



**Exploitation de levés
d'électromagnétisme héliporté dans
une perspective de réévaluation des
cartes d'aléa « mouvement de terrain »
en milieu volcanique tropical.**

Application aux Antilles - Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-64427-FR

Décembre 2014

1.89 3740.46 -625.5



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Exploitation de levés d'électromagnétisme hélicoptéré dans une perspective de réévaluation des cartes d'aléa « mouvement de terrain » en milieu volcanique tropical. Application aux Antilles - Phase1

Rapport final

BRGM/RP-64427-FR
Décembre 2014

P.-A. Reninger, A. Nachbaur, J. Deparis, S. Bernardie

Vérificateur :

Nom : Rosalie Vandromme

Fonction : Ingénieur

Date : 16/03/2015

Signature :



Approbateur :

Nom : Gilles Grandjean

Fonction : Dir. Adjoint

Date : 24/03/16

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 : Electromagnétisme hélicoptère, glissement de terrain, Antilles, aléa.

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

P.-A. Reninger, A. Nachbaur, J. Deparis, S. Bernardie. (2014) – Exploitation de levés d'électromagnétisme hélicoptère dans une perspective de réévaluation des cartes d'aléa « mouvement de terrain » en milieu volcanique tropical. Application aux Antilles - Phase1. Rapport final. BRGM/RP-64427-FR, p. 51, ill. 41.

Synthèse

Anticiper les glissements de terrain est un enjeu à la fois humain et économique, et ce plus particulièrement dans les DROM, où la vulnérabilité des versants est forte. Dans cet objectif, le développement de nouvelles méthodologies permettant de mieux caractériser les glissements apparaît nécessaire.

Les DROM bénéficiant maintenant d'une couverture en électromagnétisme hélicopté, cette étude propose de mettre en place une méthodologie d'analyse de glissement combinant ces nouvelles données aux paramètres plus classiques, tels que les paramètres géotechniques, géologiques et hydrogéologiques. Seule la phase 1 de ce projet, ayant pour objectif de démontrer l'exploitabilité de la méthode électromagnétique à cette problématique, est rapportée ici.

Les données d'électromagnétisme hélicopté permettent de bénéficier, à la fois, d'une couverture étendue et d'une imagerie haute résolution des contrastes de résistivité électrique sur les 200 premiers mètres du sous-sol. Ainsi, l'environnement géologique au sein duquel les glissements de terrain peuvent se développer peut être imagé.

Dans le cadre de cette phase 1, deux glissements ayant déjà fait l'objet d'études en Martinique ont été retenus : la Médaille et Morne Figue. En effet, ces derniers apparaissent comme étant représentatifs du type de glissement dommageable en Martinique.

L'interprétation des contrastes de résistivité contenus dans le modèle de résistivité issu de l'analyse des données d'électromagnétisme est réalisée en confrontant ces derniers aux différentes données documentées sur les deux zones, telles que les forages.

Les résultats de cette étude montrent que :

- les données d'électromagnétisme hélicopté permettent d'imager l'étendue et l'épaisseur des différentes formations en présence,
- elles fournissent également des informations sur les hétérogénéités existantes au sein d'une même formation.
- deux zones très conductrices sont présentes au niveau des deux mouvements de terrain étudiés. Celles-ci apparaissent comme particulièrement importantes à prendre en compte afin d'expliquer et de modéliser les glissements de terrain.

Le fait d'avoir deux sites contrastés apporte une information robuste sur l'exploitabilité de l'EM, notamment concernant les grandeurs de résistivité observées. Par ailleurs, cela tend à montrer la différence d'exploitabilité de l'EM selon le contexte :

- Sur le site de la Médaille, les contrastes de résistivité sont relativement bien marqués entre les différentes lithologies, nous apportant alors des informations sur les contrastes lithologiques. Or, il se trouve que le glissement de la Médaille est de grande ampleur et essentiellement guidé par la nature lithologique ;
- Sur le site de Morne Figue, les contrastes de résistivité entre les différentes lithologies sont beaucoup plus faibles. Ainsi, la résistivité apporte moins d'information sur la nature lithologique. Par contre, au sein d'une même lithologie, il met en évidence des nuances de saturation en eau ou d'altération, susceptibles d'expliquer les glissements observés. Il se trouve que les glissements redoutés à Morne Figue, sont d'ampleur plus limitée.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Sites d'étude	11
2.1. LA MÉDAILLE	11
2.1.1. Historique du glissement de terrain de La Médaille	11
2.1.2. Contexte géologique	13
2.1.2.1 Substratum andésitique.....	15
2.1.2.2 Formation dacitique en place ou sous forme bréchique et d'éboulis	15
2.1.2.3 Nuées ardentes ou tufs, au nord du glissement surplombant les brèches dacitiques	17
2.1.2.4 Contexte structural	18
2.1.3. Caractéristique du glissement récent	18
2.1.4. Interprétation géologique	19
2.1.5. Sondages disponibles	19
2.2. MORNE-FIGUE	20
2.2.1. Historique « des » glissements de Morne Figue.....	20
2.2.2. Contexte géologique	21
2.2.2.1 Basaltes de Vert Pré	21
2.2.2.2 Hyaloclastites	23
2.2.2.3 Formations volcano-sédimentaires : tuffites azoïques et conglomérats polygéniques.....	24
2.2.2.4 Andésite massive	25
2.2.3. Caractéristiques « des » glissements de Morne Figue	26
2.2.4. Interprétation géologique	27
2.2.5. Sondages disponibles	27
3. Levés d'électromagnétisme hélicopté.....	29
3.1. PRINCIPE DE MESURE	29
3.2. TRAITEMENTS DES DONNEES	30
3.2.1. Données de navigation	30
3.2.1.2. Données GPS	30
3.2.1.3. Données d'inclinaison	30
3.2.1.4. Données d'altitude	30
3.2.2. Données EM	30
3.2.2.1. Acquisition des données	30
3.2.2.2. Filtrage des données.....	30
3.2.2.3. Inversion et préparation des données	31
4. Interprétation géologique.....	33

4.1. LE SITE DE LA MÉDAILLE	33
4.1.1. Cartographie de résistivité 2D	33
4.1.2. Cube de résistivité 3D	34
4.2. LE SITE DE MORNE-FIGUE	39
4.2.1. Cartographie de résistivité 2D	39
4.2.2. Cube de résistivité 3D	41
5. Conclusion.....	45
6. Bibliographie	47

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation des deux sites d'études choisis. Source : Scan25 de l'IGN	11
Illustration 2 - Localisation du glissement de La Médaille	13
Illustration 3 - Carte de synthèse géologique. Source modifiée : carte géologique au 1/50 000 (Westercamp et al., 1990).....	14
Illustration 4 - Echantillon de dacite.....	16
Illustration 5 – Contact entre l'andésite et la dacite	16
Illustration 6 - Escarpement de dacite porphyrique	17
Illustration 7 - Eléments ponceux dans une matrice argilo-sableuse ocre	17
Illustration 8 – Altération brun/orangé des horizons ponceux	18
Illustration 9 - Profil d'altération des dépôts ponceux.....	18
Illustration 10 - Sondages disponibles dans la BSS.....	19
Illustration 11 - Localisation des glissements de Morne Figue.....	20
Illustration 12 - Carte de synthèse géologique	21
Illustration 13 - Individualisation de rognons de lave en pelure d'oignon et disparition de la structure de la roche mère	22
Illustration 14 - Argile d'altération avec éléments rocheux altérés millimétriques à centimétriques.....	22
Illustration 15 - Lave altérée avec structure de la roche mère encore identifiable	23
Illustration 16 - Hyaloclastites primaires avec scories et blocs de lave homogène	23
Illustration 17 - Conglomérats polygéniques	24
Illustration 18 - Texture sablo-argileuse des conglomérats polygéniques altérés	25
Illustration 19 - Andésite grise altérée à Morne Congo	25
Illustration 20 - Couche est-ouest schématique du glissement de Morne Figue. Source : Allard, 1989	26
Illustration 21 - Pente des terrains sur la zone étudiée. Extrait du Litto3D de l'IGN	27
Illustration 22 - Sondages disponibles dans la BSS dans le secteur de Morne Figue.....	27

Illustration 23 - Caractéristique des sondages à proximité	28
Illustration 24 - Vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol.....	29
Illustration 25 – Sondages de résistivité obtenus après inversion. La profondeur d'investigation de la méthode EM est représentée par une tranche en légère transparence reflétant l'incertitude obtenue sur ce paramètre et définie par une limite haute et une limite basse (pointillée), sous la limite haute, la transparence appliquée étant nettement plus importante.	31
Illustration 26 – Grille de résistivité entre 4 et 7 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques.....	33
Illustration 27 – Grille de résistivité entre 38 et 47 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques.....	34
Illustration 28 – Localisation des points de mesure et des différentes coupes tracées au niveau du glissement de la Médaille. Le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques sont également reportés	35
Illustration 29 – Coupe de résistivité 1 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés	36
Illustration 30 – Coupe de résistivité 2 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés	37
Illustration 31 – Coupe de résistivité 3 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés	37
Illustration 32 – Coupe de résistivité 4 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés	38
Illustration 33 – Visualisation 3D des coupes tracées dans le cube 3D (cf. Illustration 28) ainsi que de l'iso résistivité 15 ohm.m. Le contour du glissement de terrain, les failles documentées sont également reportés	38
Illustration 34 – Grille de résistivité entre 2 et 4 m de profondeur sur laquelle sont reportés les contours des glissements de terrain et les contours géologiques.....	39
Illustration 35 – Grille de résistivité entre 19 et 24 m de profondeur sur laquelle sont reportés les contours des glissements de terrain et les contours géologiques.....	40
Illustration 36 – Localisation des points de mesure et des différentes coupes tracées au niveau du glissement de Morne Figue. Les contours géologiques et des glissements de terrain sont également reportés	41
Illustration 37 – Coupe de résistivité 1 (cf. Illustration 36). Les forages à proximité ont été projetés	42
Illustration 38 – Coupe de résistivité 2 (cf. Illustration 36). Les forages à proximité ont été projetés	43
Illustration 39 – Coupe de résistivité 3 (cf. Illustration 36).....	43
Illustration 40 – Coupe de résistivité 4 (cf. Illustration 36). Les forages à proximité ont été projetés	43
Illustration 41 – Visualisation 3D des coupes tracées dans le cube 3D (cf. Illustration 36) ainsi que de l'iso résistivité 5 ohm.m. Les contours des glissements de terrain sont également reportés.....	44

1. Introduction

Anticiper les glissements de terrain est un enjeu à la fois humain et économique. Dans les DROM, la vulnérabilité des versants est particulièrement forte en raison de la concentration des enjeux sur des terrains volcaniques complexes altérés en surface et en profondeur et soumis à des saisons cycloniques marquées, la pression foncière y étant également forte (voir par exemple Audru *et al.*, 2010 pour l'exemple de Mayotte). L'instabilité de versant peut être évaluée de plusieurs manières, mais le calcul d'un facteur de stabilité de pente estimé de façon déterministe permet un diagnostic plus objectif sur l'aléa, cadré à la fois par l'utilisation d'outils numériques d'aide à la cartographie éprouvés (logiciel ALICE) et par des avis d'experts qui calibrent ces outils. Ces approches nécessitent des mesures géotechniques et un modèle géologique en 2D/3D bâti à partir de l'analyse du MNT et d'une connaissance géologique et hydrogéologique la plus large possible (cartes et données géologiques disponibles, sondages, observations de terrain, reconnaissances ponctuelles de type forage, ...).

Depuis le début des années 2000, l'ElectroMagnétisme (EM) hélicopté en domaine temporel est utilisé pour l'exploration minière mais également au sein d'études environnementales ; comme exemples d'application de l'électromagnétisme, on retient en particulier la cartographie de vallées enfouies au Danemark (Jørgensen *et al.*, 2003), l'étude d'un glissement de terrain en Autriche (Supper *et al.*, 2013), la caractérisation de l'interface eau douce/eau salée en Italie (Viezzoli *et al.*, 2010) ou encore l'imagerie d'un aquifère perché sur l'île Santa Cruz dans les Galápagos (d'Ozouville *et al.*, 2008). Parallèlement à ces résultats prometteurs, le BRGM a entrepris dès 2010 les couvertures géophysique hélicoptée haute résolution des départements de Mayotte, de la Guadeloupe, de la Martinique et de la Réunion, résultant en une caractérisation des contrastes de résistivité sur une tranche de profondeur allant jusqu'à 250-300 mètres avec une résolution horizontale de 30 m environ le long des lignes de vol (dépendant de la vitesse de vol et de la séquence d'acquisition) et verticale de 3 à 8 m environ en surface (Nehlig *et al.*, 2013 ; Vittecoq *et al.*, 2013). Si la résistivité n'a qu'une relation indirecte avec la rigidité des sols - qui conditionne les mouvements de terrains - elle permet toutefois d'obtenir des informations pertinentes à la fois sur l'épaisseur de la zone altérée et son degré de saturation. Le croisement entre les données EM et les forages doivent donc permettre d'affiner la géométrie en trois dimensions de l'épaisseur des zones altérées, et donc des sols potentiellement mobilisables.

L'objectif de ce projet est de concevoir et évaluer une méthodologie qui servira aux évaluations et cartographies de l'aléa mouvement de terrain sur les zones disposant d'une telle couverture géophysique.

Cet objectif se décline en deux phases :

1. Dans un premier temps (phase 1), une analyse qualitative de l'apport des données EM pour la cartographie de l'aléa sera effectuée. Sur deux zones se voulant représentatives des mécaniques de glissement observées en Martinique, des comparaisons/corrélations entre les données de terrain et de forage et les données de géophysique hélicoptée seront réalisées (dans l'optique de caractériser les formations potentiellement instables et identifier les mouvements de terrain potentiels). A l'issue de cette phase, l'apport de l'EM à la cartographie de l'aléa sera démontré et les éléments utiles à celle-ci seront identifiés ;
2. Dans un deuxième temps (phase 2) et en fonction des résultats de la phase 1, les éléments issus de l'EM seront intégrés dans le logiciel ALICE afin de cartographier la susceptibilité des versants d'un site pilote aux mouvements de terrain ; une phase d'échanges, entre les observations terrain, les forages et les résultats obtenus,

permettra de calibrer et de valider le modèle. L'étude sera complétée par une phase d'évaluation qui permettra d'identifier les apports et les faiblesses de la méthode, ainsi que des propositions pour l'améliorer.

Ce rapport ne concerne que la phase 1 de ce projet, dont les objectifs peuvent être déclinés en 3 sous-tâches:

1. Choix de deux zones d'études se voulant représentatives des mécanismes de glissement observés en Martinique, et compilation des données existantes sur ces sites ;
2. Comparaisons/corrélations entre les données de terrain et les données de géophysique hélicoptère (dans l'optique de caractériser les formations potentiellement instables et identifier les mouvements de terrain potentiels) ;
3. Bilan de l'approche qualitative sur l'apport de l'EM à la cartographie de l'aléa et identification des éléments utiles.

2. Sites d'étude

Les glissements de la Médaille et Morne Figue ont été choisis comme site d'étude car ceux-ci sont représentatifs du type de glissements dommageables en Martinique et sont, par ailleurs relativement bien renseignés. Ils sont localisés respectivement dans les communes de Fort de France et Trinité (cf. Illustration 1).

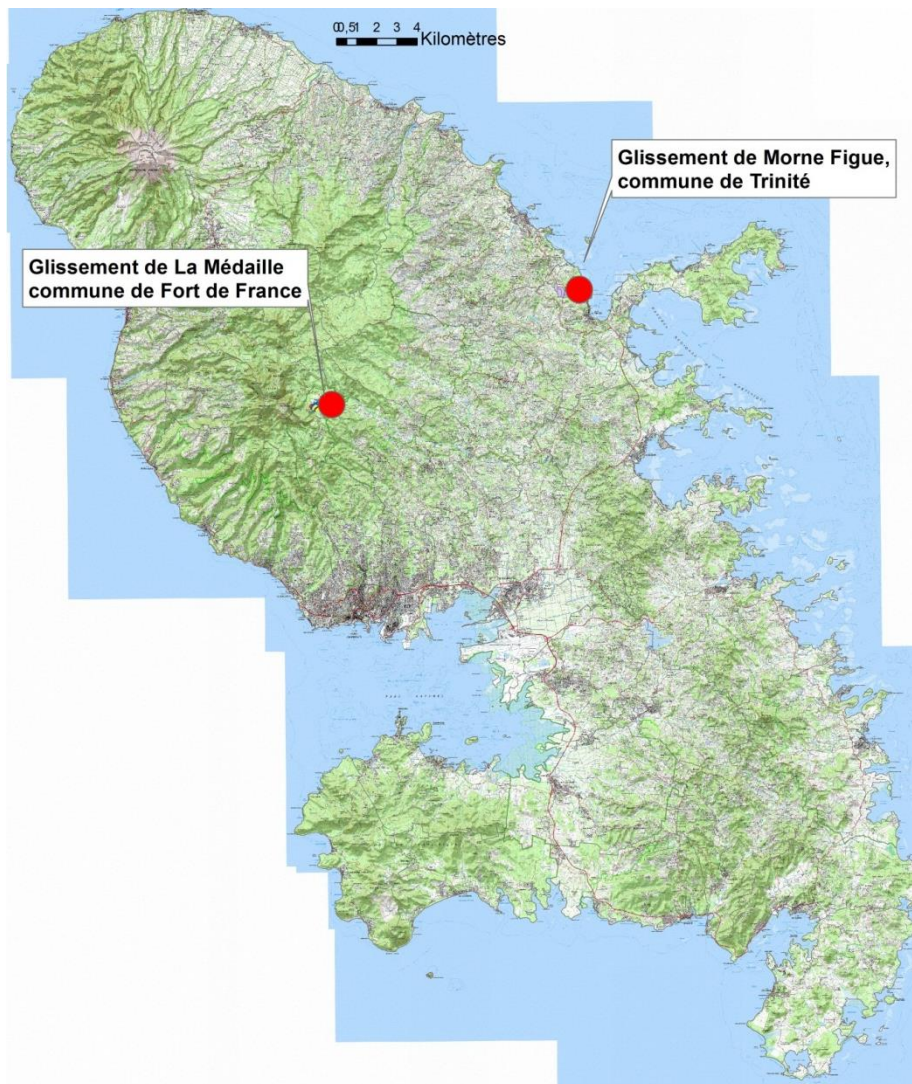


Illustration 1 - Localisation des deux sites d'études choisis. Source : Scan25 de l'IGN

2.1. LA MÉDAILLE

2.1.1. Historique du glissement de terrain de La Médaille

Le glissement de terrain se situe au nord de la commune de Fort de France, sur le versant est du Morne Balthazar, dans le quartier de la Médaille. Le glissement est traversé par la route nationale RN3 (route de la Trace).

Le glissement principal (en bleu sur l'illustration 2) est connu depuis de nombreuses années. Il met en mouvement 260 000 m³ de terrain sur plus de 8 ha, depuis la route vers l'aval côté est. Cependant, Deneufbourg (1968) évoque un vaste glissement fossile qui explique la présence d'éboulis dacitique, dont l'emprise a été reportée en jaune sur l'illustration 2, à partir des informations de la carte géologique (Westercamp *et al.*, 1990).

Concernant la reprise récente du glissement, la phase paroxysmale a eu lieu en octobre 1916. Le glissement s'est déclenché brutalement, dans l'axe de la Source, en emportant l'ancien village de la Médaille faisant 5 victimes (*cf.* plaque commémorative sur site, Humbert M. (1986)). D'autres mouvements brutaux ont été observés ensuite, notamment en 1958, 1966, 1993 (tempête Cindy), conduisant au déplacement du tracé de la route nationale plus en aval. Depuis, le Conseil Régional entreprend régulièrement le rechargement de la chaussée, qui s'enfoncé régulièrement, emportée dans le sens du mouvement d'ensemble. Aujourd'hui, la ravine La Source a retrouvé son niveau de base, en s'incisant profondément dans le glissement de 1916 (de plusieurs dizaines de mètre en 70 ans) (Humbert, 1986). Cette incision récente est source de désordres par érosion régressive des berges, notamment en rive droite.

L'éboulement survenu en 2002 (emprise en rouge sur l'illustration 2) a concerné des terrains surplombant la route, en partie haute de la falaise et est indépendant du glissement principal. La hauteur de l'escarpement concernée est d'environ 80 m et sa pente moyenne de l'ordre de 45°. Cette partie est désormais protégée par des grillages de protection et des écrans pare-blocs.

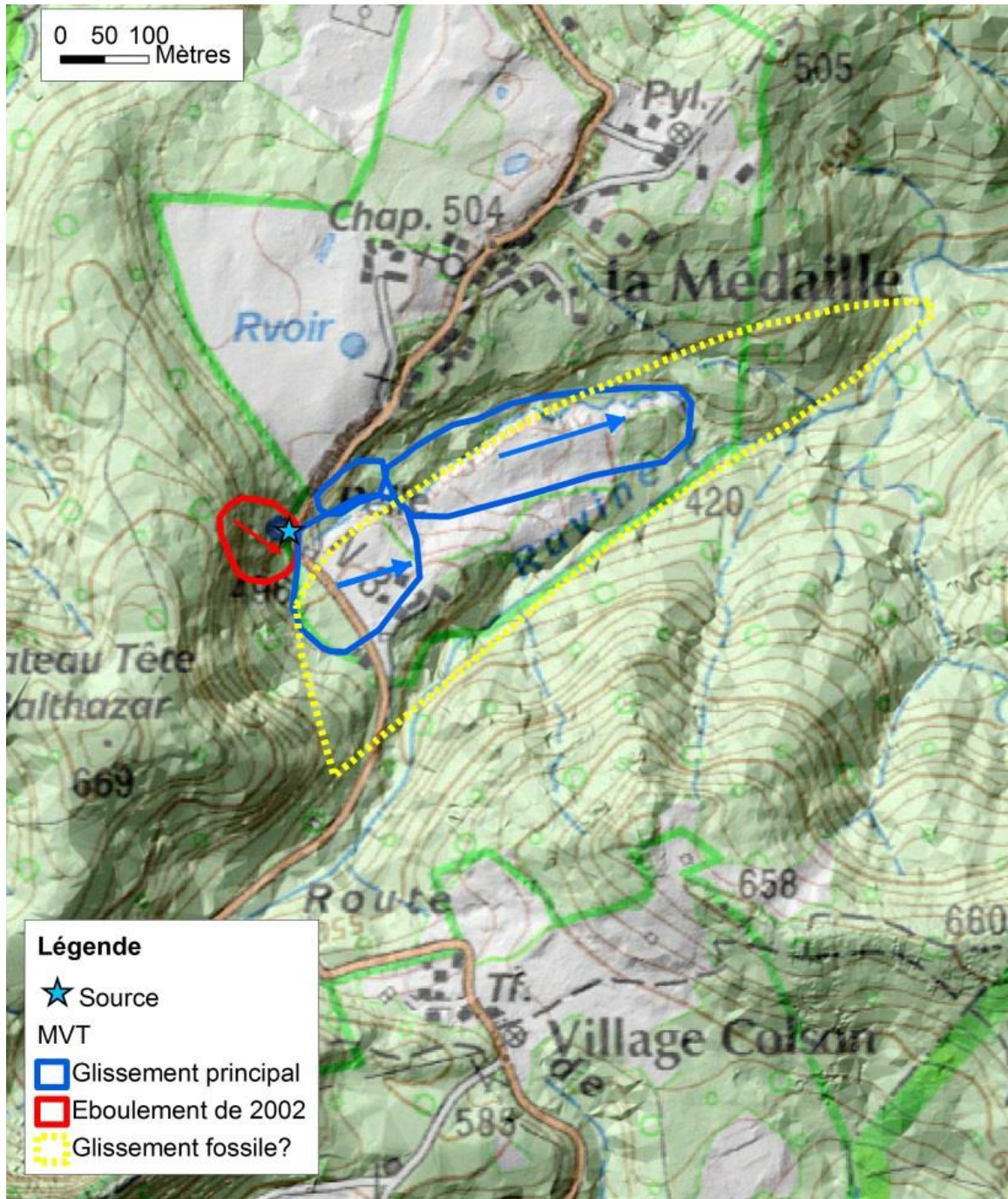


Illustration 2 - Localisation du glissement de La Médaille

2.1.2. Contexte géologique

Située au pied du massif des Pitons du Carbet, la zone de la Médaille est formée de formations dacitiques reposant sur un substratum andésitique plus ancien, argilisé au sommet (Humbert, 1986).

Interprétation géologique : La carte de synthèse géologique, présentée en Illustration 3, est issue de la carte géologique (Westercamp *et al.*, 1989) précisée à partir des reconnaissances de terrain, les données topographiques et les informations disponibles dans la bibliographie.

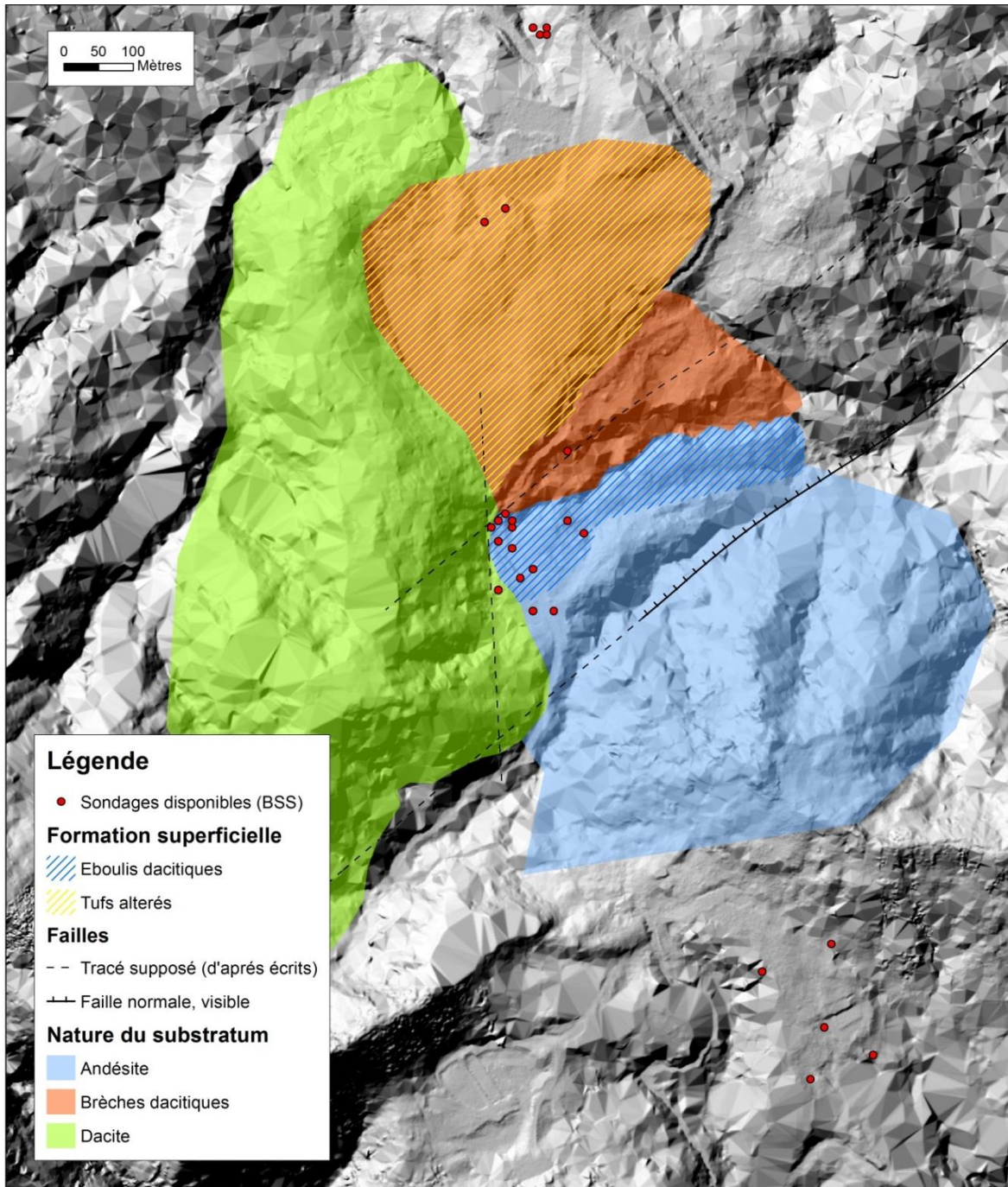


Illustration 3 - Carte de synthèse géologique. Source modifiée : carte géologique au 1/50 000 (Westercamp et al., 1990)

2.1.2.1 Substratum andésitique

Sur le secteur étudié, la formation andésitique est la plus ancienne, issue de l'épisode volcanique du Morne Jacob, il y a 2,2 à 2,8 Ma. D'après la carte géologique, il s'agirait d'une coulée massive d'andésite porphyrique sombre à hyperstène et augite. Cette formation constituerait le substratum du glissement. Plus précisément, les sondages l'ont décrit comme une lave andésitique, grise, gris-bleu ou gris vert (*sondage 1173ZZ0009, 1173ZZ0014, 1173ZZ0028*). Un seul des sondages évoque une andésite « porphyrique » comme décrite dans la carte géologique (*sondage 1173ZZ0015*).

Cette andésite apparaît très fissurée dans la plupart des sondages. Elle serait donc très affectée par les manifestations tectoniques.

La formation andésitique n'a pas été directement observée sur le terrain. Elle affleurerait le long de la rivière Cadore, au sud du glissement et plongerait vers le nord-ouest (Deneufbourg 1968). Cette formation plongerait donc vers le NW d'abord sous les éboulis dacitiques puis sous les formations dacitiques bréchiques (non recoupé par les sondages), plus ou moins brutalement par un jeu de faille successif. On évoque des brusques chutes de toit du substratum andésitique et la possibilité d'un contact faillé. Effectivement, d'après les sondages, le toit des andésites est à faible profondeur, sur l'extrémité sud du glissement et atteint 15 à 20 m plus au nord sous la route et jusqu'à 25 m à l'extrémité nord-est.

Par ailleurs, l'ensemble des sondages a confirmé la forte altération de cette formation à son sommet et évoquent un horizon de 2 mètres d'argiles franches rougeâtres sous la zone glissée et les éboulis dacitiques. Plus précisément, on décrit la frange altérée andésitique comme : « argile d'altération », « argile plastique brun violacée à gris à petits blocs de lave gris-bleus », « argile molle » voire une « argile bariolée gris-brun enrobant des rognons d'andésites ».

Cependant, les descriptions des sondages de 1966 (en vert sur l'illustration 10) et de 1968 (en jaune sur l'illustration 10) laissent un doute sur la présence d'une réelle frange d'altération andésitique. Un horizon constitué majoritairement de débris andésitique plus ou moins argileux et fissurés semble être mis en évidence. Celui-ci présenterait une forte discordance lithologique avec le substratum andésitique sous-jacent. Les descriptions lithologiques coïncideraient donc plus avec la présence d'une coulée de débris (lahars), possiblement en alternance avec des coulées d'andésite plus saine d'après la description de certaines passes. Au niveau du glissement, seul le sondage 1173ZZ0028 met clairement en évidence une frange d'altération andésitique, sans mentionner la présence de quelconque débris.

2.1.2.2 Formation dacitique en place ou sous forme bréchique et d'éboulis

La dacite est décrite comme une « lave porphyrique blanche à phénocristaux de « feldspath et biotite automorphe » (sondage 1173ZZ0054) et également de quartz.

Les formations dacitiques (cf. Illustrations 4, 5, 6) surmontant l'horizon andésitique sont présentes sous trois formes :

- En amont de la route nationale, elles constituent la falaise du cirque de la Médaille et seraient relativement saines, recouvertes sur 3 à 7 m d'une couche de sable limoneux, légèrement argileux, de couleur marron à gris, avec quelques éléments de dacite (Sedan, 2002 ; Dubois, 2003).
- Sous forme de brèches volcaniques et recouvertes par des tufs, elles arment le plateau au nord du glissement. Au sommet du plateau, on recoupe de 10 à 20 m de cette formation dacitique altérée sans avoir recoupé une dacite saine. Ces horizons altérés

sont décrits comme tendres mais « peu argileux » et se dégradant « en sable grossier gros à jaune » (sondage 1173ZZ0001, 002, 003, 004, 005), voire « sable quartzéux » ou « argileux-quartzéux ».

- Sous forme d'éboulis dacitiques, dans l'emprise du glissement. Les éléments arrachés à la falaise forment aux pieds de celle-ci un cône d'éboulis constitué de blocs dacitiques dans une matrice sablo-argileuse. Ces éboulis dacitiques sont imprégnés par une nappe d'eau souterraine, dont le niveau hydrostatique varie en moyenne de 5 à 10 m de profondeur (cf. Deneufbourg, 1968). Les éboulis dacitiques ont 15 à 20 m d'épaisseur environ au niveau de la route nationale).



Illustration 4 - Echantillon de dacite



Illustration 5 – Contact entre l'andésite et la dacite



Illustration 6 - Escarpement de dacite porphyrique

2.1.2.3 Nuées ardentes ou tufs, au nord du glissement surplombant les brèches dacitiques

Au nord de la zone glissée, on trouve des nuées ardentes, surplombant les brèches dacitiques. Ces nuées sont décrites comme des tufs ponceux argilisés, brun ou jaune/orangé (sondage de 1967 : 1173ZZ0007, 1173ZZ0008), qui s'altèrent en argile brun-rouge ou rouille. Elles présenteraient une dizaine de mètres d'épaisseur. Ces horizons ponceux et leur profil d'altération affleurent au nord du site étudié, sur les talus le long de la route (cf. Illustration 7, Illustration 8 et Illustration 9) comme décrit dans les logs de sondages.



Illustration 7 - Eléments ponceux dans une matrice argilo-sableuse ocre



Illustration 8 – Altération brun/orangé des horizons ponceux



Illustration 9 - Profil d'altération des dépôts ponceux

2.1.2.4 Contexte structural

Le secteur serait affecté par un réseau de failles développé décrit par Deneufbourg (1967). Plusieurs structures faillées (failles normales) constitueraient les limites Nord et Sud du glissement (cf. Illustration 3). La structure la mieux connue est la faille, limitant au sud le glissement, observable au niveau de la ravine Cadore. Elle est orientée sud-ouest nord-est, le compartiment nord étant effondré (Belz et Chalivat, 1996).

Une autre faille à peu près nord-sud (cf. Illustration 3), parallèle aux falaises du cirque naturel et expliquant la morphologie du site et le contact faillé entre dacite et andésite, a été mise en évidence par Deneufbourg (1968). Elle limiterait le glissement à l'ouest.

2.1.3. Caractéristique du glissement récent

Dès 1966, Deneufbourg évoque le rôle de plan de glissement qu'aurait joué l'horizon supérieur argilisé du substratum andésitique. La masse mise en mouvement serait alors la couche d'éboulis dacitique (dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de mètres), qui repose sur l'andésite.

2.1.4. Interprétation géologique

2.1.5. Sondages disponibles

Dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS), une vingtaine de forage possèdent une coupe géologique à proximité (cf. Illustration 10).

La plupart sont carottés, notamment ceux issus des campagnes de 1968, 1966 et 1981. La description géologique des logs de sondages peut être considérée comme fiable. Par ailleurs, après vérification, l'altitude indiquée à l'époque correspond plus ou moins à l'altitude actuelle.

Certains forages sont mal positionnés (1173ZZ0014 et 1173ZZ0011) par rapport au document d'origine ; leur position a été corrigée.

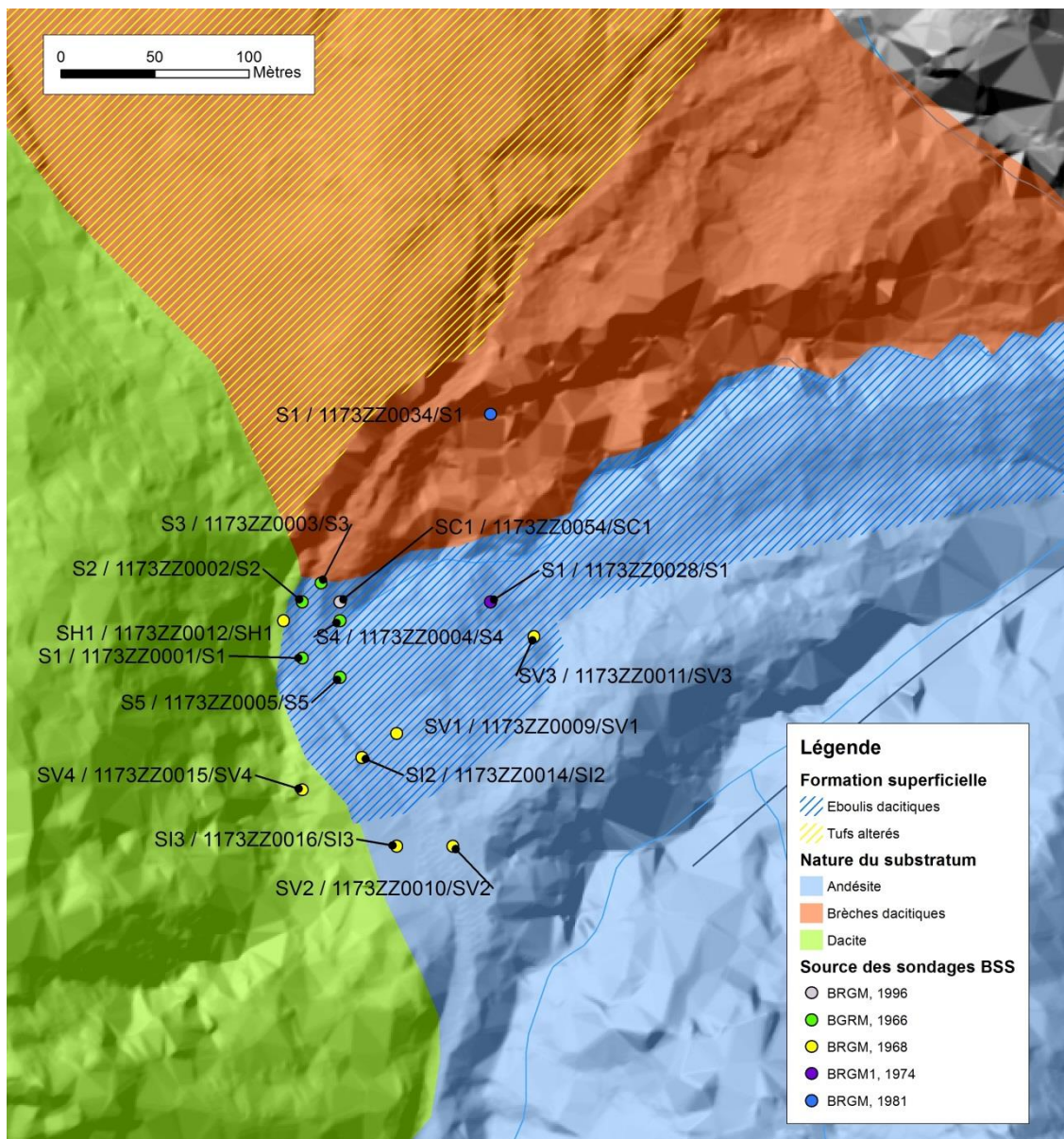


Illustration 10 - Sondages disponibles dans la BSS

2.2. MORNE-FIGUE

Le secteur d'étude est encadré par deux mornes : Morne Figue qui culmine à 129 m à l'est et Morne Congo qui culmine à 232 m à l'ouest. Le site est vallonné. Les altitudes varient entre 60 et 130 m. Les pentes sont moyennes à fortes, comprises entre 10 et plus de 30°.

2.2.1. Historique « des » glissements de Morne Figue

Des glissements sont régulièrement recensés dans le quartier de Morne Figue et Morne Congo (cf. Illustration 11), et notamment, dans le versant en contrebas de la RN1.

Les premiers signes d'instabilité datent de 1977, lors de la construction de la RD25bis (Allard, 1989). A ce même endroit, début 2013, un nouveau glissement a entraîné un affaissement de la chaussée sur une cinquantaine de mètres (source : Directeur d'Exploitation de Trinité). Depuis, la chaussée a été confortée par un mur de gabion et un système de drain pour les eaux souterraines.

Plus au nord, toujours en aval de la route nationale, un glissement a fortement endommagé la voie communale en 1989 puis de nouveau en 2004. En 2004, plusieurs habitations ont été endommagées, dont une a été évacuée ; la route communale a été fermée pendant 3 mois. D'après les témoignages des habitants du quartier en contre-bas de la route, le glissement montre toujours des signes d'activités (déformation de la route communale, rupture fréquente de la canalisation AEP en pied de glissement).

Sur les hauteurs de Morne Congo, plusieurs glissements ont été recensés en mai 2009 (Barras et al., 2010).

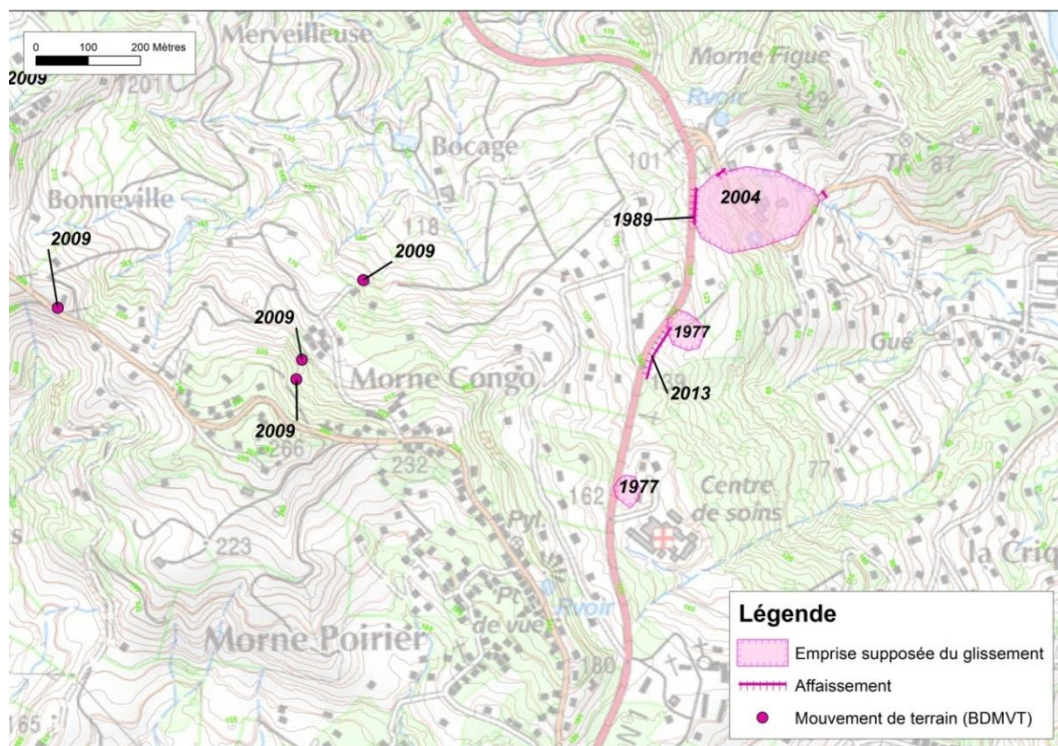


Illustration 11 - Localisation des glissements de Morne Figue

2.2.2. Contexte géologique

D'après la carte géologique au 1/50 000ème (Westercamp *et al.*, 1990), le secteur d'étude se trouve sur des formations géologiques appartenant à la chaîne volcanique sous-marine du Vauclin-Pitault et dans une moindre mesure à l'édifice du Morne Jacob.

Interprétation géologique : La carte géologique précisée d'après les reconnaissances de terrain, les données topographiques et les informations disponibles dans la bibliographie est présentée ci-dessous (*cf.* Illustration 12).

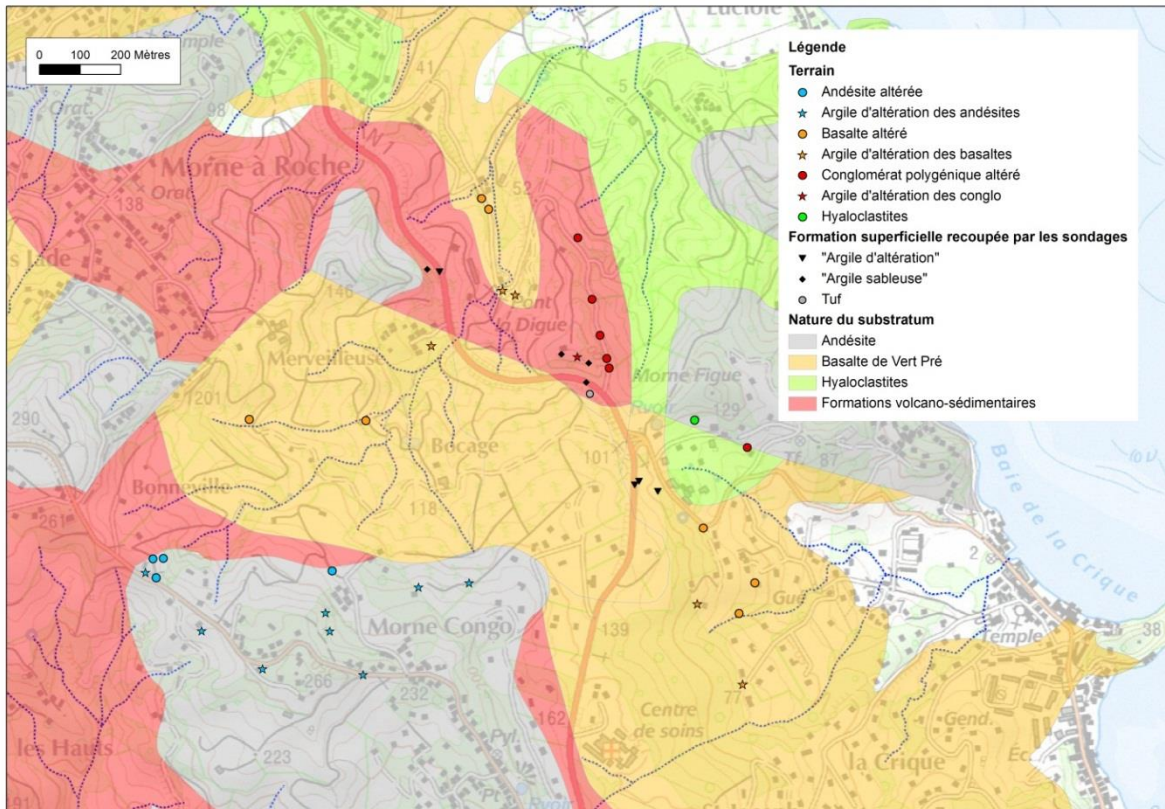


Illustration 12 - Carte de synthèse géologique

2.2.2.1 Basaltes de Vert Pré

Les plus anciennes formations rencontrées sont les basaltes porphyriques de « Vert Pré » qui se sont déposés lors de l'épisode volcanique initial de la chaîne volcanique sous-marine du Vauclin-Pitault. Ces laves sont très altérées et la roche saine n'apparaît plus que sous forme de boules dispersées dans une matrice argilisée (Westercamp, 1989) (illustration 13).

En effet, le profil d'altération de cette formation affleure à plusieurs endroits sur le secteur étudié. Plusieurs sondages et essais laboratoires ont également permis d'améliorer la connaissance de cette formation.

Les sondages 1170ZZ0124, 1170ZZ0125 (Allard, 1989) et 1170ZZ0147 (1997, ANTEA) décrivent, au sommet du profil d'altération de cette formation, une « argile raide bariolée »,

comportant plus ou moins des reliquats de la roche mère (éléments millimétriques à centimétriques altérés argilisés (cf. illustration 14)). Les Illustrations 12, 13 et 14 représentent différents niveaux d'altération de cette lave. A l'endroit des sondages, l'argile d'altération a une épaisseur constante de 9 à 10 m. En-dessous, la lave est altérée, « fortement colorée par les oxydes de fer ». La roche saine n'a pas été atteinte ; l'épaisseur de profil d'altération dépasserait donc les 25 m.

Un des affleurements où la roche est la moins altérée correspond à une lave massive mais de consistance molle, où la structure est encore reconnaissable (cf. Illustration 15).

La présence de la source de Morne Figue et les témoignages des gestionnaires de route témoignent de l'importante circulation souterraine dans le versant et au sein des Basaltes de Vert Pré.

Notons que la lave de cette formation est décrite comme andésitique.

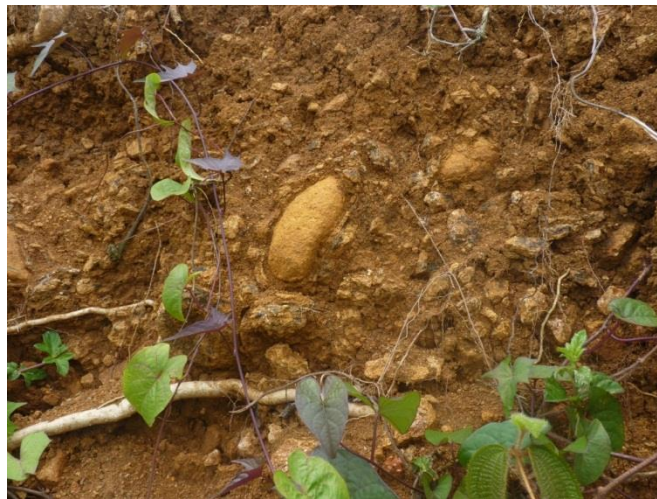


Illustration 13 - Individualisation de rognons de lave en pelure d'oignon et disparition de la structure de la roche mère



Illustration 14 - Argile d'altération avec éléments rocheux altérés millimétriques à centimétriques



Illustration 15 - Lave altérée avec structure de la roche mère encore identifiable

2.2.2.2 Hyaloclastites

Issues de petits centres éruptifs de la phase majeure du Vauclin-Pitault, les hyaloclastites sont venues recouvrir les coulées de basaltes porphyriques de Vert Pré. Ces formations indurées proviennent de retombées constituées de lapilli et de blocs de lave massive anguleuses de taille centimétrique emballés dans une matrice cendreuse indurée (cf. Illustration 16). Ces formations n'affleurent que localement sur le secteur d'étude et constituent le substratum du Morne Figue.

Les hyaloclastites sont dotées d'une porosité interstitielle faible et seraient donc peu perméables (Barras et Ollagnier, 2007).



Illustration 16 - Hyaloclastites primaires avec scories et blocs de lave homogène

2.2.2.3 Formations volcano-sédimentaires : tuffites azoïques et conglomérats polygéniques

Les tuffites azoïques puis les conglomérats polygéniques sont des formations volcano-sédimentaires déposées au Miocène. Au sein de la zone d'étude, ces formations reposent sur les basaltes porphyriques de Vert Pré.

Les tuffites azoïques n'ont pas particulièrement été recoupés par les sondages, ni observés sur le terrain.

Les conglomérats polygéniques sont décrits dans les logs de sondages, comme un « tuf très altéré, tendre » (sondage 1170ZZO21). Sur le terrain, les affleurements présentent effectivement un fort niveau d'altération (avec localement une altération en pelure d'oignon des éléments laviques) mais avec une structure de la roche mère largement reconnaissable. Ce conglomérat polygénique regroupe des blocs de lithologie hétérogène et de taille variée, puisque les blocs peuvent atteindre des tailles pluridécimétriques (cf. Illustration 17).

Les observations de terrain et les logs de sondages tendent à mettre en évidence la nature argilo-sableuse de l'altération de ces conglomérats anciens : « argile sableuse à sable-argileux », « argile à argile sableuse », « argile très sableuse » (sondage 1170ZZ02, 1170ZZ04, 1170ZZ05 et Illustration 18). Cette formation argileuse a été recoupée sur une dizaine de mètre d'épaisseur au sommet au sud du Pont la Digue.



Illustration 17 - Conglomérats polygéniques



Illustration 18 - Texture sablo-argileuse des conglomérats polygéniques altérés

2.2.2.4 Andésite massive

Des coulées de lave massives issues de l'activité du volcan bouclier du Morne Jacob coiffent les reliefs et constituent ainsi au nord-est, l'ossature de Morne Figue (andésite peu porphyrique) et au sud-ouest, l'ossature du Morne Congo et du Morne Poirier (andésite porphyrique). Il s'agirait de laves massives, de couleur sombre, à grain fin (Westercamp, 1989). Sur Morne Figue, elles recouvrent les hyalocastites du Vauclin Pitault.

Sur les hauteurs de Morne Congo et Morne Poirier, les argiles d'altérations de ces andésites ont été mises en évidence par plusieurs glissements de terrain en 2009, mais sur une épaisseur plutôt limitée (< 1 m). Cet horizon est systématiquement décrit comme « *rouge avec des blocs centimétriques et décimétriques* ». L'illustration 19 représente un affleurement d'andésite altérée sur les hauteurs du Morne Congo.



Illustration 19 - Andésite grise altérée à Morne Congo

2.2.3. Caractéristiques « des » glissements de Morne Figue

Les glissements recensés en aval de la route nationale RN1, affectent les argiles d'altération des basaltes de Vert Pré. Ils sont de volume limité (Barras et Ollagnier, 2007).

Ces événements s'apparenteraient à des glissements plans, parallèles à la pente, sur une épaisseur de 8 – 9 m correspondant à celle des argiles d'altération (cf. Illustration 20). Plus précisément, pour l'événement de 1989, la surface de rupture se situerait à l'interface argile saturée – lave altérée (Allard, 1989).

Plusieurs calculs de stabilité tendent à prouver l'influence des écoulements souterrains dans le déclenchement de ces instabilités. Sans écoulement, les terrains sont stables (Allard, 1978). Lors des glissements de 1977 et 2013, de fortes venues d'eaux souterraines, en provenance de l'amont du versant ont été mises en évidence (Allard, 1978). Au niveau du glissement de 1989 et 2004, les suivis piézométriques ont montré que la nappe était peu profonde et présentait des fluctuations importantes entre les saisons sèche et humide (jusqu'à 5 m de battement). L'éventualité d'une nappe en charge est également évoquée. Les écoulements d'eau souterraine jouent un rôle prépondérant dans l'apparition de ces mouvements de terrain.

Les glissements sur le morne Congo affectent les argiles d'altération des andésites du Morne Jacob, sur une épaisseur limitée (métrique). La pente étant forte, la masse en mouvement s'est propagée sous forme de coulées de boue pour la plupart. A Bonneville, il est précisé que le glissement s'est produit à l'interface avec la lave altérée, sub-affleurante.

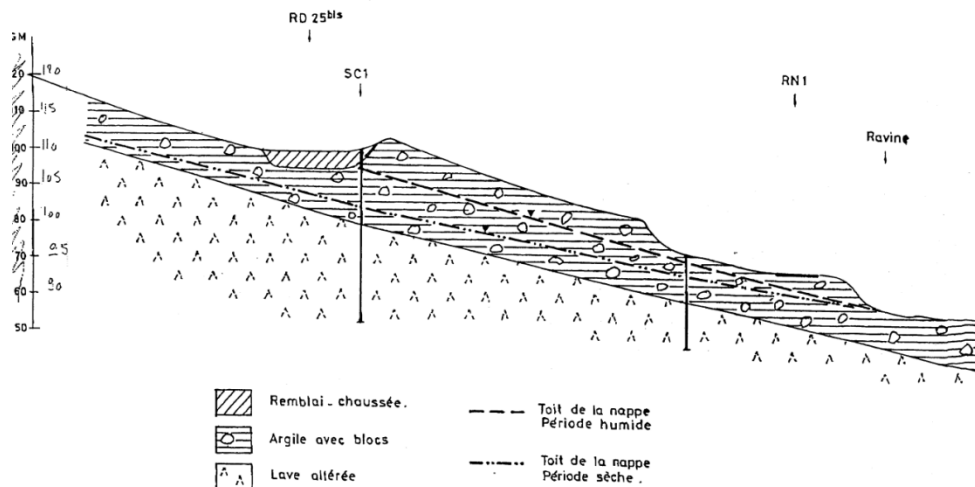


Illustration 20 - Coupe est-ouest schématique du glissement de Morne Figue. Source : Allard, 1989

Le déclenchement de ces glissements nécessite, par ailleurs, une pente suffisante des terrains, en limite de stabilité (cf. Illustration 21).

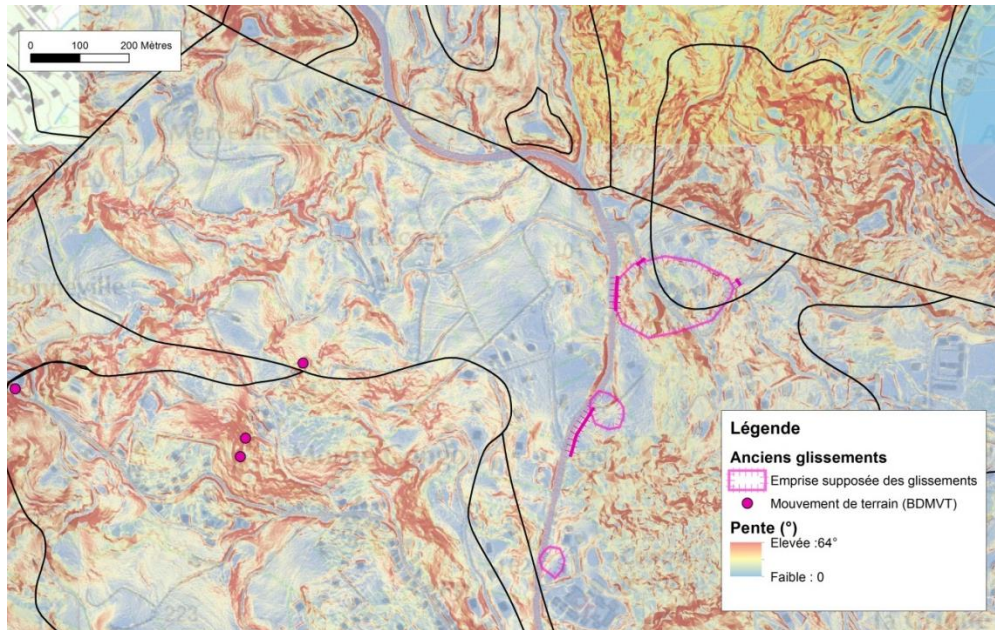


Illustration 21 - Pente des terrains sur la zone étudiée. Extrait du Litto3D de l'IGN

2.2.4. Interprétation géologique

2.2.5. Sondages disponibles

Dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS), neuf forages possèdent une coupe géologique à proximité (cf. Illustration 22 et Illustration 23).

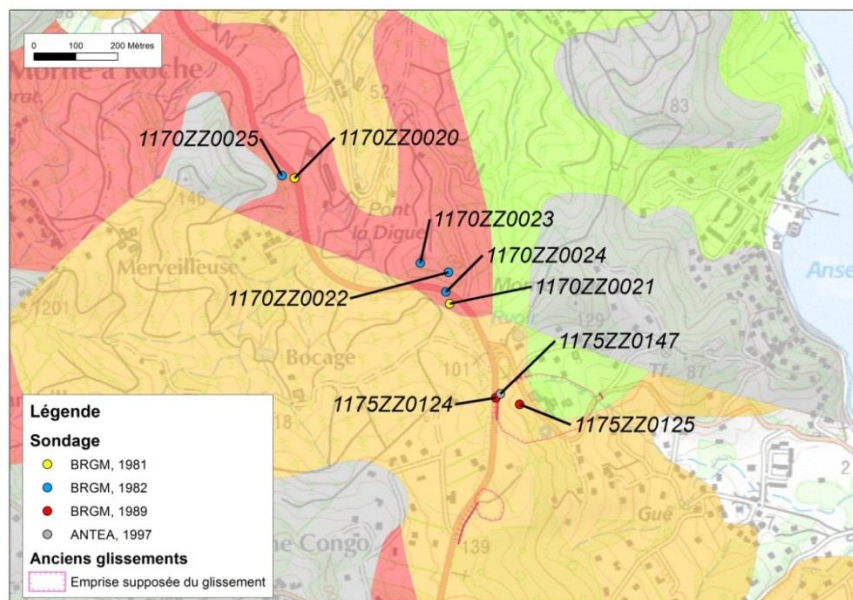


Illustration 22 - Sondages disponibles dans la BSS dans le secteur de Morne Figue

Numéro	Date	Profondeur	Profondeur du	Description des	Description du	Nature du
--------	------	------------	---------------	-----------------	----------------	-----------

			substratum	formations superficielles	substratum	substratum d'après la carte géologique
1175ZZ124	1987	23,5 m	10 m (2 m de remblai superficiel) (103 m/mer)	Argile raide, bariolée de couleur rougeâtre sur les 3 premiers mètres puis devenant brune	Lave andésitique altérée	Basalte porphyrique de Vert Pré
1175ZZ125	1987	15,5 m	9 m (88 m/mer)	Argile raide à marron avec bloc	Lave andésitique altérée	
1175ZZ147	1996	15 m	10 m	Argile d'altération	Roche	
1170ZZ21	1981	12 m		Tuf très altéré, donnant une argile plastique bariolée		
1170ZZ22	1981	25 m	11 m	Argile à argile limoneuse et sableuse	Laves autobréchifiées massives, grises, altérées	Conglomérat polygénique
1170ZZ23	1981	17,50 m	13 m	Argile à argile limoneuse et sableuse	Laves autobréchifiées massives, grises, altérées	
1170ZZ24	1981	18,50 m	> 18,5 m ?	Argile à argile limoneuse et sableuse	?	
1170ZZ25	1981	20 m	9 m	Argile très sableuse	Lave en rognon inférieur à 10 cm	

Illustration 23 - Caractéristique des sondages à proximité

3. Levés d'électromagnétisme hélicoptère

3.1. PRINCIPE DE MESURE

La théorie de l'EM appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages tels que Ward et Hohmann (1988), Telford *et al.* (1990), Nabighian et Macnae (1991) et Spies et Frisknecht (1991).

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19^e siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominant) dans le cas d'un levé EM en domaine temporel. Ceci se traduit, au premier ordre, par une sensibilité de la méthode à la conductivité/résistivité électrique du milieu.

Le système de mesure utilisé est le système SkyTEM[®] (<http://skytem.com>). Il est composé d'une boucle émettrice, d'une boucle réceptrice, d'un générateur, ainsi que différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout temps la mesure dans l'espace (cf. Illustration 24). On note également la présence d'un magnétomètre à l'avant du système ; les mesures magnétiques n'ont pas été utilisées dans la présente étude et ne sont donc pas discutées ici.

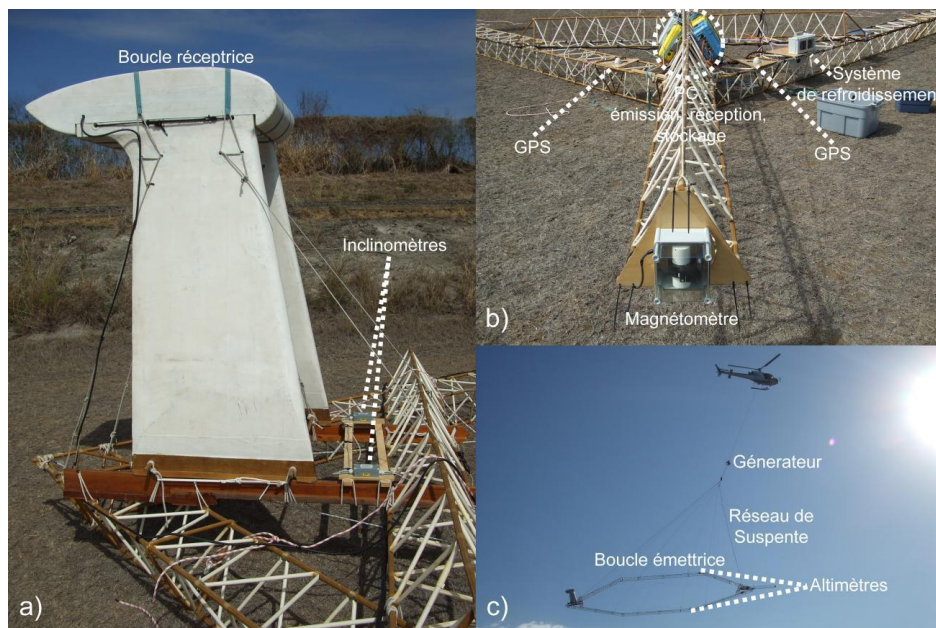


Illustration 24 - Vues du système SkyTEM[®] ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol

Un courant est injecté dans la boucle émettrice, ce qui crée un champ magnétique (primaire). Ce même courant est ensuite coupé de façon brusque entraînant alors une variation de ce champ primaire. Cette dernière résulte en l'induction de courants de Foucault dans le sous-sol, qui vont à leur tour créer un champ magnétique (secondaire), mesuré au niveau de la boucle réceptrice. Les courants s'atténuant dans le sous-sol, la donnée recueillie informera sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, qui est directement liée à la conductivité du milieu. La profondeur d'investigation de la méthode, de l'ordre de 150 m dans le cadre de cette étude, dépend de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit de la mesure ainsi que de la conductivité du sous-sol.

3.2. TRAITEMENTS DES DONNEES

3.2.1. Données de navigation

3.2.1.2. Données GPS

La position du dispositif est mesurée toutes les secondes grâce aux GPS différentiels installés à la fois sur la boucle et à la station de base. La donnée GPS est alors interpolée par ajustement polynomial et les mesures de navigation sont échantillonnées sur un pas de 0.5 s.

3.2.1.3. Données d'inclinaison

L'inclinaison est mesurée suivant l'axe de vol et sa perpendiculaire horizontale grâce aux deux inclinomètres placés sur la boucle. Un filtre médian permettant de retirer les valeurs aberrantes a été appliqué.

3.2.1.4. Données d'altitude

Il existe deux moyens de connaître l'altitude du dispositif, d'une part, grâce aux deux altimètres situés sur la boucle, d'autre part, par traitement du GPS différentiel et soustraction du modèle numérique de terrain. La première solution étant complexe et subjective, la seconde a été préférée.

3.2.2. Données EM

3.2.2.1. Acquisition des données

Le levé EM de l'île de la Martinique, effectué par SkyTEM ApS. sous maîtrise d'œuvre du BRGM, s'est déroulé du 26 janvier au 6 mars 2013. Il comprend 4233 km sous la forme de lignes de vol nord-sud et est-ouest espacées respectivement de 400 m et de 4000 m. Des zones d'intérêt pour les risques naturels (avec des enjeux) ou l'hydrogéologie ont également fait l'objet d'une densification. Celle-ci a consisté soit en l'acquisition de données supplémentaires selon une direction différente, soit en un resserrement local des lignes de vol. Lors d'un vol, la mesure est prise sans discontinuer et à pas régulier, ce qui, dans le cas du levé de l'île de la Martinique, représente en moyenne un point de donnée tous les 30 m environ. Les points de mesure acquis à proximité du glissement de la Médaille et de Morne Figue sont présentés respectivement sur les Illustrations 28 et 36.

3.2.2.2. Filtrage des données

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants », aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisant un bruit sur la donnée. Comme source de bruit naturelle, on peut citer les « sphériques », onde EM, issue de l'activité orageuse, se propageant dans la ionosphère ; les sources de bruits artificielles comprennent quant à elles toutes installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique.

Afin d'obtenir des mesures exploitables, il est donc nécessaire d'appliquer un filtre dans le but de débruiter le jeu de données. Dans le cas de la Martinique, un traitement basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières a été utilisé (Reninger *et al.*, 2011).

A l'issue de cette étape, les données sont prêtes à être interprétées d'un point de vue géophysique afin d'imager les contrastes de résistivité du sous-sol.

3.2.2.3. Inversion et préparation des données

Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol grâce aux différents signaux mesurés (i.e. ici les décroissances EM), affectés par les caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle, schématisant le sous-sol, qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie ; celui-ci est obtenu par itération de modélisations EM et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

Dans le cadre de cette étude, l'inversion utilisée considère des modèles 1D (selon la profondeur) constitués d'un nombre de couches n , chacune caractérisée par une épaisseur et une résistivité. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (cf. Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli *et al.*, 2008). Au cours de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également testée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante).

A l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D constitué de n couches et défini par n épaisseurs et résistivités sensé rendre compte des contrastes de résistivité existants en subsurface. Le nombre n est fixé avant l'inversion et dépend de notre appréhension de l'environnement géologique et de la complexité de celui-ci. Dans le cadre de cette phase 1, une inversion de type « Smooth » (i.e. de nombreuses couches d'épaisseur fixe, ici 21, dont seule la résistivité peut varier) a été réalisée. Ce type d'inversion a l'avantage d'être moins dépendant des a priori définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie) mais le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur.

L'illustration 25 présente les différents modèles obtenus le long d'une ligne de vol, la coloration étant directement lié à la résistivité.

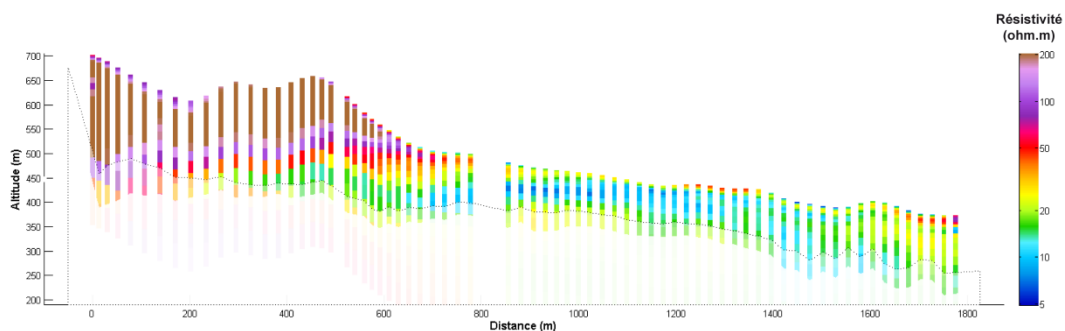


Illustration 25 – Sondages de résistivité obtenus après inversion. La profondeur d'investigation de la méthode EM est représentée par une tranche en légère transparence reflétant l'incertitude obtenu sur ce paramètre et définie par une limite haute et une limite basse (pointillé), sous la limite haute, la transparence appliquée étant nettement plus importante.

Cela nous permet d'obtenir un premier niveau d'information en termes de résistivité sur la zone d'étude, cependant la continuité 2D et 3D y est difficilement lisible.

L'information 2D est obtenue en interpolant, sur des grilles, la résistivité des couches des différents modèles incluse dans une tranche de profondeur ou d'altitude souhaitée. En répétant l'opération pour chaque tranche possible, nous obtenons une information 2D sur toute la gamme d'investigation.

L'information 3D est obtenue en agrégeant les différentes grilles interpolées au sein d'un même cube. Ce résultat nous permet alors de tracer des profils dans n'importe quelle direction et de calculer des surfaces d'iso valeur.

4. Interprétation géologique

4.1. LE SITE DE LA MÉDAILLE

4.1.1. Cartographie de résistivité 2D

L'illustration 26 présente la grille de la résistivité entre 4 et 7 m de profondeur sur laquelle ont été reportés les contours géologiques (hachures) ainsi que la localisation du glissement et des failles.

La dacite, l'andésite et les brèches dacitiques apparaissent globalement résistantes, la dacite étant la formation la plus résistante. En surface, au niveau du glissement, une formation de résistivité intermédiaire est mise en évidence, celle-ci correspondrait globalement aux éboulis dacitiques documentés (cf. Illustration 3).

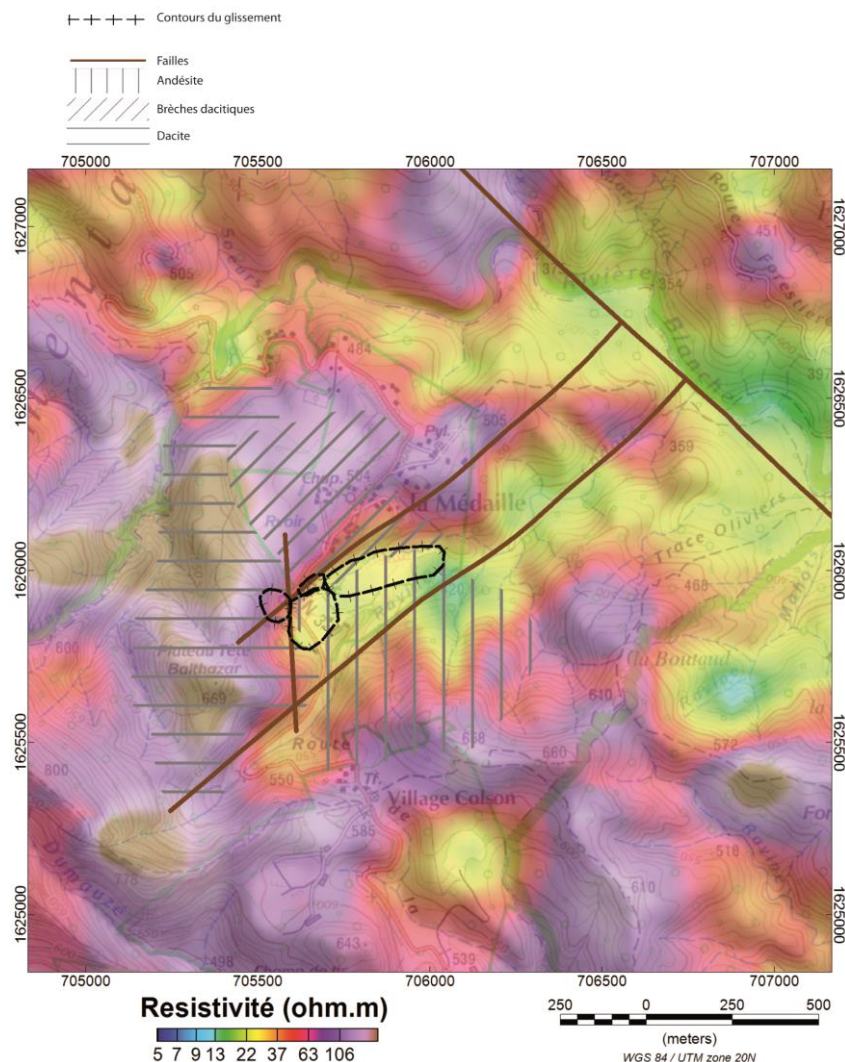


Illustration 26 – Grille de résistivité entre 4 et 7 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques

En s'intéressant maintenant à la grille de résistivité entre 38 et 47 m de profondeur (cf. Illustration 27), on s'aperçoit qu'une formation conductrice semble également être présente au niveau du glissement. On retrouve une zone très résistante au niveau de la dacite.

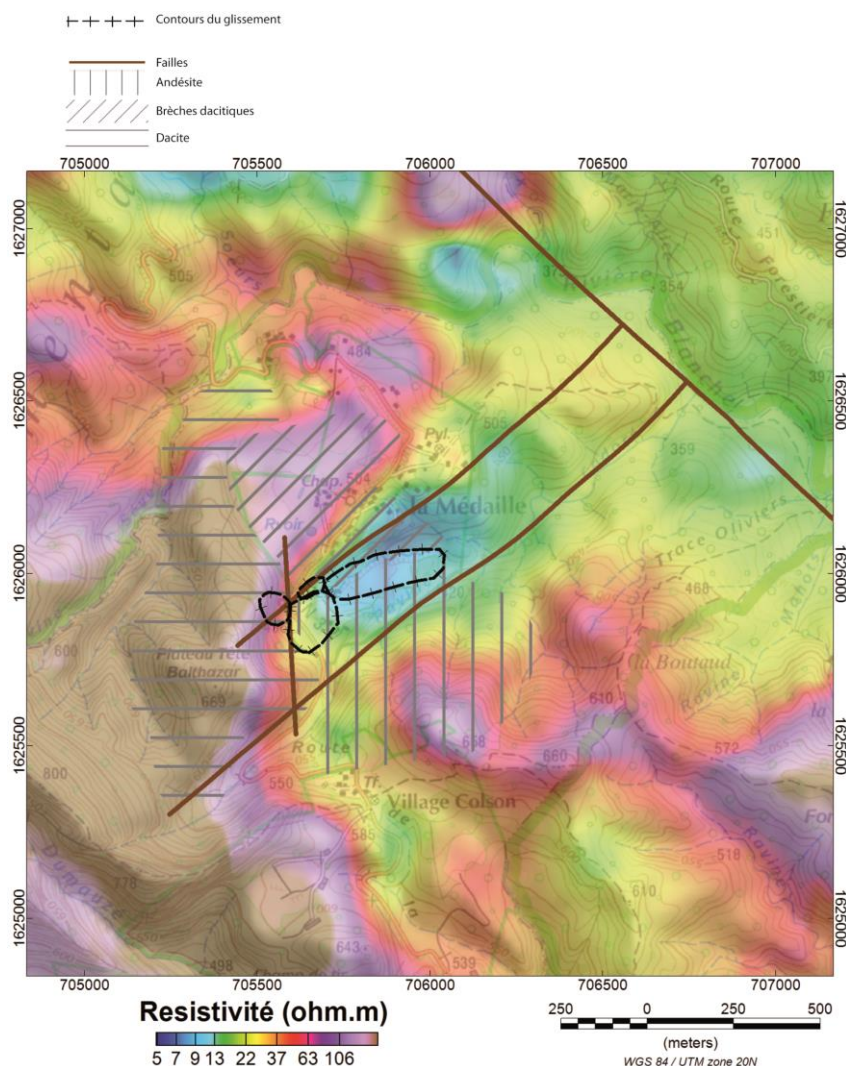


Illustration 27 – Grille de résistivité entre 38 et 47 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques

Dans le but d'interpréter au mieux les contrastes de résistivité mis en évidence, il est nécessaire de comparer ces résultats aux données documentées sur la zone d'étude.

4.1.2. Cube de résistivité 3D

Afin de comparer les résultats EM aux données géologiques (forages, failles), différentes coupes (en rouge sur l'illustration 28), cohérentes avec la localisation des points de mesure (points jaunes sur l'illustration 28), ont été tracées dans le cube de résistivité 3D.

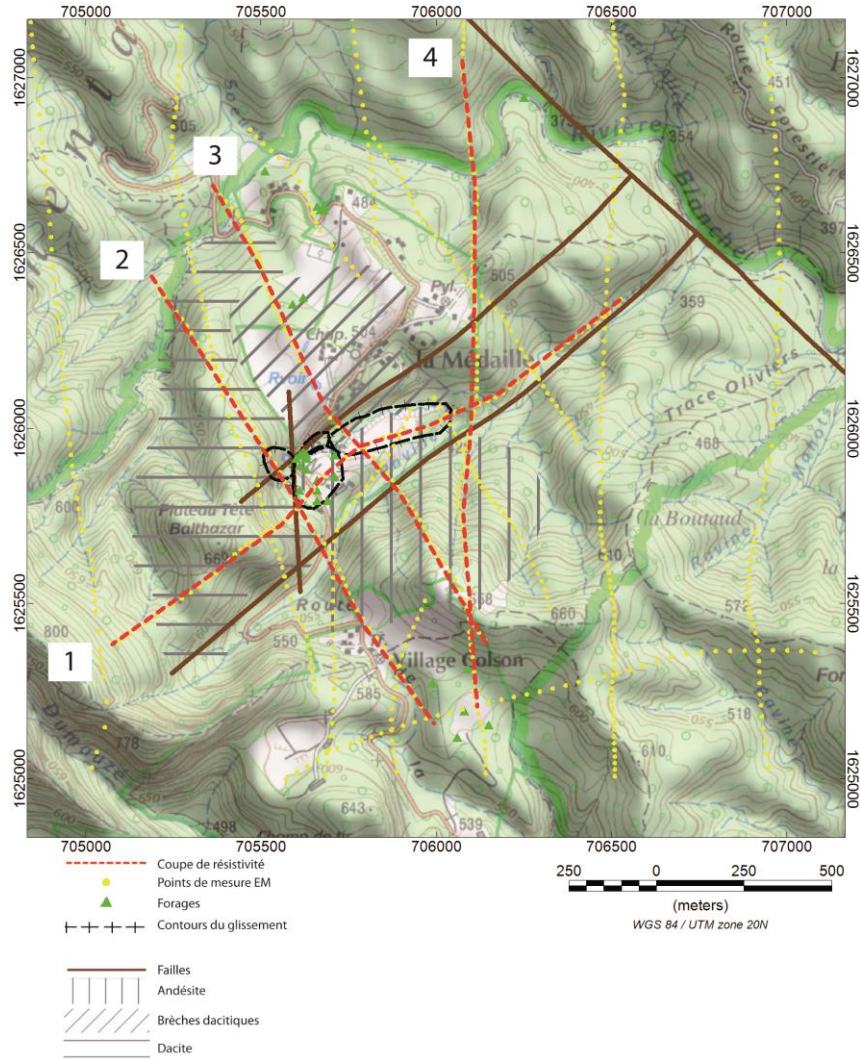


Illustration 28 – Localisation des points de mesure et des différentes coupes tracées au niveau du glissement de la Médaille. Le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques sont également reportés

Sur les coupes figurent :

- Les forages recoupés avec leur numéro BSS associé et le code couleur suivant,



- La position des failles recoupées, indiquée par un F
- L'emprise du glissement, si recoupé,
- La profondeur d'investigation de la méthode EM. Celle-ci est représentée par une tranche en légère transparence reflétant l'incertitude obtenue sur ce paramètre et

définie par une limite haute et une limite basse, sous la limite haute, la transparence appliquée étant nettement plus importante.

La première coupe (cf. Illustration 29) est orientée sud-ouest nord-est et recoupe le glissement dans sa longueur. Celle-ci peut se diviser en trois parties :

<600 m : on est en présence d'une formation très résistante (R1) correspondant au morne dacitique (cf. Illustration 28)

>600 m et <1200 m : trois couches sont clairement mises en évidence. En surface, on note la présence d'une fine couche conductrice (C1) pouvant correspondre à un niveau plutôt argileux comme décrit dans les différents forages. En très proche surface, on observe une couche plus résistante (R2). D'après les forages, celle-ci pourrait être assimilée aux formations détritiques : les éboulis dacitiques et les coulées de débris andésitiques, l'interface entre les deux formations ne semblent pas pouvoir être clairement déterminée. En-dessous, une couche conductrice épaisse (C2) est présente. D'après le forage 1173ZZ0028, seul sondage à recouper l'horizon C2, cette couche correspondrait à de l'andésite fortement altérée au niveau de la première passe et décrite comme plus saine au niveau de la seconde. Il s'agit de la même formation conductrice repérée sur l'illustration 27. Sa conductivité relativement importante ne peut être expliquée qu'avec ces seules données, l'altération ou la saturation en eau (minéralisée) pouvant par exemple en être la raison. Cette couche apparaît de première importance dans l'étude du glissement de la Médaille ; la première explication basée sur la présence du fin horizon argileux pour justifier le glissement (cf.2.1.3) ne semble plus du tout évidente à la vue de ces nouvelles données. Plus en profondeur, on note l'existence d'une formation plus résistante (R3). En l'absence de données, il est difficile d'en donner une interprétation, cependant, d'après le contexte géologique, il s'agirait probablement d'andésite. On observe également que la faille semble impacter directement la géométrie des différentes formations : R2 apparaît plus épais à l'aplomb de celle-ci tandis que C2 et R3 s'approfondissent.

>1200 m : la proximité avec la faille rend la géologie complexe, nous sommes, de plus, plus sensibles à de possibles effets 3D venant biaiser la résistivité imagée. Il semblerait cependant que l'on retrouve le niveau andésitique R3.

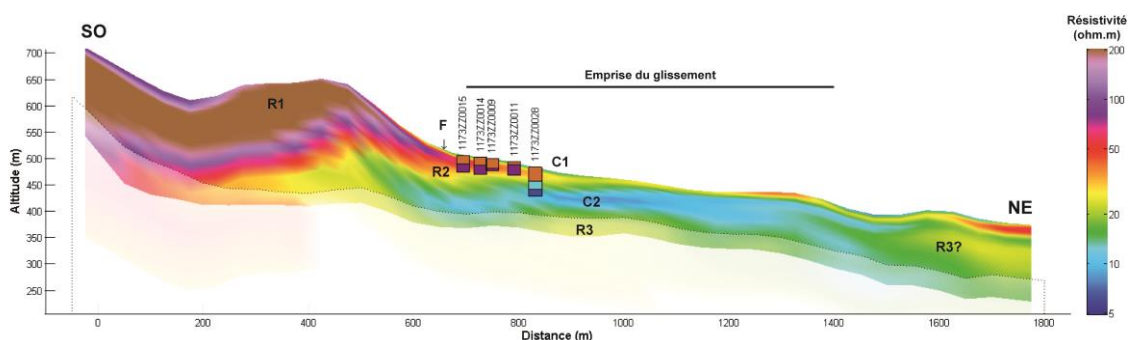


Illustration 29 – Coupe de résistivité 1 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés

La seconde coupe (cf. Illustration 30) est orientée nord-ouest sud-est, à l'amont du glissement. On retrouve le niveau dacitique R1 (cf. Illustration 28), ainsi que l'extrémité de la couche conductrice C2, approfondie sous l'effet de la faille nord sud. L'extension de celle-ci apparaît alors contrainte par la présence des deux failles sud-ouest nord-est. Au sud, la coupe recoupe le morne andésitique (R4 ; cf. Illustration 28). On note la présence d'une couche conductrice C3, pouvant indiquer l'existence d'un horizon altéré/argilisé, ainsi qu'une couche plus résistante R2bis qui imagerait la coulée de débris andésitique recoupée par la coupe 1.

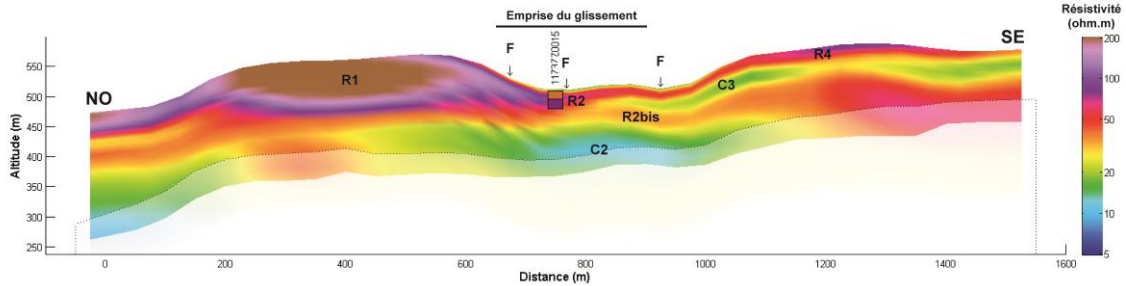


Illustration 30 – Coupe de résistivité 2 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés

La troisième coupe (cf. Illustration 31) est orientée nord-ouest sud-est et recoupe le glissement principal en son centre.

<800 m : on observe en surface la présence d'une couche résistante (R5) cohérente avec la présence du plateau de brèche dacitique (cf. Illustration 28). On note également l'existence en profondeur d'une couche conductrice, qui pourrait également correspondre à de l'andésite C2.

>800 m et <1000 m : on retrouve les différents niveaux C1, R2, C2, R3

>1000 m : la formation résistante correspondrait au morne andésitique R4 mis en évidence sur l'illustration 28

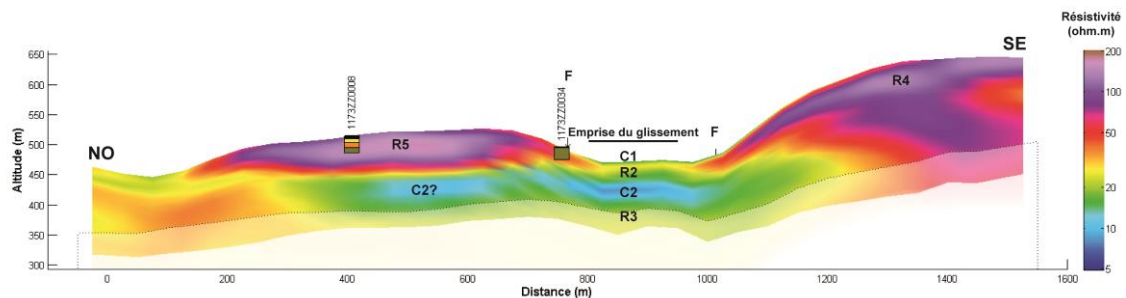


Illustration 31 – Coupe de résistivité 3 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés

La quatrième coupe (cf. Illustration 32) est orientée nord sud et recoupe la limite aval du glissement. La géométrie des formations apparaît très liée à la structurale.

<800 m : on manque de données pour pouvoir interpréter cette partie. Cependant, si l'on se fie aux gammes de résistivité, on retrouve une couche conductrice et une couche plus résistante que l'on pourrait interpréter respectivement comme de l'andésite C2 et R3.

>800 m et <1500 m : on retrouve un niveau de brèche dacitique (R5) en surface (cf. Illustration 28). Plus en profondeur, la couche conductrice correspondrait aux andésites C2 et enfin la dernière formation serait le substratum andésitique R3. C2 semble s'approfondir sous l'effet de la faille normale (~1100 m).

>1500 m : on retrouve le morne andésitique R4 (cf. Illustration 28). On note également la possible présence d'andésite plus altérée en proche surface (C3) comme le laisse supposer le forage 1173ZZ0022.

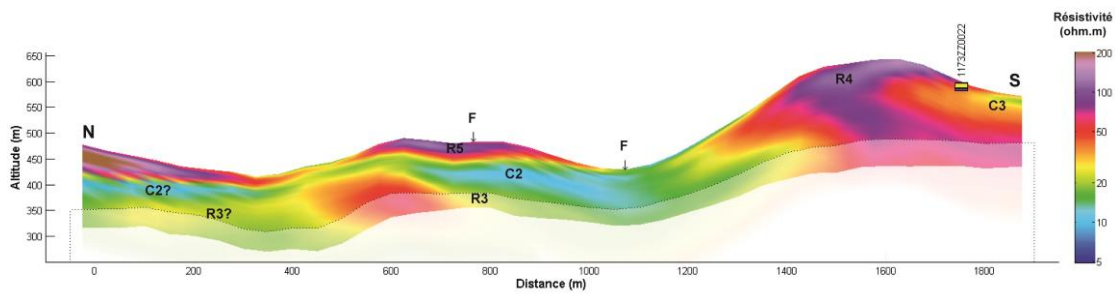


Illustration 32 – Coupe de résistivité 4 (cf. Illustration 28). Les forages à proximité ont été projetés

Afin de mieux appréhender les différentes continuités qui existent entre les profils et les formations, une visualisation de ces mêmes profils en 3D est présentée Illustration 33.

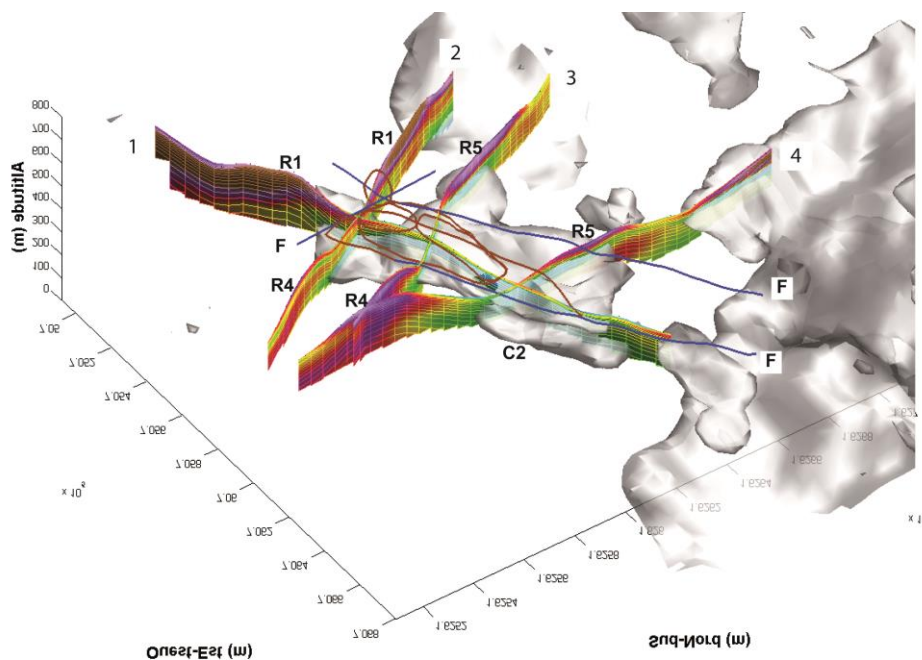


Illustration 33 – Visualisation 3D des coupes tracées dans le cube 3D (cf. Illustration 28) ainsi que de l'iso résistivité 15 ohm.m. Le contour du glissement de terrain, les failles documentées sont également reportés

On observe que la couche conductrice C2 est présente tout le long du glissement principal, le calcul de l'iso résistivité associée à C2 (15 ohm.m) venant appuyer cette observation. Ce niveau semble particulièrement intéressant pour l'étude du glissement de la Médaille. En effet, ses caractéristiques peuvent s'apparenter à celles d'une couche imperméable/argileuse et/ou possiblement saturée en eau. Elle pourrait donc correspondre à la semelle du glissement sur laquelle C1 et R2 serait mis en mouvement. La prise en compte de ce niveau pourrait permettre de mieux appréhender la mécanique de glissement à la Médaille. Il se peut cependant que la cause du glissement soit bien plus superficielle et liée à la présence de R2 ou C1. Seules des modélisations, prévues en phase 2, s'appuyant sur les résultats EM pourront permettre de mieux appréhender le rôle des différentes formations dans le glissement de la Médaille.

En conclusion, sur la Médaille :

- Mise en évidence de certains contrastes lithologiques (e.g. dacite, andésite)

- Mise en évidence d'un horizon particulièrement conducteur au sein de la formation andésitique, dont l'emprise est cohérente avec celle du glissement et au niveau de laquelle se situerait la semelle de glissement.
- Possibilité de quantifier l'emprise et le volume des formations mobilisables

4.2. LE SITE DE MORNE-FIGUE

4.2.1. Cartographie de résistivité 2D

Il faut noter que la densité et la répartition des mesures EM (points jaunes sur l'illustration 36) est moins bonne que pour le premier cas d'étude, ce qui peut rendre plus difficile la lecture cartographique. En effet, pour exemple, aucune mesure n'a été effectuée dans la partie est-sud-est.

L'illustration 34 présente la grille de la résistivité entre 2 et 4 m de profondeur sur laquelle ont été reportés les contours géologique (motifs) ainsi que la localisation des glissements.

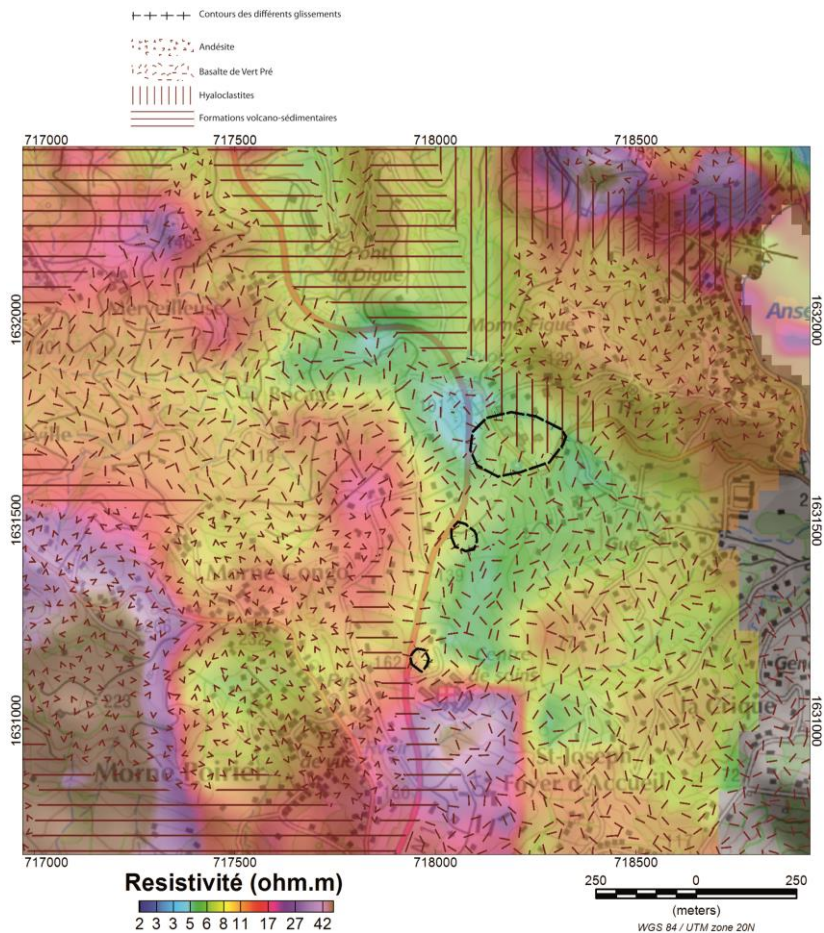


Illustration 34 – Grille de résistivité entre 2 et 4 m de profondeur sur laquelle sont reportés les contours des glissements de terrain et les contours géologiques

Le lien entre la résistivité et la lithologie est moins évident que pour le glissement de la Médaille. Cela pourrait confirmer l'effet plus prononcé d'autres facteurs. En effet, la relation

entre lithologie et résistivité n'est pas univoque et dépend également du degré d'altération et/ou de la nature et de la saturation en fluide, l'eau apparaissant ici comme un facteur clef d'après le contexte dressé (cf. 2.2.3). Etant donné le niveau global d'altération sur le site de Morne Figue, la gamme de résistivité est globalement faible (< 50 ohm.m), en surface, les andésites et les formations volcano-sédimentaires occupent la tranche haute et le basalte de vert Pré la tranche basse

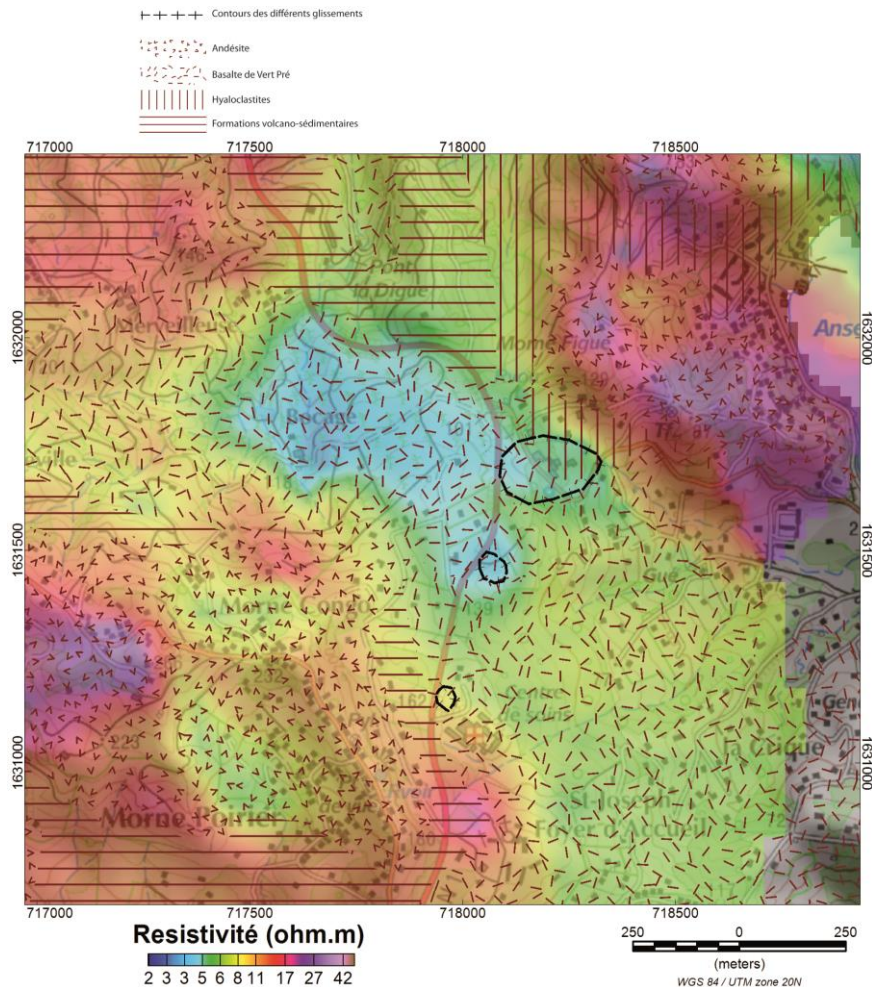


Illustration 35 – Grille de résistivité entre 19 et 24 m de profondeur sur laquelle sont reportés les contours des glissements de terrain et les contours géologiques

Entre 19 et 24 m (cf. Illustration 35) on retrouve des contrastes dans les mêmes ordres de grandeur. Toutefois, cette profondeur met en évidence la présence d'une zone très conductrice (en bleue, < 5 ohm.m), au niveau du Bocage et des deux glissements sur lesquelles des points de mesure ont été acquis (cf. Illustration 36).

Afin d'interpréter au mieux les contrastes observés, il est nécessaire de confronter ces résultats aux données documentées.

4.2.2. Cube de résistivité 3D

Afin de comparer les résultats EM aux données géologiques (forages), différentes coupes (en rouge sur l'illustration 36), cohérentes avec la localisation des points de mesure (points jaunes sur l'illustration 36), ont été tracées dans le cube 3D.

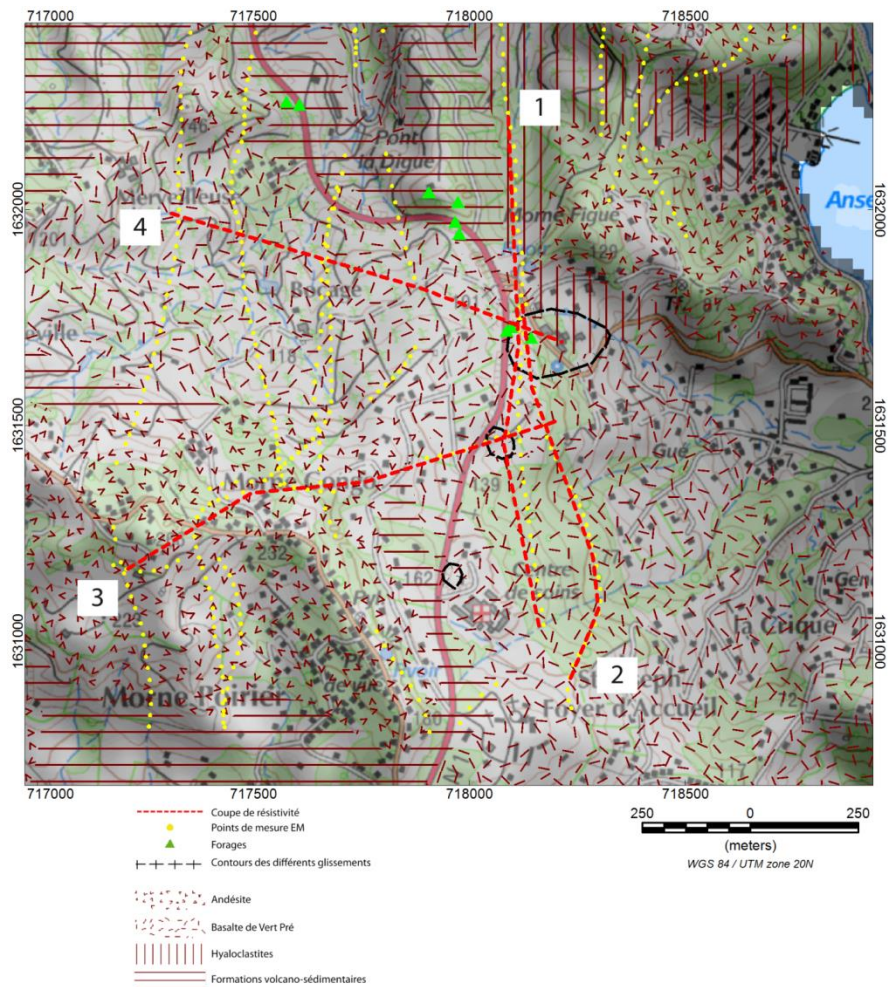


Illustration 36 – Localisation des points de mesure et des différentes coupes tracées au niveau du glissement de Morne Figue. Les contours géologiques et des glissements de terrain sont également reportés

Sur les coupes figurent :

- Les forages recoupés avec leur numéro BSS associé et le code couleur suivant
 - Argile (Blue)
 - Lave altérée (Red)
- La position des failles recoupées
- L'emprise des glissements recoupés
- La profondeur d'investigation de la méthode EM. Celle-ci est représentée par une tranche en légère transparence reflétant l'incertitude obtenu sur ce paramètre et

définie par une limite haute et une limite basse, sous la limite haute, la transparence appliquée étant nettement plus importante

La première coupe (cf. Illustration 37) est orientée nord sud et recoupe les glissements de 2004 et 1977 (cf. Illustration 36). Trois formations apparaissent distinctement à l'aplomb des deux glissements.

- un conducteur C1 très marqué, qui se superpose exactement à l'emprise des deux glissements. D'après les forages, ce conducteur correspondrait à une lave altérée. A l'instar de l'étude sur le glissement de la Médaille, la présence de cette formation conductrice à l'aplomb des glissements n'est probablement pas anodine, celle-ci pouvant mettre en évidence l'existence, à environ 10 m de profondeur, d'une couche possédant des propriétés particulières affectée ou interagissant probablement avec les écoulements souterrains.
- une formation R1 en surface, globalement plus résistante, que l'on pourrait assimiler à des argiles d'altération (cf. forages)
- une formation R2 également plus résistante en profondeur qui correspondrait aux basaltes de Vert Pré, plus sains. Cette formation est présente tout le long du profil, de manière cohérente avec le contexte géologique.

Au nord, la formation résistante de proche surface pourrait correspondre aux hyaloclastites, le jeu supposé d'une faille pouvant être observé à ~400m.

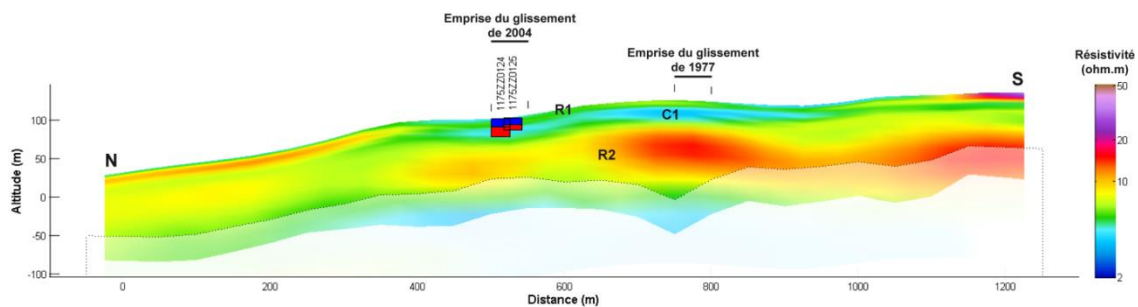


Illustration 37 – Coupe de résistivité 1 (cf. Illustration 36). Les forages à proximité ont été projetés

La seconde coupe (cf. Illustration 38) est orientée nord sud et recoupe seulement le glissement de 2004 (cf. Illustration 36). A l'aplomb du glissement, on retrouve les trois formations R1, R2 et C1. Ici, également, on s'aperçoit que l'horizon C1 se superpose exactement à l'emprise du glissement, justifiant le rôle particulier que joue cet horizon dans le déclenchement de l'instabilité. A l'inverse, à l'est du glissement de 1977, le contraste R1/C1 disparaît au profit d'une formation C2 plus résistante que C1. Si C2 est susceptible de correspondre à l'altération du substratum (argile et/ou basalte altéré), le contraste entre R1 et C1 pourrait se justifier par une saturation en eau particulière, ce qui corroborerait les hypothèses de glissement définies par Allard (1978, 1989). Une variation latérale du degré d'altération reste possible mais moins probable.

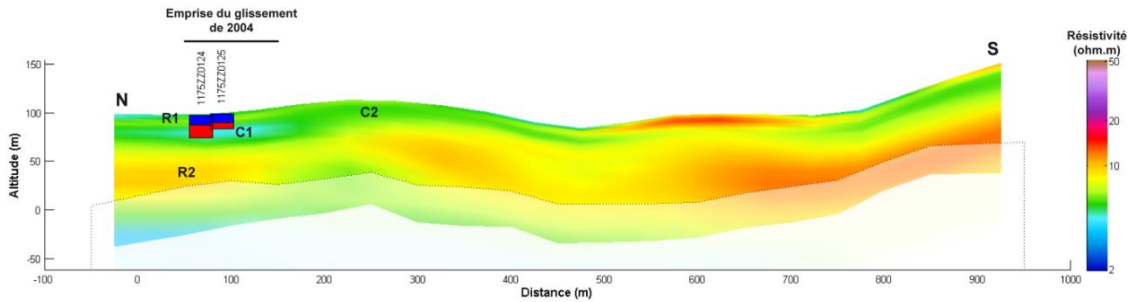


Illustration 38 – Coupe de résistivité 2 (cf. Illustration 36). Les forages à proximité ont été projetés

La troisième coupe (cf. Illustration 39) est orientée ouest est et recoupe le glissement de 1977 (cf. Illustration 36). On retrouve la présence de l'horizon C1 exactement à l'aplomb du glissement. Le résistant R3 en surface correspondrait aux andésites (plus ou moins altérées) du morne Congo (cf. Illustration 36). Nous manquons cependant de données pour interpréter le reste des contrastes.

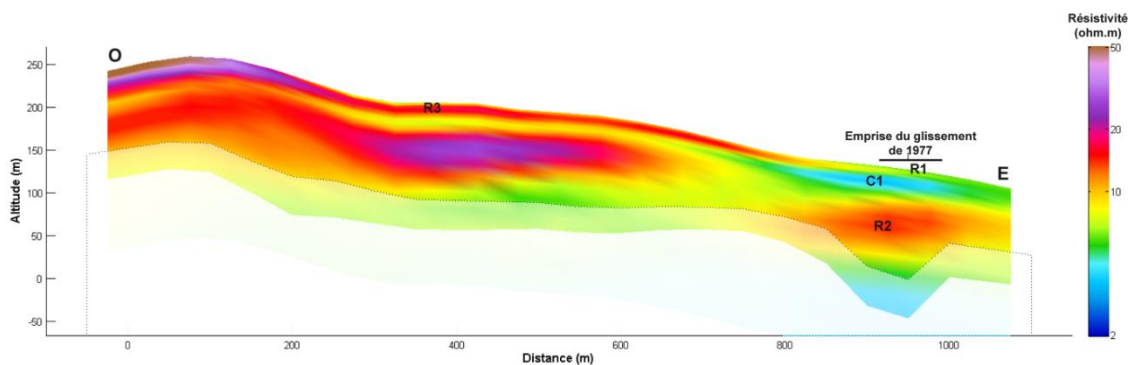


Illustration 39 – Coupe de résistivité 3 (cf. Illustration 36)

La quatrième coupe (cf. Illustration 40) est orientée ouest est et recoupe le glissement de 2004 à son extrémité est (cf. Illustration 36). De manière cohérente aux coupes 1 et 2, on retrouve les formations R1, R2 et C1. Toutefois, ce profil met également en évidence la présence d'une épaisse formation similaire à C1 (tout du moins en termes de résistivité) au niveau du Bocage (cf. Illustration 36), recouverte par un horizon plus résistant de type R1. A première vue, le secteur du Bocage présente les mêmes conditions et donc le même niveau de susceptibilité au glissement que l'aval de la RN3. Il n'est par ailleurs pas exclu que des glissements aient eu lieu dans cette zone, absolument pas anthropisée donc beaucoup moins suivie et documentée. La phase 2 pourra nous permettre de mieux appréhender cette question et de comprendre le rôle de chaque formation dans le glissement de Morne Figue.

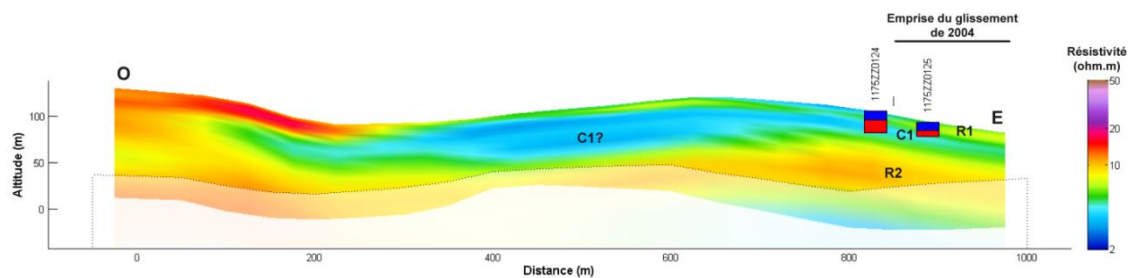


Illustration 40 – Coupe de résistivité 4 (cf. Illustration 36). Les forages à proximité ont été projetés

Afin de mieux appréhender les différentes continuités qui existent entre les profils une visualisation de ces mêmes profils en 3D est présentée Illustration 41.

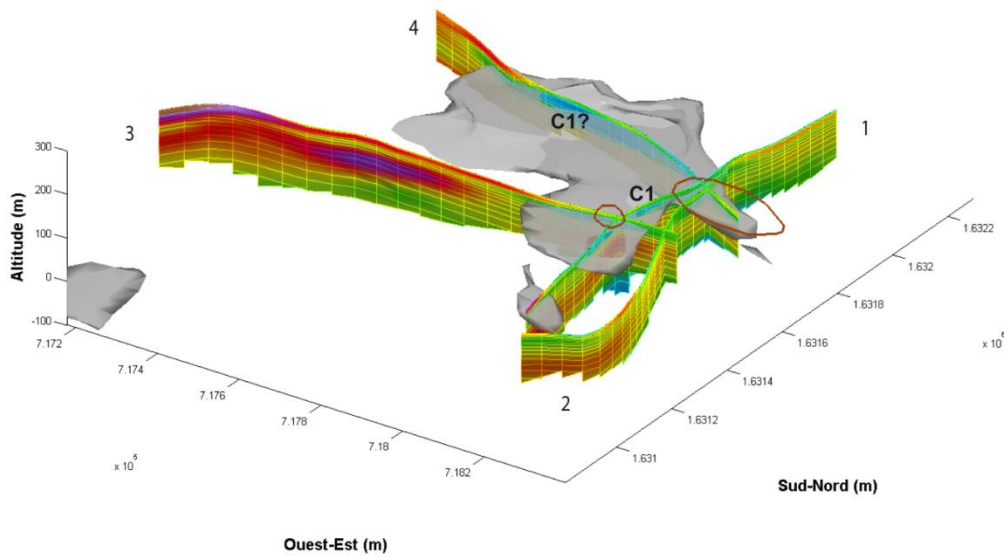


Illustration 41 – Visualisation 3D des coupes tracées dans le cube 3D (cf. Illustration 36) ainsi que de l'iso-résistivité 5 ohm.m. Les contours des glissements de terrain sont également reportés

On constate que C1 est présent à l'aplomb des glissements, mais, comme observé précédemment, également plus à l'est. L'extension de la formation est visible au travers du calcul de l'iso-résistivité 5 ohm.m entre 5 et 50 m de profondeur.

En conclusion, sur Morne Figure :

- Mise en évidence d'un horizon qui pourrait justifier les instabilités observées et qui pourrait correspondre à des nuances de saturation en eau au sein d'un horizon altéré
- Mise en évidence de secteur dans les mêmes conditions et donc, a priori, avec les mêmes niveaux de susceptibilité au glissement

5. Conclusion

L'objectif de l'étude est de mettre en place une méthodologie permettant l'interprétation conjointe des mesures EM et de données plus classiques, telles que les paramètres géotechniques, géologiques et hydrogéologiques, pour la caractérisation des glissements de terrain. Seule la phase 1 de ce projet, dont l'objectif était de démontrer l'exploitabilité de la méthode électromagnétique à la caractérisation des glissements, est rapportée ici. Cette phase 1 a été réalisée sur deux glissements de terrain, la Médaille et Morne-Figue, sur lesquels de nombreuses données géologiques et hydrogéologiques sont disponibles. Après analyse de cette information, celle-ci a permis de contraindre l'interprétation des résultats.

Au niveau des deux glissements, l'EM a mis en évidence des contrastes de résistivité pouvant être reliés aux différentes formations en présence. Ces derniers apportent donc de nouvelles informations sur l'environnement géologique, et permettent alors de mieux appréhender le glissement. Des différences au sein même des formations ont pu également être observées. Ainsi, la présence de couches fortement conductrices a pu être constatée à l'aplomb des différentes zones de glissement connues. Celle mise en évidence au niveau de la Médaille a de plus, permis de révéler un contraste assez prononcé au sein des andésites, ce dernier ne ressortant pas de manière évidente à la lecture des descriptions des forages. Ces formations conductrices apparaissent cependant comme essentielles pour la compréhension des deux glissements. En effet, leurs caractéristiques peuvent refléter la présence d'un horizon imperméable/argileux et/ou possiblement saturé en eau, qui constituerait la semelle des glissements étudiés

Après interprétation, les résultats EM permettent d'avoir accès à l'extension, l'épaisseur et la profondeur des formations en présence. Ces nouveaux paramètres seront intégrés à la modélisation prévue en phase 2, et utilisés conjointement aux données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques existantes pour tester les différentes hypothèses afin de s'approcher au mieux du modèle réel de glissement.

Le fait d'avoir deux sites contrastés a apporté une information robuste sur l'exploitabilité de l'EM, notamment concernant les grandeurs de résistivité observées. Par ailleurs, cela tend à montrer la différence d'exploitabilité de l'EM selon le contexte :

- Sur le site de la Médaille, les contrastes de résistivité sont relativement bien marqués entre les différentes lithologies, nous apportant alors des informations sur les contrastes lithologiques. Or, il se trouve que le glissement de la Médaille est de grande ampleur et essentiellement guidé par la nature lithologique ;
- Sur le site de Morne Figue, les contrastes de résistivité entre les différentes lithologies sont moins marqués. Cependant, au sein d'une même lithologie, ils mettent en évidence des nuances de saturation en eau ou d'altération, susceptibles d'expliquer les glissements observés. Il se trouve que les glissements redoutés à Morne Figue sont d'ampleur plus limitée.

Cette première analyse tend à montrer que l'exploitation des données EM pour la caractérisation d'un glissement de terrain doit prendre en compte le contexte lithologique ainsi que la dimension des événements.

6. Bibliographie

- Allard J.F., Bove Y., 1978. CD25 BIS. Etude Géotechnique du glissement survenu au quartier Morne Congo à Trinité (Martinique). BRGM/78-ANT-004.
- Allard J.F., 1989. RN1 carrefour Nord de Trinité – glissement du Morne Figue – Trinité – Martinique, Etude géotechnique. Rapport n°89 MTQ 082, 11p.
- Audru J.C, Bitri A., Desprats J.F., Dominique P., Euchet G., Jossot O., Mathon C., Nédellec J.L., Sabourault P., Sedan O., Stollsteiner P., Terrier-Sedan M., 2010. Major natural hazards in a tropical volcanic island: a review for Mayotte Island, Indian Ocean. Engineering Geology 114, 364-381.
- Barras A. V., Ollagnier S., 2007. Glissement de terrain dans le secteur de Morne Figue Trinité – Martinique : Etude hydrogéologique et campagne géophysique. Rapport n° BRGM/RP-55469-FR. P72.2007
- Barras A-V., Vanoudheusden L., Le Moigne B., Bayle E., 2010. Intempéries du 5 mai 2009 en Martinique et mouvements de terrain associés : interventions en situation de crise, inventaire post-crise et retour d'expérience. Rapport BRGM/RP-58851-FR. 73 p., 47 ill., 5 tableaux, 6 annexes
- Belz H., Chalivat P., 1996. R.N. 3, Lieu-dit "La Médaille", Fort de France, Martinique - Reconnaissances géologiques et géotechniques dans la partie Nord du glissement de terrain. Synthèse des connaissances et recommandations. Rapport BRGM N 2342, Septembre 1996, 16 p., 2 fig., 3 tabl., 5 ann.
- Deneufbourg G., 1967. Compte rendu de la reconnaissance de terrain au lieu-dit "La Médaille" - Fort de France (Martinique) - 15 novembre 1966. BRGM
- Deneufbourg G., 1968. Etude géologique des glissements de la Trace (R.N. 3) entre camp de Balata et le quartier propreté (Martinique). Décembre 1968. BRGM 68 RME 024 ANT
- Dubois L., 2003. Mission « Mouvement de terrain ». Les 20 et 21 mars 2003. Rapport CETE Normandie-Centre pour la Direction Départementale de la Martinique. Affaire n°8482
- d'Ozouville N., Auken E., Sorensen K., Violette S., de Marsily G., Deffontaines B., Merlan G., 2008. Extensive perched aquifer and structural implications revealed by 3D resistivity mapping in a Galapagos volcano. Earth and Planetary Science Letters 269, 517-521
- Humbert M., 1986. Mouvement de terrain sécurité et aménagement du quartier de la Médaille (commune de Fort de France). BRGM 86 MQE 035
- Jørgensen F., Sandersen P.B.E., Auken E., 2003. Imaging buried Quaternary valleys using the transient electromagnetic method. Journal of Applied Geophysics 53, 199-213
- Nabighian M.N., Macnae J.C., 1991. Time domain electromagnetic prospecting methods. Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic methods in applied geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 2, part A, 427-520

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, 135 p.

Reninger P.-A., Martelet G., Deparis J., Perrin J., Chen Y., 2011. Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics* 75, 264-276

Sedan. O., 2002. Glissement de La Médaille du 17 Septembre 2002 (RN3 – PR 15, commune de Fort-De-France, Martinique). Compte rendu de la visite du 21/11/2002. Avis sur l'évaluation du risque et la démarche de prévention

Spies B.R., Frischknecht F.C., 1991. Electromagnetic sounding. Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, 2, part A, 285-425

Supper R., Baron I., Ottowitz D., Motschka K., Gruber S., Winkler E., Jochum B., Römer A., 2013. Airborne geophysical mapping as an innovative methodology for landslide investigation: evaluation of results from the Gschliefgraben landslide. Austria. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Disc.* 1, 2281-2318

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., 1990. *Applied geophysics*, Second Edition. Cambridge University Press, 828 p.

Viezzoli A., Christiansen A.V., Auken E., Sørensen K., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* 73, F105-F113

Viezzoli A., Tosi L., Teatini P., Silvestri S., 2010. Surface water-groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: The Venice Lagoon example. *Geophysical research letters* 37, L01402

Vittecoq B., Deparis J., Violette S., Jaouën T., Lacquement F., 2013. 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 Original Research Article *Journal of Hydrology* 509, 519-538.

Ward S.H., Hohmann G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications. Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists 1, 131-311

Westercamp D., Andreieff P., Bouysse P., Cottez S. et Battistini R., 1989. Notice explicative de la carte géologique à 1/50000 de la Martinique, éditions BRGM. 286p.

Westercamp D., Pelletier B., Thibault P.M., Traineau H., 1990. Carte géol. France (1/50000), feuille Martinique. – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières.



Centre scientifique et technique
Direction risques et prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr