

Document public



# Investigations géophysiques du secteur de Grand-Ilet (Salazie)

Rapport final

BRGM/RP-61360-FR

Novembre 2016

PO FEDER 2007-2013 - Mesure 3-20  
Soutenir la Recherche et Développement  
sur les phénomènes de risque naturel

**Module 3** - Étude et modélisation du comportement des  
mouvements de terrain de grande ampleur

## MvTerre 2

*Détection, suivi et modélisation des Mouvements de Terrain  
de grande ampleur dans les cirques de La Réunion*





# Investigations géophysiques du secteur de Grand-Ilet (Salazie)

Rapport final

**BRGM/RP-61360-FR**

Novembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Recherche du BRGM PDR09REU01

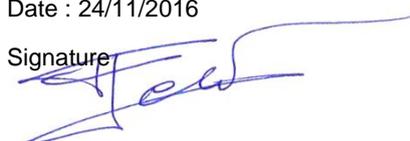
**Baltassat J-M., Roulle A, Bitri A., Belle P., Aunay B.**

**Vérificateur :**

Nom : F. Lebert

Date : 24/11/2016

Signature :



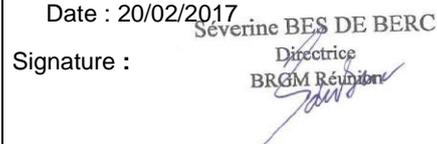
**Approbateur :**

Nom : S. BES DE BERG

Date : 20/02/2017

Signature :

Séverine BES DE BERG  
Directrice  
BRGM Réunion



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** : profil géophysique, méthode sismique, panneau électrique, brèche volcanique, glissement terrain, risque naturel, La Réunion (974), Salazie

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Baltassat J-M., Roulle A, Bitri A., Belle P., Aunay B. (2016) – MvTerre-2 : Investigations géophysiques du secteur de Grand-Ilet (Salazie). Rapport BRGMP RP- 61360-FR. 51 p.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Dans le cadre de la mesure 3-20 "Soutenir la Recherche et Développement sur les phénomènes de risque naturel", MvTerre-2 est un projet de recherche cofinancé par le PO FEDER 2007-2013, le FIDOM, la Région Réunion et le BRGM.

L'île de La Réunion se singularise par la coexistence de plusieurs paramètres majeurs de prédisposition aux mouvements de terrains de grande ampleur (supérieure au million de m<sup>3</sup>) : (i) relief très marqué avec un point culminant à 3 069 m, des escarpements exceptionnels pouvant atteindre 1 500 m de dénivelé pour une pente moyenne excédant 70°, des vallées et des cirques naturels très encaissés ; (ii) géologie jeune avec un édifice volcanique s'étant développé il y a moins de 3 millions d'années ; (iii) climat tropical humide, La Réunion détenant tous les records mondiaux de précipitation entre 12 heures (1144 mm) et 15 jours (6083 mm).

Le projet MvTerre-2 s'organise autour de trois objectifs principaux :

- > **M1 - Analyse des paramètres géomorphologiques de prédisposition.** Il s'agit d'établir les relations entre la géologie, le relief, l'hydrologie, l'hydrogéologie et les mouvements de grande ampleur ;
- > **M2 - La poursuite de la détection et du suivi des mouvements de terrain de grande ampleur** vise à compléter l'instrumentation et le suivi des glissements de terrain (GPS fixe, réseau géodésique, débit des sources, piézométrie, méthodes spatiales...) ;
- > **M3 - L'étude et la modélisation du comportement des mouvements de grande ampleur.** Il s'agit d'analyser l'ensemble des données acquises dans les autres modules du projet. La finalité est de réaliser un modèle numérique de comportement sur le site de Grand-Ilet, visant à simuler les comportements réellement observés.

Le présent rapport vise à présenter l'ensemble des investigations géophysiques (ERT, MASW et H/V) réalisées sur le secteur de Grand-Ilet dans le cadre du module 3 du programme de recherche MvTerre-2. La finalité des campagnes géophysiques était d'imager la surface de glissement, c'est-à-dire l'interface entre les matériaux en mouvement et le substratum.

Les tomographies de résistivité réalisées, malgré d'importantes difficultés de terrain et sous la supervision du BRGM, ont permis de mettre en évidence de nouvelles structures au sein du glissement de Grand-Ilet. Les tomographies révèlent des formations résistantes dans la partie Est de Grand-Ilet qui peuvent marquer le substrat du glissement.

En ce qui concerne la méthode H/V, on constate que les profondeurs obtenues par les mesures géophysiques (interprétations Grilla) sont du même ordre de grandeur que celles du modèle géologique ce qui permet de renforcer les interprétations de ces deux méthodes indirectes.

Des interprétations déduites des données géophysiques et géologiques sont proposées par Belle (2014) : *le modèle géologique établi met en évidence que le pendage de la base du glissement évolue spatialement. Il est orienté vers le sud-est au niveau des unités du Bélier et de Camp Pierrot, alors qu'il est majoritairement orienté vers le nord-est pour l'unité de Grand Ilet et de Casabois. En outre, la base du glissement montre une pente plus importante en direction de l'est au niveau du secteur est bordant la rivière des Fleurs Jaunes.*

*Après interpolation des isobathes, les paramètres caractéristiques du glissement peuvent être évalués à partir du modèle géologique. Les volumes instables sont calculés en soustrayant la surface interpolée de la base du glissement au modèle numérique de terrain. A l'échelle de l'unité active de Grand Ilet, le pendage moyen de la zone de cisaillement basale est de  $6,5^\circ$  en direction du nord-est. Et le volume mobilisé par cette unité est estimé à  $175 \text{ Mm}^3$ .*

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Contexte des investigations géophysique sur le secteur de Grand Ilet.....</b>	<b>11</b>
2.1. PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE.....	11
2.2. DONNEES ANTERIEURES (D'APRES BELLE, 2014).....	12
2.2.1. Investigations géophysiques des structures profondes.....	12
2.2.2. Investigations géophysiques des structures à faible profondeur (< 300 m)13	
<b>3. Supervision des tomographies géoélectriques réalisées par Stratagem974... 17</b>	<b>17</b>
3.1. DEROULEMENT DES OPERATIONS .....	17
3.1.1. Contexte.....	17
3.1.2. Opérations de terrain.....	17
3.1.3. Interprétation et rapport.....	18
3.2. ANALYSE QUALITE DES DONNEES.....	19
3.3. INTERPRETATION DES RESULTATS .....	21
3.3.1. Comparaison avec les données géologiques disponibles.....	21
3.3.2. Modélisation du sill résistant.....	22
3.3.3. Indétermination de la profondeur des interfaces.....	23
<b>4. Investigations sismiques.....</b>	<b>27</b>
4.1. METHODOLOGIE .....	27
4.1.1. Méthode H/V bruit de fond sismique.....	27
4.1.2. Principe de la méthode des ondes de surface. ....	31
4.2. DESCRIPTION DES INVESTIGATIONS DE TERRAIN BRGM.....	33
4.3. INTERPRETATION .....	34
4.4. DISCUSSION (D'APRES BELLE, 2014).....	37
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>41</b>
5.1. CONCLUSION SUR LES METHODES ELECTRIQUES MISES EN OEUVRE	41
5.2. CONCLUSION SUR LES METHODES SASW ET H/V MISES EN OEUVRE ..	42

5.3. INTERPRETATIONS DES DONNEES GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES 43

**6. Bibliographie ..... 45**

**Liste des figures**

Figure 1 : Pied du glissement à proximité de la Ravine Roche à Jacquot ..... 11

Figure 2 : Contact entre les brèches basiques pulvérulentes, les brèches basiques indurées et les coulées d'océanites zéolithisées (laves basiques). ..... 12

Figure 3 - Synthèse des résultats des prospections géophysiques électriques et sismiques d'après les études historiques sur le secteur de Grand Ilet (Belle, 2014)..... 15

Figure 4 : Qualité des mesures, en configuration pôle-dipôle, sur le profil P2, (en haut) et sur le profil P4 (en bas)..... 20

Figure 5 : Résultats d'inversion des tomographies des profils P2, P3 et P4 par Stratagem974 (2011)..... 24

Figure 6 : Modélisation électrique d'une couche à 3000 ohm.m faisant un angle de 10° par rapport à la surface (en bas). ..... 25

Figure 7 : Inversion 2D en mode « robust » de la pseudo-section de résistivité apparente de la Figure 6..... 25

Figure 8 : Simulation de l'indétermination sur les résultats d'inversion pour un modèle 1D ..... 26

Figure 9 : Dispositif H/V mise en œuvre sur les différents secteurs de Grand-Ilet ..... 28

Figure 10 : Exemple de mesure H/V sur le glissement de terrain de Grand-Ilet (point 236)..... 30

Figure 11 : Exemple de rapport H/V sans pic de résonance (point 238). Ce type de courbe indique un site rocheux ou une absence de contraste de vitesse en profondeur. .... 30

Figure 12 : Principe de la méthode ses ondes de surface ..... 31

Figure 13 : Exemple de traitement d'un tir en ondes de surface..... 32

Figure 14 : Localisation des mesures H/V et des profils MASW réalisés sur le glissement de terrain de Grand-Ilet. .... 33

Figure 15 : Fréquences de résonance déduites des mesures H/V ..... 34

Figure 16 : Schéma d'interprétation conjointe des profils MASW et des mesures H/V. .... 35

Figure 17 : Ordre de grandeur de la profondeur de l'interface entre la roche altérée (glissement) et la roche saine (méthode Grilla)..... 36

Figure 18 : Carte des isobathes de la base du glissement (surface de glissement) de Grand-Ilet (Belle, 2014). ..... 38

Figure 19 : Comparaison des profondeurs obtenues par l'interprétation des mesures géophysiques interprétées par Grilla (chiffres du haut) avec celles du modèle géologique de la base du glissement de Grand Ilet (chiffres du bas) – Belle, 2014. .... 39

Figure 20 : Statistiques descriptives des résultats obtenus par l'approche géophysique H/V et l'approche géologique. ....39

## Liste des tableaux

Tableau 1- Erreur RMS d'ajustement du résultat de l'inversion. ....19

## Liste des annexes

Annexe 1 Compte rendus de la supervision réalisée sur le terrain du 20/06 au 23/06/2012 .....47  
Annexe 2 Rapports Stratagem sur CD-Rom.....53

## Lexique

ERT	Electrical resistivity tomography (panneau électrique ou tomographie de résistivité électrique)
MASW	Multiple analysis of Surface waves
SASW	Spectral Analysis of Surface Waves



# 1. Introduction

Le BRGM, en partenariat avec l'Europe, l'Etat français, la Région Réunion et le Département de La Réunion, a engagé en 2002 le projet MVTerre1 pour la compréhension et le suivi des mouvements de terrain de grande ampleur.

Bien que ce projet ait permis d'avancer dans la connaissance de ces phénomènes, il nécessite aujourd'hui d'être poursuivi pour achever les modules principaux déjà engagés. L'objectif est d'affiner les résultats par la poursuite de l'acquisition et de l'analyse.

Dans le cadre de la mesure 3-20 "Soutenir la Recherche et Développement sur les phénomènes de risque naturel", MvTerre-2, projet de recherche cofinancé par le PO FEDER 2007-2013, le FIDOM et la Région Réunion, a donc été engagé.

Il s'organise autour de trois objectifs principaux :

- > **Module 1 - Analyse des paramètres géomorphologiques de prédisposition.** Il s'agit d'établir les relations entre la géologie, le relief, l'hydrologie, l'hydrogéologie et les mouvements de grande ampleur. La finalité est d'affiner les paramètres de prédisposition géomorphologiques guidant le développement et la poursuite des mouvements de grande ampleur afin de hiérarchiser l'aléa lié aux mouvements de grande ampleur dans les cirques.
- > **Module 2 - La poursuite de la détection et du suivi des mouvements de terrain de grande ampleur** vise à compléter l'instrumentation et le suivi des glissements de terrain (GPS fixe, réseau géodésique, débit des sources, piézométrie, méthodes spatiales...).
- > **Module 3 - L'étude et la modélisation du comportement des mouvements de grande ampleur.** Il s'agit d'analyser l'ensemble des données acquises dans les autres modules du projet. La finalité est de réaliser un modèle numérique de comportement sur le site de Grand-Ilet, visant à simuler les comportements réellement observés. Plusieurs approches de modélisation seront mises en œuvre. Le principal intérêt de ce type de modèle est de pouvoir ensuite faire varier les paramètres d'entrée (pluviométrie principalement, mais aussi paramètres de résistance au cisaillement des matériaux ou érosion des terrains en pied de glissement, etc.) afin d'examiner les conséquences en matière de circulation des eaux souterraines, de déplacement ou de stabilité. Des tendances pourront ainsi être dégagées, celles-ci pouvant ultérieurement servir de base pour des projets opérationnels d'aménagement ou de surveillance.

Dans le cadre du projet MvTerre-2, le glissement de Grand Ilet a été sélectionné comme site pilote pour l'étude des mécanismes régissant le fonctionnement des

glissements de terrain de grande ampleur. Sur ce site, un suivi des déplacements par GPS permanents est couplé à un dispositif de suivis hydrologique, hydrogéologique et hydrochimique (mise en place de stations permanentes sur les piézomètres et aux exutoires des aquifères du plateau). L'objectif est de mieux comprendre le fonctionnement hydrique du glissement de Grand Ilet pour mieux définir le rôle de l'eau souterraine dans le contrôle des vitesses de déplacement.

Le présent rapport vise à présenter l'ensemble des investigations géophysiques réalisées sur le secteur de Grand-Ilet dans le cadre du programme de recherche MvTerre-2.

La finalité des campagnes géophysiques était d'imager la surface de glissement. En d'autre terme, il s'agissait de déterminer la profondeur du glissement du substratum du glissement de terrain de Grand-Ilet (Stratagem, 2011a).

Ainsi, une première campagne de géophysique électrique (ERT) a été réalisée. Cette campagne a été complétée par des acquisitions MASW (Stratagem, 2011b) afin de calculer la profondeur de l'interface par la méthode H/V.

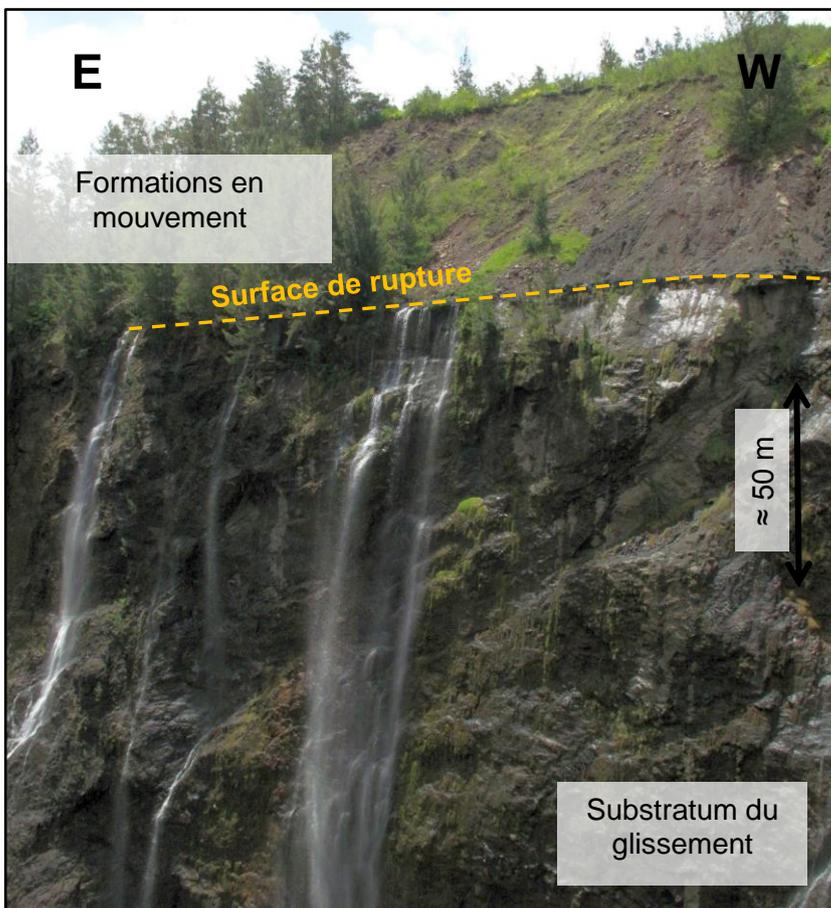
## 2. Contexte des investigations géophysique sur le secteur de Grand Ilet

### 2.1. PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE

Sur le secteur de Grand-Ilet, la question scientifique prédominante qui vise à être résolue par les méthodes géophysiques est la géométrie de la surface de glissement. En d'autres termes, les investigations géophysiques visent principalement à déterminer la profondeur de l'interface entre le substratum stable et les formations en mouvement en différents points du glissement.

Bien qu'aisément observable dans la morphologie sur certains secteurs proches du pied de glissement (Figure 1), cette interface ne peut être facilement imagée pour les raisons suivantes :

- Secteur urbanisé dans le centre de Grand-Ilet ;
- Réponse géophysique potentiellement similaire entre le glissement et son substratum (Figure 2 - Figure 3). Le contexte géologique du site est décrit dans Belle (2014) ;
- Epaisseur du glissement croissante vers l'amont, avec des objets géologiques à imager (cible géophysique) localisées à 200 m de profondeur minimum.



*Figure 1 : Pied du glissement à proximité de la Ravine Roche à Jacquot  
Les terrains se déplacent vers le nord, c'est-à-dire, vers le photographe.*

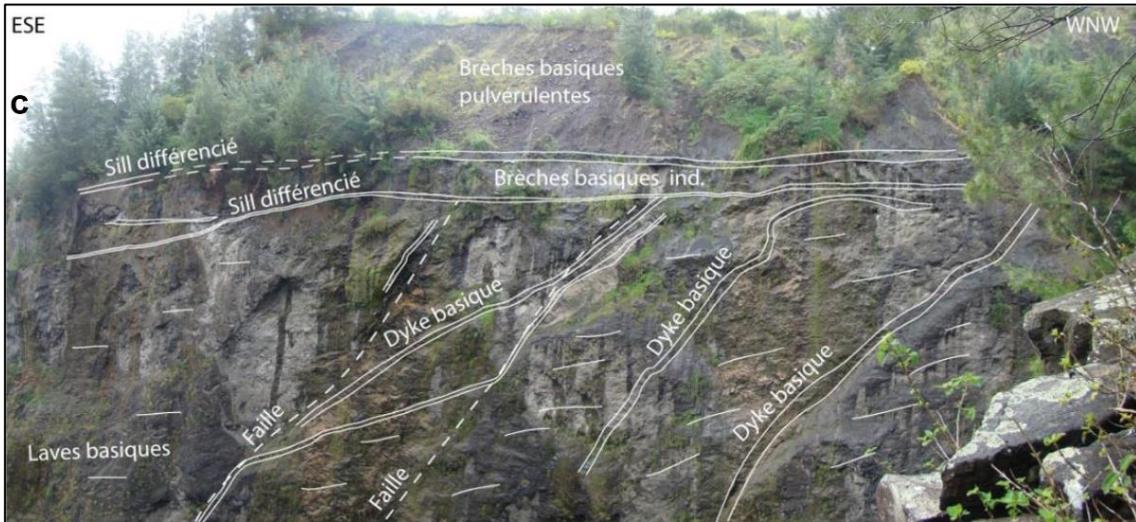


Figure 2 : Contact entre les brèches basiques pulvérulentes, les brèches basiques indurées et les coulées d'océanites zéolithisées (laves basiques).  
Rive droite de la ravine Roche-à-Jacquot en aval de de la cascade Micheline (Belle, 2014)

## 2.2. DONNEES ANTERIEURES (D'APRES BELLE, 2014)

Différentes campagnes géophysiques ont été menées depuis 1984 sur le secteur de Grand Ilet. Les cibles de ces investigations sont variées, fonction du type d'étude menée (géothermie, hydrogéologie, risques naturels). Plusieurs forages ont par ailleurs été réalisés sur le plateau de Grand Ilet. Les méthodes d'investigation et les principaux résultats obtenus sont détaillés ci-après.

### 2.2.1. Investigations géophysiques des structures profondes

Plusieurs campagnes de géophysique ont été menées sur ce secteur dans le cadre de l'étude du potentiel géothermique du cirque de Salazie. La cible de ces campagnes étant les structures situées à des profondeurs de l'ordre de plusieurs kilomètres, les données obtenues ne renseignent pas sur la géométrie des formations à l'échelle du glissement. Les campagnes réalisées sont les suivantes :

- Acquisitions gravimétriques (Demange et al., 1984) ;
- Acquisitions magnétiques (Malengreau, 1995) ;
- Acquisitions électromagnétiques (Barthes et al., 1984).

## 2.2.2. Investigations géophysiques des structures à faible profondeur (< 300 m)

### a) Sondages géoelectriques dans la rivière des Fleurs Jaunes

Dans le cadre de l'implantation de forages pour la prospection géothermique (Valentin, 1984), plusieurs sondages électriques ont été réalisés dans la ravine des Fleurs Jaunes, au niveau de la passerelle de Mare-à-Vieille Place/Mare-à Martin. Ils ont permis d'établir des résistivités moyennes pour plusieurs lithologies rencontrées (Figure 3). La localisation précise des profils n'a pas été retrouvée.

Bien que ces acquisitions soient géographiquement éloignées du secteur de Grand Ilet, les lithologies rencontrées sont relativement similaires entre les deux secteurs. Les gammes de résistivités obtenues pourront donc être réutilisées le cas échéant pour l'interprétation de nouvelles données de géophysiques électriques.

### b) Etude géophysique de Grand Ilet (SAGE)

Dans le but de préciser la structure géologique du plateau de Grand Ilet, un programme de reconnaissance géophysique et géotechnique a été lancé en 1999 par la Société Alpine de Géotechnique SAGE (Delmas et Desvarreux, 1999). Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- Observations géologiques et hydrogéologiques ;
- Essais d'identification et essai triaxial Cell-Test sur des échantillons prélevés dans la ravine Roche-à-Jacquot ;
- 10 profils sismiques réfraction de 120 m à 12 géophones et 5 tirs dont 2 offsets ;
- 40 sondages électriques comprenant 5 à 15 mesures ( $150 < AB \text{ max} < 450 \text{ m}$ ).

Pour les profils sismiques effectués, la profondeur d'investigation de la méthode utilisée est inférieure à 50 m. Cependant, les profils réalisés en pied de glissement dans la ravine Roche-à-Jacquot permettent de mettre en évidence des terrains caractérisés par des vitesses supérieures (3100 à 4200 m/s) à celles observées en surface dans les alluvions (1000 m/s). Ces vitesses en profondeur sont associées par SAGE au substratum rocheux. La profondeur de l'interface serait comprise entre 10 et 25 m sous la surface du sol au droit de la ravine Roche-à-Jacquot.

Par ailleurs, les profils réalisés au centre du plateau mettent en évidence une interface à des profondeurs comprises entre 2,5 et 25 m. Pour SAGE, cette interface est interprétée comme étant le mur des brèches de Grand Ilet. Les vitesses caractérisées pour les terrains superficiels sont comprises entre 400 et 1000 m/s. Pour les brèches de Grand Ilet, elles sont de l'ordre de 2000 à 2500 m/s. La méthode d'investigation utilisée n'a pas permis d'imager le toit du substratum rocheux. Elle est donc par défaut supérieure à 50 m à la verticale des profils investigués.

Les sondages électriques réalisés possèdent des profondeurs d'investigations variant entre 50 et 150 mètres. 4 classes de résistivités ( $\rho$ ) ont été distinguées selon la nature des lithologies et la saturation du massif (Figure 3).

L'interface la plus profonde imagée correspond au toit des formations argileuses de la base des brèches de Grand Ilet. D'après l'interprétation des profils par SAGE, la méthode utilisée n'a pas permis d'imager le toit du substratum rocheux, en raison de faibles contrastes de résistivité entre le substratum et les formations argileuses de la base des brèches de Grand Ilet.

### **c) Campagne magnétique (Hydroexpert)**

Dans le cadre du Programme Départementale de Recherche en Eau, une campagne de mesure par résonance magnétique des protons (RMP) a été réalisée par la société Hydroexpert (Lacoste et Daessle, 2003) sur le secteur de Grand Ilet. Selon les données disponibles dans le rapport, les conditions d'acquisition difficiles n'auraient pas permis d'obtenir les résultats pertinents :

- « *Les conditions climatiques mauvaises ayant régnées lors de la campagne ont été fortement défavorables aux mesures* » ;
- Le 50 Hz et ses harmoniques liés au réseau électrique ont perturbé plusieurs points de mesures ;
- Les lithologies volcaniques augmentent sensiblement le bruit de fond naturel.

Sur la base des résultats ayant pu être interprétés, plusieurs coupes géologiques et hydrogéologiques ont été établies. Cependant, compte tenu des conditions très défavorables lors des mesures (pluie et bruit de fond), le rapport de synthèse souligne que « *les résultats obtenus sont à considérer comme des indicateurs* ». Les résultats sont très peu valorisés dans le rapport, témoignant probablement des fortes incertitudes y étant associées. Sur la base de ce constat, il convient de limiter l'utilisation de ces résultats pour l'étude géologique et hydrogéologique du secteur.

<b>Etude</b>	Valentin, 1984	SAGE, 1999	SAGE, 1999
<b>Méthode</b>	Electrique	Electrique	Sismique réfraction
<b>Secteur</b>	Rivière des Fleurs Jaunes	Grand Ilet / ravine Roche-à-Jacquot	Grand Ilet / ravine Roche-à-Jacquot
<b>Formation géologique</b>	<b><math>\rho</math> en <math>\Omega.m</math></b>	<b><math>\rho</math> en <math>\Omega.m</math></b>	<b><math>v</math> en m/s (ondes longitudinales)</b>
Alluvions récentes non-saturées	$200 < \rho < 400$	500	$400 < v < 1000$
Alluvions grossières saturées	$150 < \rho < 200$	-	-
Alluvions fines saturées	$80 < \rho < 100$	-	-
Brèches de Grand Ilet non-saturées	-	$200 < \rho < 500$	$2000 < v < 2500$
Brèches de Grand Ilet saturées		$100 < \rho < 200$	
Formations argileuses de la base des brèches de Grand Ilet	-	$\rho < 100$	-
Basaltes altérés hydrothermalisés et fissurés	$45 < \rho < 60$	-	$3100 < v < 4200$
Brèches indurées, zéolitisées, hydrothermalisées	$25 < \rho < 35$	-	-

*Figure 3 - Synthèse des résultats des prospections géophysiques électriques et sismiques d'après les études historiques sur le secteur de Grand Ilet (Belle, 2014)*

*L'ordre des formations dans le tableau ci-dessus n'est pas représentatif de l'âge des formations ou de la « stratigraphie » régionale. Toutefois, les alluvions sont plus récentes et sus-jacentes aux formations de brèches.*



## **3. Supervision des tomographies géoélectriques réalisées par Stratagem974**

### **3.1. DEROULEMENT DES OPERATIONS**

#### **3.1.1. Contexte**

La campagne de mesure de Stratagem974 (Stratagem, 2011a) fait suite à une première intervention du BRGM qui a dû être interrompue du fait d'une panne d'instrumentation (composants électroniques défectueux sur la carte puissance du résistivimètre SYSCAL Pro96) après plusieurs tentatives infructueuses de réparation sur le terrain. Le BRGM, n'étant pas en mesure de programmer une nouvelle intervention dans des délais compatibles avec le chronogramme serré du projet MVT2, il a été décidé de faire appel à Stratagem974 pour poursuivre les investigations.

Un profil test de 475 m en configuration dipôle-dipôle, avec un espacement de 5 m, avait été réalisé par le BRGM à l'extrémité N du profil P2, avant que la panne ne soit constatée. Présentant pour partie des résultats cohérents avec les résultats de Stratagem974 et pour partie des artefacts de mesure dus au dysfonctionnement de l'équipement, cette tomographie qui correspond à la partie NE du profil P2 de l'étude de Stratagem974 et n'apporte pas d'information supplémentaires par rapport à cette dernière n'est donc pas incluse dans ce rapport.

#### **3.1.2. Opérations de terrain**

La campagne de tomographie électrique de Stratagem974 est relatée dans le rapport Stratagem974 (2011). Les opérations de terrain se sont déroulées du 19/06/2011 au 01/07/2011 après une visite préliminaire du site le 14/06/2011.

Stratagem974 a pu utiliser les layons ouverts par le BRGM pour réaliser ses profils de tomographie. Tout au long des mesures, des efforts de relation publique avec la population de Grand-Ilet ont été menées afin de permettre le passage sur les propriétés privées et l'acceptation des travaux. Malgré cela de nombreux vols et coupures de câbles sont survenus tout au long de la campagne. Ils ont significativement gêné le déroulement des travaux provoquant des interruptions de mesure, obligeant parfois le prestataire à faire plusieurs mises en place sur les mêmes sites et à réaliser certains profils de nuit.

La supervision par le BRGM a été réalisée du 20 au 23/06/2011 sur le terrain. Les compte-rendus journaliers de la supervision sont donnés en annexe 1.

Les mesures ont été réalisées en configuration pôle-dipôle en accord avec les termes de la consultation afin d'assurer une profondeur d'investigation conforme aux objectifs

(200 m) et une bonne résolution verticale comme latérale. La maintenance du câble de l'électrode lointaine a été un souci permanent au cours de la campagne (du fait des coupures et des vols de câbles). Suivant une suggestion du prestataire, des mesures complémentaires en configuration Wenner ont été également réalisées sur chaque profil (sauf pour l'extrémité S du profil P2), considérant notamment que ces mesures pouvaient souvent être réalisées pendant que les équipes remettaient en place le câble de l'électrode lointaine et permettait d'avoir un jeu de données complémentaire avec un rapport signal/bruit supérieur aux données pôle-dipôle. Un complément d'investigation pôle-dipôle a également été réalisé pour augmenter la profondeur d'investigation qui atteint ainsi environ 300 m.

Les premières mesures réalisées avec les 4 canaux du résistivimètre ABEM SAS4000 sont apparues particulièrement bruitées. Stratagem974 a alors diagnostiqué un problème avec les relais électroniques commandant la connexion des différents canaux de mesure (multiplexeur) et procédé au changement de ces pièces. Par la suite et jusqu'à la fin de la campagne, les mesures pôle-dipôle n'ont été toutefois réalisées que sur un seul canal de mesure (au lieu de 4) afin d'assurer la meilleure qualité de mesure.

### **3.1.3. Interprétation et rapport**

Les résultats et l'interprétation des tomographies électriques sont présentées dans le rapport de Stratagem974 (2011) avec la liste et une description des données numériques livrées au BRGM.

L'inversion a été réalisé dans le mode « robust » du logiciel RES2DINV qui est adapté pour prendre en compte des niveaux de bruit important.

### 3.2. ANALYSE QUALITE DES DONNEES

Les résistances de prises étaient généralement de quelques centaines d'ohm (quelques dizaines d'ohm et 2 kOhm pour les valeurs extrêmes) ce qui offre globalement de bonnes conditions d'injection. Les grandes différences de résistance de prise entre les points d'injection les plus résistants et les plus conducteurs sont dues aux conditions de terrain très variables en surface sur le glissement de terrain (de formations argileuses, saturées très conductrices à des amoncellements de blocs de roches volcaniques très résistants en raison de l'absence de matrice). Pour réduire les prises les plus résistantes, une saumure saturée et des électrodes longues (jusqu'à 1.5 m) ont été utilisées. Les fortes résistances de prise et les déséquilibres de prise, restent néanmoins une cause significative d'augmentation locale du niveau de bruit des mesures.

Avec des niveaux d'injection de quelques centaines de mA (généralement 200 mA), les niveaux de signal mesuré sont généralement supérieurs à 0.5 mV, voire 1 mV et les erreurs (évaluées par l'appareil sur la base des injections répétées pour une même mesure) sont généralement inférieures à 10% voire 3% suivant les conditions de terrain (Figure 4).

Dans ces conditions, Stratgem974 a réalisé un « filtrage léger », qui paraît adapté, avant de procéder à l'inversion des données.

Les erreurs d'ajustements de la réponse calculée du modèle résultat de l'inversion par rapport aux données de résistivités apparentes, mesurées sont présentées dans le Tableau 1. Ces valeurs sont raisonnables et acceptables considérant les conditions des terrains très hétérogènes du site que ce soit au niveau des conditions de surface ou au niveau des terrains glissés plus en profondeur dont la répartition chaotique dans les 3 dimensions de l'espace ne peut pas toujours être appréhendée correctement par les investigations en profil (effet 3D non pris en compte dans les modélisations de tomographie 2D).

<b>Profil</b>	<b>Configuration pôle-dipôle</b>	<b>Configuration Wenner</b>
P2	11.9 %	7.3 %
P3	8.7 %	2.9 %
P4	11.6	5.2 %

Tableau 1- Erreur RMS d'ajustement du résultat de l'inversion.

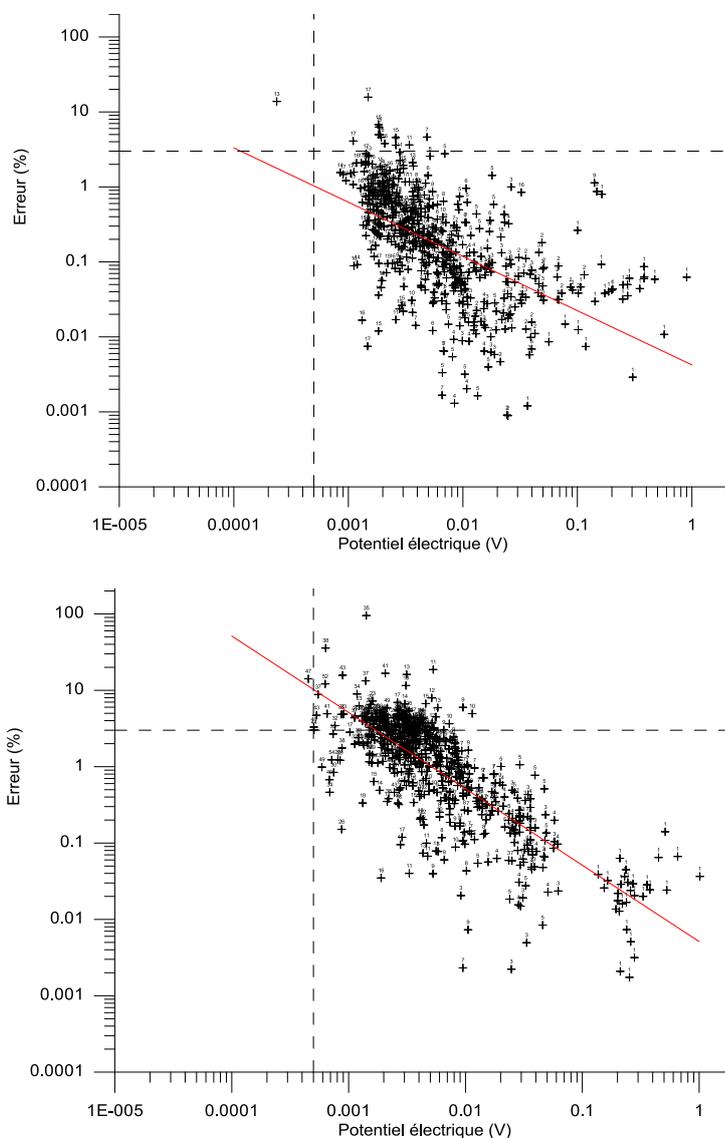


Figure 4 : Qualité des mesures, en configuration pôle-dipôle, sur le profil P2, (en haut) et sur le profil P4 (en bas)

L'erreur de mesure évaluée par l'appareil ABEM SAS4000 (écart-type de la distribution des mesures élémentaires) est présentée en fonction du voltage mesuré ( $V_{MN}$ ). Comme attendu l'erreur diminue quand le voltage augmente. La dispersion ainsi que la différence de niveau sur les 2 graphiques sont dues aux conditions de terrain (résistances de prise, atténuation du milieu, ...) variables d'un site à l'autre sur la zone d'étude.

### 3.3. INTERPRETATION DES RESULTATS

#### 3.3.1. Comparaison avec les données géologiques disponibles

Une description détaillée des résultats est présentée dans le rapport Stratagem974. Nous reprenons ici les résultats d'inversion de Stratagem974 pour les comparer aux données géologiques disponibles les plus significatives et apporter quelques éléments complémentaires d'interprétation.

Les résultats d'inversion des tomographies réalisées par Stratagem974 sont présentés sur la figure 5. Globalement trois ensembles sont distingués sur la base de la distribution des résistivités en profondeur, soit de haut en bas :

- Une couche superficielle R1 de résistivité supérieure à 100 ohm.m ; Cette couche est hétérogène et des résistivités supérieures à 1000 ohm.m peuvent être observées localement en surface ;
- Une couche intermédiaire C1 de résistivité inférieure à 100 ohm.m ;
- Une couche profonde R2 de résistivité supérieure à 100 ohm.m.

Sur le profil P2, la couche R2 n'est observée que très localement à l'extrémité NE du profil. Il est considéré que ce niveau R2 correspond au sill qui marque dans ce secteur la base du glissement pour les raisons suivantes :

- Résistivité de plusieurs centaines d'ohm.m pour R2 ;
- Altitude de son toit qui s'établit de façon uniforme à 880 m en correspondance avec le toit du sill de roche saine observé à l'affleurement dans le rempart.

Il est également intéressant de noter que le toit du sill observé dans la falaise, le toit de ce résistant R2 dans cette partie NW du profil et le report sur le profil P2 (au SE) du toit du résistant R2 observé sur le profil P4 s'alignent selon une droite horizontale d'altitude 880 m (trait noir discontinu, Figure 5). En l'absence de plus d'information, on considère que cette droite marque le toit du substrat du glissement.

Pour mémoire, il convient également de rappeler que ce sill ne correspond pas à la surface de glissement à l'échelle de Grand-Ilet en raison de différents arguments géologiques développés par Belle (2014). D'une part, au droit de la rivière des Fleurs Jaunes (pont de la RD52), ce sill est présent alors que la surface de glissement se situe 200 m à 250 m plus haut en altitude. D'autre part, dans la Ravine Roche à Jacquot et dans la ravine de l'Eglise, le contact entre le substratum et le glissement est identifié en l'absence de ce sill.

La profondeur du résistant R2' au SW du profil P2 n'est pas cohérente avec la profondeur de R2 sur le profil P4. Cette extrémité du profil P2 semble être bruitée et probablement mal résolue. Il est possible aussi que l'on soit en limite d'une structure 3D mal investiguée par les tomographies 2D. Pour mieux étudier cette zone, il est recommandé de réaliser des profils supplémentaires pour mieux appréhender une potentielle structure complexe. A ce stade, on considérera que le résultat du profil P4, plus simple est plus fiable pour la définir le substrat résistant R2, dans ce secteur.

L'absence de faciès résistant dans la partie centrale de P2 peut être expliquée par un changement de nature du substrat du glissement (plus argileux ou altéré et/ou de plus forte teneur en eau) dans cette zone par rapport à P3 et P4 au NE et par rapport au sill au NW.

Les résistivités variables du niveau R1 sont sans doute la marque de l'hétérogénéité de la partie supérieure du glissement (zones de blocs de roches saines, zones très argilisées). Il n'a pas toutefois pas été possible d'établir des correspondances bien établies entre ces faciès de résistivité et les observations des forages qui sont souvent trop éloignés des lignes de mesure ou dont la description paraît parfois insuffisamment détaillée. Il est recommandé de réaliser des diagraphies de résistivité dans les futurs forages qui pourraient être réalisés à l'avenir, en particulier pour ceux qui seraient localisées à proximité des profils de tomographie électrique.

Toujours sur le profil P2, l'observation du cisaillement dans le piézomètre abattoir (PZA3 - 12268X0126) à une cinquantaine de mètres sous la base de R1 invite à supposer que cette interface pourrait être indicative du fonctionnement du glissement. Cette information isolée est toutefois insuffisante et demande à être confirmée par d'autres investigations.

### **3.3.2. Modélisation du sill résistant**

Une modélisation du sill<sup>1</sup> résistant a été réalisée afin d'évaluer si l'interruption au SW du résistant R2 sur le profil P2 était dû à sa position en limite de la tomographie ou si elle révélait la limite SW du sill. Le modèle utilisé, la réponse en résistivité pour un dispositif pôle-dipôle et le résultat d'inversion de la réponse du modèle sont présentés figure 6 et figure 7. On observe que pour une résistivité de 3000 ohm.m (représentant un sill de roche saine), un sill se prolongeant bien au-delà de 200 m de distance horizontale continuait à se marquer par une anomalie résistante de plusieurs centaines d'ohm.m. On en déduit que l'interruption du résistant R2 sur le profil P2 à environ 200 m au SW du bord de la falaise où il est observé à l'affleurement marque bien l'interruption du sill.

En conséquence, la correspondance des profondeurs permet de raccorder au NE, le substrat au sill de roche saine observé dans le rempart. Ce sill se marque très clairement sur le profil P2 par une anomalie résistante localisée qui conduit à limiter l'extension du sill à environ 200 m sous le glissement vers le SE. Il convient toutefois de rappeler que ce sill ne correspond pas à la surface de glissement à l'échelle de Grand-Ilet en raison de différents arguments géologiques développés par Belle (2014).

---

<sup>1</sup> secteur cascade Micheline - Figure 2 – p 12

### **3.3.3. Indétermination de la profondeur des interfaces**

L'indétermination sur les résultats de l'inversion a été évaluée par simulation à partir d'un modèle 1D correspondant (Figure 8) considérant un bruit de 2 ou 5 % sur les données mesurées. Le profil P3 essentiellement tabulaire, faisant abstraction de la pente topographique, peut en effet être raisonnablement simulé par un modèle 1D.

Sur cette base, l'indétermination sur la profondeur du substrat (interface C1-R2) peut être évaluée entre 20 et 30% suivant que le niveau de bruit est de 2 ou 5 %, respectivement) ; cette dernière valeur étant plutôt à considérer pour cette étude.

L'indétermination sur l'interface R1-C1 est plus faible (10 à 15% respectivement pour un bruit de 2 à 5%).

Cette indétermination peut être réduite en utilisant des contraintes dans l'inversion (à partir de données de forage par exemple) et en améliorant la qualité des mesures (en utilisant un système à émetteur et récepteur séparé).

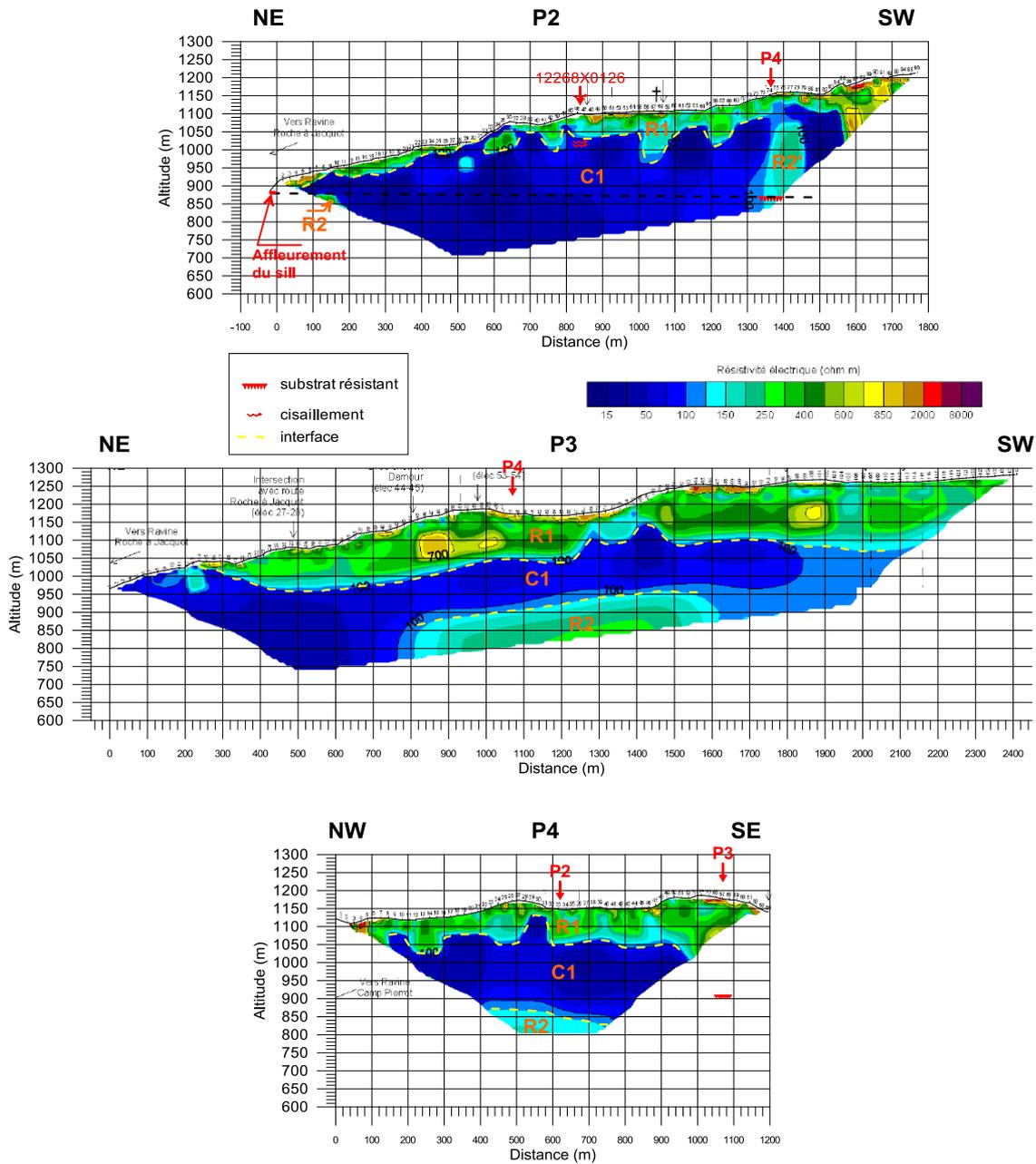


Figure 5 : Résultats d'inversion des tomographies des profils P2, P3 et P4 par Stratagem974 (2011).

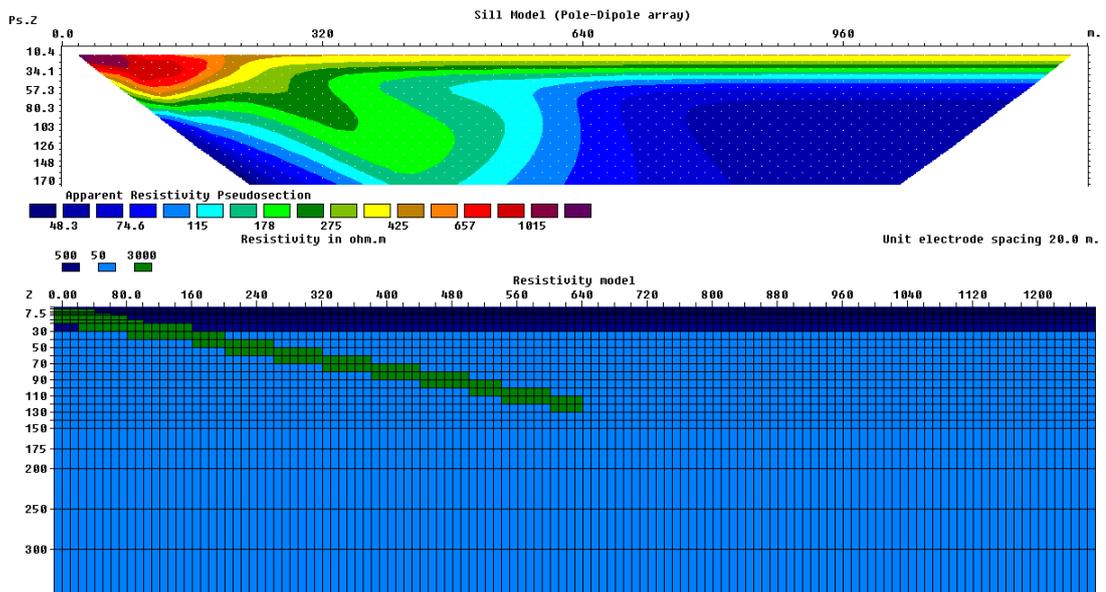


Figure 6 : Modélisation électrique d'une couche à 3000 ohm.m faisant un angle de 10° par rapport à la surface (en bas). Cette couche représente le sill supposé subhorizontal d'après le profil P2 sous une surface topographique globalement pentée de 10° vers le NE. La réponse pôle-dipôle en résistivité apparente est présentée sous forme de pseudo-section en haut.

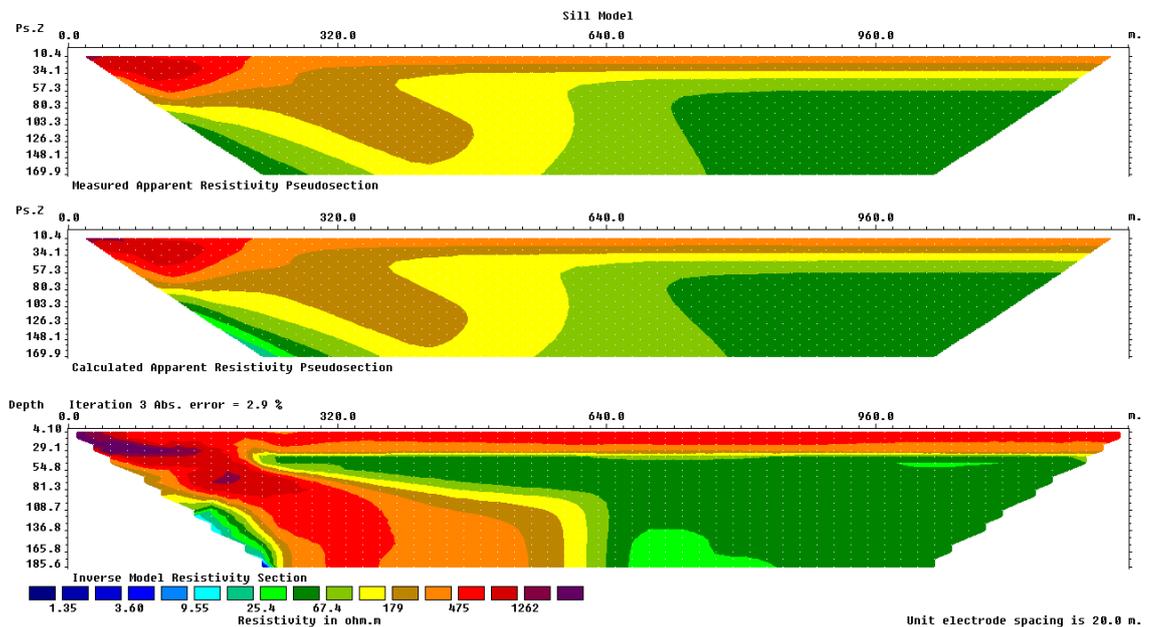


Figure 7 : Inversion 2D en mode « robust » de la pseudo-section de résistivité apparente de la Figure 6.

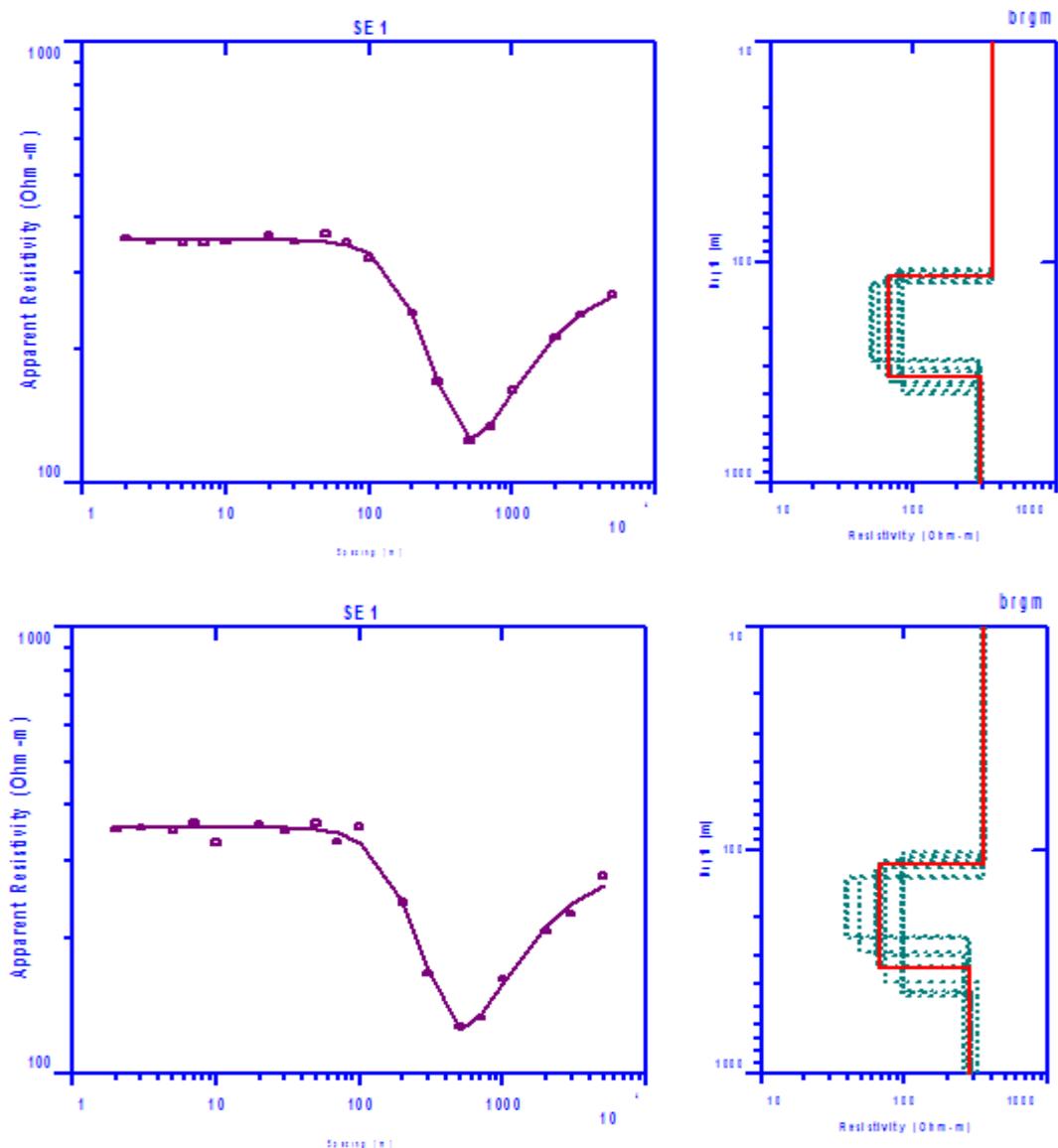


Figure 8 : Simulation de l'indétermination sur les résultats d'inversion pour un modèle 1D correspondant au cas du profil P3 en considérant un niveau de bruit de 2% (en haut) et de 5% (en bas). Les paramètres du modèle tabulaire sont de haut en bas,  $R1=350 \text{ ohm.m}$ ,  $C1=50 \text{ ohm.m}$ ,  $R2=300 \text{ ohm.m}$  avec une épaisseur de 110 m pour  $R1$  et 250 m pour  $R2$  (courbe rouge). La réponse électrique pour un sondage pôle-dipôle est présentée à gauche par la courbe de points avec la réponse équivalente des différents modèles (courbe continue). Les différents modèles équivalents résultats de l'inversion sont figurés par les traits discontinus à droite.

## 4. Investigations sismiques

### 4.1. METHODOLOGIE

#### 4.1.1. Méthode H/V bruit de fond sismique

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (Borcherdt, 1970), c'est-à-dire les modifications du mouvement du sol liées aux couches géologiques superficielles. Les techniques expérimentales font généralement appel à un site de référence, c'est-à-dire un site rocheux n'amplifiant pas le mouvement sismique. Ce site rocheux n'est pas toujours présent sur les zones d'études, ce qui peut engendrer des erreurs dans les estimations des effets de site. C'est pourquoi des techniques plus récentes, ne faisant pas intervenir de site de référence, ont été mises au point (Lermo et Chávez-García, 1993). L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nakamura, 1989). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition (Figure 9).

Les principes physiques sous-tendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits (Lachet et Bard, 1994 ; Field et Jacob, 1995). L'explication la plus communément admise est la suivante : soit un modèle très simple constitué d'une couche meuble (souvent sédimentaire) surmontant un demi-espace homogène. Le bruit de fond est engendré par des sources proches comme le trafic urbain et donc composé d'ondes de surface. Seules les composantes horizontales sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sous-jacentes. La composante verticale du bruit de fond contient, elle, la signature des sources de bruit. On suppose également que la base de la couche sédimentaire n'est pas affectée par les ondes de surface.

Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site (ou fréquence propre).

En définitive, la réalisation d'une campagne de mesures ponctuelles H/V permet, en première approche, de déterminer en chaque point de mesure la fréquence propre du sol.



*Figure 9 : Dispositif H/V mise en œuvre sur les différents secteurs de Grand-Ilet  
Station d'acquisition CityShark et sismomètre tridimensionnel Lennartz 5 secondes.*

Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono-dimensionnel, On peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale  $f_0$  par l'expression :

$$H = \frac{V_s}{4f_0}$$

avec  $H$  : épaisseur moyenne de la couche meuble,

$V_s$  : vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble,

$f_0$  : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble.

Cette méthode est habituellement utilisée dans le cadre d'études d'ingénierie sismologique pour la quantification des effets de site lithologiques. Dans le cas du glissement de terrain de Grand-Ilet, elle devrait permettre de suivre les variations spatiales des fréquences de résonance sur le glissement de terrain. Couplée aux profils de vitesse sismique d'ondes S obtenus par la méthode SASW décrite ci-dessous, elle devrait permettre d'imager de façon sommaire les variations d'épaisseur de l'interface entre le glissement lui-même et les couches géologiques sous-jacentes en place.

Le traitement du bruit de fond sismique pour le calcul d'un rapport spectral H/V consiste en :

- découpage des signaux de chacune des trois composantes en fenêtres temporelles ;
- calcul et lissage des spectres de Fourier des trois composantes de chacune des fenêtres ;
- calcul de la moyenne quadratique des composantes horizontales pour chacune des fenêtres ;
- calcul du rapport H/V pour chacune des fenêtres ;
- calcul de la moyenne et de l'écart type de la courbe H/V.

Le traitement a été réalisé à l'aide du logiciel Geopsy disponible gratuitement sur le site : <http://www.geopsy.org>. Il a suivi les règles de qualité édictées lors du projet européen SESAME (SESAME European Project, 2004). Tous les résultats sont présentés en annexe 6.

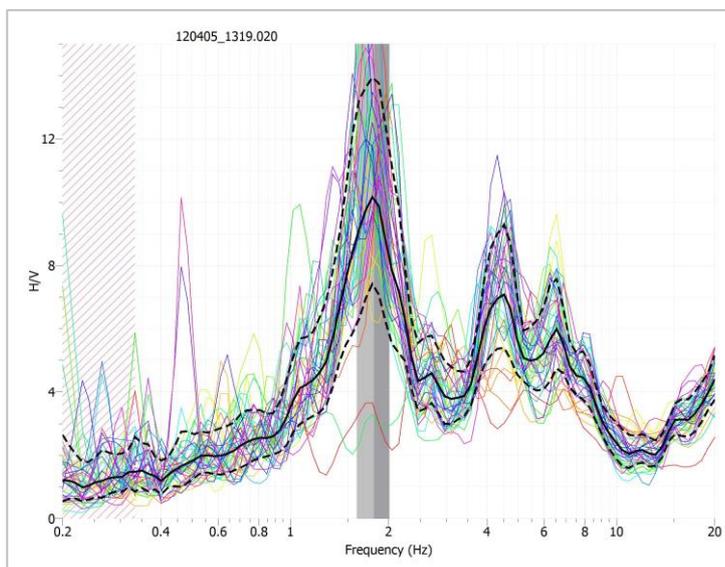


Figure 10 : Exemple de mesure H/V sur le glissement de terrain de Grand-Ilet (point 236). La courbe noire donne le rapport H/V moyen, la courbe en pointillés donne les rapport H/V augmenté ou diminué d'un écart-type. Les hachures rouges à basse fréquence donne la limite de validité du rapport H/V (ici autour de 0.3 Hz) et la bande grise donne le pic principal de résonance (ici à 1.6 Hz). Sur cet exemple, deux pics de résonance sont visibles : l'un à 1.6 Hz correspondant à la résonance principale, et l'autre autour de 4.5 Hz.

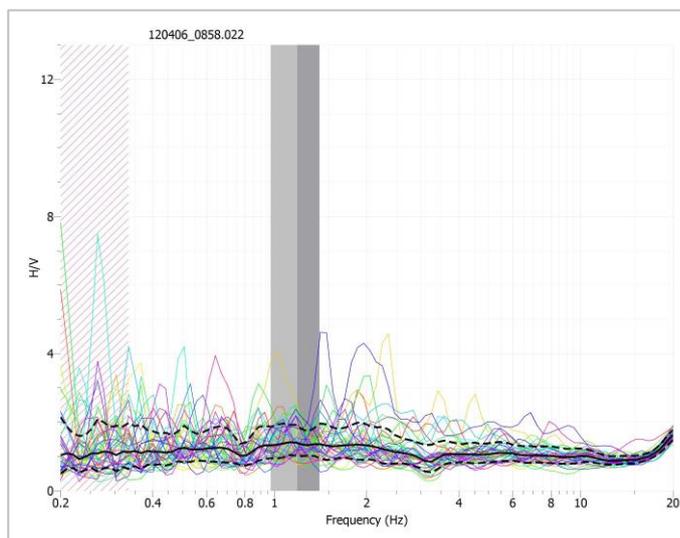


Figure 11 : Exemple de rapport H/V sans pic de résonance (point 238). Ce type de courbe indique un site rocheux ou une absence de contraste de vitesse en profondeur.

#### 4.1.2. Principe de la méthode des ondes de surface.

Les ondes de surface, se propage parallèlement à la surface du sol, dans sa partie superficielle. C'est l'aspect énergétique de ces ondes qui est a priori le plus marquant. Environ deux tiers de l'énergie transmise par une source sismique se propage sous forme d'ondes de surface. De plus, l'atténuation par expansion géométrique de ces ondes est proportionnelle à  $1/\sqrt{r}$ ,  $r$  étant la distance à la source. Par conséquent, à partir d'une certaine distance de la source, le champ d'onde est essentiellement constitué d'ondes de surface.

Dans les milieux stratifiés où chaque couche de sous-sol est caractérisée par des propriétés mécaniques différentes, l'onde de surface est dispersive : la vitesse de propagation varie avec la fréquence. Chaque composante fréquentielle de l'onde se propage dans une épaisseur de terrain différente, les plus hautes fréquences se retrouvent dans les parties les plus superficielles. C'est cette propriété qui va être exploitée dans la méthode proposée.

Les principales étapes de la méthode sont les suivantes (Fig 1):

- acquisition d'un tir sismique, la source et la série de capteurs étant alignées sur une partie du profil
- calcul des diagrammes de dispersion et extraction des courbes de dispersion. Celle-ci représente les variations de la vitesse de phase en fonction de la fréquence
- inversion mathématique de la courbe de dispersion afin d'obtenir un modèle de vitesse de cisaillement  $V_s(z)$ .

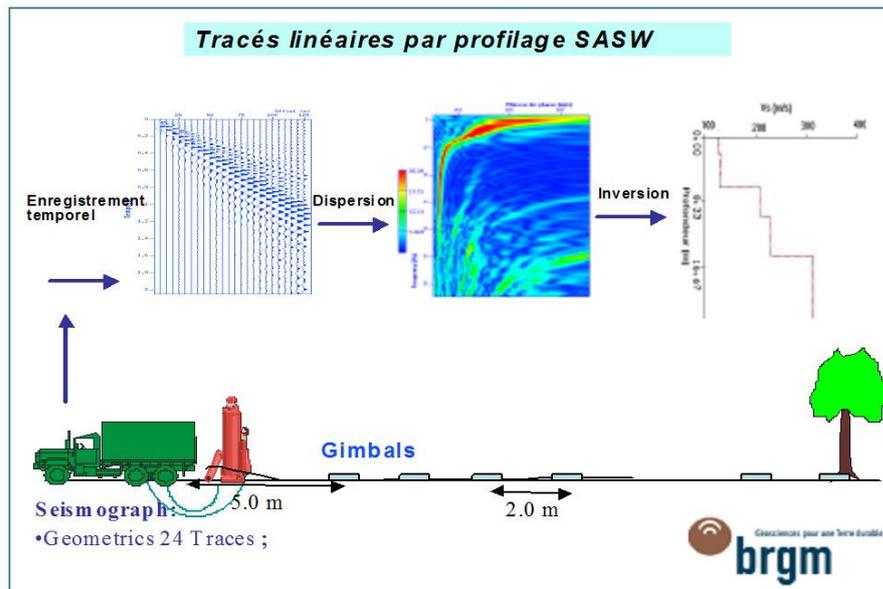
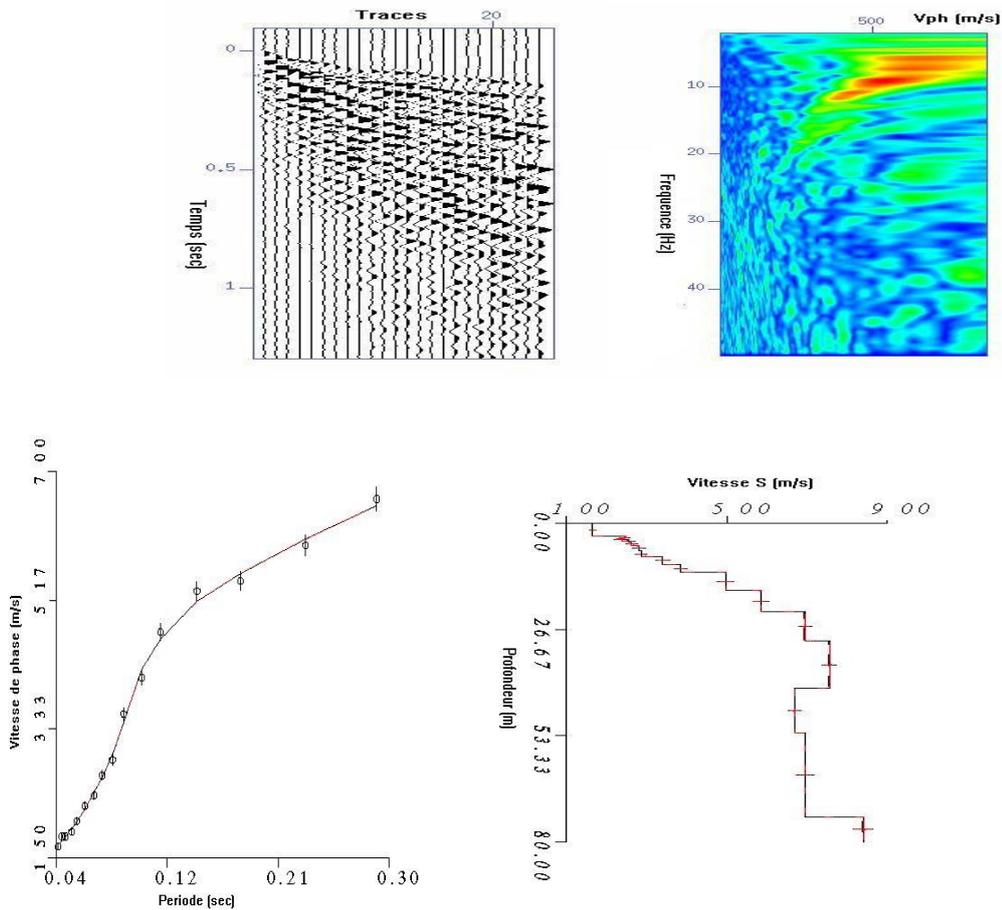


Figure 12 : Principe de la méthode des ondes de surface

Pour chaque profil, les mesures ont été réalisées avec une distance entre trace de 5 m et le déport entre source et le premier géophone de 10m. Pour base du profil, 4 tirs (au minimum) ont été réalisés aux deux extrémités. La figure 13 montre un tir sismique du profil 4 et le traitement pour obtenir la distribution de la vitesse S en profondeur.



**Figure 13 : Exemple de traitement d'un tir en ondes de surface**  
 a- point de tir enregistré sur le profil 4  
 b- diagramme de dispersion associé au point de tir  
 c- courbes de dispersion réelle ( cercles et barres d'erreurs associés) et obtenues par inversion (en continues)  
 d- modèle de vitesse des ondes S obtenu par inversion de la courbe de dispersion

## 4.2. DESCRIPTION DES INVESTIGATIONS DE TERRAIN BRGM

Une série de 18 mesures H/V et de 13 profils MASW ont été réalisés sur le site du glissement de terrain de Grand-Ilet (Figure 14).

Les mesures H/V donnent des fréquences de résonance marquées (exemple sur la Figure 10 et ensemble des mesures en annexe 6), avec des valeurs globalement homogènes (Figure 15), comprises entre 1 Hz au Sud-Ouest du site (point 228) à 2.6 Hz en milieu de zone (point 223). Cela indique une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres de formation meuble en surface (correspondant probablement à l'épaisseur de glissement) avec un contraste de vitesses net entre le glissement et le substratum sous-jacent. Les deux points situés en bordure de rivière présentent soit une fréquence de résonance autour de 10 Hz, correspondant à une faible épaisseur de formation meuble en surface, soit une absence de pic de résonance, correspondant à un sol rocheux affleurant.

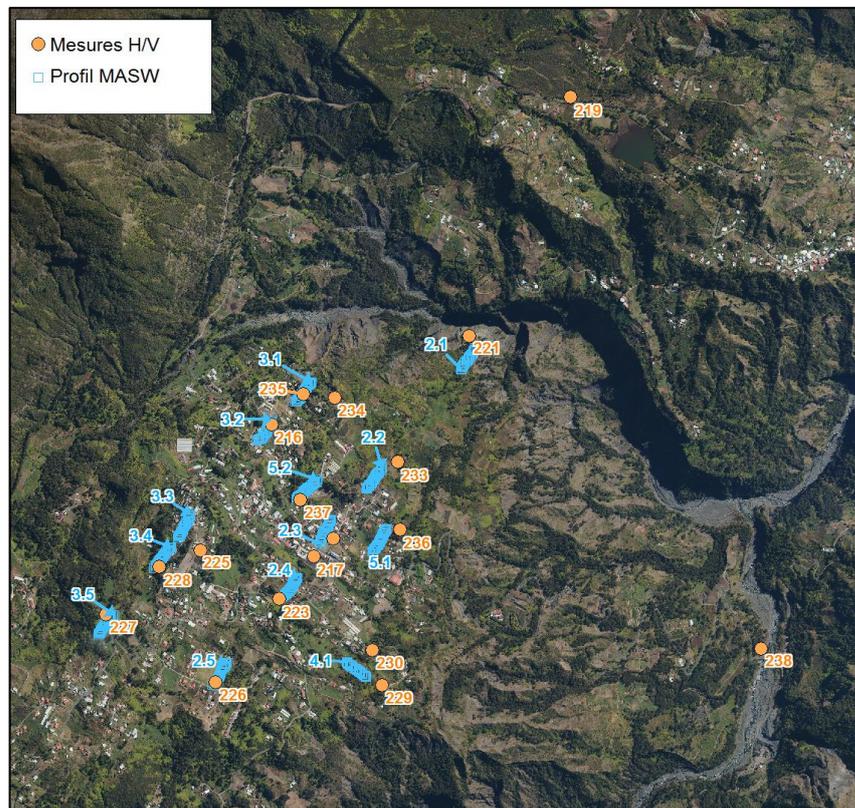


Figure 14 : Localisation des mesures H/V et des profils MASW réalisés sur le glissement de terrain de Grand-Ilet.

Les valeurs en bleu font référence aux profils MASW réalisés par Stratagem (2011b).

Les valeurs en orange font référence aux mesures H/V acquises par le BRGM

### 4.3. INTERPRETATION

Une analyse combinée des profils MASW et des mesures H/V à l'aide du logiciel Grilla (<http://www.tromino.eu>) a permis de donner des ordres de grandeur de profondeur de l'interface entre les formations meubles et le substratum sous-jacent (Figure 16 et Figure 17). Ces valeurs sont données à titre indicatif et doivent être corrélées aux autres données géologiques, géotechniques ou géophysiques disponibles.

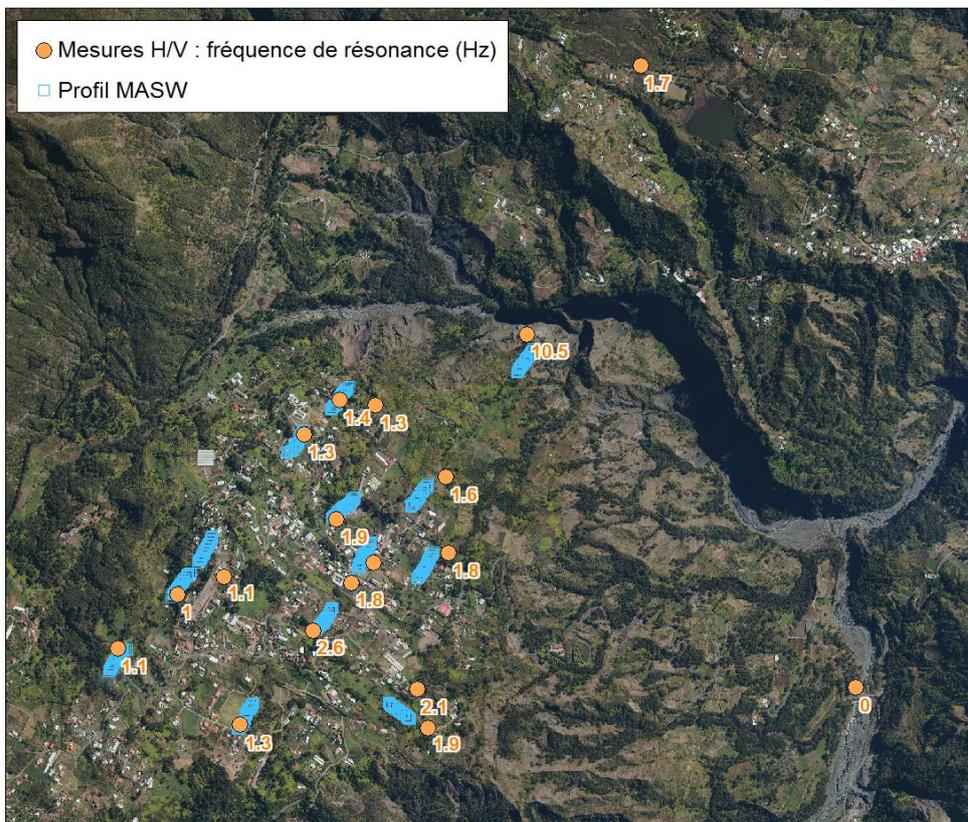
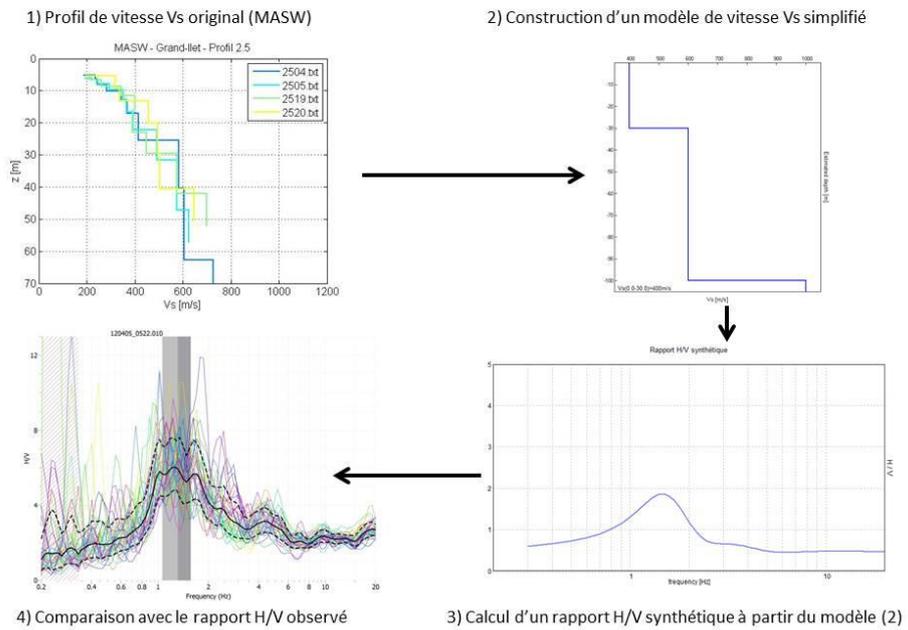


Figure 15 : Fréquences de résonance déduites des mesures H/V



*Figure 16 : Schéma d'interprétation conjointe des profils MASW et des mesures H/V. Dans ce cas-là, le modèle de vitesse proposé permet de reproduire correctement la fréquence de résonance observée sur le H/V. On en déduit donc une profondeur de substratum sismique autour de 100 m d'après le modèle de vitesse simplifié (2).*

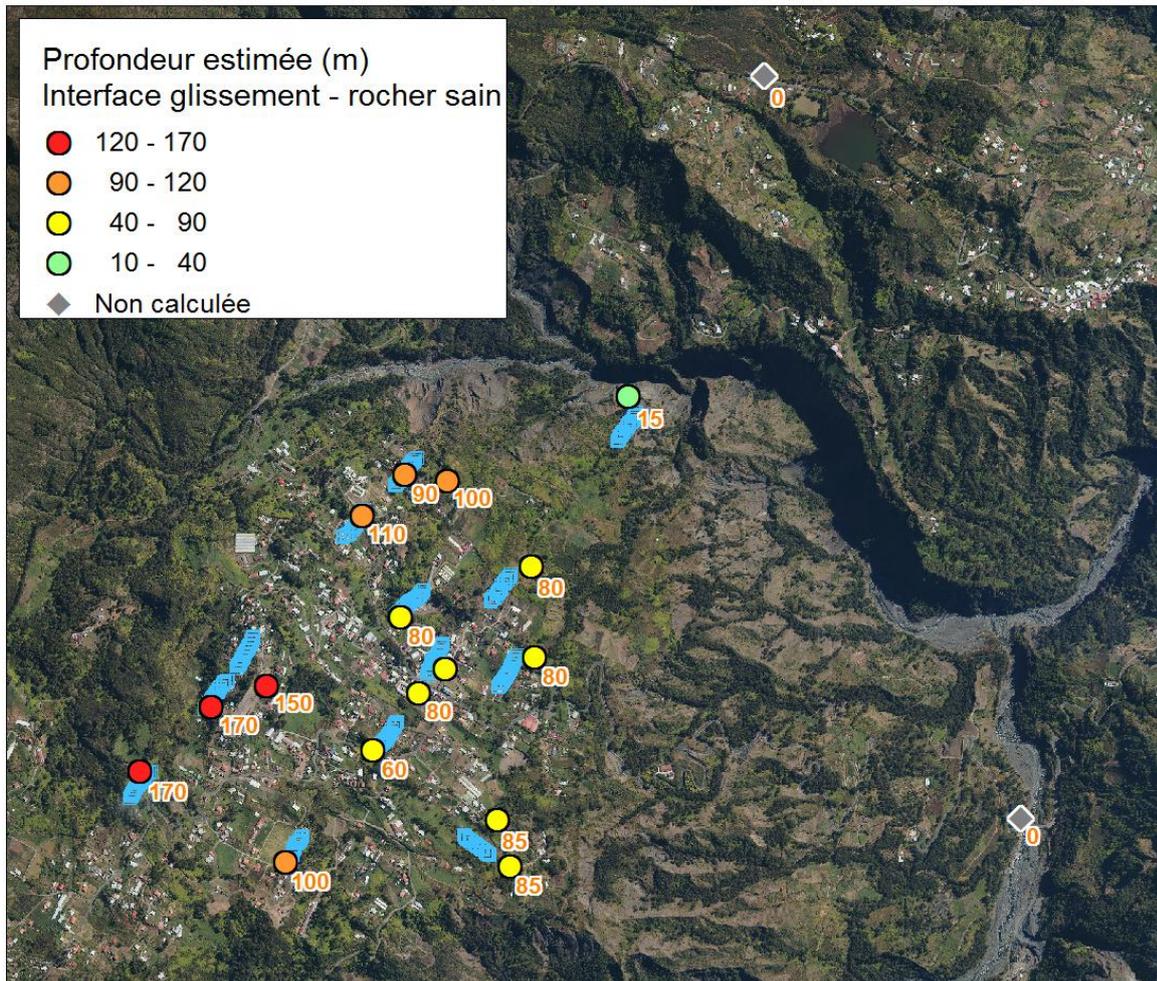


Figure 17 : Ordre de grandeur de la profondeur de l'interface entre la roche altérée (glissement) et la roche saine (méthode Grilla)

#### 4.4. DISCUSSION (D'APRES BELLE, 2014)

Après interprétation des profils, des ordres de grandeur de profondeur de la base du glissement sont proposées pour 16 points sur la surface du plateau de Grand-Ilet. Les valeurs varient entre 15 mètres au pied du glissement et 170 mètres dans sa partie centrale. Ces profondeurs sont comparées avec celles du modèle géologique<sup>2</sup> (Belle, 2014 - Figure 18) de la base du glissement construit à partir des affleurements et des piézomètres (Figure 19).

On constate que les profondeurs obtenues par les mesures géophysiques (interprétations Grilla) sont du même ordre de grandeur que celle du modèle géologique. Les fortes épaisseurs mesurées par la géophysique dans la zone amont (entre 150 et 170 m) se corrèlent relativement bien avec celles quantifiées par le modèle géologique (entre 89 et 136 m). Toutefois, les profondeurs obtenues par la géophysique sont généralement plus élevées que celles proposées par le modèle géologique, en particulier dans la zone amont (secteur Casabois).

En moyenne, l'écart entre les mesures géophysiques H/V et le modèle géologique est de 13.5 m sur 16 mesures H/V (23 m en valeur absolue). Bien que différentes, ces valeurs sont du même ordre de grandeur et présentent une bonne cohérence.

L'absence de quantification d'incertitude pour les mesures géophysiques limite fortement la comparaison point par point avec le modèle géologique. De plus, les points mesurés dans la partie médiane indiquent une géométrie plane de la base du glissement à environ 80 m de profondeur sur une grande surface, ce qui est peu réaliste au regard du pendage de la zone de cisaillement basale du glissement de Grand Ilet.

En revanche, la cohérence générale des deux approches à l'échelle globale du secteur d'étude (géophysique et géologie de terrain) confirme la géométrie établie, avec une tendance à l'augmentation de l'épaisseur depuis le pied du glissement vers l'amont. En termes de perspectives, la méthode H/V couplée aux mesures MASW s'avère porteuse pour préciser la géométrie du glissement de Grand Ilet. La quantification des incertitudes sera une étape primordiale en vue d'une meilleure valorisation des données acquises.

---

<sup>2</sup> Le modèle géologique de la base du glissement a été élaboré par Belle (2014). Il s'appuie sur les données d'affleurement et sur les profondeurs de cisaillement des piézomètres.

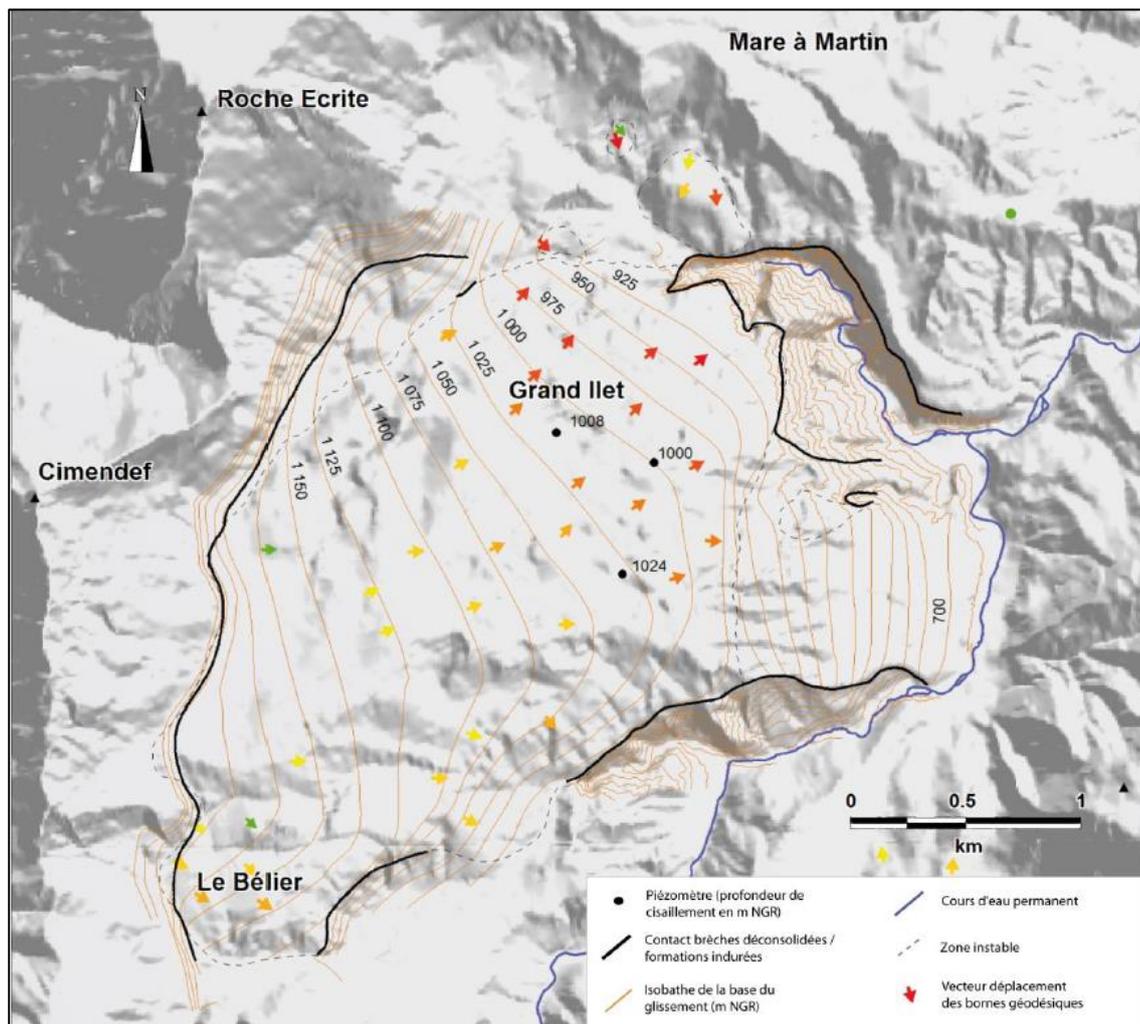


Figure 18 : Carte des isobathes de la base du glissement (surface de glissement) de Grand-Ilet (Belle, 2014).

Comparaison avec l'orientation des vecteurs déplacements mesurés à l'aide des bornes géodésiques (Belle, 2014 et Mazué, et al. 2013)

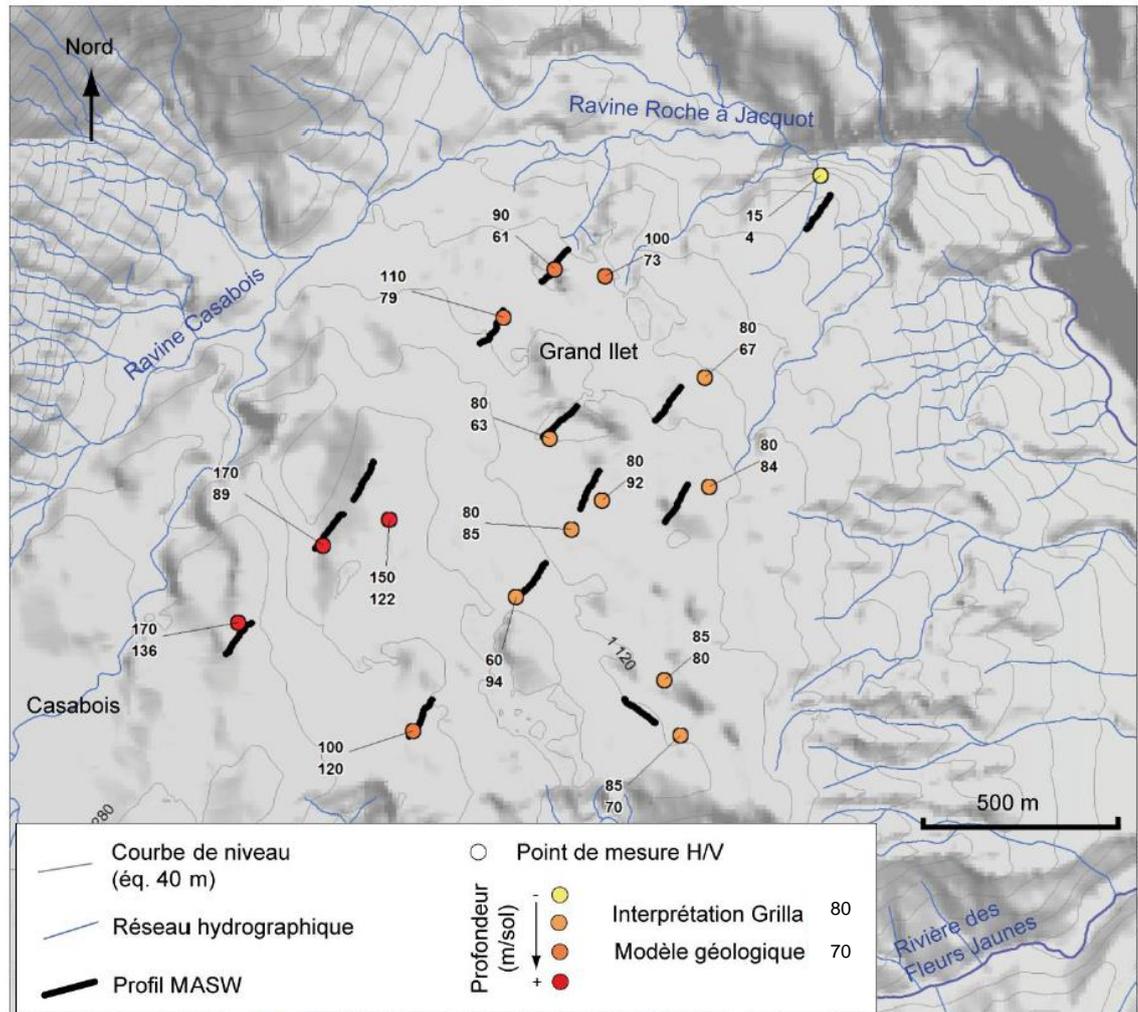


Figure 19 : Comparaison des profondeurs obtenues par l'interprétation des mesures géophysiques interprétées par Grilla (chiffres du haut) avec celles du modèle géologique de la base du glissement de Grand Ilet (chiffres du bas) – Belle, 2014. Les profondeurs obtenues par les mesures géophysiques sont du même ordre de grandeur que celle du modèle géologique (13.5 m d'écart en moyenne sur les 16 mesures - ). Des écarts plus ou moins significatifs sont néanmoins notés et sont expliqués par le fait que les deux méthodes employées conservent un caractère indirects.

Variable	Obs.	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
Grilla (H/V)	16	15	170	95.9	39.6
Modèle géologique	16	4	136	82.4	30.1

Figure 20 : Statistiques descriptives des résultats obtenus par l'approche géophysique H/V et l'approche géologique.



## 5. Conclusion

### 5.1. CONCLUSION SUR LES METHODES ELECTRIQUES MISES EN OEUVRE

Les tomographies de résistivité réalisées par Stratagem974 malgré d'importantes difficultés de terrain et sous la supervision du BRGM ont permis de mettre en évidence différentes nouvelles structures au sein du glissement de Grand-Ilet.

Les difficultés rencontrées lors de la réalisation de ces travaux sur le terrain, indiquent qu'un effort significativement plus important de publicité et d'acceptation des travaux devra être fait auprès de la population locale si de nouvelles investigations géophysiques sont envisagées.

Les données sont de qualité acceptable si l'on considère les conditions d'hétérogénéité du milieu, en particulier en surface, qui sont la cause d'un bruit significatif affectant les mesures. La qualité de ces données garantit des résultats fiables.

Les tomographies révèlent des formations résistantes dans la partie NE de Grand-Ilet qui pourraient marquer le substratum du glissement. La correspondance des profondeurs permet de raccorder au NE, ce substrat au sill de roche saine observé dans le rempart. Ce sill se marque très clairement sur le profil P2 par une anomalie résistante localisée qui conduit à limiter l'extension du sill à environ 200 m sous le glissement vers le SE. Il convient toutefois de rappeler que ce sill ne correspond pas à la surface de glissement à l'échelle de Grand-Ilet en raison de différents arguments géologiques développés par Belle (2014). Par ailleurs, au droit de la rivière des Fleurs Jaunes (pont de la RD52), ce sill est présent alors que la surface de glissement se situe 200 m à 250 m plus haut en altitude. D'autre part, dans la Ravine Roche à Jacquot et dans la ravine de l'Eglise, le contact entre le substratum et le glissement est identifié en l'absence de ce sill.

Dans les conditions de bruit de cette étude et en l'absence de contrainte extérieure, la précision de détermination du toit du substrat est évaluée à 30%.

La disparition de ce substrat résistant à l'W peut être expliqué par un changement de résistivité d'origine lithologique : le substrat plus altéré, plus argileux et en conséquence plus conducteur ne se différencierait plus de sa couverture conductrice. Pour contrôler cette interprétation, il est recommandé de recourir à des investigations par méthodes sismiques et forages.

Des compléments d'investigation par méthode électrique sont recommandés pour étudier le secteur qui apparait complexe dans la partie S (extrémité SE du profil P2).

Les configurations de quadripôle utilisées sont adaptées pour répondre à l'objectif principal de l'étude soit la détermination du toit du substrat du glissement. Toutefois, une résolution améliorée pourrait peut être obtenue avec des dispositifs de mesure plus détaillés<sup>3</sup>.

Il est recommandé de réaliser des diagraphies de résistivité dans les futurs forages qui pourraient être réalisés à l'avenir en particulier pour ceux qui seraient localisés à proximité des profils de tomographie électrique afin de produire de l'information permettant de contraindre l'inversion et l'interprétation.

## **5.2. CONCLUSION SUR LES METHODES SASW ET H/V MISES EN OEUVRE**

On constate que les profondeurs obtenues par les mesures géophysiques (interprétations Grilla) sont du même ordre de grandeur que celle du modèle géologique. Les fortes épaisseurs mesurées par la géophysique dans la zone amont (entre 150 et 170 m) se corrélient relativement bien avec celles quantifiées par le modèle géologique (entre 89 et 136 m). Toutefois, les profondeurs obtenues par la géophysique sont généralement plus élevées que celles proposées par le modèle géologique, en particulier dans la zone amont (secteur Casabois).

L'absence de quantification d'incertitude pour les mesures géophysiques limite fortement la comparaison point par point avec le modèle géologique. De plus, les points mesurés dans la partie médiane indiquent une géométrie plane de la base du glissement à environ 80 m de profondeur sur une grande surface, ce qui est peu réaliste au regard du pendage de la zone de cisaillement basale du glissement de Grand Ilet.

En revanche, la cohérence générale des deux approches à l'échelle globale du secteur d'étude (géophysique et géologie de terrain) confirme la géométrie établie, avec une tendance à l'augmentation de l'épaisseur depuis le pied du glissement vers l'amont. En termes de perspectives, la méthode H/V couplée aux mesures MASW s'avère porteuse pour préciser la géométrie du glissement de Grand Ilet. La quantification des incertitudes sera une étape primordiale en vue d'une meilleure valorisation des données acquises.

---

<sup>3</sup> De tels dispositifs peuvent être réalisés dans des conditions économiques acceptables grâce à des résistivimètres multicanaux et des systèmes à émetteur et récepteur séparés. En utilisant une plus forte puissance d'émission, ces systèmes permettent de mesurer des niveaux plus faibles de bonne qualité, avec des espacements réduits en réception pour une meilleure résolution tout en augmentant la profondeur d'investigation.

### **5.3. INTERPRETATIONS DES DONNEES GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES**

Des interprétations déduites des données géophysiques et géologiques sont proposées par Belle (2014) : *le modèle géologique établi met en évidence que le pendage de la base du glissement évolue spatialement. Il est orienté vers le sud-est au niveau des unités du Bélier et de Camp Pierrot, alors qu'il est majoritairement orienté vers le nord-est pour l'unité de Grand Ilet et de Casabois. En outre, la base du glissement montre une pente plus importante en direction de l'est au niveau du secteur est bordant la rivière des Fleurs Jaunes.*

*Après interpolation des isobathes, les paramètres caractéristiques du glissement peuvent être évalués à partir du modèle géologique. Les volumes instables sont calculés en soustrayant la surface interpolée de la base du glissement au modèle numérique de terrain. A l'échelle de l'unité active de Grand Ilet, le pendage moyen de la zone de cisaillement basale est de 6,5° en direction du nord-est. Et le volume mobilisé par cette unité est estimé à 175 Mm<sup>3</sup>.*



## 6. Bibliographie

Barthes, V., Fabriol, H., and Petiau, G., (1984) - Mesures magnéto-telluriques dans l'île de La Réunion - zones de Salazie et Grand-Brûlé: BRGM 84-SGN-226-IRG (<http://infoterre.brgm.fr/rapports/84-SGN-226-IRG.pdf>), 30 p.

Belle P. (2014) - Contribution des processus hydrologiques et hydrogéologiques aux glissements de terrain de grande ampleur : application au contexte tropical de la Réunion, BRGM - Université de Saint-Denis, La Réunion (<http://www.theses.fr/2014LARE0022>).

Borcherdt, R.D. (1970) - Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 29-61.

Delmas, J., & Desvarreux, P. (1999) - Mouvements de terrains à Grand Ilet - Etude géotechnique: Société Alpine de Géotechnique, 34 p.

Demange, J., Puvilland, P. & Rançon, J.P. (1984) - Prospection géothermique de l'île de La Réunion - Grand Brûlé - Salazie - Rapport final d'exploration: BRGM, 51 p.

Field, E.H., and K.H. Jacob (1995) - A comparison and test of various site-response estimation techniques, including that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1127-1143.

Lachet, C., and Bard P.Y (1994) - Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth*, **42**, 377-397.

Lacoste, V. & Daessle, M. (2003) - Etude hydrogéologique et géophysique de Grand Ilet: Hydroexpert, 44 p.

Lermo, J., and F.J. Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1574-1594.

Malengreau B. (1995) - Structure profonde de la Réunion d'après les données magnétiques et gravimétriques. Thèse Université de Clermont-Ferrand, France, 366 p.

Mazue R., Aunay B., Belle P. (2013) - Suivi des réseaux géodésiques dans les cirques de La Réunion. BRGM/RP-61994-FR. 65 p.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTR1*, **30**, **1**, 25-32.

Stratagem (2011a) - Etude géophysique du glissement de terrain de grande ampleur de Grand-Ilet. Mission réalisée du 19 juin au 1er juillet 2011 - 3 profils de résistivité électrique - Version 2 - 7 Novembre 2011. 64 p.

Stratagem (2011b) - Campagne de mesures géophysiques - Glissement de Grand-Ilet  
Mission réalisée du 11 au 15 juin 2012 - Rapport de mesures sismiques MASW. 52 p.

Valentin, J. (1984) - Etude hydrogéologique par sondages électriques sur la rivière  
Fleurs Jaunes à Salazie (Ile de La Réunion). Note/84-GPH-053 BRGM, 2 p.

## **Annexe 1**

### **Compte rendus de la supervision réalisée sur le terrain du 20/06 au 23/06/2012**



## **CR préliminaire de supervision des travaux de Stratagem974 – n°3**

### **Jeudi 23/06/11 :**

L'analyse des problèmes de mesure rencontrés la veille, a montré que le canal 1 se comportait correctement et que les canaux 2, 3 et 4 rassemblaient l'essentiel des mesures incertaines. Les différentes mesures suivantes ont été engagées :

- Mise au point d'un protocole de mesure sur le seul canal 1 en optimisant les configurations de protocole (diminution du K pour améliorer le rapport S/N et suppression des écartements les plus importants). Comme la mesure sur un seul canal demande plus de temps, le nombre de points de quadripôle de mesure a dû être réduit.
- Réduction du nombre de points de mesure.
- Remplacement des relais des circuits de compensation de PS sur les canaux 2, 3 et 4.

Réparation de la ligne de l'électrode lointaine (coupée et volée en 2 endroits durant la nuit). Nouvelle réparation en milieu de matinée après que la ligne ait été de nouveau coupée et 2 points. Une coupure supplémentaire sera encore observée en milieu de journée avant le lancement de l'acquisition « reverse ».

Acquisition des mesures en configuration pôle-dipôle forward et reverse sur la même portion (N) du profil P2 avec le nouveau protocole monocanal (canal 1).

Recommandation pour la poursuite et l'achèvement des travaux :

- Pour limiter les problèmes de coupure du câble de l'électrode lointaine, il est recommandé de renforcer les équipes de surveillance chaque fois qu'il est possible. Une sensibilisation accrue des agents municipaux est opérée côté BRGM et E. Delcher a interpellé la gendarmerie de son côté ce jour.
- L'acquisition monocanal avec le nouveau protocole de 571 points conduit à un set de données avec majoritairement des signaux au-dessus de 1 mV et en-deçà de 3% d'erreur. La profondeur d'investigation donnée en résultat d'une inversion standard avec RES2DINV atteint env. 200 m de profondeur. L'objectif assigné au contrat est donc atteint. Il serait toutefois possible d'optimiser le protocole pour essayer de gagner légèrement en profondeur d'investigation en tentant de descendre le niveau de signal à 0.5 mV. En réduisant la longueur des plus grands dipôles de mesure de moitié on divisera le signal par 2 mais on augmentera la distance OA d'environ 1/3 et par là la profondeur d'investigation. Il n'est cependant pas certain que cela change le résultat. Cette optimisation est laissée à l'initiative du prestataire.

- Localisation des mesures : les électrodes sont levées au GPS de poche. Sur chaque dispositif, la distance de 2 ou 3 points topographiques non ambigus aux électrodes les plus proches sont levés au ruban métré. Ces points caractéristiques seront utilisés pour vérifier la cohérence géographique du levé avec la carte IGN 1/25 000 ou les orthophotos satellites ou aériennes disponibles. 1 ou 2 pts topographiques seront répétés chaque jour pour vérifier la répétitivité des mesures de coordonnées GPS et détecter éventuellement une période d'incertitude incompatible avec la précision de l'étude. La comparaison des distances obtenues par GPS de poche (en connaissance de l'altimétrie) et les distances le long du profil de mesure conduira avec l'évaluation de la répétitivité à évaluer l'incertitude globale de positionnement.
- Altimétrie : l'altimétrie sera mesurée en relatif le long des profils de mesures grâce à un distance-mètre laser muni d'une fonction inclinométrique. Si possible une fermeture (par ex. entre les trois profils) sera réalisée pour évaluer l'incertitude globale du levé. Les utilisateurs du résultat de l'étude souhaitent avoir des coupes inversées avec une ordonnée en altitude plutôt qu'en profondeur. L'altitude sera obtenue par rattachement des mesures relatives au réseau géodésique du projet MVT2 dont les valeurs et les détails seront livrés par le BRGM Réunion (il existe env. 3 bornes par profil sauf sur P4, le transverse).
- Il est convenu que les données .dat (format RES2DINV) seront transmises régulièrement au BRGM. Des données plus détaillées pourront être livrées sur demande.

## **CR préliminaire de supervision des travaux de Stratagem974 – n°2.**

### **Mercredi 22/06/11 :**

Réparation et tests de la liaison à l'électrode lointaine (résistance de prise d'environ 700 ohm). Remise en place d'une partie du dispositif de mesure (situé en zone habité) qui avait été démobilisé la veille au soir.

Mesure en configuration pôle-dipôle forward et reverse (injection de 200 mA généralement) : observation de potentiels négatifs et de paramètre qualité élevés (erreur supérieures à 10%) dès que le niveau n de mesure augmente. Possibilité de problème instrumental sur certains canaux, en cours de vérification et remédiation.

Mesure en configuration Wenner-Schlumberger. Même type d'observations cependant moins marquées.

Accord entre BRGM (JM. Baltassat) et Stratagem (E. Delcher) sur la réalisation de l'altimétrie par STRATAGEM974 au moyen d'un distance-mètre laser avec fonction inclinométrique en fin de mission.

## **CR préliminaire de supervision des travaux de Stratagem974 – n°1.**

### **Lundi 20/06/11 :**

Stratagem974 met en place l'électrode lointaine et poursuit des efforts de relation publique avec les propriétaires ou exploitants de parcelle pour expliquer et permettre la reprise des travaux sur les layons ouverts par le BRGM.

### **Mardi 21/06/11 :**

Stratagem974 met en place un dispositif de 64 électrodes séparées de 20 m sur le profil P2 en aval glissement (NE). Les moyens et les procédures mis en œuvre sont tout à fait conformes aux exigences des travaux définis au devis.

Tests des résistances de prise qui sont généralement de quelques centaines d'ohm.m (quelques dizaines d'ohm et 2 kOhm pour les valeurs extrêmes) ce qui offre de bonnes conditions d'injection. Liaison et test de l'électrode lointaine qui s'avère non connectée. Observation de plusieurs coupures et prélèvement de câble. Impossibilité de lancer une acquisition pôle-dipôle.

Mesure d'un dispositif Wenner Alpha (2 h30 env., injection de quelques 100 aines à 500 mA) et première inversion sur site. Observation d'un important milieu conducteur en profondeur qui pourrait limiter significativement la profondeur d'investigation.

Levé au GPS de poche des positions (coordonnées) des électrodes du dispositif.



## **Annexe 2**

### **Rapports Stratagem sur CD-Rom**

Stratagem (2011a) - Etude géophysique du glissement de terrain de grande ampleur de Grand-Ilet. Mission réalisée du 19 juin au 1er juillet 2011 - 3 profils de résistivité électrique - Version 2 - 7 Novembre 2011. 64 p.

Stratagem (2011b) - Campagne de mesures géophysiques - Glissement de Grand-Ilet Mission réalisée du 11 au 15 juin 2012 - Rapport de mesures sismiques MASW. 52 p.







**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction géologique régionale "Réunion"**  
5, rue Sainte-Anne  
CS 51016  
97404 Saint-Denis Cedex  
Tél. : 02 62 21 22 14