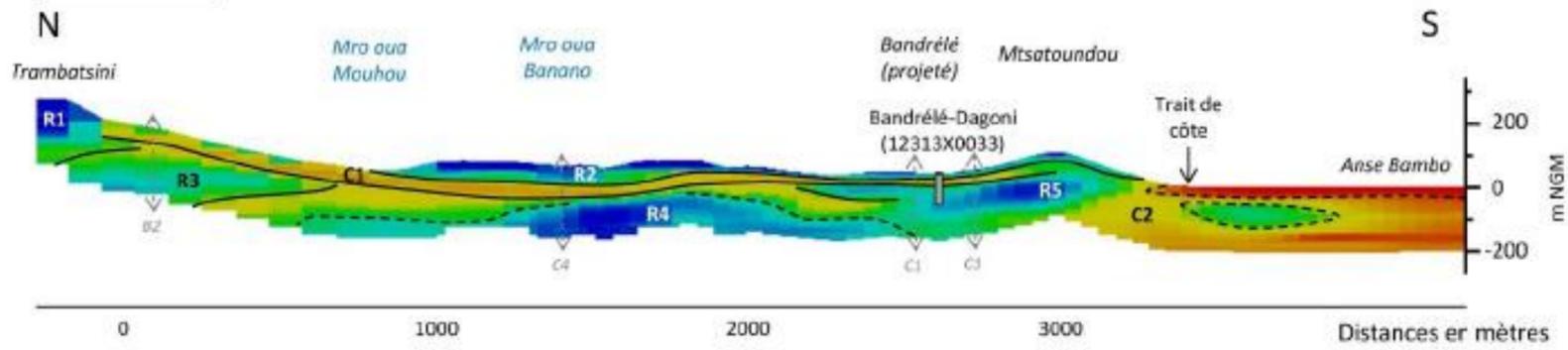




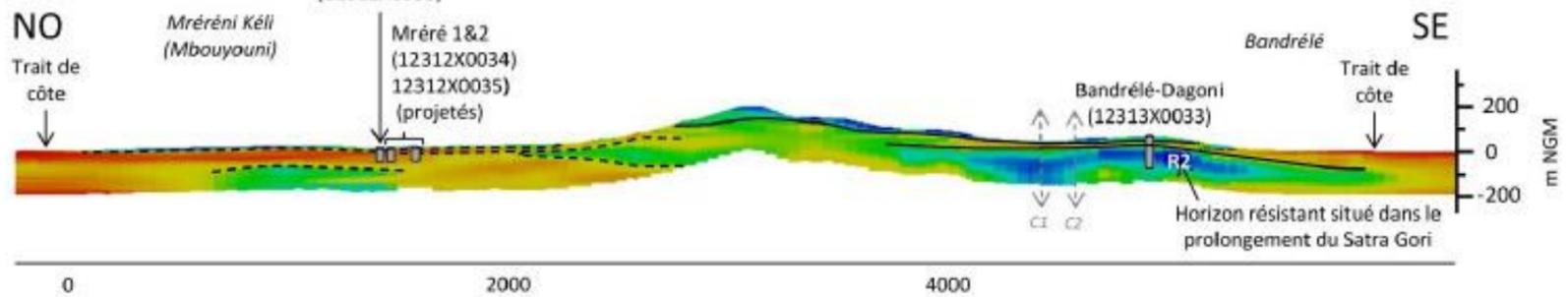
Chirongui 1



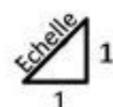
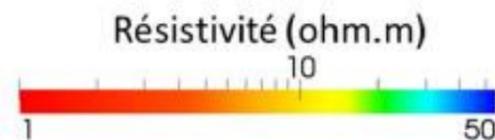
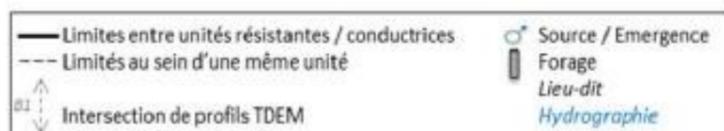
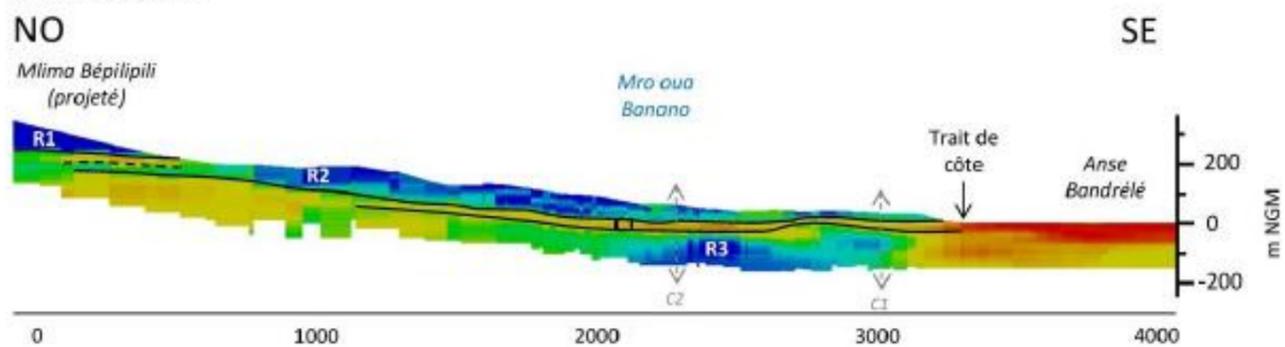
Chirongui 2



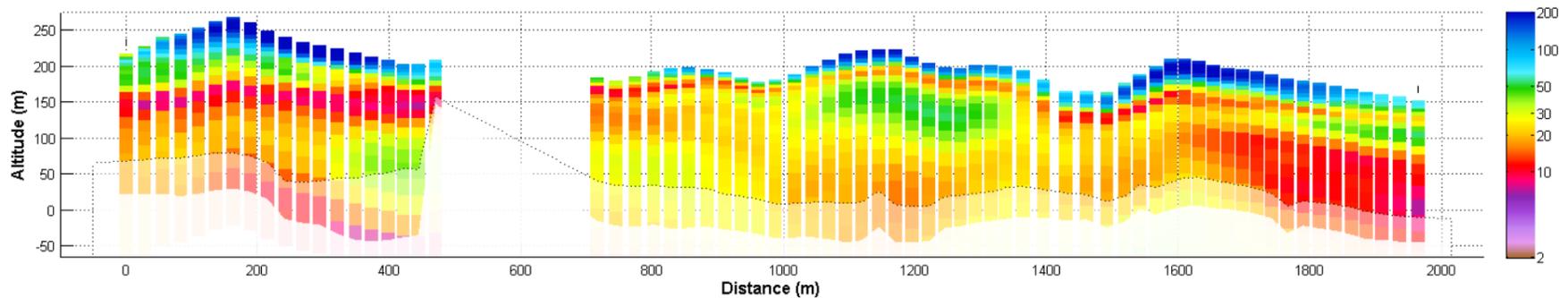
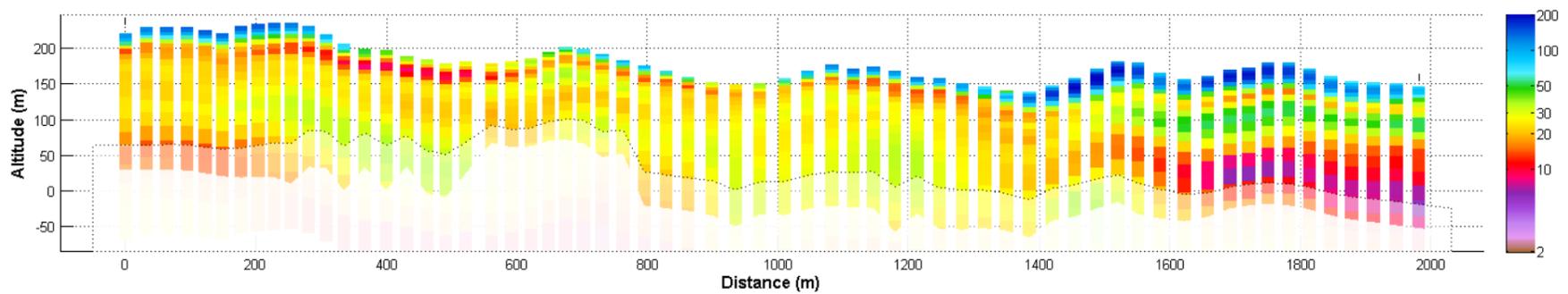
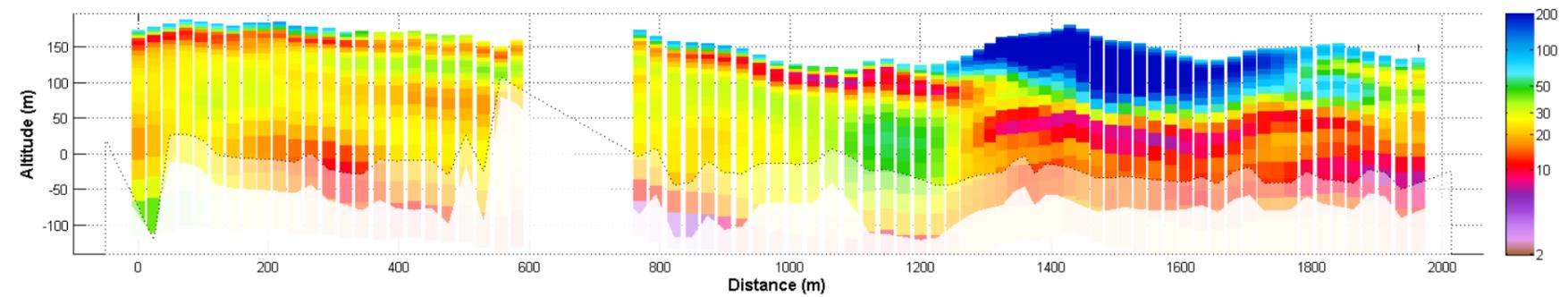
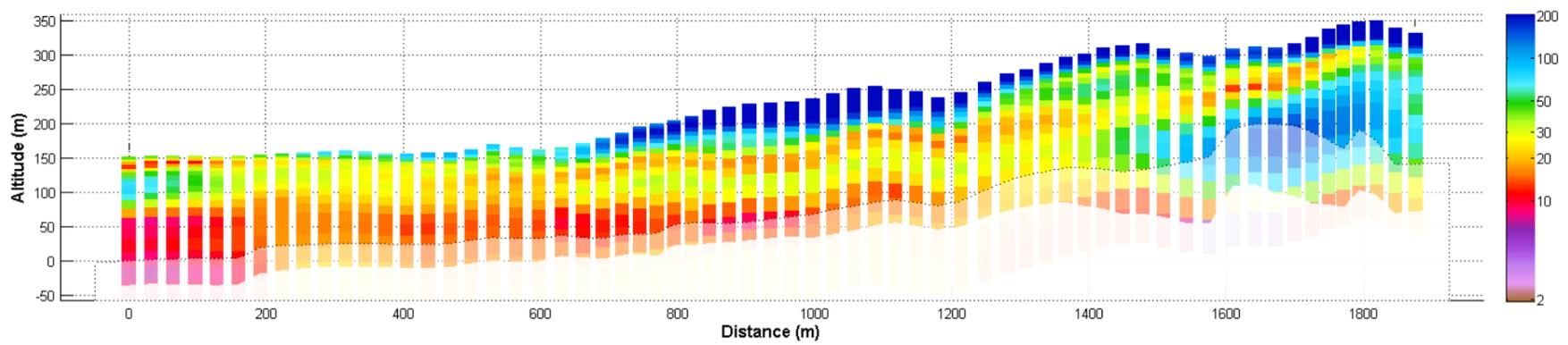
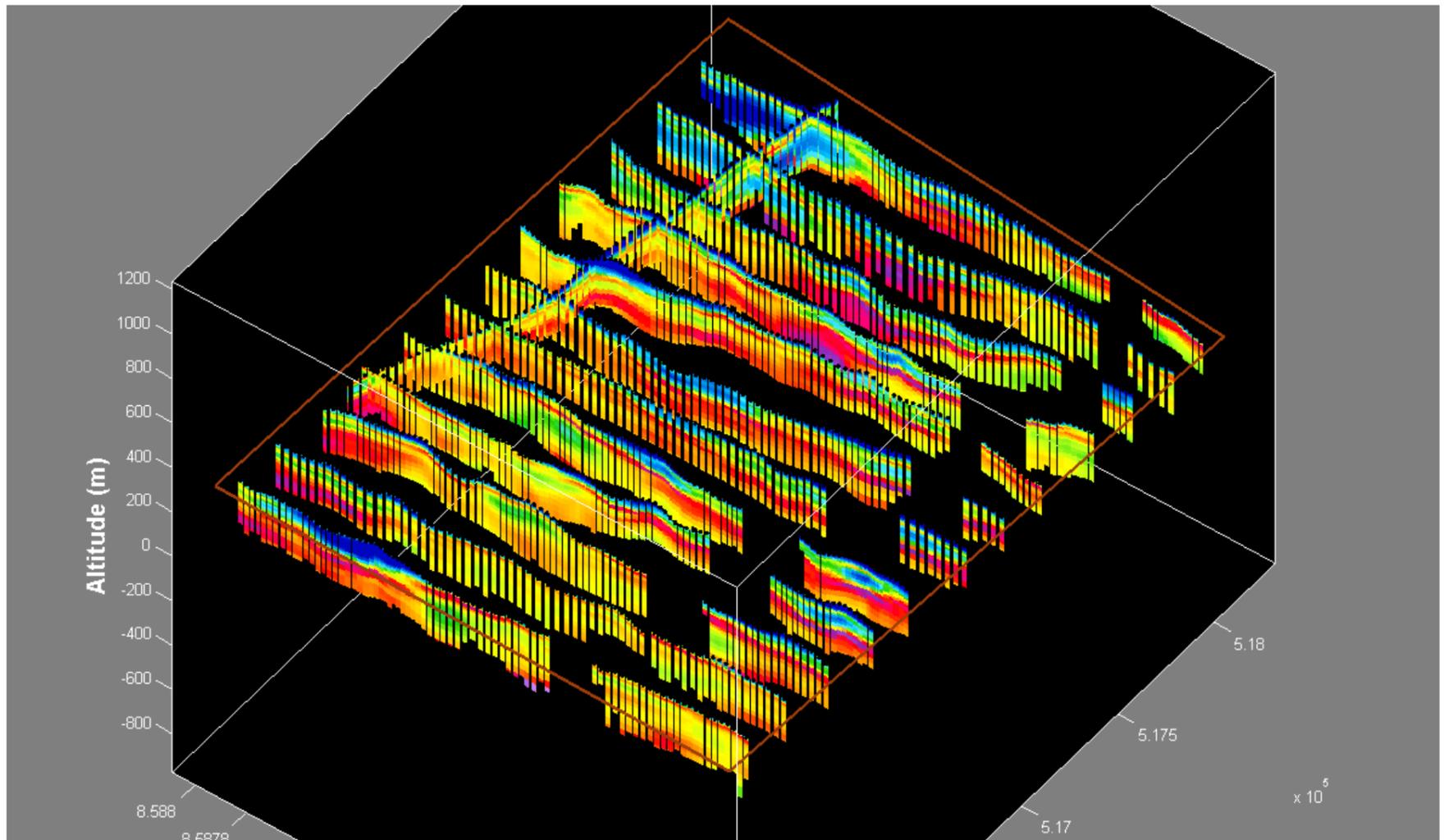
Chirongui 3

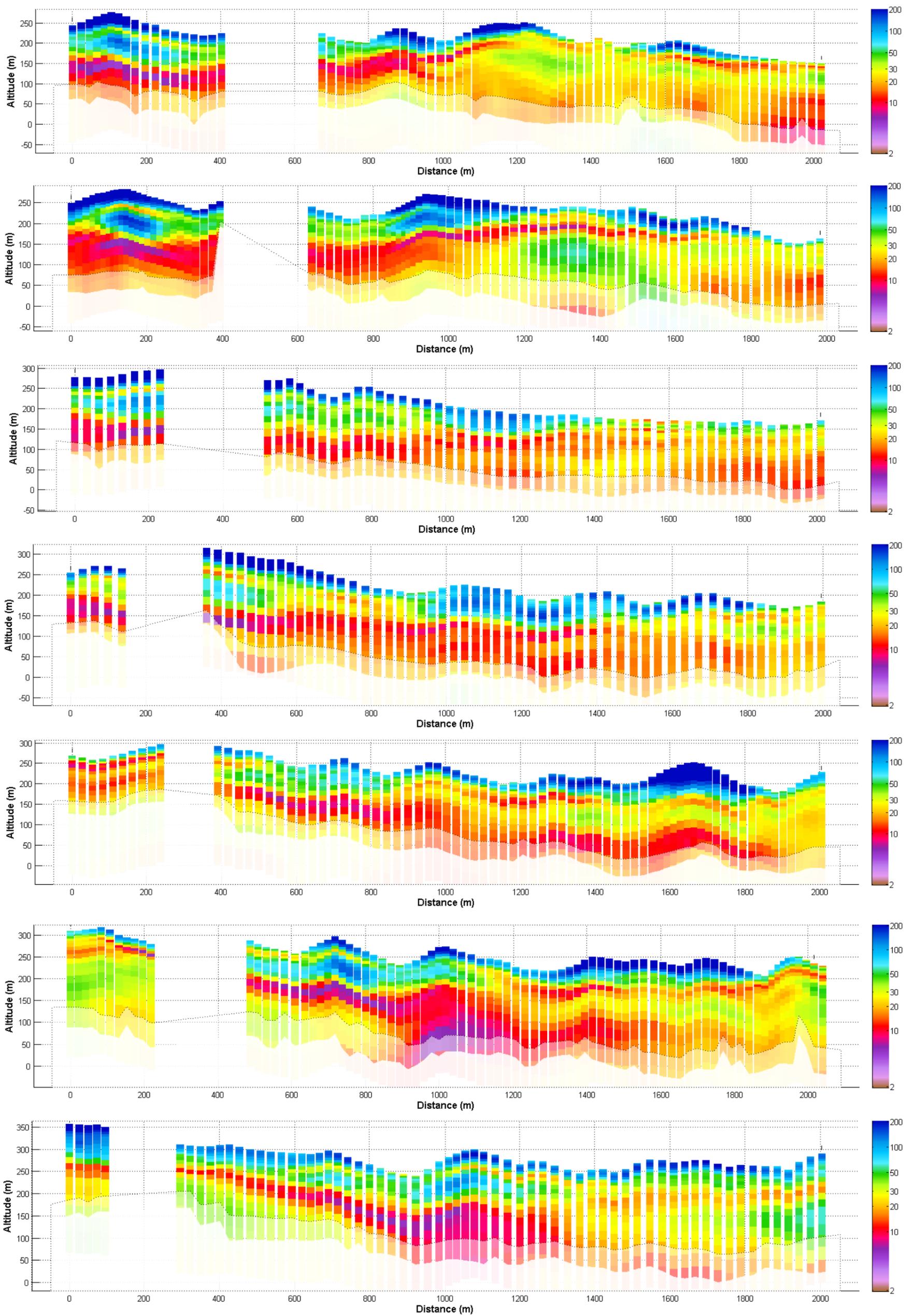


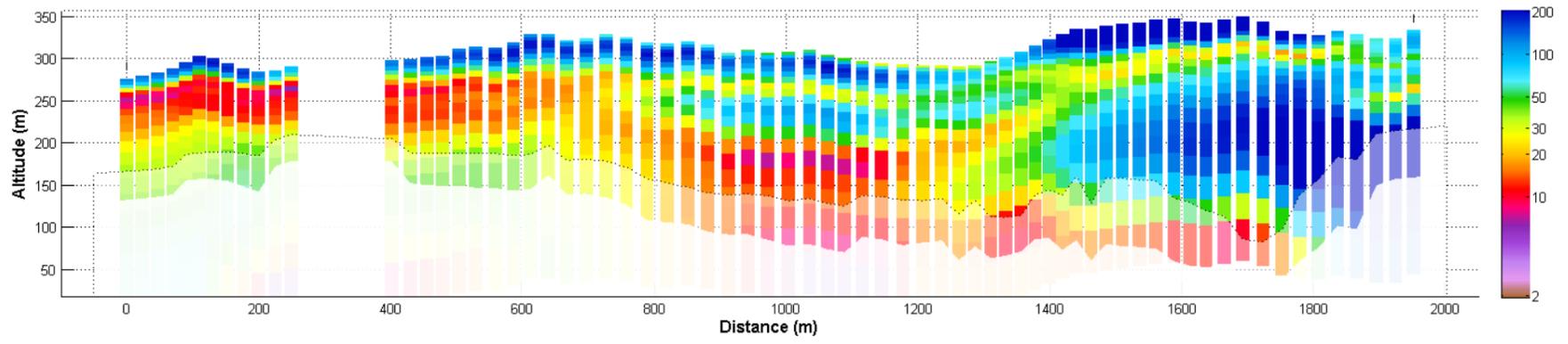
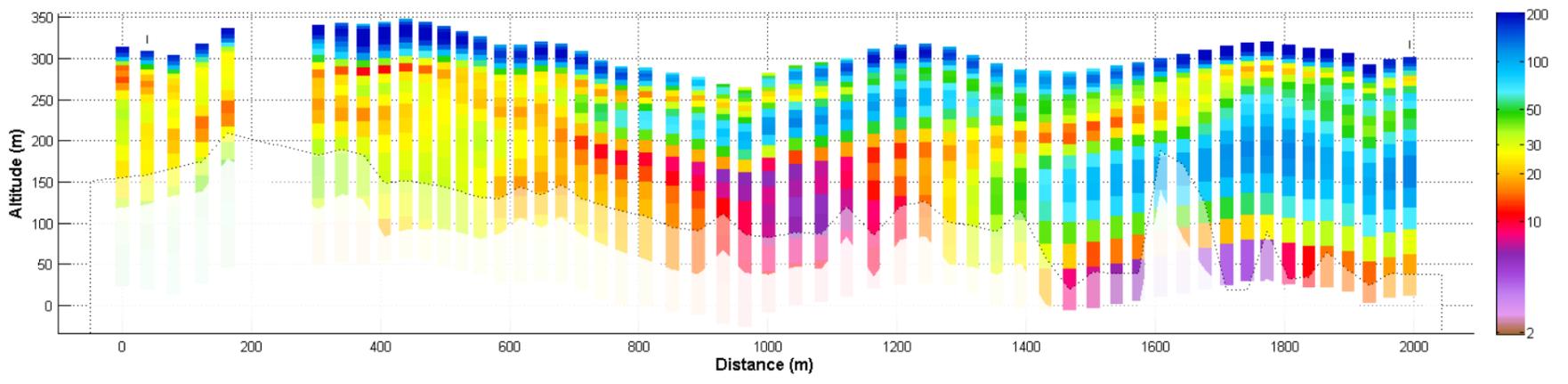
Chirongui 4



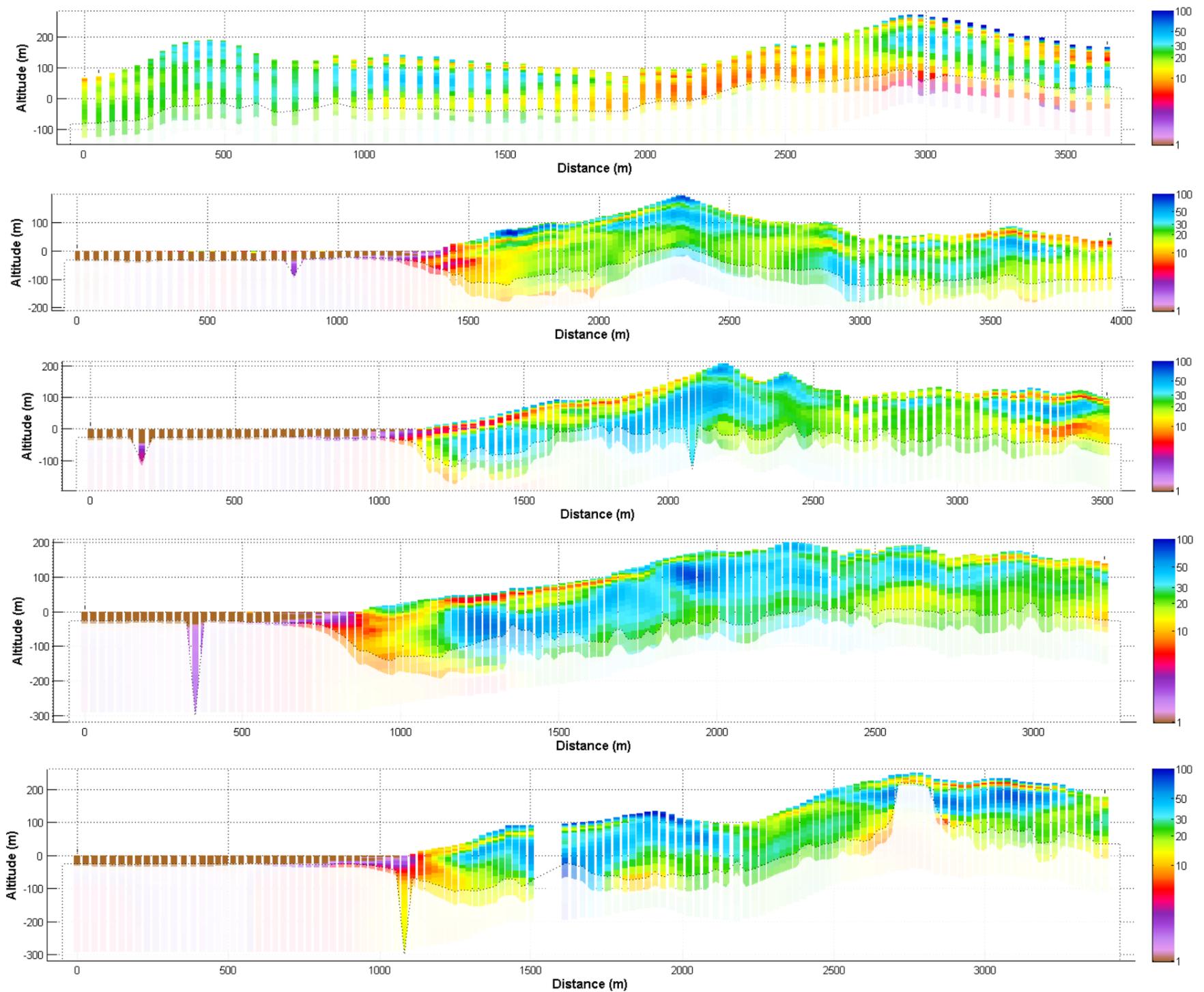
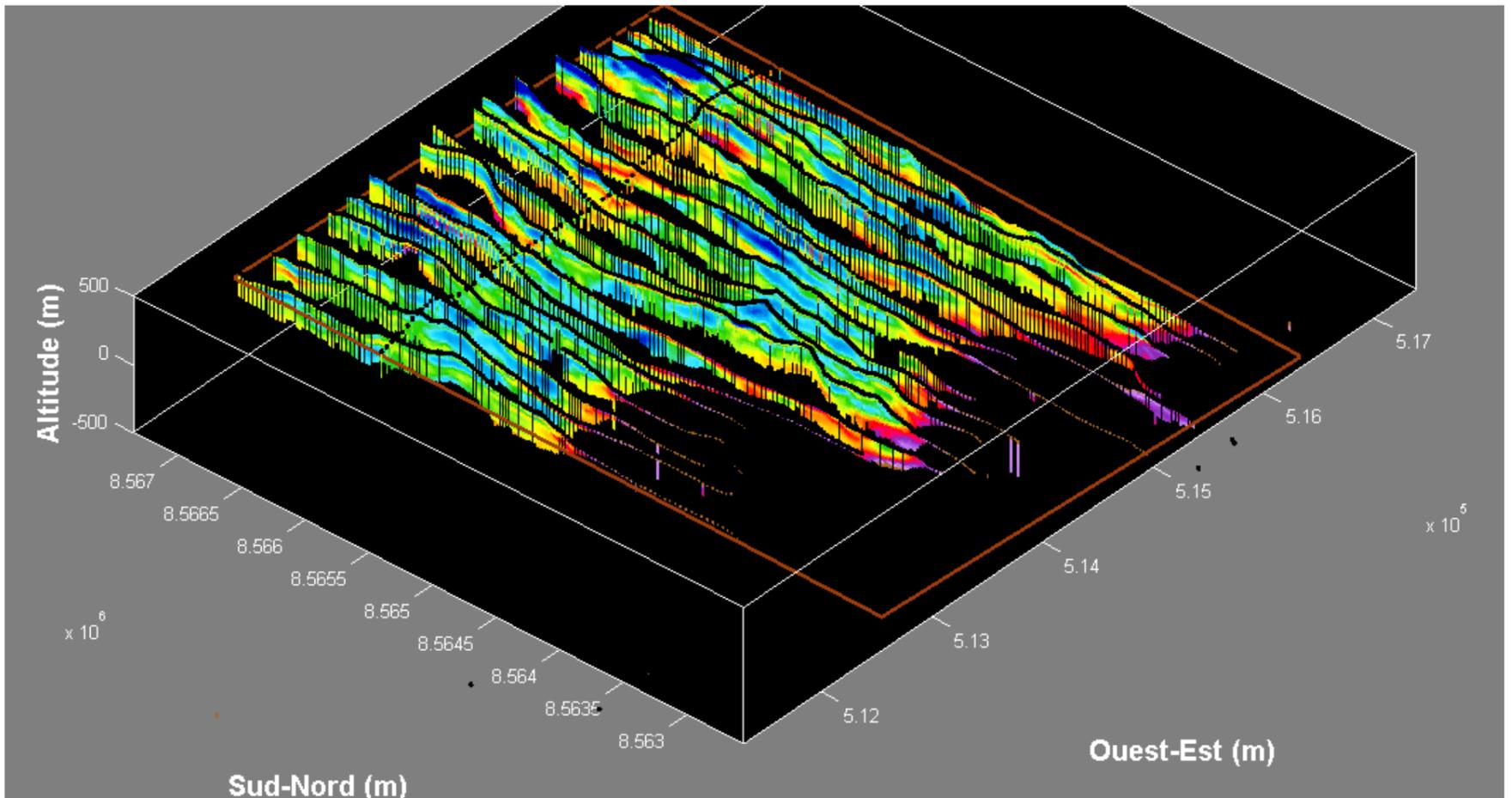
Zone de MIRERENI (5)

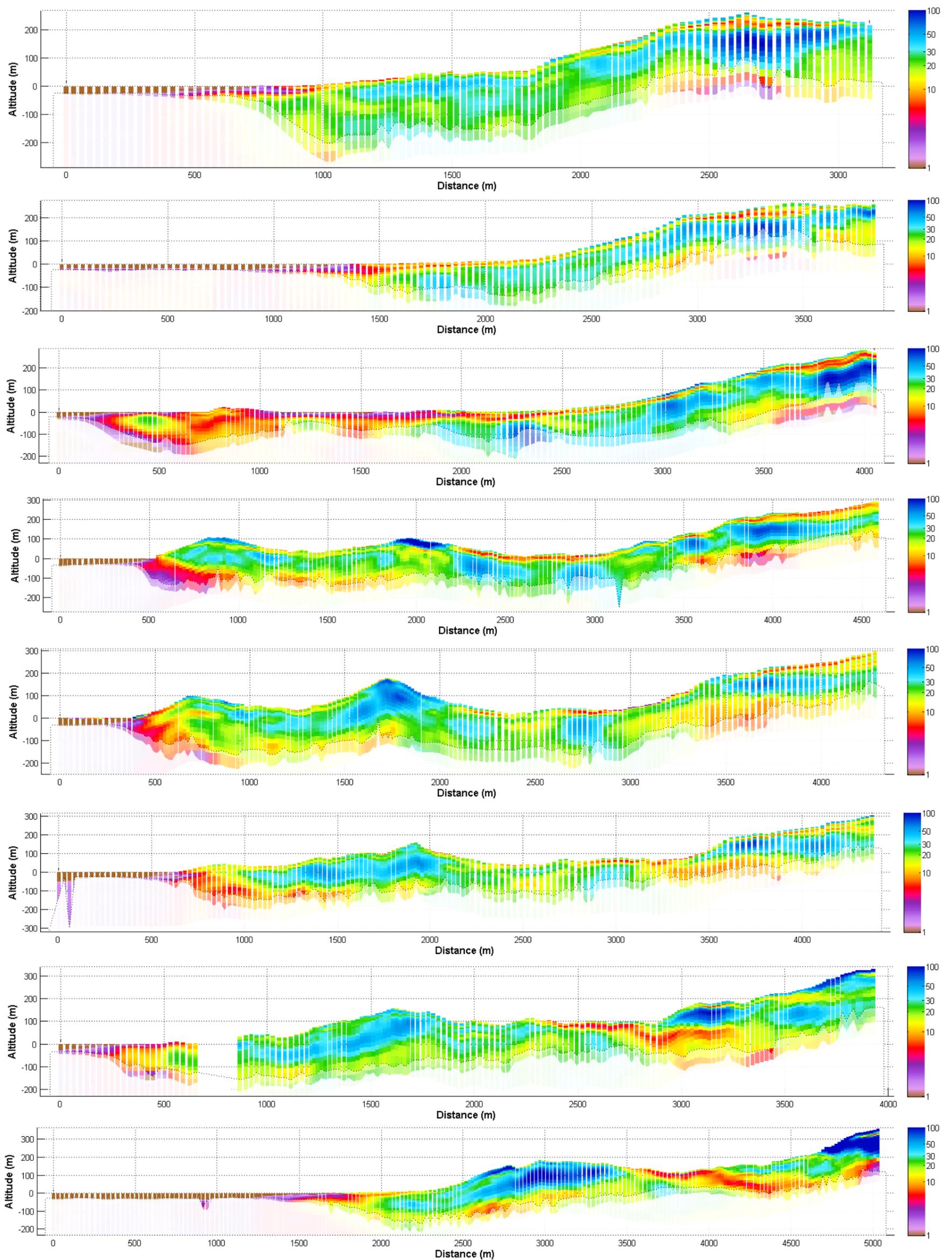


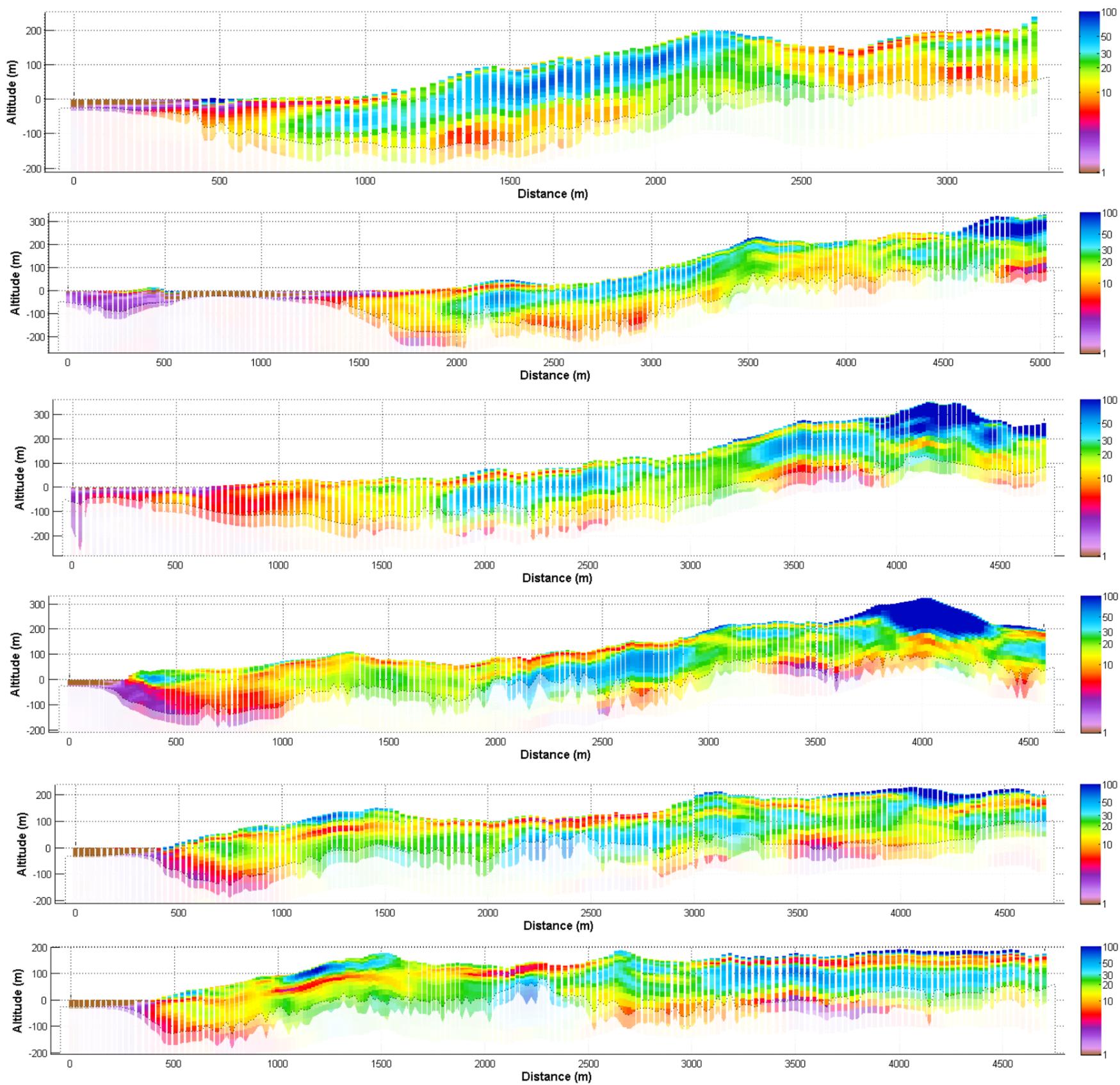




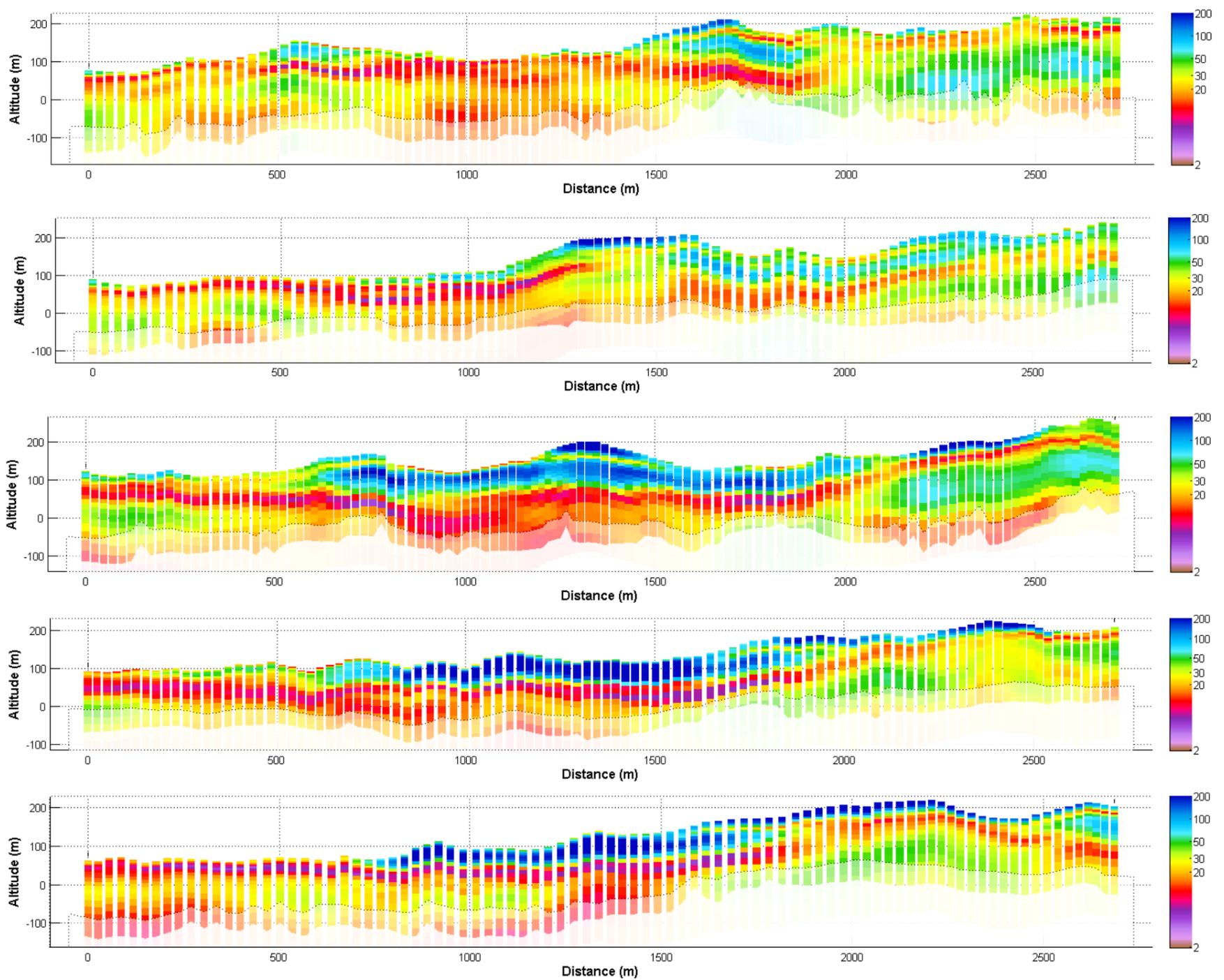
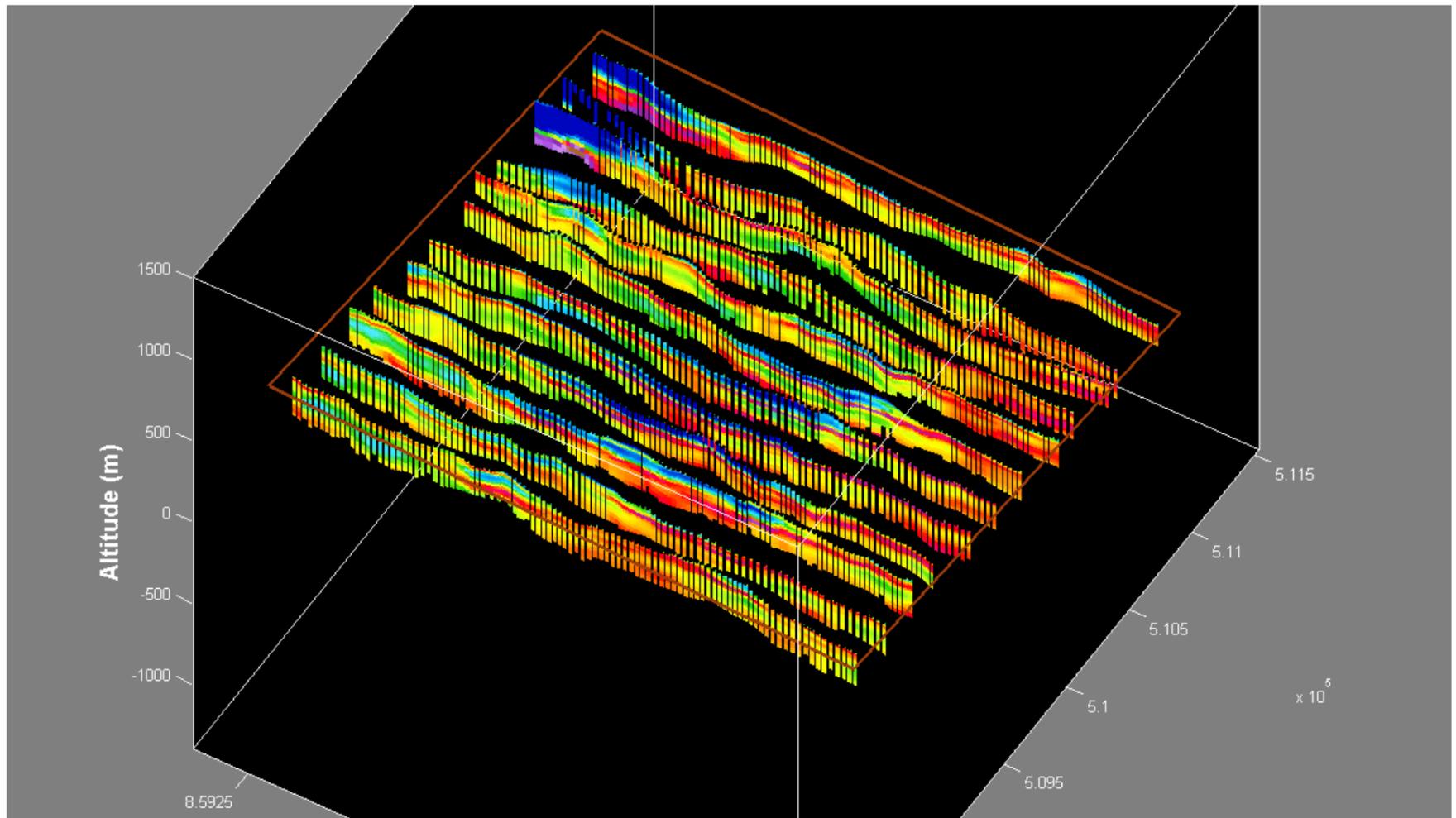
Zone de MBOUINI et MRONABEJA (1 et 2)

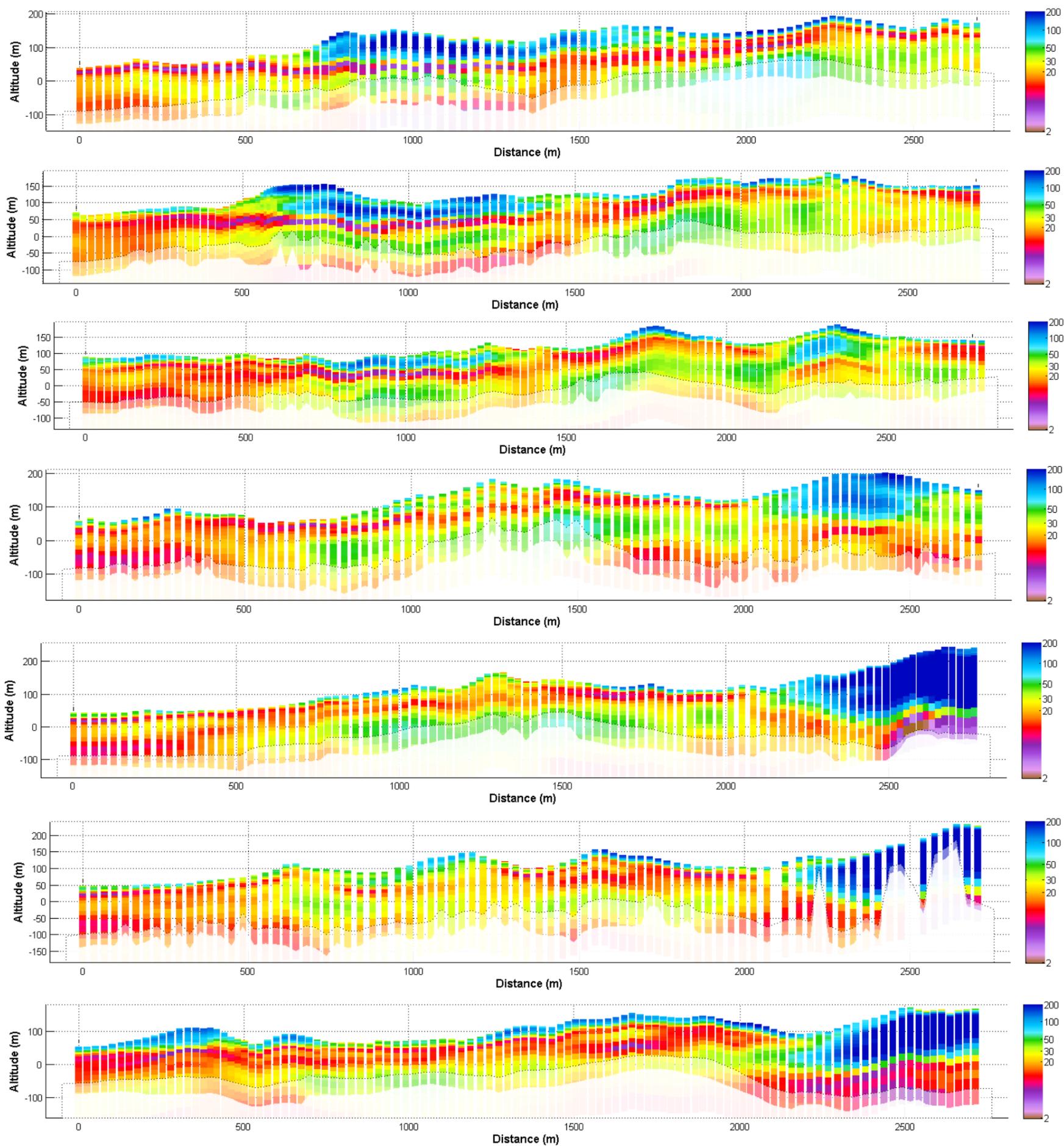




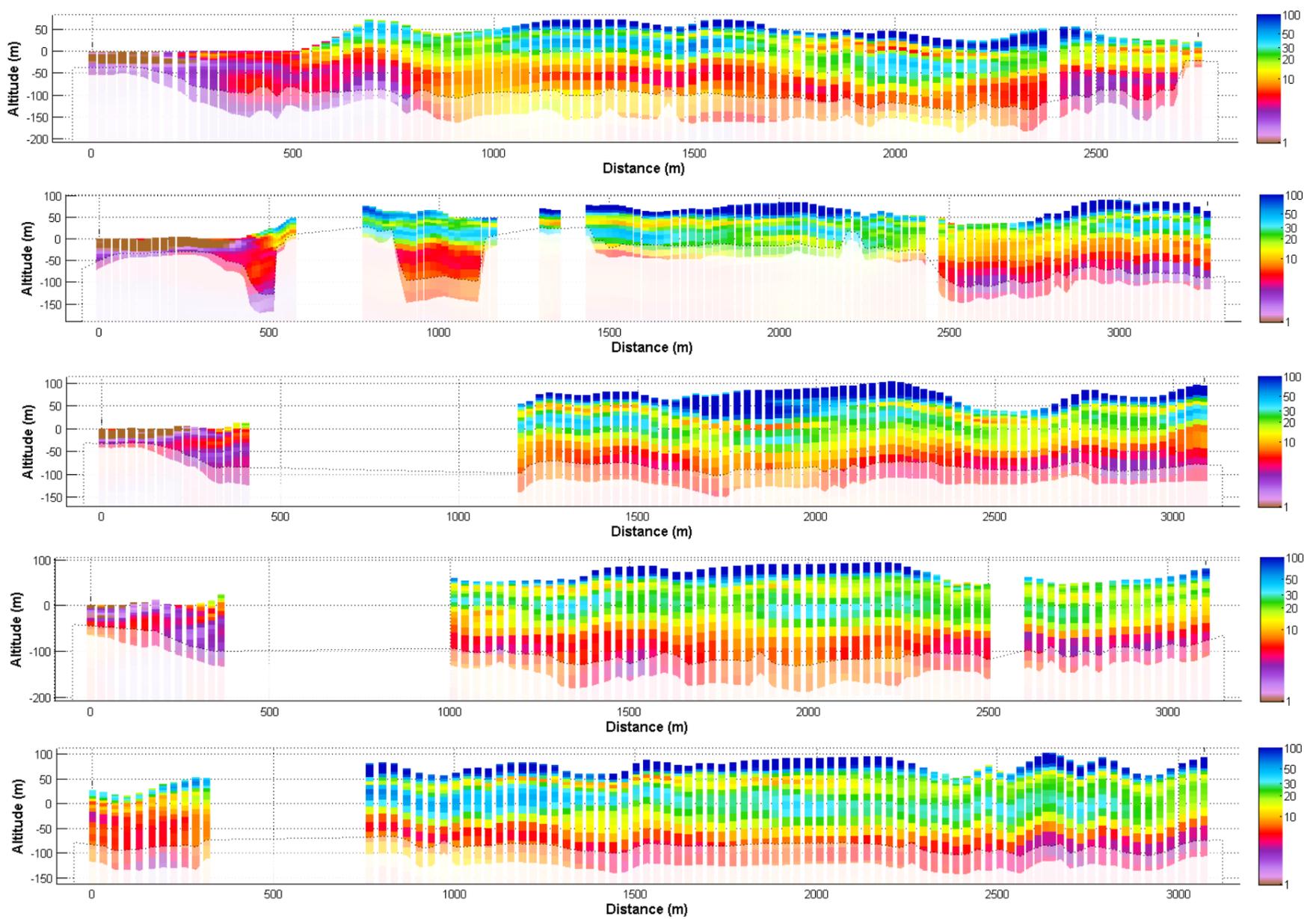
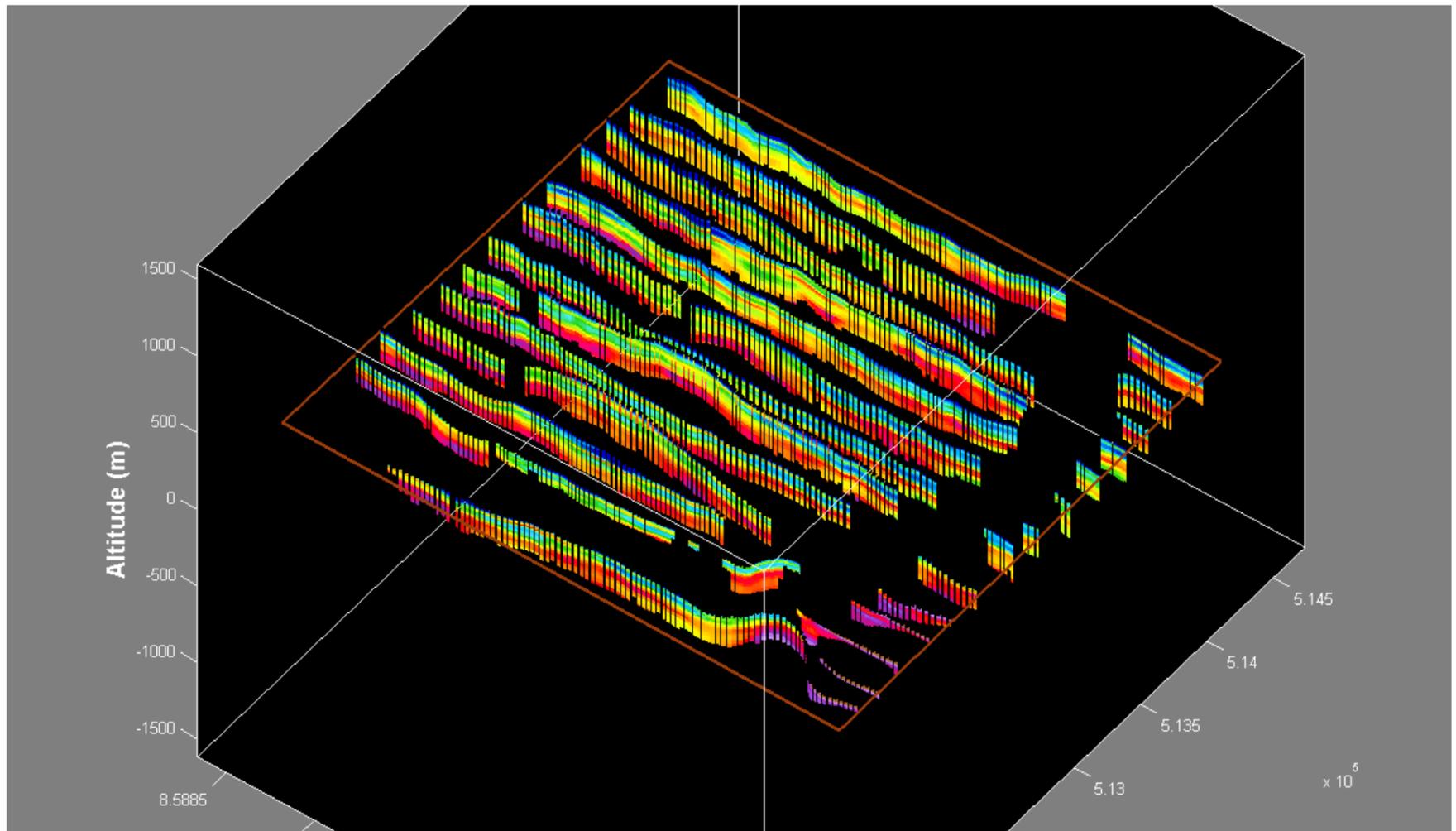


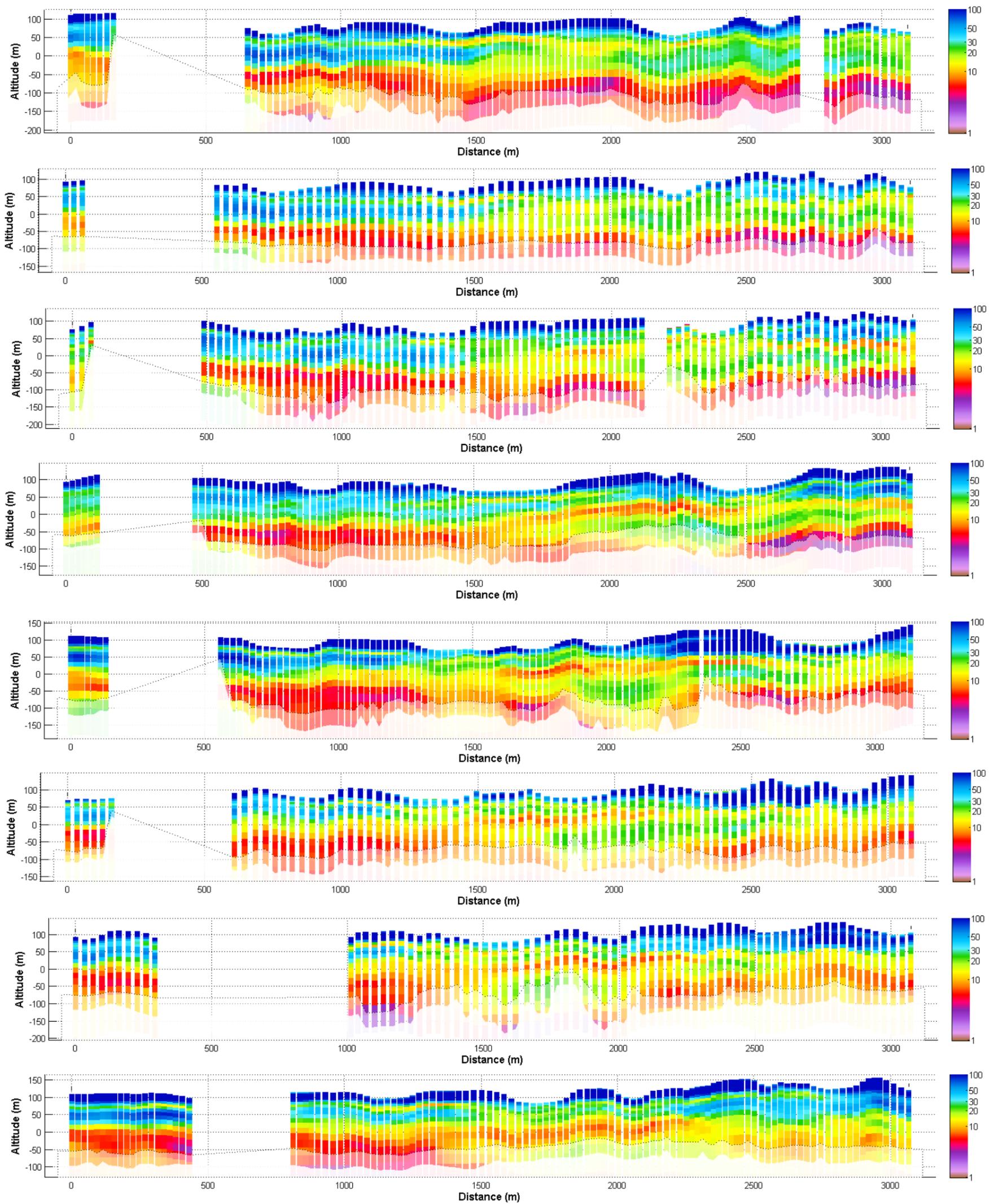
Zone de ANKETABE (MTSANGAMOUJI) (10)



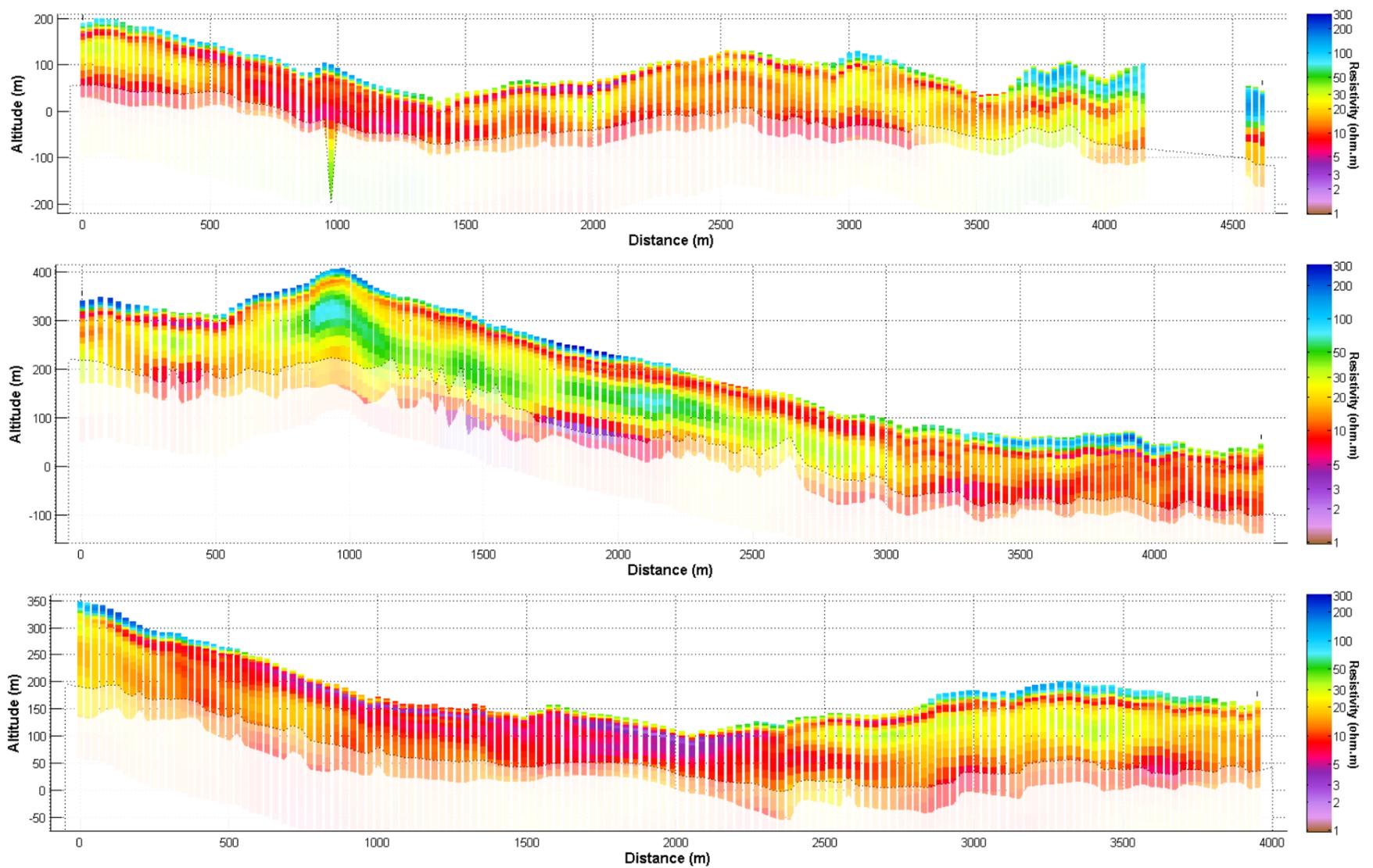
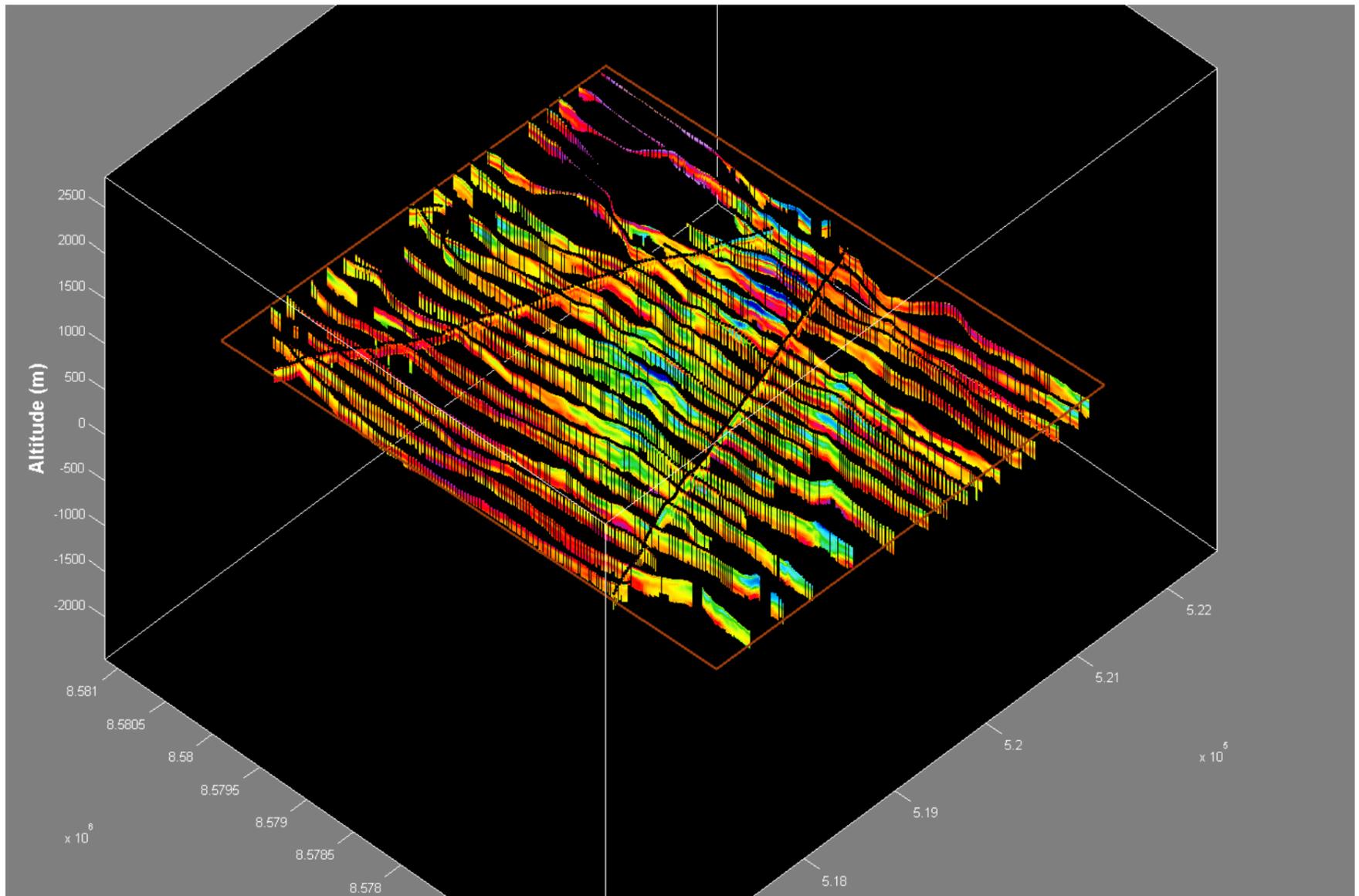


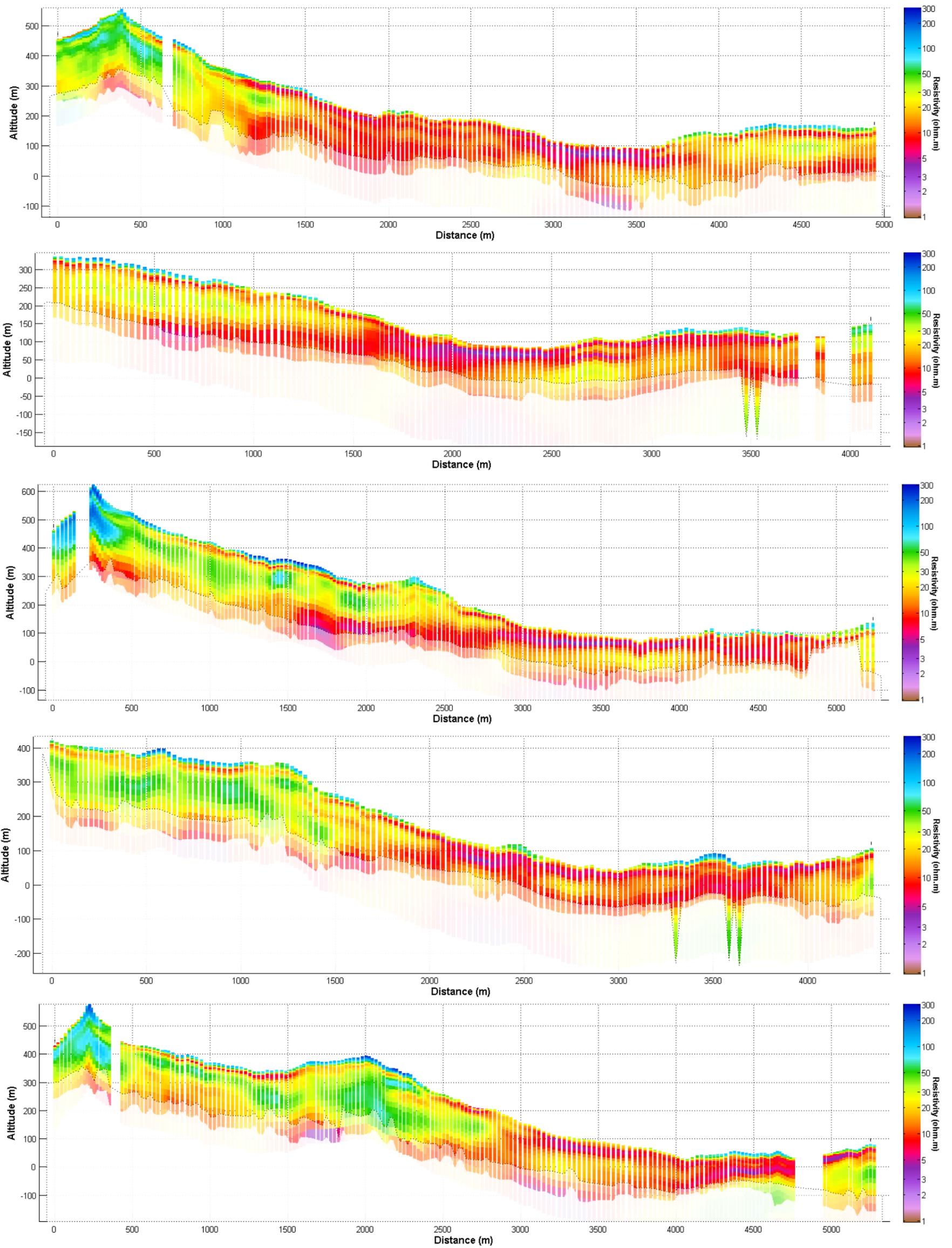
Zone de MROWALE (TSINGONI) (8)

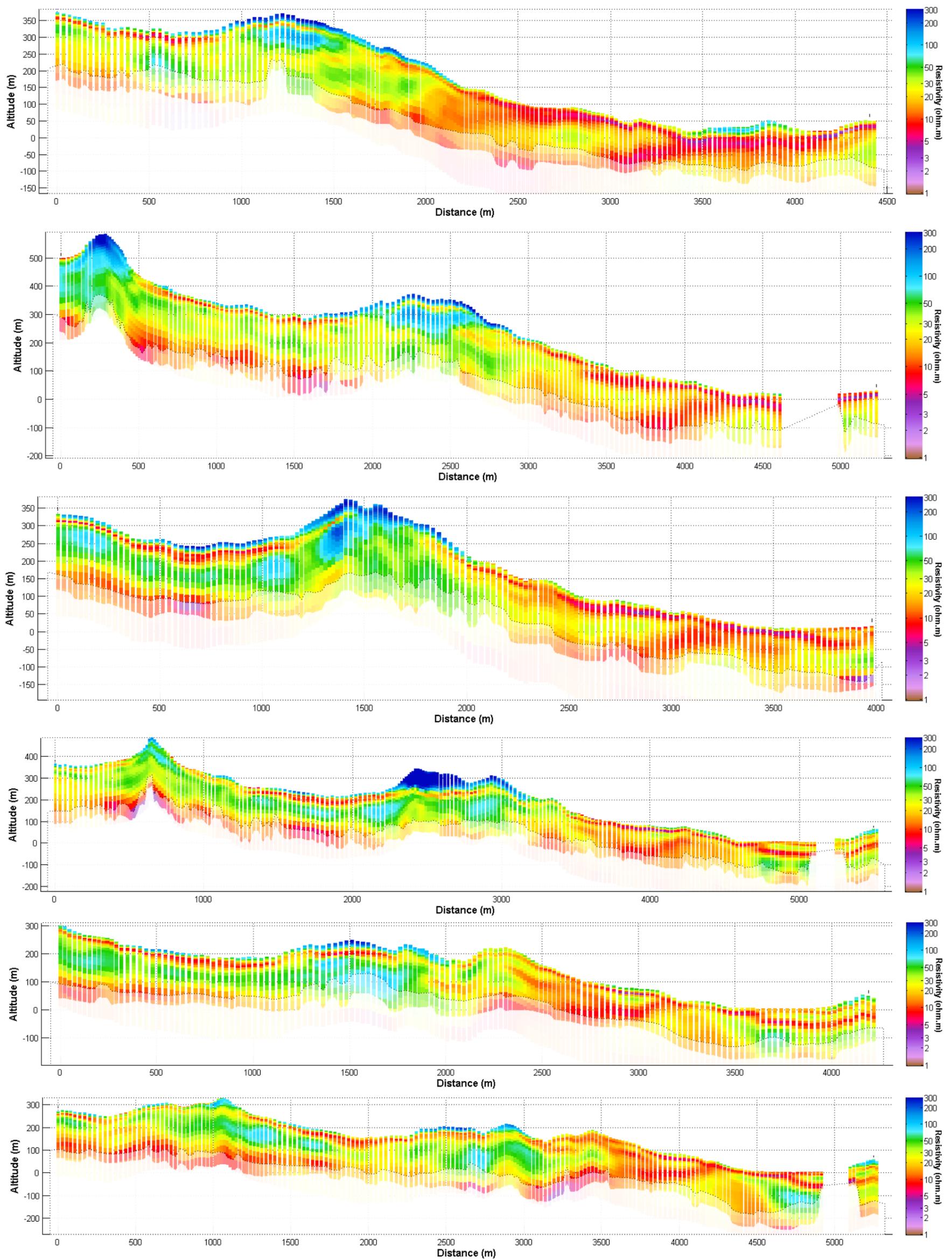


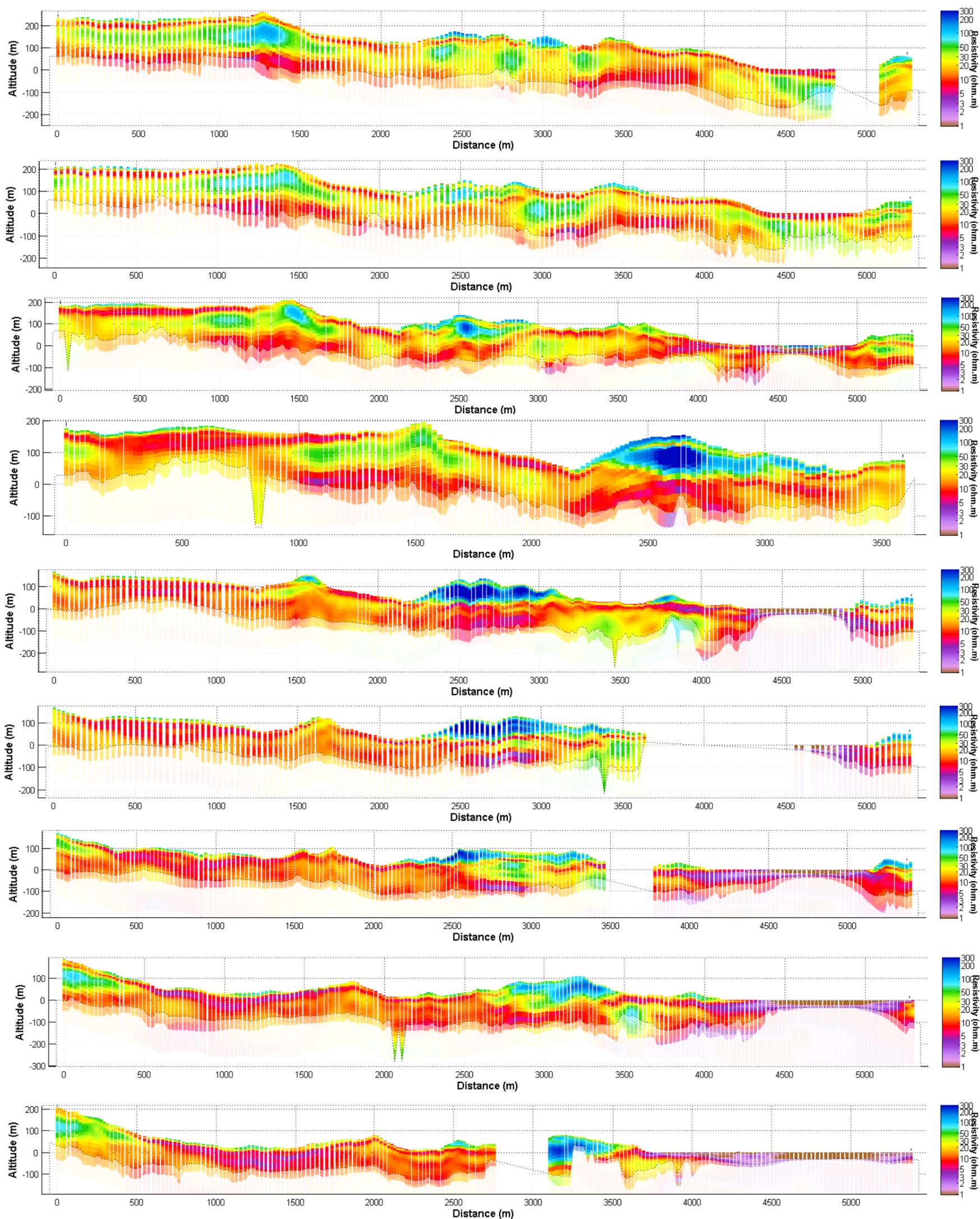


Zone de DEMBENI (9)









Annexe 3

Agenda des réalisations

Samedi 24/06/2017, am : Arrivée à Mayotte, récupération de la voiture de location à l'aéroport. Déplacement Aéroport- gîte (Villa Maora) ; pm : RDV au Bureau avec Manu Parizot, déballage des caisses, mises en place dans les véhicules. Echange du véhicule de location avec un véhicule BRGM (4x4).

Dimanche 25/06/2017 : Repos

Lundi 26/06/2017 : RDV à 8H00 avec Manu Parizot, Sara Eddam et Grégoire Dectot (GD), mise en place et mesure du Profil P7. 8H00-16H00

Mardi 27/06/2017 : RDV à 8H00 Benjamin Maurice (BM) et Jean-Michel Baltassat (JMB) avec Said Ali (SA), Ben Ahamada Mohamed (BAM) et Mohamed Ali (MA), manœuvres de Tifaki Hazi. Démobilisation du profil P7. 8H00-16H00. Echange du Duster blanc (pb de démarrage + à bas régime) avec Duster bleu.

Mercredi 28/06/2017 : RDV à 7H00 BM et JMB avec SA, BAM et MA. Mise en place, mesure et démobilisation du profil P6. 7H00-16H30

Jeudi 29/06/2017 : RDV à 7H00 BM et JMB avec SA, BAM et MA. Mise en place, mesure et démobilisation du profil P10. 7H00-17H00

Vendredi 30/06/2017 : RDV à 7H00 BM avec SA, BAM et MA. Mise en place, mesure et démobilisation du profil P8. 7H00-18H00

Samedi 01/07/2017 : RDV à 7H00 BM avec SA, BAM et MA. Prise en charge des manœuvres à Mamoudzou (pb voiture). Mise en place, mesure et démobilisation du profil P5. 8H00-17H00

Dimanche 02/07/2017 : Repos. Effraction portière avant gauche du Duster bleu dans l'enceinte du gîte.

Lundi 03/07/2017 : RDV à 8H30 JMB+BM avec SA, BAM et MA au bureau BRGM à Kaweni. Echange du Duster bleu avec le Duster blanc. Décision de reporter le voyage retour au mercredi 12/07/17. Mise en place du profil P3. 8H30-17H30

Mardi 04/07/2017 : RDV à 8H30 JMB+BM avec SA, BAM et MA à Iloni. Deux traces avec résistance infinie (74-75) ; vérification électrodes et connecteurs, échanges de flûtes et finalement pb dû à 1 feuille à l'intérieur d'une connexion (!). Mesure et démobilisation du profil P3. 8H30-18H00.

Mercredi 05/07/2017 : RDV à 8H00 JMB+BM avec SA, BAM et MA à Bandrélé. Mise en place, mesure et démobilisation partielle du profil P1. 8H30-17H30. Fin du layonnage du P4 par Grégoire Dectot avec 2 manoeuvres.

Jeudi 06/07/2017 : RDV à 8H00 BM avec Frédéric Tronel (FT) et SA, BAM, MA et Ichad (I) à Iloni. Fin de démobilisation du profil P1. Visite de terrain de FT qui participe à la mise à la mise en place du profil. Mise en place, mesure et démobilisation du profil P2. 8H00-18H00. RDV à 8H00 JMB avec GD et deux manoeuvre pour implantation du profil P9. Implantation du profil et layonnage du P9 par GD avec 2 manoeuvres. Visite à la gendarmerie de Zaouszia (infructueuse) par JMB qui rejoint ensuite BM sur P2. Perte de 2 machettes. Accident rétro sur la voiture des manoeuvres lors du voyage retour de nuit.

Vendredi 07/07/2017 : Achat ampoules phares pour Duster blanc, d'une machette et d'une massette. RDV à 8H00 BM + JMB avec SA, BAM, MA et I à Bandré. Mise en place, mesure et démobilitation du profil P4. 8H00-17H00. Achat d'une machette et d'une massette.

Samedi 08/07/2017 : Panne d'essence du Duster gris 270 km après le plein (!). RDV à 8H30 BM + JMB avec SA, BAM, MA et I au Sakouli. Mise en place, mesure et démobilitation du P3bis. 8H30-16H00.

Dimanche 09/07/2017 : Repos

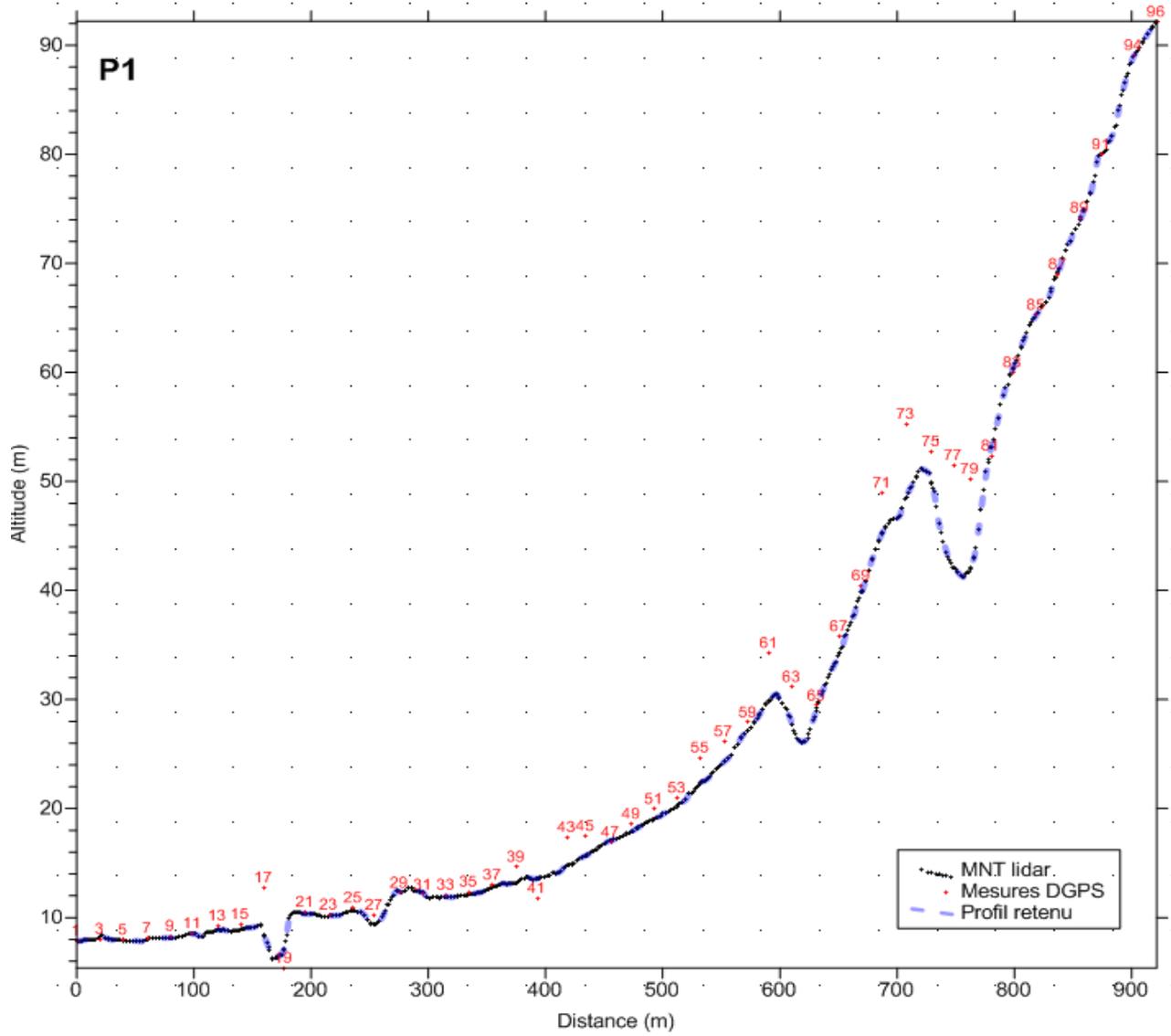
Lundi 10/07/2017 : RDV à 7H00 BM + JMB avec SA, BAM, MA et I à la barge. Déplacement à Petite Terre. Mise en place et mesure du profil sur la plage à proximité de l'usine de dessalement. Seul la configuration Wenner-Schlumberger a été mesurée. Nous nous sommes fait surprendre par la marée montante (Alizés forts) en fin de mesure. Démobilisation du profil en catastrophe avec une partie sous l'eau. Sur une bonne moitié du profil, les connecteurs ont été maintenus hors d'eau mais pour 4 segments les connecteurs ont été submergés. Deux enrouleurs et une partie des électrodes et des connecteurs d'électrode n'ont pu être démobilisés. Nettoyage du matériel à l'eau douce à l'usine de dessalement. 7H00-19H00

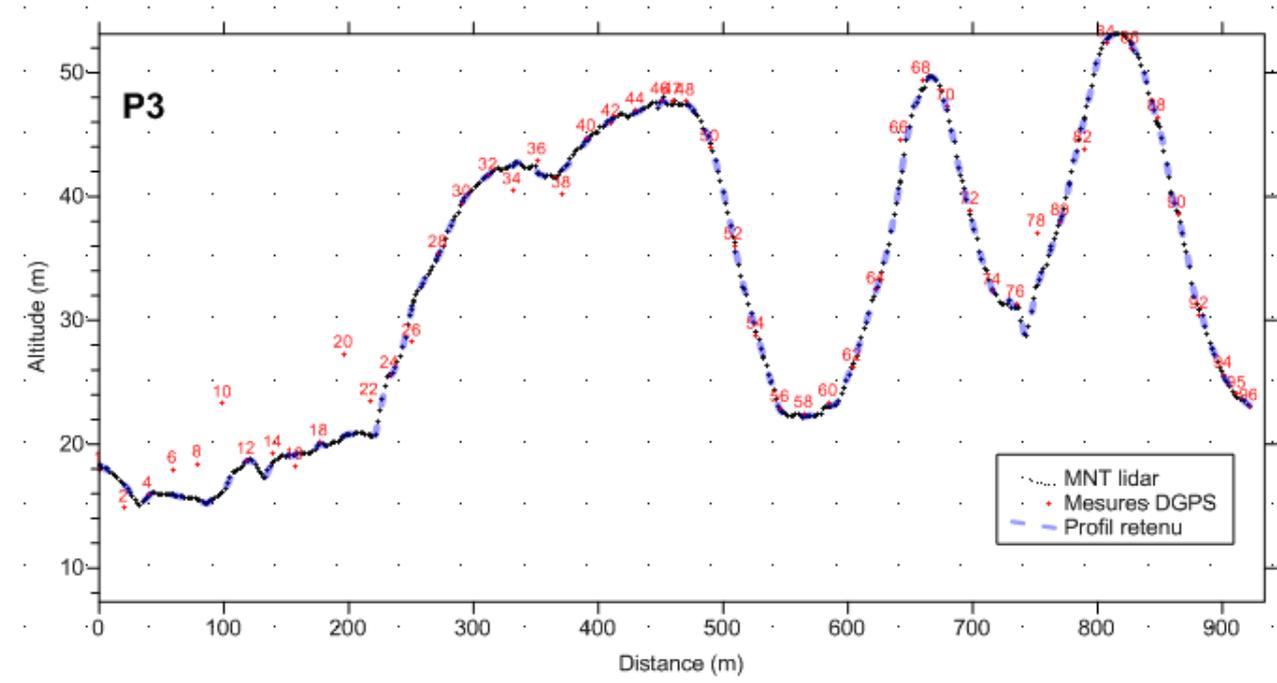
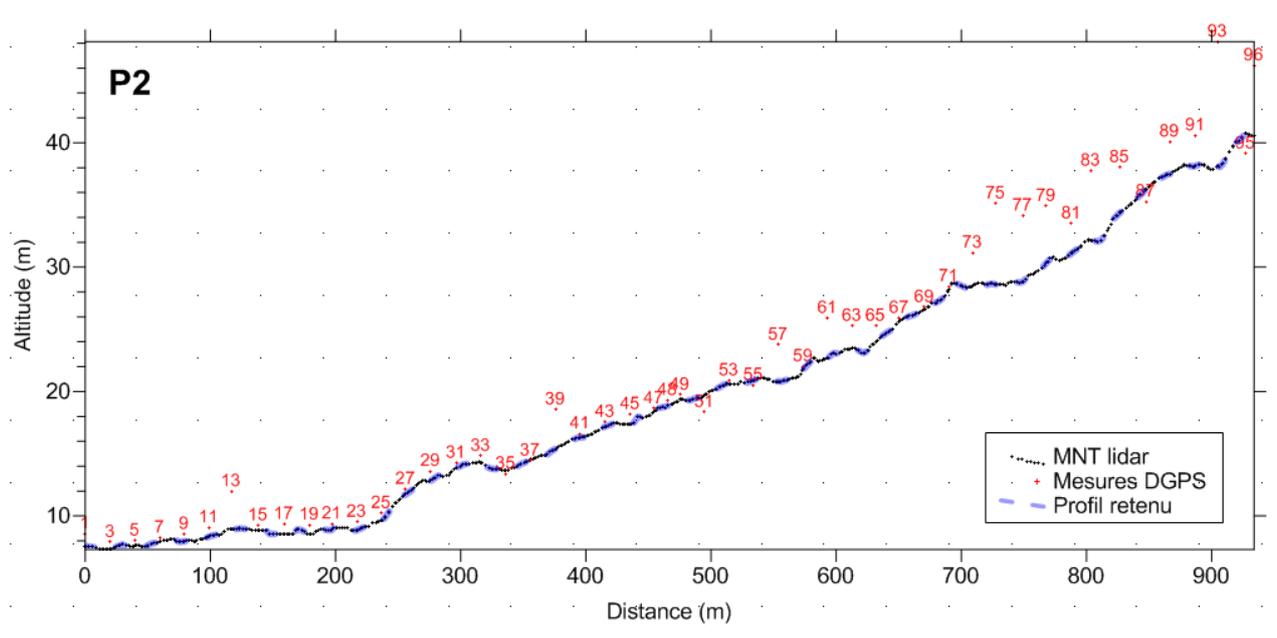
Mardi 11/07/2017 : RDV à 8H00 BM + JMB avec SA, BAM, MA et I à Itoni. Dépose du matériel le long du P9. Mise en place du P9 avec le matériel disponible par BM avec SA, BAM et I. Récupération du matériel sur la plage de l'usine de dessalement par JMB avec MA. Fin de mise en place du profil P9 avec le matériel récupéré. 2 enrouleurs manquants (volés ?), 10 électrodes et 18 raccords électrodes perdus. Mesure du P9 et démobilitation. 8H00-18H00

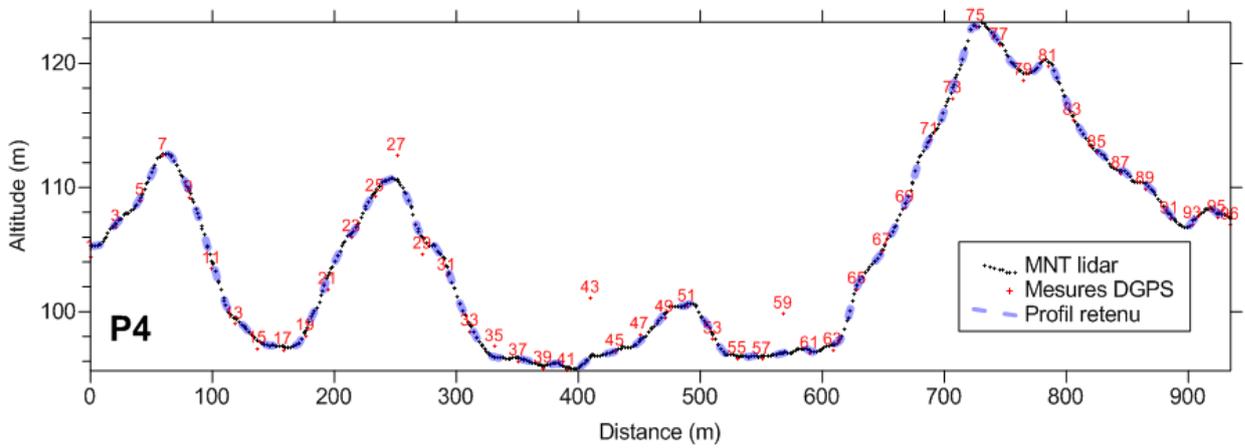
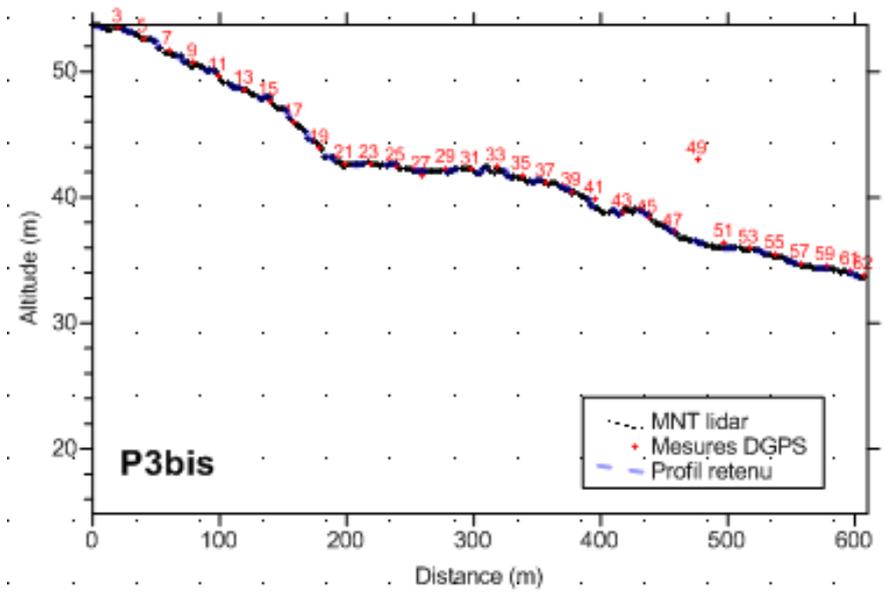
Mercredi 12/07/2017 : matin : mise en caisse ; après-midi : avion retour Dzaoudzi-Paris 15H00-5H00 (le jeudi).

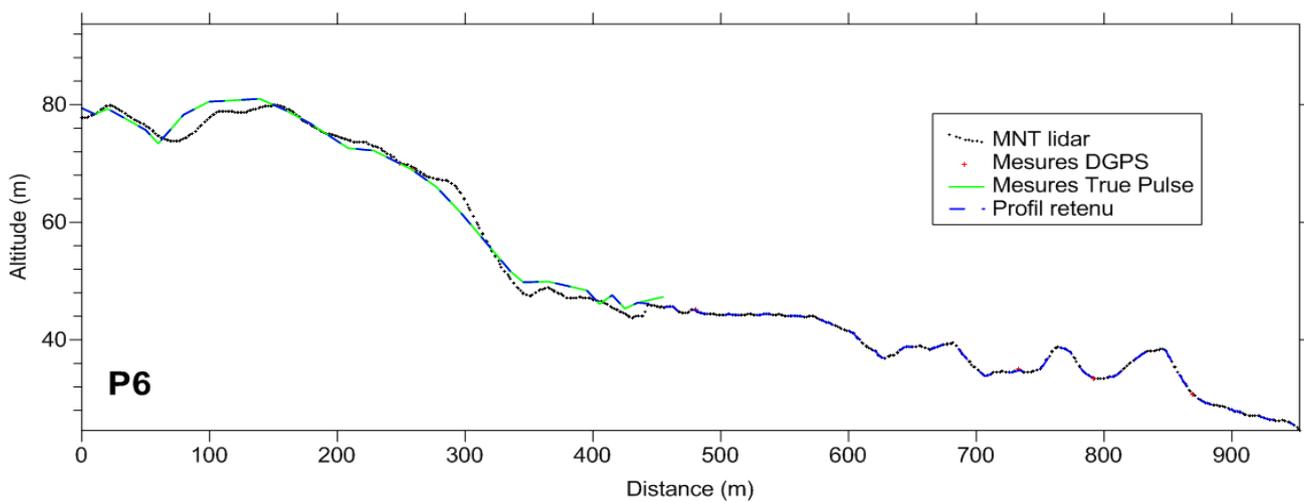
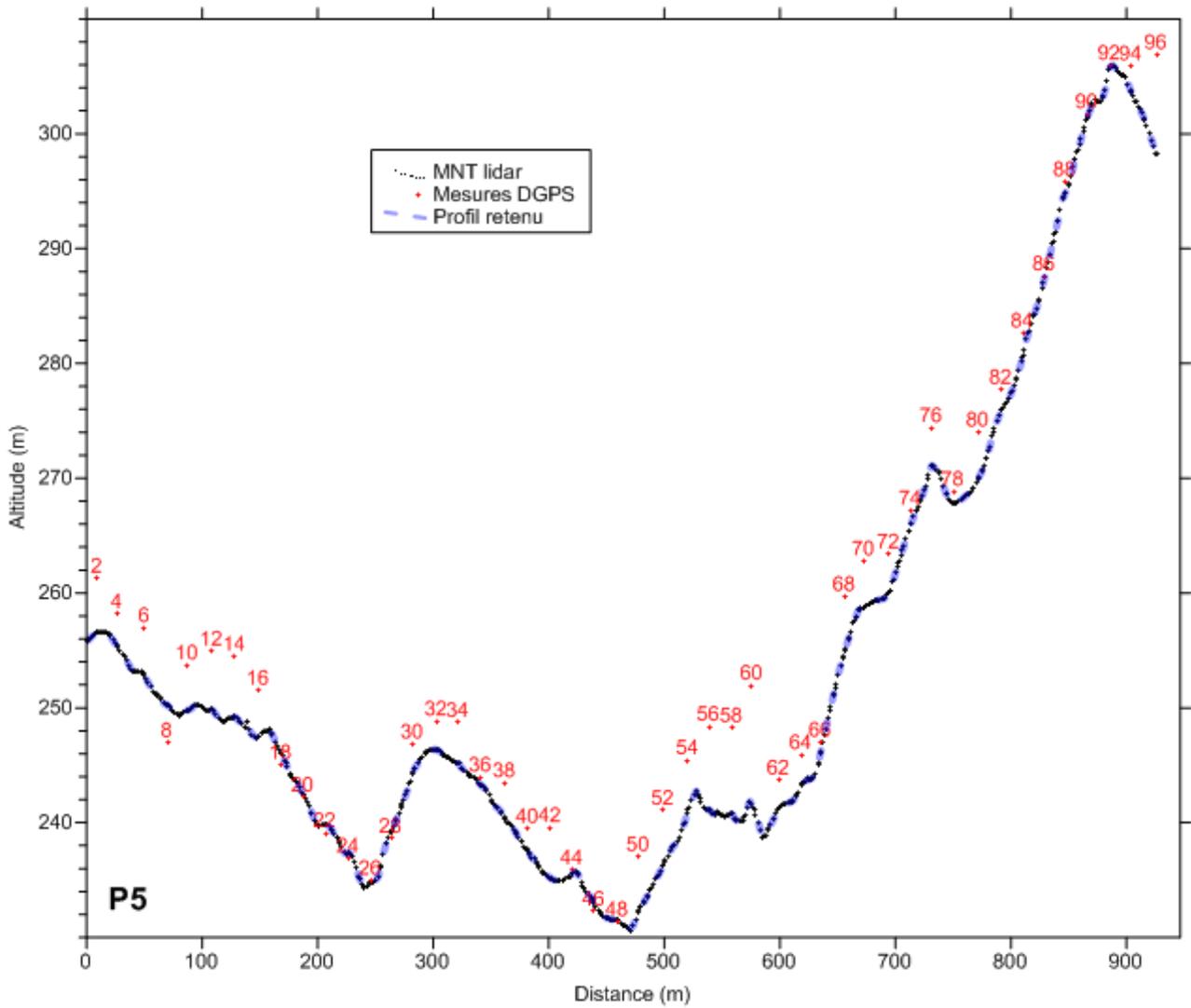
Annexe 4

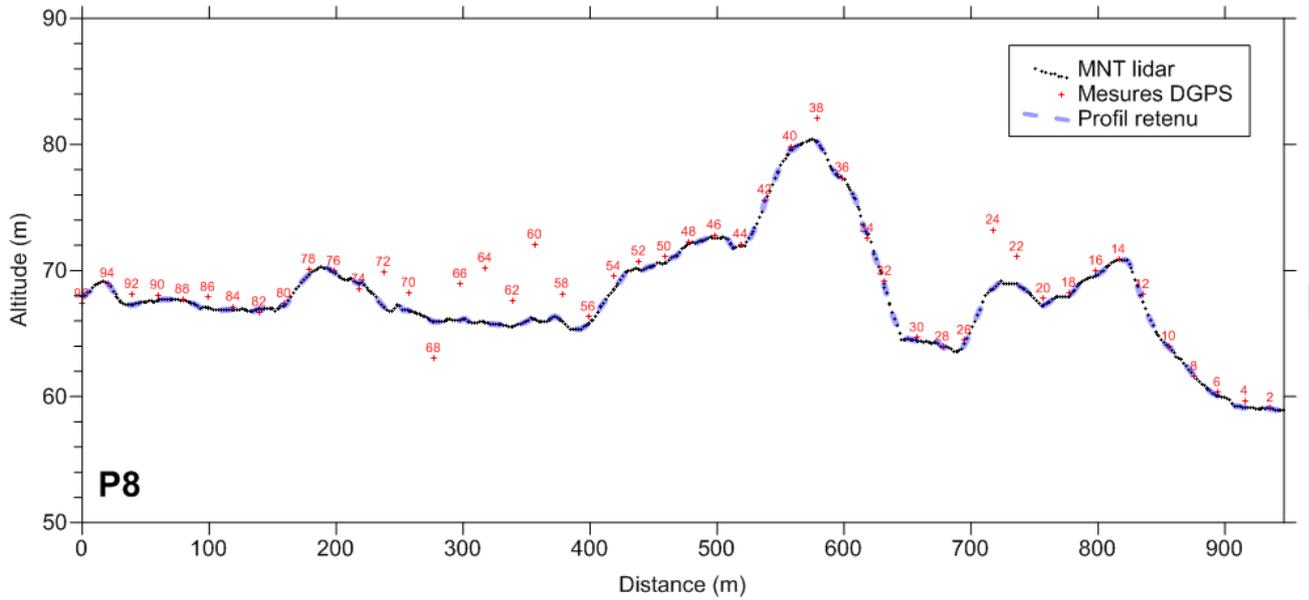
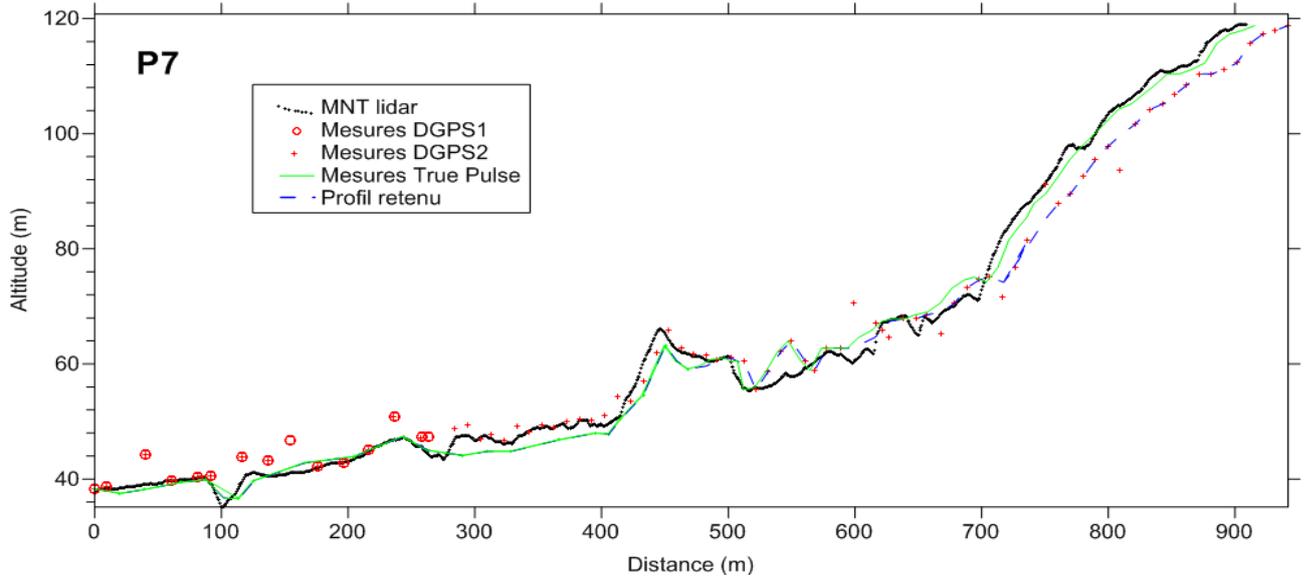
Topographie des profils

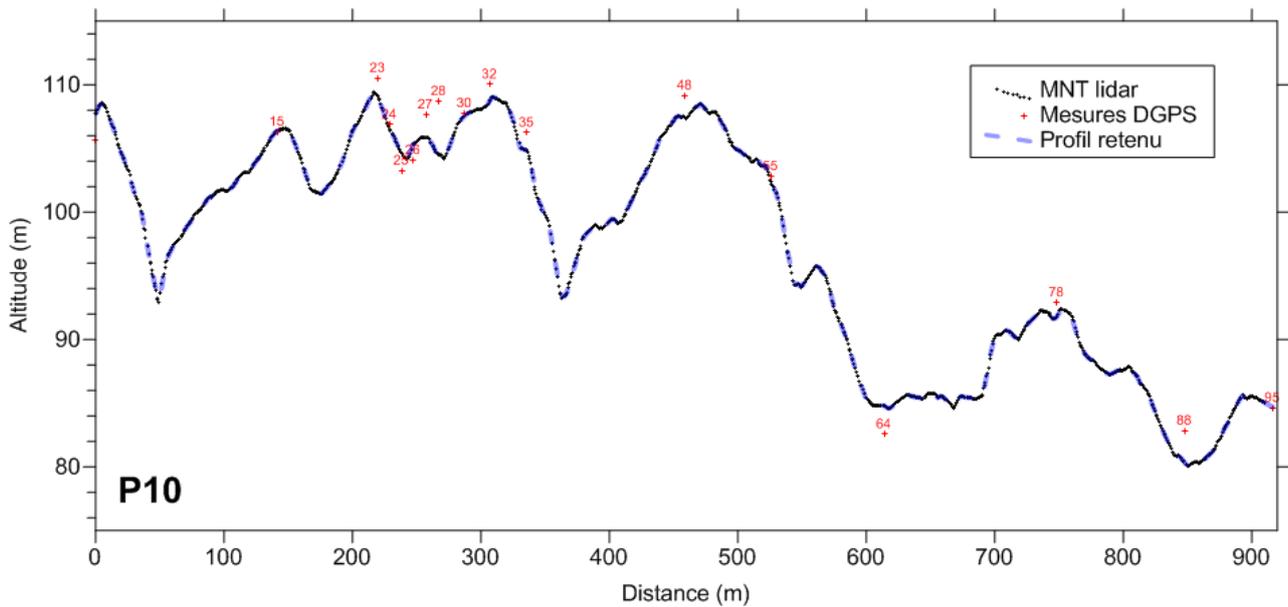
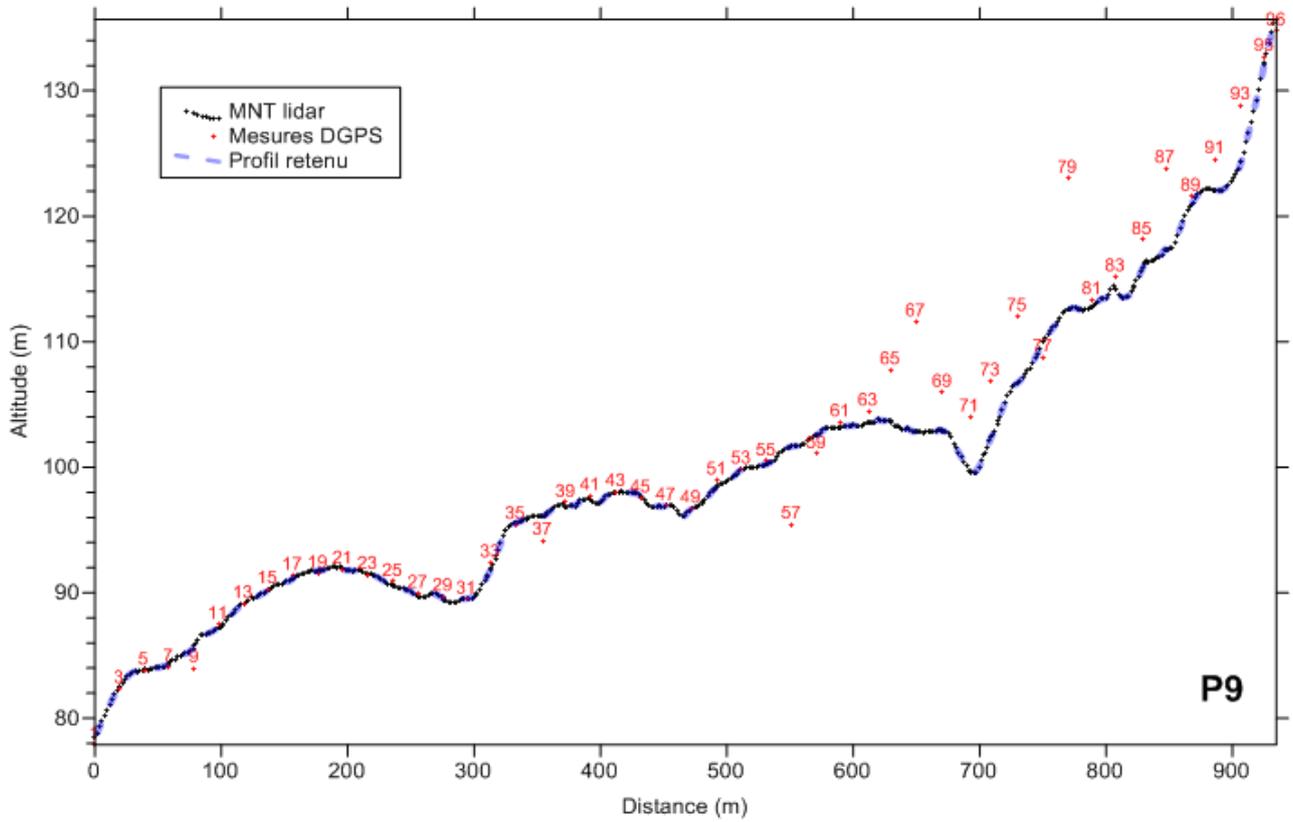












Annexe 5

Synthèses des paramètres de traitement des tomographies dipôle-dipôle

File input (.txt)	P1DD		P2DD		P3DD		P3bisDD		P4DD		P5DD		P6DD		P7DD		P8DD		P10DD		Plage	
quad. nbr	3494	3494	3205	3205	2672	2376	1552	1263	3205	3205	3585	2655	2672	2672	2672	2672	3435	2543	2672	2672	2837	2718
Rejected nodes																						
min I	204		338		150		109		43		23		123		364	400	55		111	124		1574
max I	2305		1702		1355		743		784		415		1232		1265	1234	980		1244			3115
filtered I																						5
min V	0,18		0,07		0,01		0,025		0,01		0,01		0,01		0,025	0,25	0,05		0,03	0,6		0,37
max V	14		16		40		70		26		26		26		17,8	4,6	7,3		50	49		30
filtered V	0,3		0,2		0,2		0,2				0,3		0,3		0,2		0,3		0,3			
min Q																						
max Q	16		11	3,75	18		12,5		28		32		20		14	4,5	15	8	14	3		17
filtered Q	5		5		5		5	3			5		5		5				5			
min rho	6,7		3		4,4		11,2		6,6		16		6,4		3,4	4,1	11	5	4,7	6		0,46
max rho	54,3		140		209		242		236		520		114		73	73	230	18	581	511		6
filtered rho																						
filtered quad.	160		347		801		469		1615		1858		872				1212		915			187
remain. quad.	3334	3211	2858	2042	1871	1685	1083	923	1590	1590	1727	1283	1800	1557	1826	1778	2223	1614	1757	1731		2531
% remain. quad	95	92	89	64	70	71	70	73	50	50	48	48	67	58	68	67	65	63	66	65		93
neg. rho	61		50		101		36		459		506		98		83		320		104			42
File output (.dat)	P1DDF	P1DDF	P2DDF	P2DDF	P3DDF	P3DDF	P3bisDDF	P3DDF	P4DDF	P4DDF	P5DDF	P5DDF	P6DDF		P7DDF	P7DDF	P8DDF	P8DDF	P10DDF	P10DDF	PlageW	
remark	n 30 not used (road)	man edit, n96 rejected		man. edit	6 last lines rem.	man. edit	18 last lines rem.	man. edit	16 last lines remove	man. edit	very noisy, 26 last lines rem.	man. Edit	6 last lines rem.	man. edit	7 last lines rem.	man. edit	n77 not used, n35 rej.	man. edit, 13 last lines rej.	acoup on n.79; 11 last lines rem.	man. edit		no injection on nodes 20,21,2

Annexe 6

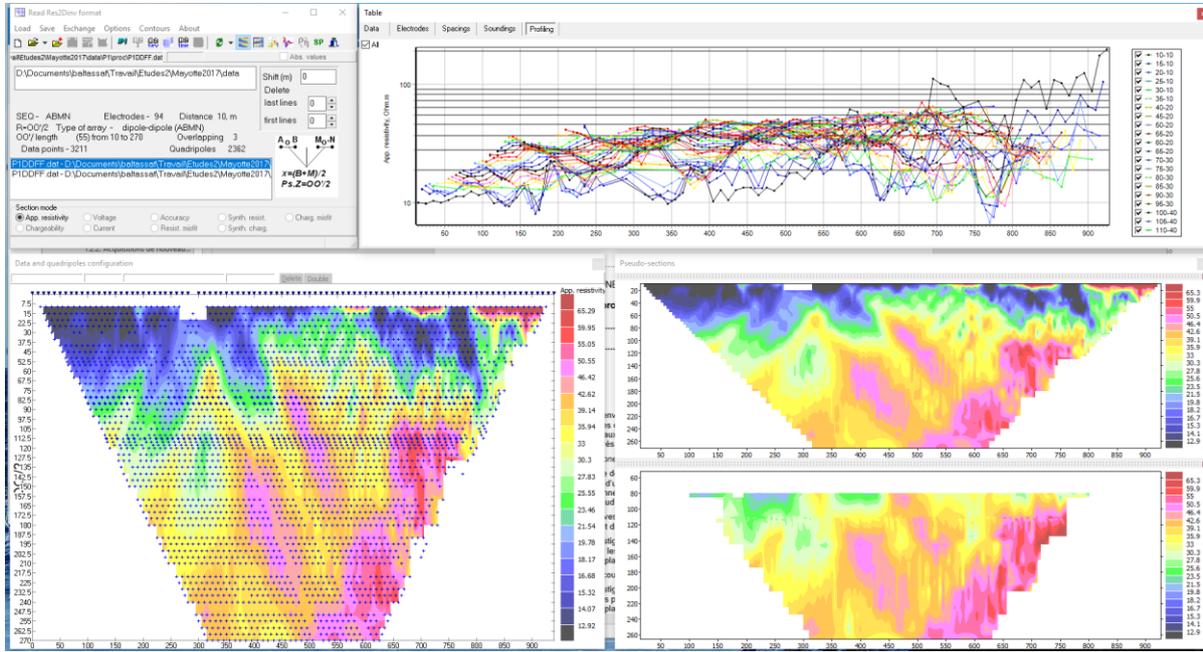
Synthèses des paramètres de traitement des tomographies Wenner-Schlumberger

File input (.txt)	P1WSR		P2WSR		P3WSR		P3bisWSR		P4WSR		P5WSR		P6WSR		P7WSR		P8WSR		P9WSR		P10WSR		Plage	
quad. nbr	3250		3250		3250		1519	1519	3250		3250	3250	2871		3250		3117		3250	3250	3250		2837	2718
Rejected nodes																								
min I	289		35		135		100		60		19		203		280		55		150		137			1574
max I	1629		1468		990		885		685		600		1066		1340		980		1355		1375			3115
filtered I																							5	
min V	0,75		0,6		0,15		0,2		0,08		0,1		0,7		0,2	0,3	0,12		0,23		0,7			0,37
max V	76		76		180		400		92		180		123		95	94	130		92		223			30
filtered V					0,3		0,3		0,3		0,3				0,3		0,3		0,3					
min Q																								
max Q	2,2	0,65	1,7	0,7	2,25	1,8	1,2		4,75	2,25	7	3,4	8	0,65	2,6	1,4	6,5	1,6	42	1,5	1,02	0,7		17
filtered Q	1		1		1		1								5				2					
min rho	12,7		10		8,5		15,3		9		26		10		5,4		18		3,9		10			0,46
max rho	77		45		145		143,5		128		295		81		51		120		116		308			6
filtered rho																								
filtered quad.	52		92		21		1	9	110		182	299	17		50		117		754		149			187
remain. quad.	3198		3158		3229		1518	1510	3140	2699	3068	2951	2854		3200		3000		2496	2077	3101			2531
% remain. quad	98		97		99		100	99	97	83	94	91	99		98		96		77	64	95			93
neg. rho	8		7		1		1		0		102		0		8		27		294		129			42
File output (.dat)	P1WSRF		P2WSRF		P3WSRF	P3WSRF	P3WSRF	P3WSRF	P4WSRF	P4WSRF	P5WSRF	P6WSRF	P7WSRF		P8WSRF		P9WSRF	P9WSRF	P10WSRF				PlageW SRF.txt	
remark	not used (road), man. edit		low V and I on n.52	man. edit				man. Edit			noisy			man. Edit		n.77 not used, man.edi t		man. Edit		acoup on n.79; man. edit			injection on nodes 20,21,22; man	

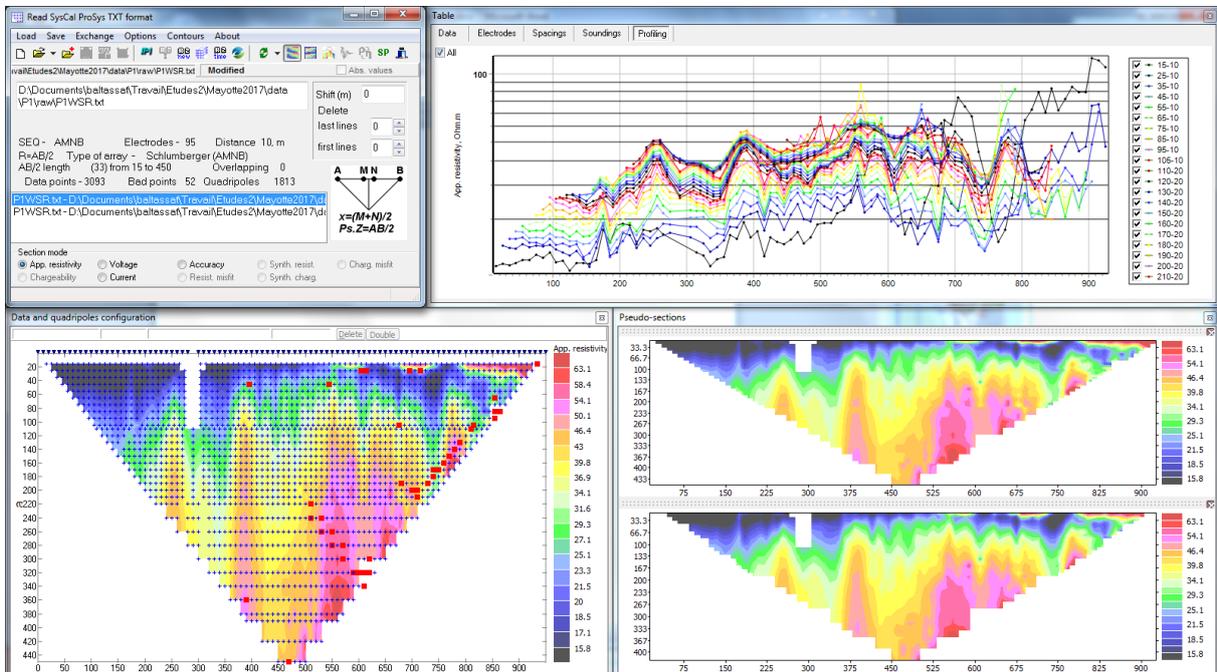
Annexe 7

Données des tomographies électriques dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger

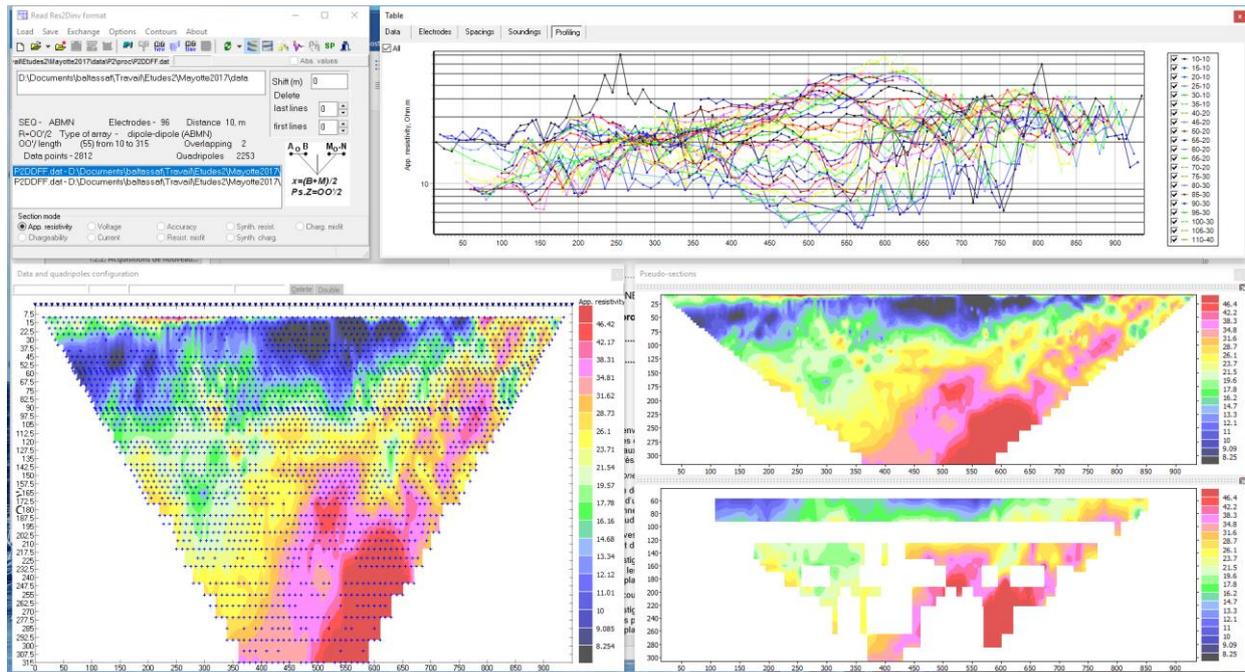
P1DD



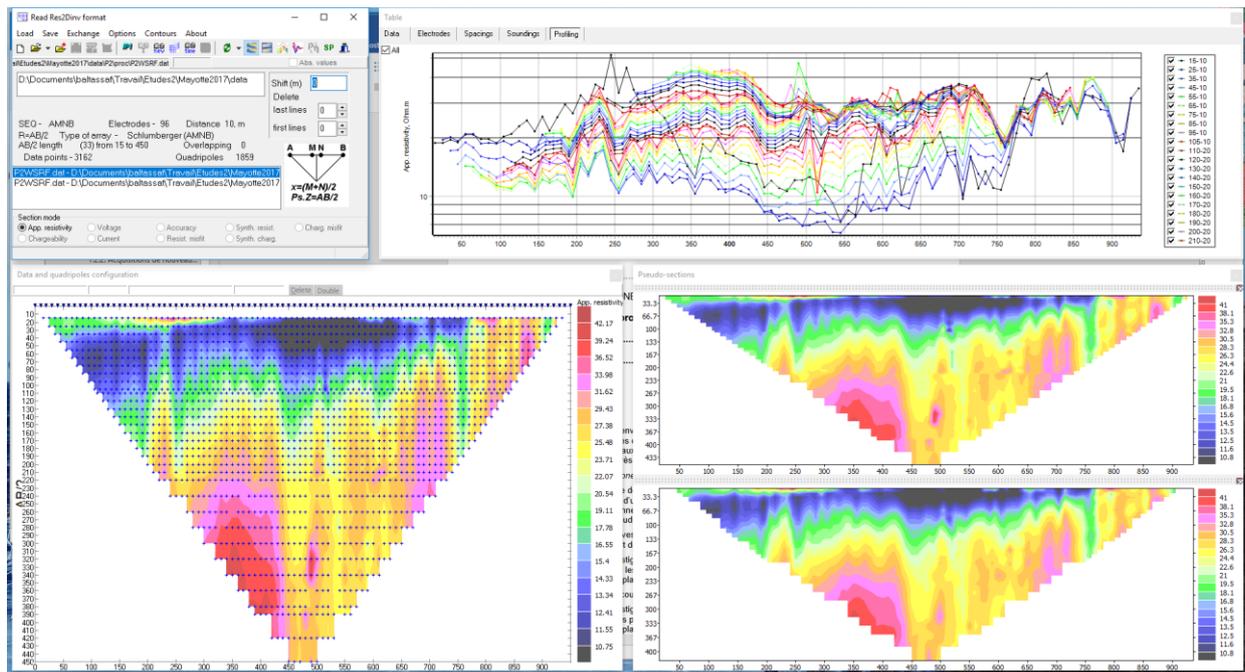
P1WSR



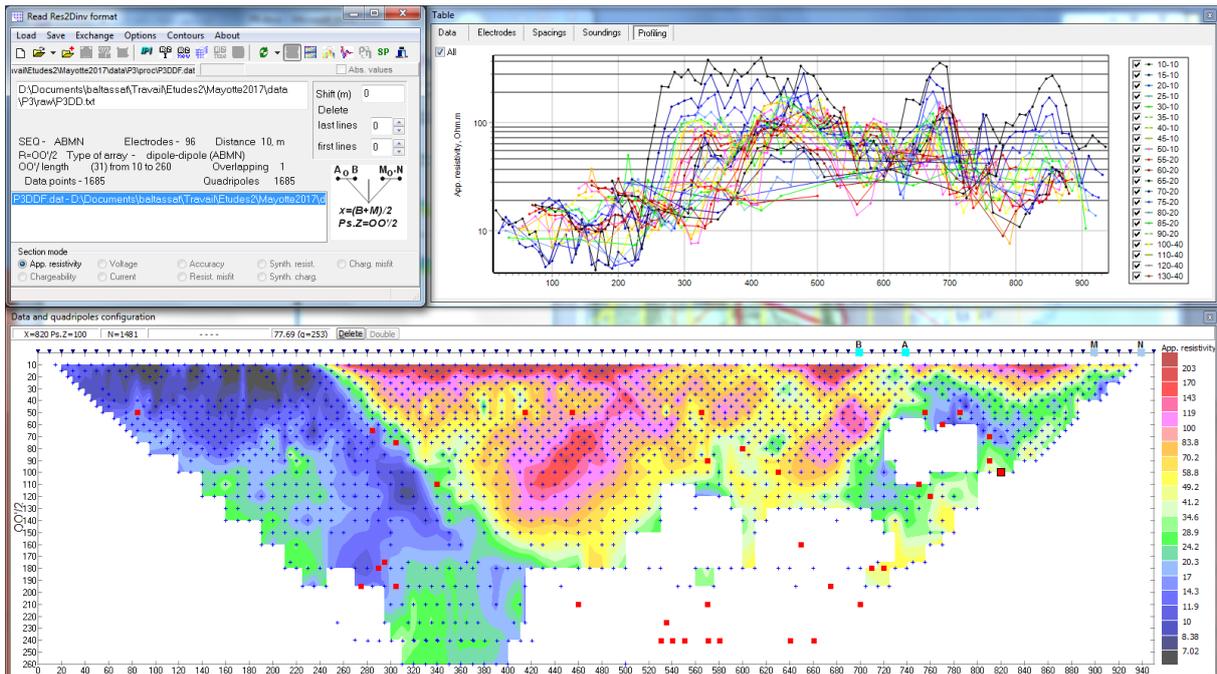
P2DD



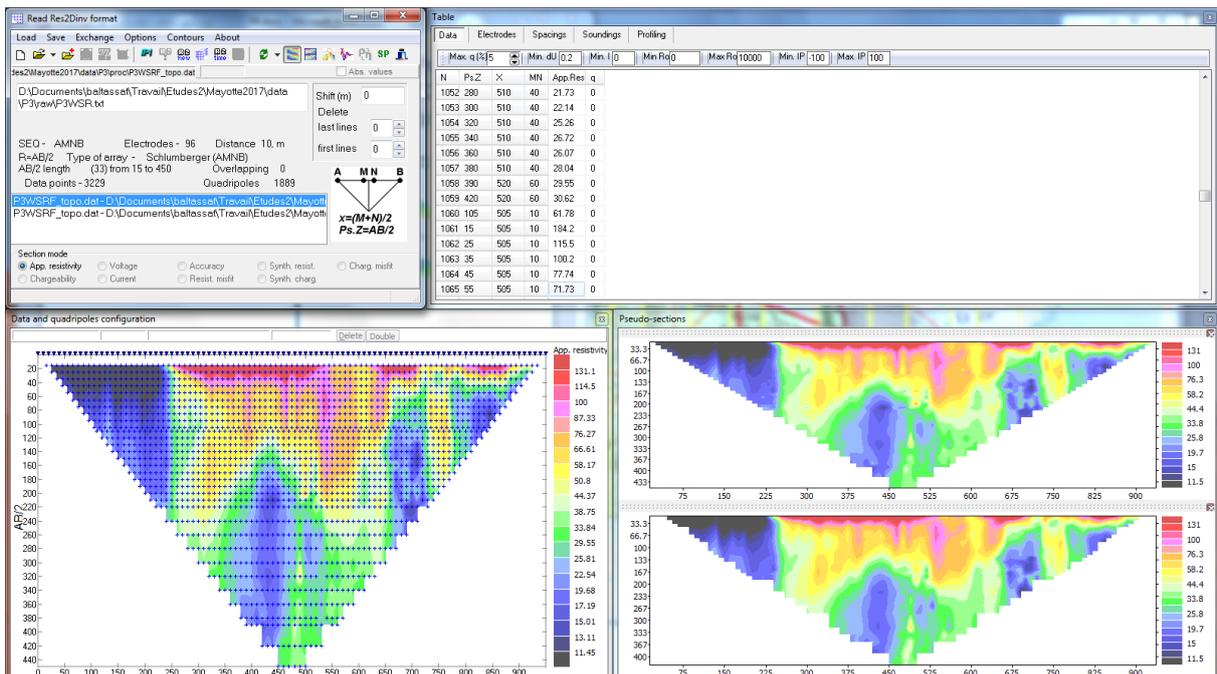
P2WSR



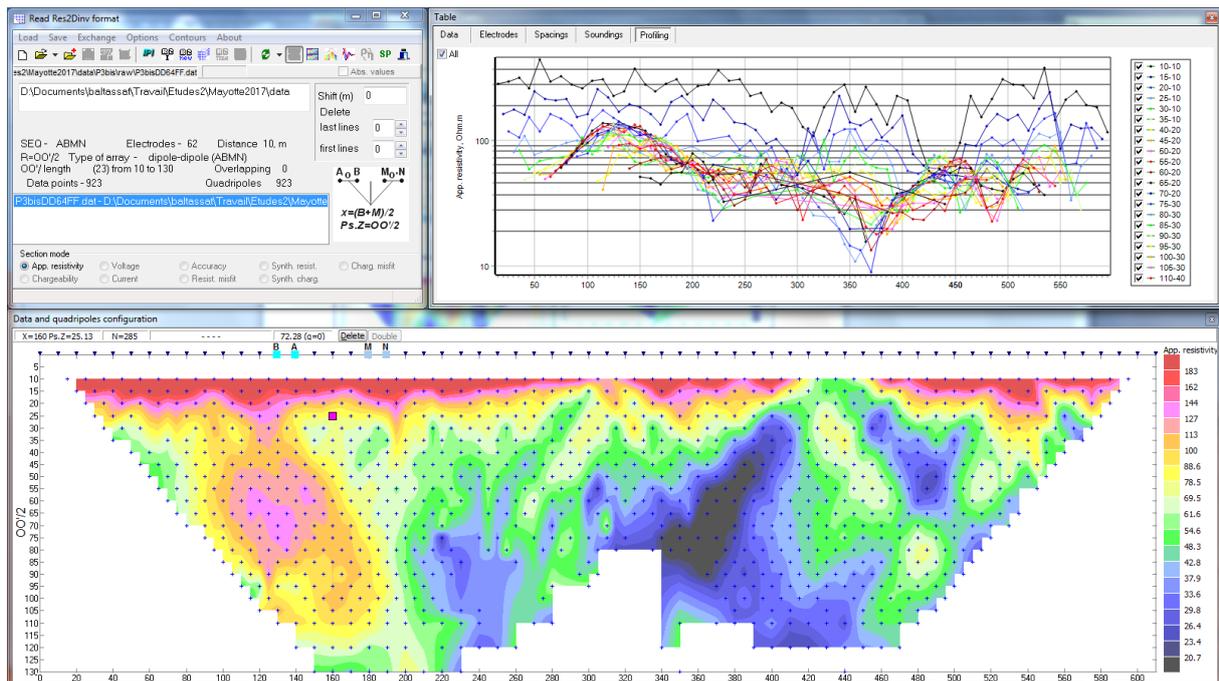
P3DD



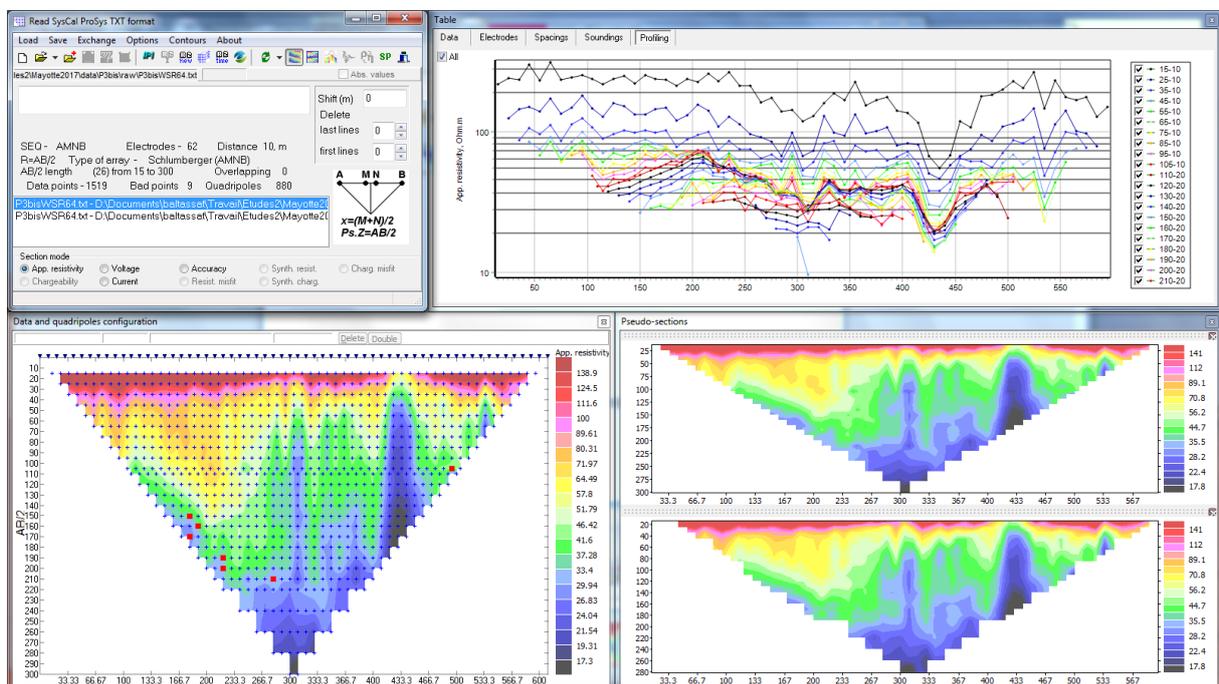
P3WSR



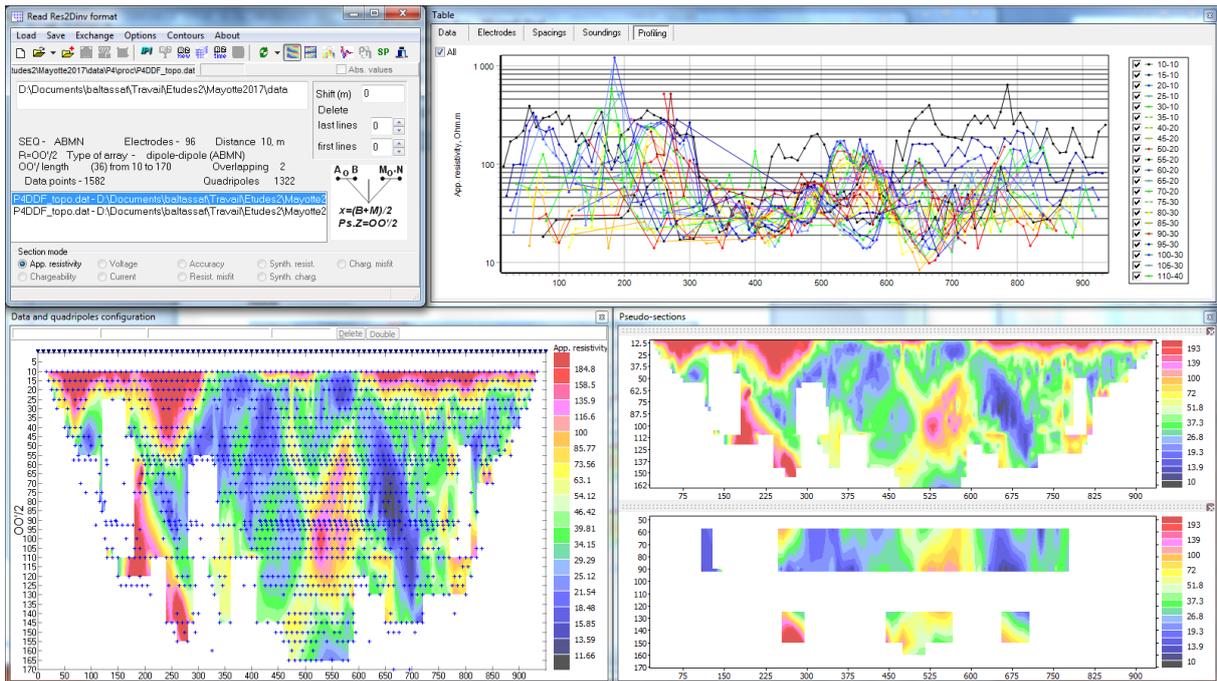
P3bisDD



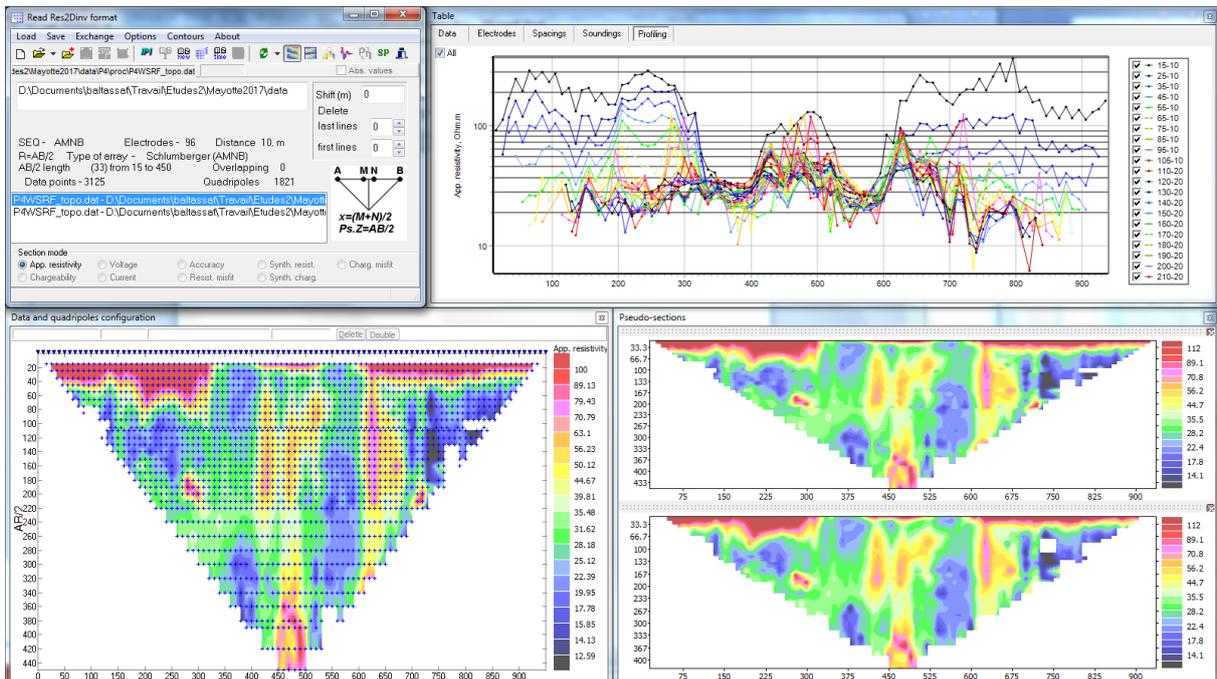
P3bisWSR



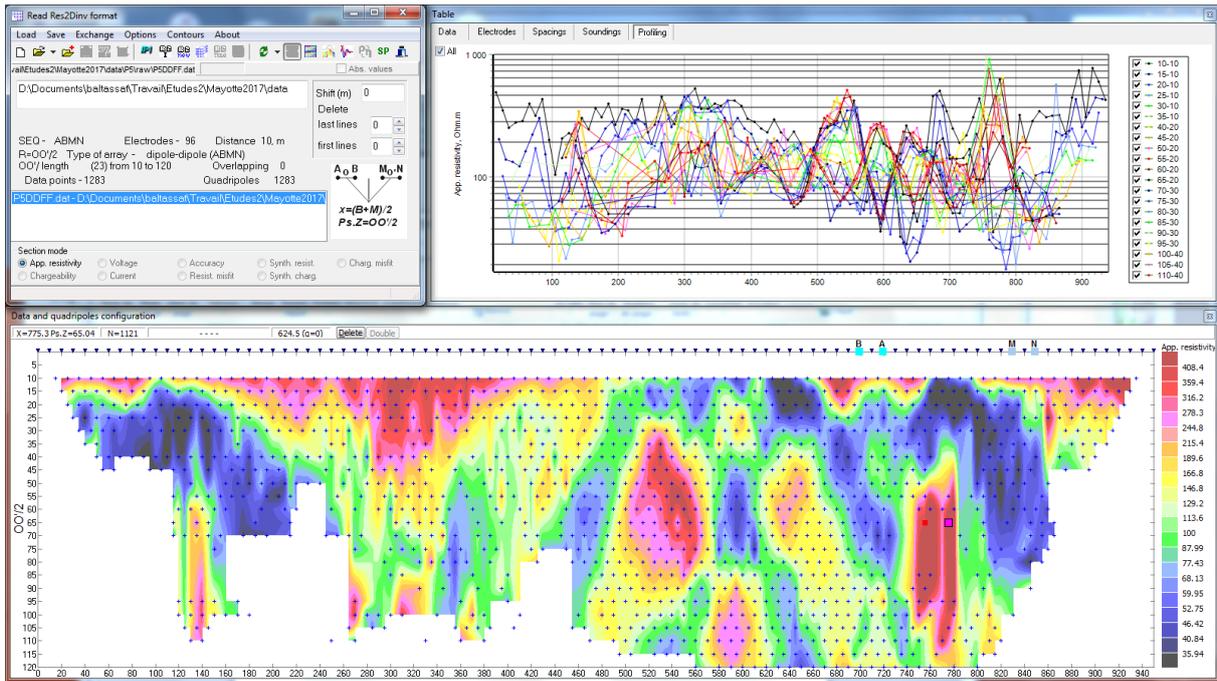
P4DD



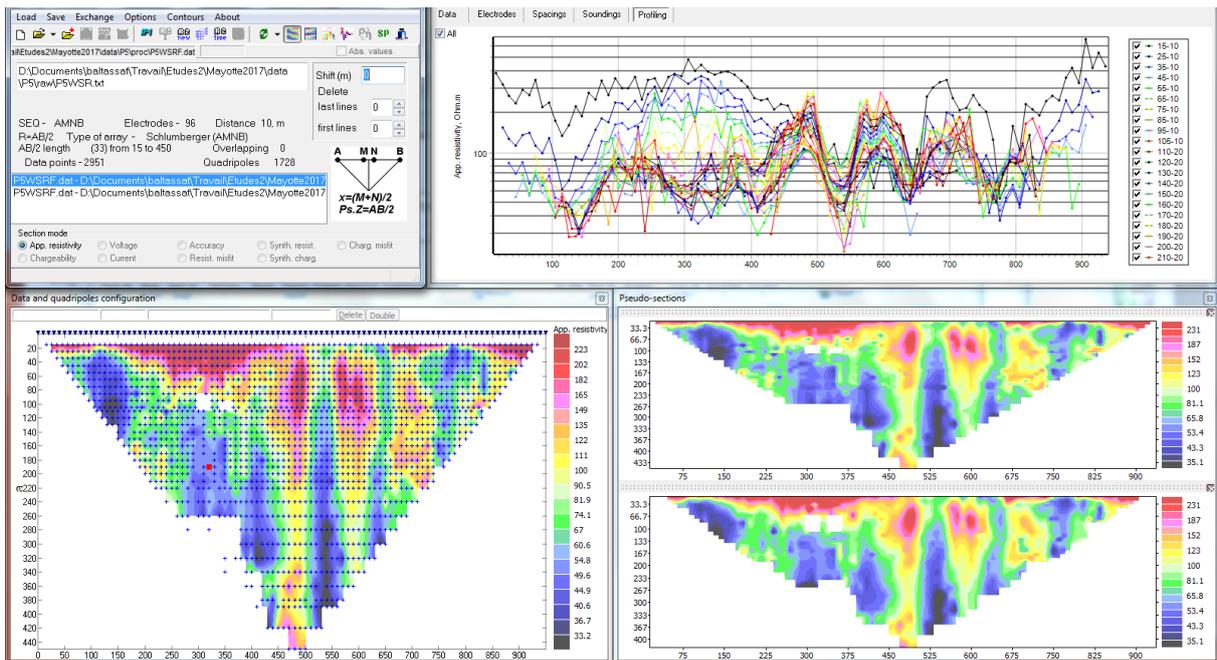
P4WSR



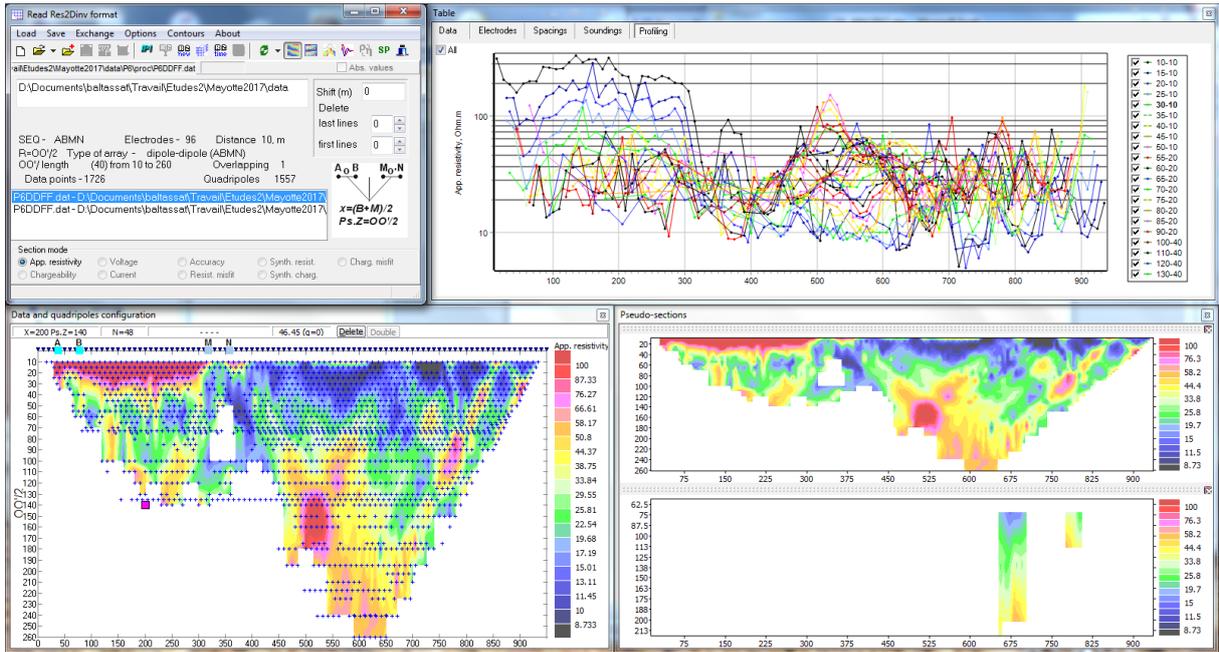
Tomographies électriques pour forages AEP à Mayotte



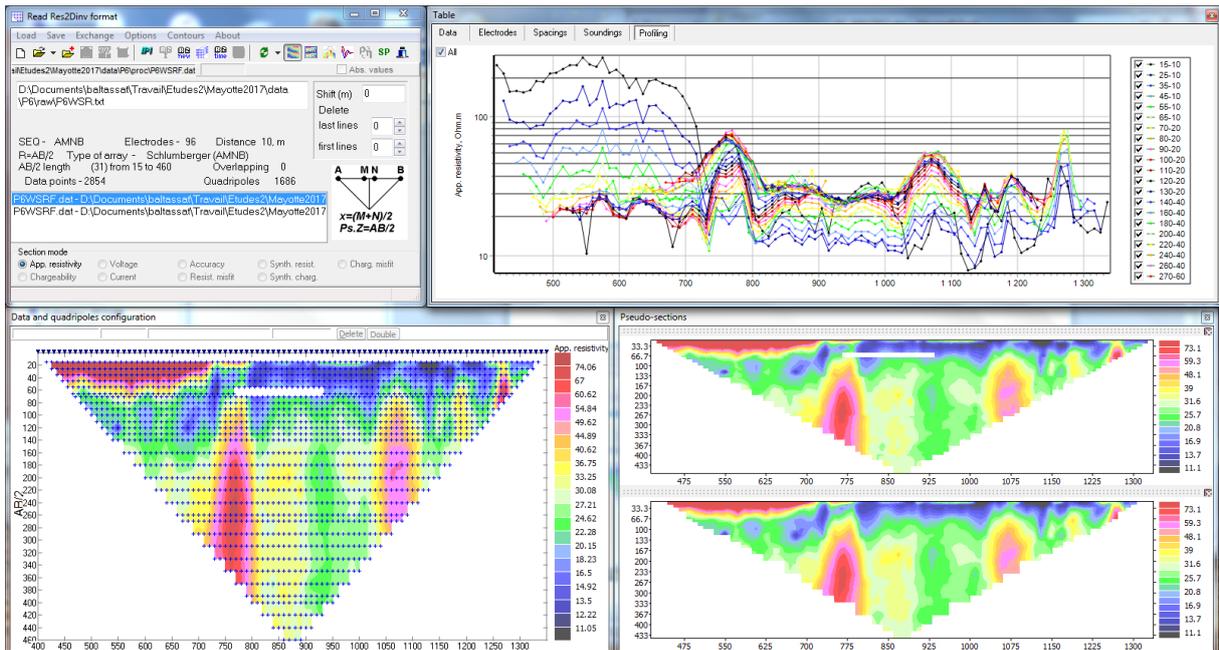
P5WSR



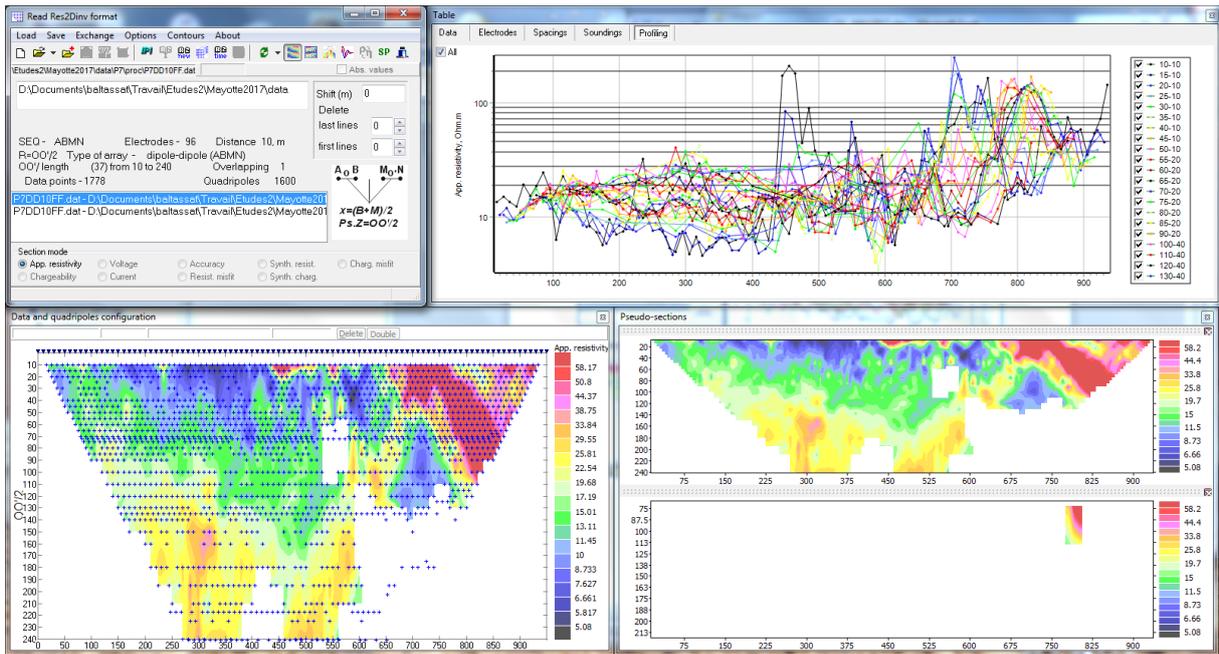
P6DD



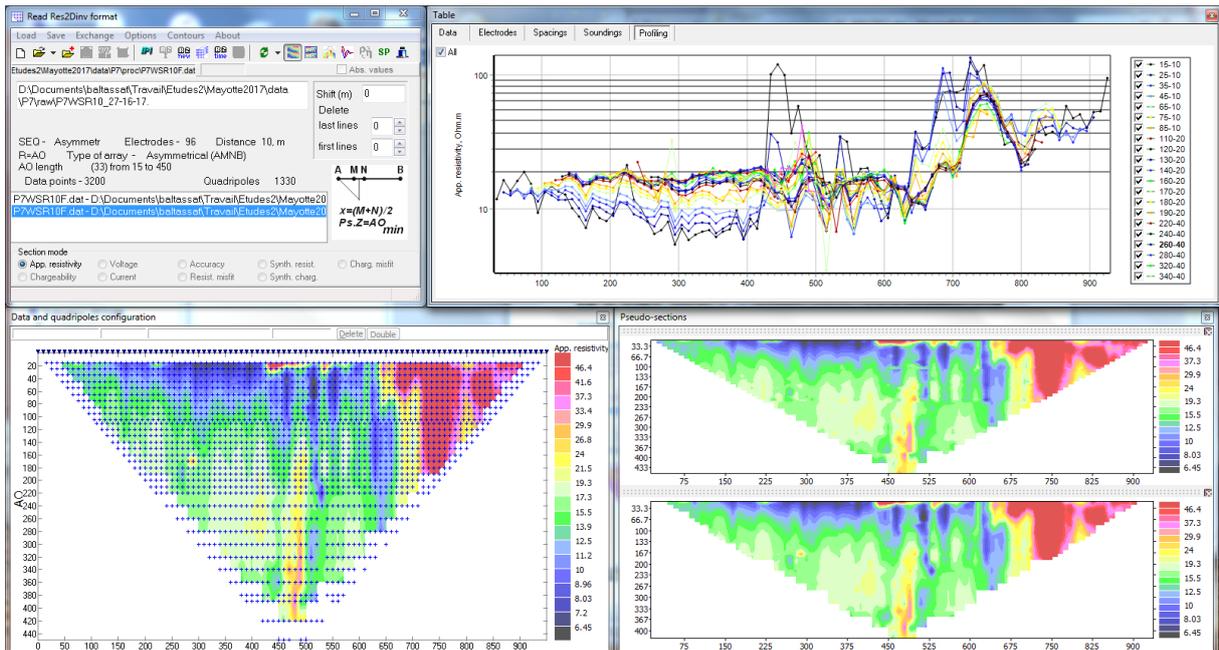
P6WSR



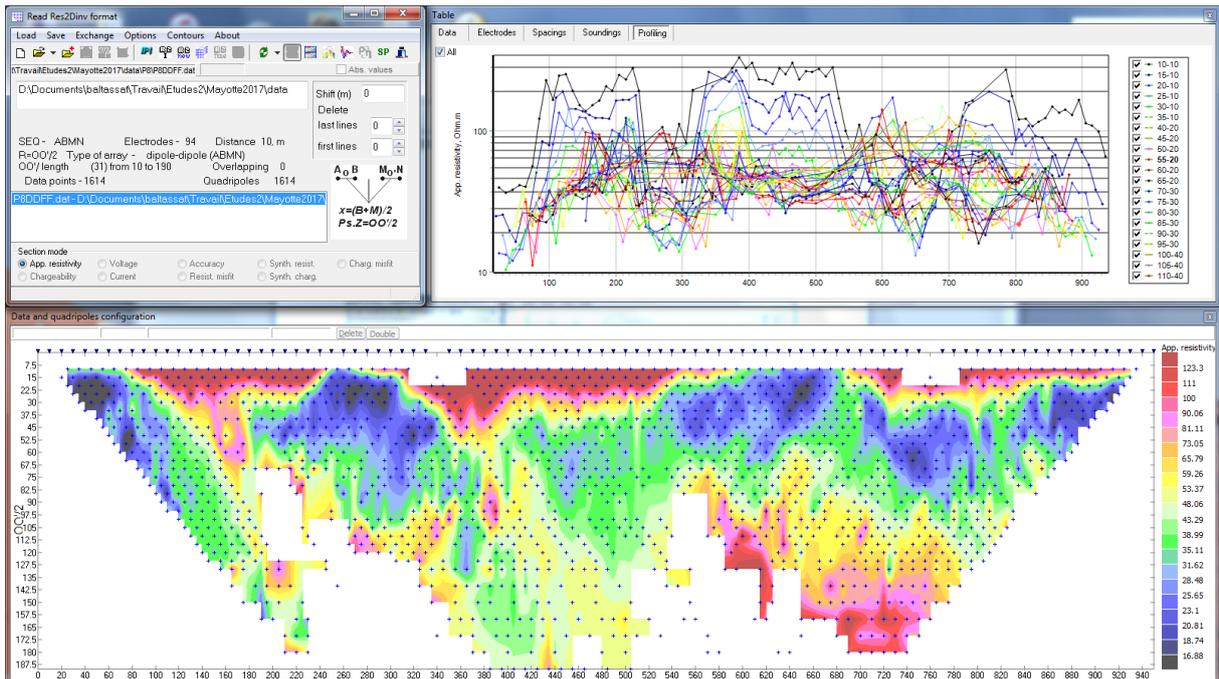
P7DD



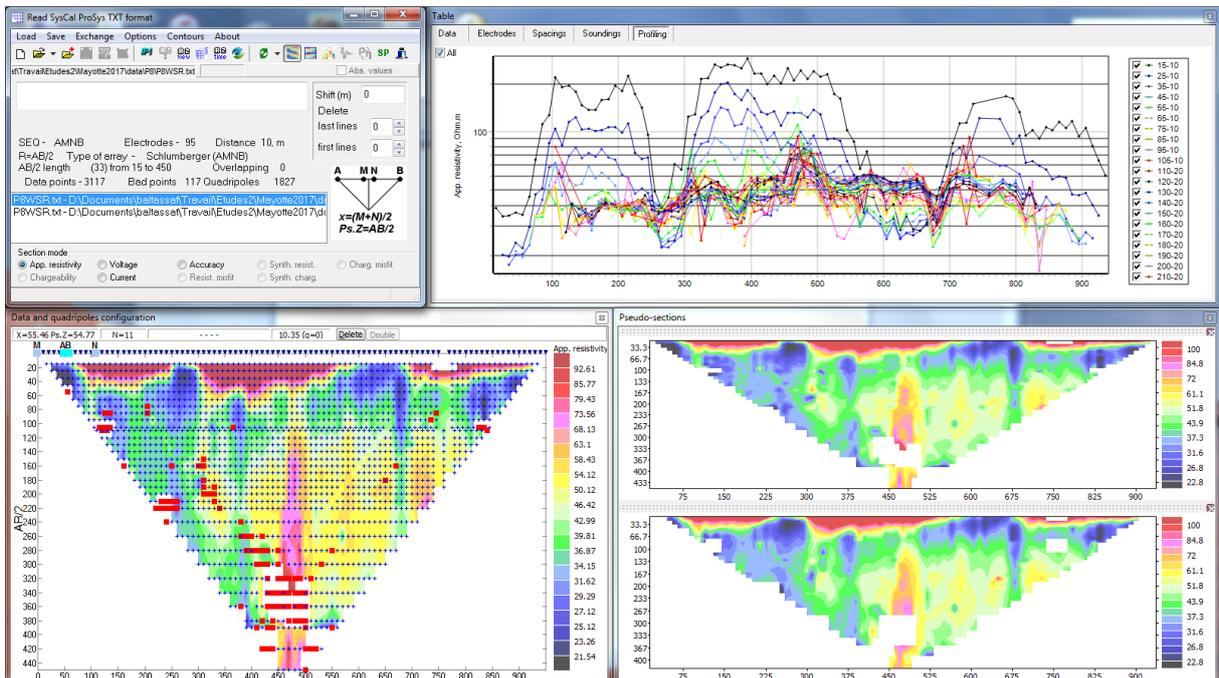
P7WSR



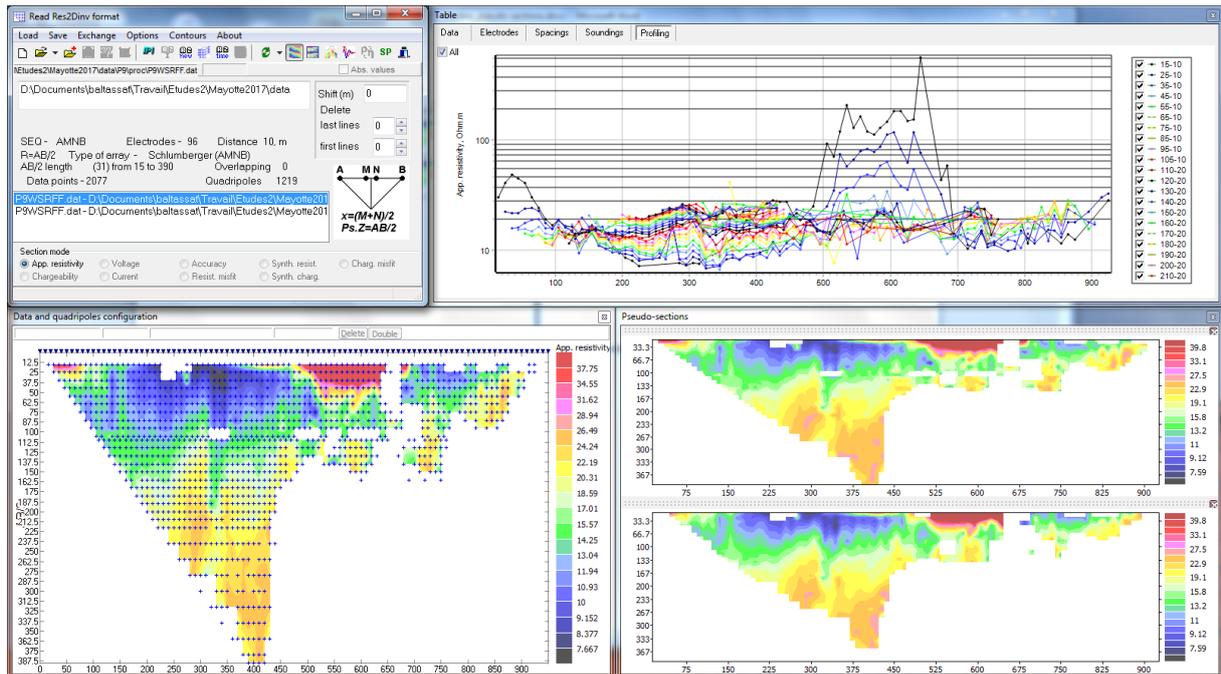
P8DD



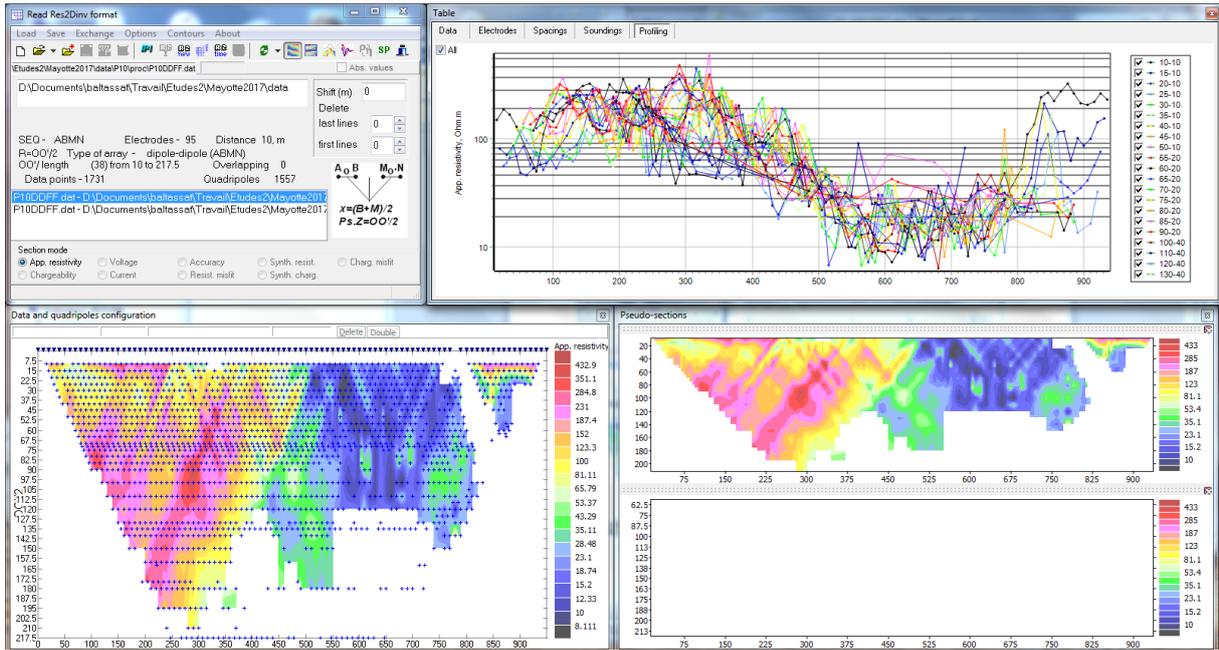
P8WSR



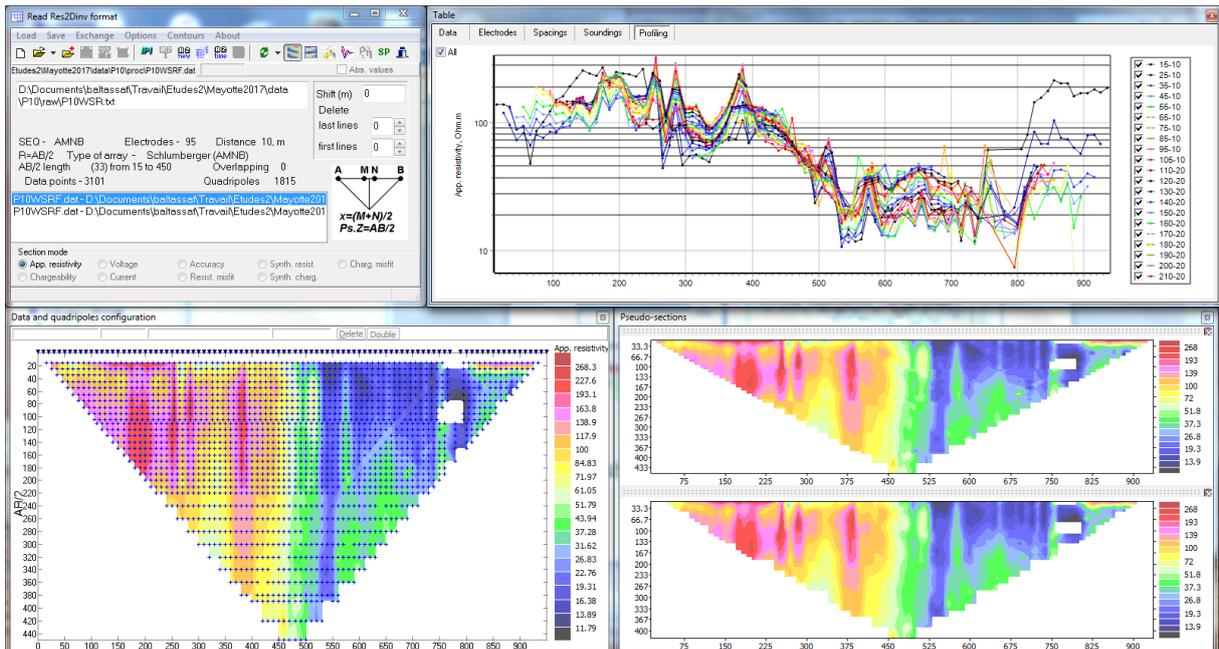
P9WSR



P10DD



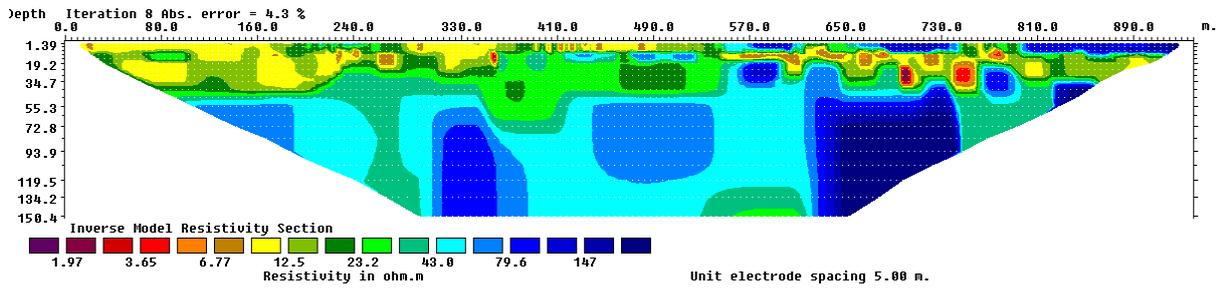
P10WSR



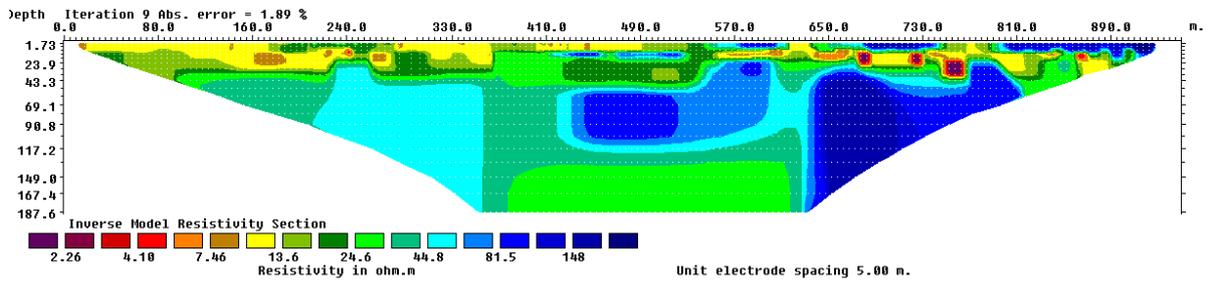
Annexe 8

Résultats d'inversion des tomographies électriques

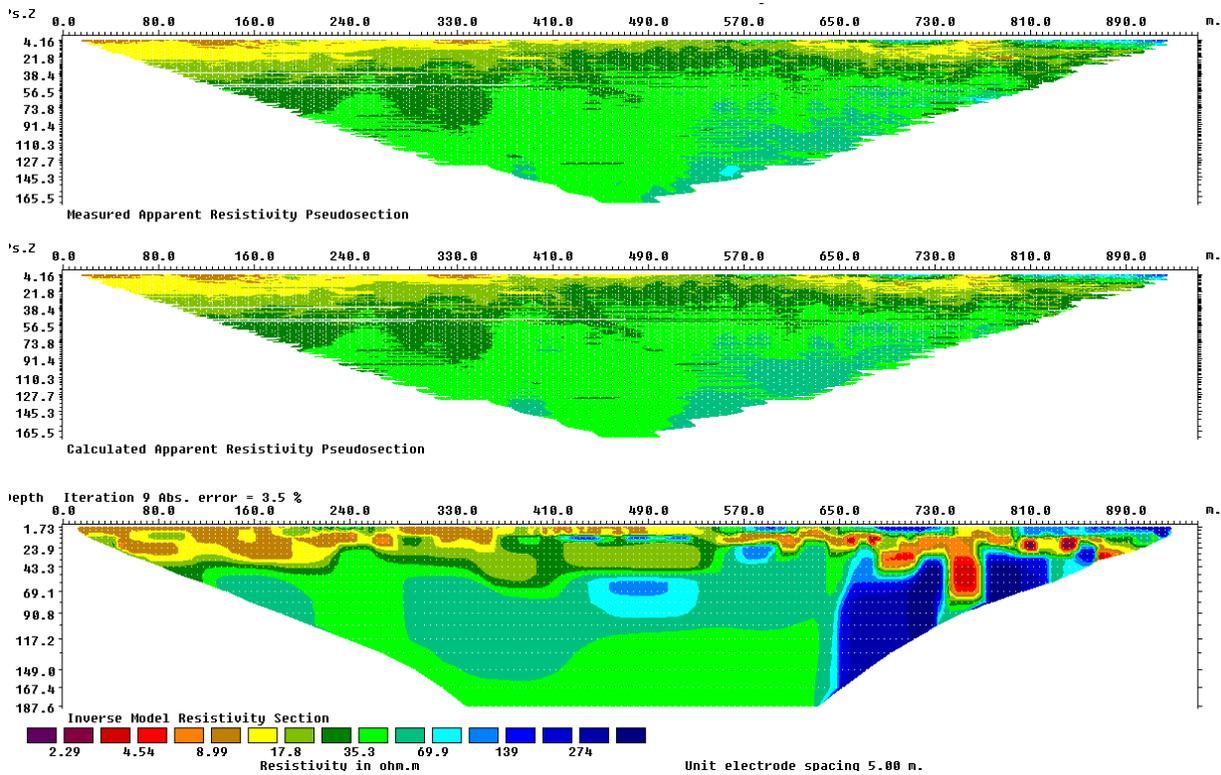
P1DD



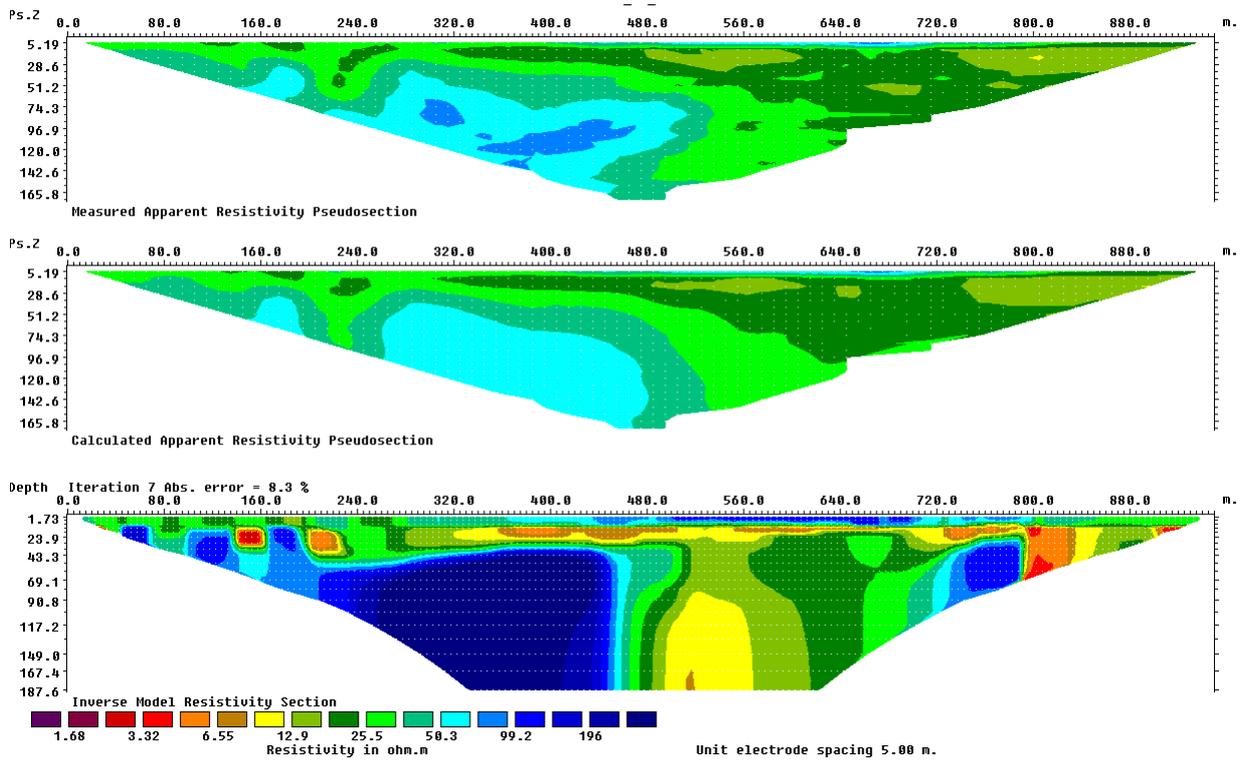
P1WSR



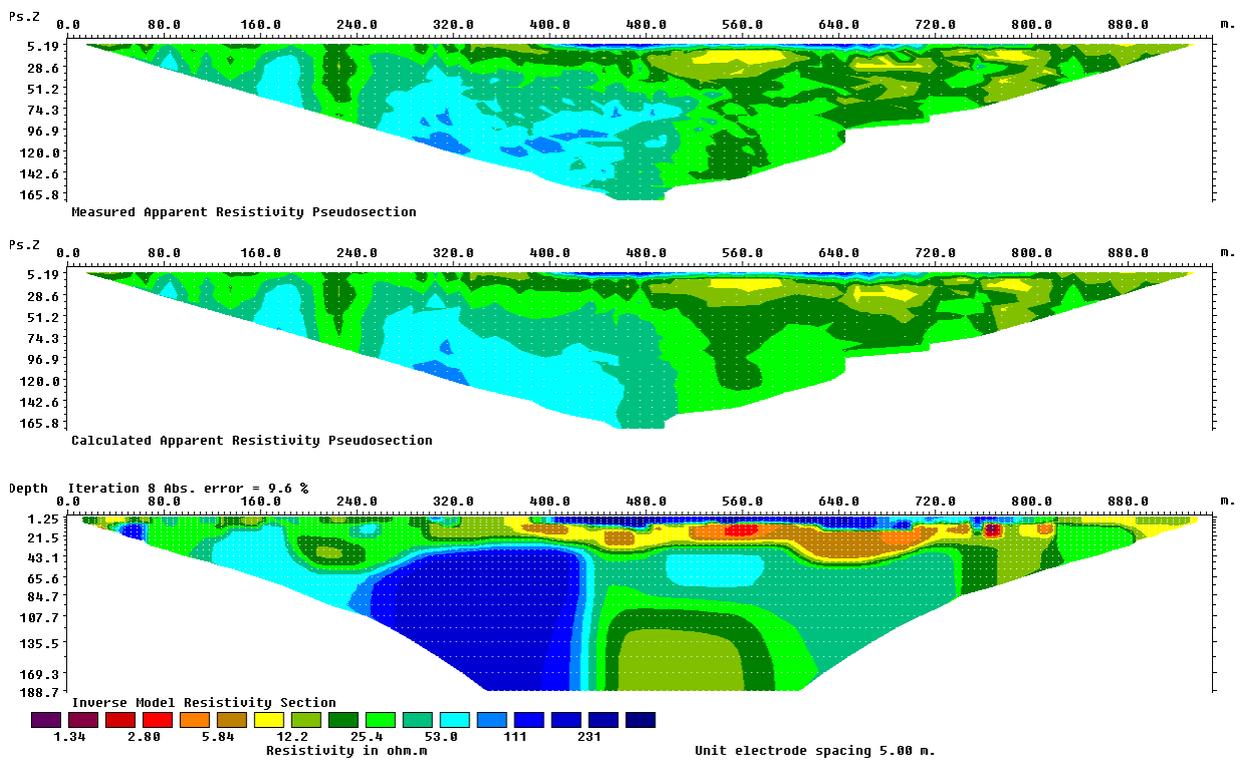
P1DD+WSR



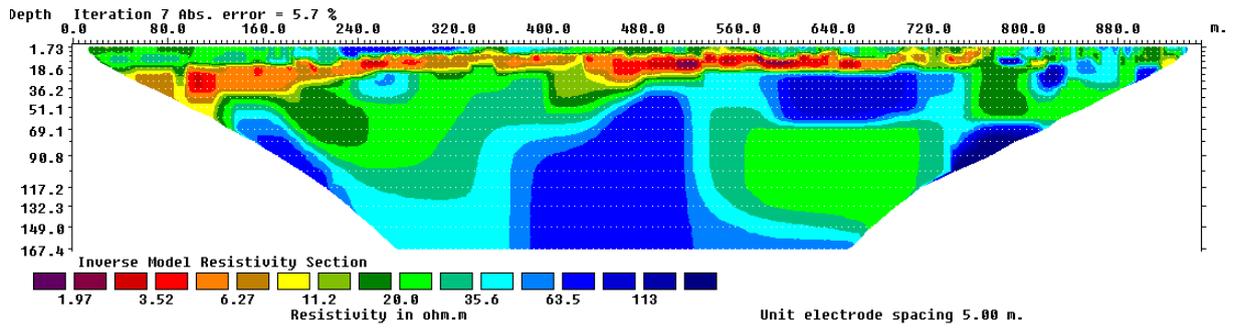
P2012 Mbouini filtrage X2IPI



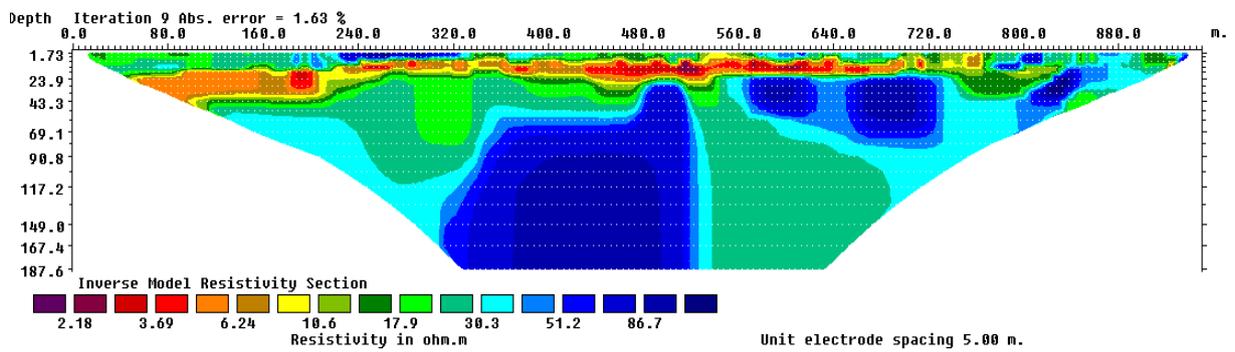
P2012 Mbouini filtrage manuel



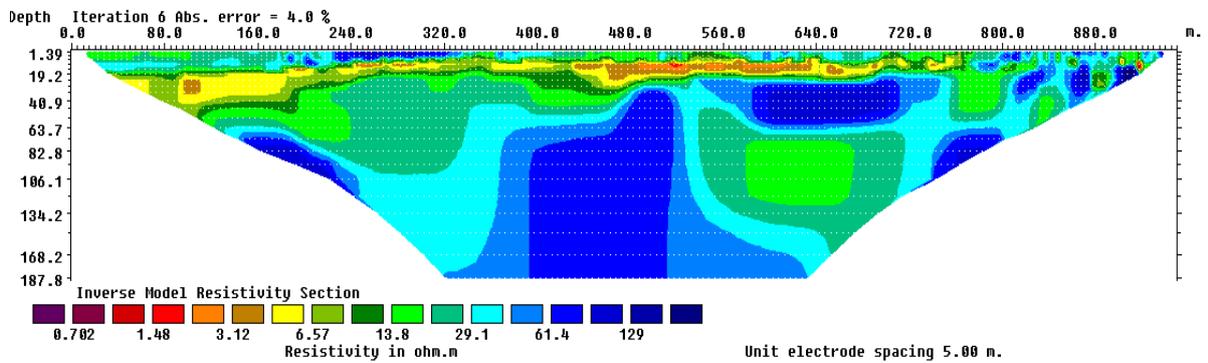
P2DD



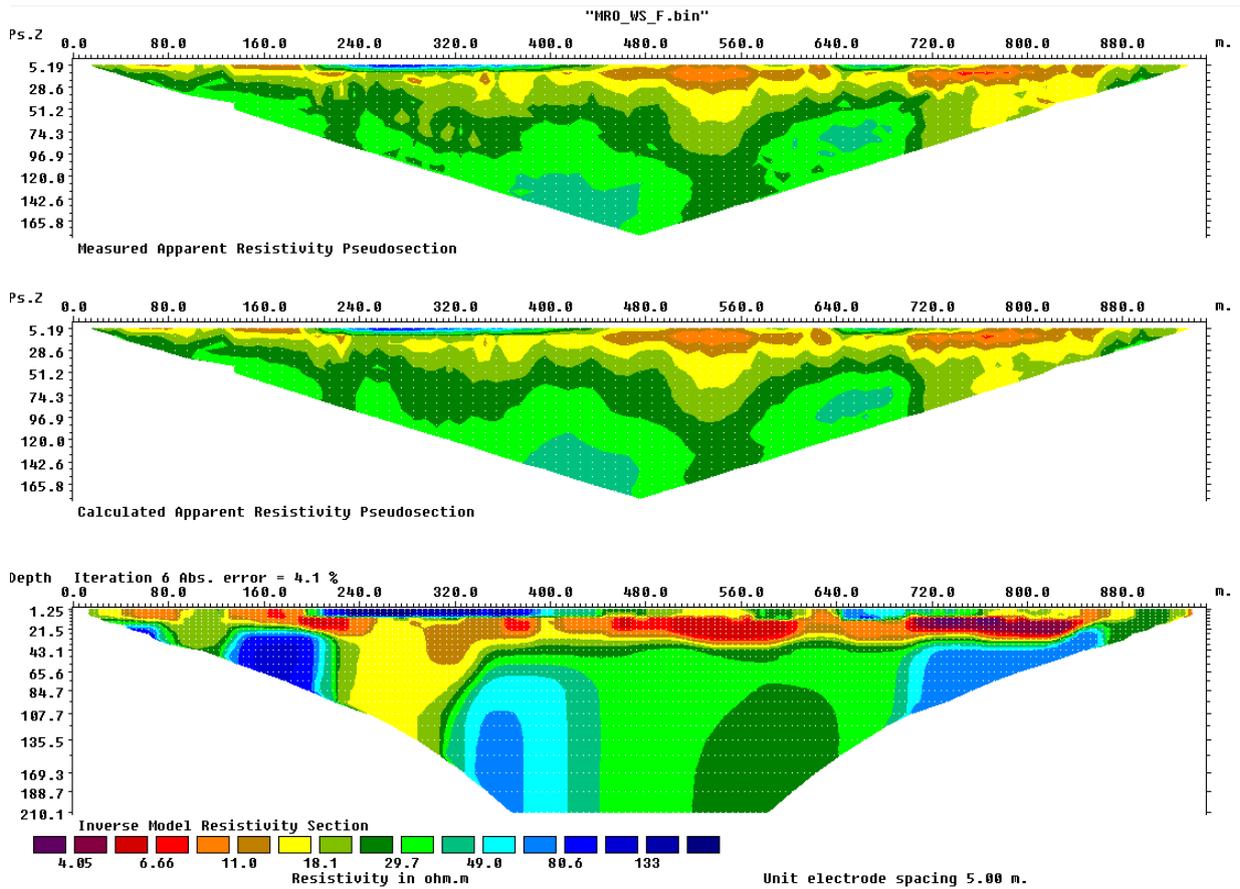
P2WSR



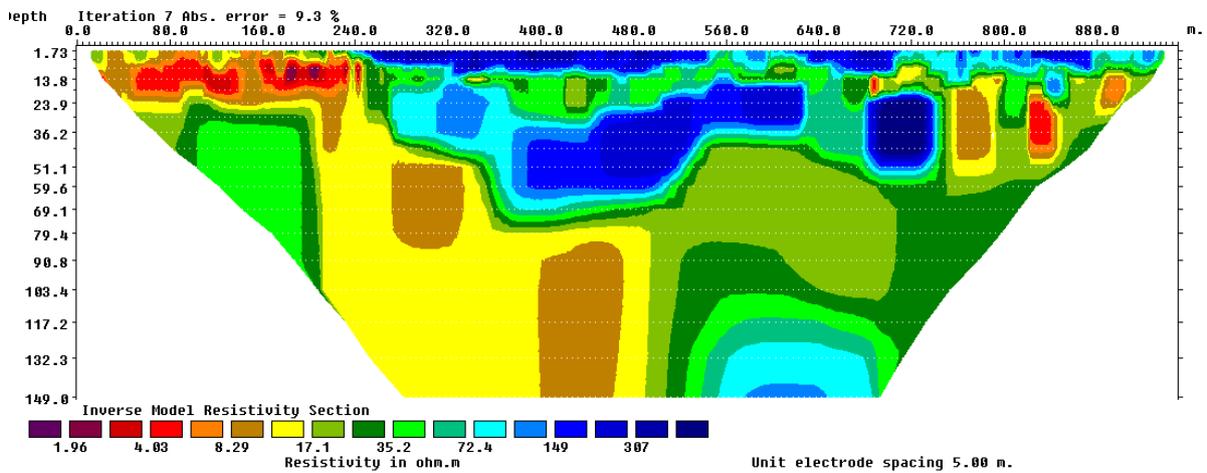
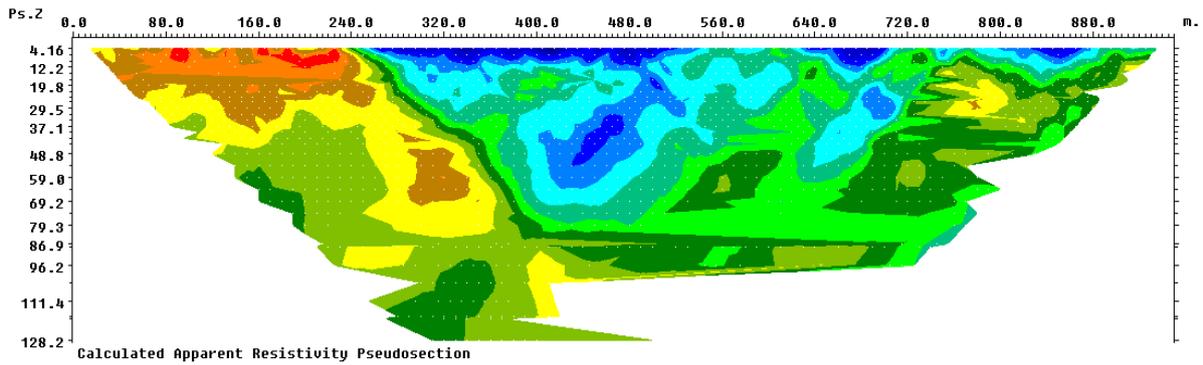
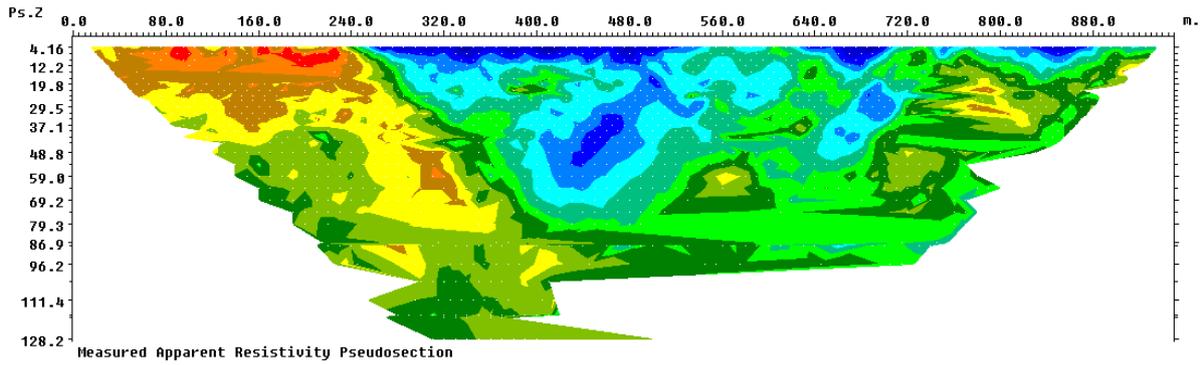
P2DD+WSR



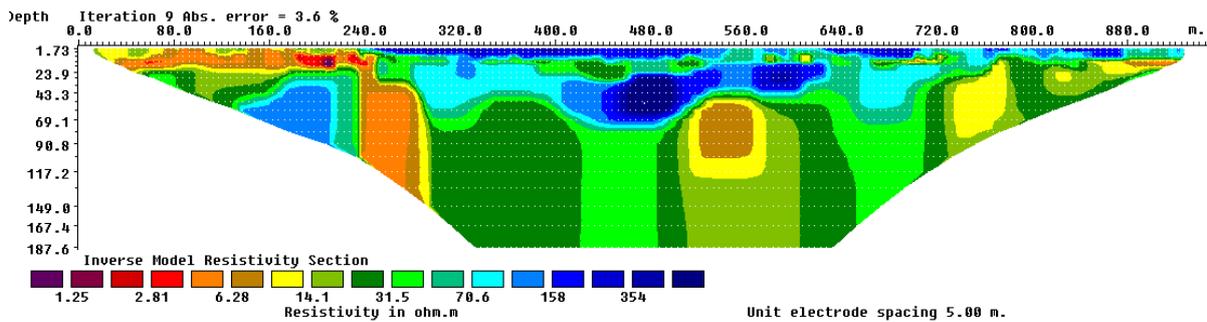
P2012 Mronabeja WSR



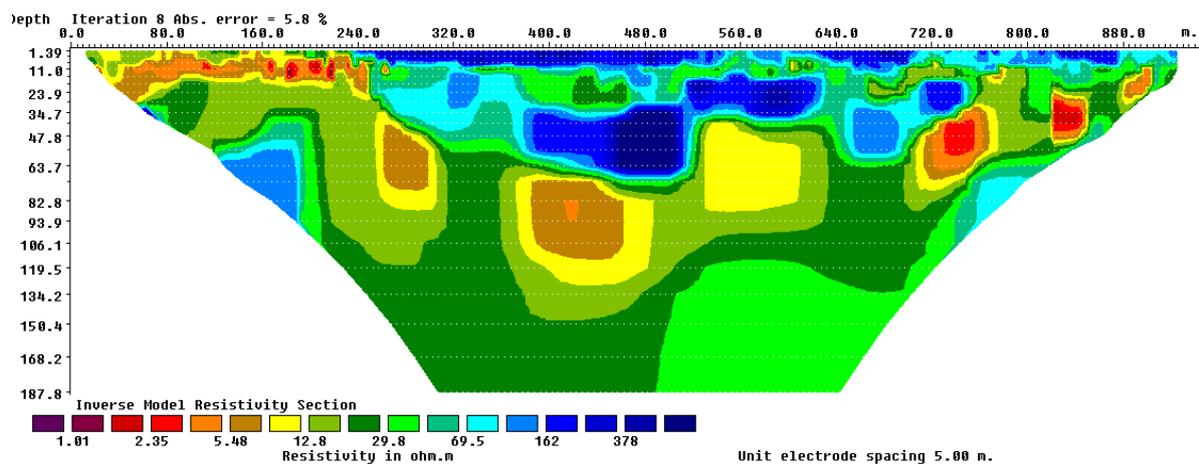
P3DD



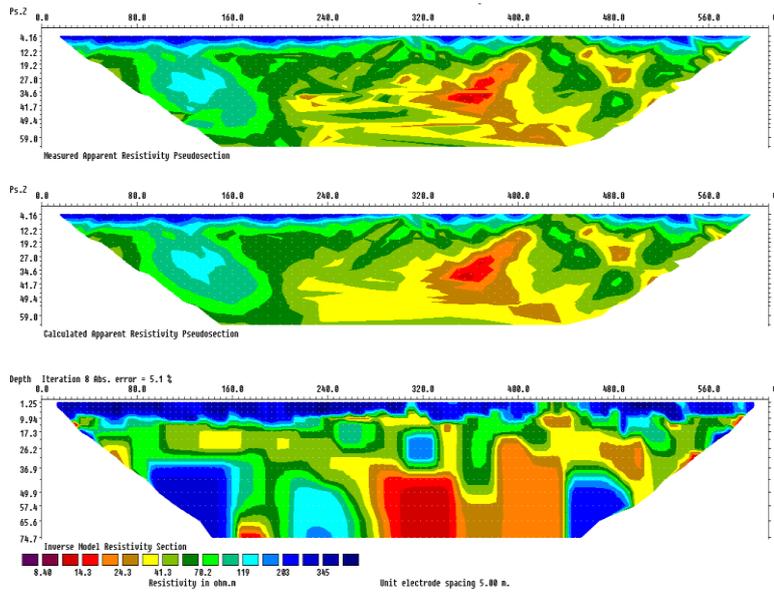
P3WSR



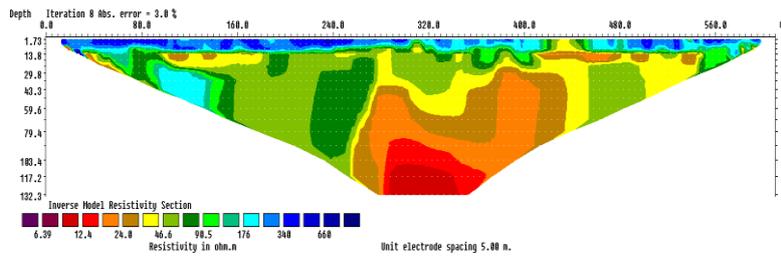
P3DD+WSR



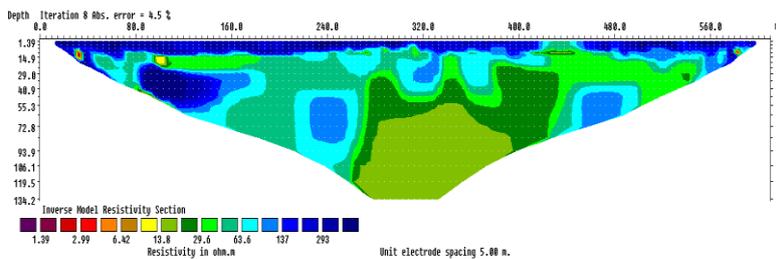
P3bisDD



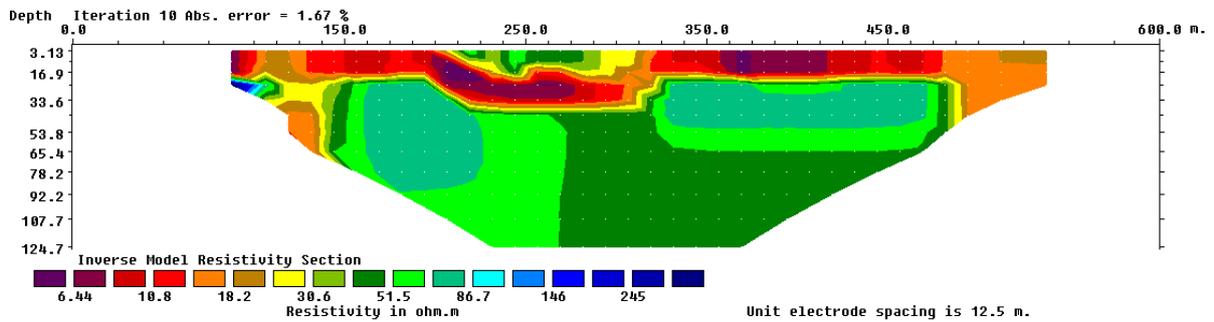
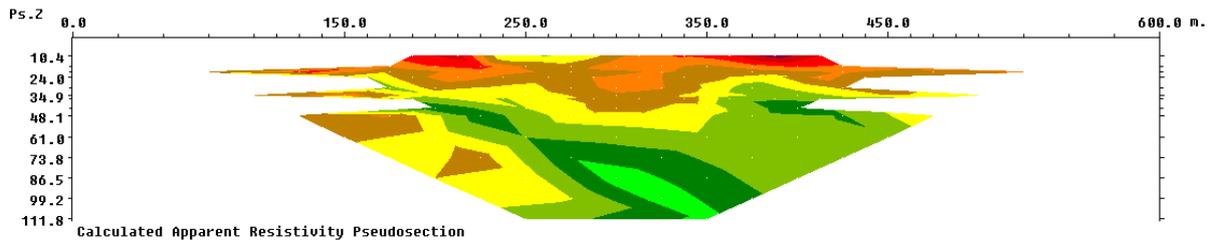
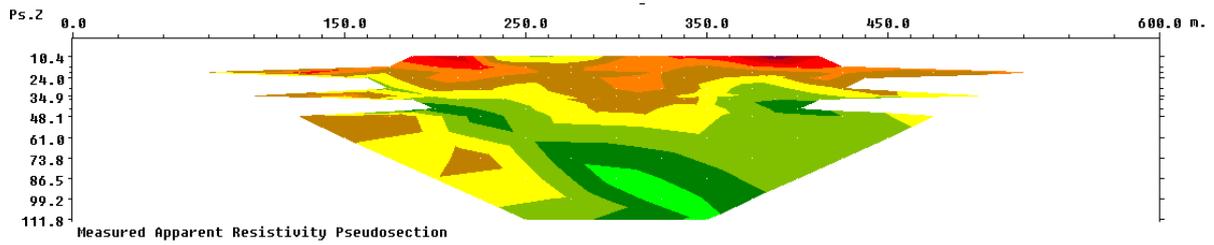
P3bisWSR



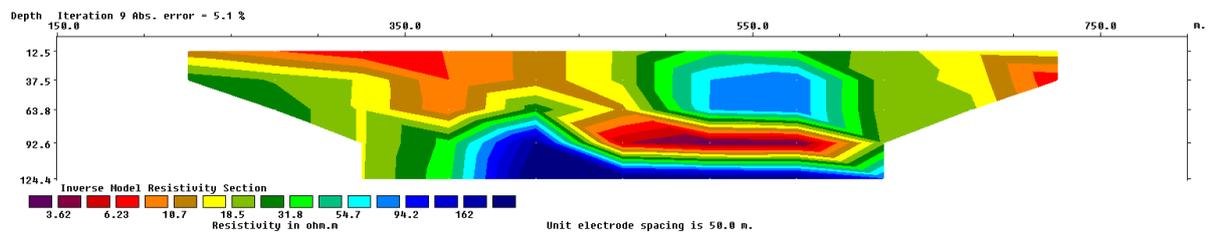
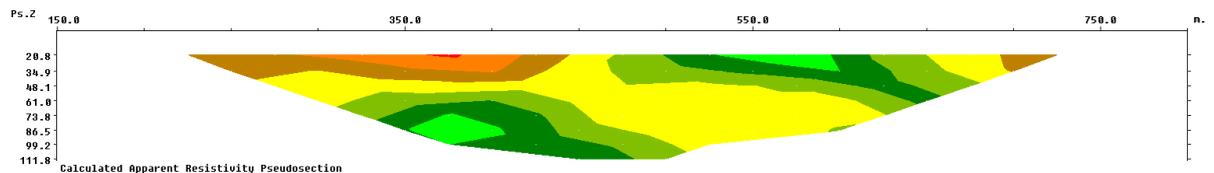
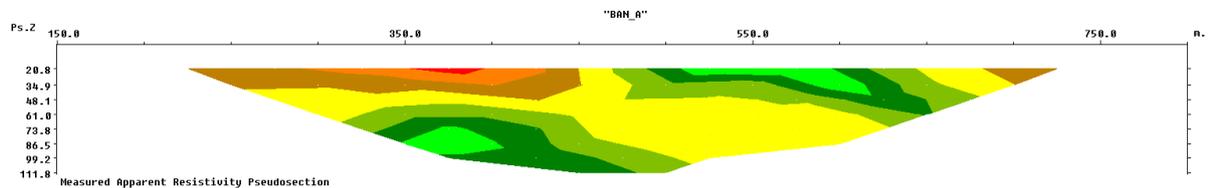
P3bisDD+WSR



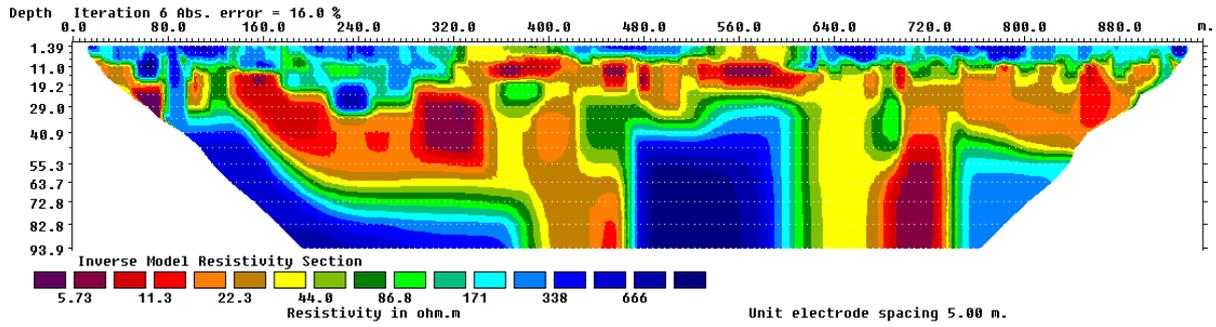
P2002DD Bandrelé



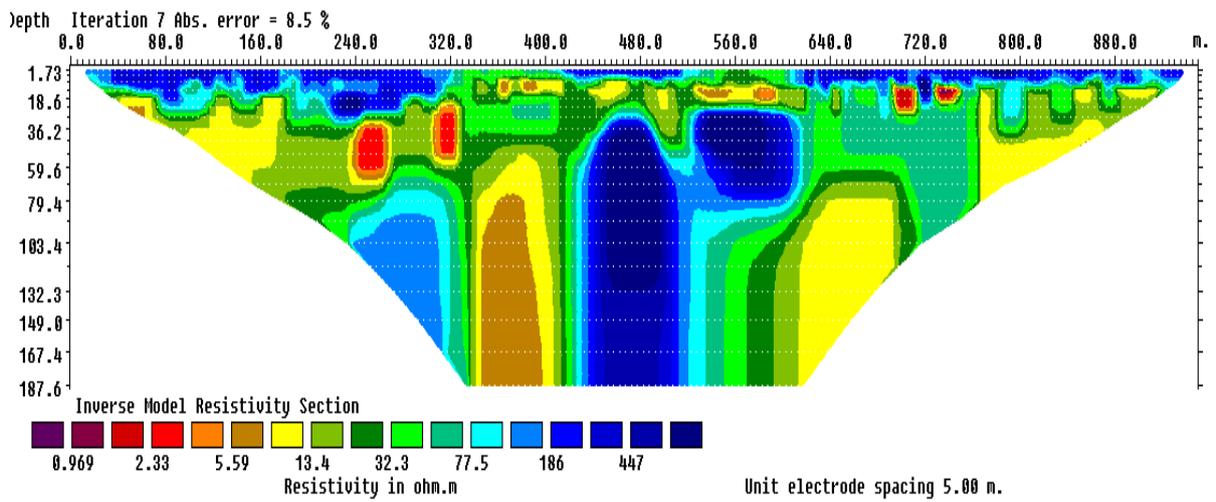
P2003 Bandrelé



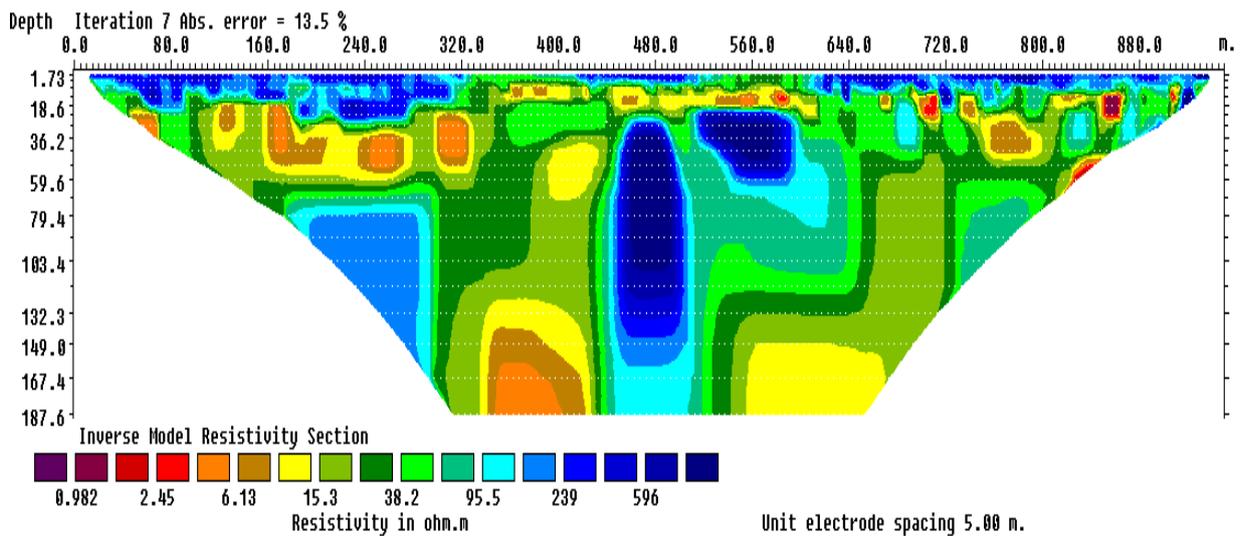
P4DD

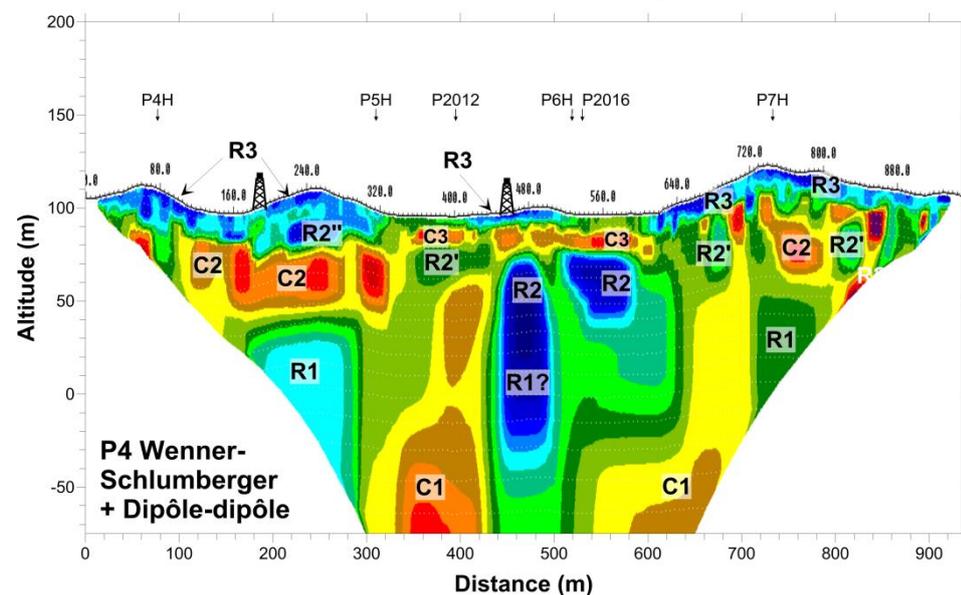
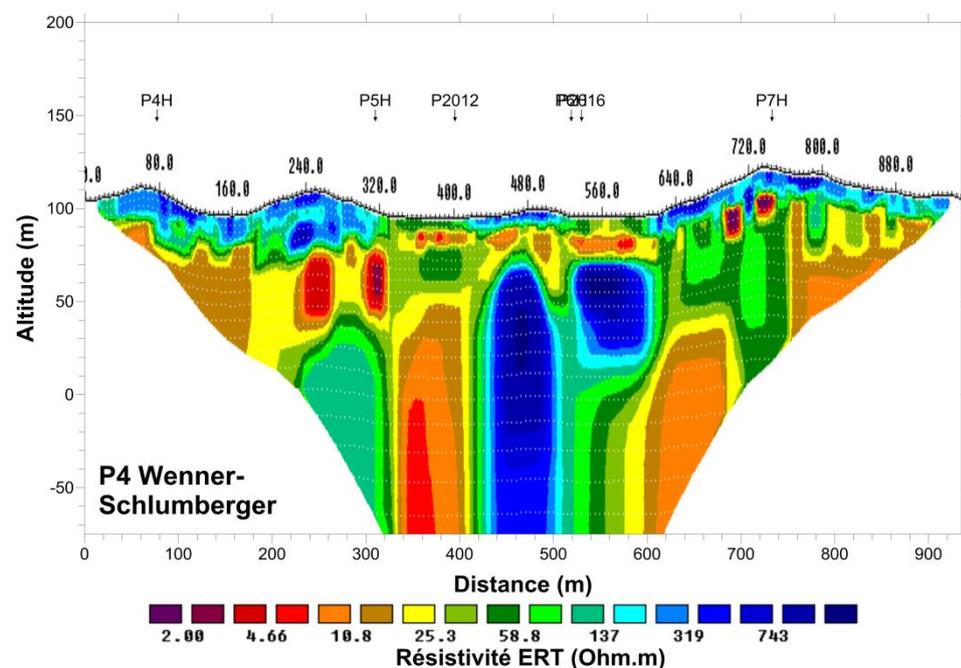
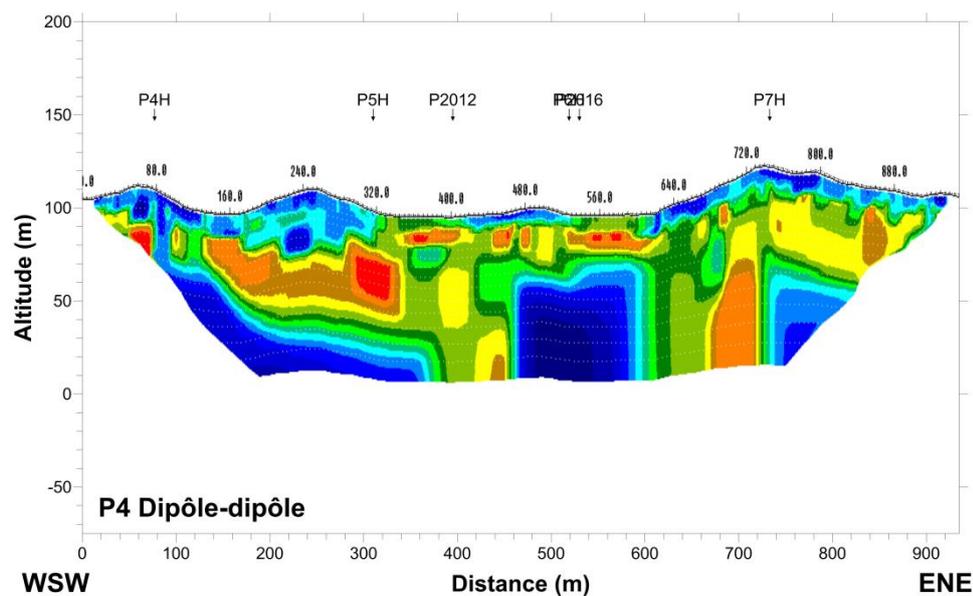


P4WSR

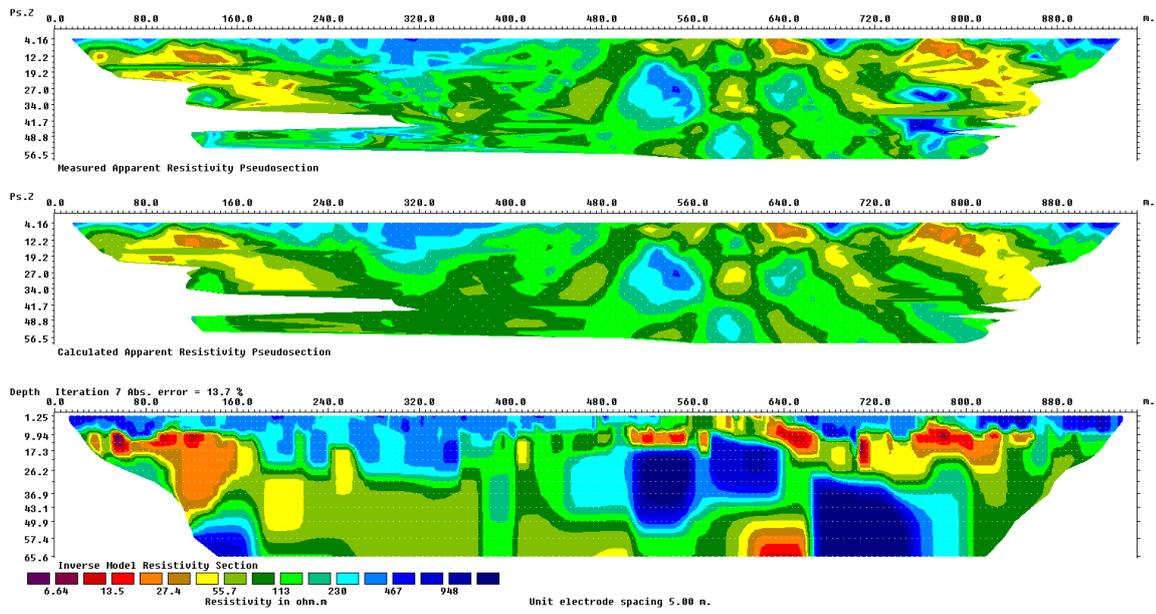


P4DD+WSR

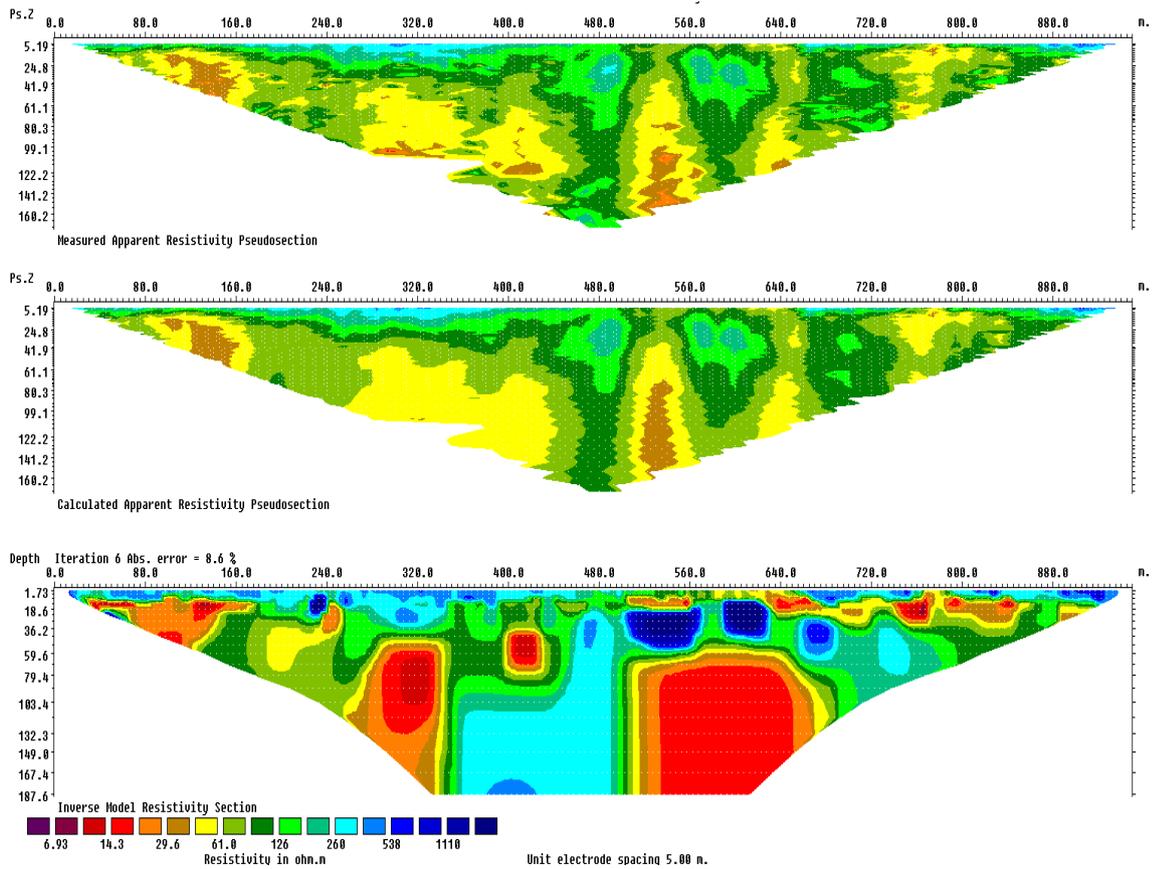




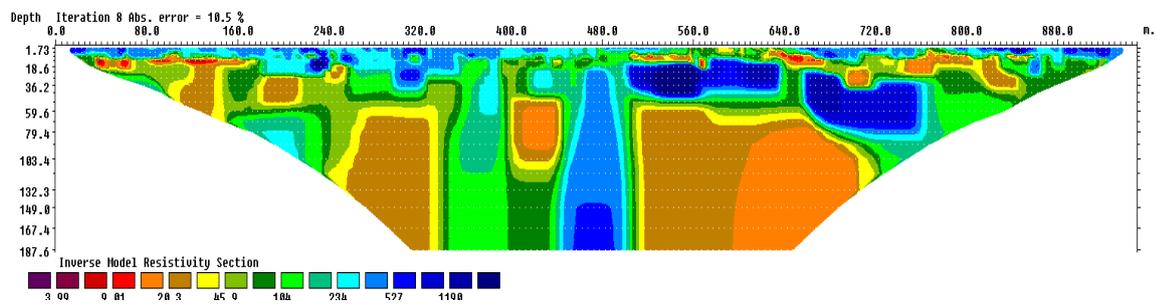
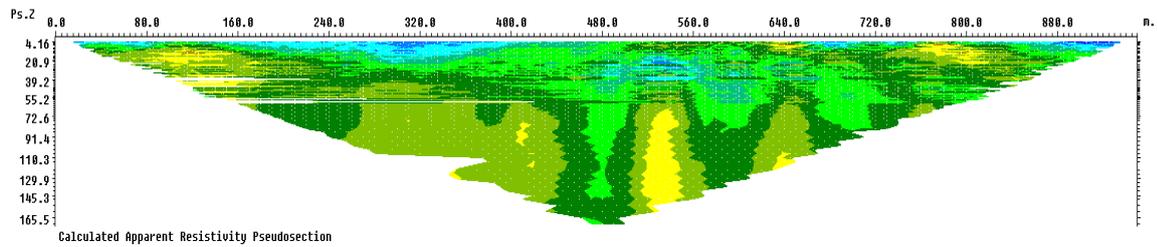
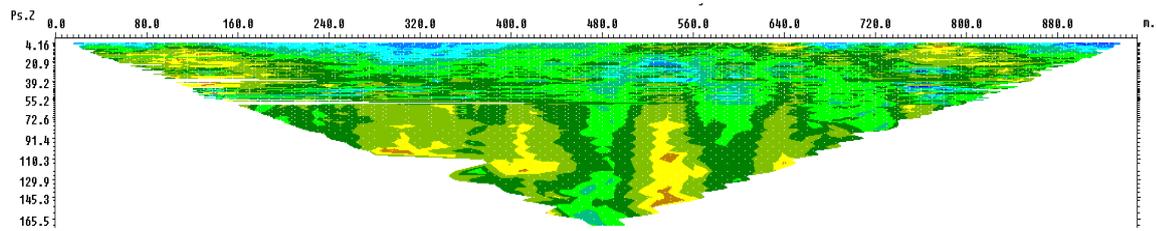
P5DD



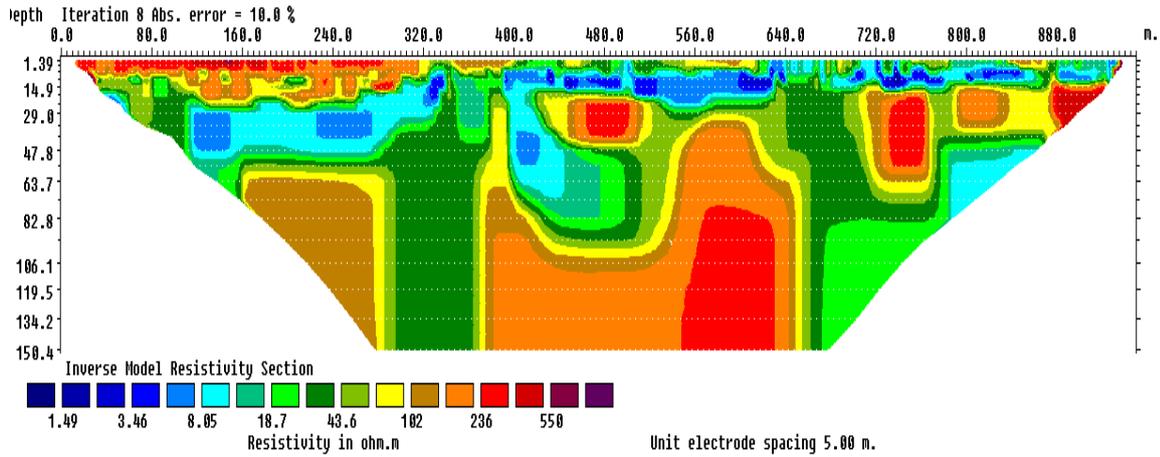
P5 WSR



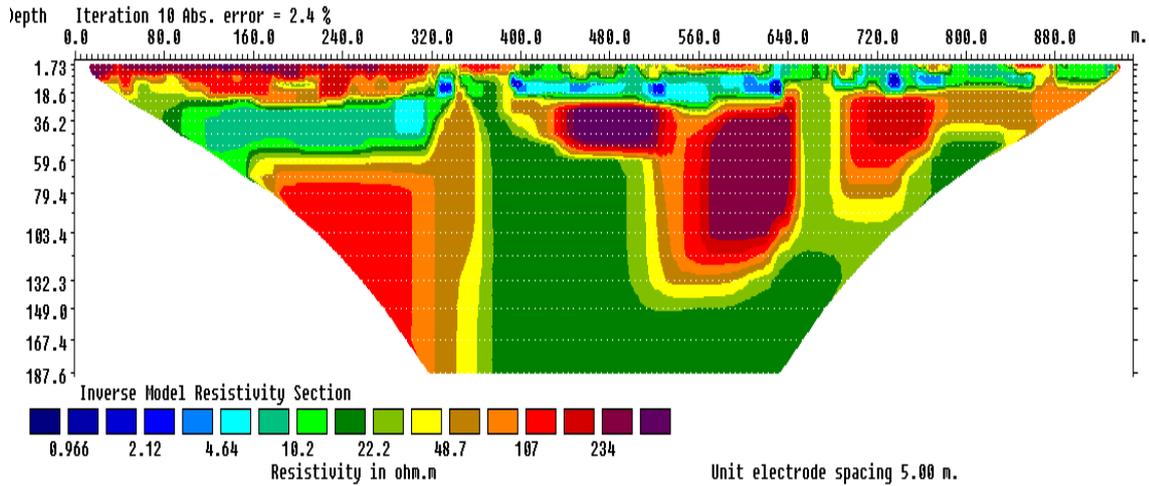
P5DD+WSR



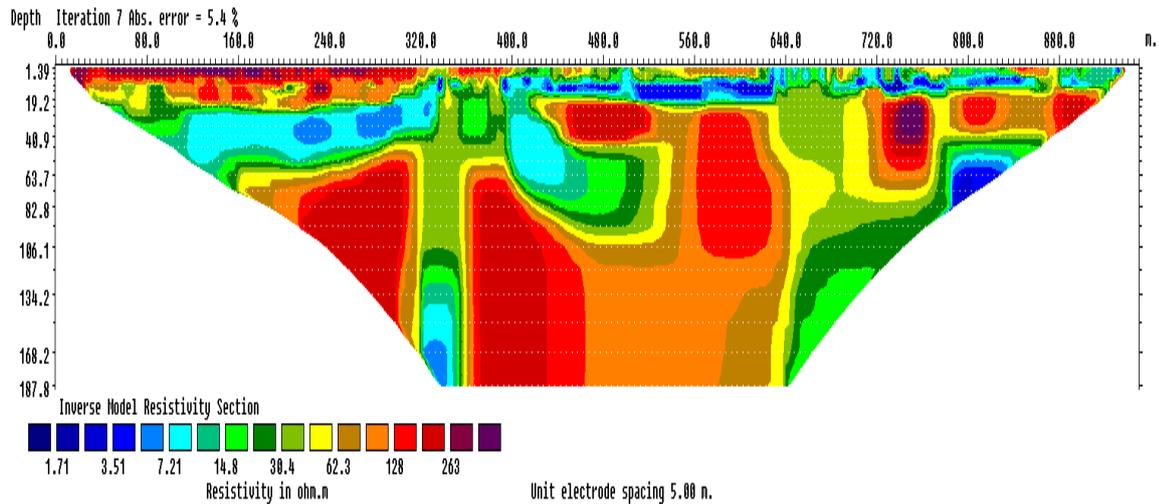
P6DD

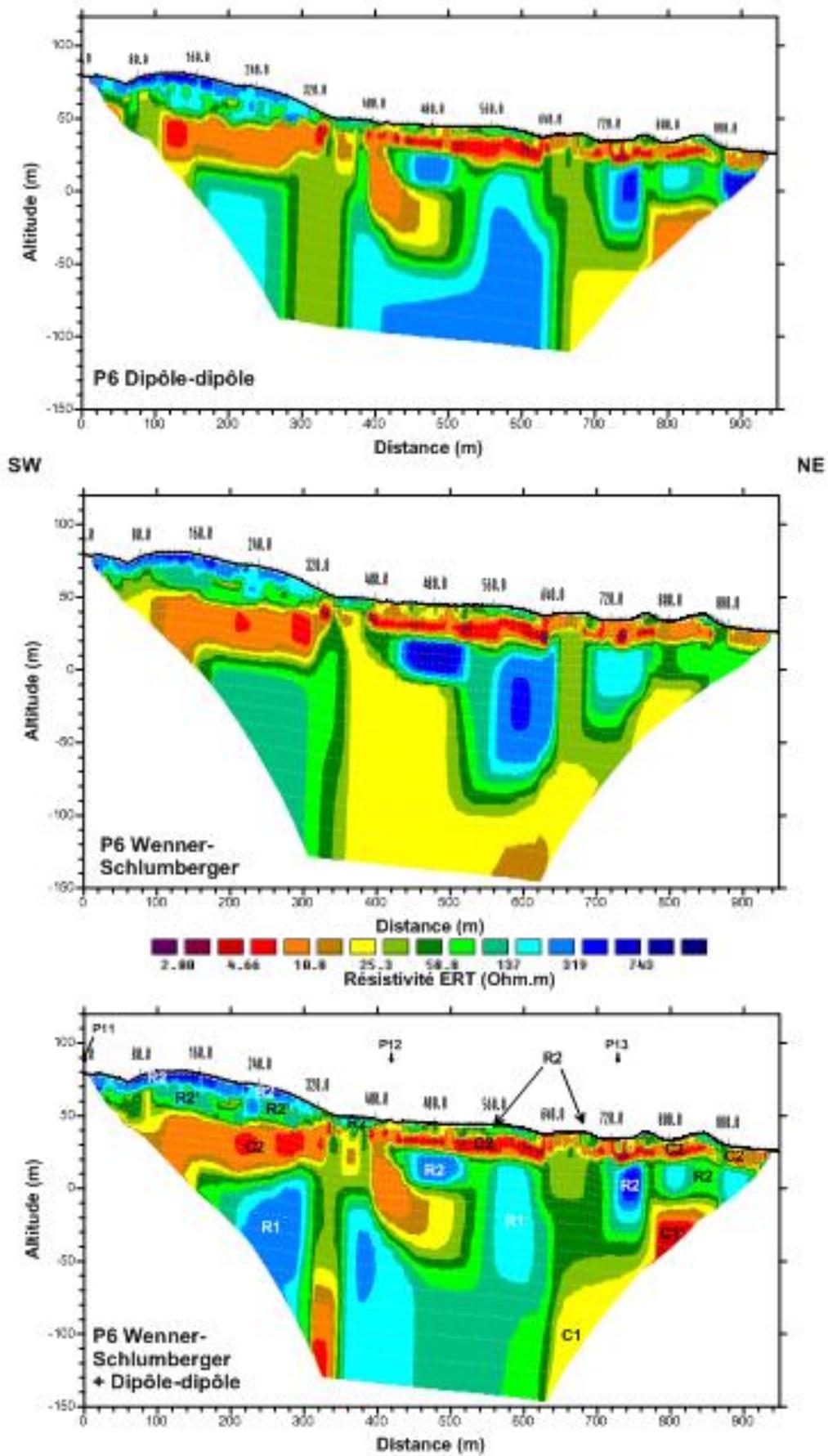


P6 WSR

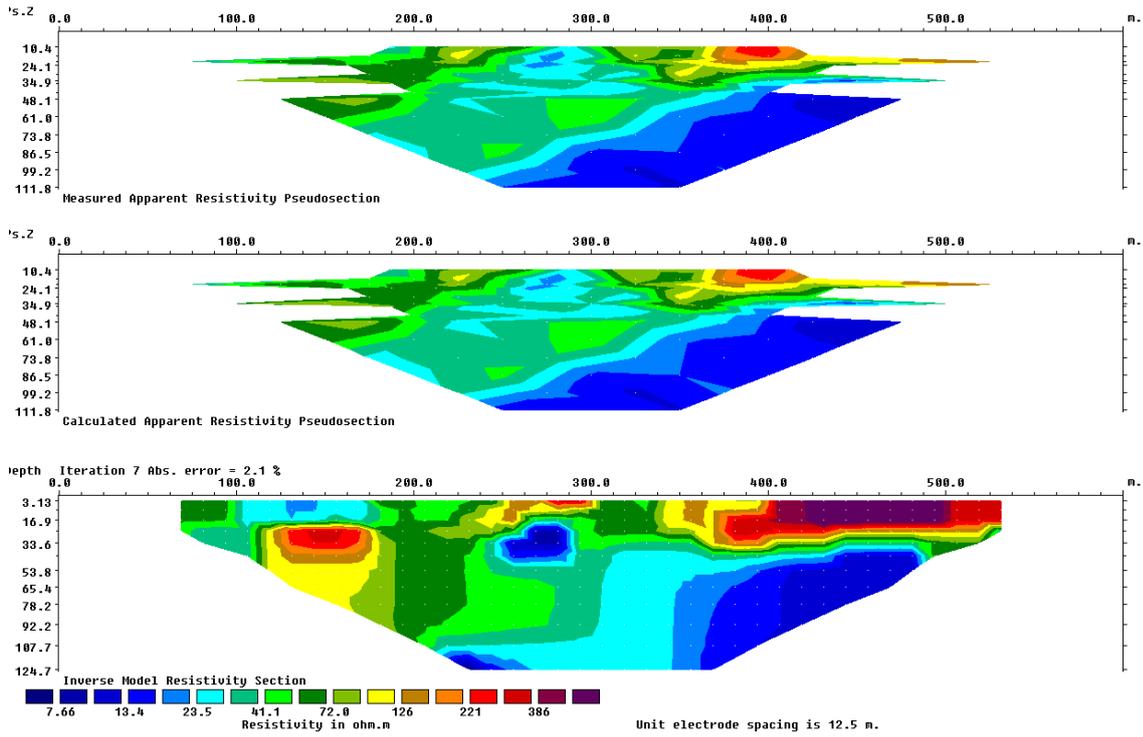


P6DD+WSR

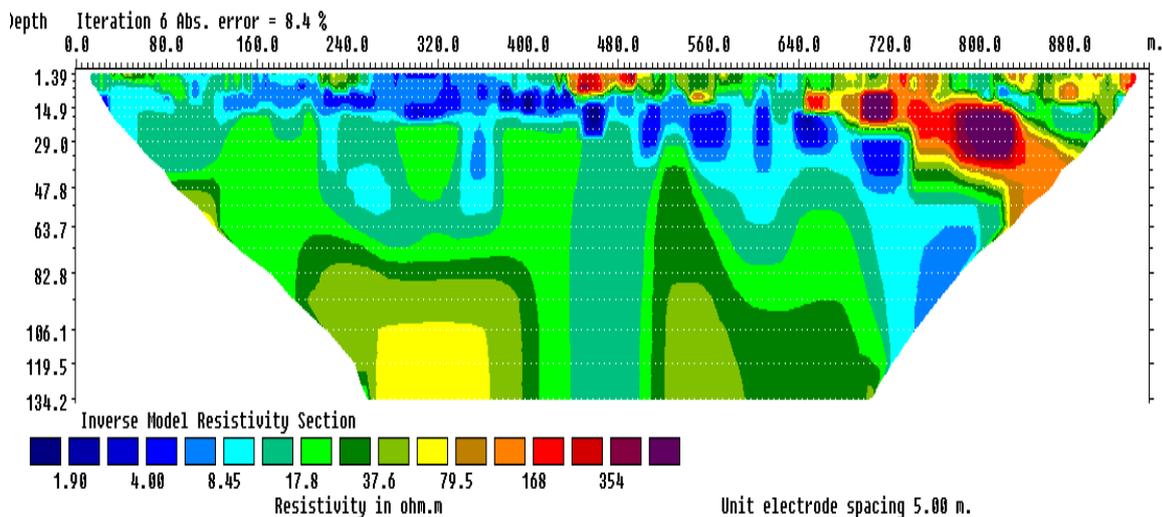




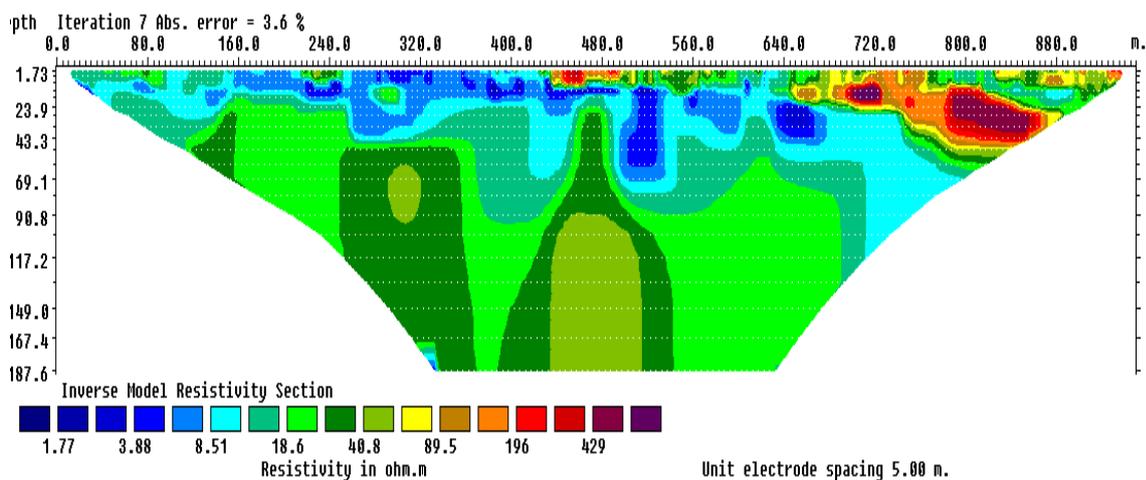
Profil Bouyoumi-Méresse DD25-50 2001 (RP51498)



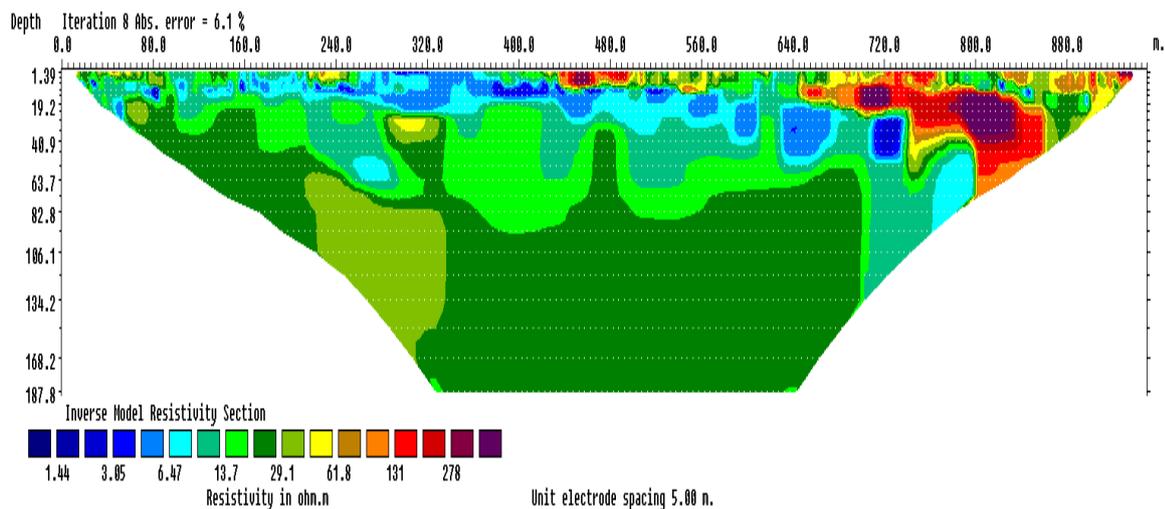
P7DD



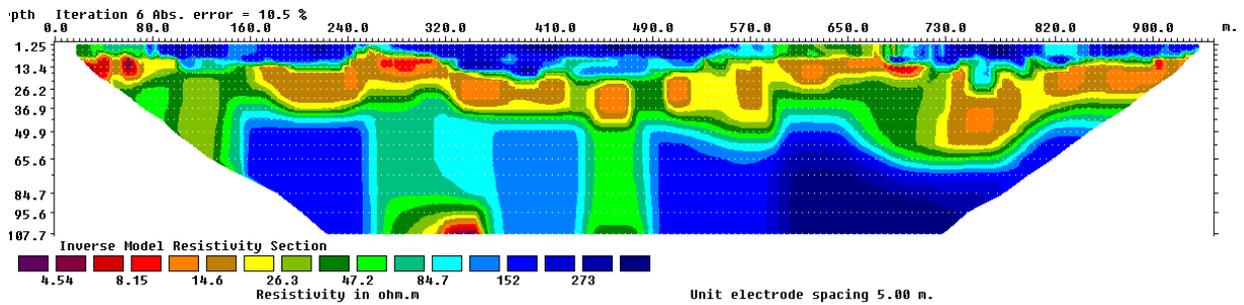
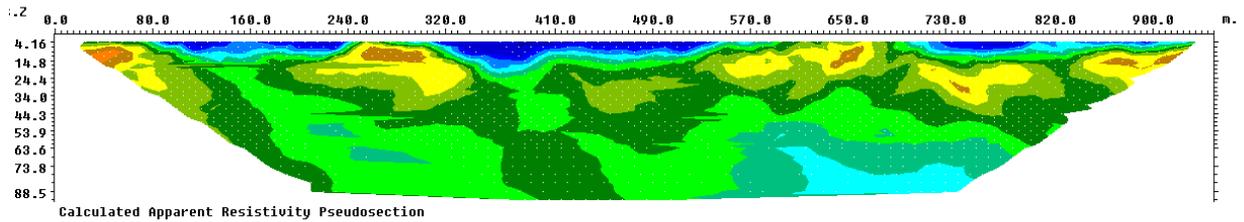
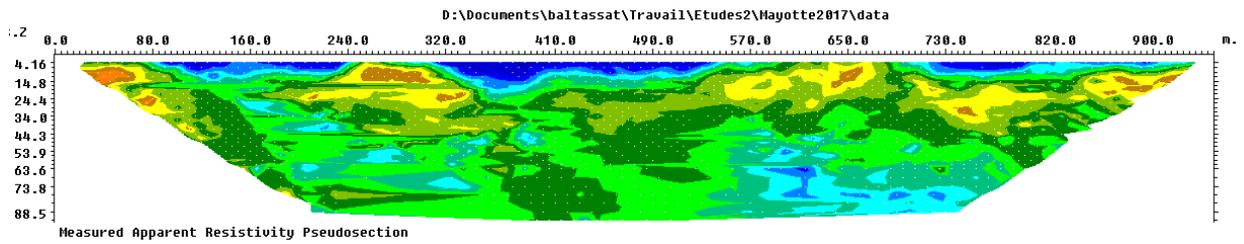
P7WSR



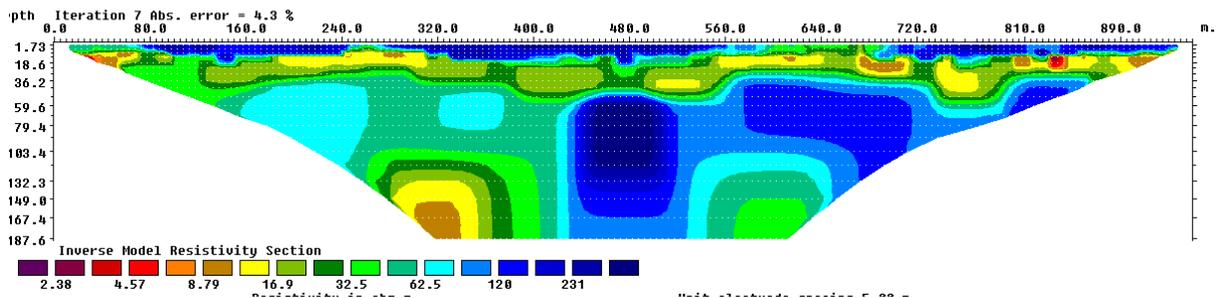
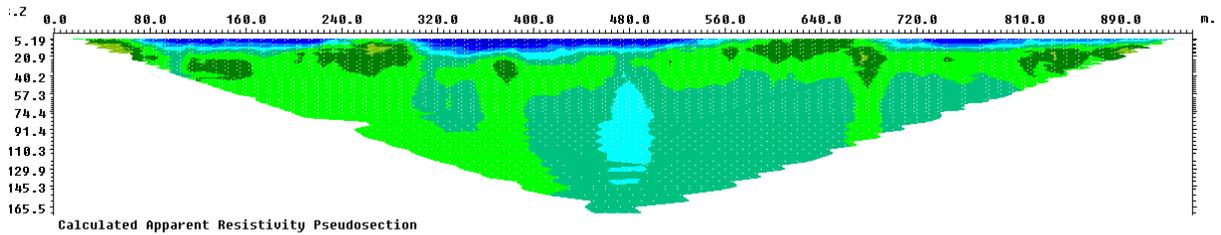
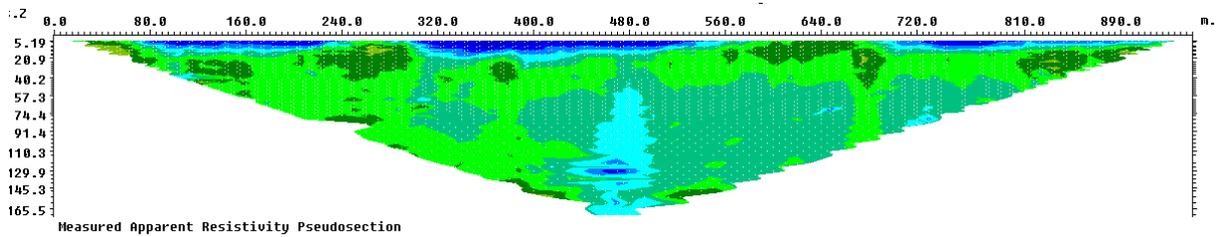
P7DD+WSR



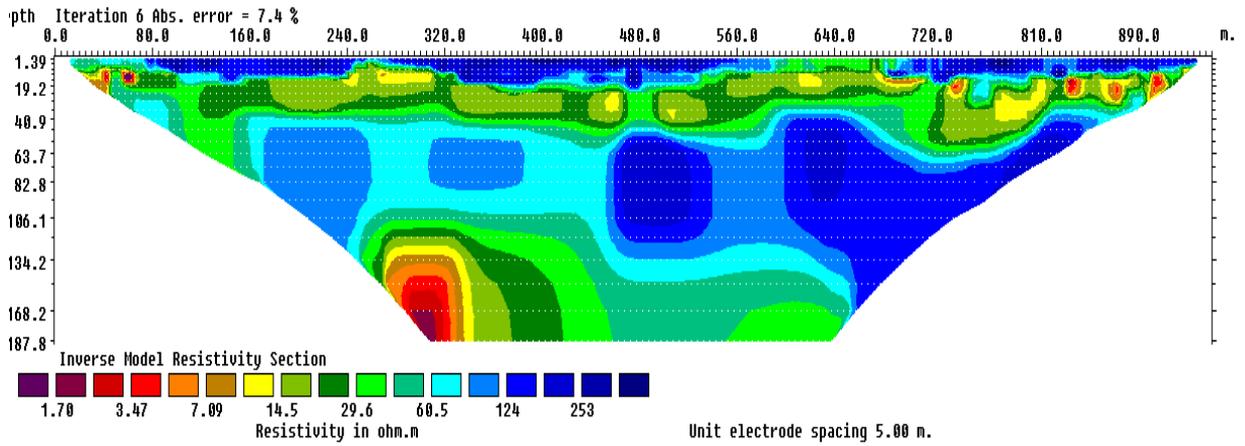
P8DD



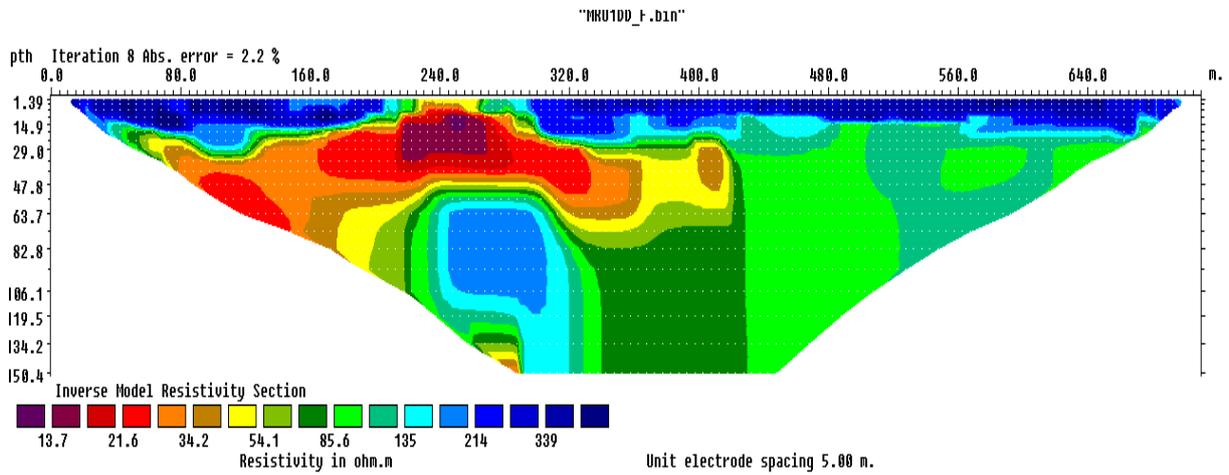
P8WSR



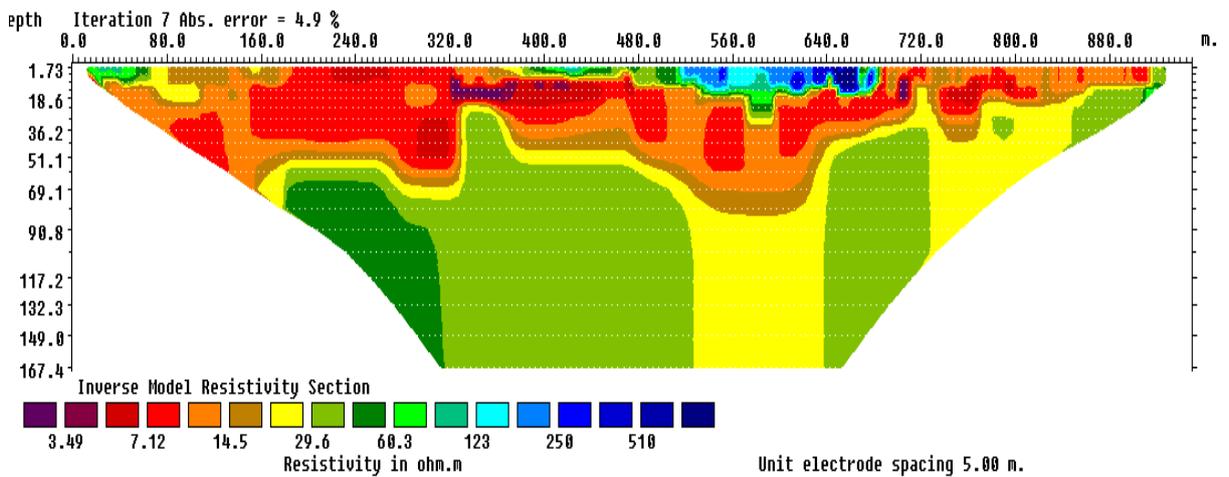
P8DD+WSR



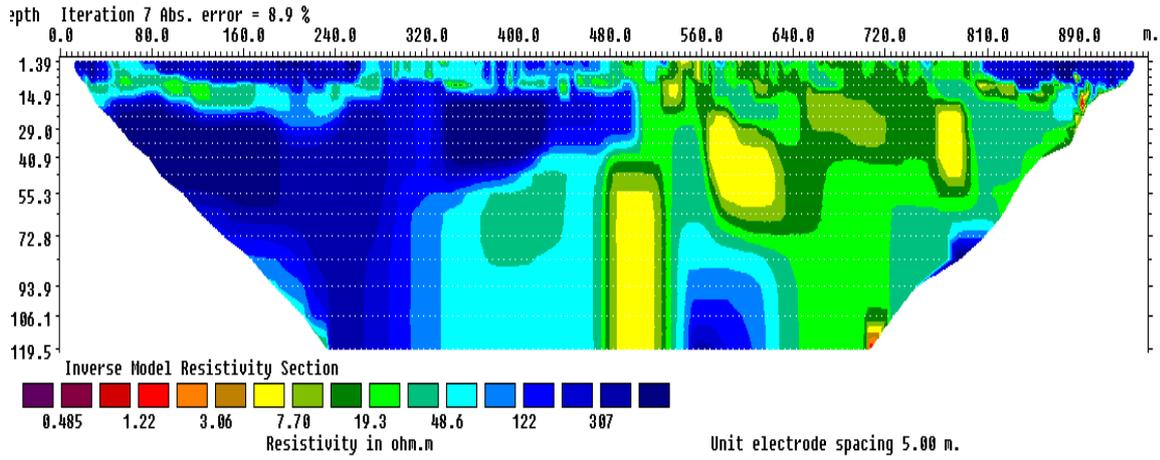
P2011 Mrowale1



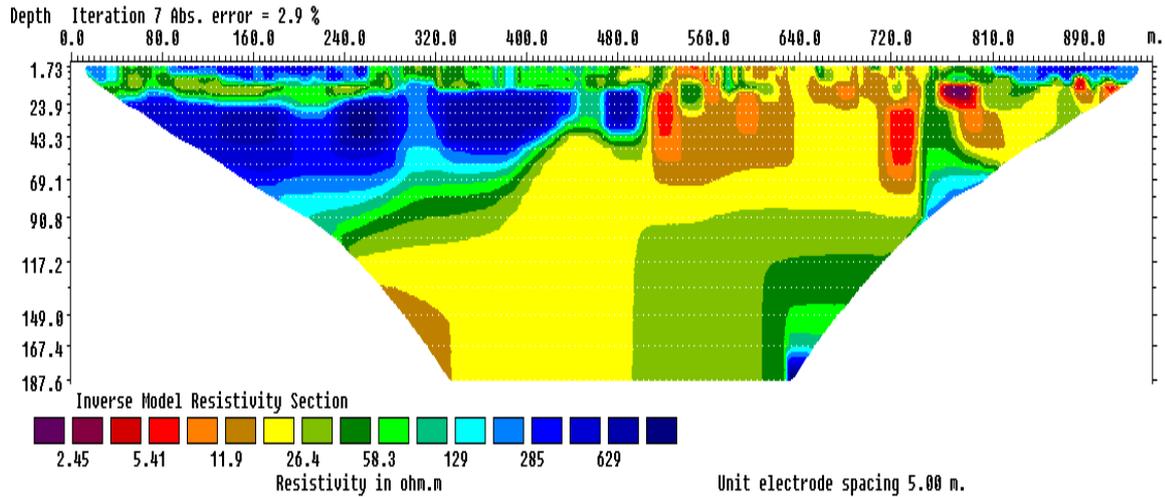
P9WSR



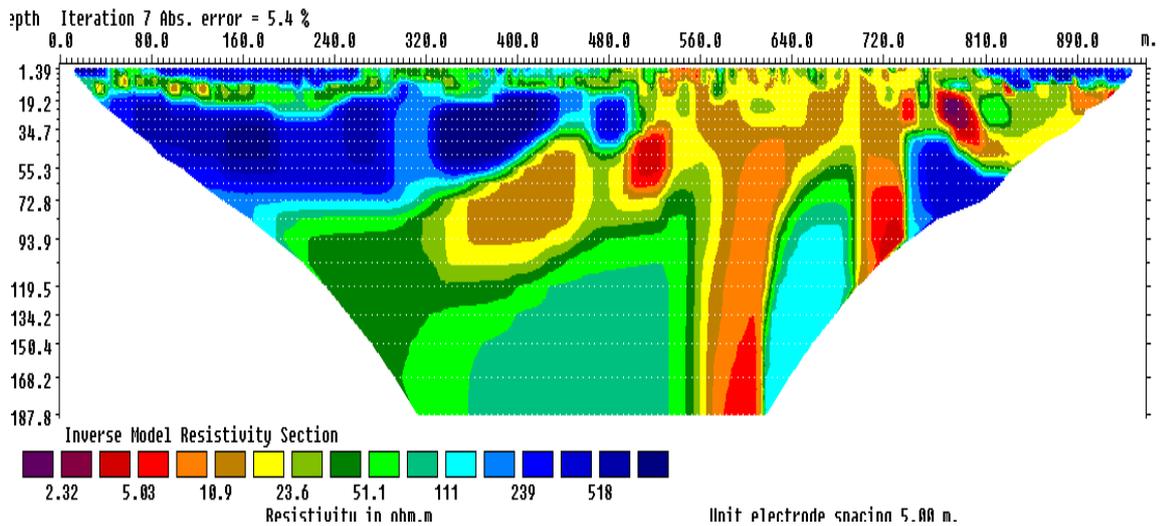
P10DD



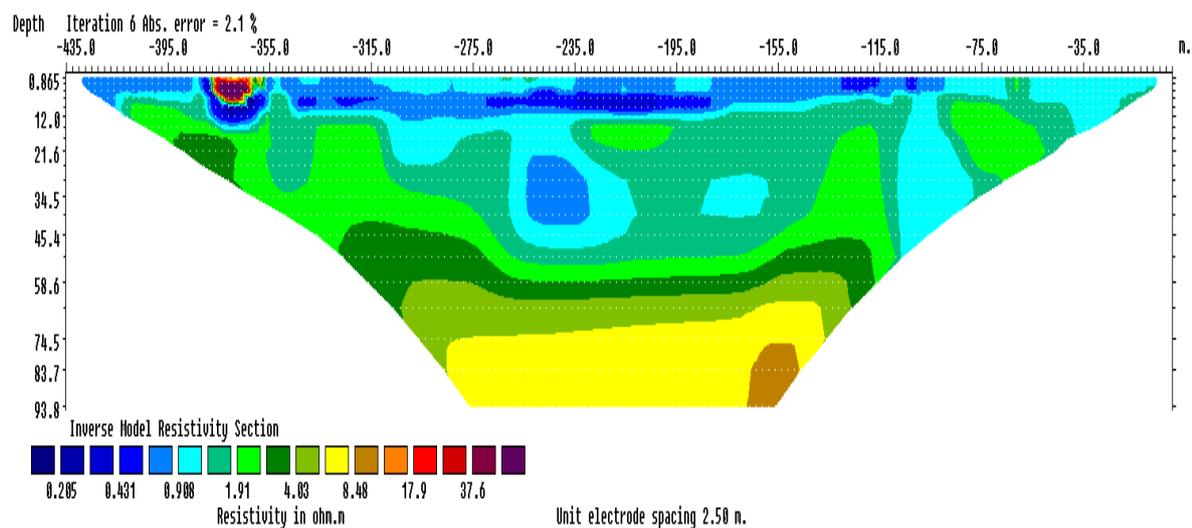
P10WSR



P10DD+WSR

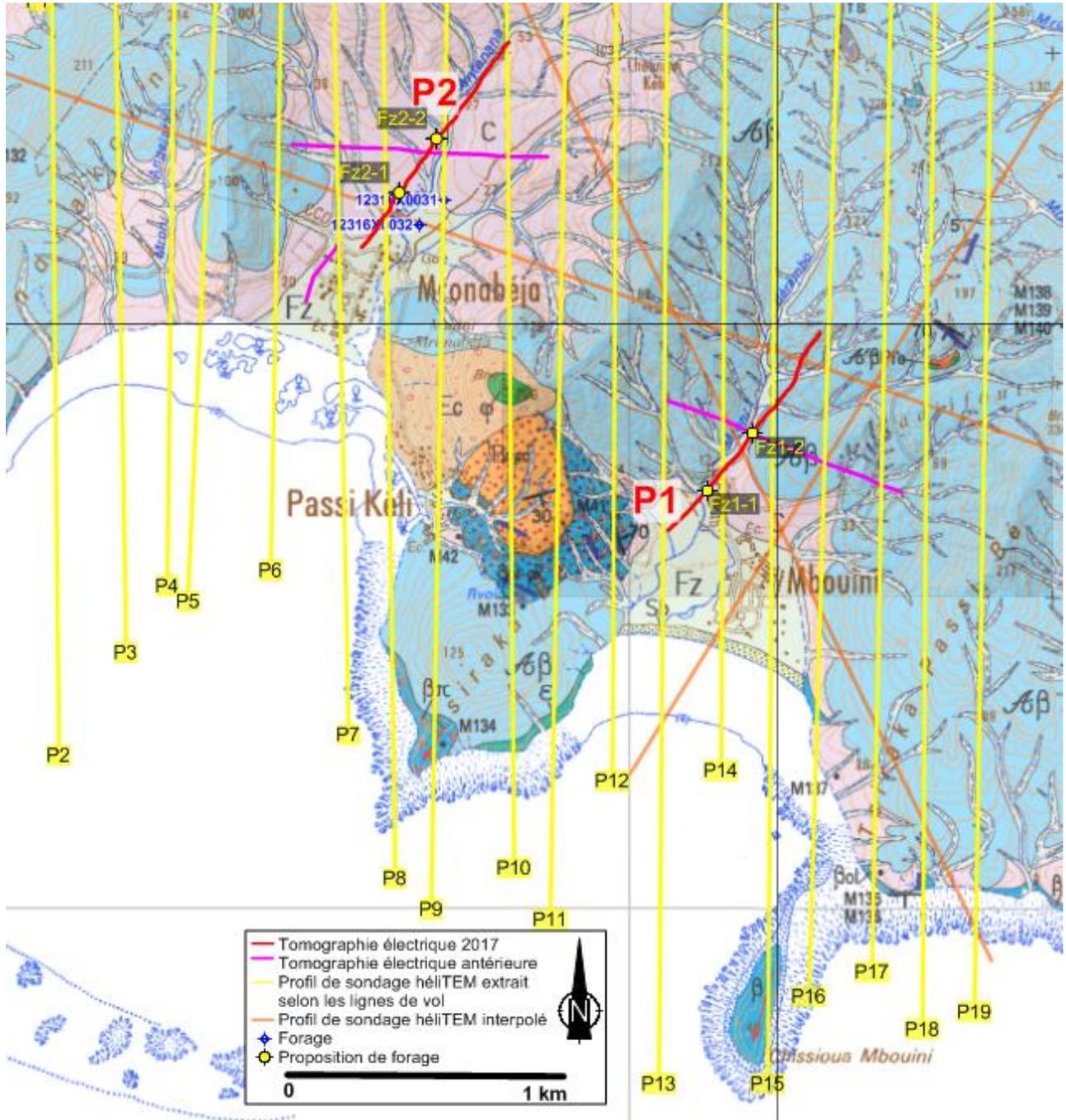


PlageWSR

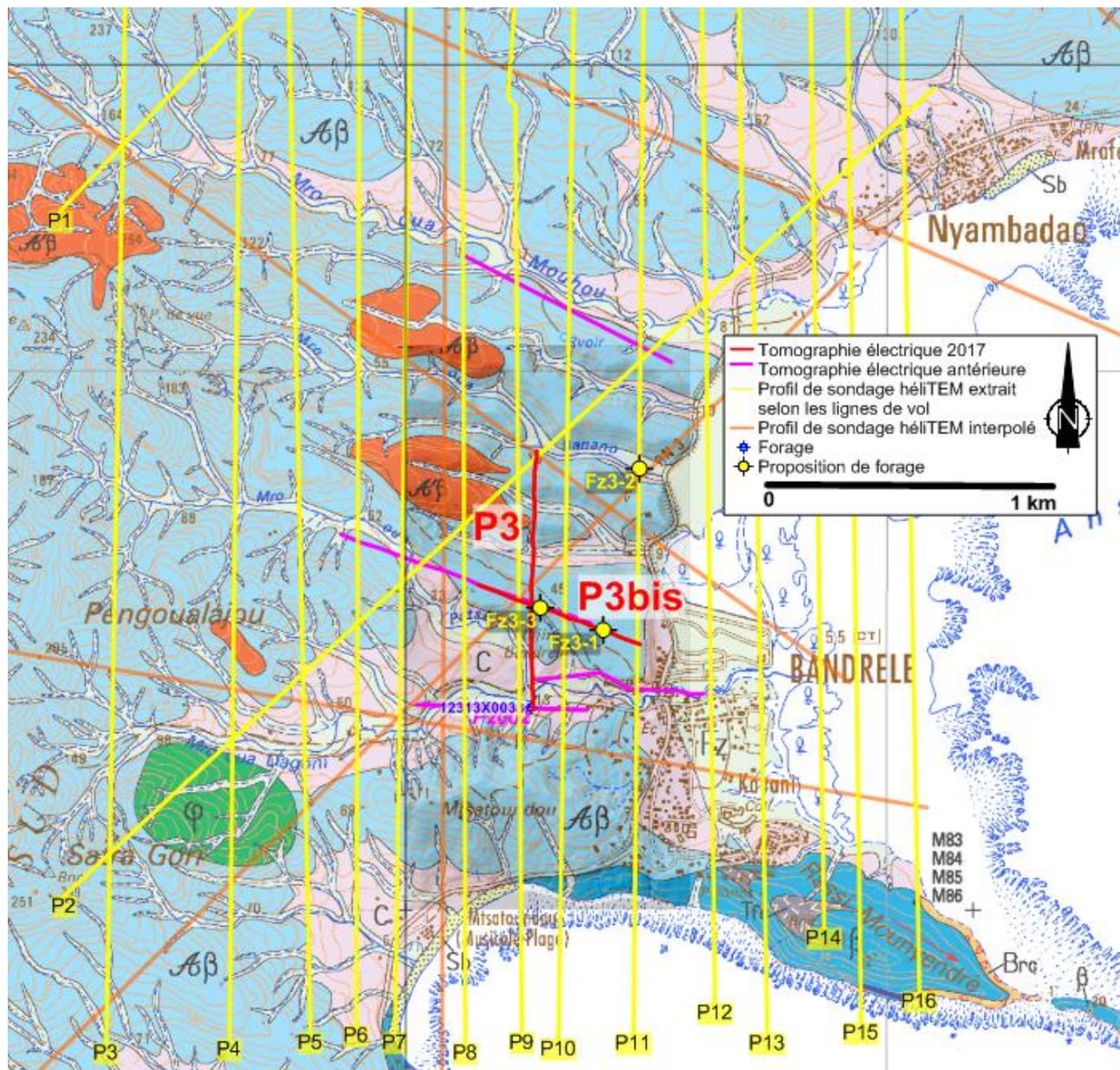


Annexe 9

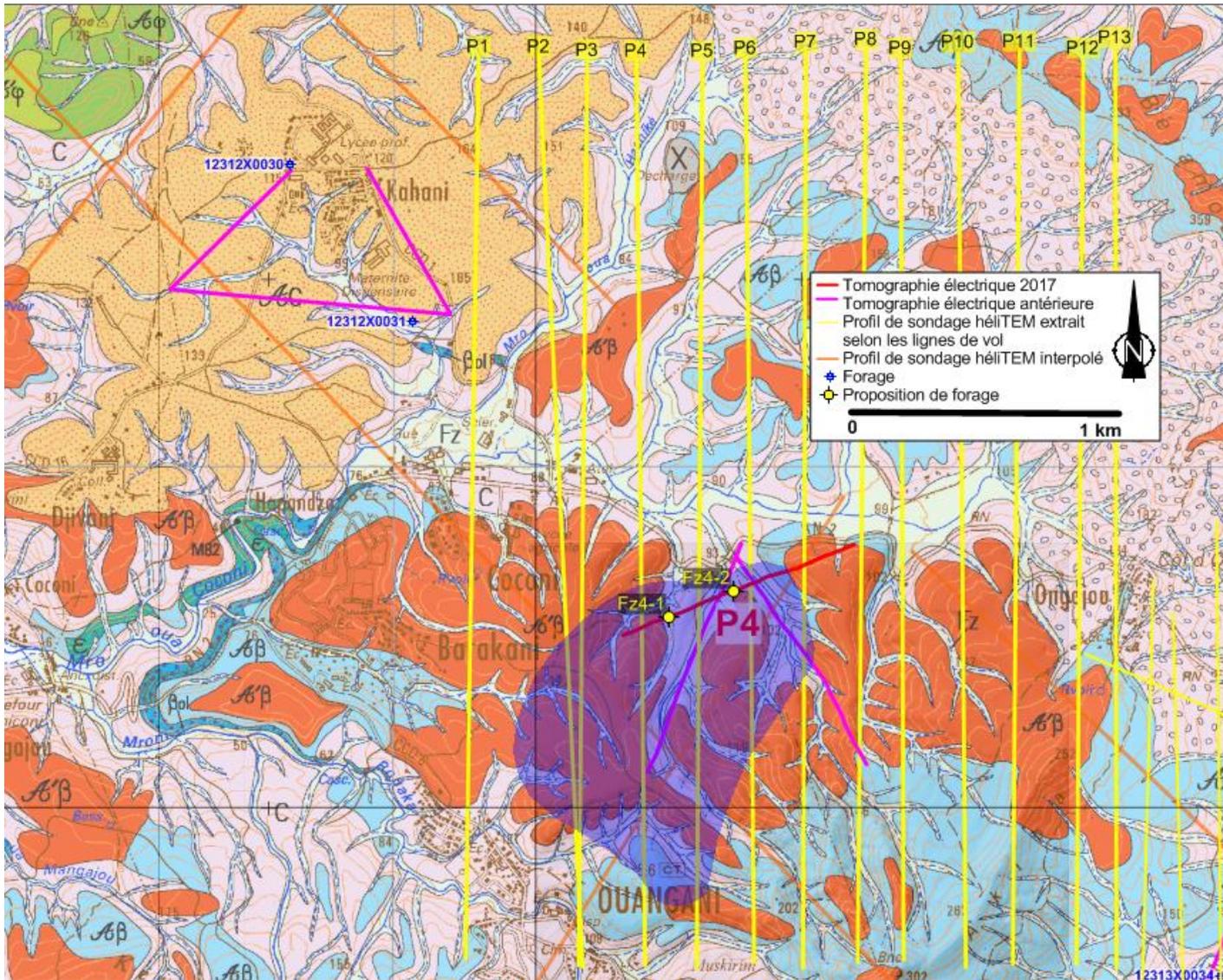
Implantation des investigations sur fond de carte géologique de Mayotte au 1/30000



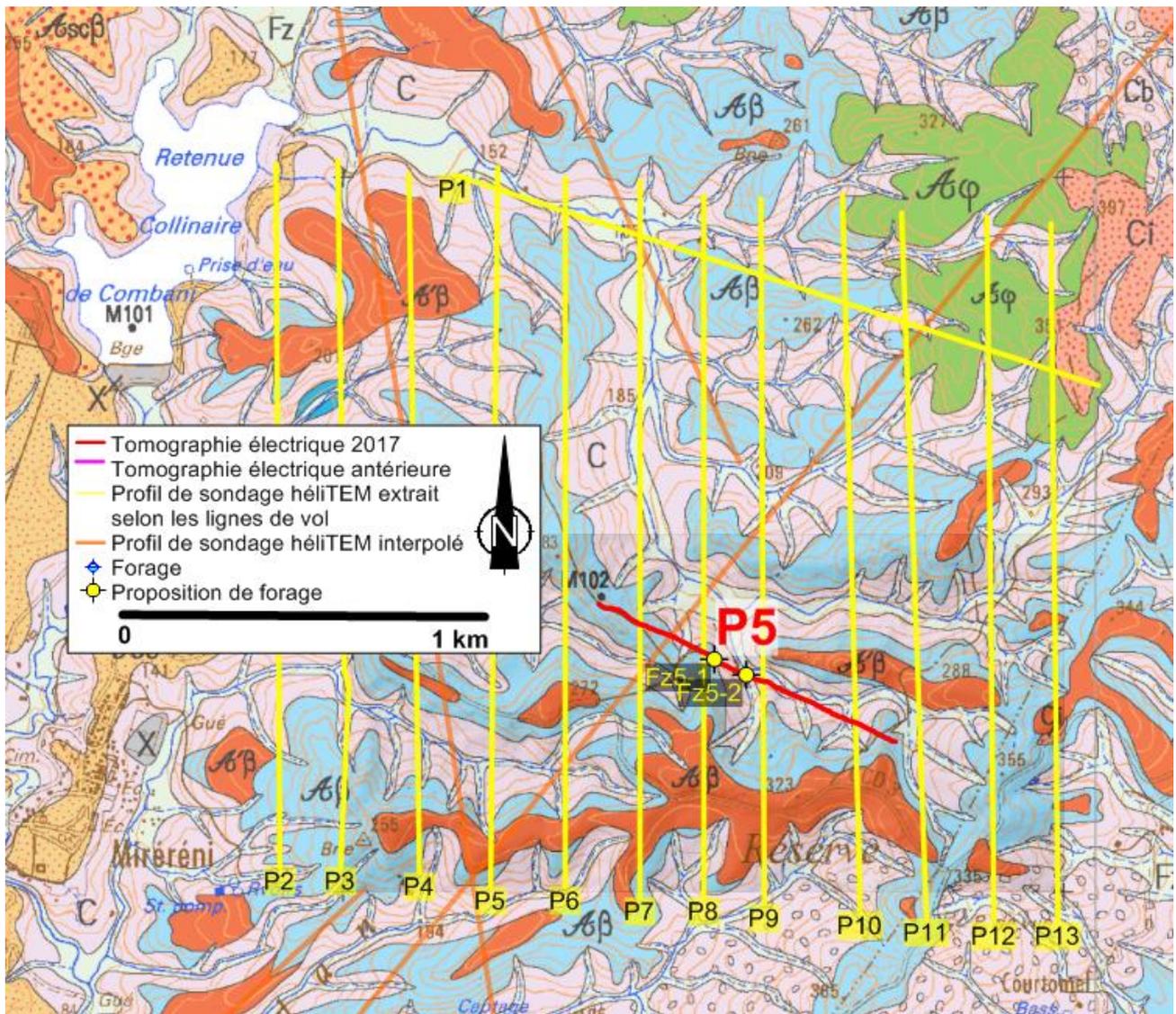
Zones 1 et 2



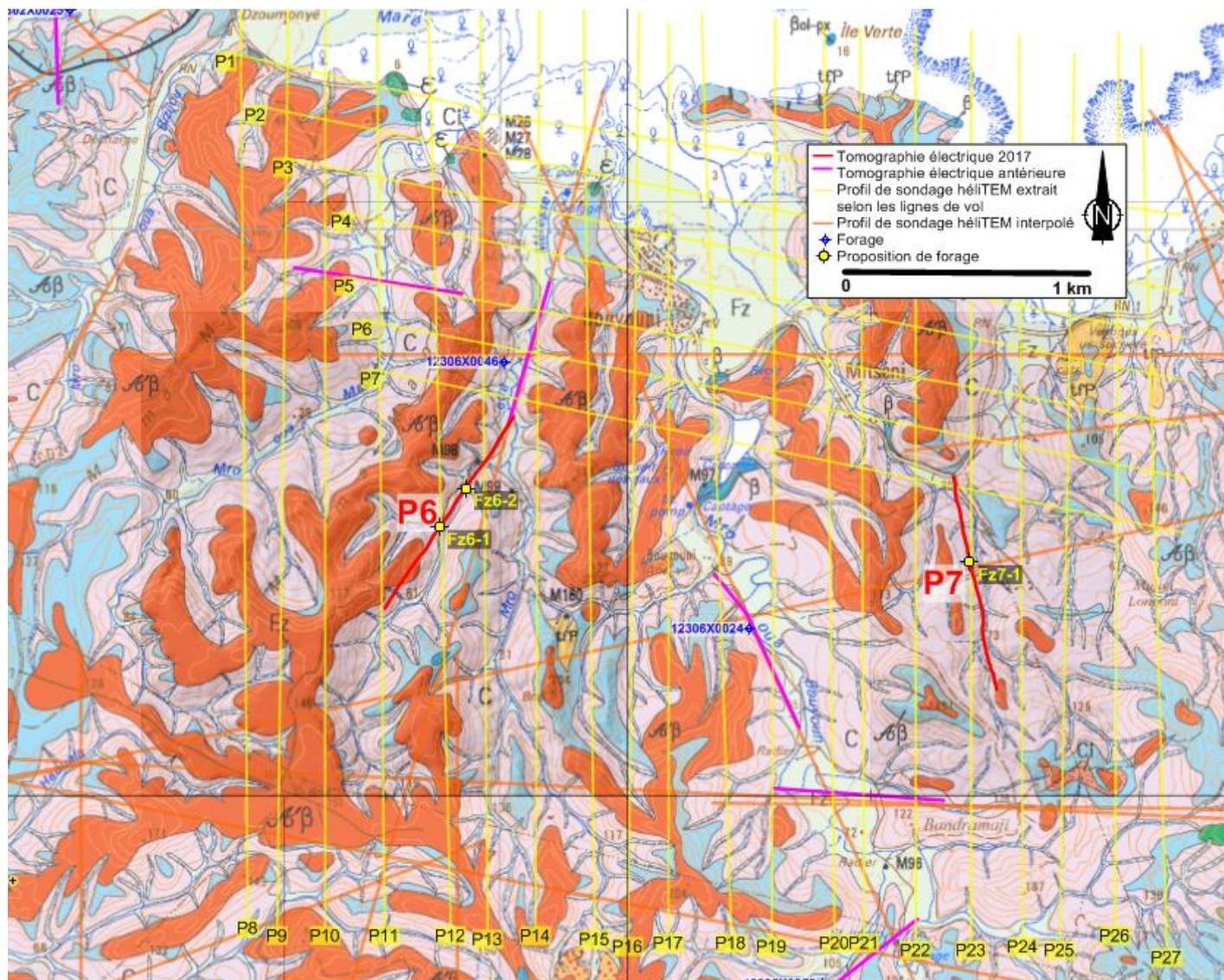
Zone 3



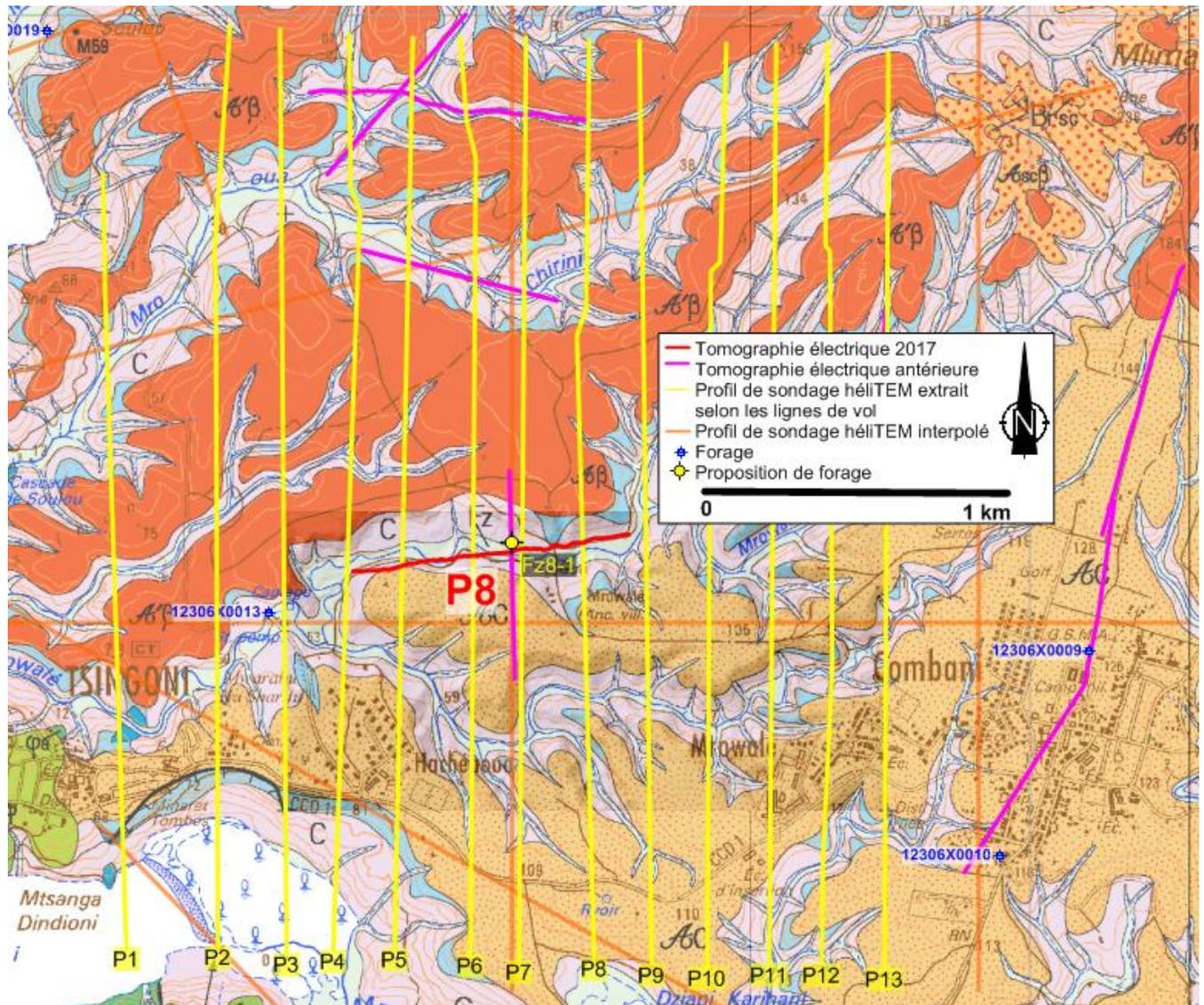
Zone 4



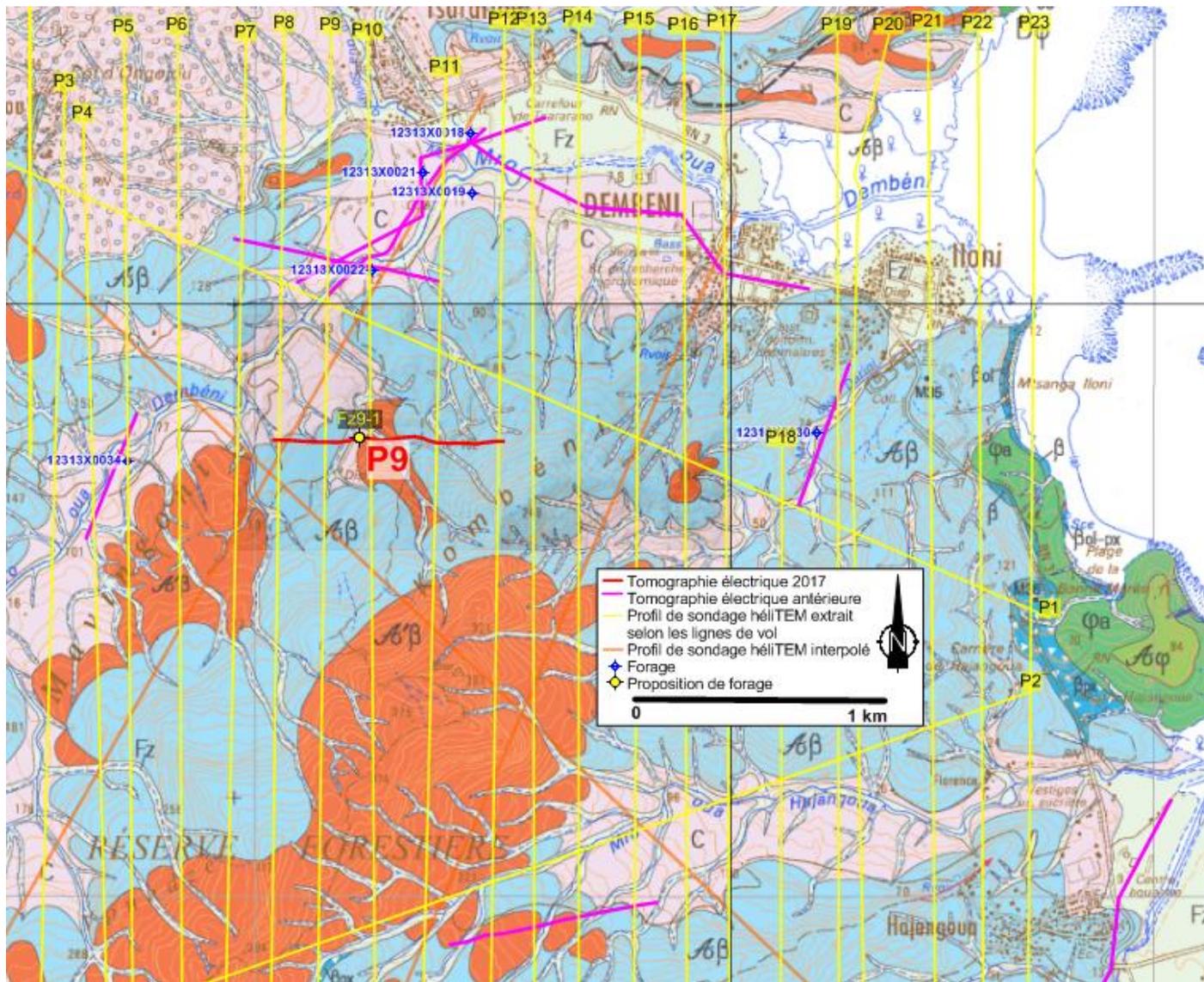
Zone 5



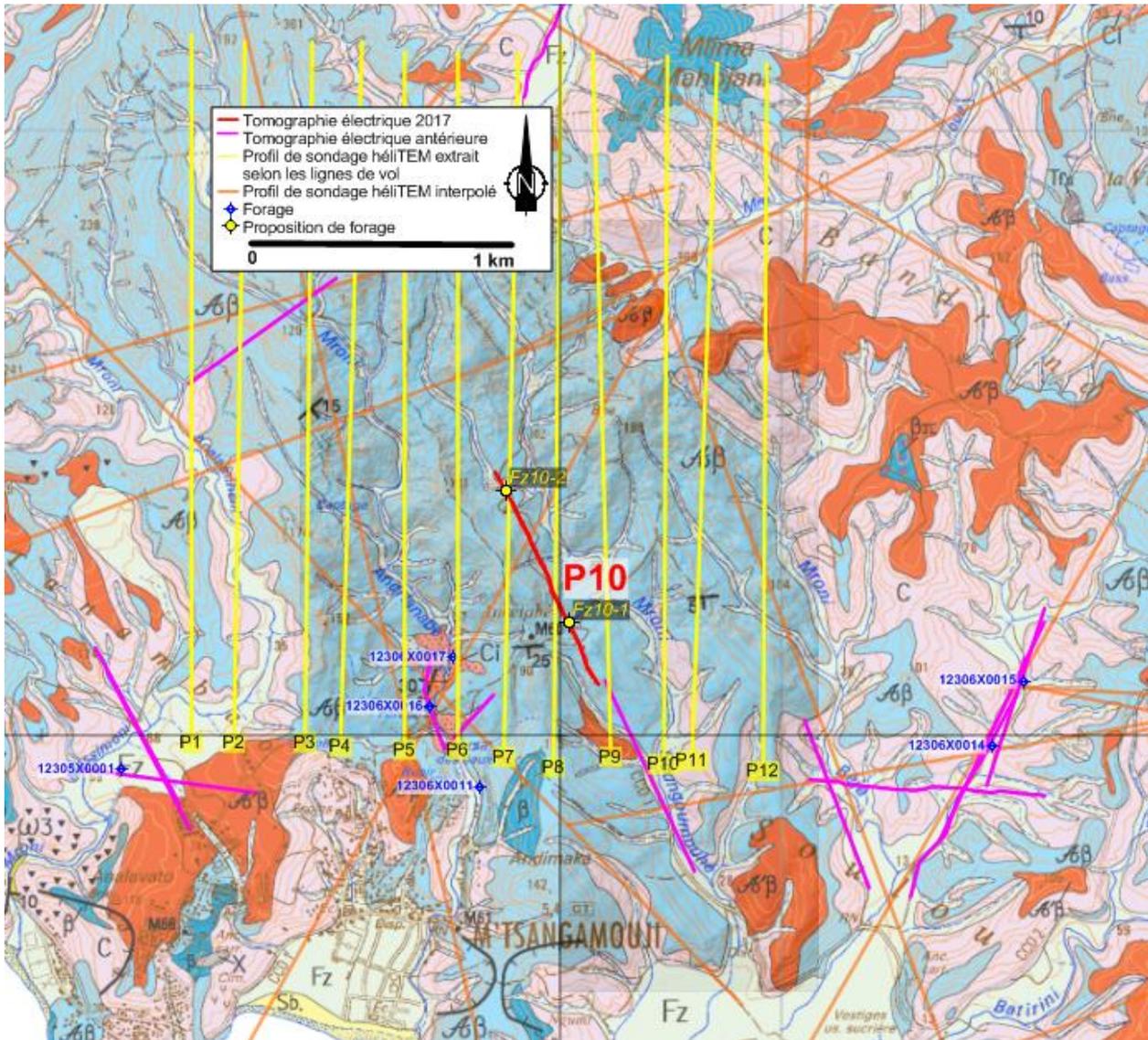
Zones 6 et 7



Zone 8



Zone 9



Zone 10

Annexe 10

Légende de la carte géologique au 1/30000

Formations superficielles

Dépôts anthropiques

X Remblais anthropiques

Formations superficielles allochtones

Formations alluvionnaires

Fz Alluvions indifférenciées

Fy Alluvions anciennes indifférenciées

Formations de pente

C Colluvions

E Éboulis

Ec Dépôts d'éroulements

Cb Colluvions à blocs

BG Brèches et panneaux glissés

Formations de plage

Sb Sables

Formations superficielles autochtones

Allotérites

Aβ Allotérites de laves basiques et intermédiaires

Aβpx Allotérites de laves basiques et intermédiaires à grenailles ferrugineuses

Aφ Allotérites de phonolites

Isaltérites

Aβ Isaltérites de laves basiques et intermédiaires

Aβpx Isaltérites de basaltes à pyroxène

Aφ Isaltérites de phonolites

Ascβ Isaltérites de cônes de scories

Ac Isaltérites de cinérites et alluvions (paléosurface de Combani)

ABG Isaltérites de brèches et panneaux glissés

Formations volcaniques

Formations laviques

β Basalte sl

βol Basalte à olivine

βpx Basalte à pyroxène

βrc Basalte porphyrique

βol-px Basalte à olivine et cl

ε Téphrite sl

ω Néphéline

ω3 Mélilitite

φ Phonolite sl

φa Phonolite aphyrique

Formations volcanoclastiques

trP Projections phréatorm
Petite Terre et de Mai

Brsc Projections scoriacée
Petite Terre et de Mai

Brsc Projections scoriacée

Brcc Brèches riches en cur
flot Bambo et de Barr

Trs Tufs indifférenciés (p

Ci Cinérites

Formations hypovolcaniques

Dφ Protrusion de phonol

Légende technique

 Contour

 Faille

 Faille supposée

 Niche d'arrachement

 Cratère de maar

 Dyke

 Stratification

 Figure d'impact de pi
pyroclastique

 Sens de glissement

 Sens d'écoulement

 Bloc

 M18
Point d'analyse géocli

Annexe 11

Proposition de forage hydrogéologique sur les 10 zones - Coordonnées RGM04

x RGM04 (m)	y RGM04 (m)	z (m)	Forage	Profondeur (m)
514744,1	8564388,1	10,2	Fz1-1	100-130
514911,4	8564596,6	17,9	Fz1-2	100-130
513622,3	8565481,5	10,9	Fz2-1	150
513758,0	8565680,0	19,5	Fz2-2	150
520695,7	8572993,7	36,7	Fz3-1	130-150
520823,5	8573566,6	11,1	Fz3-2	130-150
520474,2	8573072,5	42,5	Fz3-3	130-150
515499,6	8580720,9	100,3	Fz4-1	130-150
515742,4	8580818,5	97,5	Fz4-2	130-150
517029,8	8586650,9	240,4	Fz5-1	100
517118,2	8586607,6	231,3	Fz5-2	100
514224,2	8591113,5	46,8	Fz6-1	130-150
514333,3	8591274,3	41,3	Fz6-2	130-150
516409,4	8590967,2	48,5	Fz7-1	150
512749,0	8586898,7	64,9	Fz8-1	120
518507,0	8579456,3	96,2	Fz9-1	100-130
509790,2	8590951,4	100,3	Fz10-2	150
510034,7	8590436,7	84,6	Fz10-1	150

Annexe 12

Station MAYG du réseau GNNS

Identité de la station

Renseignements	
Acronyme	MAYG
Nom	Mayotte
Numéro DOMES	90101M001
Mise en service	20/12/2013
Classe »	PNG
Constellations suivies	GPS+GLONASS+GALILEO
Liste des observables	L1L2C1P1P2D1D2S1S2
Session d'enregistrement	1h
Cadence d'enregistrement	1s
Propriétaire	CNES
Gestionnaire	CNES
Autres Réseaux	SONEL, REGINA

Logsheets *
mayg_20151022 (actuel) 
<i>* fiches signalétiques au standard international</i>

Dernières infos
Aucune info récente ! <i>Voir l'historique »</i>



Coordonnées de la station

Début validité	Fin validité	Jeux de coordonnées			
		Système	RGM04		
19/12/2013	en cours	Cartésiennes	X	Y	Z
			4379104.710 m	4418744.327 m	-1401898.078 m
		Géographiques	Longitude	Latitude	Hauteur
			45° 15' 29.34108" E	12° 46' 55.39597" S	-16.353 m
		En projection (UTM Sud Fuseau 38)	E	N	Altitude (SHOM 1953)
	528018.483 m	8586951.891 m	3.617 m		
	Hauteur d'antenne	3.0356 m	Statut de stabilité	Groupe : N	

Équipement de la station

Le tableau ci-dessous prend uniquement en compte la marque et le modèle des équipements. Pour avoir des informations plus précises (numéro de série, de firmware...) veuillez consulter le logsheet.

Récepteur			Antenne		
Installé le	Retiré le	Marque et modèle	Installée le	Retirée le	Marque et modèle
19/12/2013	en cours	TRIMBLE NetR9	19/12/2013	en cours	TRIMBLE TRM59800.00



Annexe 13

Paramètres utilisés pour l'inversion avec le logiciel RES2DIN64

Paramètres d'inversion RES2DINV utilisés

Restoring inversion parameters from file D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Mayotte2017\data\Mayotte2017.ivp.
 Initial damping factor is 0.1500.
 Minimum damping factor is 0.0200.
 Local optimization is used.
 Convergence limit is 2.0000.
 Minimum change in RMS error is 0.5000.
 Number of iterations is 10.
 Vertical to horizontal flatness filter ratio is 1.0000.
 User defined increase in layer thickness.
 Number of nodes between adjacent electrodes is 2.
 Smoothness constrain is only used directly on model resistivity values.
 Number of topographical data points is not reduced.
 Topographical modeling is to be carried out.
 End-to-end linear topographical trend to be removed.
 Jacobian matrix is recalculated after each iteration.
 Increase of damping factor with depth is 1.0500.
 Finite element method with damped grid is used for topographic modeling.
 Robust data inversion constrain is used with cutoff factor 0.0500.
 Robust model inversion constrain is used with cutoff factor 0.0050.
 Extended model is not used.
 Effect of side blocks is severely reduced.
 Normal mesh is used.
 Damping factor is optimised at each iteration.
 Blocky constraint is used in time-lapse inversion.
 Thickness of first layer is 0.6920.
 Factor to increase thickness layer with depth is 1.1000.
 Finite element method is used
 Width of blocks used is 1 times the unit electrode spacing
 All models blocks must have the same width
 RMS convergence limit is 0.1 percent
 Logarithm of apparent resistivity values are used for the inversion
 Resistivity/IP data are inverted concurrently
 Do not proceed automatically in sequential IP inversion
 IP damping factor is 0.2500
 Automatic IP damping factor is not used
 Cutoff factor for borehole data is 0.00010
 Standard cross-borehole model is used.
 Upper resistivity cutoff limit is 50.00000
 Lower resistivity cutoff limit is 0.02000
 Average resistivity used.
 Model refinement not used.
 Incomplete Gauss-Newton method used with convergence limit of 0.0050
 Reference model with damping factor of 0.010 used.
 Factor to increase model depth range is 1.050.
 Borehole damping not used
 Limit range of data weights from error estimates not used.
 Different data weights from error estimates used for different time series.
 Model resolution not calculated.
 L curve method not used
 Different norms used in L curve method.
 Damping factor allowed to increase in L curve method.
 Borehole damping using horizontal distance from nearest borehole
 Fast Jacobian calculation for dense data sets not used.
 Higher damping factors at sides are used.
 Damping factors are adjusted for distances between blocks in model.
 Length of segment in sparse inversion method is 250 electrodes.

Annexe 14

Compte-rendu préliminaire des investigations géoélectriques réalisées sur le site de captage de l'usine de dessalement de Petite- Terre (Mayotte)

La coupe de résistivité, résultat de la tomographie électrique réalisée sur la plage au S de l'usine de part et d'autre du forage montre une structure globalement tabulaire avec une succession de couches caractérisées par leur résistivité soit de bas en haut (cf. Figure 1):

- Le substrat R1 ($3 < \rho < 15$ Ohm.m) relativement résistant par rapport à sa couverture se développe à partir d'une profondeur de 60 m. Sa nature est indéterminée.
- La conducteur C1 ($1.3 < \rho < 3$ Ohm.m) attribué aux téphrites (cendres) qui composent tout le massif de la Vigie et affleurent le long de la falaise bordant la plage. Son épaisseur atteint 50 m sur la coupe. On peut distinguer localement un faciès plus conducteur C1' qui pourrait correspondre à des effets latéraux au passage de la canalisation en fonte remontant vers l'usine au niveau du forage, à des panaches de saumure quand le profil recoupe le drain de ré-injection (abscisse -40m, fuite ?), à l'effet de fluides géothermaux considérant la correspondance géographique avec les émanations de gaz visibles sur le terrain selon un axe SSW-NNE dont l'extrémité SSW est voisine du profil au niveau de l'abscisse -115m. La fiabilité de l'interprétation de ces anomalies localisées est toutefois limitée.
- Le conducteur C2 ($0.4 < \rho < 1.3$ Ohm.m) attribué aux téphrites altérées dont l'épaisseur atteint une dizaine de m en partie centrale et SW et se limite à 5 m au NE. Il est possible que l'arrêt du forage vers 10 m de profondeur corresponde au passage à la formation dure ou peu altérée. On ne peut toutefois exclure un changement de faciès vers une autre formation qui serait indéterminée. Les forages peu nombreux et peu profonds dans la région ne permettent pas de calibrer l'interprétation géophysique.
- Le résistant R2 ($1.3 < \rho < 25$ Ohm.m) correspond aux brèches scoriacées en accord avec la carte géologique (²Brsc) et les affleurements observés en pieds de falaise entre les abscisses -345 et -390 m.

La zone couverte par le profil présente à l'affleurement les téphrites ou du sable de plage. Un relevé des zones de sable le long du profil permettra peut-être d'affiner l'interprétation des variations observées à l'intérieur de la couche C2 mais en l'état des connaissances, il est considéré qu'il s'agit d'un niveau globalement homogène, plus ou moins altéré et présentant des conditions relativement favorables pour des travaux de terrassement.

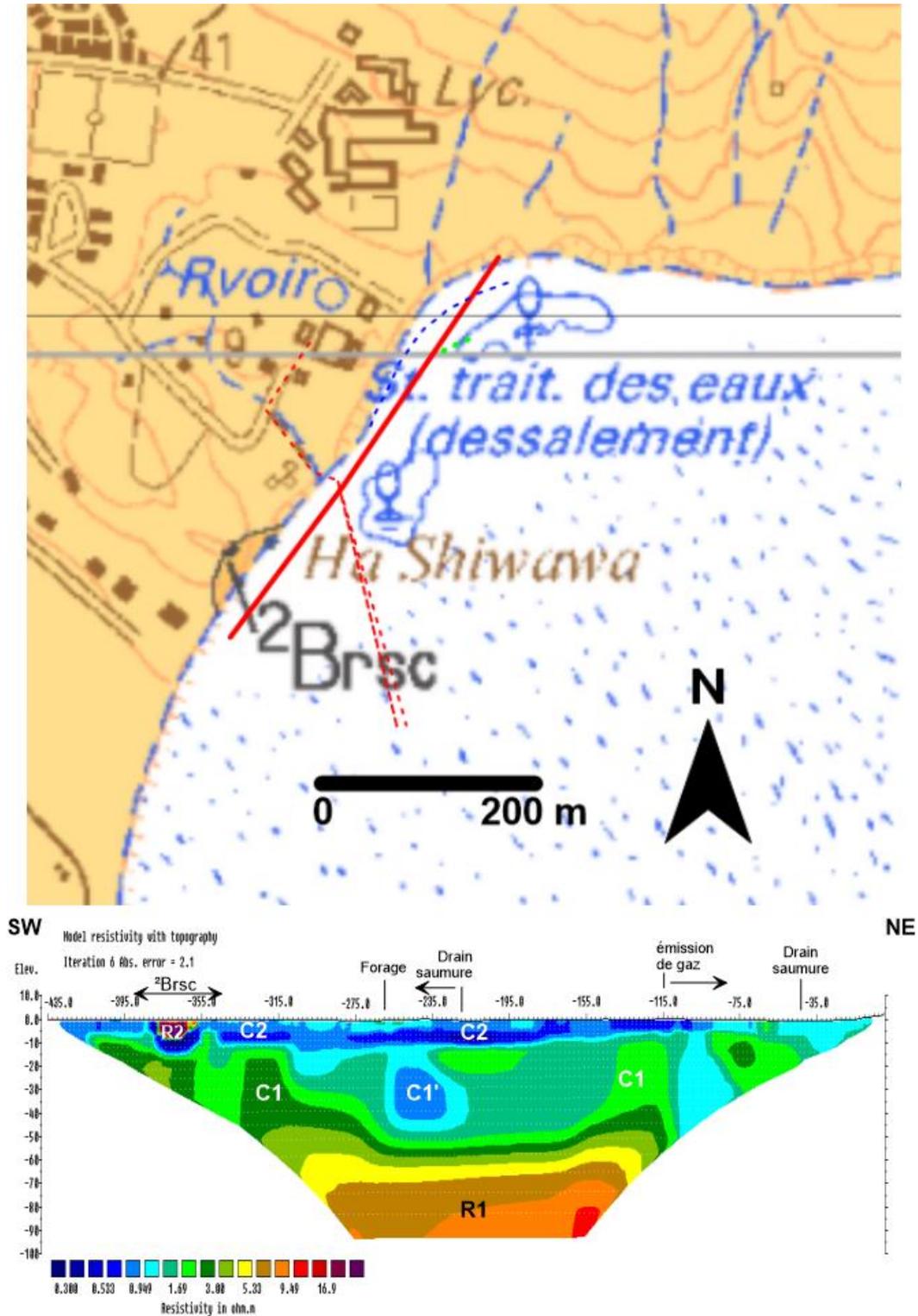


Figure 1 - En haut : plan d'implantation du profil de tomographie électrique (trait rouge) sur fond de la carte géologique au 1/30000. Trait tillé rouge : canalisation et drain de pompage de l'eau salée ; trait-tillé bleu : canalisation de réinjection de saumure (d'après la photographie aérienne IGN de 2003 dans rapport BRGM/RP57112) ; losange verts : émission de gaz. En bas : coupe de résistivité en résultat d'inversion de la tomographie électrique Wenner-Schlumberger.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale de Mayotte

Immeuble « Le Jacaranda » n° 5
1, lotissement « Les Trois Vallées »

BP 363, Kawéni - 97600 Mamoudzou - France

Tél. : 02 69 61 28 13