

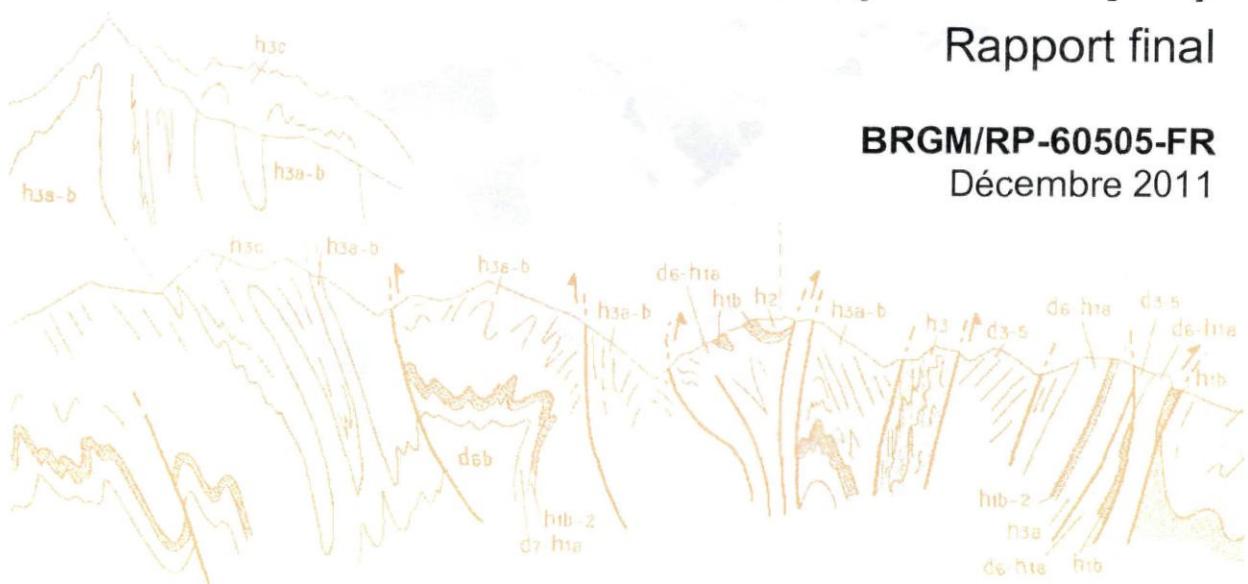


60505

Prospections hydrogéologiques sur le site de Fond Manoël, commune du Diamant (Martinique)

Rapport final

BRGM/RP-60505-FR
Décembre 2011



Géosciences pour une Terre durable
brgm

BRGM
Barcode
3 5000 00091373 0



Prospections hydrogéologiques sur le site de Fond Manoël, commune du Diamant (Martinique)

Rapport final

BRGM/RP-60505-FR
Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 EAUI60

L. Arnaud, F. Mathieu, B. François

Vérificateur :

Nom : B. Vittecoq

Date : le 28 novembre 2011

Signature :

Approbateur :

Nom : J.-C. Audru

Date : le 14 décembre 2011

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : Aquifères volcaniques, Alimentation en eau potable, Alimentation de secours, Eau souterraine, Géophysique, Milieu fissuré, Reconnaissances géologique et hydrogéologique, Le Diamant, Martinique, SICSM, DOM.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Arnaud L., Mathieu F., François B. (2011). Prospections hydrogéologiques sur le site de Fond Manoël, commune du Diamant (Martinique), Rapport BRGM/RP-60505-FR, 73 p., 25 ill., 5 ann.

Synthèse

Le SICSM souhaite diversifier et augmenter les ressources en eau potable disponibles sur son territoire, par l'exploitation des eaux souterraines.

Le SICSM a ainsi confié au BRGM un programme de reconnaissance des eaux souterraines du centre et du sud de la Martinique.

Le présent rapport rend compte des prospections hydrogéologiques menées en 2011 sur le site de Fond Manoël au Diamant selon une méthodologie adaptée aux milieux volcaniques : reconnaissances géologique et hydrogéologique de terrain, investigations géophysiques par panneau électrique, interprétation générale du site (modèle conceptuel hydrogéologique) et propositions d'implantation de forages de reconnaissance.

Ces travaux de prospection ont permis d'identifier les coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes (pam2c) comme cible hydrogéologique. Plus précisément, les zones d'intérêt correspondent aux parties saines, potentiellement fracturées/fissurées, et aux éventuels horizons perméables associés aux inter-coulées.

Les acquisitions géophysiques mettent en évidence trois grands épisodes d'épanchement volcanique. Ces trois épanchements sont caractérisés par le même doublet d'horizons géoélectriques : un conducteur superficiel et résistant sous-jacent. Le premier est interprété comme l'enveloppe bréchique altérée/argilisée d'une coulée de lave saine sous-jacente, marquée par une résistivité plus élevée.

Ainsi, quatre secteurs favorables à l'implantation de forages de reconnaissance ont été identifiés avec des profondeurs d'investigation toutes supérieures ou égales à 100 m. Ils concernent tous l'épanchement intermédiaire, cible la plus pertinente en termes d'épaisseur et de profondeur.

Dans le cas du Diamant, compte tenu de la proximité de la mer, de la faible altimétrie du secteur et des profondeurs importantes des forages de reconnaissance, le risque d'une intrusion d'eaux salines ne peut être écarté. Une attention toute particulière devra donc être portée sur ce point lors de la réalisation des sondages.

En concertation avec le SICSM, les propositions d'implantation, volontairement nombreuses, pourront être modifiées en fonction des éléments de réponse apportés par le(s) premier(s) forages de reconnaissance (logs géologiques, venues d'eau, rôle des failles, intrusion d'eaux salines, etc.). Il est rappelé que le SICSM prévoit, en moyenne, la réalisation de 3 ouvrages de reconnaissance par site.



Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Présentation du site d'étude.....	11
2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE	11
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	12
2.3. PROSPECTIONS ANTÉRIEURES.....	15
3. Reconnaissances géologique et hydrogéologique de terrain.....	17
3.1. ITINÉRAIRE PARCOURU ET STATIONS D'OBSERVATION	17
3.2. OBSERVATIONS GÉOLOGIQUES.....	18
3.2.1.Les coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes (notées pam2c)..	19
3.2.2.La brèche pyroclastique à éléments andésitiques (notée Bm2f)	22
3.3. OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES	23
3.4. MODÈLE CONCEPTUEL PRÉLIMINAIRE.....	23
4. Investigations géophysiques	27
4.1. ACQUISITIONS GÉOPHYSIQUES	27
4.1.1.Objectifs.....	27
4.1.2.Équipement	27
4.1.3.Configurations d'acquisition des PE	28
4.1.4.Inversions des pseudosections	29
4.1.5.Localisation des panneaux électriques.....	29
4.2. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	32
4.2.1.FM_P1	32
4.2.2.FM_P2	34
4.2.3.FM_P3	36
4.2.4.FM_P4	38
5. Interprétation générale et recommandations.....	41
5.1. INTERPRÉTATION GÉNÉRALE	41

5.2. ZONES POTENTIELLEMENT FAVORABLES À L'IMPLANTATION D'OUVRAGES DE RECONNAISSANCE	44
6. Conclusion.....	47
7. Références bibliographiques	49

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation du site de Fond Manoël (IGN).....	11
Illustration 2 : Carte géologique au 1/50 000 du site de Fond Manoël (Westercamp et al., 1990).....	13
Illustration 3 : Carte de l'itinéraire parcouru (en marron) et des stations d'observation (en rouge)	17
Illustration 4 : Carte des affleurements observés	18
Illustration 5 : Echantillons de lave récupérés sur les stations n°175 (à gauche) et n°186 (à droite)	19
Illustration 6 : Lave massive observée au niveau du front de taille de la station n° 175. On peut noter l'absence d'un profil d'altération significatif	20
Illustration 7 : Lave localement altérée observée sur la station n°178	20
Illustration 8 : Débit en plaques et plaquettes de la lave observée sur les stations n°175 et 177	21
Illustration 9 : Lave fissurée observée au niveau des fronts de taille des stations n°178 et 180.....	21
Illustration 10 : Coulées de lave successives sur le front de taille de la station n°175	21
Illustration 11 : Brèche pyroclastique Bm2f observée sur la station n°188	22
Illustration 12 : Ravine Fonds Manoël sur l'amont du site d'étude (station n° 183)	23
Illustration 13 : Modèle conceptuel du site de Fond Manoël selon une coupe orientée SE-NO	25
Illustration 14 : Modèle conceptuel du site de Fond Manoël selon une coupe orientée OSO-ENE	25
Illustration 15 : Récapitulatif des mesures électriques (Cf. Annexe 2, spacing = a / levels= n)	30
Illustration 16 : Implantation des profils géophysiques sur le site de Fond Manoël	30
Illustration 17 : Implantation des profils géophysiques sur le site de Fond Manoël	31
Illustration 18 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P1	33
Illustration 19 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P2	35
Illustration 20 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P3	37

Illustration 21 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P4.....	39
Illustration 22 : Modèle conceptuel du site de FondManoël révisé après les investigations géophysiques	43
Illustration 23: Schéma structural interprétatif du site de Fond-Manoël	43
Illustration 24 : Carte de localisation des forages de reconnaissance proposés.....	46
Illustration 25 : Coordonnées des forages de reconnaissance proposés	46

Liste des annexes

Annexe 1 Synthèse des observations de terrain	51
Annexe 2 Principe du panneau électrique	55
Annexe 3 Coordonnées géographiques des panneaux électriques	65
Annexe 4 Paramètres d'inversion utilisés dans Res2DInv	69
Annexe 5 Résultats complets des inversions des panneaux électriques	75



1. Introduction

Le SICSM souhaite diversifier et augmenter les ressources en eau potable disponibles sur son territoire, par l'exploitation des eaux souterraines. A minima, l'objectif du SICSM est de disposer d'une ressource complémentaire mobilisable en situation de crise : étiage sévère pendant le Carême et/ou post catastrophe naturelle (cyclone, séisme).

Le SICSM a ainsi confié au BRGM un programme de reconnaissance des eaux souterraines sur le centre et le sud de la Martinique. Une première phase d'étude, menée fin 2010, a permis d'identifier 20 sites favorables à la recherche d'eaux souterraines (Rapport BRGM-59123-FR, Arnaud et al., 2010).

Les prospections hydrogéologiques de terrain ont débutées début 2011 selon une méthodologie adaptée aux aquifères volcaniques et éprouvée par le BRGM depuis plusieurs années en Martinique. Cette dernière se décompose en trois étapes principales :

- reconnaissances géologique et hydrogéologique de terrain ;
- investigations géophysiques par panneau électrique ;
- interprétation générale du site (modèle conceptuel hydrogéologique) et propositions d'implantation de forages de reconnaissance.

Le présent rapport rend compte des prospections hydrogéologiques menées en 2011 sur le site de Fond Manoël au Diamant.



2. Présentation du site d'étude

2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

Le site de Fond Manoël, situé immédiatement après la sortie de la route nationale en direction du Diamant, est traversé par la RD7 (Illustration 1). Son altitude varie entre 5 et 110 m NGM. À l'amont de la RD7, le site est occupé par une carrière en exploitation (plusieurs fronts de taille disséminés) ; tandis qu'à l'aval, le site est en friche (anciennes carrières).



Illustration 1 : Localisation du site de Fond Manoël (IGN)

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les différentes formations géologiques rencontrées sur le bassin versant de Fonds Manoël sont, selon la dénomination des lithologies de la carte géologique au 1/50 000 (Westercamp et al., 1990), et des plus anciennes aux plus récentes (Illustration 2) :

- les coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes (notées pam2c) qui affleurent sur une grande partie du site et qui font l'objet d'une exploitation en carrière. Ces coulées appartiennent à la chaîne volcanique sous-marine du Vauclin-Pitault (phase effusive de Rivière-Pilote). Elles constituent le substratum de la presqu'île des Trois Ilets avec des coulées massives plus ou moins autobrechiques et présentant des degrés d'altération variable. Elles dessinent le relief côtier entre les pointes du Marigot et Pimentée jusqu'au quartier des Coteaux (immédiatement à l'est du site) ;
- les tufs hyaloclastiques et conglomératiques à bois silicifiés (notés Cm2e) appartenant à l'axe Rivière-Salée – Sainte-Luce du volcanisme fissural du sud et sud-ouest martiniquais. Ils correspondent à deux phases explosives de caractère phréatomagmatique. Ils se présentent très généralement sous forme de lahars ou de conglomérats polygéniques. Ils affleurent très localement au nord du site ;
- une brèche pyroclastique à éléments andésitiques (notée Bm2f) qui affleure sur la bordure sud-ouest du site (appareil fissural du Morne Pavillon, ultime phase du volcanisme fissural du sud et du sud-ouest martiniquais). Il s'agit également d'une phase explosive de caractère phréatomagmatique ;
- les coulées d'andésite porphyrique à augite et hypersthène (notées pam2f), issues de l'appareil fissural du Morne Pavillon, affleurant à l'ouest et au sud-est du site. Elles sont très comparables sur le plan pétrographique aux coulées sous-jacentes (pam2c) mais semblent plus altérées. Il s'agit d'andésites sombres porphyriques à mésostase plus ou moins vitreuse englobant des phénocristaux de plagioclase, d'orthopyroxènes, de clinopyroxène, et de minéraux opaques. La majorité de l'édifice du morne Pavillon se présente comme un empilement de coulées de lave massives à enveloppes bréchiques, d'épaisseur décimétrique.

D'un point de vue structural, le secteur est traversé partiellement par deux failles supposées, de direction NE-SW (Illustration 2).

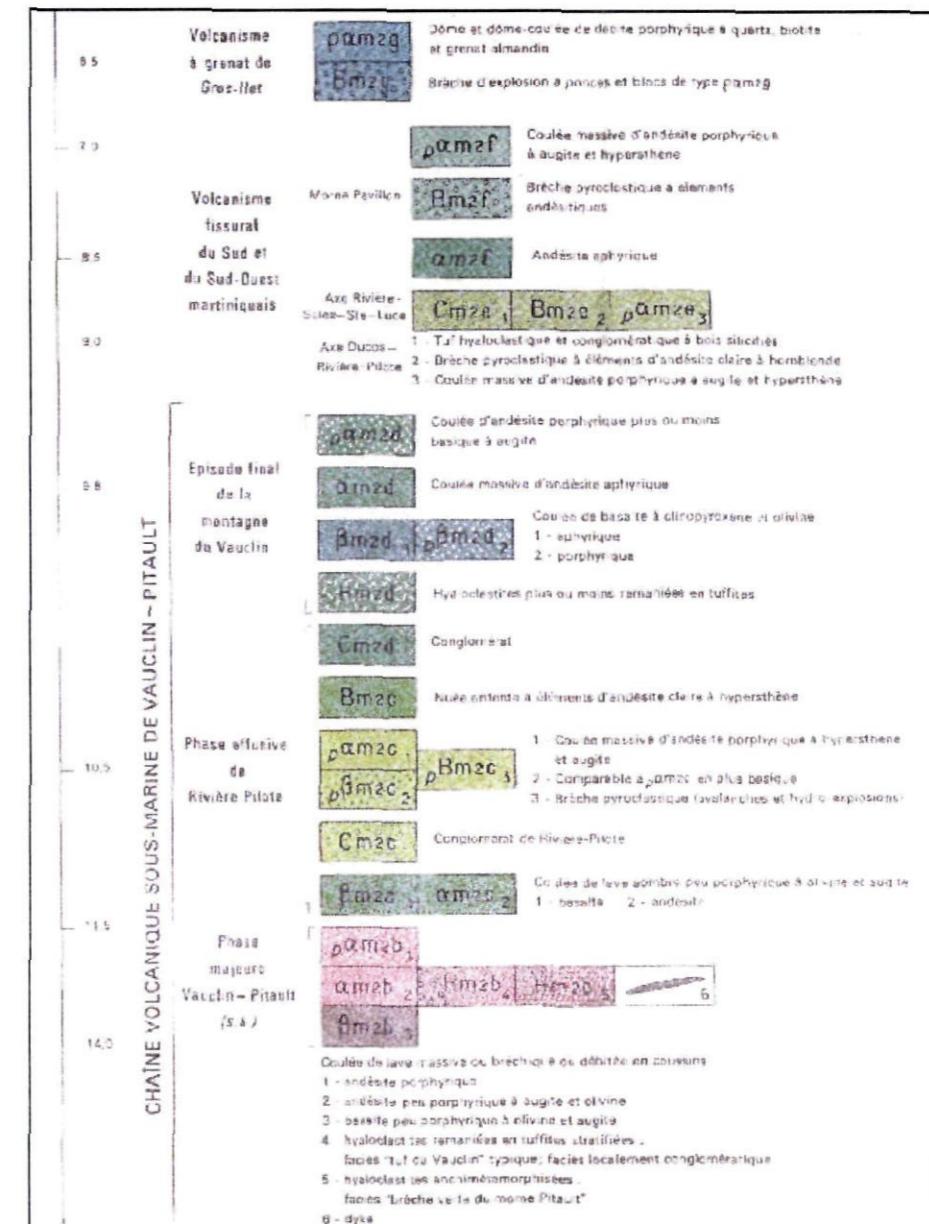
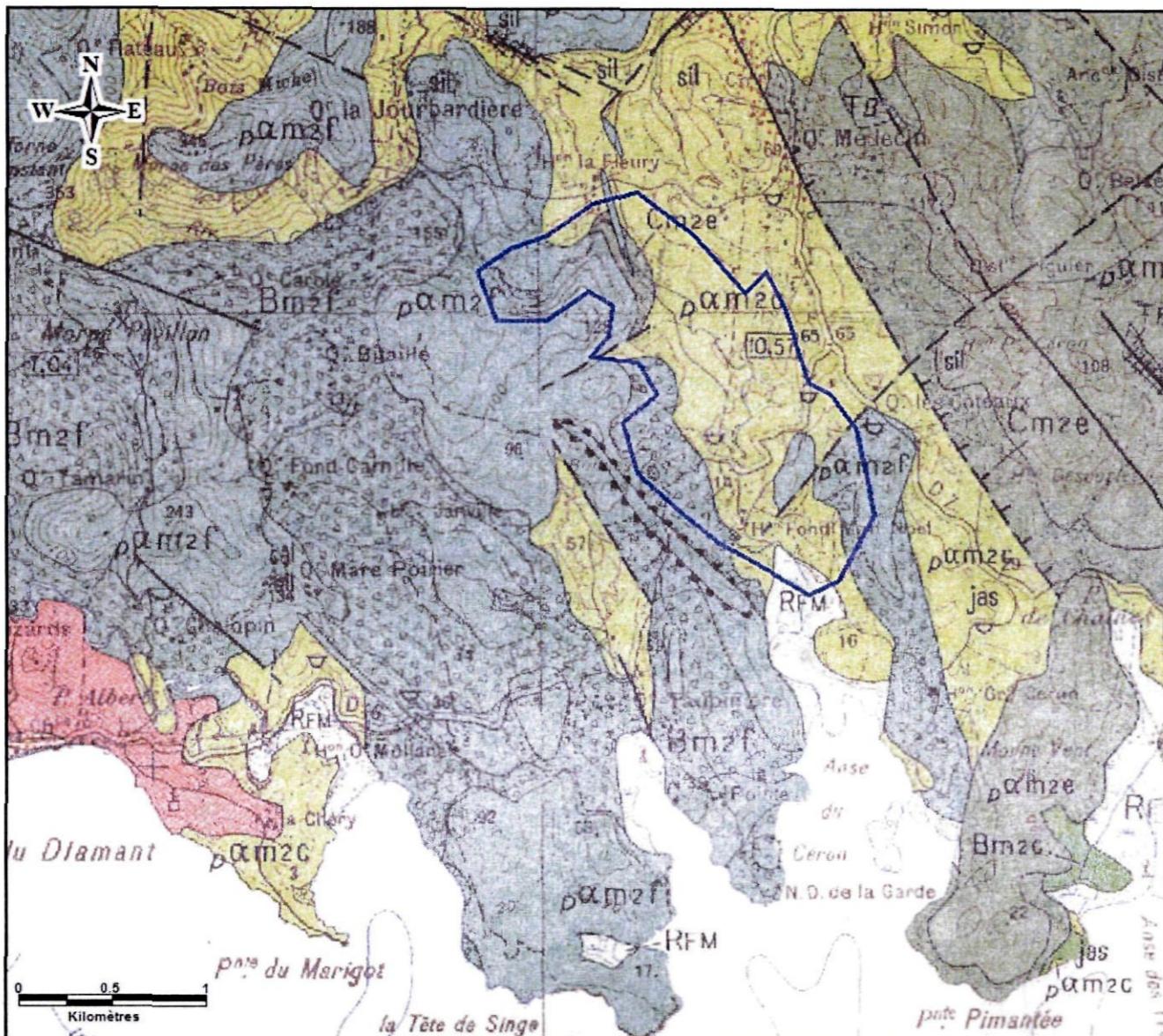


Illustration 2 : Carte géologique au 1/50 000 du site de Fond Manoël (Westercamp et al., 1990)

2.3. PROSPECTIONS ANTÉRIEURES

Aucune prospection hydrogéologique n'a été menée par le passé sur le bassin versant de Fonds Manoël.

Dans la Banque de données sur le Sous-Sol (BSS), gérée par le BRGM, les coupes géologiques de deux sondages géotechniques peu profonds sont disponibles (1185ZZ0117 et 1185ZZ0118, Illustration 4). Des andésites faiblement altérées ont été rencontrées à partir de 3 m de profondeur.



3. Reconnaissances géologique et hydrogéologique de terrain

3.1. ITINÉRAIRE PARCOURU ET STATIONS D'OBSERVATION

La reconnaissance de terrain a été menée le 19 janvier 2011. Les conditions d'accès du site étaient bonnes avec, en particulier, les pistes d'exploitation de la carrière. La totalité du site a ainsi pu être visitée.

La géologie et l'hydrogéologie du secteur ainsi que la configuration du terrain (relief, végétation) ont été appréhendés à partir de 16 stations d'observation.

L'itinéraire parcouru et les stations d'observation sont reportés sur l'illustration 3.

La minute de terrain, où sont consignées toutes les observations faites sur site, est reportée en Annexe 1.

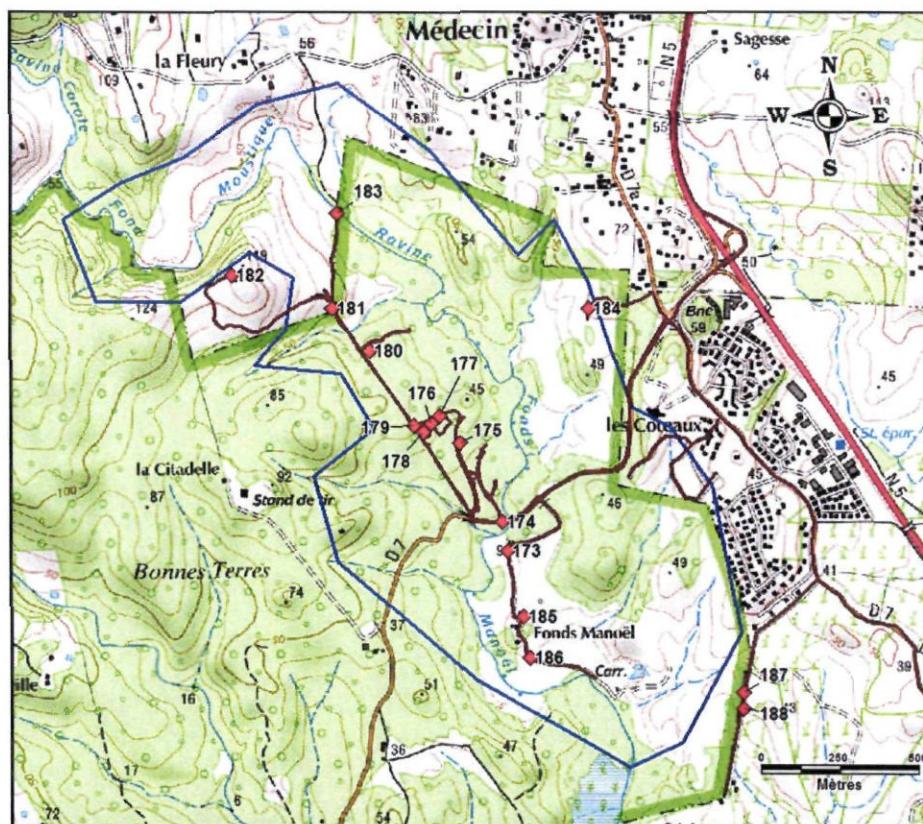


Illustration 3 : Carte de l'itinéraire parcouru (en marron) et des stations d'observation (en rouge)

3.2. OBSERVATIONS GÉOLOGIQUES

Les différentes formations lithologiques rencontrées à l'affleurement sur le site d'étude sont reportées sur la carte de l'illustration 4. Elles sont présentées ci-après, des plus anciennes aux plus récentes. Pour chacune des stations d'observation, une description plus détaillée de l'affleurement est proposé en Annexe 1 (minute terrain).

Aucun indice permettant de valider la présence des failles indiquées sur la carte géologique n'a été observé sur le terrain.

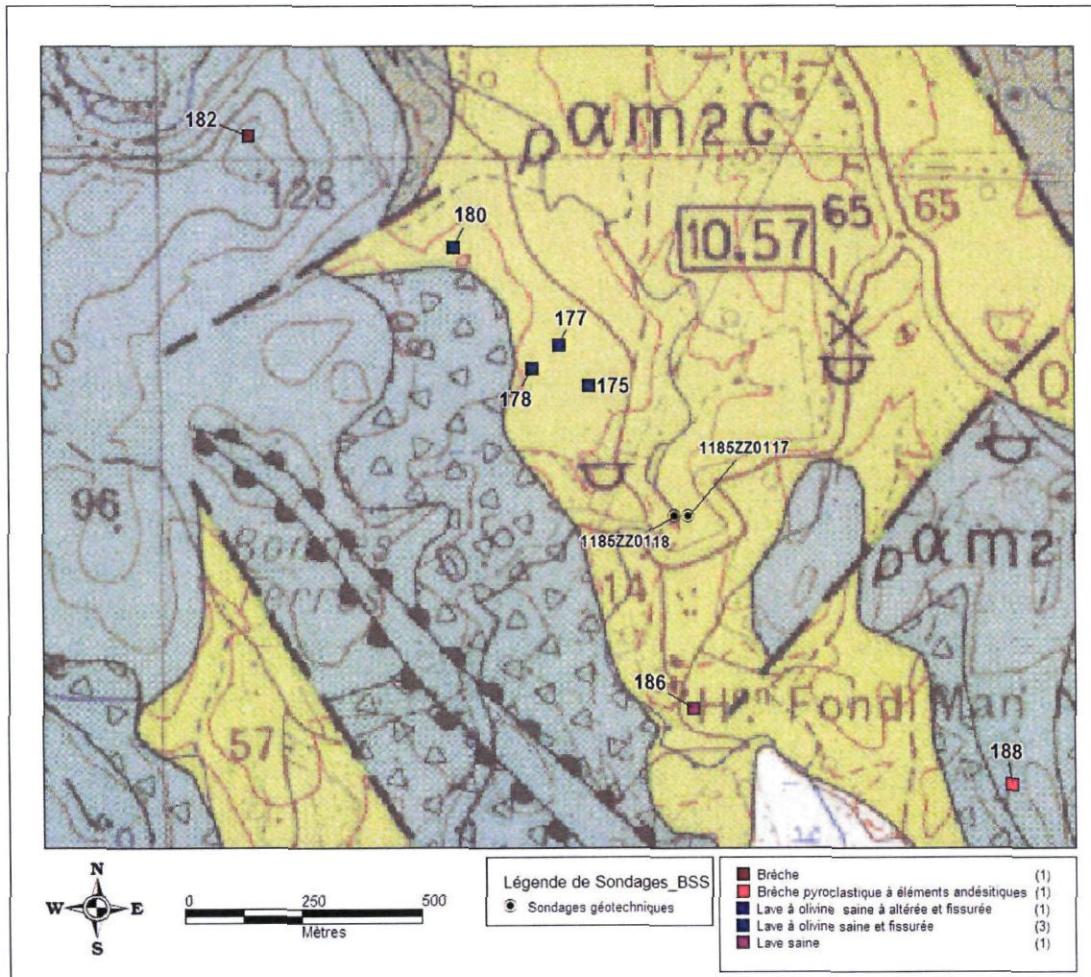


Illustration 4 : Carte des affleurements observés

3.2.1. Les coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes (notées pam2c)

Les andésites pam2c ont été observées à l'affleurement en plusieurs points, notamment au niveau des différents fronts de taille présents sur l'amont du site (stations n° 175, 177, 178 et 179). Elles affleurent sur la grande majorité du site (Illustration 4).

Les affleurements rencontrés montrent une lave porphyrique de teinte sombre (couleur grise à noire), saine et fissurée, principalement constituées de minéraux ferromagnésiens plus ou moins oxydés, de minéraux blancs opaques et de minéraux vert olive (probablement de l'olivine altérée) (Illustration 5). À l'exception de la station la plus aval (n° 186) pour laquelle aucun minéral vert n'a été observé.



Illustration 5 : Echantillons de lave récupérés sur les stations n°175 (à gauche) et n°186 (à droite)

Sur chacun de ces points d'observation, les laves sont apparues globalement peu altérées, avec l'absence d'un profil d'altération développé. Ceci est bien visible au niveau du front de taille de la station n°175 où la lave saine affleure directement sous un sol peu épais (Illustration 6). L'absence d'une frange d'altération superficielle semble également être confirmée à l'aval du site (station n°186) où plusieurs affleurements sont visibles au droit de la trace menant à une ancienne carrière.

Localement, des horizons intercalés plus altérés ont cependant été observées, par exemple sur le front de taille de la station n° 178, avec un horizon altéré de couleur rouge à lie de vin (Illustration 7). Parmi les différents affleurements étudiés, il s'agissait de l'état d'altération le plus avancé.

La fissuration des andésites est marquée à très marquée. Au niveau des fronts de taille des stations n° 175 et 177, la lave se débite en plaques et plaquettes (Illustration 8). Sur les deux autres fronts de taille du secteur (stations n° 178 et 180), la fissuration de la roche reste très marquée mais ne présente pas de débit particulier (Illustration 9).



Illustration 6 : Lave massive observée au niveau du front de taille de la station n° 175. On peut noter l'absence d'un profil d'altération significatif



Illustration 7 : Lave localement altérée observée sur la station n°178

Ces laves massives se sont mises en place par coulées successives. Ce phénomène est très bien illustré au niveau d'un des fronts de taille (station n° 175, Illustration 10). Les observations faites ne permettent cependant pas d'appréhender l'épaisseur des coulées (*métrique a minima*).



Illustration 8 : Débit en plaques et plaquettes de la lave observée sur les stations n°175 et 177



Illustration 9 : Lave fissurée observée au niveau des fronts de taille des stations n°178 et 180



Illustration 10 : Coulées de lave successives sur le front de taille de la station n°175

3.2.2. La brèche pyroclastique à éléments andésitiques (notée Bm2f)

Un affleurement caractéristique de la brèche pyroclastique Bm2f a été observé au sud du site, tout le long de la route menant à la décharge du Diamant (station n° 188, Illustration 4).

Il s'agit d'une brèche pyroclastique indurée, non classée, monogénique, constituée de blocs sombres, anguleux, massifs, de taille moyenne décimétrique, emballés dans une matrice claire, cendro-caillouteuse de même nature (Illustration 11).



Illustration 11 : Brèche pyroclastique Bm2f observée sur la station n°188

3.3. OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

Lors de la visite de terrain, la ravine Fond Manoël présentait un très faible écoulement (station n° 183, Illustration 12).

Compte tenu des précipitations ayant précédé la reconnaissance de terrain, aucune mesure de la conductivité n'a été réalisée (absence de représentativité dans les conditions de l'écoulement).

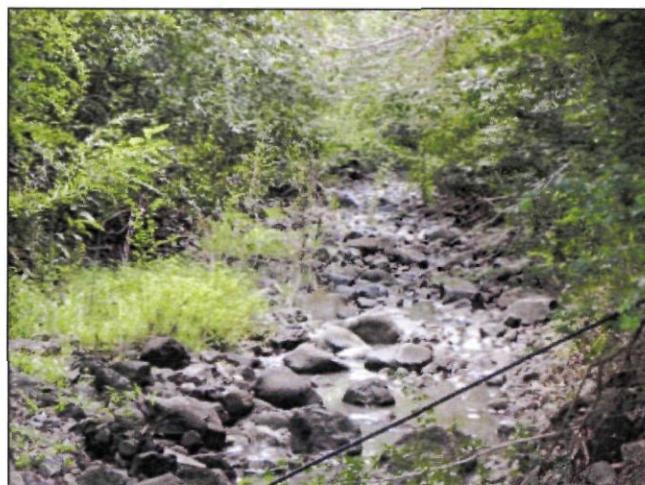


Illustration 12 : Ravine Fonds Manoël sur l'amont du site d'étude (station n° 183)

3.4. MODÈLE CONCEPTUEL PRÉLIMINAIRE

Le modèle conceptuel du site de Fonds Manoël a été établi à la suite de l'interprétation de la carte géologique et des nouvelles informations acquises lors des investigations de terrain. Les Illustration 13 et Illustration 14 présentent des schémas du modèle conceptuel retenu selon deux coupes : respectivement orientées NO-SE (coupe longitudinale) et ENE-OSO (coupe transversale).

Les principales caractéristiques relatives à sa structure et son fonctionnement sont présentées ci-dessous :

- l'aquifère ciblé par la présente reconnaissance hydrogéologique est l'aquifère des andésites pam2c. Cette formation devrait être aquifère, compte-tenu de sa porosité de fissure et d'éventuels horizons perméables associés aux intercoulées. Elle constitue le substratum de la presqu'île des Trois Ilets ;
- les andésites se seraient en effet mises en place par coulées successives superposées, avec une durée variable entre chaque épisode et des processus

d'altérations variables en conséquence. La superposition de ces coulées a été très bien observées sur le terrain ;

- au regard des observations de terrain, l'altération superficielle des andésites est peu prononcée. Les coulées massives affleurent directement sous la frange de sol ;
- le degré de fissuration/fracturation des andésites est hétérogène, probablement due à la superposition de nombreuses coulées plus ou moins altérées et plus ou moins fissurées/fracturées (Illustrations 8 à 10) ;
- l'épaisseur des andésites fissurées restent à préciser par les investigations géophysiques ;
- au droit de la ravine Fonds Manoël, les andésites sont recouvertes d'une faible épaisseur d'alluvions. Leur faible épaisseur et extension ne leur confère *a priori* aucun rôle significatif dans le système hydrogéologique étudié ;
- les écoulements de la nappe suivent probablement la topographie avec un axe majeur d'écoulement N-S. Le bassin d'alimentation pourrait correspondre au bassin versant topographique, sous réserve de l'absence de limites étanches (faille et/ou coulées imbriquées indépendantes).

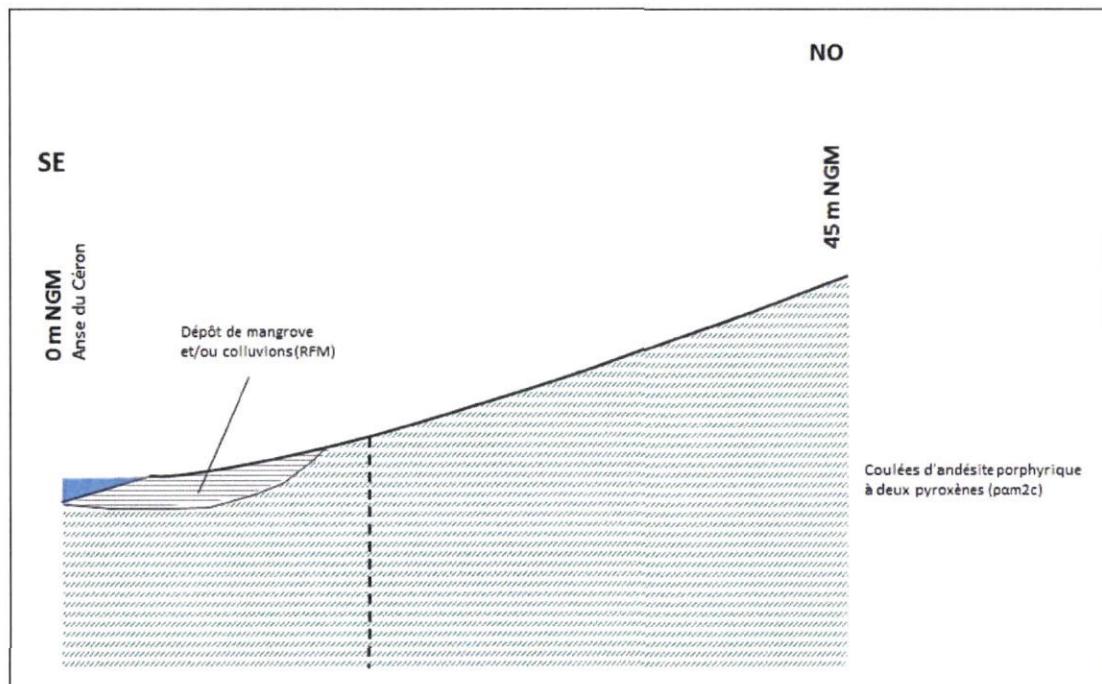


Illustration 13 : Modèle conceptuel du site de Fond Manoël selon une coupe orientée SE-NO

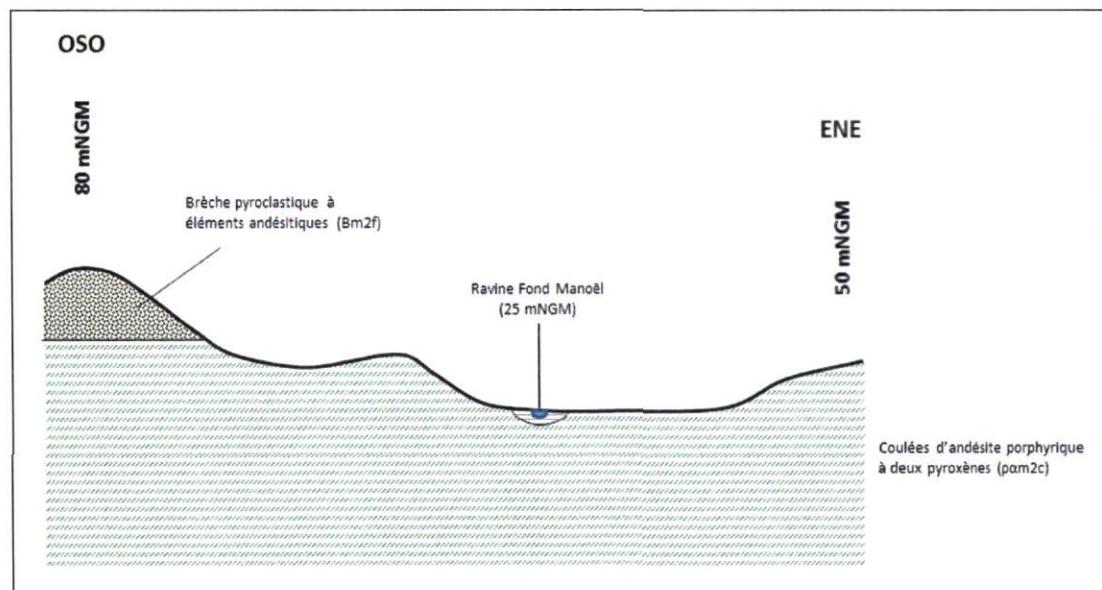


Illustration 14 : Modèle conceptuel du site de Fond Manoël selon une coupe orientée OSO-ENE



4. Investigations géophysiques

4.1. ACQUISITIONS GÉOPHYSIQUES

4.1.1. Objectifs

Les reconnaissances géologiques et hydrogéologiques entreprises sur le site de Fond Manoël ont permis d'acquérir de nouvelles données et de proposer un modèle conceptuel préliminaire du fonctionnement hydrogéologique du site. L'apport de la géophysique sur ces sites a donc pour objectifs :

- de déterminer les propriétés électriques et les épaisseurs des formations géologiques présentes dans le secteur et observées à l'affleurement ;
- de définir au mieux leur extension latérale ;
- de préciser la tectonique locale ;
- de proposer, en accord avec les résultats et en concertation avec les hydrogéologues, des sites pour l'implantation des forages de reconnaissance.

Ces résultats permettront de mettre à jour le modèle conceptuel hydrogéologique du site. Le principe méthodologique du panneau électrique est décrit en détail en Annexe 2.

4.1.2. Équipement

Panneau électrique (PE)

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 12 flûtes de 8 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 mètres sur 950m (pour un dispositif élémentaire). L'énergie provenait d'une batterie externe. 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 pour les grands dispositifs. Le matériel utilisé comprend :

- 1 Syscal Pro
- 12 flûtes de 8 traces
- 96 électrodes
- 96 cordons
- 3 massettes
- 4 clés de portages
- 1 transporteur à chenilles

- 2 batteries de voiture 70 Ah
- 10 connecteurs de flûtes
- Câbles divers

En comptant la subsistance et les machettes, c'est quelques 660 kg de matériel déplacés quotidiennement à trois personnes dans des terrains gras, très escarpés et sous des conditions météorologiques tropicales.

Topographie

Les panneaux électriques (électrodes 1 à 48 et 96, parfois plus) ont été positionnés au GPS (système WGS84, UTM zone 20N). La précision du positionnement varie de +/- 2m à +/- 5m en fonction de la couverture végétale et du relief. Ces coordonnées ont ensuite été converties en Fort Desaix (UTM zone 20N). L'ensemble de ces données est fourni en Annexe 3.

Les levés altimétriques ont été effectués sur chaque profil avec un télémètre laser muni d'une fonction inclinométrique (TruPulse 200). Le pas de mesure est d'environ 10 m. En relatif, la précision sur les altitudes est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. Par contre, en absolu, la précision est estimée à quelques mètres tout en restant inférieure à 5 m car l'altitude des bases de référence topographique a été interpolée à partir des courbes de niveau de la carte IGN au 1/25 000. Ce procédé évite des calages de bases longs et fastidieux en zone isolée tout en donnant une précision en adéquation avec les objectifs.

4.1.3. Configurations d'acquisition des PE

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 temps d'acquisition. La mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet, dans un contexte géologique complexe, de mieux appréhender la géométrie des différentes formations en présence.

Durant cette prospection, deux configurations d'acquisition ont été mises en œuvre lors de la réalisation des panneaux électriques : un dispositif dipôle-dipôle pour la résolution des terrains de surface ainsi qu'un dispositif Wenner-Schlumberger pour la profondeur.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Il est moins sensible aux effets latéraux (coulées parallèles au profil, ravines ou crêtes parallèles au profil) que le dispositif Wenner-Schlumberger. Par contre, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation, dans le cas présent, est réduite à quelques dizaines de mètres.

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

4.1.4. Inversions des pseudosections

Après filtrage des données de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré, celles-ci sont ensuite inversées avec le logiciel Res2DInv (Loke & Barker 1996). Afin de prendre en compte les morphologies acérées rencontrées, les profils de topographie sont inclus lors des inversions de chaque panneau électrique.

La section de résistivité « vraie » (3^{ème} image des figures présentées en Annexe 2), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation géologique. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie et profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion ont été choisis (Annexe 4) de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information géologique « *a priori* ».

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

4.1.5. Localisation des panneaux électriques

L'implantation des profils s'appuie sur le modèle conceptuel hydrogéologique, mais doit aussi prendre en compte les contraintes d'accessibilité. Par faute d'autorisation, le site n'a pu être investiguée au sud de la route RD7.

En définitive, quatre panneaux électriques ont été implantés (Illustration 16). Les différents fronts de taille représenteront des points de calage.

D'importantes opérations de layonnage ont été nécessaires.

Les coordonnées GPS des panneaux électriques (système WSG84 UTM zone 20N et Fort Desaix) sont présentées en Annexe 3. Toutes les cartes sont présentées dans le

système de référence locale Fort Desaix. La conversion entre les deux grilles peut s'effectuer au moyen de la formule simple suivante :

$$X_{\text{UTM}} (\text{m}) = X_{\text{FortDesaix}} (\text{m}) + 386 (\text{m})$$

$$Y_{\text{UTM}} (\text{m}) = Y_{\text{FortDesaix}} (\text{m}) + 169 (\text{m})$$

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques des 4 panneaux réalisés.

Panneau électrique	Longueur au sol (m)	Configuration d'acquisition	Spacing (levels)	Nb mesures exploitables	Profondeur d'investigation max atteinte (m)
FM_P1	710	Dipôle-dipôle	10 m (7)	1294	125
		Wenner-Schlumberger		1037	145
FM_P2	790	Dipôle-dipôle	20 m (7)	1384	85
		Wenner-Schlumberger		1172	80
FM_P3	550	Dipôle-dipôle	50 m (5)	675	85
		Wenner-Schlumberger		596	80
FM_P4	470	Dipôle-dipôle	70 m (5)	758	120
		Wenner-Schlumberger		539	135

Illustration 15 : Récapitulatif des mesures électriques (Cf. Annexe 2, spacing = a / levels= n)

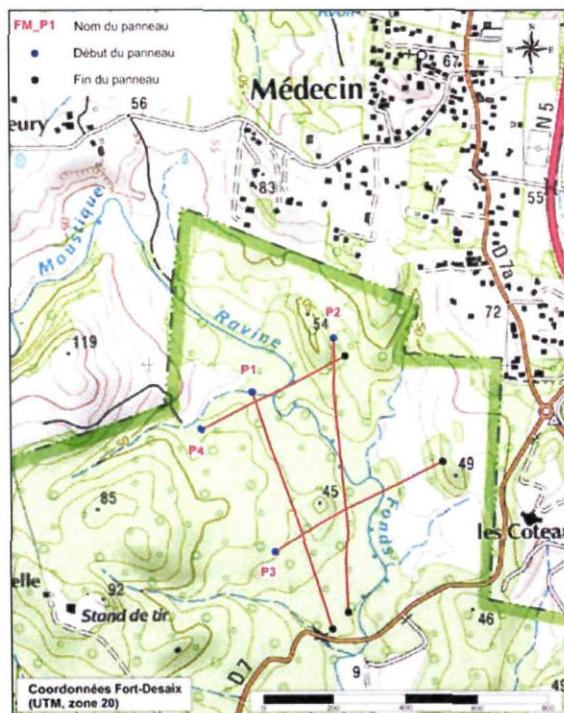


Illustration 16 : Implantation des profils géophysiques sur le site de Fond Manoël

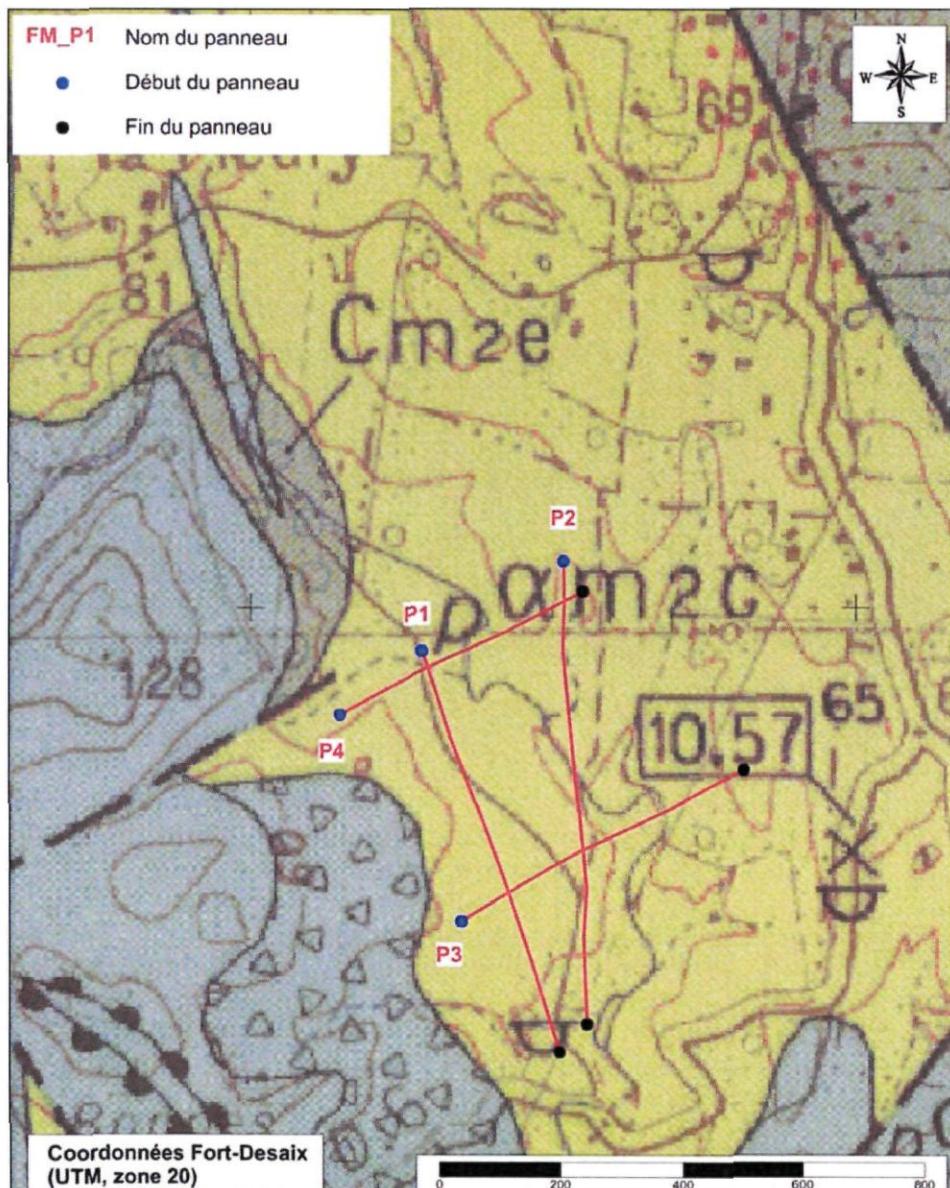


Illustration 17 : Implantation des profils géophysiques sur le site de Fond Manoël

4.2. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Compte tenu de la gamme de résistivité (4-70 $\Omega\cdot\text{m}$) observée, la catégorisation retenue pour chaque panneau électrique sera la suivante :

- Résistivité > 8 $\Omega\cdot\text{m}$: terrains résistants
- Résistivité < 8 $\Omega\cdot\text{m}$: terrains conducteurs

4.2.1. FM_P1

Le panneau électrique FM_P1 (Illustration 16 et Illustration 17), de direction NNW-SSE, est implanté pratiquement dans l'axe de la ravine Fond-Manoël. Il intersecte les panneaux FM_P4 au Nord (abscisse 35m) et FM_P3 au Sud (abscisse 435m).

La carte géologique montre que ce panneau électrique est exclusivement implanté sur les andésites porphyriques à deux pyroxènes $\text{pam}2c$, substratum de la presqu'île des Trois-Îlets.

La coupe inversée du dipôle-dipôle présente une meilleures résolution que les 2 autres, c'est donc elle qui servira de base à l'interprétation (Illustration 18).

Les horizons géoélectriques observés sur FM_P1 sont les suivants, de haut en bas (Illustration 18) :

- Un premier terrain résistant R0 est présent en position sub-affleurante sur l'extrême SSE de la coupe, entre les abscisses 535 et 710 m. Son épaisseur est relativement réduite, inférieure à une vingtaine de mètres. Cet horizon correspondrait d'après la carte géologique et les observations de terrain à une coulée massive fracturée et fissurée d'andésite $\text{pam}2c$ qui fait d'ailleurs l'objet d'une exploitation en carrière en quelques points du site. Les carrières rencontrées sur le terrain ne sont pas forcément caractérisées par une signature résistante (station n°175 à l'abscisse 480 m et station n°177 vers 380 m) probablement du fait de la trop faible épaisseur de lave saine (les premiers mètres ne sont pas considérés sur les coupes de résistivité).
- Un premier terrain conducteur C0 est sub-affleurant entre les abscisses 120 et 535 m. Il se trouve sous l'horizon R0 au SSE de l'abscisse 535 m. Son épaisseur réelle qui ne peut être estimée que dans la zone où il est sous-jacent à R0 serait de l'ordre de 20 à 25 m. Compte tenu des informations apportées par la carte géologique et de l'expérience géophysique acquise sur les coulées d'andésite, cet horizon conducteur devrait correspondre à l'enveloppe bréchique très altérée/argilisée (donc très conductrice) d'une coulée massive sous-jacente d'andésite $\text{pam}2c$.

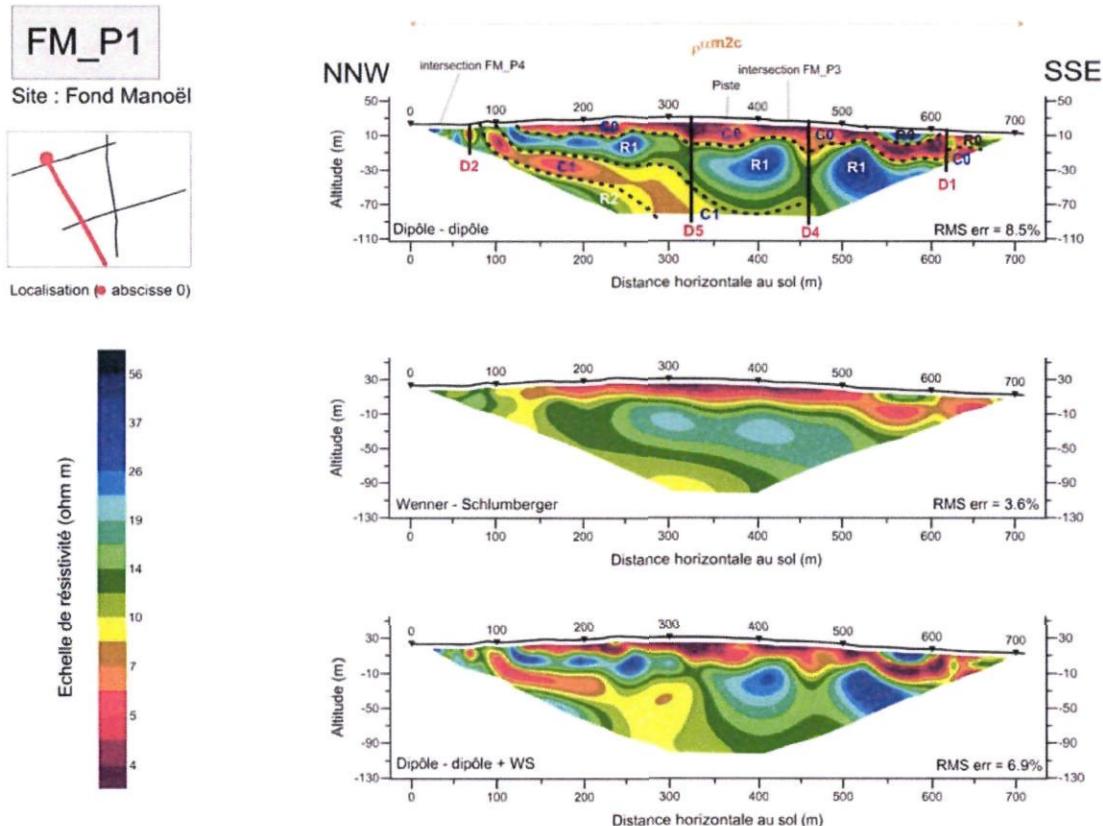


Illustration 18 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P1

- Un deuxième terrain résistant R1 est en position sub-affleurante entre les abscisses 95 et 120 m et plonge ensuite vers le SSE. Son épaisseur qui n'est que d'une vingtaine de mètres dans le secteur où il est sub-affleurant augmente vers le SSE et atteint une valeur de l'ordre de 70 m à l'extrémité de la coupe. À ce niveau, le mur de cet horizon serait à environ 100 m de profondeur. Ce terrain résistant serait attribué à la partie massive fracturée et fissurée d'une deuxième coulée de lave andésitique plus ancienne que celle exploitée en carrière.
- Un deuxième terrain conducteur C1 affleure entre les abscisses 80 et 95 m et plonge ensuite vers le SSE. La profondeur d'investigation (110 m) du panneau FM_P1 ne permet pas de caractériser cet horizon au-delà de l'abscisse 460 m. Son épaisseur, relativement bien exprimée dans la zone NNW (entre les abscisses 80 et 250 m), serait de l'ordre de 20 à 30 m.
D'après la notice explicative de la carte géologique, plusieurs coulées de lave andésitique se seraient épanchées sur la presqu'île de Trois-Îlets lors de la phase effusive de Rivière Pilote. En conséquence, le deuxième horizon conducteur C1 pourrait correspondre à l'enveloppe bréchique altérée/argilisée d'une troisième coulée d'andésite massive *pam2c*.

- Un troisième terrain résistant R2 est supposé mais il est très mal caractérisé car mis en évidence seulement sur la bordure NNW de la coupe. Il s'agirait de la partie massive fracturée/fissurée du troisième épanchement de lave andésitique.

Les points particuliers de ce panneau électrique sont les suivants :

- Mise en évidence d'un empilement de 3 épisodes d'épanchement de lave andésitique $\rho_{\text{cm}^2\text{c}}$.
- Mise en évidence de 4 discontinuités, D2, D5, D4 et D1, correspondant probablement à des failles.

Les failles D5, D4 et D1 semblent avoir un jeu décrochant, les compartiments SSE étant successivement effondrés ce qui pourrait expliquer en partie le plongement des différents horizons vers le SSE.

4.2.2. FM_P2

Le panneau électrique FM_P2 (Illustration 16 et Illustration 17), de direction N-S, est également subparallèle à l'axe de la ravine Fond-Manoël. Il intersecte les panneaux FM_P4 au Nord (abscisse 70 m) et FM_P3 (abscisse 505 m).

La coupe inversée du dipôle-dipôle présente une meilleure résolution que les 2 autres, c'est donc elle qui servira de base à l'interprétation en termes de géologie et de structurale (Illustration 19).

Les horizons géoélectriques observés sur FM_P2 sont les suivants de haut en bas (Illustration 19) :

- Un premier horizon R0 est sub-affleurant de façon discontinue sur l'ensemble de la coupe (entre les abscisses 0 et 215 m, puis entre 440 et 620 m et enfin entre 685 et 790 m). Son épaisseur est de l'ordre de 20 à 30 m. Entre les abscisses 525 et 570 m, où il est sous-jacent à l'horizon conducteur C0, il présenterait son épaisseur réelle qui ne serait que d'une vingtaine de mètres. Il correspond à la partie massive fissurée/fracturée de la première coulée (la plus récente) d'andésite $\rho_{\text{cm}^2\text{c}}$. C'est probablement cette coulée qui fait l'objet d'une exploitation en carrière.
- Un premier horizon conducteur C0 est mis en évidence, en position sub-affleurante, sur une très faible distance entre les abscisses 525 et 570 m. Il serait attribuable à un reliquat de l'enveloppe bréchique très altérée de la première coulée d'andésite massive (R0).

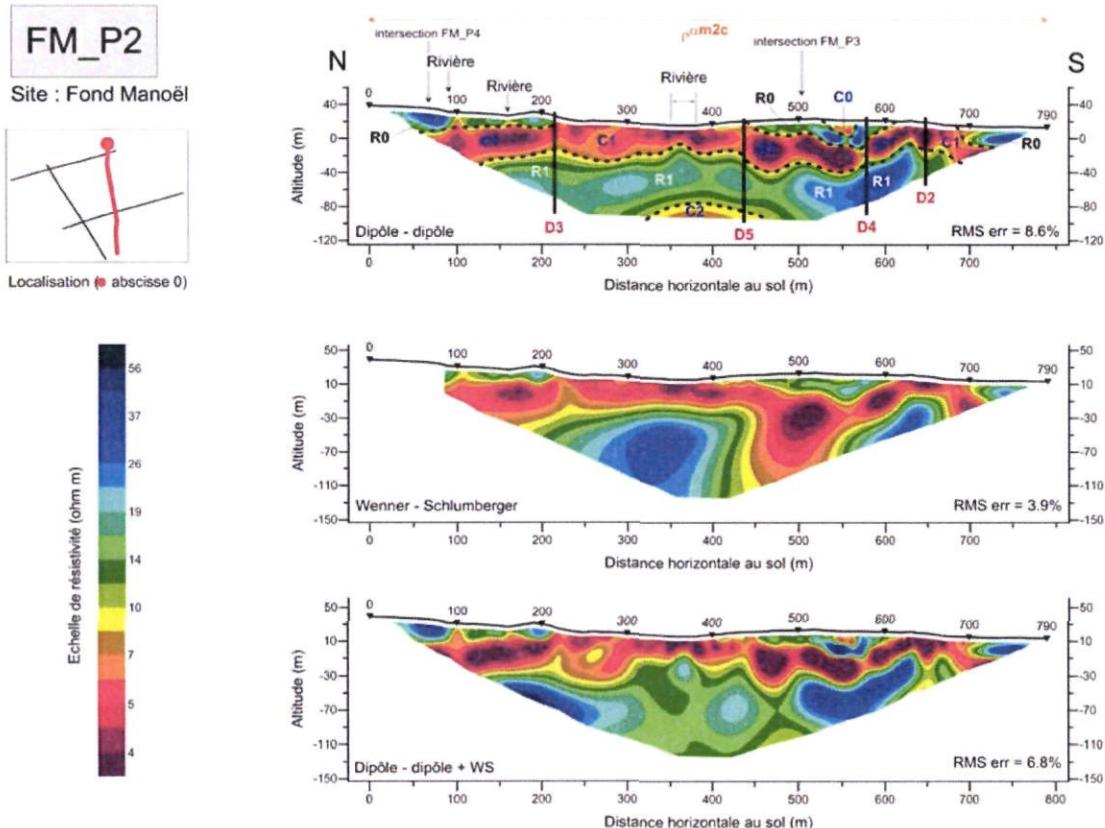


Illustration 19 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P2

- Un deuxième horizon conducteur C1 est présent sur l'ensemble de la coupe. Il est en position sub-affleurante entre les abscisses 625 et 685 m. Son épaisseur est de l'ordre de 30 à 40 m. La base de cet horizon présente une figure de paléovallée entre les discontinuités D5 et D2. La largeur (210 m) et surtout l'amplitude (15 à 20 m) de cette paléo-vallée ne sont pas très importantes. D'après le schéma géologique développé au niveau de FM_P1, cet horizon conducteur correspondrait à la frange d'altération/argilisation de la deuxième coulée d'andésite.
- Un deuxième terrain résistant R1 est présent en profondeur sur toute la coupe. Son épaisseur ne peut être estimée que dans la partie centrale de la coupe où elle serait de l'ordre de 70 à 80 m. L'allure générale de cet horizon, notamment dans la zone située au N de la discontinuité D4, correspond à une « structure anticlinale ». Toujours d'après le schéma géologique développé au niveau de FM_P1, cet horizon résistant correspondrait à la partie massive fracturée/fissurée de la deuxième coulée d'andésite.
- Un dernier terrain conducteur C2 est mis en évidence seulement dans la partie centrale de la coupe (abscisses 320-490 m). La caractérisation géométrique de

cet horizon se résume à une estimation de la profondeur de son toit qui serait de l'ordre de 90 à 100 m. Il pourrait être assimilé comme sur FM_P1 (horizon C1) à la frange altérée/argilisée de la coulée massive d'andésite appartenant au troisième épisode d'épanchement de ces coulées d'andésite.

Les points particuliers de ce panneau électrique sont les suivants :

- Confirmation de la présence sur le secteur d'étude d'un empilement de 3 épisodes d'épanchements de laves andésitiques appartenant à la phase effusive de Rivière-Pilote. À une profondeur d'investigation de 120 m, seul le toit du troisième épisode (le plus ancien) a été atteint.
- Mise en évidence d'un éventuel remplissage d'une petite paléovallée par les 2 épisodes les plus récents d'épanchement de laves andésitiques.
- Mise en évidence de quatre discontinuités D3, D5, D4 et D2. Ces discontinuités correspondent à des failles et cette hypothèse est confortée par les intersections de D2, D4 et D5 par le panneau FM_P1 qui confèrent à la faille D2 une orientation NW-SE, direction régionale bien représentée sur la carte géologique et pour les failles D5 et D4 une orientation SW-NE (failles conjuguées) que l'on retrouve également sur la carte géologique au niveau de ce secteur d'étude. À ce stade, la direction de la faille D3 reste indéterminée.

4.2.3. FM_P3

Le panneau électrique FM_P3 (Illustration 16 et Illustration 17), de direction SW-NE, est implanté perpendiculairement à l'axe de la ravine Fond-Manoël. Il intersecte les panneaux FM_P1 (abscisse 90 m) et FM_P2 (abscisse 235 m).

D'après la carte géologique, ce panneau électrique ne concerne que les andésites p_{am}2c.

Contrairement aux 2 premières coupes inversées (FM_P1 et FM_P2), cette fois-ci c'est le dispositif Wenner-Schlumberger qui semble avoir la meilleure résolution. C'est donc sur la base de cette coupe que sera menée l'interprétation en termes de géologie et de structurale (Illustration 20).

Les horizons géoélectriques observés sur FM_P3 sont les suivants de haut en bas (Illustration 20) :

- Un premier terrain résistant R0 est présent de façon discontinue sur l'ensemble de la coupe. Il est mis en évidence entre les abscisses 0-315 m puis entre 350-380 m. Sur ces 2 secteurs, il est en position sub-affleurante. Son épaisseur maximale, enregistrée au niveau du contact de la discontinuité D2, est de l'ordre de 25 m. Cet horizon résistant correspondrait à la partie massive fracturée/fissurée de la première coulée d'andésite p_{am}2c mise en évidence sur FM_P1 et FM_P2. C'est cette formation qui ferait l'objet d'une exploitation en carrière comme en témoignent les 2 fronts de taille observés sur le terrain (station n°177 vers l'abscisse 80 m et station n° 178 au début du profil).

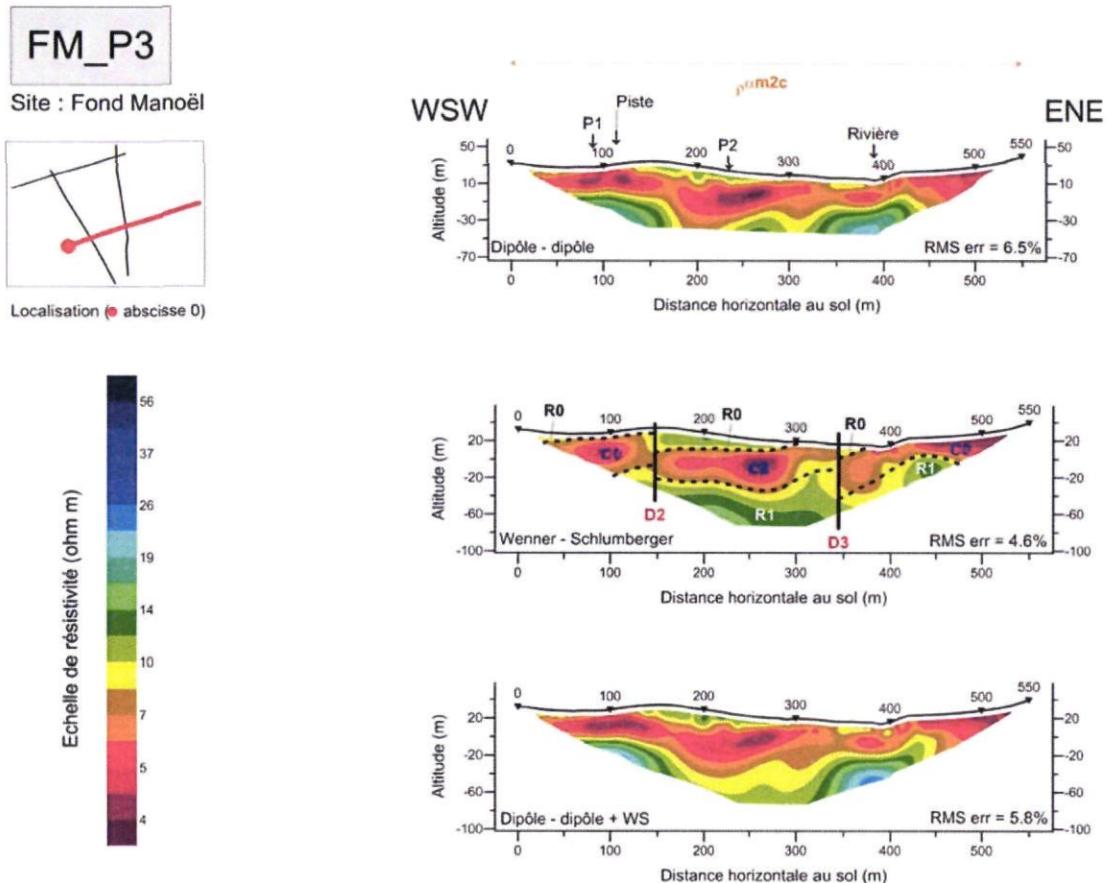


Illustration 20 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P3

- Un premier terrain conducteur C0 est présent sur l'ensemble de la coupe. Il est en position sub-affleurante entre les abscisses 315 et 350 m et entre 380 et 550 m. Son épaisseur relativement constante est de l'ordre de 35 à 40 m. Il est attribué à l'enveloppe bréchique très altérée/argilisée de la deuxième coulée massive d'andésite p_{am}2c.
- Un dernier terrain résistant R1 n'est que très partiellement caractérisé du fait de la faible profondeur d'investigation (90 m) de ce panneau électrique (la profondeur d'investigation est en effet proportionnelle à la longueur du panneau). Son épaisseur peut toutefois être estimée à plus de 50 m. La profondeur du toit de cet horizon varie de 20 m à l'extrême NE de la coupe à 50 m sur le reste de la coupe. Il correspondrait à la partie massive de la deuxième coulée d'andésite p_{am}2c.

Les points particuliers de ce panneau électrique sont les suivants :

- Seuls les 2 épisodes les plus récents d'épanchement de lave andésitique appartenant à la phase effusive de Rivière-Pilote ont été mis en évidence. La

faible profondeur d'investigation de ce panneau n'a pas permis d'atteindre le troisième épisode.

- Mise en évidence de 2 discontinuités, D2 et D3, pouvant être assimilées à des failles. La direction NW-SE de la faille D2 déjà mise en évidence sur les panneaux FM_P1 et FM_P2 est confirmée. La faille D3 déjà intersectée sur le panneau FM_P2 aurait donc elle aussi une direction NW-SE. Ces 2 failles semblent avoir un jeu décrochant, les compartiments ENE étant successivement effondrés. Les rejets verticaux générés par ces failles sont assez conséquents : 20 m pour D2 et de l'ordre de 30 m pour D3.

4.2.4. FM_P4

Le panneau électrique FM_P4 (Illustration 16 et Illustration 17), de direction SW-NE, est implanté parallèlement à FM_P3 et donc perpendiculairement à l'axe de la ravine Fond-Manoël. Il intersecte les panneaux FM_P1 (abscisse 165m) et FM_P2 (abscisse 440m). D'après la carte géologique, ce panneau électrique ne concerne que les andésites p_{am2c}.

Comme pour FM_P3, c'est le dispositif Wenner-Schlumberger qui semble avoir la meilleure résolution et c'est donc sur la base de cette coupe que sera menée l'interprétation en termes de géologie et de structurale (Illustration 21).

Les horizons géoélectriques observés sur FM_P4 sont les suivants de haut en bas (Illustration 21) :

- Un premier terrain résistant R0 est mis en évidence de façon discontinue sur l'ensemble de la coupe. Il est présent entre les abscisses 55-180 m, puis entre 265-315 m et enfin entre 350-470 m. Sur ces 3 tronçons il est en position sub-affleurante. Son épaisseur maximale enregistrée à l'extrémité ENE de la coupe est de l'ordre d'une trentaine de mètres. Cet horizon résistant correspondrait à la partie massive fracturée/fissurée de la coulée d'andésite la plus récente.
- Un premier terrain conducteur C0 n'a été mis en évidence qu'entre les abscisses 155 et 180 m et qui est en position sub-affleurante entre les abscisses 0-55 m, 180-265 m et 315-355 m. Son épaisseur réelle, qui peut être estimée dans le compartiment D1-D2 et dans le compartiment situé au NE de la discontinuité D3, est de l'ordre de 30 m. Cet horizon est attribué à l'enveloppe bréchique très altérée/argilisée de la deuxième coulée massive d'andésite.
- Un deuxième terrain résistant R1 a été mis en évidence dans le compartiment D2-D3. Son épaisseur varie de 30 à 50 m mais comme la profondeur d'investigation ne dépasse pas 75 m, le mur de cet horizon qui se situe à peu près à la même profondeur est assez mal caractérisé. L'estimation de l'épaisseur de R1 n'est donc qu'indicative. Cet horizon, compte tenu des résultats obtenus sur les autres panneaux, correspondrait à la partie massive de la deuxième coulée d'andésite.

- La présence d'un substratum conducteur C1 est soupçonnée dans le compartiment D2-D3. Il s'agirait du toit de l'enveloppe bréchique très altérée/argilisée de la 3^e coulée massive d'andésite. Ce toit se situerait à une profondeur de l'ordre de 60 à 70 m.

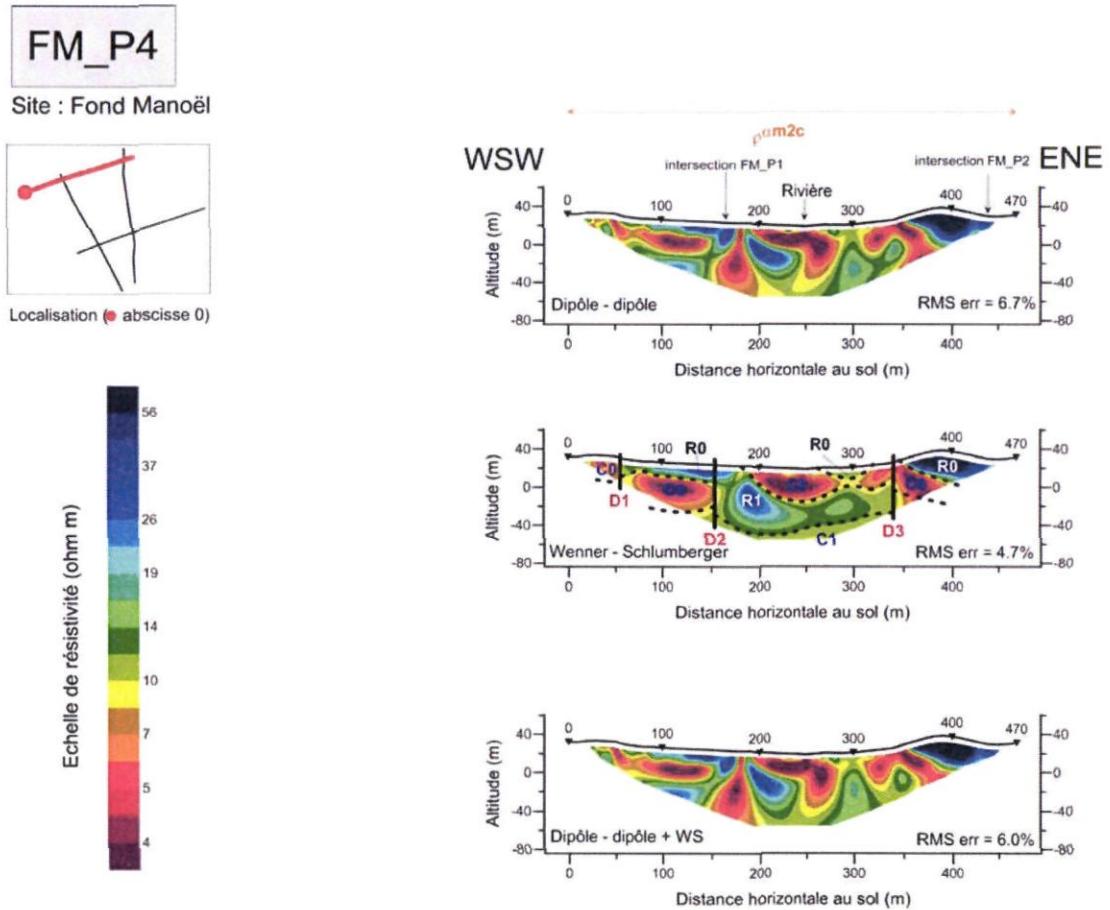


Illustration 21 : Coupes de résistivité du panneau électrique FM_P4

5. Interprétation générale et recommandations

5.1. INTERPRÉTATION GÉNÉRALE

Les 4 panneaux électriques réalisés sur le secteur de Fond Manoël ont permis de mieux appréhender la nature et la géométrie des différentes coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes $\text{pxm}2\text{c}$.

- D'après la carte géologique et les reconnaissances de terrain effectuées dans le cadre de cette étude, seule la formation des andésites $\text{pxm}2\text{c}$ serait concernée par les investigations géophysiques. En partant de cette hypothèse l'interprétation des panneaux électriques montre que sur ce secteur nous serions en présence d'au moins 3 épisodes d'épanchement des laves andésitiques $\text{pxm}2\text{c}$.
 - L'épisode le plus récent serait représenté par des reliquats consécutifs au jeu de l'érosion de la partie massive fracturée/fissurée d'une coulée de lave andésitique. Les témoins de cette coulée font ponctuellement l'objet d'une exploitation en carrière. Son épaisseur relativement réduite ($<30\text{m}$), son extension discontinue et sa position sub-affleurante font que cette coulée ne présente pas de potentiel hydrogéologique.
 - L'épisode intermédiaire est caractérisé par un doublet d'horizons géoélectriques, l'un conducteur et l'autre résistant. Cette signature géophysique est interprétée de la façon suivante :
 - la partie supérieure de la coulée est représentée par un horizon conducteur (résistivité $< 8 \Omega.\text{m}$) dont l'épaisseur est de l'ordre de 30 à 40 m. Il correspondrait à l'enveloppe bréchique altérée/argilisée d'une coulée massive sous-jacente ;
 - la partie inférieure de la coulée est caractérisée par un horizon résistant. Sa résistivité est comprise entre 8 et 70 $\Omega.\text{m}$. Son épaisseur semble variable : elle ne serait que d'une vingtaine de mètres sur la bordure NW du secteur (FM_P1) et atteindrait 70-80 m dans l'axe de la ravine Fond-Manoël (FM_P2). Cet horizon résistant correspondrait donc à la partie massive fracturée/fissurée de la coulée d'andésite et constitue la principale cible hydrogéologique du secteur.
 - L'épisode le plus ancien est également caractérisé par le même doublet d'horizons géoélectriques : l'un conducteur et l'autre résistant. La signature géophysique serait identique à celle du précédent. Par contre la géométrie de cette coulée n'est que partiellement résolue du fait d'une profondeur d'investigation insuffisante. Le toit de la partie massive

de cette coulée n'a été atteint que sur l'extrémité NNW du panneau FM_P1 et ce à une profondeur de l'ordre de 80 m.

- D'un point de vue géomorphologique, un seul indice d'une présence de paléo-vallée a été mis en évidence sur l'extrémité Sud du panneau FM_P2. Les caractéristiques de cette paléo-vallée seraient les suivantes : une largeur de l'ordre de 200 m et une amplitude de 15 à 20 m. On peut éventuellement deviner cette paléo-vallée sur FM_P1, centrée en abscisse 570 m. Il est cependant délicat de valider cette hypothèse car nous sommes en bordure du panneau. Si elle est avérée, cette paléo-vallée pourrait constituer un drain hydrogéologique potentiellement intéressant.
- L'interprétation des panneaux électriques ne permet pas d'identifier clairement la direction et l'orientation des coulées. Certains indices comme le fait que sur les panneaux orientés NE-SW (FM_P3 et FM_P4) le dispositif Wenner-Schlumberger offre la meilleure résolution laisserait supposer que la direction des coulées serait NE-SW. Ceci est en accord avec la direction générale associée à la phase effusive de Rivière Pilote. Même si des coulées orientées N-S ne peuvent être exclues (continuité des horizons électriques sur P1 et P2), c'est l'hypothèse que nous retiendrons à ce stade de l'étude.
- D'un point de vue structural, 3 failles D1, D2 et D3 de direction NW-SE ont été mises en évidence. Avec les failles de direction identique indiquées sur la carte géologique sur la bordure NE du secteur d'étude, c'est un véritable couloir de fracturation qui traverse la zone d'étude. La mise en place de la ravine Fond Manoël semble d'ailleurs être contrôlée non pas par la direction des coulées mais plus certainement par cette direction structurale.
Ces failles ne semblent pas être accompagnées d'anomalies conductrices caractérisant une argilisation importante de la zone faillée. Cela reste à confirmer par les forages de reconnaissance, mais les failles pourraient ainsi jouer un rôle de drain vis-à-vis des écoulements souterrains.
Deux failles conjuguées, D4 et D5, de direction NE-SW ont également été mises en évidence dans la partie aval de la zone d'étude. Une faille de direction identique est indiquée sur la carte géologique dans la partie amont du secteur. Comme les précédentes, ces failles ne sont pas marquées par des anomalies conductrices et pourraient donc également avoir un rôle drainant.

Le schéma structural de l'illustration 23 et le modèle conceptuel de l'illustration 22 résument cette interprétation.

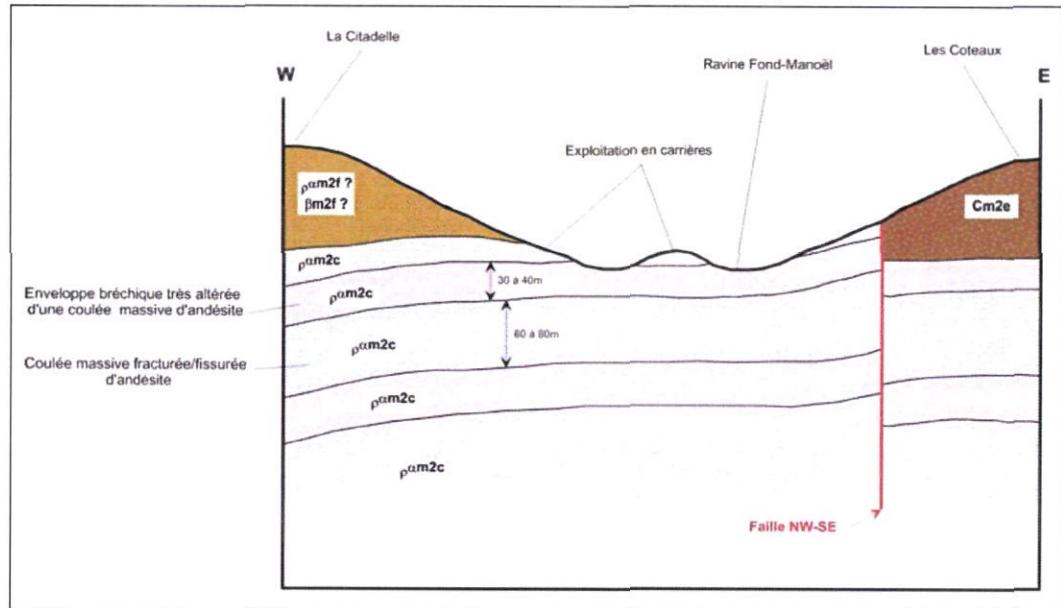


Illustration 22 : Modèle conceptuel du site de FondManoël révisé après les investigations géophysiques

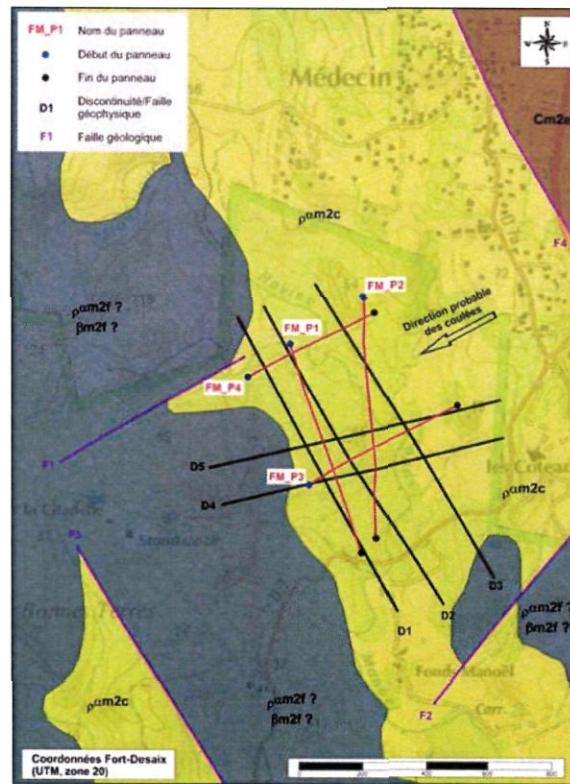


Illustration 23: Schéma structural interprétatif du site de Fond-Manoël

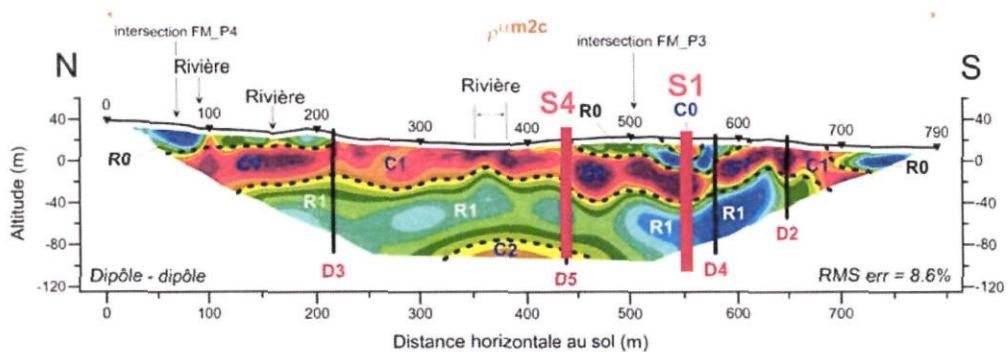
5.2. ZONES POTENTIELLEMENT FAVORABLES À L'IMPLANTATION D'OUVRAGES DE RECONNAISSANCE

La cible hydrogéologique sur cette zone est représentée, d'une part, par les coulées d'andésites massives fracturées/fissurées $\rho_{\text{cm}2c}$, et plus particulièrement l'épanchement intermédiaire mis en évidence par les investigations géophysiques, et, d'autre part, par les horizons éventuellement perméables associés aux inter-coulées.

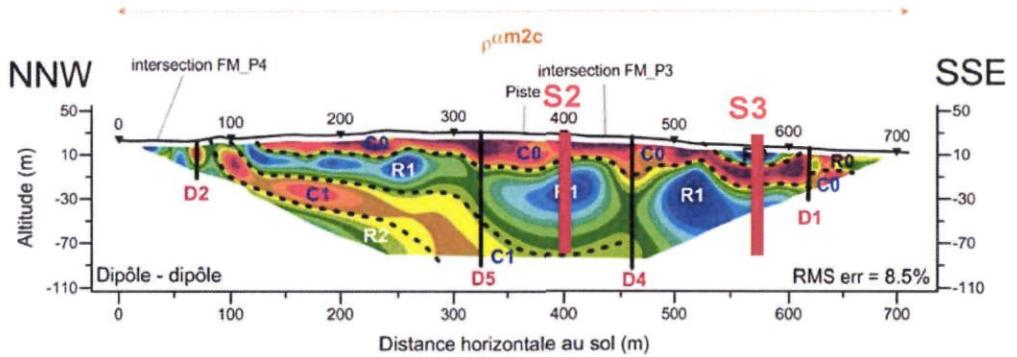
Les reliquats de l'épisode le plus récent ne constituent pas un aquifère potentiel compte tenu de la faible épaisseur de l'horizon sain.

Sur la base de l'interprétation présentée au paragraphe suivant, trois secteurs potentiellement intéressants pour l'implantation d'ouvrages de reconnaissances ont été identifiés. Ils concernent tous la partie aval du site qui, malgré l'incertitude sur les sens d'écoulement des coulées d'andésite, concerne *a priori* l'aval des coulées épanchées :

- **S1** : situé sur le panneau FM_P2 (abscisse 550 m). Il est implanté dans l'axe de la petite paléo-vallée discutée précédemment. L'objectif de ce sondage de reconnaissance est de recouper en totalité la coulée massive d'andésite de l'épisode le plus récent (R0, 20 m d'épaisseur) et celle de l'épisode intermédiaire (R1, 50 à 60 m d'épaisseur) ainsi que les inter-coulées. Ce forage devra donc atteindre une profondeur d'au moins 120 m.



- **S2** : situé sur le panneau FM_P1 (abscisse 400 m). Son objectif est de reconnaître la coulée de lave massive intermédiaire, au cœur du compartiment D4-D5. La profondeur minimale de l'ouvrage devra être de 110 m.



- **S3** : situé également sur le panneau FM_P1 (abscisse 570 m). L'objectif de ce sondage est de reconnaître la coulée de lave massive intermédiaire (R1) au Sud de la faille présumée D4. Dans le but de recouper la totalité de la partie massive et le mur de l'épisode précédent, la profondeur visée est de l'ordre de 100 m. Il est possible que la coulée visée soit celle testée par S1 plus à l'amont (remplissage d'une paléo-vallée orienté NE-SW). Son implantation sera donc fortement dépendante des résultats obtenus sur S1.
- **S4** : en dernière option, il est proposé de tester la productivité d'une zone faillée, à savoir la faille D5 mise en évidence sur le panneau FM_P2 en abscisse 440 m. une profondeur d'investigation de l'ordre de 110 m est également attendue.

Il est important de noter qu'au regard des profondeurs d'investigation visées et de la proximité de la mer, un risque d'intrusion d'eaux salines ne peut être écartés.

Ces propositions pourront bien entendu être ajustées, en concertation avec le SICSM, au regard des informations apportées par le premier forage de reconnaissance mis en oeuvre (logs géologiques, venues d'eau, rôle hydraulique des failles, intrusion d'eaux salines, etc.).

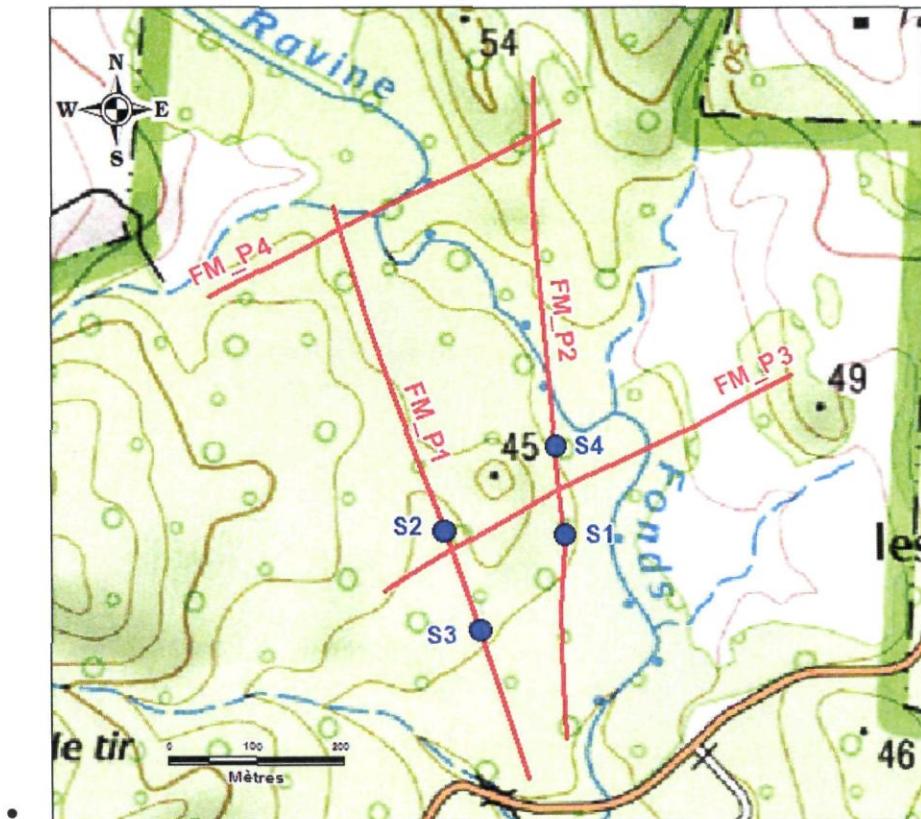


Illustration 24 : Carte de localisation des forages de reconnaissance proposés

Sondage	Parcelle cadastrale	X _{Fort Desaix} (m)	Y _{Fort Desaix} (m)	Z (m NGM)	Profondeur estimée (m)
S1	206C10106	716 557	1 603 541	22	120
S2	206C10106	716 416	1 603 547	28	110
S3	206C10106	716 456	1 603 432	22	100
S4	206C10106	716 546	1 603 647	19	110

Illustration 25 : Coordonnées des forages de reconnaissance proposés

6. Conclusion

Les reconnaissances géologique et hydrogéologique ainsi que les investigations géophysiques menées sur le site Fond Manoël ont permis de clairement identifier les coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes (pam2c) comme cible hydrogéologique.

Sa mise en place s'est faite par coulées successives. D'un point de vue hydrogéologique, les zones d'intérêt correspondent aux parties saines et fracturées/fissurées et aux éventuels horizons perméables associés aux inter-coulées.

Les acquisitions géophysiques mettent plus précisément en évidence trois grands épisodes d'épanchement. Les coulées d'andésite liées à l'épisode intermédiaire présentent le plus grand intérêt hydrogéologique, notamment en termes d'épaisseur et de profondeur.

Ces trois épanchements sont caractérisés par le même doublet d'horizons géoélectriques : un conducteur superficiel et résistant sous-jacent. Le premier est interprété comme l'enveloppe bréchique altérée/argilisée d'une coulée de lave saine sous-jacente, marquée par une résistivité plus élevée.

Ainsi, quatre secteurs favorables à l'implantation de forages de reconnaissance ont été identifiés avec des profondeurs d'investigation comprises entre 100 et 120 m de profondeur.

Dans le cas du Diamant, compte tenu de la proximité de la mer, de la faible altimétrie du secteur et des profondeurs importantes des forages de reconnaissance, le risque d'une intrusion d'eaux salines ne peut être écarté. Une attention toute particulière devra donc être portée sur ce point lors de la réalisation des sondages.

En concertation avec le SICSM, les propositions d'implantation pourront être modifiées en fonction des éléments de réponse apportés par le(s) premier(s) forages de reconnaissance (logs géologiques, venues d'eau, rôle des failles, intrusion d'eaux salines, etc.). Il est rappelé que le SICSM prévoit, en moyenne, la réalisation de 3 ouvrages de reconnaissance par site.



7. Références bibliographiques

Arnaud L., de Bechillon M., Wiart N. (2010). Sélection de 20 sites favorables à la recherche d'eau souterraine et répondant aux besoins du SICSM, Rapport BRGM/RP-59123-FR, 106 p., 13 ill., 3 ann.

Loke M. H. et Barker R.D (1996) : Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* (44), p.131-152.

Westercamp D., Pelletier B., Thibault P.A. et Trainneau H. (1990) – Carte géologique de la France (1 / 50 000), feuille Martinique, BRGM. Notice explicative par W.D., Andreieff P., Bouysse P., Cottez S. et Battistini R., 1989



Annexe 1

Synthèse des observations de terrain

Observations géologiques

MARK	X	Y	Z	TEINTE	COULEUR	DURETE	STRUCTURE	PHENOCRISTAUX	DESCRIPTION
175				Sombre	Gris à noir	1	Porphyrique	Minéraux ferromagnésiens oxydés (<25%), minéraux ferromagnésiens non altérés (<25%), minéraux vert olive (25%) et minéraux blancs opaques (25%)	Lave massive peu altérée avec un profil d'altération très peu développé, fissurée (débit en plaques et plaquettes) à localement très fissurée, à minéraux verts (olivine ?) et noirs
	716837	1603645	34					Minéraux noirs brillants, minéraux ferromagnésiens oxydés, minéraux blancs brillants et mats, minéraux vert olive (olivine ?)	Lave massive peu altérée et fissurée (débit en plaques). Pas de profil d'altération. Un horizon peu épais altéré (patine blanche visible sur 178)
177				Sombre	Lie de vin	2	Porphyrique		Lave massive peu altérée, avec un horizon intercalé plus altéré (rouge à lie de vin) et de possibles circulations d'eau (oxydation variable et localisée). Profil d'altération très peu développé (lave massive affleurante)
	716773	1603729	33						
178				Sombre	Gris à noir et lie de vin	1	Porphyrique	minéraux verts olive	Lave massive peu altérée (pas de profil d'altération) à minéraux verts
	716719	1603680	41						
180				Sombre	Gris à noir	1	Porphyrique	idem 175	Brèche à blocs anguleux (pluri-centimétrique à pluri-décimétrique) et à matrice grise à rouge
	716553	1603934	45						
182				Sombre	Gris à Rouge				Lave massive à feldspath (minéraux blancs très clairs) et pyroxènes, sans minéraux verts
	716122	1604170	116						
186				Sombre	Gris à noir	1	Porphyrique	Minéraux blancs (80%), minéraux ferromagnésiens (20%)	Brèche à matrice beige indurée et à blocs noirs anguleux (centimétrique à pluri-décimétrique)
	717055	1602967	15						
188				Claire	Beige				
	717724	1602806	34						

MARK	FISSURATION	DENOMINATION	CARTE_GEOLOGIQUE	CODE_FORMATION	PUISANCE	EXTENSION	TYPE AFFLEUREMENT	PHOTO	ECHANTILLON
175	Très marquée localement (débit en plaquettes)	Lave à olivine saine et fissurée	coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes	pam2c	1 à 3 m	Environ 20 m	Front de taille	Oui	Oui
177	Marquée (débit en plaques)	Lave à olivine saine à altérée et fissurée	coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes	pam2c	1 à 2 m	Environ 15 m	Front de taille	Oui	Oui
178	Marquée (pas de réel débit en plaquettes)	Lave à olivine saine et fissurée	coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes	pam2c	0.5 à 2 m	environ 20 m	Front de taille	Oui	Non
180	Marquée (pas de réel débit en plaquettes)	Lave à olivine saine et fissurée	coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes	pam2c	4 à 5 m	Environ 30 m	Front de taille	Oui	Non
182		Brèche	coulées d'andésite porphyrique à augite et hypersthène	pam2f	5 m	10 m	Sommet de morne	Oui	Non
186	non visible à l'affleurement (au sol)	Lave saine	coulées d'andésite porphyrique à deux pyroxènes	pam2c	NA	sur toute la p. sol		Oui	Oui
188		Brèche pyroclastique à éléments andésitiques	brèche pyroclastique à éléments andésitiques	Bm2f	1 à 2 m	50 m	talus bord de route	Oui	Non



Annexe 2

Principe du panneau électrique



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

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

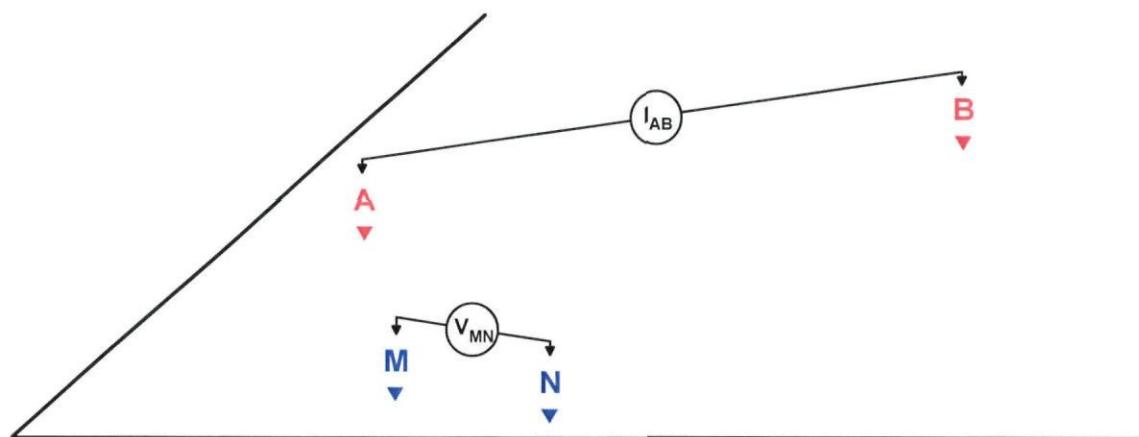


Figure 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu

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

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

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

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

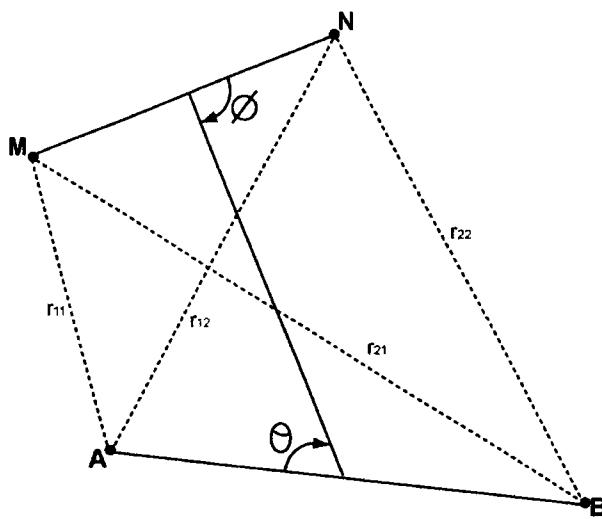


Figure 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant,

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.

Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant

électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant).

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

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

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

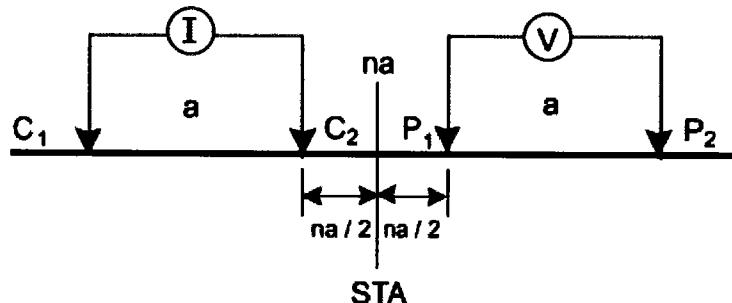


Figure 3 : Configuration dipôle-dipôle

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

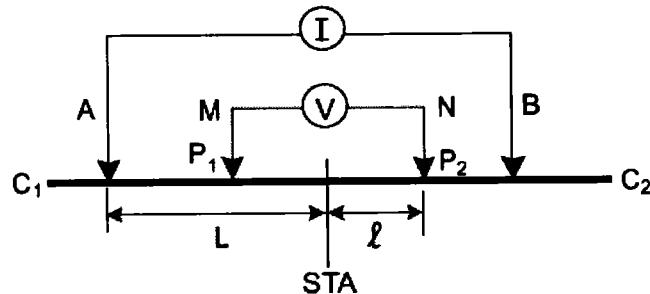


Figure 4 : Configuration de Schlumberger

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

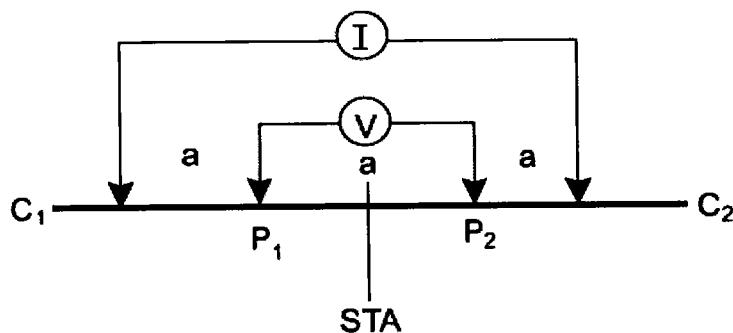


Figure 5 : Configuration de Wenner

Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisque apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (figure 6).

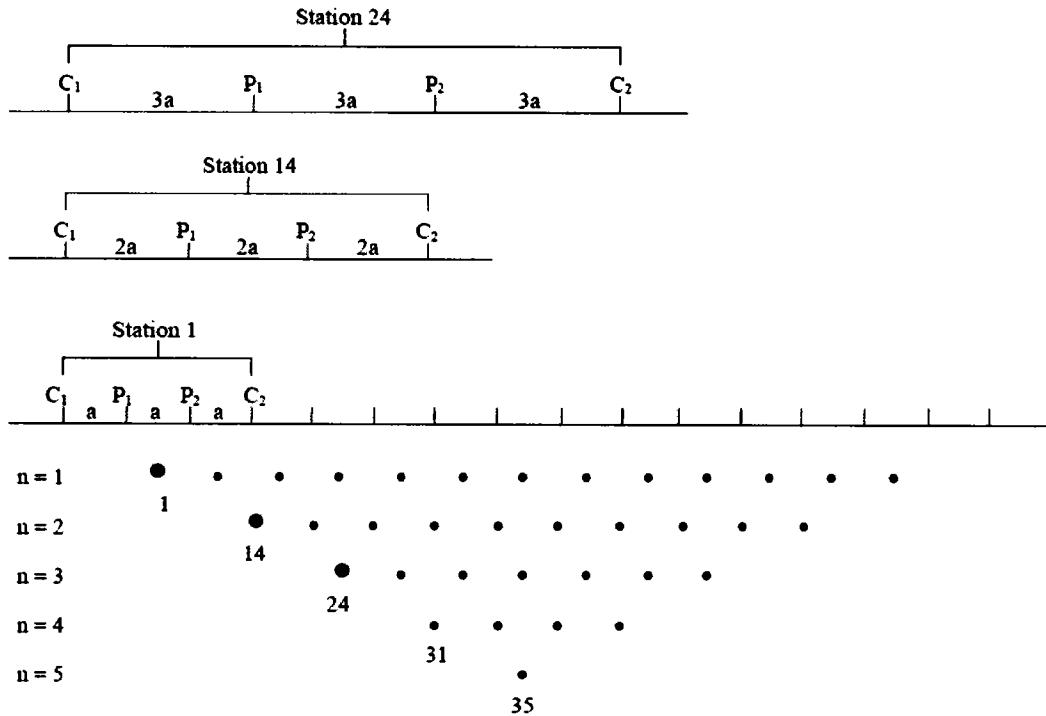


Figure 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

Traitement et inversion des données

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

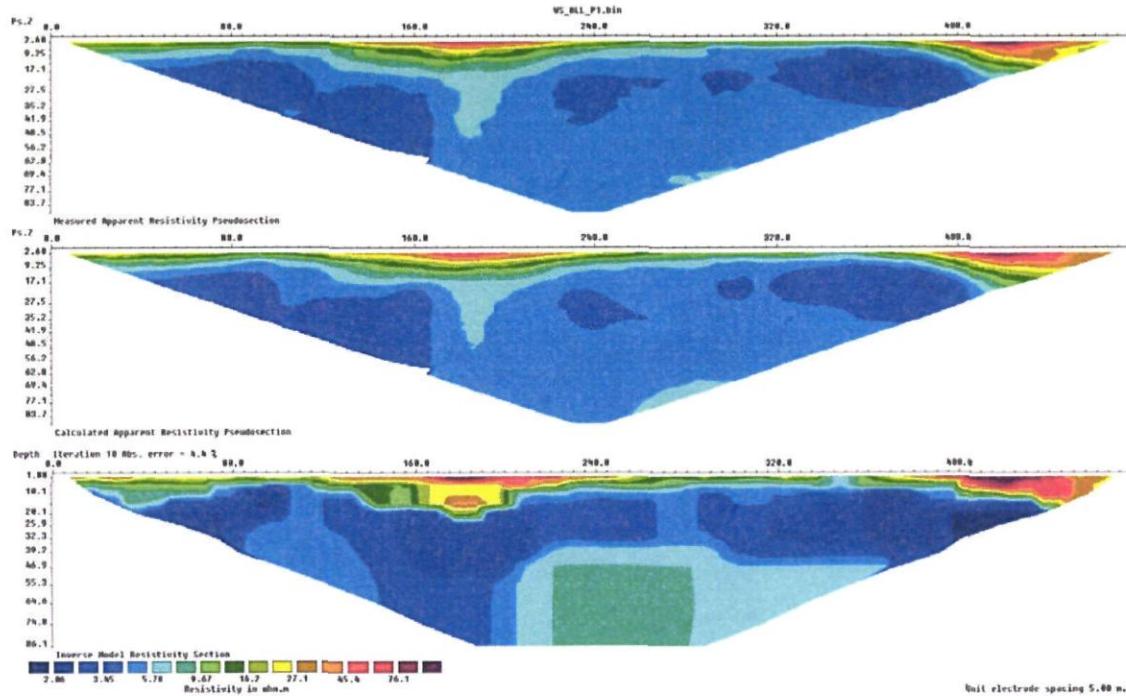


Figure 7 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

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

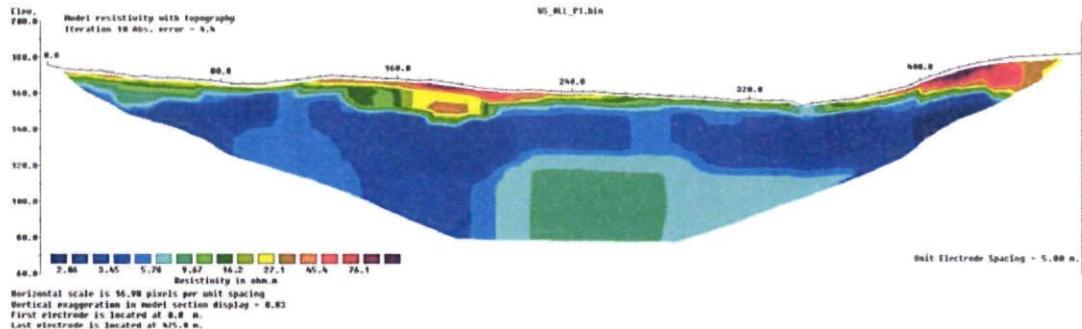


Figure 8 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.

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

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

Annexe 3

Coordonnées géographiques des panneaux électriques



Nom du profil	WGS84 UTM zone 20N		Fort Desaix		Z (m)
Electrode (Ex)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
FM1-0	716671	1604095	716285	1603926	23
FM1-160	716719	1603943	716333	1603774	
FM1-390	716798	1603729	716412	1603560	
FM1-550	716849	1603579	716463	1603410	
FM1-710	716898	1603427	716512	1603258	12
FM2-0	716905	1604245	716519	1604076	39
FM2-80	716906	1604169	716520	1604000	
FM2-160	716904	1604096	716518	1603927	
FM2-480	716935	1603779	716549	1603610	
FM2-560	716943	1603699	716557	1603530	
FM2-640	716938	1603621	716552	1603452	
FM2-720	716941	1603542	716555	1603373	
FM2-790	716944	1603474	716558	1603305	13
FM3-0	716733	1603645	716347	1603476	32
FM3-80	716799	1603687	716413	1603518	
FM3-160	716866	1603726	716480	1603557	
FM3-240	716934	1603763	716548	1603594	
FM3-320	717008	1603798	716622	1603629	
FM3-400	717083	1603835	716697	1603666	
FM3-480	717144	1603867	716758	1603698	
FM3-550	717204	1603897	716818	1603728	39
FM4-0	716534	1603989	716148	1603820	32
FM4-160	716674	1604065	716288	1603896	
FM4-320	716812	1604130	716426	1603961	
FM4-470	716938	1604195	716552	1604026	31



Annexe 4

Paramètres d'inversion utilisés dans Res2DInv

Pour les dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger:

Inversion settings
 Initial damping factor (0.01 to 1.00)
 0.1500
 Minimum damping factor (0.001 to 0.75)
 0.03
 Line search option (0=Never, 1=Sometimes, 2=Always)
 2
 Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)
 1.0000
 Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)
 0.5000
 Number of iterations (1 to 30)
 10
 Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)
 1.0000
 Model for increase in thickness of layers(0=default 10, 1=default 25, 2=user defined)
 2
 Number of nodes between adjacent electrodes (2 or 4)
 4
 Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only,1=directly on model)
 1
 Reduce number of topographical datum points? (0=No,1=Yes. Recommend leave at 0)
 0
 Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)
 1
 Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end)
 1
 Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed)
 2
 Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)
 1.0200
 Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not use, 2=uniform distorted FEM,
 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with inverse Swartz-Christoffel)
 5
 Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)
 0
 Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))
 0.0100
 Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)
 0
 Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)
 0.0010
 Allow number of model parameters to exceed datum points? (0=No, 1=Yes)
 1
 Use extended model? (0=No, 1=Yes)
 0
 Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)
 2
 Type of mesh (0=Normal,1=Fine,2=Finest)
 2
 Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)
 1
 Time-lapse inversion constrain (0=None,1=Least-squares,2=Smooth,3=Robust)
 0
 Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)
 0
 Thickness of first layer (0.25 to 1.0)
 0.7500
 Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)
 1.0500
 USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)

```

1
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRUPLE, 5=QUINTUPLE)
1
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)
1
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)
1.000
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE
VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)
0
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)
0
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)
0
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)
0.150
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)
0
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)
0.00100
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)
0
LIMIT RESISTIVITY VALUES(0=No,1=Yes)
1
Upper limit factor (10-50)
40.000
Lower limit factor (0.02 to 0.1)
0.025
Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)
0
Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)
1.00
Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)
0
Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)
2
Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
0.010
Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes)
0
Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)
0
Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)
0.05000
Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes)
1
Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)
0
Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
2.50000
Type of finite-element method (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)
0
Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
1.000
Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
0
Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced (2 to 100)
5.0
Factor to control variation of borehole damping factor with distance (0.5 to 5.0)
1.0
Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer, 1=Incorporate water layer into the model)
0
Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary freely,1=minimise variation)
1
Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes)
0

```

Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes)
0
Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No, 1=Yes)
1
Force resistance value to be consistant with the geometric factor (0=No, 1=Yes)
0
Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes)
0
Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No, 1=Yes)
1
Use active constraint balancing (0=No, 1=Yes)
0
Type of active constraints (0=Normal, 1=Reverse)
0
Lower damping factor limit for active constraints
0.4000
Upper damping factor limit for active constraints
2.5000
Water resistivity variation damping factor
4.0000

Afin d'aider à l'interprétation des structures verticales les inversions ont aussi été menées avec les paramètres suivants

Inversion settings
Initial damping factor (0.01 to 1.00)
0.1500
Minimum damping factor (0.001 to 0.75)
0.03
Line search option (0=Never, 1=Sometimes, 2=Always)
2
Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)
1.0000
Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)
0.5000
Number of iterations (1 to 30)
10
Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)
2.0000

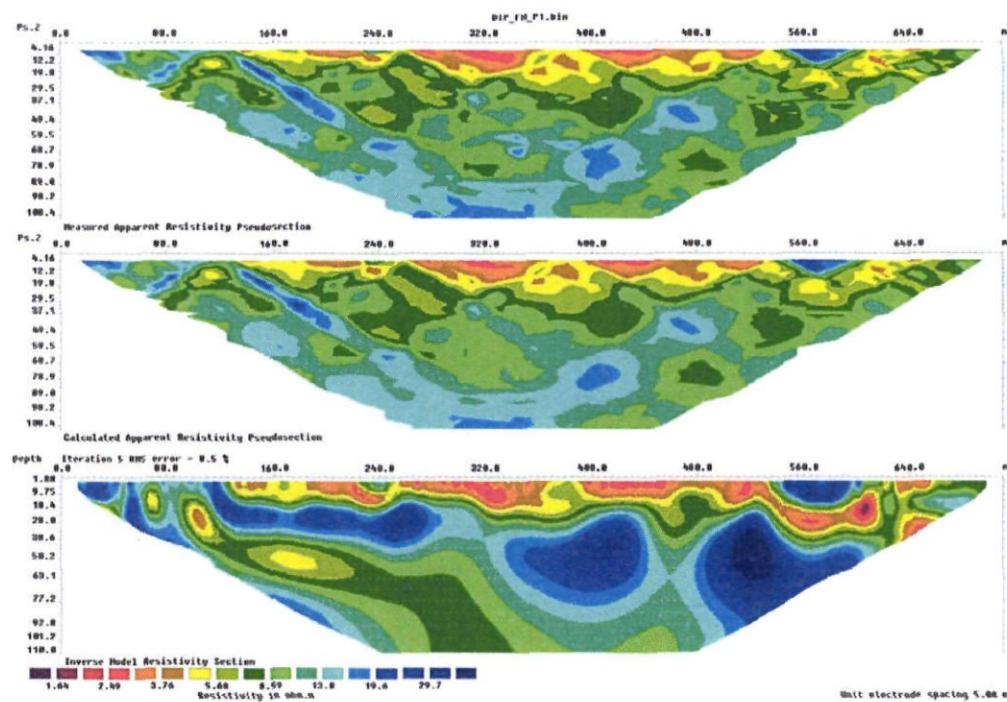


Annexe 5

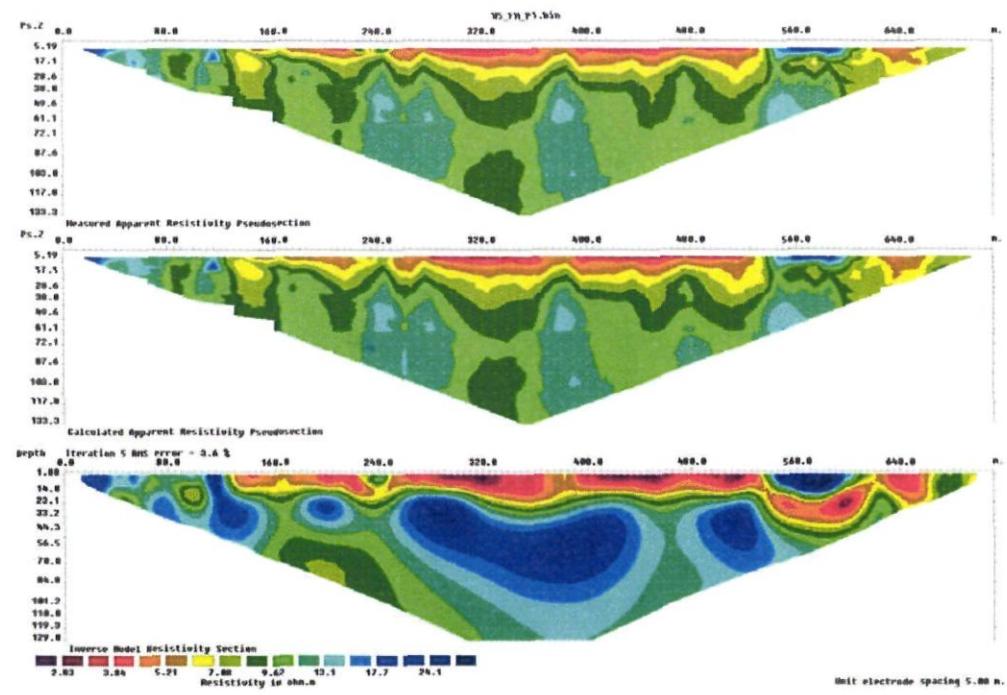
Résultats complets des inversions des panneaux électriques



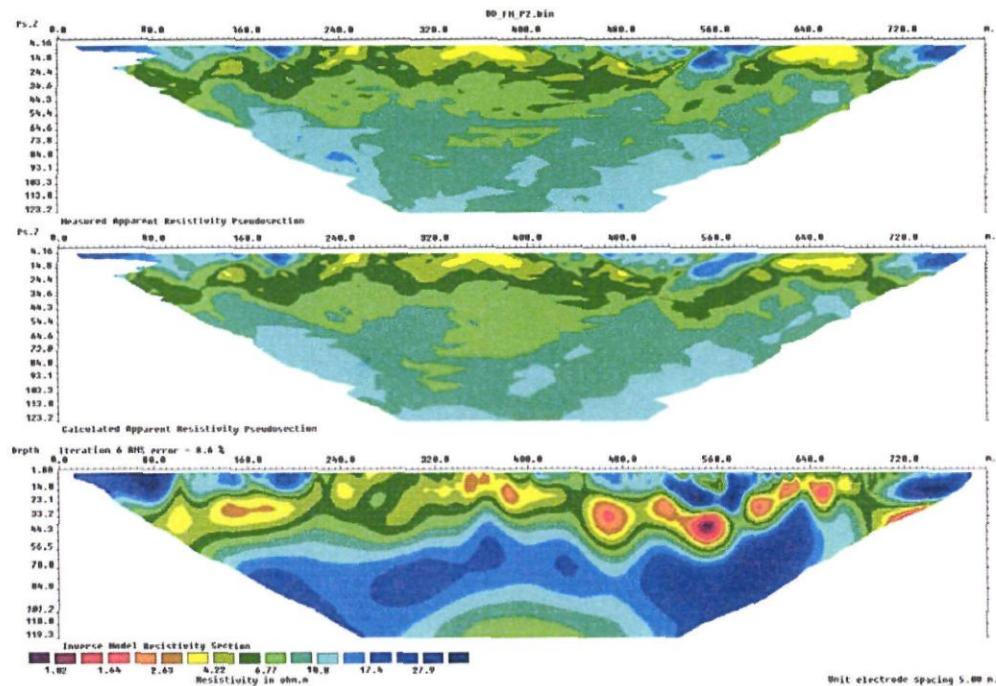
FM_P1 – Dipôle-dipôle



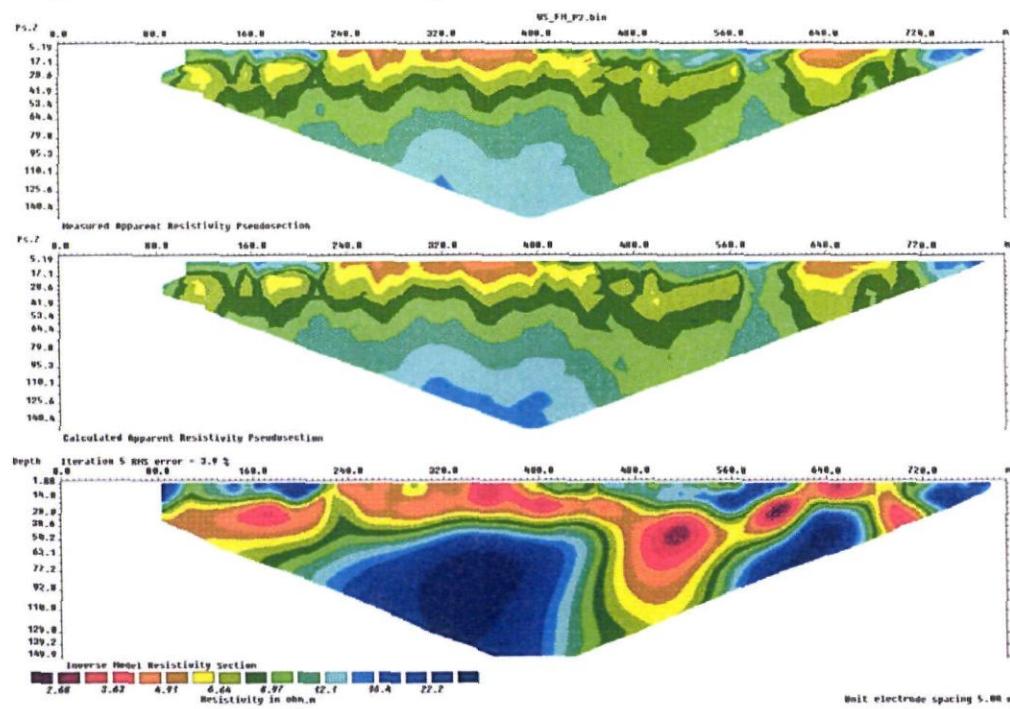
FM_P1 – Wenner-Schlumberger



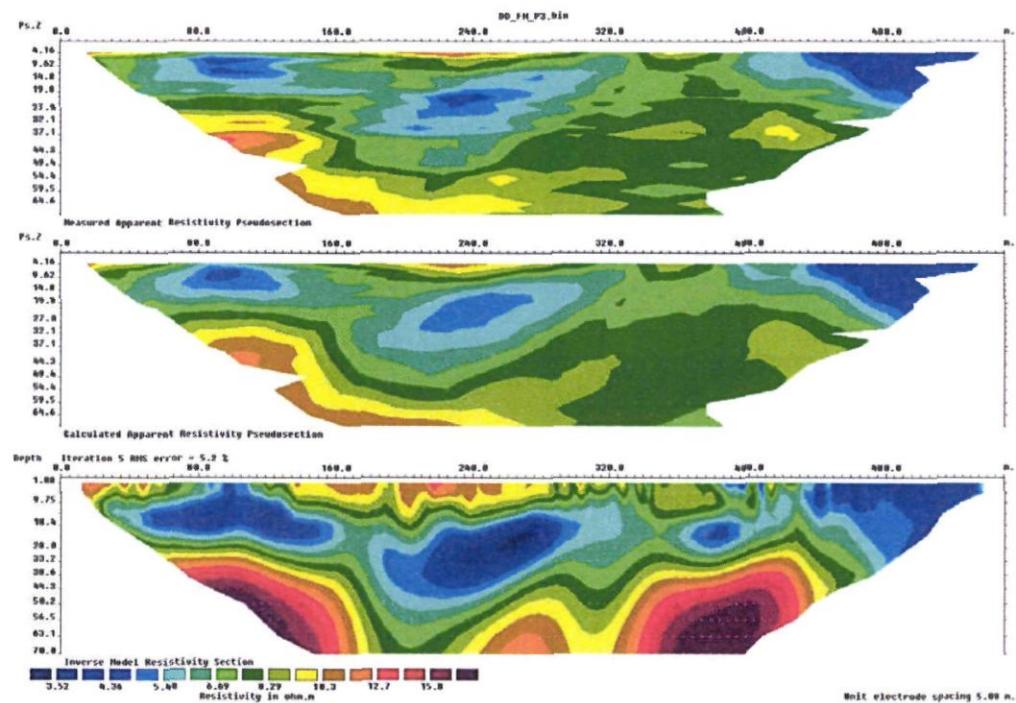
FM_P2 – Dipôle-dipôle



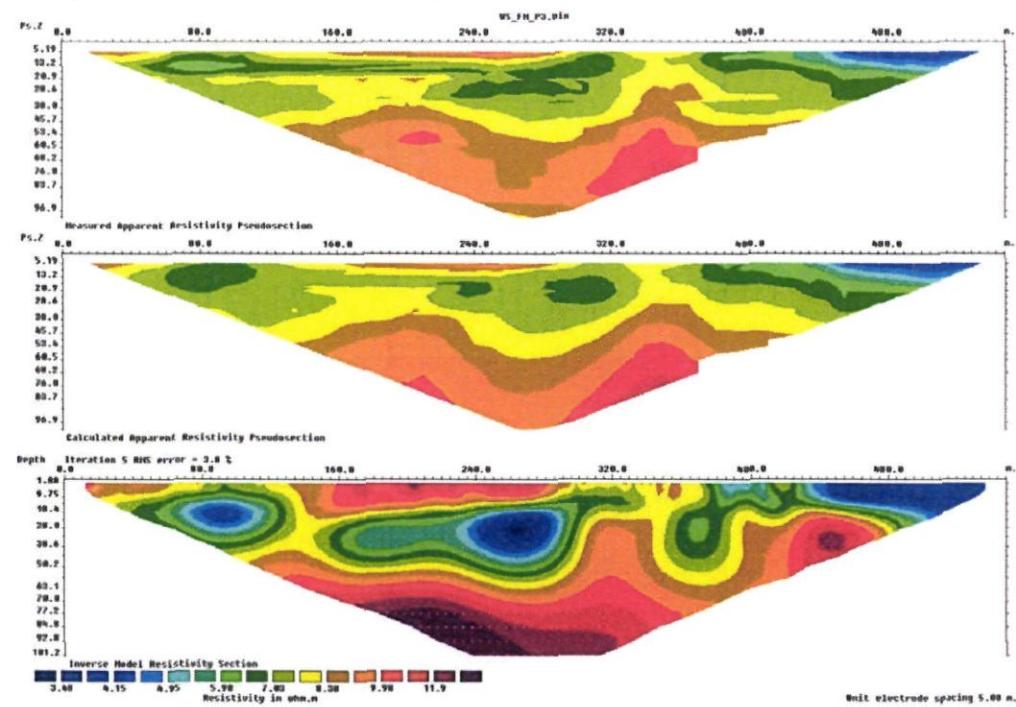
FM_P2 – Wenner-Schlumberger



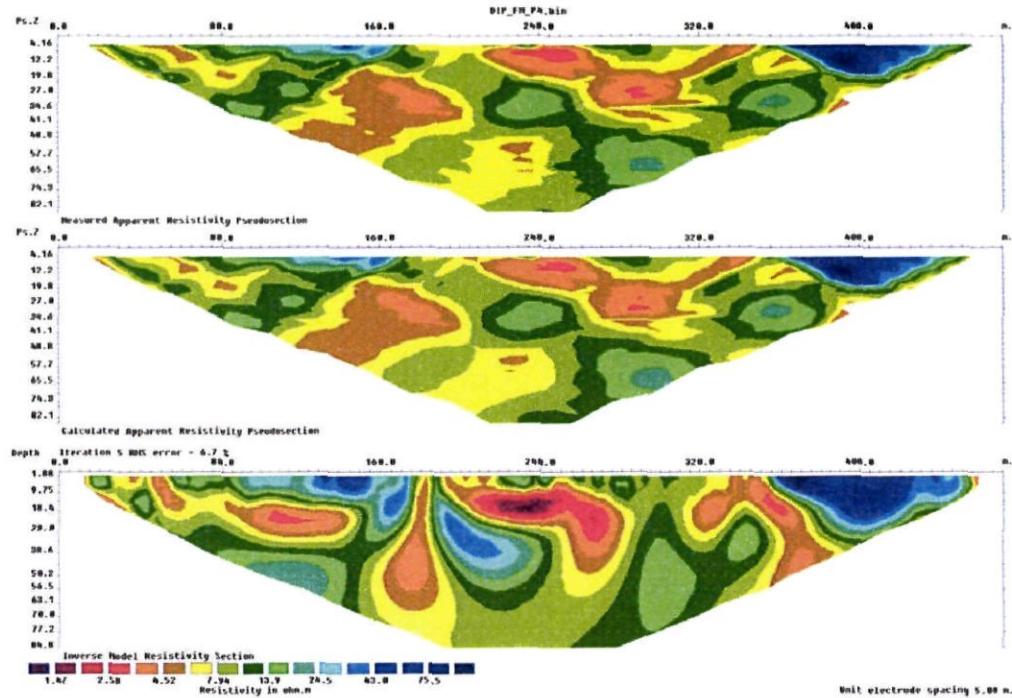
FM_P3 – Dipôle-dipôle



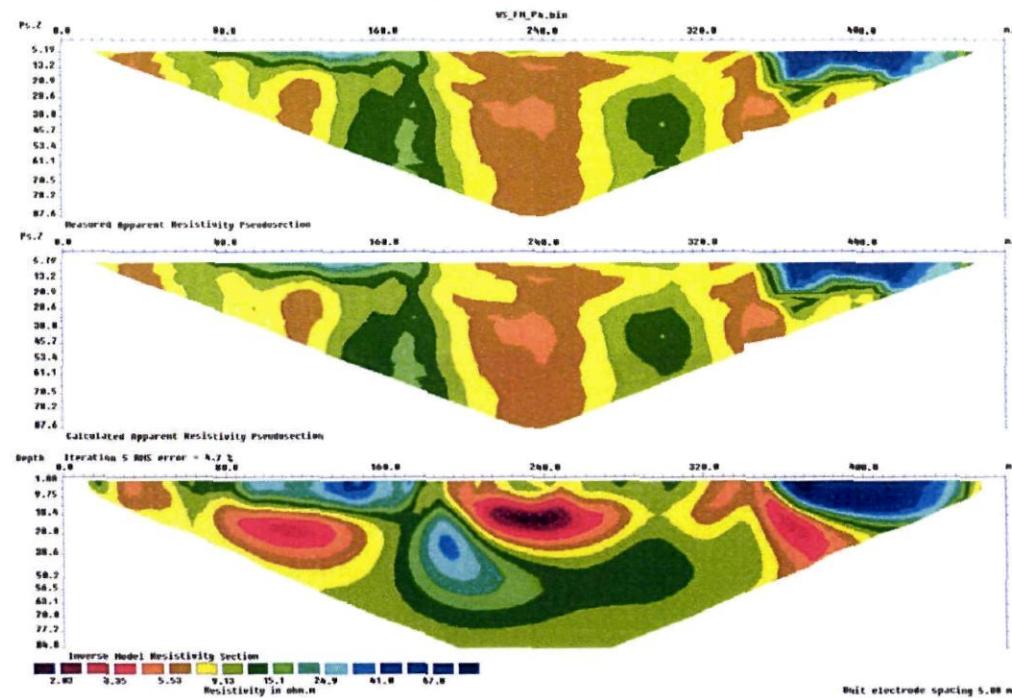
FM_P3 – Wenner-Schlumberger



FM_P4 – Dipôle-dipôle



FM_P4 – Wenner-Schlumberger





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

Service géologique régional Martinique
4 Lot. Miramar
Route de la Pointe des Nègres
97 200 – Fort-de-France - Martinique
Tél. : 05 96 71 17 70