



**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 – Phase 2**

Rapport Final

BRGM/RP-66605-FR

Décembre 2016

1.89 3740.46 -625.5



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 2

Rapport Final

BRGM/RP-66605-FR
Décembre 2016

Y. Thiery, P.-A. Reninger, A. Nachbaur,

Vérificateur :

Nom : Vandromme R.

Date : 30/01/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : Grandjean G.

Fonction : **Dir. Adjoint**

Date : 02/02/2017

Signature :



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

Mots-clés : Electromagnétisme hélicoptère, mouvement de terrain, Antilles, aléa, ALICE, Martinique, Morne-Figue.

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

Y. Thiery, P.-A. Reninger, A. Nachbaur, R. (2016) – 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 – Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-66605-FR, 73 p., 35 ill.

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 ces phénomènes apparaît nécessaire. Les DROM bénéficient maintenant d'une couverture en électromagnétisme hélicopté, ce qui doit faciliter l'acquisition d'informations sur les épaisseurs et la spatialisation des formations géologiques et superficielles sur les 200 premiers mètres tout en évitant de déployer des moyens techniques lourds à terre.

Cette étude propose de mettre en place une méthodologie d'analyse de glissement de terrain combinant ces nouvelles informations aux paramètres plus classiques, tels que les paramètres géotechniques, géologiques et hydrogéologiques.

La phase 1 du projet a montré qu'il était possible d'imager l'étendue et l'épaisseur des formations sur deux sites en Martinique. Ainsi, des couches très conductrices (de faible résistivité) présentes au niveau des deux glissements de terrain (secteur de la Médaille et de Morne-Figue) ont été identifiées et comparées avec les sondages existants.

Au cours de la phase 2 (année 1), de nouvelles informations ont été apportées, notamment sur le site de la Médaille, avec l'identification de deux corps bien différenciés, correspondant probablement à deux corps formant la masse instable alors qu'un seul était généralement admis.

La phase 2 de ce projet, avait pour objectif :

- De caractériser les différentes couches de terrain mobilisables pour différents environnements ;
- De les intégrer dans le logiciel ALICE® afin de caler et valider le modèle déterministe pour des phénomènes dommageables caractéristiques en Martinique ;
- D'établir des cartes de probabilité de rupture en intégrant les données issues de l'EM hélicopté.

Ce rapport concerne en premier lieu l'année 2 de la phase 2 c'est-à-dire : (i) la caractérisation spatiale et géo-mécanique des données nécessaires pour une modélisation des probabilités de rupture sous ALICE®, (ii) l'intégration de ces informations sous ALICE®, (iii) calage du modèle. Ces trois étapes sont réalisées sur le site de Morne-Figue. Les résultats de cette étude montrent que :

- Le site de Morne-Figue possède une structure géologique complexe, ce qui pouvait-être supposé mais peu mis en évidence auparavant ;
- Les informations issues de l'EM hélicopté peuvent être intégrées dans un logiciel de modélisation déterministe de type ALICE® après confrontation avec les données terrain ;
- Un niveau de nappe d'eau minimum est nécessaire pour mobiliser les terrains instables afin que les terrains mobilisables soient mis en mouvement.

Le fait d'avoir introduit les étendues spatiales et les épaisseurs des formations nouvellement identifiées avec l'EM hélicopté dans un modèle déterministe sur un second site confirme

l'exploitabilité de cette approche dans un contexte volcanique complexe et altéré sur des secteurs instables.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Site d'étude.....	11
2.1. SITE D'ETUDE	11
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	12
2.2.1. Basaltes de Vert-Pré.....	13
2.2.2. Hyaloclastites.....	13
2.2.3. Formations volcano-sédimentaires : tuffites azoïques et conglomérats polygéniques.....	13
2.2.4. Andésite massive.....	14
2.3. LES GLISSEMENTS DE TERRAIN DE MORNE-FIGUE	14
2.3.1. Description des glissements	14
2.3.2. Activité des glissements (Illustration 9)	18
3. Imagerie, interprétations et caractérisations géo-mécaniques du glissement de Morne- Figue.....	23
3.1. IMAGERIES	23
3.1.1. Principes généraux	23
3.1.2. Retraitement des données EM.....	23
3.1.3. Cartographie de la résistivité 2D	24
3.2. INTERPRETATIONS	25
3.2.1. Sondages et coupes	25
3.2.2. Corrélation entre les résultats de l'EM hélicoptère et les études antérieures	27
4. ALICE® : principes, variables utilisées et stratégie de modélisation	33
4.1. ALICE® : PRINCIPES ET PRESENTATION DU MODELE	33
4.1.1. Introduction	33
4.1.2. Principes.....	33
4.1.3. Intérêt d'ALICE® pour l'étude	34
4.2. VARIABLES UTILISEES	35
4.2.1. Le(s) MNT(s).....	35
4.2.2. Construction du modèle géotechnique	35
4.2.3. Caractéristiques géotechniques retenues	38
4.2.4. Hydrogéologie.....	45
4.3. PROTOCOLE DE MODELISATION.....	45

5. Résultats	51
5.1. INFLUENCE DE LA MAILLE DE CALCUL.....	51
5.1.1. Modèles et cartes obtenues.....	51
5.1.2. Discussion.....	53
5.1.3. Conclusion de la phase 1.....	55
5.2. INFLUENCE DU NIVEAU DE LA NAPPE D'EAU.....	55
5.2.1. Glissements translationnels superficiels.....	55
5.2.2. Glissements profonds.....	57
5.2.3. Conclusion de la phase 2 – année 2.....	59
6. Conclusion finale : intérêts, limites, recommandations	61
6.1. GENERALITES.....	61
6.2. INTERETS ET LIMITES DE L'APPROCHE.....	61
6.1.1. Intérêts.....	61
6.1.2. Limites actuelles.....	63
6.3. RECOMMANDATIONS.....	64
7. Bibliographie	67

Liste des figures

Illustration 1 - Localisation des deux sites d'études choisis (Fond Scan25®).	11
Illustration 2 - Photographies du site d'étude. A gauche vue sur le versant habité de Morne-Figue. A droite : vue sur la RN1 et le secteur amont du glissement.	12
Illustration 3 - Carte de synthèse géologique (Fond SCAN 25® ; d'après Reninger et al., 2014). En noir la localisation des glissements de terrain étudiés pour ce rapport.	12
Illustration 4 – Matériaux observés sur le terrain. A gauche basaltes altérés de Vert-Pré. Au centre des hyaloclastites. A droite des andésites altérées à Morne Congo (d'après Reninger et al., 2014).	14
Illustration 5 - Localisation des glissements terrain dans le secteur de Morne-Figue et année d'occurrence ou de réactivation (d'après Reninger et al., 2014 ; BDMVT®, fond SCAN25®).	15
Illustration 6 - Exemples de coupes interprétatives de la partie amont du glissement de Morne-Figue. A – Coupe interprétative du secteur amont du glissement d'après Allard (1989). B – Coupe dérivée du MNT Litto 3D et interprétation suite aux observations de terrain de 2016.	16
Illustration 7- Exemple de résultats de la campagne d'investigations géophysique réalisée en 2007 sur le site de Morne-Figue (Barras et Ollagnier, 2007).....	17
Illustration 8- Exemple d'observations réalisées en 2016. Photographie de gauche : instabilités superficielles le long du ruisseau de Morne-Figue. Photographie de droite : altération	

<i>des basaltes de Vert-Pré pouvant être localement destabilisés de manière superficielle.</i>	18
Illustration 9- Carte des indices d'instabilités sur le site de Morne-Figue.	19
Illustration 10 - <i>Indices d'instabilité sur la Route comunale de Morne-Figue en 2016. A gauche rupture de la bordure en béton. A droite ressaut sur la route en limite du glissement (Fond SCAN 25®, Orthophoto 2010 IGN®, Relief dérivé du MNT Litto 3D).</i>	19
Illustration 11 - <i>Glissements du site de Morne-Figue : partie active et latente (Orthophoto 2010 IGN®).</i>	20
Illustration 12 - <i>Grille de résistivité entre 2 et 4 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain et les ensembles géologiques (fond SCAN 25®).</i>	24
Illustration 13 - <i>Grille de résistivité entre 19 et 24 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain et les ensembles géologiques (fond SCAN 25®).</i>	25
Illustration 14 - <i>Sondages disponibles dans la BSS (fond SCAN25® ; Reninger et al., 2014).</i>	26
Illustration 15 - <i>Caractéristiques des sondages proches du site étudié. En rosé les sondages qui ont permis de caler le modèle géotechnique fondé sur les coupes de résistivités.</i>	26
Illustration 16 - <i>Carte des observations de terrain réalisées depuis 2014 (Orthophoto 2010 IGN®). En noir le secteur d'étude.</i>	27
Illustration 17- <i>Localisation des coupes servant à l'interprétation.</i>	28
Illustration 18 – <i>Coupes de résistivité et interprétations sur le site de Morne-Figue.</i>	29
Illustration 19 – <i>Synthèse des formations observées et/ou interprétées sur le site de Morne-Figue. A- D'après Allard (1989). B- D'après Barras et Ollagnier (2007). C- Coupe issue de l'EM hélicopté (les numéros de secteurs identifiés sont reportés sur la coupe par leurs numéros respectifs).</i>	31
Illustration 20 – <i>Carte des secteurs homogènes identifiés sur Morne-Figue.</i>	32
Illustration 21 – <i>Schématisation du principe de fonctionnement d'ALICE® couplé au module hydrologique GARDENIA®. Dans cette étude seul est utilisé le module ALICE® calculant des probabilités de rupture selon une nappe d'eau empirique (Thiery et al., 2017).</i>	34
Illustration 22 – <i>Exemples des 2 MNT disponibles pour l'étude. A - BD Alti®. B - MNT 2010 (Litto3D). Les MNT sont représentés sous forme de reliefs ombragés.</i>	35
Illustration 23 – <i>Représentation simplifiée du modèle géotechnique par unité géologique retenu pour ALICE®.</i>	37
Illustration 24 – <i>Représentation 3D des interfaces introduites dans ALICE®. Le relief est dérivé du MNT Litto 3D 2010.</i>	38
Illustration 25 – <i>Caractéristiques géotechniques pour chaque type de formation géologique et son cortège d'altération. Les valeurs représentent les extrêmes relevés sur le site d'étude (en gras) ou dans la littérature pour des essais géotechniques localisés dans des contextes volcaniques.</i>	39
Illustration 26 – <i>Exemple de cartographie utilisée pour définir les valeurs géotechniques à utiliser pour la modélisation sous ALICE®. Les valeurs des figures A et B sont données à titre indicatif et n'ont pas de valeurs significatives pour l'étude. A - Exemple pour un versant toujours stable. B - Exemple pour un versant en situation de stabilité précaire (i.e. le versant est stable par endroit avec une/des localisation(s) de rupture observé(es).</i>	40
Illustration 27 – <i>Schéma explicatif d'aide à la décision pour certaines valeurs géotechniques. Les valeurs des figures A, B et C sont données à titre indicatif et ne sont pas significatives pour l'étude. A – FS obtenus pour un versant quelconque. B – Visualisation des</i>	

secteurs de rupture modélisés sous Talren® avec les valeurs posant problème d'interprétation. C – Valeurs gardées pour être introduites sous ALICE®. 42

- Illustration 28 – *Coupe type utilisée sous Talren® pour l'analyse de sensibilité. 43*
- Illustration 29 – *Valeurs géotechniques retenues (en gras) après analyse de sensibilité pour chaque couche du modèle géotechnique pour le site de Morne-Figue. Le secteur S5 n'est pas intégré dans la modélisation. 46*
- Illustration 30 – *Exemples de fenêtre de paramétrage sous ALICE®. A – Interface cartographique. B – interface de calage par profil..... 48*
- Illustration 31– *Exemple des distributions de probabilités affectées dans ALICE® pour chaque paramètre géotechnique pour les couches B1, B2, B3 et B4. L'outil réalise les tirages de Monte Carlo (n = 10 000) dans le spectre fixé par l'expert. La probabilité de tirage est plus forte sur les valeurs situées en pic de distribution. 49*
- Illustration 32– *Résultats de calcul de probabilités pour une **rupture translationnelle de 30 m de long et d'une profondeur superficielle** à l'interface entre la couche A1/A2 et B1/B2 (4 m maximum) correspondant au glissement superficiel de 1977. La nappe d'eau considérée est à son maximum soit à 0 m (sub-affleurante). A- Calcul réalisé avec une maille de 10 m. B- Calcul réalisé avec une maille de 5 m. 51*
- Illustration 33– *Résultats de calcul de probabilités pour une **rupture rotationnelle de 50 m de long et d'une profondeur comprise entre 9 et 11 m** correspondant au glissement de Morne-Figue. La nappe d'eau considérée est à son maximum soit à - 0.5 m sous la surface. A- Calcul réalisé avec une maille de 10 m. B- Calcul réalisé avec une maille de 5 m. 52*
- Illustration 34 – *Cartes des probabilités de rupture pour des glissements translationnels superficiels selon le niveau de la nappe d'eau (Ground Water level = GWL). Les calculs sont réalisés avec une maille de 10 m..... 56*
- Illustration 35 – *Cartes des probabilités de rupture pour des glissements rotationnels profonds selon le niveau de la nappe d'eau (Ground Water level = GWL). Les calculs sont réalisés avec une maille de 10 m. 58*

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 ;
- Des saisons cycloniques marquées participant activement à la dégradation des terrains ;
- D'une forte pression foncière (comme par exemple à Mayotte, Audru *et al.*, 2010).

L'instabilité de versant peut être évaluée par plusieurs approches comme (i) l'approche experte, (ii) l'approche statistique ou (iii) l'approche déterministe. Parmi ces dernières, les approches statistiques et déterministes sont les plus objectives s'affranchissant pour tout ou partie de l'avis subjectif de l'expert.

Les approches déterministes, utilisant dorénavant des modèles numériques (comme ALICE®), permettent de calculer un facteur de stabilité de pentes en tenant compte de paramètres mécaniques, géotechniques, hydrologiques et hydrogéologiques (obtenus à partir de cartes, données géologiques disponibles, sondages, observations de terrain, analyses piézométriques, reconnaissances ponctuelles de type forage, ...). Elles ont besoin en parallèle de modèle 2D/3D des couches souvent bâties à partir d'un MNT.

Toutefois, les moyens pour obtenir des informations indispensables pour alimenter les modèles sont parfois difficiles à acquérir et peuvent être lourds à mettre en œuvre sur le terrain. Ainsi, l'ElectroMagnétisme (EM) hélicopté peut être une alternative pour obtenir certaines informations rapidement et sur des espaces larges.

Depuis le début des années 2000, l'EM hélicopté en domaine temporel est utilisé pour des 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 la couverture géophysique hélicoptée haute résolution des départements de Mayotte, de la Guadeloupe, de la Martinique et de la Réunion. Ainsi, ont pu être imagés 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 d'obtenir des informations pertinentes à la fois sur l'épaisseur des formations et leur spatialisation. Le croisement entre les données EM et les forages doit permettre d'affiner la géométrie en trois dimensions de l'épaisseur des formations, et donc des sols potentiellement mobilisables.

L'objectif de ce projet est de concevoir et d'évaluer une méthodologie qui servira aux modélisations 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 est effectuée.** Des comparaisons/corrélations entre les données de terrain et de forage et les données de géophysique hélicoptère sont réalisées dans l'optique de caractériser les formations potentiellement instables et identifier les mouvements de terrain potentiels. Ces comparaisons sont réalisées sur deux secteurs se voulant représentatifs des mouvements de terrain observés en Martinique. A l'issue de cette phase, l'apport de l'EM hélicoptère à la cartographie de l'aléa est 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 sont intégrés dans le logiciel ALICE® afin de cartographier la susceptibilité des versants sur les deux secteurs sélectionnés.** Une phase d'échanges, entre les observations terrain, les forages et les résultats obtenus, permet de caler et de valider le modèle. L'étude est complétée par une phase d'évaluation qui permet d'identifier les apports et les faiblesses de la méthode, ainsi que des propositions pour l'améliorer.

Ce rapport concerne l'année 2 de la phase 2 dont les objectifs peuvent être déclinés en 5 sous-tâches:

1. Comparaisons/corrélations entre les données de géophysique hélicoptère et les données de terrain sur le site de Morne-Figue (dans l'optique de caractériser les formations potentiellement instables et identifier les mouvements de terrain potentiels) ;
2. Caractérisation géo-mécanique des formations potentiellement instables ;
3. Intégration des données issues des tâches 1 et 2 dans le modèle ALICE® ;
4. Calage/validation du modèle ;
5. Bilan de cette année 2 de la phase 2

Une conclusion finale du projet concernera l'intérêt, les limites et quelques recommandations pour l'intégration des données complexes issues de l'EM hélicoptère complexes et l'analyse de la susceptibilité par modélisation spatialisée à base physique sous ALICE® pour différents types d'instabilités gravitaires caractéristiques des environnements volcaniques des Caraïbes.

2. Site d'étude

Les glissements de la Médaille et Morne-Figue ont été choisis comme site d'étude car ils sont représentatifs des types de glissements dommageables en Martinique et sont, par ailleurs, relativement bien renseignés (Illustration 1). Ils sont localisés respectivement dans les communes de Fort de France et Trinité. Dans ce rapport seul le glissement de la Morne-Figue est discuté¹.

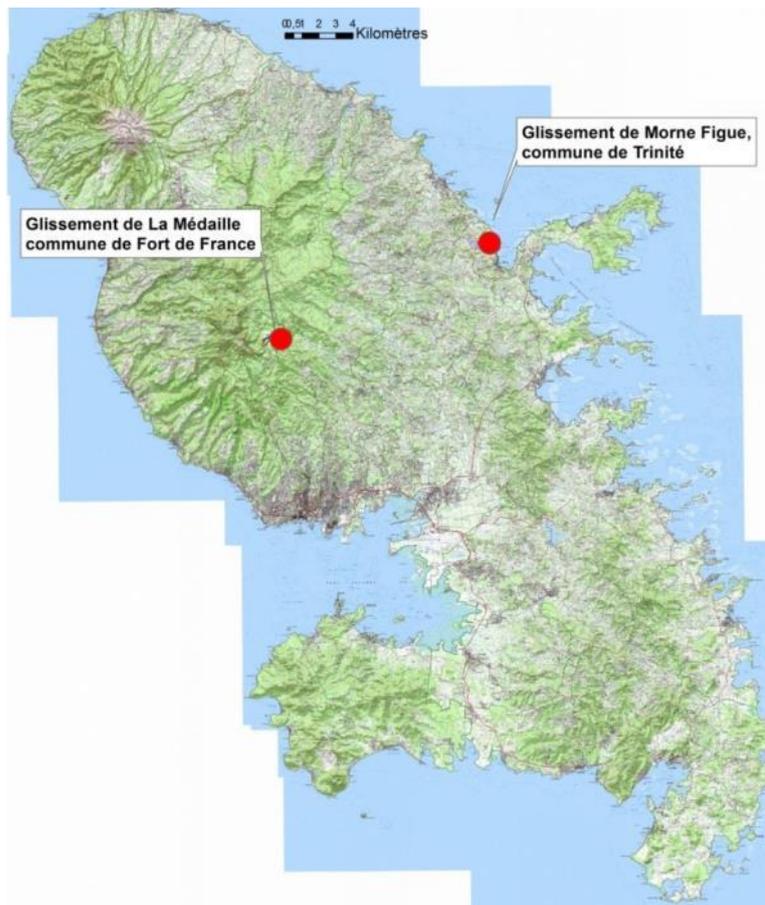


Illustration 1 - Localisation des deux sites d'études choisis (Fond Scan25 ©).

2.1. SITE D'ETUDE

Le secteur dit de Morne-Figue (Illustration 2) se situe sur la commune de Trinité sur la côte Est de l'île. Le site d'étude d'une surface de 0.36 km² est limité au Nord et à l'Ouest par le Morne-Figue (129 m d'altitude) et par le Morne-Congo (232 m d'altitude) armés dans les andésites compactes, au Sud par le ruisseau du Gué et à l'Est par la baie de la Crique. Le site, vallonné et aux altitudes variant entre 100 et 10 m, connaît des pentes faibles à fortes, comprises entre 5° et 45°.

¹ Les résultats sur le glissement de la Médaille sont discutés dans le rapport précédent (Thiery *et al.*, 2015)

Ce secteur très anthropisé (une trentaine d'habitations) est bordé à l'Ouest par la RD1 et traversé par la route dite de Morne-Figue qui relie la RN1 au centre-ville de la commune de la Trinité et dessert les habitations localisées sur le versant (Illustration 2). Le versant principal est connu depuis 1977 pour de multiples instabilités de versant suite à la construction de la RD 25 Bis (devenue RN 1).



Illustration 2 - Photographies du site d'étude. A gauche vue sur le versant habité de Morne-Figue. A droite : vue sur la RN1 et le secteur amont du glissement.

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'un point de vue géologique, le secteur d'étude se situe sur des formations appartenant à la chaîne volcanique sous-marine du Vauclin-Pitault et dans une moindre mesure à l'édifice du Morne Jacob (Westercamp *et al.*, 1989, 1990).

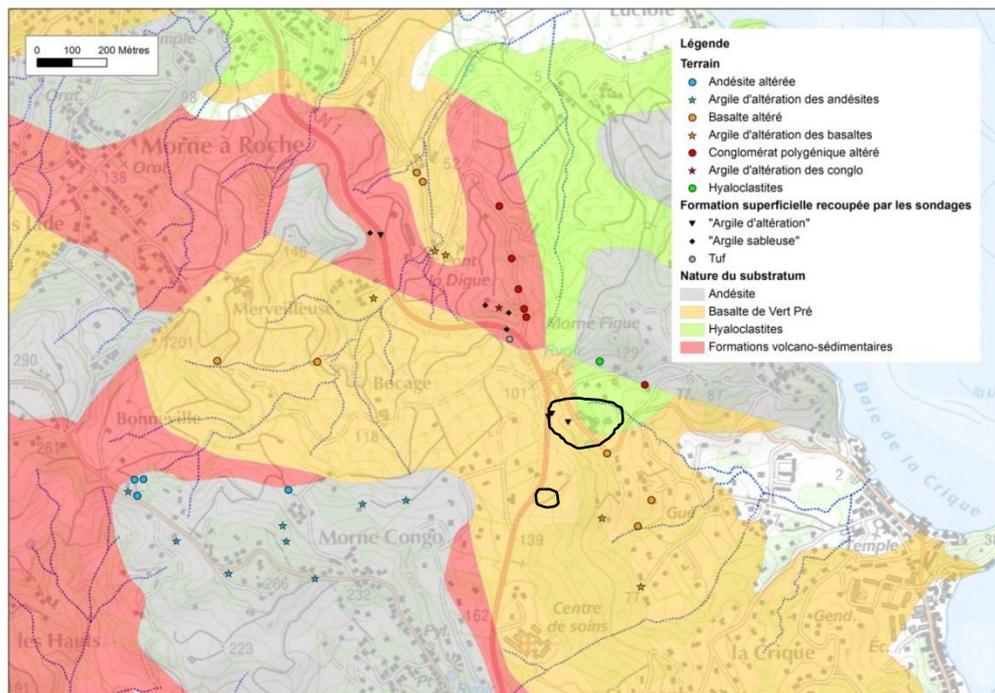


Illustration 3 - Carte de synthèse géologique (Fond SCAN 25 © ; d'après Reninger *et al.*, 2014). En noir la localisation des glissements de terrain étudiés pour ce rapport.

2.2.1. Basaltes de Vert-Pré

Les plus anciennes formations du site d'étude 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, décrites comme andésitiques, sont très altérées et la roche saine n'apparaît plus que sous forme de boules dispersées dans une matrice argilisée (Westercamp, 1989).

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 décrivent, au sommet du profil d'altération de cette formation, une « argile raide bariolée », comportant plus ou moins de reliquats de la roche mère (éléments millimétriques à centimétriques altérés argilisés ; Illustration 4) dont l'épaisseur constante est de 9 à 10 m. Sous cette couche, la lave est altérée, elle est « fortement colorée par les oxydes de fer ». Ainsi, la roche saine n'est pas atteinte ; l'épaisseur de profil d'altération dépasserait donc les 25 m avec deux couches distinctes (Allard, 1989).

La présence de la source de Morne-Figue et les témoignages des gestionnaires de route, témoignent de l'importante circulation souterraine proche du sol (i.e. sur les 15 premiers mètres) dans le versant et au sein des Basaltes de Vert-Pré.

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 anguleux de taille centimétrique emballés dans une matrice cendreuse indurée (Illustration 4). Ces formations n'affleurent que localement sur le secteur d'étude et constituent le substratum du Morne-Figue. Les hyaloclastites saines sont dotées d'une porosité interstitielle faible et seraient donc peu perméables (Barras et Ollagnier, 2007 ; Vittecoq *et al.*, 2007). Toutefois, la présence au sein des faciès primaires de coulées de laves inter-stratifiées ainsi qu'une fracturation tectonique peuvent conférer, localement, des propriétés aquifères supérieures (Vittecoq *et al.*, 2007). Enfin, ces formations compactes et de porosité limitée sont peu sujettes à l'altération (Vittecoq *et al.*, 2007).

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.

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 1170ZZ022, 1170ZZ024, 1170ZZ025). Cette formation argileuse a été recoupée sur une dizaine de mètres d'épaisseur au sommet au Sud du Pont la Digue.



Illustration 4 – Matériaux observés sur le terrain. A gauche basaltes altérés de Vert-Pré. Au centre des hyaloclastites. A droite des andésites altérées à Morne Congo (d'après Reninger et al., 2014).

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 hyaloclastites du Vauclin Pitault.

Sur les hauteurs de Morne Congo (Illustration 4) 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 ».

2.3. LES GLISSEMENTS DE TERRAIN DE MORNE-FIGUE

2.3.1. Description des glissements

Le secteur d'étude connaît deux glissements de terrain : le glissement de 1977 et le glissement dit de « Morne-Figue ».

Le glissement de 1977

Le glissement situé au Sud du secteur (Illustration 5) et déclenché en 1977 est d'ampleur modeste (0,32 Ha). Il s'apparente à un glissement translationnel de faible épaisseur (i.e. 3-4 m) affectant des argiles d'altération de Vert-Pré. Son occurrence est directement liée à un mauvais drainage des eaux. Cette instabilité a été stabilisée comme il est décrit au paragraphe 2.3.2.

Le glissement dit de « Morne-Figue »

Le deuxième glissement de terrain observé sur le site d'étude est le glissement dit de Morne-Figue (Illustration 5). Ce glissement d'une superficie de 2,99 Ha est connu depuis 1988 (Allard, 1989). Les conclusions sur le type de rupture ne sont pas définies exactement. En effet, Allard

mentionne plutôt un glissement de type translationnel se développant à l'interface d'argile d'altération alors que Barras et Ollagnier (2007) ne tranchent pas entre glissement rotationnel profond ou translationnel superficiel. Les conclusions des observations de terrain réalisées en octobre 2016 pencheraient plutôt vers un glissement à composante rotationnelle en amont (avec un escarpement demi-circulaire et une rupture circulaire) et une composante plutôt translationnelle en aval correspondant au secteur de propagation de la masse glissée (Illustration 6).

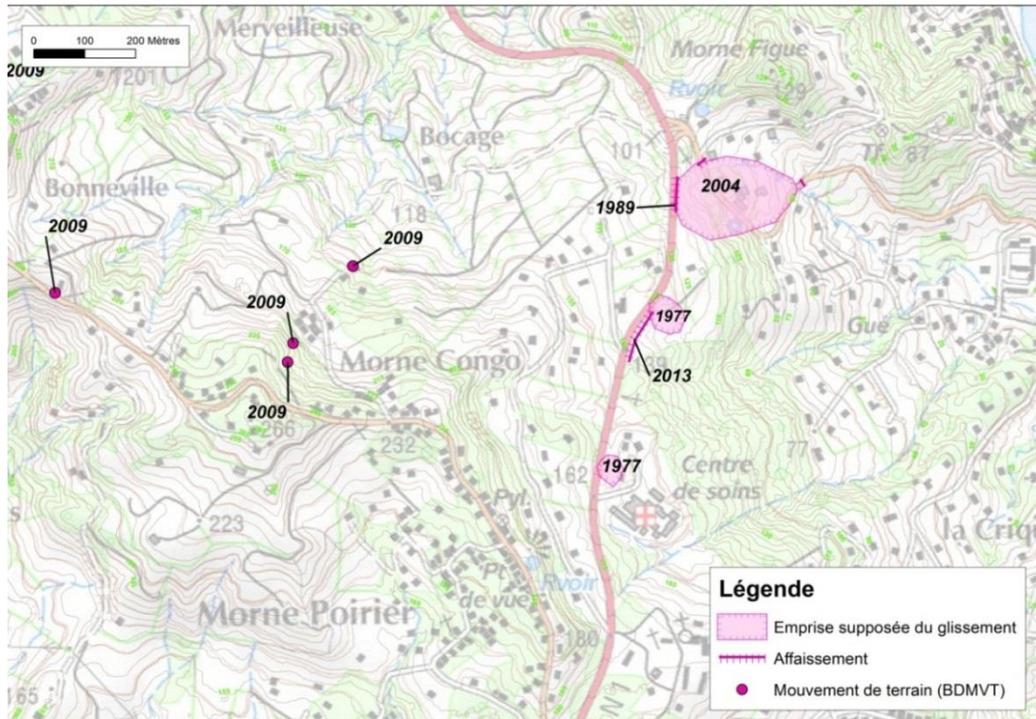


Illustration 5 - Localisation des glissements terrain dans le secteur de Morne-Figue et année d'occurrence ou de réactivation (d'après Reninger et al., 2014 ; BDMVT®, fond SCAN25®).

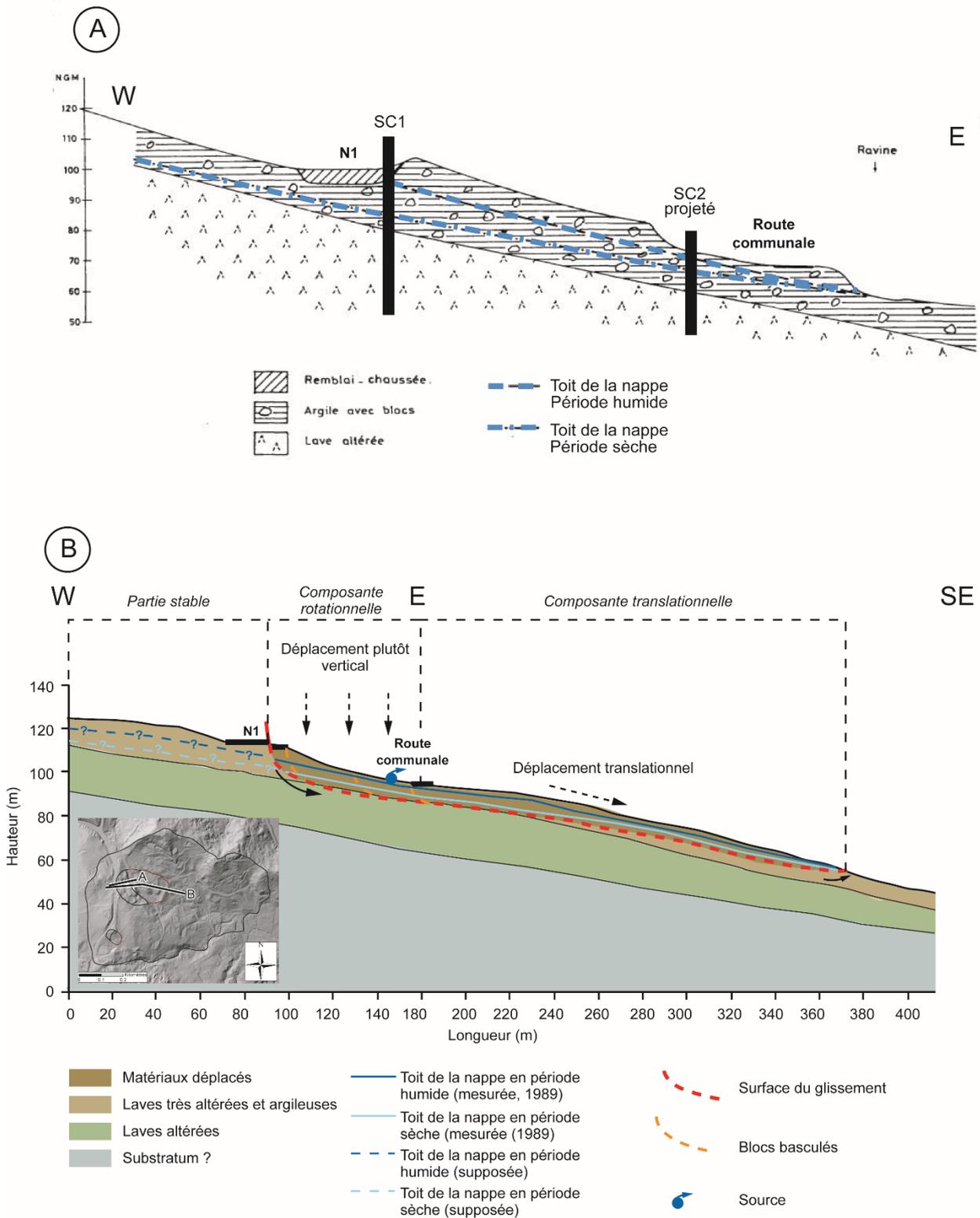


Illustration 6 - Exemples de coupes interprétatives de la partie amont du glissement de Morne-Figue. A – Coupe interprétative du secteur amont du glissement d'après Allard (1989). B – Coupe dérivée du MNT Litto 3D et interprétation suite aux observations de terrain de 2016.

Si le type de phénomène n'est pas bien défini, les matériaux affectés par ce glissement sont plutôt bien différenciés, notamment suite à la campagne géophysique réalisée en 2007 à l'aide de

panneaux électriques (Barras et Ollagnier, 2007). Ainsi, à l'endroit du glissement, une nouvelle analyse des résultats de 2007 (Illustration 7) permet de différencier plusieurs horizons de matériaux avec :

- Un ensemble supérieur composé d'argiles ou de remblai d'une épaisseur comprise entre 1 m et 3 m ;
- Un horizon d'une épaisseur variant entre 8 et 10 m et composé d'argiles d'altération probablement saturées et où la nappe a été définie comme fluctuante en 1989 (Allard, 1989) ;
- Un horizon d'une épaisseur variant entre 10 et 12 m composé probablement d'argiles altérées des basaltes de Vert-Pré ;
- Un horizon peu résistant dont l'épaisseur n'est pas connu.

Combinaison des dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger

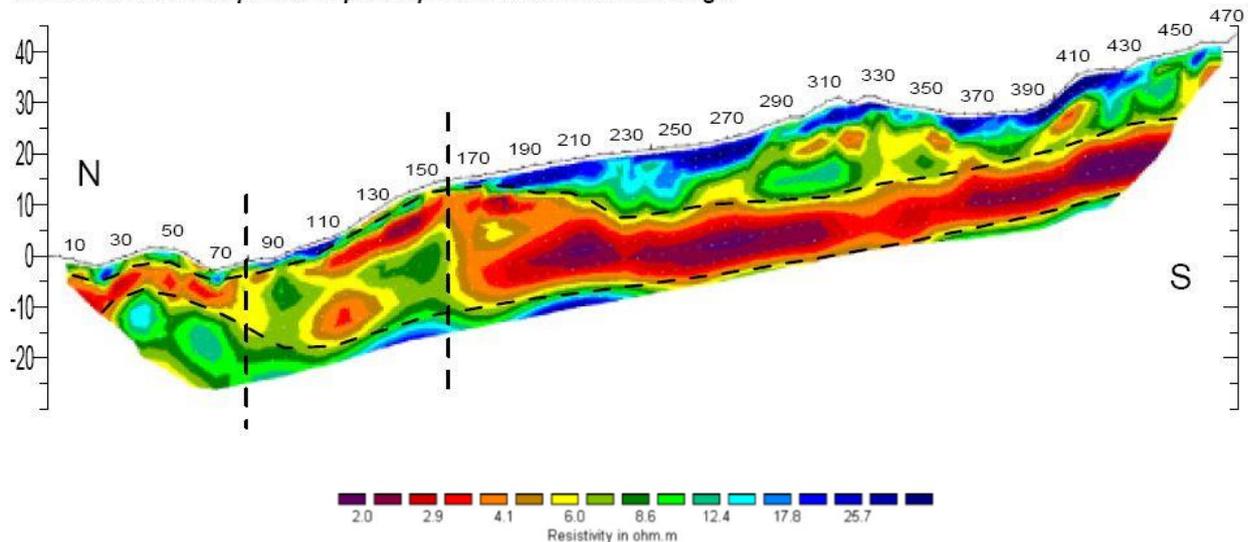


Illustration 7- Exemple de résultats de la campagne d'investigation géophysique réalisée en 2007 sur le site de Morne-Figue (Barras et Ollagnier, 2007).

Autres instabilités observées

Sur le secteur étudié, des indices géomorphologiques relevés en 2007 et confirmés en 2016 montrent que certains secteurs sont soumis à certaines instabilités superficielles (Illustration 8) comme la partie Nord-Ouest dont la topographie est moutonnée ou encore la présence de petits escarpements sur certaines parcelles ou sur la route de Morne-Figue (Illustration 9).



Illustration 8- Exemple d'observations réalisées en 2016. Photographie de gauche : instabilités superficielles le long du ruisseau de Morne-Figue. Photographie de droite : altération des basaltes de Vert-Pré pouvant être localement destabilisés de manière superficielle.

2.3.2. Activité des glissements (Illustration 9)

Le glissement de 1977

Suite à la construction de la RD 25 Bis (devenue RN 1), le glissement de 1977 endommage la route (Allard, 1989). A ce même endroit, début 2013, une nouvelle instabilité a entraîné un affaissement de la chaussée sur une cinquantaine de mètres (source : Directeur d'Exploitation de Trinité). Depuis, cette dernière a été confortée par un mur de gabions et un système de drains pour les eaux souterraines.

Glissement de Morne-Figue

Le glissement de Morne-Figue a fortement endommagé la RN 1 et la voie communale (Route de Morne-Figue) entre 1987 et 1989, puis de nouveau en 2004. En 2007, plusieurs habitations ont été impactées, dont une a été évacuée et les dégâts ont entraîné la fermeture de la route communale pendant 3 mois (Barras et Ollagnier, 2007). Depuis cette étude, le glissement montre toujours des signes d'activité (déformation de la route communale, rupture fréquente de la canalisation AEP en pied de glissement) notamment au niveau du secteur amont, ce qui est corroboré par (i) les témoignages des habitants du quartier en contrebas de la route, (ii) les observations de terrain réalisées en octobre 2016 (Illustrations 9 et 10).

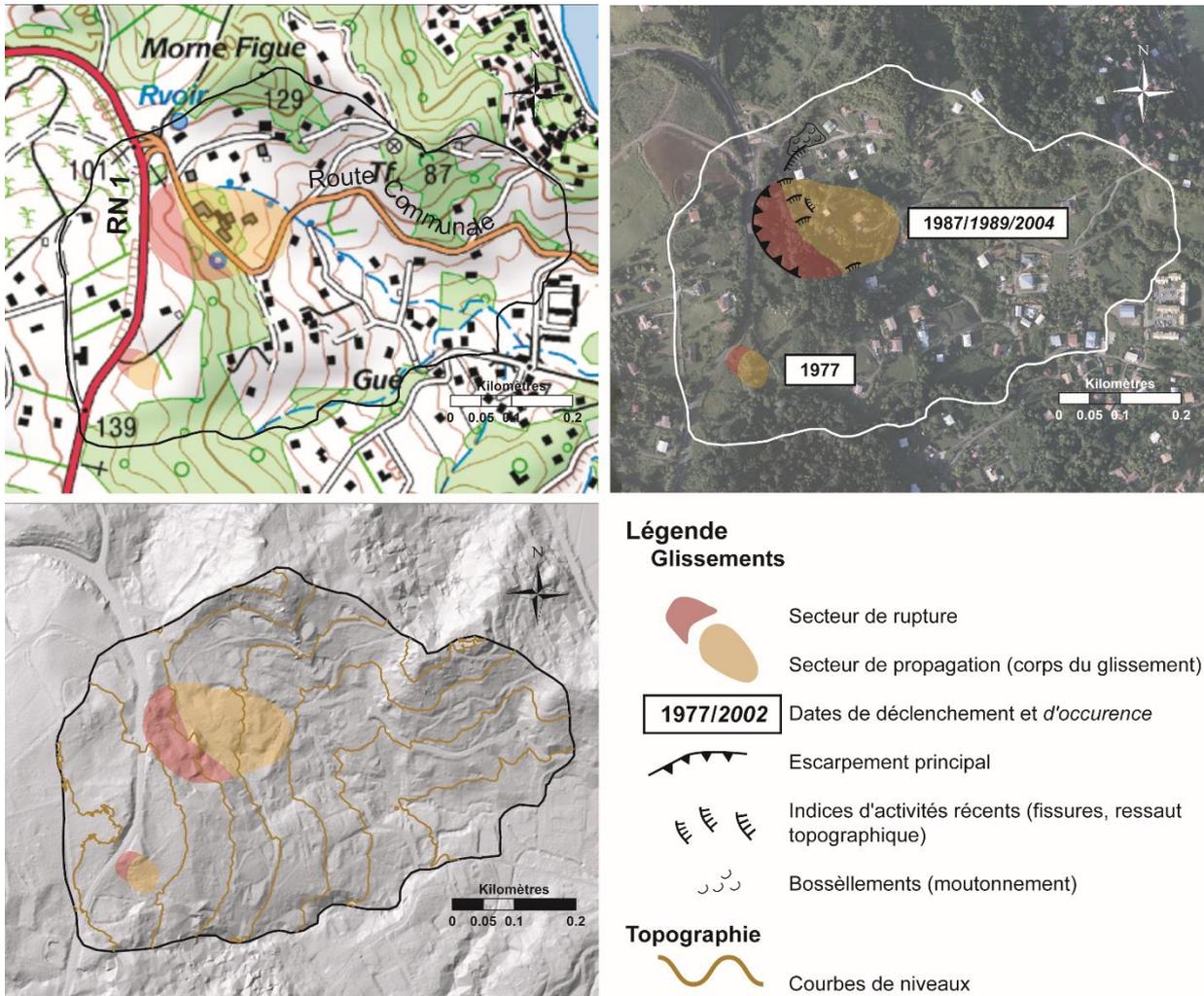


Illustration 9- Carte des indices d'instabilités sur le site de Morne-Figue.



Illustration 10 - Indices d'instabilité sur la Route communale de Morne-Figue en 2016. A gauche rupture de la bordure en béton. A droite ressaut sur la route en limite du glissement (Fond SCAN 25®, Orthophoto 2010 IGN®, Relief dérivé du MNT Litto 3D).

Des mesures piézométriques et inclinométriques réalisées entre Mai 1987 et Février 1988 (Allard, 1989) ont montré que l'activité du glissement était corrélée au battement d'une nappe d'eau dont

le toit est situé au sein de l'horizon supérieur d'argiles altérées. Le niveau de cette nappe est lié aux saisons avec (i) une nappe haute (entre 2 m du sol en amont et 0,5 m du sol en aval) en saison humide et (ii) une nappe basse (entre 8 et 9 m du sol) en saison sèche. Ainsi, entre Mai et Octobre 1988, en saison humide (nappe haute) des déplacements de 1,4 cm ont été observés alors qu'en saison sèche, entre Octobre 1987 et Mars 1988 aucun signe de déplacement n'a été remarqué (Allard, 1989).

A partir de ces informations et des observations de 2016, il est possible de délimiter de manière « experte »² deux secteurs d'activité différents pour le glissement de Morne-Figue (Illustration 10) : (i) une partie « active continue » participant à la déformation de la route, sa fissuration et sa réfection régulière, (ii) une partie inactive que l'on considérera comme « latente » (au sens de Dikau *et al.*, 1996) faute de données et d'observations tangibles (pas de fissures de traction observées, pas de fissures sur le bâti, pas d'indicateurs morphologiques de déformations sur le versant).

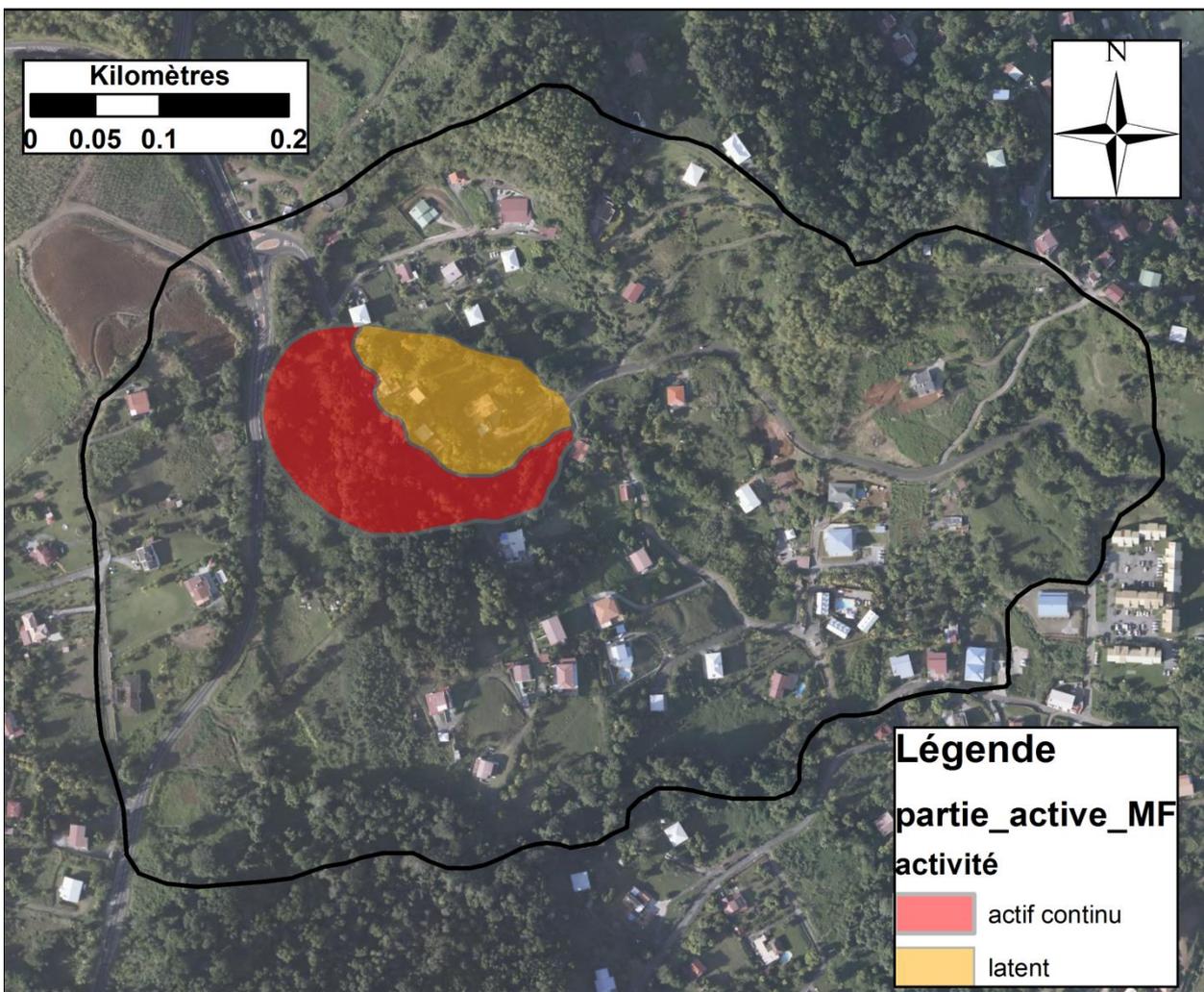


Illustration 11 - Glissements du site de Morne-Figue : partie active et latente (Orthophoto 2010 IGN®).

² Afin de définir l'activité en continu du glissement un suivi topographique permanent et/ou la mise en place d'inclinomètres serait nécessaire et permettrait d'obtenir une information fiable sur l'activité de ce dernier.

Autres instabilités

Suite à des intempéries les versants de la commune de Trinité ont été fortement déstabilisés par plusieurs glissements de terrain (Barras, 2008 ; Barras *et al.*, 2010). Si le secteur étudié de Morne-Figue n'a pas subi de dégâts, des versants aux caractéristiques topographiques et géologiques proches ont été fortement impactés, nécessitant des arrêtés d'évacuation (e.g. secteur du Bocage, secteur de Bonneville).

3. Imagerie, interprétations et caractérisations géo-mécaniques du glissement de Morne-Figue

Les premières interprétations montraient que le lien entre la résistivité et la lithologie était moins évident que pour le glissement de la Médaille (Reninger *et al.*, 2014), la zone étant également moins bien couverte par le levé. Toutefois, un nouveau traitement et une nouvelle inversion réalisés au cours de l'année 2016 permettent de préciser les différentes formations. En outre, ce retraitement a permis d'affiner la connaissance du contexte structural du site et de préciser les horizons altérés qui influencent la localisation des instabilités de versants.

3.1. IMAGERIES

3.1.1. Principes généraux

Les principes de l'EM hélicoptère et les traitements effectués dans le cadre de cette étude sont décrits dans Reninger *et al.* (2014). Il est à noter qu'un retraitement a été réalisé, améliorant la couverture et l'imagerie des résistivités. Ce retraitement est décrit dans le paragraphe 3.1.2. Les résultats suivant servent de base pour élaborer le modèle géotechnique à introduire dans ALICE® et utilisés aux chapitres 4 et 5.

3.1.2. Retraitement des données EM

Si le principe du traitement reste le même que celui présenté dans Reninger *et al.* (2014), quelques améliorations y ont été apportées :

- Le filtrage des données étant basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières (Reninger *et al.*, 2011), son résultat peut être étendu au filtrage de toutes les données acquises, y compris celles hors production (i.e. durant les trajets avant/après et entre les lignes de vols planifiées). Ainsi, il a été possible d'améliorer la couverture dans une zone où peu de lignes de vol ont été effectuées ;
- Un moyennage des données bruitées s'adaptant au niveau de bruit de chacune des mesures a également été appliqué. Ce dernier permet de garder des résultats contrastés lorsque la donnée est bonne et de récupérer de l'information lorsque celle-ci est bruitée. Ceci se traduit par une amélioration de la profondeur de l'imagerie des contrastes de résistivité ainsi que la récupération de certaines données jugées non utilisables auparavant ;
- La topographie a été prise en compte lors du traitement de l'inclinaison de la boucle (Reninger *et al.*, 2015). Ceci permet de définir une aire effective plus réaliste et ainsi d'améliorer la résolution des contrastes de résistivité ;
- Des nouveaux paramètres d'inversion ont été définis afin d'optimiser l'imagerie des contrastes de résistivité.

3.1.3. Cartographie de la résistivité 2D

Le lien entre la résistivité et la lithologie est moins évident que pour le glissement de la Médaille (Reninger *et al.*, 2014 ; Thiery *et al.*, 2015). 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'une manière générale la gamme de résistivité est faible ($<50 \Omega.m^{-1}$). En surface, les andésites et les formations volcano-sédimentaires occupent la tranche haute ($>15 \Omega.m^{-1}$) alors que les basaltes de Vert-Pré et l'altération associée occupent la tranche basse ($1-8 \Omega.m^{-1}$). Entre les deux se situent les hyaloclastites dans une gamme comprise entre 8 et $15 \Omega.m^{-1}$.

Les Illustrations 12 et 13 présentent la grille de résistivité entre 2 et 4 m de profondeur ainsi qu'entre 19 et 24 m de profondeur. En surface (2-4 m de profondeur), le nouveau traitement a permis d'identifier un niveau très conducteur (en bleu sur les illustrations), probablement l'horizon très altéré fortement saturé. Plus en profondeur, est identifié un corps également très conducteur ($< 5 \Omega.m^{-1}$) au niveau du secteur situé entre Bocage et le centre soin (illustration 12).

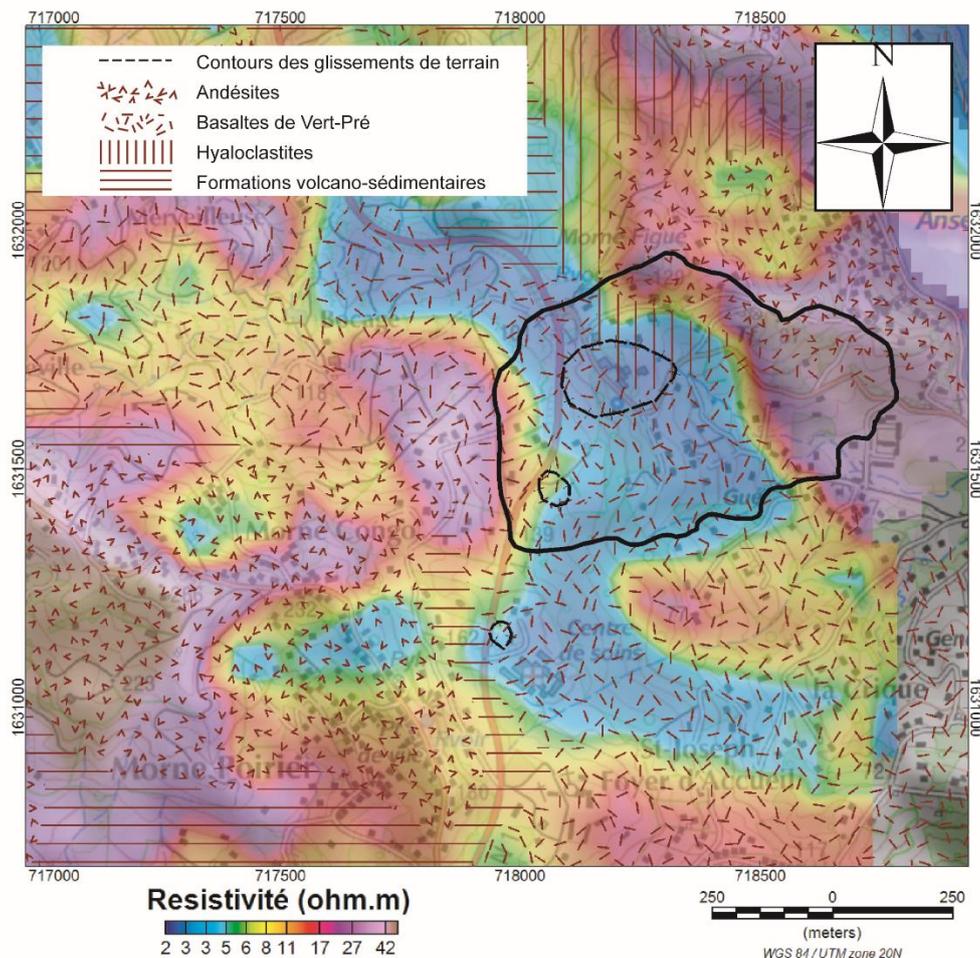


Illustration 12 - Grille de résistivité entre 2 et 4 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain et les ensembles géologiques (fond SCAN 25®).

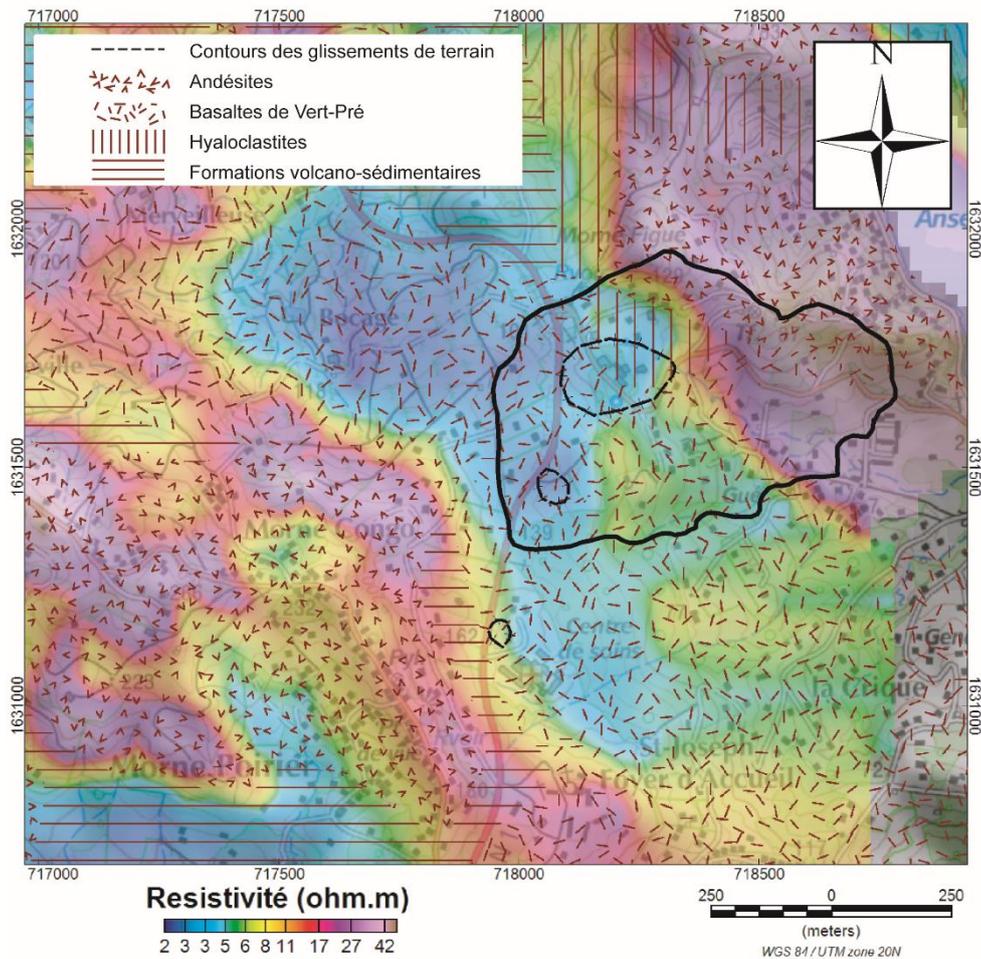


Illustration 13 - Grille de résistivité entre 19 et 24 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain et les ensembles géologiques (fond SCAN 25 ®).

Afin d'interpréter au mieux les contrastes de résistivité et d'en dériver des couches exploitables pour notre problématique, ces résultats ont été comparés aux différents sondages et autres documents.

3.2. INTERPRETATIONS

3.2.1. Sondages et coupes

Dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS), neuf forages sont disponibles et possèdent une coupe géologique à proximité (Illustrations 14 et 15). Ils sont tous carottés. La description géologique des logs de sondages peut être considérée comme fiable, les épaisseurs et la description des formations observées sont claires. Par ailleurs, après vérification, l'altitude indiquée correspond plus ou moins à l'altitude actuelle (+/- 3 m). Sur le site d'étude trois forages nous intéressent plus particulièrement (1175ZZ124, 1175ZZ125, 1175ZZ147).

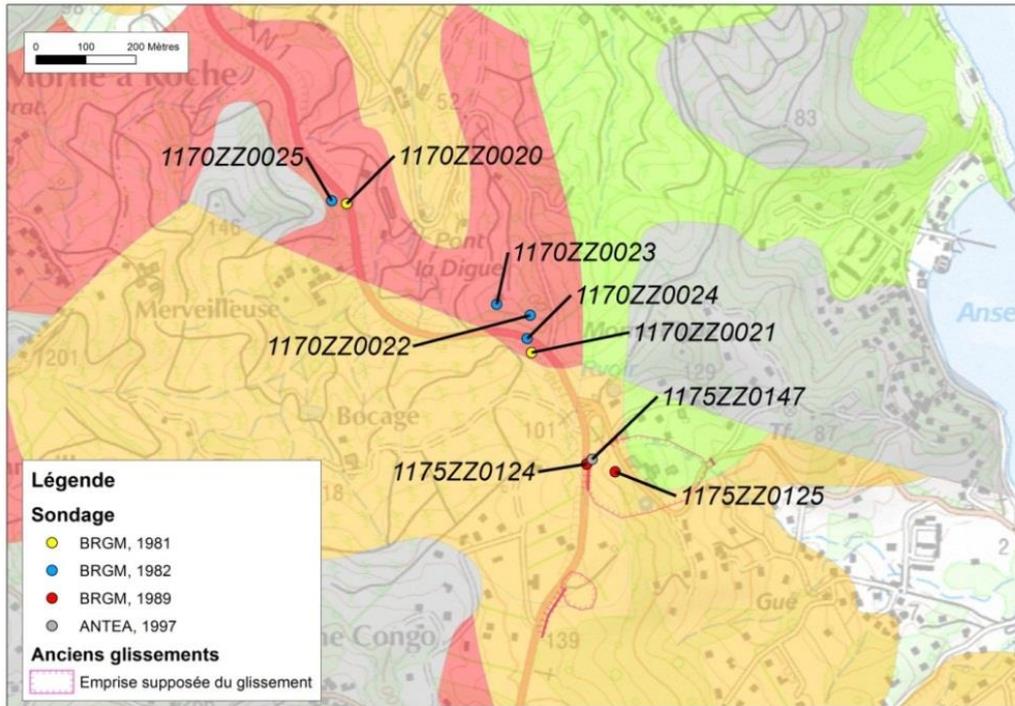


Illustration 14 - Sondages disponibles dans la BSS (fond SCAN25® ; Reninger et al., 2014).

Numéro	Date	Profondeur	Profondeur du substratum	Description des formations superficielles	Description du substratum	Nature du 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		Conglomérat polygénique
1170ZZ22	1981	25 m	11 m	Argile à argile limoneuse et sableuse	Laves autobréchifiées massives, grises, altérées	
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 15 - Caractéristiques des sondages proches du site étudié. En rose les sondages qui ont permis de caler le modèle géotechnique fondé sur les coupes de résistivités.

3.2.2. Corrélation entre les résultats de l'EM hélicopté et les études antécédentes

Etudes antécédentes

Les campagnes géophysiques de 2007, avaient permis de différencier 4 types de formations et épaisseurs associées (paragraphe 2.3.1) sur une épaisseur maximum de 25 m, ces dernières ayant été corrélées avec les sondages de 1989.

La campagne de terrain réalisée en 2016 a permis d'observer des coupes le long d'affleurements naturels ou d'excavation réalisés pour des travaux de terrassements. Ainsi, il a été permis de repréciser la localisation de certaines formations (Illustration 16) comme les hyaloclastites ou certaines altérites et le positionnement de la faille située au Nord du site d'étude.

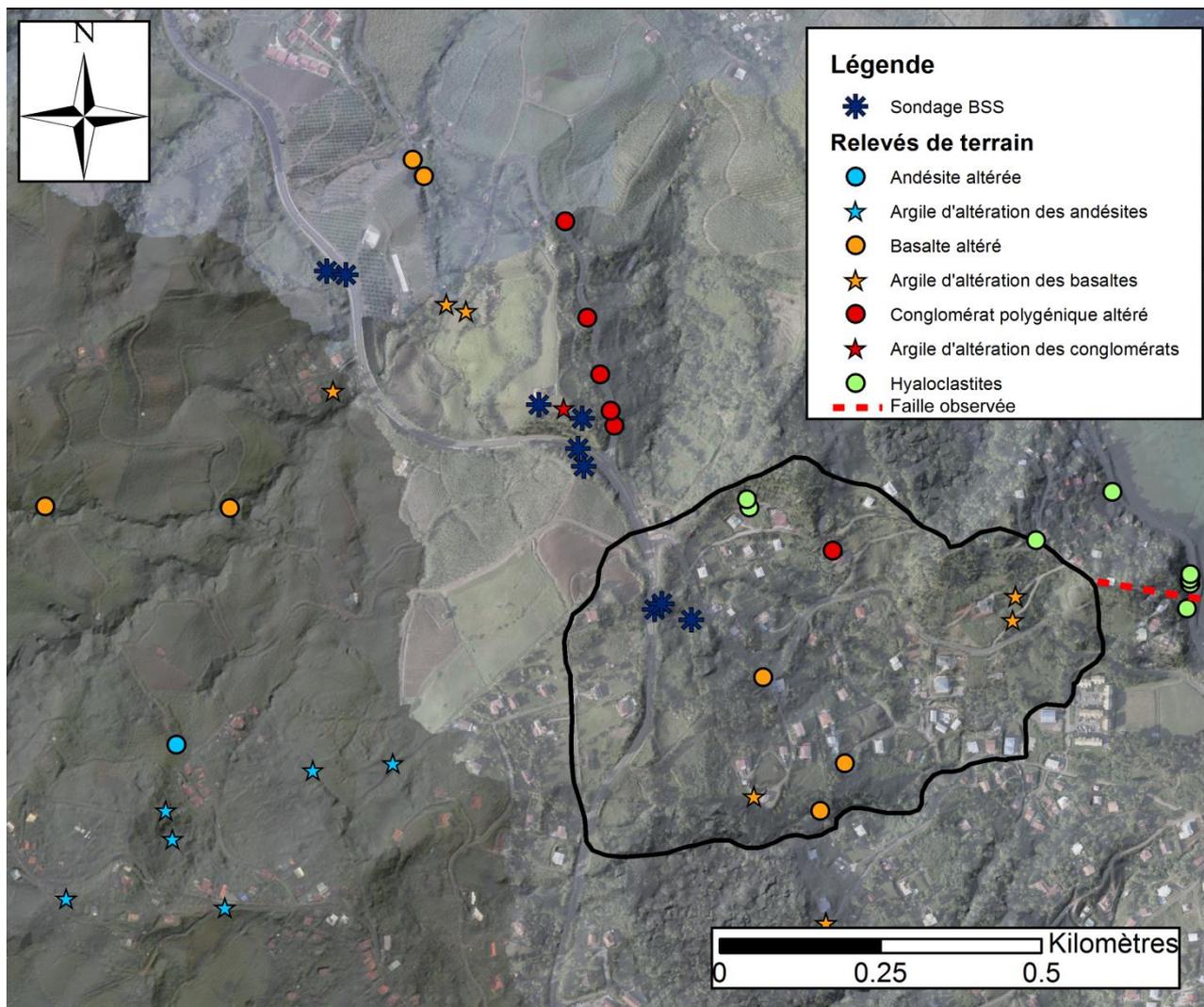


Illustration 16 - Carte des observations de terrain réalisées depuis 2014 (Orthophoto 2010 IGN ®). En noir le secteur d'étude.

Résultats de l'EM hélicopté et description des couches

Afin de comparer les résultats de l'EM hélicopté aux données géologiques (forages, carte géologique), différentes coupes, le long des lignes de vol, ont été tracées. Le retraitement a permis

d'améliorer le rendu et de redéfinir les différentes formations et leurs épaisseurs. L'illustration 17 présente l'emplacement des différentes coupes issues de la nouvelle inversion et (illustration 18 les coupes en elles-mêmes.

D'une manière générale sur le site étudié il se dégage 6 types de formations : deux formations conductrices (C1 et C2) et quatre formations plus résistantes (R1, R1Bis, R2, R3). Outre, les formations reconnues, les coupes ont permis de localiser des secteurs probablement fracturés (en trait gris clair sur l'illustration 18) qui sont confirmés par des observations de terrain.

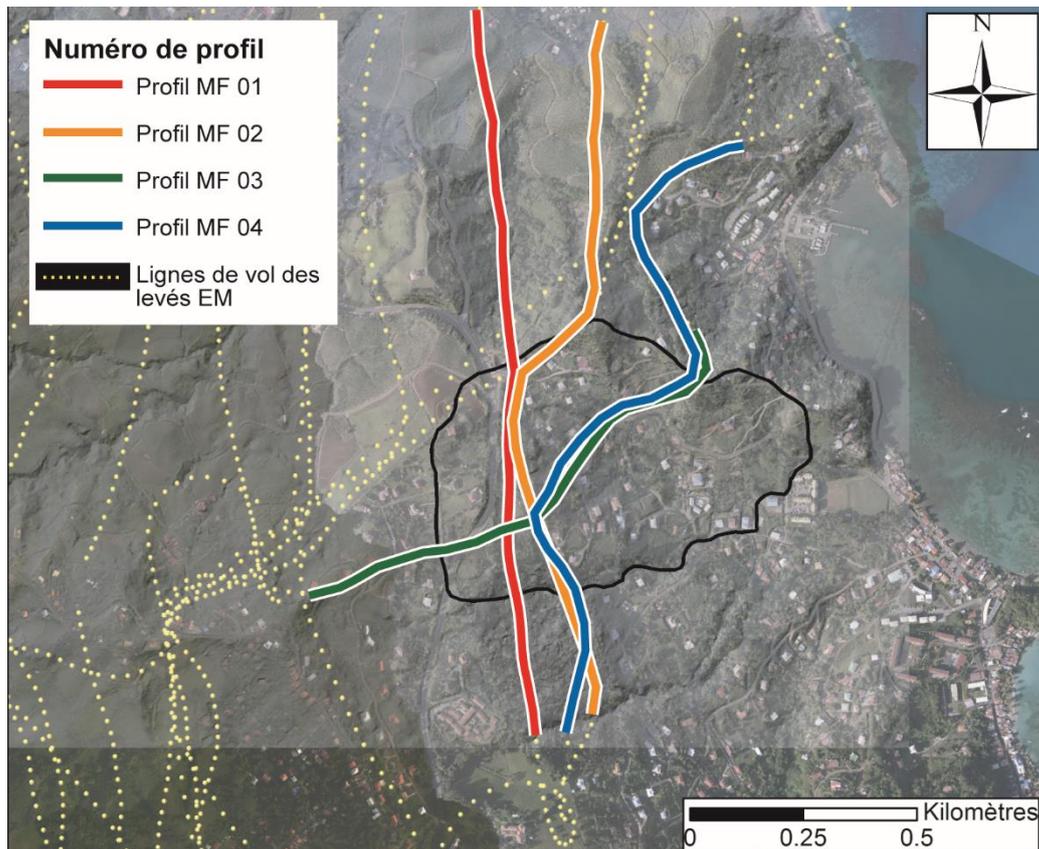


Illustration 17- Localisation des coupes servant à l'interprétation.

- (C1), en surface, couche très conductrice ($< 5 \Omega.m^{-1}$) d'une épaisseur d'environ 4 m est décrite par Allard (1989) Barras et Ollagnier (2007). Cet horizon correspondrait à un niveau supérieur composé d'argiles très altérées plus ou moins saturées selon le niveau de la nappe (Allard, 1989);
- (R1), couche plus résistante ($5-8 \Omega.m^{-1}$) correspondant probablement aux argiles d'altération. On retrouve cet horizon dans la description des différents sondages d'Allard (1989) ainsi que sur les tomographies électriques réalisées en 2007 par Barras et Ollagnier (2007). Cette couche également est plus ou moins saturée selon le battement de la nappe d'eau (Allard, 1989). Localement cette couche R1 disparaît au profit de C2 ;
- (C2), au sein de R1, ce conducteur est très marqué et se superpose exactement à l'emprise des deux glissements. D'après les forages, ce conducteur correspondrait à une lave altérée. Comme pour l'étude sur le glissement de la Médaille (Reninger *et al.*, 2014 ; Thierry *et al.*, 2015), 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 10/15 m de profondeur, d'une couche possédant des propriétés particulières affectant ou interagissant probablement avec les écoulements souterrains.

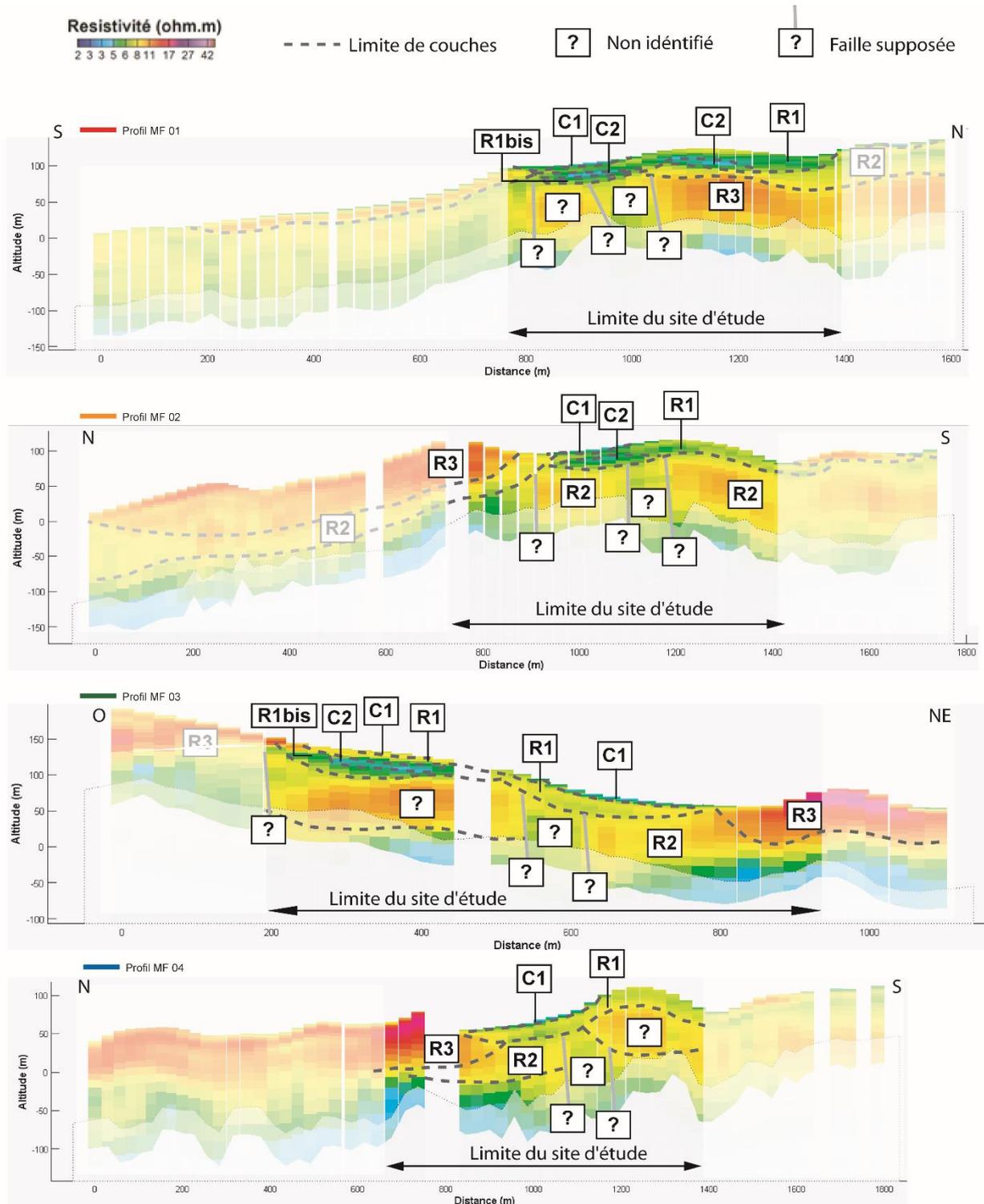


Illustration 18 – Coupes de résistivité et interprétations sur le site de Morne-Figue.

- (R1bis), le contraste R1/C2 disparaît au profit d'une formation R1bis possédant les mêmes caractéristiques de résistivités que R1. Si R1 et R1bis sont susceptibles de correspondre à l'altération du substratum (argile et/ou basalte altéré), le contraste entre R1/R1bis et C2 pourrait donc 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 (Reninger *et al.*, 2014).

- (R2), d'une résistivité plus élevée ($8-11 \Omega.m^{-1}$) cette couche apparaît sous R1/R1Bis au centre du site d'étude à environ -25/-30 m sous la surface topographique. Le même type de couche ayant les mêmes caractéristiques de résistivités se retrouve plus au Nord sous le Morne-Figue avec une inclinaison de $25-30^\circ$ environ de direction Nord-Ouest/Sud-Est et un décalage avec la couche de même résistivité située au centre du site d'étude. D'après les observations de terrain, sous le Morne-Figue, cet horizon correspondrait à des hyaloclastites. Cette lithologie, à cet endroit apparaît sous-représentée sur la carte lithologique. Enfin, faute de sondages profonds, il est difficile de savoir à quel type de lithologie appartiendrait la couche R2 sous R1 ou R1bis.
- (R3), cet horizon doté de caractéristiques de résistivités plus élevées que les autres horizons identifiés correspondrait aux andésites (plus ou moins altérées) du Morne-Figue. Elles surmontent les hyaloclastites décrites ci-dessus.

L'illustration 19 synthétise les différentes formations décrites dans les études précédentes et décrites ci-dessus.

Ainsi, l'imagerie EM hélicoptérée permet de mettre en évidence :

- Six contrastes lithologiques dont l'andésite qui « arme » le relief du Morne-Figue et les hyaloclastites dont l'emprise spatiale sur la carte géologique semble sous-estimée ;
- Un horizon particulièrement conducteur (C2) au sein de la formation basaltique (R1/R1bis), dont l'emprise est cohérente avec celle du glissement de Morne-Figue et qui pourrait caractériser sa base ;
- Deux secteurs dont les résistivités varient brusquement d'un log à l'autre (de $5 \Omega.m^{-1}$ à $11 \Omega.m^{-1}$ et de $10 \Omega.m^{-1}$ à $5 \Omega.m^{-1}$) qui pourraient ressembler à des secteurs faillés qui délimiteraient la dépression de Morne-Figue (Illustration 18, Profil MF 02).

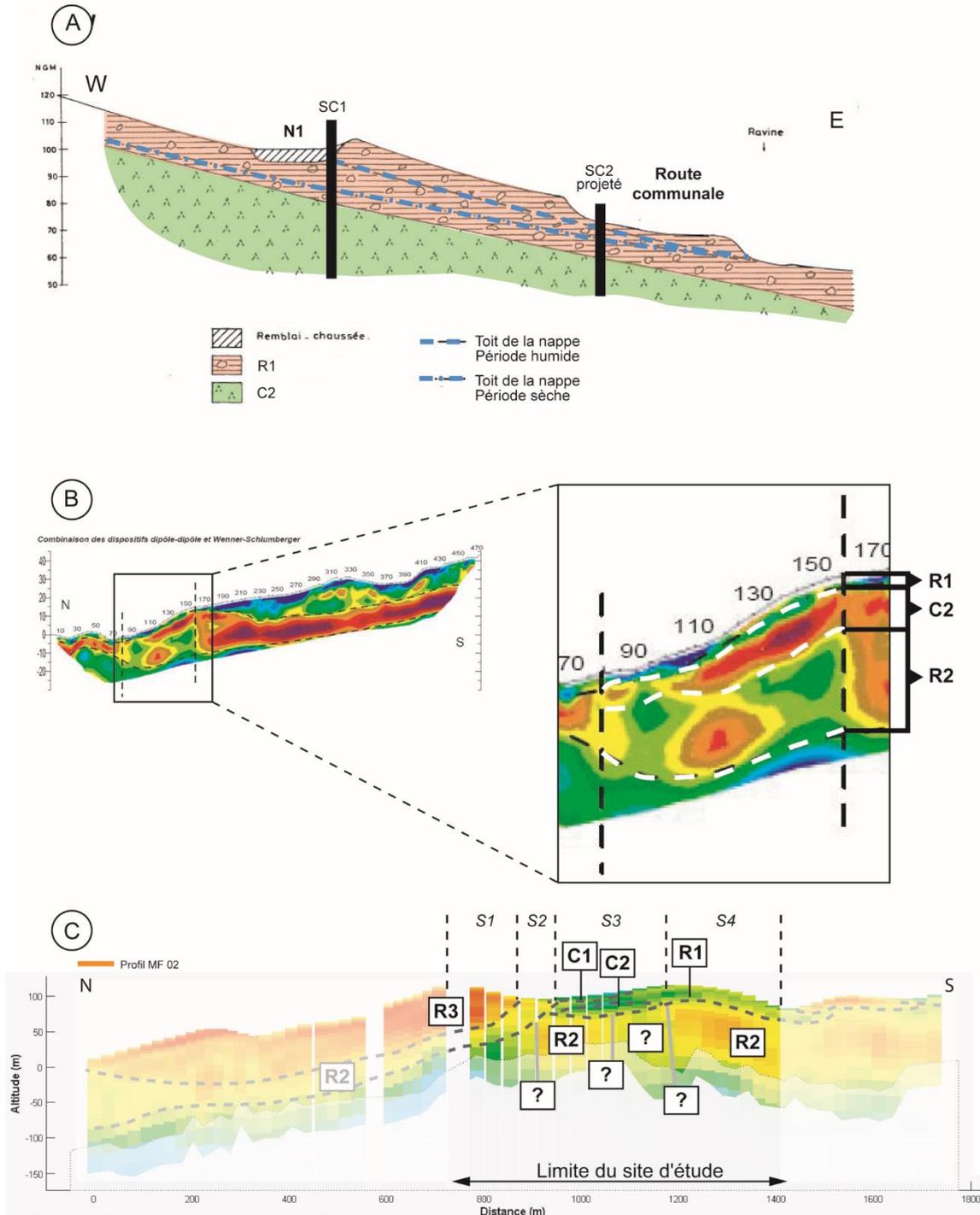


Illustration 19 – Synthèse des formations observées et/ou interprétées sur le site de Morne-Figue. A- D'après Allard (1989). B- D'après Barras et Ollagnier (2007). C- Coupe issue de l'EM hélicoptère (les numéros de secteurs identifiés sont reportés sur la coupe par leurs numéros respectifs).

D'un point de vue spatial 5 secteurs sont ainsi délimités, selon la nature de la lithologie, la structure et la géomorphologie :

- Le secteur 1 (S1) correspondant aux andésites surmontant des hyaloclastites ;
- Le secteur 2 (S2) ce secteur est composé essentiellement de hyaloclastites ;

- Le secteur 3 (S3) au centre du site et séparé de S2 par une faille. Ce secteur est caractérisé par une succession d'horizons conducteurs et plus résistants, dont l'horizon C2 sur pratiquement toute sa surface ;
- Le secteur 4 (S4) au sud du site qui se différencie du secteur 3 par une absence d'horizon C2 sur toute la partie Est jusqu'à la rupture de pente située à 70 m à l'Est de la route. Ce secteur pourrait être limité au Nord par une faille le séparant de S3 ;
- Le secteur 5 (S5) représente le secteur aval aux pentes faibles recouvertes par les alluvions. Ce secteur n'est pas intégré pour la suite des modélisations.

Chaque secteur est représenté dans l'illustration 20.

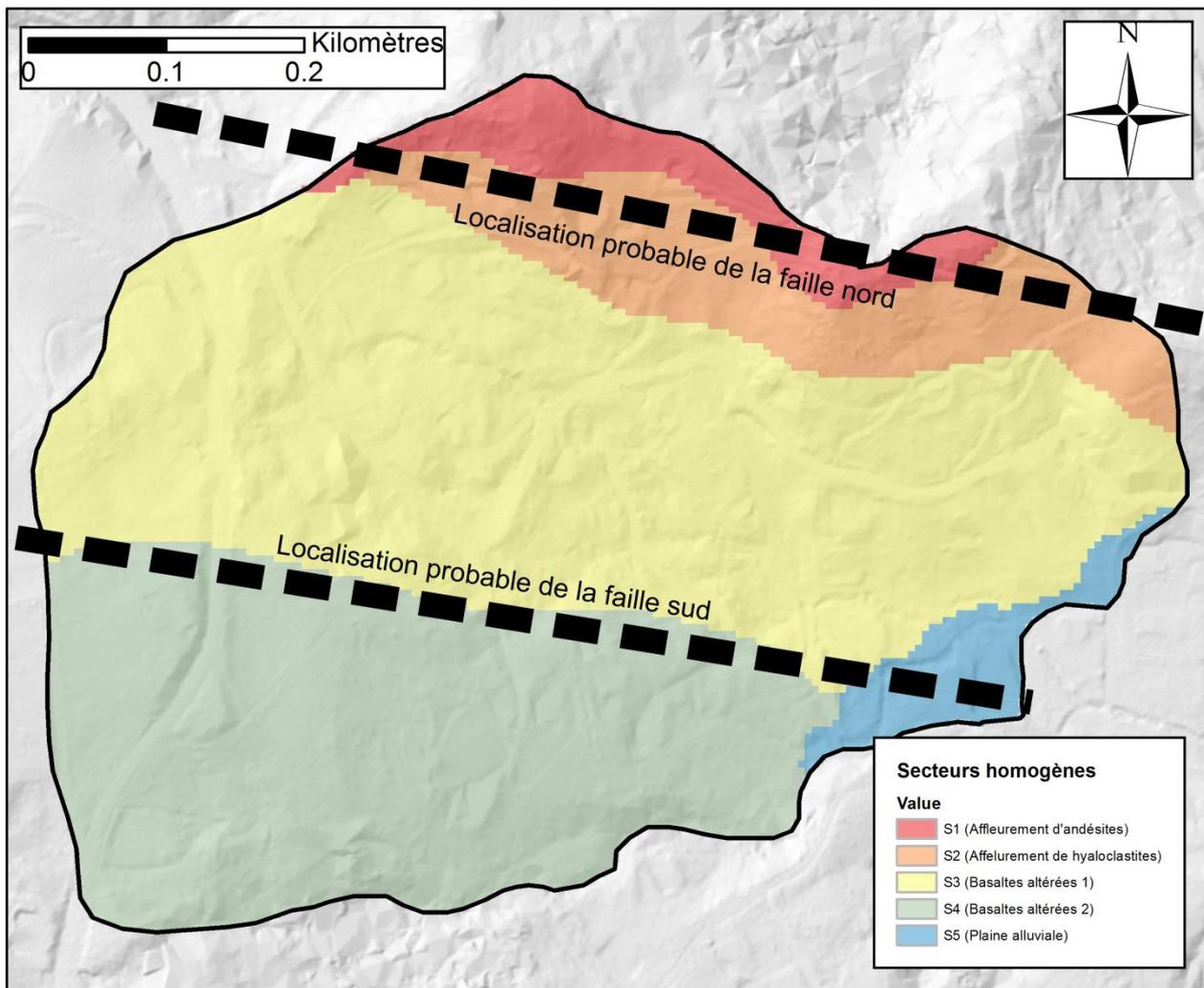


Illustration 20 – Carte des secteurs homogènes identifiés sur Morne-Figue.

4. ALICE® : principes, variables utilisées et stratégie de modélisation

4.1. ALICE® : PRINCIPES ET PRESENTATION DU MODELE

4.1.1. Introduction

Pour analyser l'aléa glissement de terrain en intégrant des paramètres géotechniques, deux approches existent :

- Les approches déterministes fondées sur des paramètres spatialement explicites, ce sont les approches le plus fréquemment mises en œuvre (van Westen *et al.*, 2006) ;
- Les approches probabilistes qui prennent en compte les incertitudes en assignant des distributions probabilistes aux paramètres d'un modèle déterministe (Stillwater Sciences, 2007). Ce type d'approche est moins fréquemment mise en œuvre (Thiery, 2007).

ALICE® (Assessment of Landslides Induced by Climatic Events), développé par le BRGM dans le cadre des travaux de recherche «AR47» aux Antilles (méthode TROPICALE, Mompelat, 1994 ; Sedan & Mompelat, 1995), permet de mettre en œuvre ces 2 types d'approche. Ce logiciel d'aide à la cartographie de l'aléa glissement de terrain calcule des cartes de stabilité de pentes sur des territoires de plusieurs kilomètres carrés grâce à une approche quantifiée et spatialisée de la susceptibilité (i.e. rupture potentielle des terrains).

4.1.2. Principes

ALICE® s'appuie sur un modèle mécanique et géotechnique dans lequel les caractéristiques physiques du milieu sont quantifiées et utilisées dans un modèle mathématique calculant un facteur de sécurité (Sedan, 2013).

Le modèle de calcul de stabilité de pente est fondé sur une approche mécanique d'équilibre limite (i.e. géotechnique ou déterministe), pour laquelle il est nécessaire de connaître la répartition spatiale et parfois temporelle des différents paramètres qui conditionnent la stabilité des sols (caractéristiques mécaniques et géométriques des couches, état hydrique du sol à un instant T déduits de mesures et/ou d'observations de terrain,...). Une fois les principales propriétés physiques du milieu quantifiées (même sommairement, compte tenu de la variabilité naturelle de ces paramètres au sein de secteurs d'étude large, Haneberg, 2000), elles sont intégrées dans le modèle mathématique qui calcule un facteur de sécurité (FS) pour une valeur donnée pour chaque caractéristique géotechnique (FS ; Aleotti & Chowdhury, 1999 ; Corominas *et al.*, 2014) ou une probabilité de rupture ($FS < 1$) après plusieurs tirages aléatoires de type Monte-Carlo pour une série de valeurs des caractéristiques géotechniques définies selon une loi de probabilités prédéfinie (triangulaire, trapézoïdale, loi normale etc., Sedan, 2013). Les résultats sont présentés sous forme de cartes qui rendent compte des probabilités de rupture pour des sollicitations hydro-pluviométriques et sismiques données.

ALICE® se caractérise par un modèle de pente finie avec une géométrie quelconque utilisant la méthode de Morgenstern et Price (1965) et Morgenstern (1967) appliquée à distance régulière le long de profils 2D de versants (Sedan, 2013).

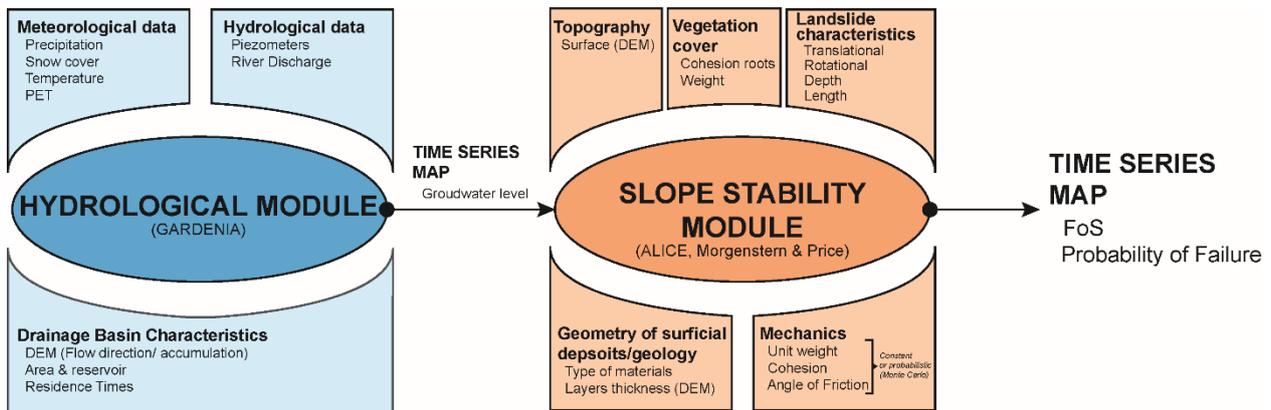


Illustration 21 – Schématisation du principe de fonctionnement d'ALICE® couplé au module hydrologique GARDENIA®. Dans cette étude seul est utilisé le module ALICE® calculant des probabilités de rupture selon une nappe d'eau empirique (Thiery et al., 2017).

Le modèle peut-être couplé avec un modèle hydrogéologique de type GARDENIA® (illustration 21). Ce modèle pluie/débit a été développé par le BRGM (Thiery, 2003). Le modèle simule le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin-versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau d'un aquifère en un point. Il permet ainsi de simuler un niveau de nappe qui peut ensuite être intégré dans le modèle ALICE.

Toutefois, GARDENIA® ne sera pas utilisé dans cette étude. En effet, il nécessite des chroniques de données climatiques (précipitations, ETP, température, insolation etc.), hydrologiques (débit à l'exutoire, piézométrie) et hydrogéologiques en continue. Certaines de ces données existent pour le site de la Médaille, mais elles sont discontinues dans le temps et difficilement exploitables.

4.1.3. Intérêt d'ALICE® pour l'étude

Cette évaluation sous ALICE® doit :

- Répondre au besoin d'homogénéiser la cartographie des aléas glissement de terrain au niveau régional (comme par exemple les études du type « Scénario départemental de Risque Mouvement de terrain » – SDRMvt – dans le Jura en Métropole, Sedan *et al.* 2011) ;
- Contribuer à un meilleur diagnostic des aléas les plus forts grâce à une meilleure prise en compte des formations en présence et potentiellement instables.

Ainsi, une future révision des PPR pourrait s'appuyer sur ces diagnostics, et ce, afin d'organiser la révision des cartes d'aléas existantes, en intégrant de manière robuste et homogène les nouvelles informations dans la détermination de l'aléa.

Toutefois, avant d'utiliser ALICE® sur tout ou partie du territoire de la Martinique, il est nécessaire de caler et valider le modèle pour les types d'instabilités choisis. Cette étude doit donc permettre de choisir le nombre de paramètres ainsi que les valeurs et/ou distributions optimums qui pourront être associées aux différentes couches de terrain dérivées de l'image EM héliportée.

4.2. VARIABLES UTILISEES

Le secteur de Morne-Figue présente l'avantage d'avoir été étudié depuis plusieurs années. Ainsi, une série de documents et de variables sont disponibles pour pouvoir construire le modèle géotechnique.

4.2.1. Le(s) MNT(s)

Deux modèles numériques de terrain (MNT) sont disponibles (Illustration 22) :

- La BD Alti® de l'IGN au pas de 25 m, qui couvre la surface totale de l'île ;
- Un MNT levé en 2010, au pas de 1m couvrant la surface de la commune de Trinité (MNT Litto3D) ;

Concernant BDAlti®, en comparant ses altitudes et celles de l'EM hélicopté des différences de +/- 15 m sont observées. En effet, les résultats d'EM hélicopté sont calés par traitement DGPS. La précision en altitude est de l'ordre du mètre (Reninger *et al.*, 2014). La BDAlti® élaborée à partir de carte IGN au 1 : 25 000^{ème} vectorisée n'a pas cette précision. La BDAlti® n'est donc pas utilisée pour cette étude.

Concernant le MNT Litto3D, sa résolution (en planimétrie et en altimétrie) est supérieure à la BDAlti®. Sur le site d'étude peu d'artefacts ont été observés à la différence du site la Médaille (Thiery *et al.*, 2015). Ainsi pour cette étude, le MNT Litto3D est utilisé.

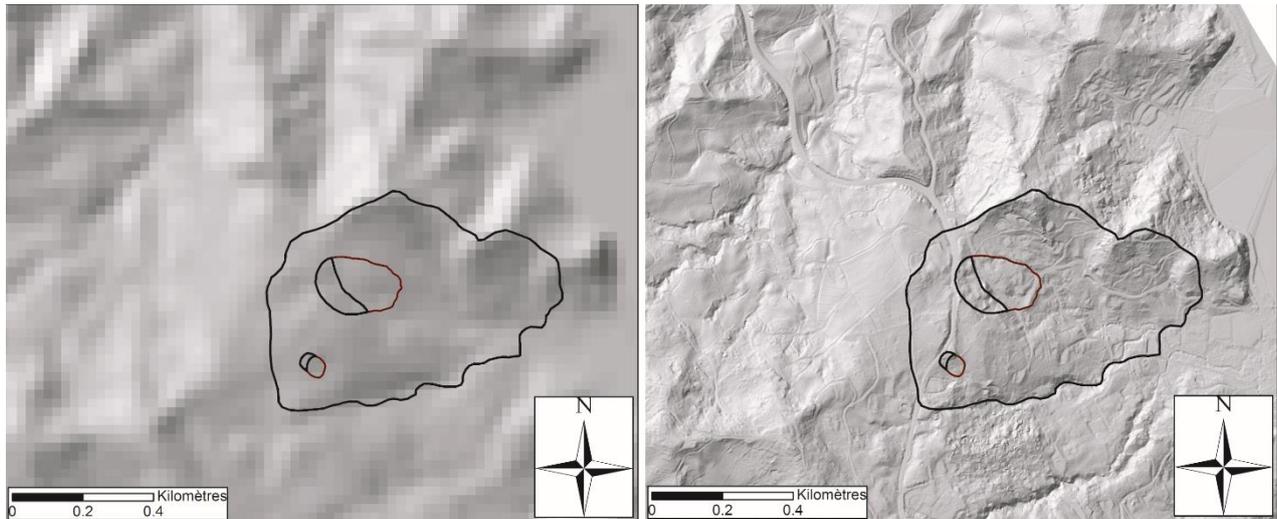


Illustration 22 – Exemples des 2 MNT disponibles pour l'étude. A - BD Alti®. B - MNT 2010 (Litto3D). Les MNT sont représentés sous forme de reliefs ombragés.

4.2.2. Construction du modèle géotechnique

ALICE® nécessite une représentation des différentes couches de terrain susceptibles d'être instables sous certaines conditions. Cette représentation se réalise dans un premier temps par la construction de la géométrie des couches (présence et épaisseur).

A partir des résultats d'EM hélicopté et des sondages antécédents, plusieurs couches, représentant les différents faciès interprétés, ont été construites par interpolation (krigeage paramétré selon un variogramme adapté) au pas de 1 mètre à partir : (i) d'un pointage manuel des épaisseurs sur les

profils issus de l'EM héliporté, (ii) des épaisseurs de formation obtenues grâce aux sondages de la BSS et les travaux de Barras et Ollagnier (2007) et (iii) d'une partition du site en unité correspondant aux différents secteurs ou unités géologiques 'homogènes' décrites précédemment. Les couches ont été calées à partir du MNT Litto3D.

Six couches ont été définies (Illustrations 23 et 24) ; elles sont décrites par unités lithologiques.

Pour les secteurs S1 et S2, on trouvera :

- La couche A1 qui correspond à une altération superficielle ou du remblai variant de 1 à 2 m maximum ;
- Une couche A2 correspondant aux andésites compactes qui arment le Morne-Figue. Cette couche correspond à R3. Les limites de cette couche forment S1 ;
- Une couche A3 représentant les hyaloclastites et correspondant à R2. Les limites de cette couche forment S2.

Pour les secteurs S3 et S4 on trouvera :

- Une première couche (couche B1) correspondant au remblai ou argile de surface (C1) décrit par Allard (1989) et Barras et Ollagnier (2007). L'épaisseur varie de 1 à 4 m selon les unités géologiques. Les épaisseurs les plus remarquables se situent sur le secteur du glissement de Morne-Figue. Les épaisseurs interpolées ont été comparées aux sondages réalisés en 1989 avec des différences de 0,6 m pour le sondage 1175ZZ0124 et de 0.5 m pour le sondage 1175ZZ0125.
- Une deuxième couche (couche B2) correspondant aux argiles d'altération de Vert-Pré (R1). Cette couche est présente sur les unités lithologiques 3 et 4 sur des épaisseurs variant de 2 à 15 mètres selon la localisation. Les couches les plus épaisses se situent en amont de la RN1 vers l'Est où la topographie est plane et où l'épaisseur d'altération est la plus forte. Les secteurs les moins épais se situent sur le versant où des ruptures de pente sont assez fortes sur de courtes distances. Les épaisseurs interpolées ont été comparées aux sondages réalisés en 1989 avec des différences de 1,5 m pour le sondage 1175ZZ0124 et de 1 m pour le sondage 1175ZZ0125. Une légère surestimation de l'épaisseur de cette couche est donc à noter pour l'amont du glissement de Morne-Figue. Cet horizon correspond à la couche argilisée décrite par Allard (1989) où la nappe fluctue selon les saisons.
- Une troisième couche (B3) représentant l'horizon plus conducteur (C2) d'une puissance de 2 m en aval à 15 m en amont. Cette couche se situe essentiellement en amont des unités 3 et 4 au sein des basaltes de Vert-Pré et correspondrait à un horizon plus argileux, et/ou fracturé et perméable où des circulations d'eau permanentes auraient lieu (Barras et Ollagnier, 2007).
- Une quatrième couche (B4) aux caractéristiques proches de R1, correspondant aux basaltes de Vert-Pré plus ou moins altérées. Cette couche correspond à R1Bis et rejoint R1 lorsque la troisième couche conductrice disparaît. Cet horizon aura les mêmes propriétés géotechniques que R1.
- Sous B4 sera considéré le substratum.

Les failles sont intégrées géométriquement dans le modèle géotechnique mais ne joueront aucun rôle sur la modélisation.

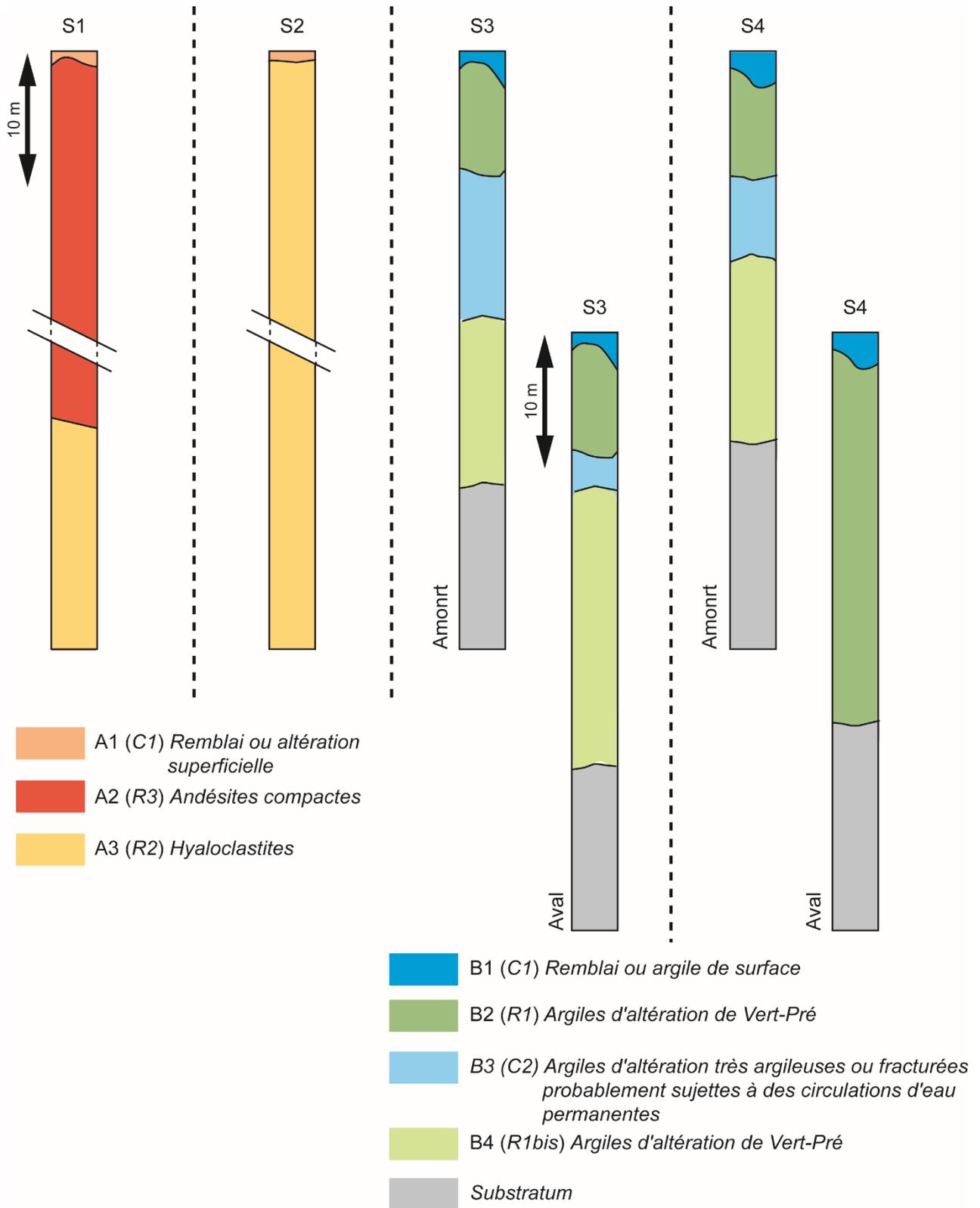


Illustration 23 – Représentation simplifiée du modèle géotechnique par unité géologique retenu pour ALICE®.

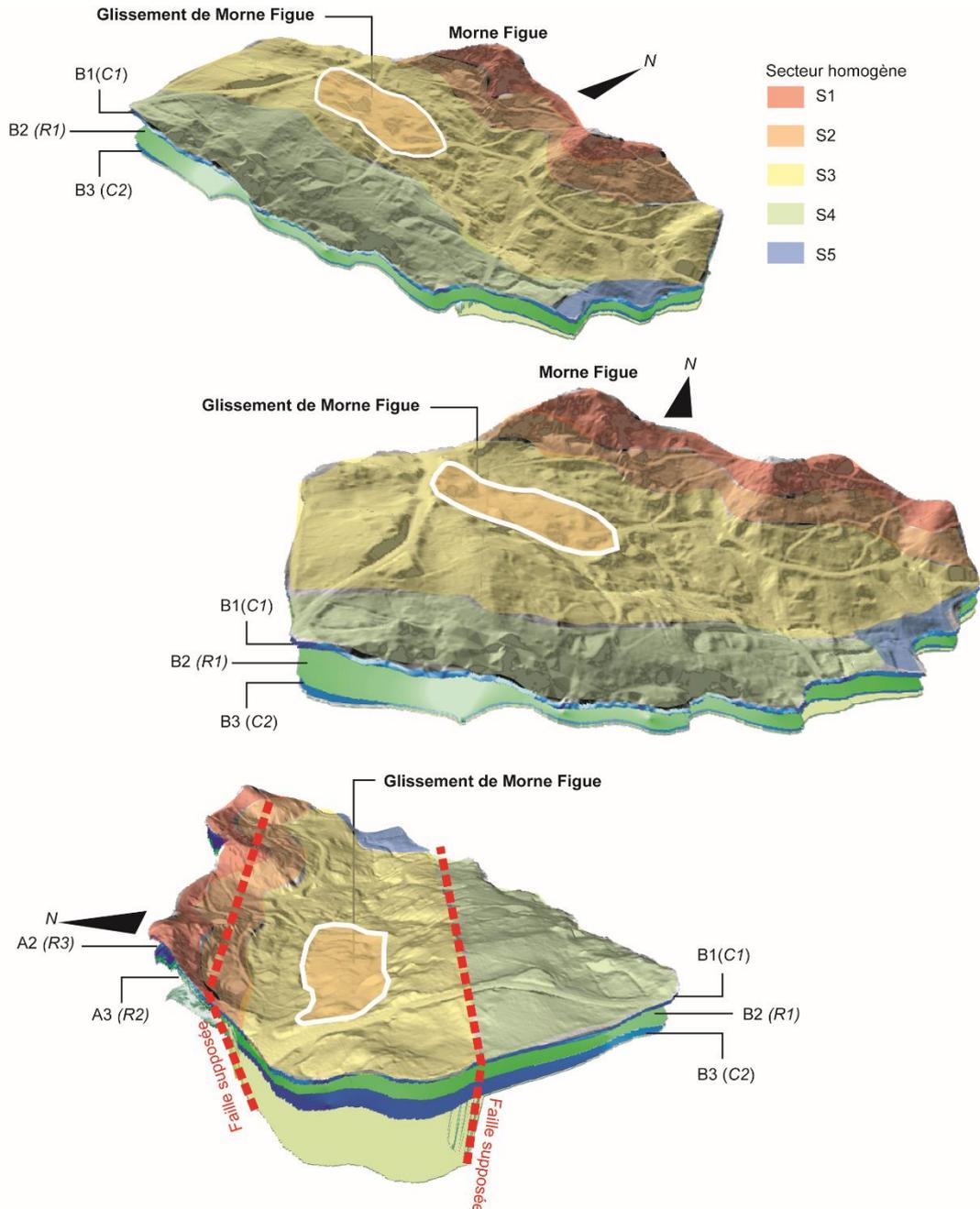


Illustration 24 – Représentation 3D des interfaces introduites dans ALICE®. Le relief est dérivé du MNT Litto 3D 2010.

4.2.3. Caractéristiques géotechniques retenues

Généralités

Trois caractéristiques géotechniques doivent être renseignées pour chaque couche (formation) :

- Le poids volumique (γ_d exprimé en kN.m^{-3}) ;
- La cohésion (c' exprimé en KPa) ;
- L'angle de frottement (φ' exprimé en $^\circ$).

Ces paramètres sont obtenus généralement par des essais en laboratoire. Proche du site de Morne-Figue, quelques essais ont été réalisés dans les formations altérées de basaltes de Vert-Pré (Allard, 1989 ; Belz, 1992, Chalivat et Chassagneux, 1992 ; Belz et Chassagneux, 1993 ; Thiery *et al.* 2015).

Analyse de sensibilité : principes

L'illustration 25 synthétise les différentes caractéristiques extrêmes relevées dans la littérature pour les différentes formations. Une forte hétérogénéité peut-être observée, ainsi, une analyse de sensibilité est donc réalisée sur une coupe topographique caractéristique pour les formations qui apparaissent comme très susceptibles aux glissements de terrain (Allard, 1989 ; Thiery *et al.*, 2015).

Type de lithologie	Type d'horizon	Epaisseur	γ_d (kN.m ⁻³)	c' (KPa)	ϕ' (°)
Andésite	A1 - Altération niveau 3 ou 4	Jusqu'à 10 m	10-30	10-15	5-15
	A2 - Altération niveau 2 ou 3	Jusqu'à 20 m	10-30	8-16	6-40
	Substratum sain	infinie	26-30	40	40
Hyaloclastites	A1 - Altération niveau 2, 3, 4	Jusqu'à 03 m	05-29	5-20	1-35
	A3 - Substratum sain	infinie	29-30	31-35	31-35
Basaltes	B1 - Argiles ou remblai	1 – 3 m	12 -17	5-15	10-22
	B2 - Altération niveau 3 ou 4	5 – 9 m	10-18	1-20	16-25
	B3 - Altération niveau 3 ou 4	7 – 12 m	10-18	1-20	16-25
	B4 - Altération niveau 1 ou 2	6 – 10 m	10-18	5-25	18-25
	Substratum sain	infinie	25-30	50-66	30-38

Illustration 25 – *Caractéristiques géotechniques pour chaque type de formation géologique et son cortège d'altération. Les valeurs représentent les extrêmes relevés sur le site d'étude (en gras) ou dans la littérature pour des essais géotechniques localisés dans des contextes volcaniques.*

Cette analyse est focalisée sur le corps peu épais d'argiles et/ou de remblais d'une épaisseur maximum de 4 m (B1) et le premier corps altéré des basaltes de Vert-Pré (B2), d'une épaisseur de 2 à 12 m qui constituent les formations dans lesquelles se déclenchent les glissements de terrain superficiels et profonds (Allard, 1989).

La méthode consiste à réduire la fenêtre des paramètres géotechniques à introduire dans ALICE®. Elle est fondée sur une approche par rétro-analyse sur une coupe topographique tenant compte des différentes formations choisies. Des séries de facteurs de sécurité sont calculées sous TALREN® en augmentant successivement chaque paramètre géotechnique individuellement tout en gardant les autres paramètres comme constantes. Les calculs sont effectués (i) en environnement sec et saturé et (ii) avant rupture et après rupture. Pour chaque combinaison de paramètres géotechniques, quatre calculs sont donc réalisés (avant rupture/environnement sec ; après rupture/environnement sec ; avant rupture/environnement saturé ; après rupture/environnement saturé). Les résultats sont analysés grâce à :

- Un graphique montrant l'évolution du facteur de sécurité selon les variables géotechniques retenues ;

- Une cartographie des facteurs de sécurité selon l'angle de friction et la cohésion. Cette cartographie permet de relever rapidement les combinaisons dont les résultats sont toujours instables ($FS \leq 1$), probablement conditionnellement instables ($1 > FS \geq 1.2$), probablement conditionnellement stable ($1.2 > FS \geq 1.5$) et stable ($FS > 1.5$).

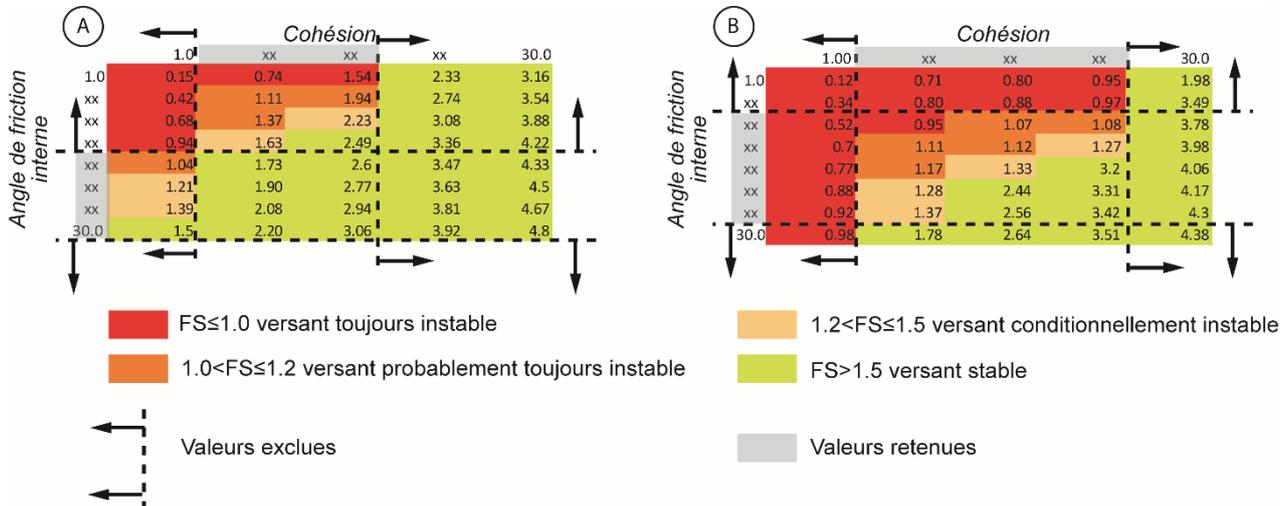


Illustration 26 – Exemple de cartographie utilisée pour définir les valeurs géotechniques à utiliser pour la modélisation sous ALICE®. Les valeurs des figures A et B sont données à titre indicatif et n'ont pas de valeurs significatives pour l'étude. A - Exemple pour un versant toujours stable. B - Exemple pour un versant en situation de stabilité précaire (i.e. le versant est stable par endroit avec une/des localisation(s) de rupture observé(es)).

Le secteur de Morne-Figue n'étant pas instable de manière continue mais selon certains paroxysmes dus au battement de la nappe d'eau (Allard, 1989) mais également résultant de facteurs encore mal déterminés (Barras et Ollagnier, 2007), retenir des valeurs donnant des valeurs de FS inférieur à 1 pour chaque scénario ne serait pas représentatif des conditions réelles. Ainsi, selon les conditions (sec/saturé ; avant rupture/après rupture), pour une série de caractéristique(s) géotechnique(s) des règles d'exclusion ou d'intégration seront suivies :

- Si les résultats sont toujours inférieurs à 1 ($FS \leq 1$), alors ces valeurs sont exclues³ ;
- Si les résultats sont toujours supérieurs à 1.5 ($FS > 1.5$), alors ces valeurs sont exclues⁴ ;
- Si les résultats de combinaison selon le scénario évoluent (e.g. passant de stable à instable) alors ces valeurs sont examinées. Pour ces cas, afin d'aider à mieux définir les valeurs 'clefs' minimales et maximales de chaque paramètre, la localisation des ruptures aux $FS \leq 1$ sont analysées sur les coupes : si la localisation et l'épaisseur de la rupture modélisée correspondent au glissement recherché les valeurs sont gardées, inversement

³ Par exemple si chaque FS est inférieur à 1 avec une cohésion à inférieure à 5 en contexte sec ou saturé alors ces valeurs sont exclues. En effet, ceci voudrait dire que le secteur est toujours instable sous n'importe quelle condition avec un $c' < 5$ KPa ce qui n'est pas le cas sur ce site.

⁴ Par exemple si chaque FS est supérieur à 1.5 avec une cohésion à supérieure à 20 KPa en contexte sec ou saturé alors ces valeurs sont exclues. En effet, ceci voudrait dire que le secteur est toujours stable sous n'importe quelle condition avec un $c' > 20$ KPa ce qui n'est pas le cas sur ce site.

si la localisation et l'épaisseur de la rupture modélisée ne correspondent pas au glissement recherché les valeurs sont exclues⁵.

⁵ TALREN® ou ALICE ® permettent de localiser le facteur de sécurité minimum d'un versant. Ce facteur de sécurité est lié à une taille de rupture. Par exemple, selon certaines valeurs géotechniques retenues, la taille de la rupture correspond à l'emprise du secteur d'ablation de Morne-Figue.

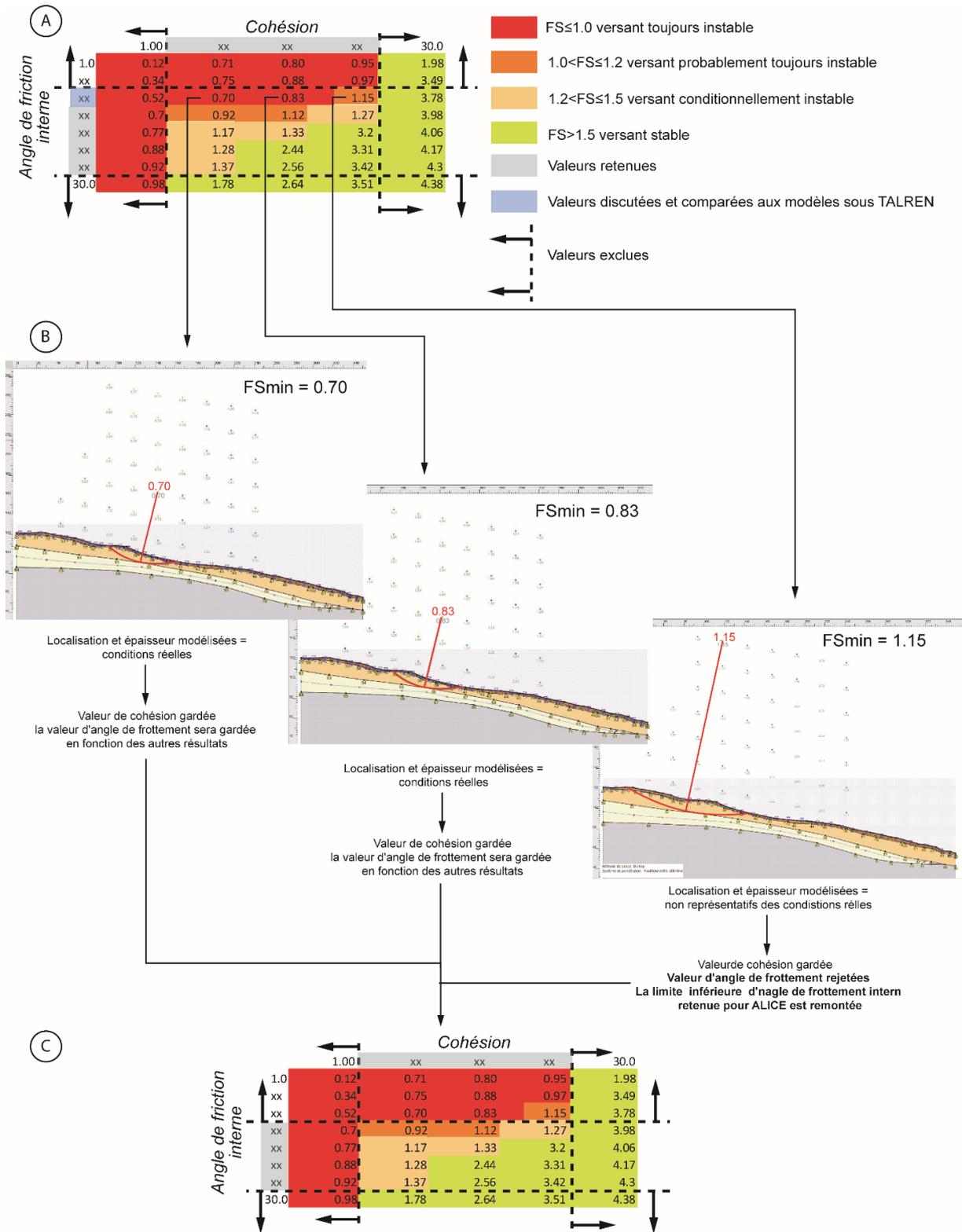


Illustration 27 – Schéma explicatif d'aide à la décision pour certaines valeurs géotechniques. Les valeurs des figures A, B et C sont données à titre indicatif et ne sont pas significatives pour l'étude. A – FS obtenus pour un versant quelconque. B – Visualisation des secteurs de rupture modélisés sous Talren® avec les valeurs posant problème d'interprétation. C – Valeurs gardées pour être introduites sous ALICE®.

Analyse de sensibilité : résultats

La coupe choisie se situe sur le glissement de Morne-Figue, cette dernière est dérivée du MNT Litto 3D (Illustration 28). Les épaisseurs de formations issues de l'interprétation des données de l'EM hélicoptère sont reportées sur la coupe. La topographie avant rupture (illustration 28) a été reconstituée par expertise à partir des anciennes photographies aériennes et des descriptions d'Allard (1989) et Barras et Ollagnier (2007). Les résultats sont présentés par type de phénomène.

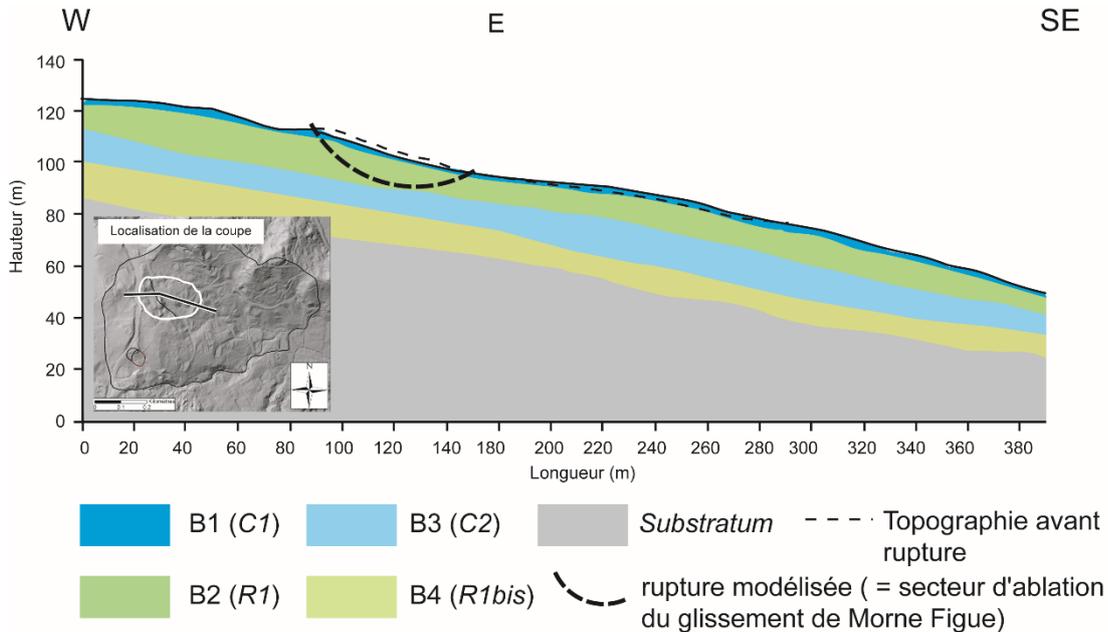


Illustration 28 – Coupe type utilisée sous Talren® pour l'analyse de sensibilité.

Pour les glissements superficiels localisés dans les argiles ou les remblais superficiels :

- D'une manière générale pour ce type de glissement superficiel lorsque l'angle de friction interne est supérieur à 15° (sauf cas d'une cohésion égale à 1) la pente est en situation de stabilité avec un $FS > 1.5$.
- En situation avant glissement quelles que soient les conditions de saturation et l'angle de friction interne, lorsque la cohésion est supérieure à 10 KPa la pente est toujours largement stable ($FS > 1.5$). En revanche pour une cohésion proche de 5 KPa, le FS se situe soit dans les valeurs de pente toujours instables ($FS \leq 1$) ou probablement toujours instables ($1 < FS \leq 1.2$).
- En situation après glissement, lorsque la cohésion est inférieure à 5 KPa la pente est toujours en situation instable ($FS \leq 1$) ou de probablement toujours instable ($1 < FS \leq 1.2$) surtout lorsque la valeur de l'angle de friction est inférieure à 15° en situation sèche et inférieure à 23° en situation saturée.
- Le poids volumique joue assez peu sur les résultats du facteur de stabilité calculé pour ce type d'instabilités localisées dans des formations peu épaisses ; le facteur de sécurité évoluant de moins de 15 % pour une variation de plus de 75 % du poids volumique. Un léger seuil est observé aux alentours d'un poids volumique de 15 kN.m^{-3} .

Pour les glissements plus profonds, localisés dans les altérites de basaltes et correspondant au site de Morne-Figue, la situation est un peu plus complexe:

- D'une manière générale que ce soit la situation avant ou après glissement, le secteur s'avère être conditionnellement instable même avec des cohésions ou des angles de friction élevés. Les situations sèches révèlent que lorsque la nappe est basse, le versant est plus stable, ce qui va dans le sens des observations d'Allard (1989).
- En situation d'avant glissement, le secteur est toujours considéré en instabilité avérée ou précaire ($FS \leq 1$ ou $1 < FS \leq 1.5$) avec un angle de friction inférieur à 10° et ce que quelles que soient les conditions de saturation. A l'inverse, le FS calculé avec un angle de friction interne $> 20^\circ$ montre une pente stable surtout en condition « sèche ». En condition « saturée », les limites de stabilité sont repoussées et lorsque la cohésion est inférieure à 5 KPa le modèle tend à montrer un versant instable, quel que soit l'angle de friction. Lorsque la cohésion est supérieure à 10 KPa et les angles de friction supérieurs à 10° , les FS augmentent passant graduellement de l'instabilité ($FS \leq 1$) à la stabilité ($FS > 1$).
- En situation d'après glissement, en conditions « sèches », le secteur est considéré comme stable lorsque l'angle de friction est supérieur à 20° , quelle que soit la cohésion. Lorsque l'angle de friction interne est compris entre 10 et 15° , le FS augmente graduellement avec la cohésion. Le fait d'introduire dans le modèle des angles de friction internes inférieurs à 5° donne des $FS < 1$ quelle que soit la cohésion. En situation saturée, il faut des valeurs d'angle de friction interne $> 15^\circ$ et de cohésion > 15 KPa pour que le FS soit supérieur à 1.
- Le poids volumique joue assez peu sur les résultats du facteur de stabilité pour ce type d'instabilités plus profondes. Un léger seuil se remarque aux alentours d'un poids volumique de $17 \text{ } \gamma_d$ avec un facteur de sécurité évoluant de moins de 10 % pour une variation de plus de 100 % du poids volumique.

Pour résumer, afin d'obtenir des simulations sous ALICE® proches de la réalité et éviter que les cartes obtenues tendent vers une instabilité récurrente de tous les versants, les valeurs utilisées pour les argiles ou les remblais **pour les glissements superficiels** seront :

- Comprises entre 10° et 20° pour les angles de friction interne (en deçà de 8° le FS serait pratiquement toujours ≤ 1 ; au-dessus de 20° le FS serait toujours > 1.5) ;
- Comprises entre 5 et 10 KPa pour la cohésion (en deçà de 5 KPa le FS serait toujours ≤ 1 et au-dessus de 10 KPa ; le FS serait toujours > 1.5) ;
- Comprises entre 12 kN.m^{-3} et 17 kN.m^{-3} , 15 kN.m^{-3} pour le poids volumique correspondant au seuil pour lequel le FS se stabilise quelles que soient les valeurs de cohésion et d'angle de friction interne.

Pour les glissements profonds les valeurs utilisées pour la couche d'altération de basalte seront :

- Comprises entre 15° et 25° pour les angles de friction interne (en deçà de 15° le FS serait pratiquement toujours ≤ 1 et au-dessus de 25° le FS serait toujours > 1.5) ;
- Comprises entre 10 KPa et 20 KPa pour la cohésion (en deçà de 10 KPa le FS serait toujours ≤ 1 et au-dessus de 20 KPa ; le FS serait toujours > 1.5) ;
- Comprises entre 12 kN.m^{-3} et 18 kN.m^{-3} , 17 kN.m^{-3} pour le poids volumique correspondant au seuil pour lequel le FS se stabilise quelles que soient les valeurs de cohésion et d'angle de friction interne.

4.2.4. Hydrogéologie

Une étude piézométrique a été menée pendant un an sur le site de Morne-Figue (Allard, 1989). Cette étude mentionne :

- Un niveau de nappe d'eau entre 0,5 et 10 mètres sous la surface ;
- Une corrélation entre le battement de la nappe et son niveau et les phases d'instabilités.

Ainsi, le suivi piézométrique ayant été très ponctuel sans mise en relation avec les précipitations, il n'est pas possible de modéliser le comportement de la nappe d'eau au sein des formations selon des épisodes climatiques.

Toutefois, dans ALICE®, il est possible d'imposer un niveau d'eau en fixant une profondeur pour le secteur étudié. Grâce à l'étude de 1989 la nappe d'eau sera donc contrainte entre -0.5 m sous la topographie et -10 m sous la topographie.

4.3. PROTOCOLE DE MODELISATION

Le protocole pour modéliser les probabilités de rupture pour Morne-Figue est légèrement différent de celui utilisé pour la Médaille. En effet, les phénomènes sont moins complexes avec moins d'incertitudes. Les glissements modélisés sont :

- Les glissements translationnels superficiels, correspondant au glissement de 1977 dont la longueur de la rupture est égale à environ 30 m
- Les glissements rotationnels plus profonds (profondeur comprise entre 9 et 11 m) correspondant au glissement dit de Morne-Figue décrit au paragraphe 2.3.1 dont la longueur de la rupture est égale à environ 50 m.

Les paramètres géotechniques fixés sont ceux définis lors de l'analyse de sensibilité (Illustration 29). Les distributions de probabilités (pour chaque paramètre géotechnique) choisies sont triangulaires (Illustration 30). Le nombre de tirage de Monte Carlo est fixé à 10 000 tirages afin de réduire l'incertitude liée aux calculs des probabilités de rupture. Ce seuil est celui fixé par Thiery *et al.* (2017) pour des études sur plusieurs types de glissement de terrain superficiels et profonds.

Le protocole simplifié comporte **2 étapes** :

- **La première étape** consiste à définir la maille de calcul optimum. Pour les modèles spatiaux (statistiques et/ou déterministes) la maille de calcul conditionne les résultats : une maille de calcul trop petite peut générer des artefacts et à l'inverse une maille de calcul trop grande généralise trop les différences topographiques (pentes, concavités convexités, exposition, etc., van Westen *et al.*, 2003 ; Thiery, 2007). Par exemple sous ALICE® le fait d'introduire un MNT très précis au pas de 1 m n'est pas la garantie d'obtenir des résultats reflétant la réalité (Thiery *et al.*, 2015). En effet, les profils à partir desquels sont calculés les facteurs de sécurité sont de taille réduite (reflétant la rugosité du MNT d'une maille à 1m pouvant tenir compte de la végétation ou autres artefacts de surface), ce qui oblige à caler le modèle sur des instabilités de petite taille non représentatives des conditions environnementales et d'instabilités réelles. Ainsi, dans le cadre de cette étude, comme pour l'année 1 de la Phase 2 (Thiery *et al.*, 2015), le MNT a été dégradé au pas de 5 m et 10 m⁶.

⁶ La maille de calcul de 25 m prévue initialement pour l'analyse de sensibilité a été abandonnée, en effet lors de l'année 1 de la phase 2 il a été démontré que des calculs avec une taille de maille de cet ordre de grandeur ne garantissaient pas des résultats optimums.

Lors de l'année 1 de la phase 2 la maille de calcul optimum était de 10 m. Toutefois, le glissement de la Médaille est un glissement de grande taille, les glissements étudiés pour l'année 2 sont plus petits, la question est donc de savoir si une maille de 5 m peut donner des résultats plus précis pour ce type d'étude. Ainsi, il a été décidé de réaliser des calculs pour une maille de 10 m et 5 m avec les caractéristiques géotechniques définies lors de l'analyse de sensibilité. Cette étape doit permettre de définir une maille de calcul optimum pour le site. Pour cette étape le niveau de la nappe d'eau est fixé à son maximum pour les glissements profonds (i.e. nappe à moins 0,5 m du sol) et translationnels superficiels (i.e. nappe affleurant à 0 m).

Secteur	Couche	Epaisseur	γ (kN.m ⁻³)		c (KPa)		ϕ (°)	
			extrême (littérature)	valeur retenues	extrême (littérature)	valeur retenues	extrême (littérature)	valeur retenues
S1	A1 - Altération d'andésite niveau 3 ou 4	Jusqu'à 10 m	10-30	10-30	10-15	10-15	5-15	10-15
	A2 - Altération d'andésite niveau 2 ou 3	Jusqu'à 20 m	10-30	10-30	8-16	8-16	6-40	30-40
	Substratum (andésites saines)	infinie	26-30	30	40	40	40	40
S2	A1 - Altération de hyaloclastites	Jusqu'à 03 m	05-29	10-15	5-20	5-10	1-35	10-18
	A3 - Substratum (hyaloclastites saines)	infinie	29-30	29	31-35	35	31-35	35
S3 ou S4	B1 - Argiles ou remblai (C1)	1-3 m	12-17	12-17	5-15	5-10	10-22	10-20
	B2 - Basaltes de Vert-Pré altérés (R1)	5-9 m	10-18	12-18	1-20	10-20	16-25	17-22
	B3 - Basaltes de Vert-Pré altérés conducteurs (C2)	7-12 m	10-18	12-18	5-25	10-20	18-25	18-25
	B4 - Basaltes de Vert-Pré altérés (R1bis)	6-10 m	10-18	12-18	5-25	10-20	18-25	18-25
	Substratum (basaltes/hyaloclastites)	infinie	25-30/29-30	29	50-66/31-35	66	30-38/31-35	38

Illustration 29 – Valeurs géotechniques retenues (en gras) après analyse de sensibilité pour chaque couche du modèle géotechnique pour le site de Morne-Figue. Le secteur S5 n'est pas intégré dans la modélisation.

- **La deuxième étape** consiste à évaluer l'influence du battement de la nappe afin d'observer son influence sur les instabilités. Cette étape est réalisée avec la maille optimum retenue lors de l'étape 1. Ainsi, le niveau de la nappe est modifié empiriquement en augmentant son niveau pas à pas. Pour les glissements superficiels dans les argiles ou dans les remblais, le niveau est modifié tous les 50 cm entre -3 et 0 m (par rapport à la surface topographique) ; pour les glissements rotationnels profonds, le niveau est modifié tous les mètres entre -10 m et -0,5 m, les limites du battement de la nappe observées par Allard (1989).

La validation de la première étape est réalisée en 2 phases :

- **La phase 1** réside en une analyse statistique des résultats. Deux indices sont calculés : l'erreur relative (ξ) et le taux de prédiction (i.e. prediction rate : PR).

L'erreur relative (ξ) exprime le ratio du nombre de cellules représentant le(s) secteur(s) de rupture moins le nombre de cellules considéré en probabilité forte de rupture dans le(s) secteur(s) de rupture sur le nombre de cellules représentant le secteur de rupture, soit :

$$\xi = \frac{O_v - P_v}{P_v} \quad \text{Eq. 1}$$

Où ξ est l'erreur relative, O_v les valeurs observées (i.e. le nombre de cellules des secteurs de rupture) et P_v les valeurs modélisées (i.e. le nombre de cellules représentant les probabilités de ruptures élevées retenues dans les secteurs de rupture). Plus ξ est faible plus le modèle est proche d'identifier les conditions de ruptures potentielles proche de la réalité.

Quant au taux de prédiction (PR), il est fonction de la proportion cumulée des cellules des secteurs observés (sur l'axe des abscisses) par rapport à la proportion des cellules des secteurs de rupture retenus en instabilité forte (Vazquez-Selem and Zinck, 1994; Zinck *et al.*, 2001; Chung et Fabbri, 2003). La courbe obtenue permet de calculer une surface sous la courbe (Area Under Curve, AUC) utilisée pour évaluer la précision du modèle, plus l'AUC est proche de 1, plus le degré d'ajustement du modèle est considéré comme exact.

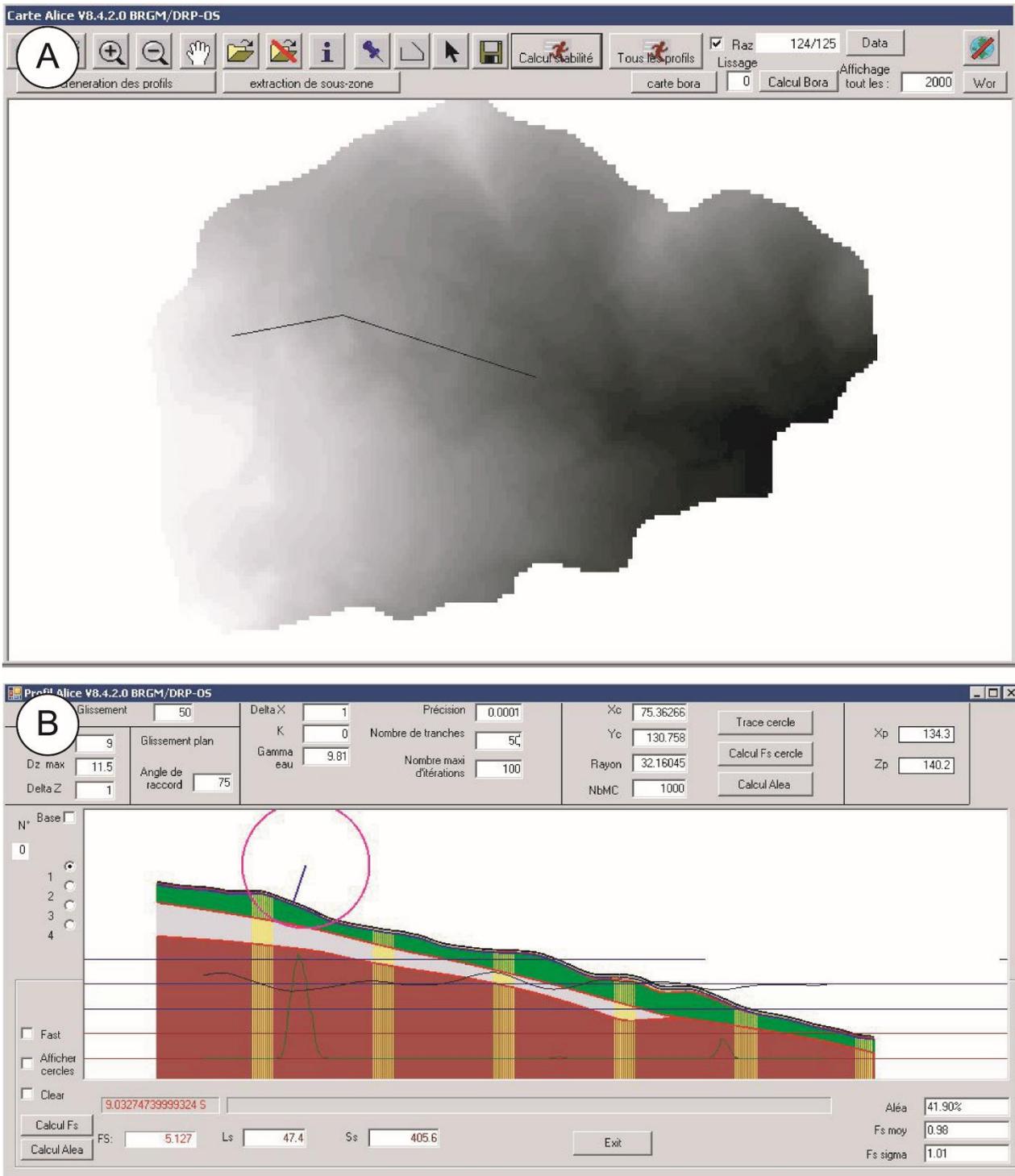


Illustration 30 – Exemples de fenêtre de paramétrage sous ALICE®. A – Interface cartographique. B – interface de calage par profil.

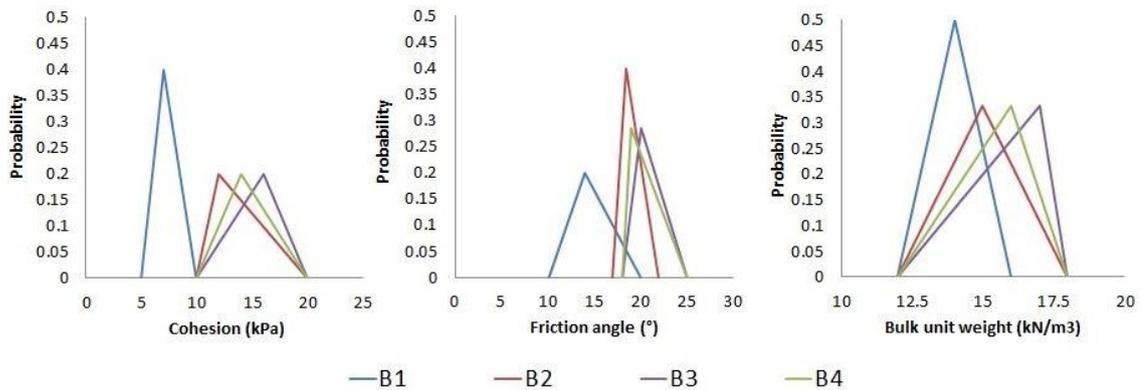


Illustration 31– Exemple des distributions de probabilités affectées dans ALICE® pour chaque paramètre géotechnique pour les couches B1, B2, B3 et B4. L'outil réalise les tirages de Monte Carlo ($n = 10\,000$) dans le spectre fixé par l'expert. La probabilité de tirage est plus forte sur les valeurs situées en pic de distribution.

- **La phase 2** consiste à évaluer de manière experte les secteurs considérés comme instables. Cette évaluation permet une critique des résultats des modèles⁷. En effet, les procédures de calage/validation des modèles dépendent des seuils de prévalence et des valeurs choisies pour les classes d'instabilité. Bégueria (2006) et Thiery *et al.* (2007) soulignent bien que cet aspect de classification/validation peut surestimer ou sous-estimer les secteurs potentiellement instables.

La validation de l'étape 2 sera réalisée :

- **Pour les glissements superficiels** : par comparaison des observations de l'influence de la nappe d'eau sur le glissement superficiel de 1977 (Allard, 1989). Si le modèle donne des probabilités d'instabilité fortes sur le secteur du glissement de 1977 lorsque la nappe est à son maximum, les résultats seront considérés comme corrects.
- **Pour les glissements profonds** : par comparaison des observations de l'influence de la nappe d'eau sur le glissement profond (Allard, 1989). Si le modèle donne des probabilités d'instabilités fortes lorsque la nappe est comprise entre -0,5 m et -2 m du sol, les résultats seront considérés comme corrects.

⁷ En effet, les modèles de susceptibilité ou d'aléa glissement de terrain qu'ils soient statistiques ou à base physique, à cause de simplifications de données d'entrée, peuvent calculer des secteurs à forte probabilité de rupture alors qu'il y a de faibles probabilités (voire aucune) qu'un glissement de terrain se déclenche. Par exemple, van Westen *et al.* (2006), Fressard *et al.* (2013), Thiery (2007), Thiery *et al.* (2007, 2014) démontrent qu'une validation experte est indispensable, malgré des séries de tests statistiques positifs, pour valider certains modèles car des secteurs aux valeurs de pente inférieure à 5° avec une lithologie peu favorable sont reconnus en probabilité de rupture élevée. Il convient donc d'avoir un œil critique quant aux résultats des modélisations.

5. Résultats

5.1. INFLUENCE DE LA MAILLE DE CALCUL

5.1.1. Modèles et cartes obtenues

Les résultats de modélisation sous ALICE®, pour différentes mailles de calcul (i.e. 10 m et 5 m) pour les glissements translationnels superficiels d'une taille de rupture de 30 m et pour les glissements profonds d'une taille de rupture de 50 m, sont représentés sur les illustrations 32 et 33.

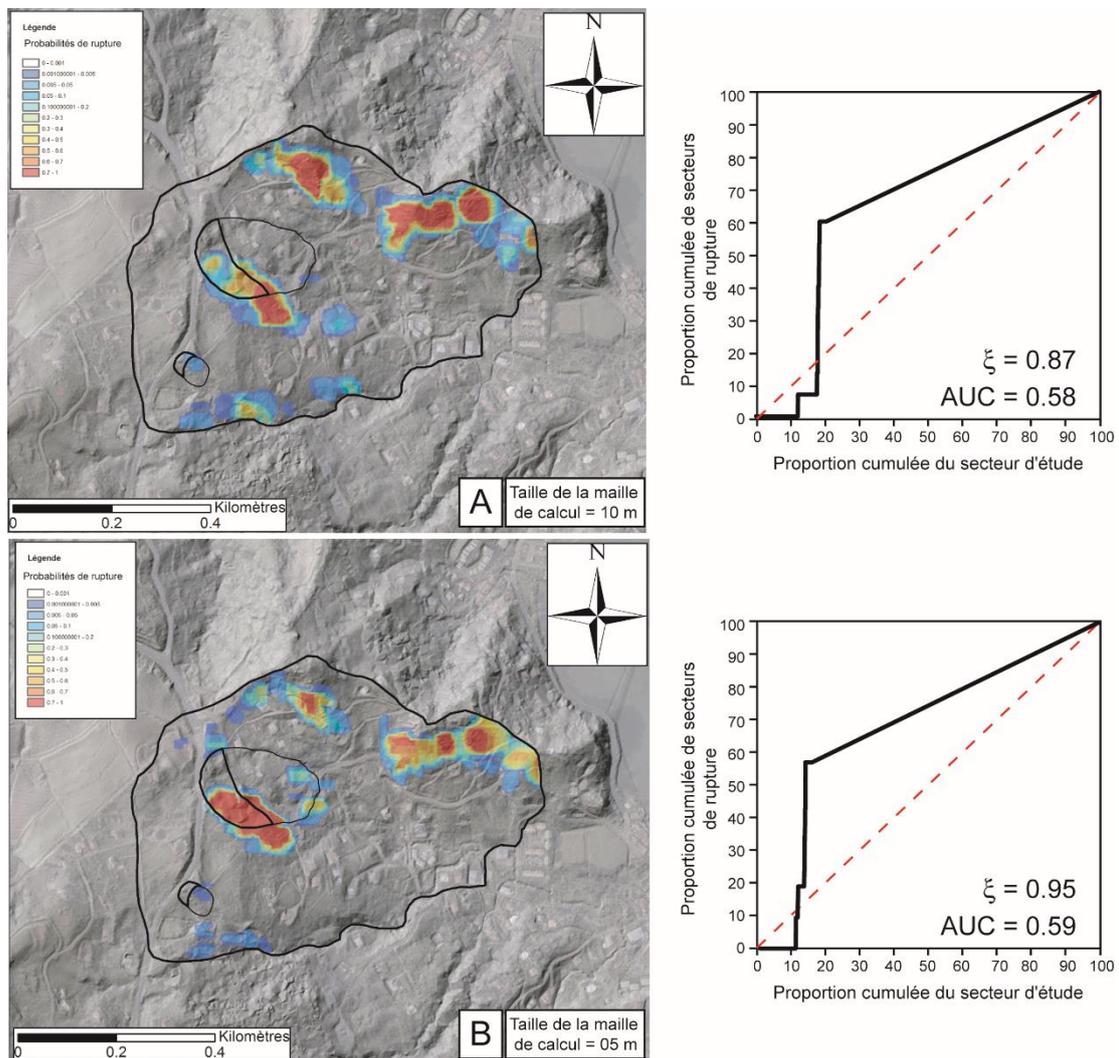


Illustration 32– Résultats de calcul de probabilités pour une **rupture translationnelle de 30 m de long et d'une profondeur superficielle** à l'interface entre la couche A1/A2 et B1/B2 (4 m maximum) correspondant au glissement superficiel de 1977. La nappe d'eau considérée est à son maximum soit à 0 m (sub-affleurante). A- Calcul réalisé avec une maille de 10 m. B- Calcul réalisé avec une maille de 5 m.

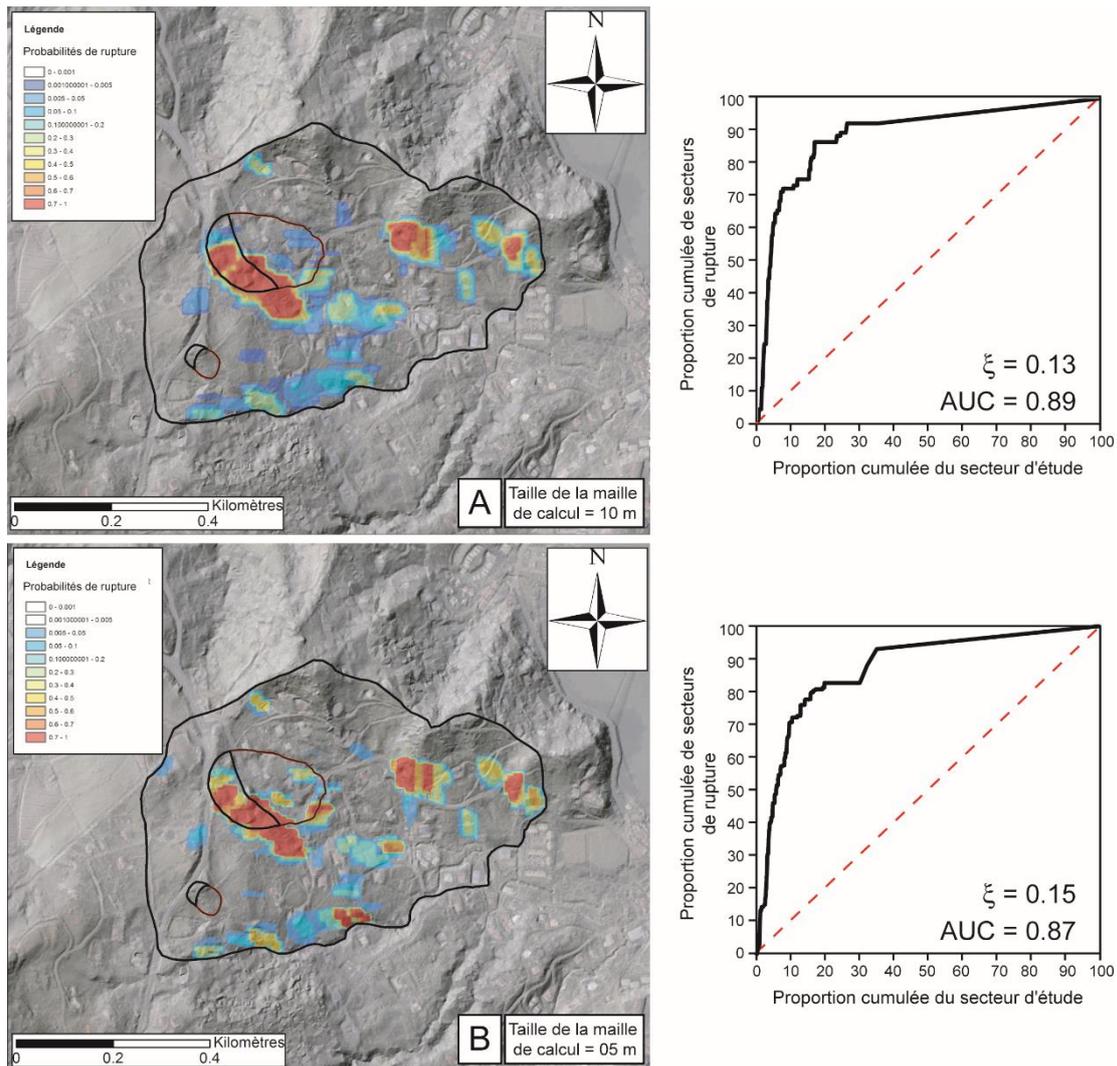


Illustration 33– Résultats de calcul de probabilités pour une **rupture rotationnelle de 50 m de long et d'une profondeur comprise entre 9 et 11 m** correspondant au glissement de Morne-Figue. La nappe d'eau considérée est à son maximum soit à - 0.5 m sous la surface. A- Calcul réalisé avec une maille de 10 m. B- Calcul réalisé avec une maille de 5 m.

Glissements translationnels superficiels

Les modèles obtenus, pour chaque maille de calcul, pour les glissements translationnels superficiels ne sont pas bons d'un point de vue statistique. En effet, l'erreur relative ξ calculée ou le taux de prédiction font partie des valeurs engendrant un rejet des modèles (Guzzetti *et al.*, 2006, Thiery, 2007). L'erreur relative ξ est de 0.87 et 0.95 respectivement pour une maille de 10 m et 5 m. Quant aux aires calculées sous les courbes de prédiction (AUC) elles sont proches de 0,5 signifiant un faible degré d'ajustement⁸ (low goodness of fit) et par conséquent une faible représentativité des modèles calculés pour ce type de phénomène.

⁸ Les valeurs généralement admises par la communauté scientifique travaillant sur les instabilités gravitaires pour valider de manière statistique les modèles de susceptibilité (par approches statistiques ou à base physique) sont pour l'erreur relative ξ inférieures à 0,25 et pour le taux de prédiction supérieures à 0,7. En deçà de ses valeurs, on peut considérer qu'il peut y avoir des erreurs dans les données d'entrée (artefacts, erreurs de cartographie, d'interprétation, etc.) ou dans les paramètres de calage des modèles. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser une validation

Glissements profonds

Pour les glissements profonds les résultats des calculs pour des mailles de 10 m et 5 m sont très proches. Le secteur de rupture du glissement de Morne-Figue est plutôt bien reconnu avec une erreur relative de 0,13 et 0,15 pour une maille de 10 m et une maille de 5m. Les aires calculées sous les courbes de prédiction ($AUC > 0.85$) sont élevées indiquant une bonne représentativité des modèles réalisés pour les glissements de type Morne-Figue (high goodness of fit) et par conséquent une très bonne représentativité des modèles calculés pour ce type de phénomène.

5.1.2. Discussion

La première phase de modélisation a pour but de comparer les mailles de calculs. Les modèles calculés pour les deux types de glissements correspondent à des situations où la nappe d'eau, pour chaque cas, est exceptionnellement élevée correspondant peu ou prou aux conditions de déclenchement des phénomènes. D'une manière générale, les deux modèles calculés pour chaque phénomène sont très proches.

En termes de résultats statistiques il s'avère que, si les modèles pour les glissements rotationnels profonds sont très bons, il n'en est pas de même pour les glissements translationnels superficiels. Cependant, si une classification statistique peut être correcte, il faut en parallèle prêter une attention particulière aux différents secteurs simulés afin de valider d'un point de vue expert les résultats (Thiery *et al.*, 2007, Thiery *et al.*, 2014). En effet, selon les paramètres introduits dans le modèle il arrive que des secteurs instables ou/et stables soient mal représentés alors que des phénomènes instables ou une certaine stabilité sont admis et observés (Olivier *et al.*, 2012).

Une analyse experte des modèles a donc été entreprise ce qui permet de pointer les informations supplémentaires nécessaires pour améliorer les cartes obtenues.

Glissements translationnels superficiels

Les cartes calculées pour glissements translationnels superficiels révèlent trois secteurs fortement susceptibles en cas de forte saturation en eau des matériaux : la totalité du secteur S2 (illustration 24) localisé sur les hyaloclastites, le secteur localisé au Sud du glissement de Morne-Figue et enfin la partie Sud du secteur S4. Le glissement de 1977 est très mal modélisé.

- Il n'est pas étonnant que le secteur S2 apparaisse en susceptibilité forte avec un modèle d'équilibre limite spatialisé tel qu'ALICE®. En effet, les pentes sont modérément fortes à fortes (entre 15° et 40°) et les matériaux altérés des hyaloclastites possèdent des caractéristiques géotechniques faibles ($\phi' < 18^\circ$; $c' < 10$ KPa). D'ailleurs, ce n'est pas la première fois que des études montrent que les matériaux altérés de hyaloclastites sont favorables aux glissements de terrain en cas de forte saturation (Barras et Ollagnier, 2007 ; Barras et Dumont, 2008). Toutefois, les observations de terrain d'octobre n'ont pas montré de traces de ce type d'instabilités sur ce secteur. Ces observations ne prouvent pas que le modèle n'est pas bon sur ce secteur, mais afin d'améliorer les résultats il faudrait disposer d'informations complémentaires sur les circulations d'eau dans les hyaloclastites même altérées. En effet, généralement les hyaloclastites ne constituent pas

« experte » des secteurs qui semblent poser des problèmes et de discuter des résultats de manière objective afin d'améliorer par la suite les modèles. C'est ce qui est réalisé ensuite dans le texte.

de bons aquifères. Or localement des circulations d'eau et des nappes perchées peuvent y être localisés (Vittecoq *et al.*, 2007).

- Le secteur Sud-Est, proche du secteur d'ablation du glissement de Morne-Figue et les secteurs Sud de S4 apparaissent comme très susceptibles aux glissements translationnels superficiels en cas de saturation forte des matériaux. Les pentes plus fortes (20-30°) conditionnent des valeurs de probabilités élevées.
- Enfin, le glissement de 1977 est mal reconnu et ce pour deux raisons principales: **(i) le MNT utilisé est récent et ne reflète pas les conditions de pentes de 1977** ; (ii) les matériaux dans lesquels se sont déclenchés le glissement de terrain sont constitués de remblai. Le modèle de formations 3D n'a pas intégré ce type de formation, du moins les caractéristiques géotechniques associées (aucune valeur n'est disponible).

Afin, d'améliorer ces modèles il serait nécessaire d'acquérir quelques informations supplémentaires notamment sur les remblais et les circulations d'eau dans les hyaloclastites voire sur la topographie antécédente⁹ sur tout le secteur d'étude. Le modèle de susceptibilité pourrait être probablement mieux contraint.

Glissements profonds

Pour les glissements rotationnels plus profonds, les cartes obtenues montrent des secteurs à très forte probabilité de glissement ; notamment sur le secteur Nord du secteur S3 où aucun évènement n'a été observé.

Ce versant n'est pas apparu fortement susceptible aux glissements de terrain lors de notre visite de terrain (Octobre 2016). Ainsi, sans rejeter de facto ces résultats, le modèle surestime la probabilité d'occurrence des glissements profonds probablement pour deux raisons :

- **La première raison est liée à une surestimation des épaisseurs de matériaux (B)** à ces endroits. En effet, malgré les efforts pour être proche de la réalité, cette partie du site souffre d'un manque de données¹⁰ par l'EM hélicoptère et de coupes naturelles ou de sondages pour contraindre l'interpolation. L'épaisseur des matériaux altérés est parfois supérieure à 20 mètres. Sans forages, il nous est difficile de dire si cela correspond à la réalité.
- **La seconde raison est liée à un manque de connaissance du niveau de la nappe d'eau sur cette partie du versant.** En effet, nous avons appliqué un niveau de nappe d'eau homogène et statique dans les altérites de basaltes, niveau d'eau considéré comme exceptionnel et suffisant pour être considéré comme facteur de déclenchement. Toutefois, il est possible que les circulations d'eau soient complètement différentes avec une forte action hydrodynamique (Allard et Bove, 1978), une forte influence de la faille Ouest-Est pour la partie du secteur S3 et que le niveau soit plus bas que ce que nous avons estimé même en condition exceptionnelle.

⁹ Cette correction a été envisagée lors du rapport de Thiery *et al.* (2015). Des essais ont été entrepris mais les résultats de la correction manuelle n'étaient pas satisfaisant engendrant de fortes incertitudes topographiques dues à une forte végétation. Cette correction a été abandonnée. Ce travail pourrait être réalisé par photogrammétrie sur des anciennes photographies aériennes orthorectifiées.

¹⁰ Les levés EM hélicoptère ont été densifiés essentiellement sur le secteur du glissement rotationnel profond de Morne-Figue. Ainsi, la partie Est du site ne bénéficie pas de la même qualité, ce qui implique une forte part d'incertitude et d'interprétation pour tenter de reconstituer le sous-sol de ce secteur.

Ainsi, des observations de terrain supplémentaires, un ajustement sous un geo-modèle, des forages ou une campagne géophysique (tomographie électrique) pourraient permettre d'améliorer le modèle 3D des formations et la connaissance hydrologique de ce versant afin de mieux contraindre le modèle de susceptibilité aux glissements de terrain profonds final.

5.1.3. Conclusion de la phase 1

Les résultats statistiques et l'analyse experte conduisent, pour cette étude, à retenir une maille de calcul de 10 mètres. Les résultats avec une maille de 5 mètres n'améliorent pas la modélisation en termes de précision spatiale. Cette résolution est celle qui a déjà été retenue pour le glissement de la Médaille.

5.2. INFLUENCE DU NIVEAU DE LA NAPPE D'EAU

A partir des distributions de référence, en fixant une maille de calcul à 10 mètres, plusieurs scénarii ont été établis pour chaque type de phénomène afin d'observer le comportement des versants face au battement de la nappe.

- Pour les glissements superficiels localisés dans les argiles ou remblai (couche A1 et B1), le niveau est modifié tous les 50 cm entre -3 m et 0 m (surface topographique) ;
- Pour les glissements rotationnels profonds localisés dans les basaltes de Vert-Pré altérés (couche B2), le niveau est modifié tous les mètres entre -10.5 m et -0.5 m, limites du battement de la nappe observées par Allard (1989).

5.2.1. Glissements translationnels superficiels

L'illustration 34 montre les résultats des simulations sous ALICE® pour les glissements translationnels superficiels pour différentes conditions hydrologiques allant de conditions sèches (Ground Water Level ; $GWL = 0$) jusqu'aux conditions de saturation exceptionnelle ($GWL = 1$).

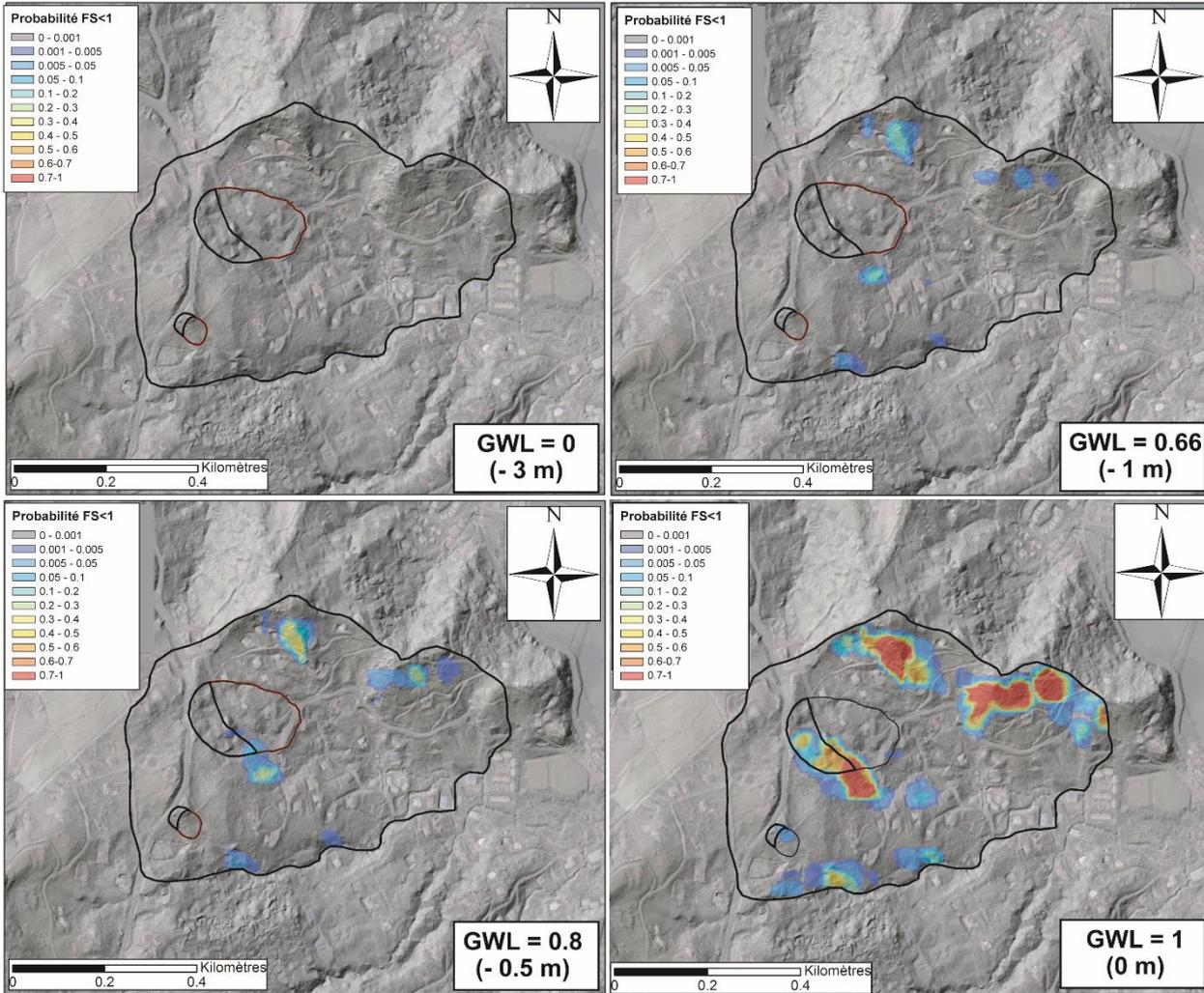


Illustration 34 – Cartes des probabilités de rupture pour des glissements translationnels superficiels selon le niveau de la nappe d'eau (Ground Water level = GWL). Les calculs sont réalisés avec une maille de 10 m.

- En conditions « sèches », les versants sont stables, les probabilités obtenues sont de 0 pour tous les versants.
- Lorsque le niveau de la nappe est compris entre 2 m et 0,5 m ($GWL = 0,33 \rightarrow GWL = 0,8$) sous la surface topographique, peu de différences sont à noter quant aux secteurs modélisés avec : (i) de faibles probabilités de rupture (les probabilités de rupture sont inférieures à 5%) pour une nappe à 1 m du sol ($GWL = 0,66$), (ii) des probabilités plus fortes (probabilités de rupture comprise entre 5% et 30%) pour une nappe à 0,5 m du sol ($GWL = 0,8$). les secteurs à plus fortes probabilités sont situés sur les pentes les plus fortes (i.e. $> 25^\circ$).
- Enfin, lorsque les conditions sont exceptionnelles et que la couche d'argile altérée est saturée ($GWL = 1$) les versants localisés sur le secteur S2 et les versants proches du glissement de Morne-Figue ont une probabilité très forte de rupture (probabilités $> 50\%$).

Même si peu de glissements superficiels sont observés sur ce site, cette série de simulation reflète certaines observations réalisées dans différents rapports relatifs aux glissements de terrain superficiels en Martinique et/ou dans les Caraïbes (Atlan et Besson, 1983 ; van Westen *et al.*, 2016) dans les matériaux altérés. Elles montrent que ce type de matériaux superficiels est

très sensible au niveau de la nappe d'eau surtout en cas de saturation forte. Elles indiquent également les secteurs sur lesquels il faudrait faire attention en cas de forçage extrême.

Toutefois, les conditions de circulations d'eaux dans ces matériaux sont mal connues et la nappe d'eau est modifiée de manière empirique sans réels liens avec les facteurs de forçages (i.e. précipitations, hydrodynamique souterraine). Ainsi, ces cartes sont indicatives, mais les secteurs à fort probabilité mériteraient probablement des investigations supplémentaires pour affiner ces cartes de susceptibilité aux glissements de terrain translationnels superficiels.

5.2.2. Glissements profonds

L'illustration 35 présente les résultats pour les glissements rotationnels profonds pour différentes conditions : conditions sèches (Ground water level ; $GWL = 0$) jusqu'aux conditions de saturation exceptionnelle ($GWL = 1$; nappe à 0,5 m du sol).

- En conditions 'sèches', les versants sont stables, les probabilités obtenues sont de 0 pour tous les versants.
- Lorsque la nappe est à 4,5 m de la surface du sol ($GWL = 0,6$), seul le secteur proche du glissement de Morne-Figue apparaît en probabilités de rupture. Cependant ces probabilités sont faibles ($Pr < 0,05\%$).
- Pour une nappe située à 3.5 m du sol ($GWL = 0,7$), les probabilités de rupture des versants sont plus élevées, notamment sur zone d'ablation du glissement de Morne-Figue.
- A 2,5 m du sol ($GWL = 0,8$), les matériaux sont plus sensibles, les probabilités augmentent (jusqu'à 40%) ; à partir de ce niveau d'eau les probabilités de rupture peuvent être considérées comme très élevées.
- Lorsque la nappe est située à 1,5 m du sol ($GWL = 0,9$), certaines portions de versants présentent de très fortes probabilités de rupture.

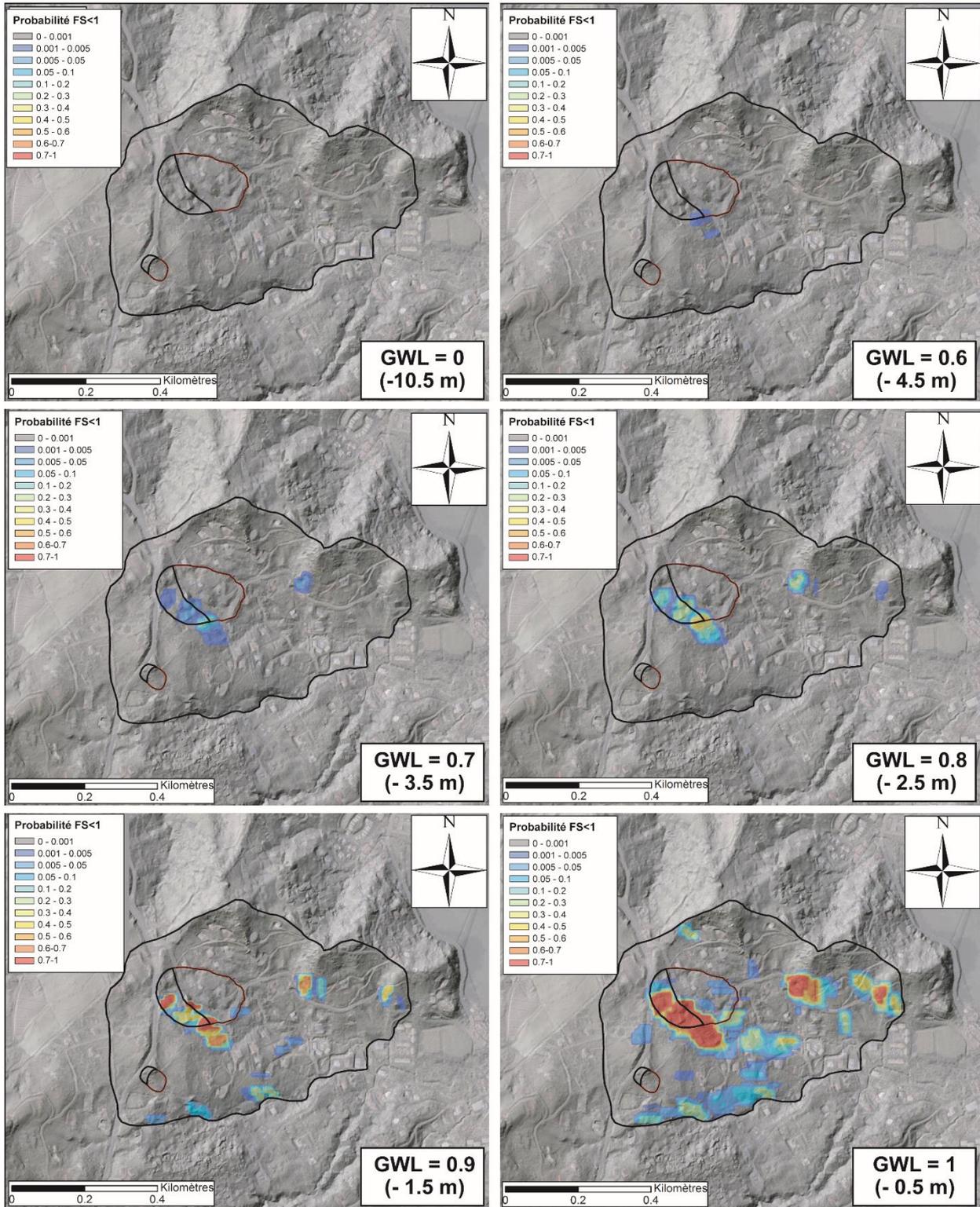


Illustration 35 – Cartes des probabilités de rupture pour des glissements rotationnels profonds selon le niveau de la nappe d'eau (Ground Water level = GWL). Les calculs sont réalisés avec une maille de 10 m.

- Enfin, pour des conditions exceptionnelles avec une nappe à 0,5 m du sol (GWL = 1), on retrouve les trois secteurs à forte probabilité de rupture observés lors de l'étape 1, particulièrement la zone d'ablation du glissement de Morne-Figue.

Cette série de simulations reflète bien les observations réalisées par Allard (1989) ou par Barras et Ollagnier (2007) notamment sur la forte activité du glissement lorsque la nappe d'eau est haute, coïncidant avec les saisons humides. Cette activité est confirmée récemment par les différentes fissures sur la route et sa réfection régulière de l'enrobé. Ainsi, le glissement de Morne-Figue sans être spectaculaire en terme de dégâts, reste actif notamment sur sa partie amont (ce que confirment bien les modèles).

Le rôle de l'eau, comme mécanisme prépondérant à l'instabilité récurrente des versants de Morne-Figue est ainsi confirmé, notamment pour le secteur du glissement rotationnel. En effet, en deçà de 2,5 m sous la surface (GWL = 0,8 soit une forte saturation), au regard des simulations sous ALICE®, les versants restent globalement stables, avec cependant des probabilités confirmant que la limite de stabilité est rapidement atteinte.

5.2.3. Conclusion de la phase 2 – année 2

Pour cette phase 2 relative aux calculs d'instabilité du site de Morne-Figue, il convient de mentionner que :

- Les données issues de l'EM et leur interprétation ont permis de (i) définir un schéma géologique et structural nouveau pour ce secteur, (ii) de définir des couches de résistivités faibles et modérées à fortes représentant des formations favorables aux instabilités gravitaires superficielles et profondes.
- Les simulations des instabilités ont été réalisées avec un MNT reflétant la topographie actuelle, on peut se demander quels auraient été les résultats avec un MNT reproduisant la topographie antécédente sur tout le secteur (topographie avant glissements) surtout pour le site du glissement rotationnel.
- Le fonctionnement de la nappe d'eau est simplifié (statique) et reprend certaines conclusions d'Allard (1989). Les résultats des images de l'EM montrent bien que des secteurs à faible résistivités sont situés à -15 m/-20 m sous le sol. Comme le soulignait déjà Allard (1989) une nappe plus profonde pourrait être présente et malgré des recherches sur l'origine des eaux souterraines (Barras et Ollagnier, 2007), actuellement, il est impossible de savoir si des relations existent entre cette nappe et la nappe permanente de proche surface. L'installation de piézomètres profonds crépinés a été envisagée mais non réalisées. Pourtant un tel dispositif permettrait de bien identifier le comportement hydrogéologique local et proposer des solutions pérennes pour stabiliser le versant.
- Enfin, pour avoir une vision globale et réelle de la situation actuelle il faudrait (i) corriger le MNT¹¹ et (ii) tenter d'avoir plus d'informations sur les circulations d'eau souterraines du site.

¹¹ Cette correction a été envisagée lors du rapport de Thiery *et al.* (2015). Des essais ont été entrepris mais les résultats de la correction manuelle n'étaient pas satisfaisant engendrant de fortes incertitudes topographiques dues à une forte végétation. Cette correction a été abandonnée. Ce travail pourrait être réalisé par photogrammétrie sur des anciennes photographies aériennes orthorectifiées.

6. Conclusion finale : intérêts, limites, recommandations

L'objectif général de l'étude était de mettre œuvre une méthodologie permettant l'interprétation conjointe des mesures issues de l'EM hélicoptées et des données plus classiques, telles que les paramètres géotechniques, géologiques et hydrogéologiques, pour la caractérisation des glissements de terrain. Les travaux menés lors des trois années permettent de donner quelques recommandations pour l'usage de telles données dans le cadre de l'analyse des instabilités gravitaires.

6.1. GENERALITES

L'objectif était d'intégrer les données issues de l'EM hélicopté dans un logiciel de modélisation déterministe (ALICE®) et d'en évaluer l'apport sur la cartographie de l'aléa pour un site avec des glissements complexes comme celui de la Médaille ou plus simples et superficiels comme ceux du site de Morne-Figue.

Ces études ont été réalisées sur des sites, pour lesquels quelques informations géologiques étaient disponibles. Ces informations ont permis de compléter un modèle géotechnique fondé conjointement sur (i) des MNT précis (i.e. MNT LIDAR 2013 et MNT Litto3D), (ii) l'interprétation des résultats d'EM hélicopté et (iii) des sondages acquis entre 1968 et 2000 pour le site de la Médaille et entre 1989 et 2007 pour le site de Morne-Figue, (iv) des données de tomographie électrique acquises en 2007 pour Morne-Figue.

Les modèles obtenus ont été introduits dans ALICE® pour estimer les conditions de stabilité des versants et observer par rétro-analyse si les données issues de l'EM pouvaient être utiles dans le cadre d'une modélisation déterministe de différents types d'instabilités gravitaires.

Au terme de cette étude et au regard des résultats il apparaît nécessaire de :

- Résumer l'apport des images EM hélicopté pour définir l'extension et la profondeur des formations considérées comme instables et l'intérêt d'introduire ces informations dans ALICE® ;
- Montrer les limites de l'approche notamment pour les glissements complexes.

6.2. INTERETS ET LIMITES DE L'APPROCHE

6.1.1. Intérêts

Intérêt de l'EM hélicopté pour les instabilités gravitaires

Les résultats d'EM hélicopté obtenus dans le cadre de cette étude ont apporté de nouvelles informations sur les matériaux mobilisables en milieu volcanique complexe comme : (i) l'extension, (ii) l'épaisseur et (iii) la profondeur des formations.

- **Pour le site de la Médaille** de nouvelles informations supposées, mais non confirmées faute de sondages profonds, ont été obtenues, comme l'existence de deux corps

principaux superposés (dont un de faible résistivité) composant le glissement de terrain de la Médaille. Les informations extraites des résultats d'EM hélicoptère ont permis également de construire un modèle géotechnique propre au glissement de la Médaille pouvant être intégré dans ALICE®. Sans ces informations issues de l'EM hélicoptère le modèle géotechnique aurait été différent (Thiery et al. 2015). Enfin, le modèle géotechnique final a permis d'envisager et de confirmer un modèle conceptuel de fonctionnement du glissement principal en deux compartiments, avec un compartiment aval et un compartiment amont (Thiery et al., 2015).

- **Pour le site de Morne-Figue** les données issues de l'EM ont permis de préciser la structure géologique du site, notamment : (i) l'emprise des hyaloclastites et (ii) les différents horizons successifs de faible et plus forte résistivités dans les basaltes de Vert-Pré (différents niveaux d'altérations ?). Les informations extraites des résultats d'EM hélicoptère ont permis de construire un modèle géotechnique propre au site de Morne-Figue pouvant être intégré dans ALICE®. Ce modèle géotechnique tel qu'il a été construit permet de bien reproduire les comportements instables des matériaux fortement saturés surtout pour les glissements rotationnels profonds. Pour les glissements translationnels superficiels, le peu d'informations sur le site ne permet pas d'être aussi affirmatif. En effet, le seul glissement translationnel superficiel observé date de 1977 et s'est déclenché dans des remblais routiers. Ce type de matériaux n'a pas été introduit dans le modèle géotechnique.
- A noter que pour les deux sites une succession d'horizons à résistivité modérée/horizon à faible résistivité a été observée entre -4 et -30 m. Ces horizons de faible résistivité pourraient correspondre à des nappes d'eau souterraines profondes (entre -20 et -25 m pour le site de la Médaille et entre -15 m et -20 m pour le site de Morne-Figue). Ces observations corroborent les différentes études antérieures qui supposaient l'existence d'une nappe profonde que ce soit pour Morne-Figue et La Médaille. Ces nappes profondes pourraient jouer sur le comportement hydrogéologique des sites et sur les instabilités de versant. Cependant, sans forages pour confirmer ces hypothèses, il convient d'être prudent sur ces interprétations et sur les relations nappes profondes/nappes plus superficielles.

Intérêt de la modélisation sous ALICE®

Introduit dans ALICE®, les modèles géotechniques ont permis de faire **une analyse de sensibilité** sur :

- **La maille de calcul minimum à introduire pour obtenir des résultats cohérents ;**
- **Le niveau de la nappe et les conséquences sur la stabilité des secteurs modélisés.**

Les résultats montrent qu'avec les caractéristiques géotechniques retenues pour chaque site et introduites selon une distribution triangulaire, une maille de calcul de 10 mètres et un niveau de nappe considéré comme exceptionnel, on obtient une bonne simulation des probabilités de rupture des secteurs les plus instables. Au-delà de ces résultats, il faut retenir :

- **Pour le site de la Médaille**, les simulations sous ALICE® confirment le modèle conceptuel envisagé : (i) le glissement de la Médaille fonctionne par compartiment, (ii) les probabilités de rupture sont bien identifiées sur des secteurs clefs comme la limite entre le compartiment amont et le compartiment aval (Thiery et al., 2015). En conditions 'sèches' le glissement peut être considéré comme stable. Un drainage pourrait stopper, sinon ralentir, l'instabilité des terrains (ce qui confirmerait certaines conclusions d'Allard, 1981). Toutefois, ce drainage doit être envisagé pour le compartiment aval également car

ce dernier participe à la déstabilisation du compartiment amont A. Enfin, une nappe d'eau conséquente est nécessaire pour que le glissement devienne très instable. Ainsi, l'alimentation de la nappe d'eau par la seule source en amont ne devrait pas permettre au glissement de la Médaille d'être trop instable. En revanche un apport exceptionnel par précipitations augmenterait le volume de la nappe (par infiltration et augmentation du débit de la source) et jouerait sur l'instabilité du glissement.

- **Pour le site de Morne-Figue** : les simulations sous ALICE® ont permis d'identifier les secteurs probablement instables en cas de forte saturation des matériaux et de reproduire de manière simplifiée mais réaliste l'influence de la nappe d'eau dont le battement se situe entre -10.5 m et -0.5 m sous le sol. En situation 'sèches', les versants sont stables. En revanche, que ce soit pour les glissements rotationnels profonds ou translationnels superficiels, lorsque la nappe est proche de la surface, les limites d'équilibre sont atteintes et une partie des versants peut être déstabilisée. Pour les glissements rotationnels profonds de type Morne-figue, les simulations correspondent aux observations réalisées. En revanche, pour les glissements translationnels superficiels des simulations sur un site comportant le même type de phénomène sur le même type de matériaux permettraient de confirmer si les versants nord du site de Morne-Figue sont bien susceptibles à ce type de glissements de terrain.
- A noter, que pour Morne-Figue, **la typologie fondée sur les épaisseurs, le type et la forme de rupture et esquissée par Atlan et Besson (1983) est confirmée**. Quant au site de la Médaille, le fonctionnement du glissement permet de la compléter (Thiery *et al.*, 2015).
- Enfin, **les résultats obtenus permettent d'envisager l'utilisation d'ALICE®** dans cet environnement particulier de laves altérées non seulement à méso-échelles¹² (i.e. 1 : 25 000^{ème} - 1 : 10 000^{ème}) mais également **à l'échelle du phénomène** afin de mieux comprendre leur fonctionnement.

6.1.2. Limites actuelles

Malgré des résultats satisfaisants, quelques limites sont à pointer :

- **Précision des images issues de l'EM hélicopté** : si les résultats issus de l'EM hélicopté ont permis de définir différents horizons en profondeur souvent mal connus ou supposés avec une précision jusqu'au mètre (pour les couches superficielles proches du sol), il est difficile de définir en profondeur des couches fines. Par exemple, pour le site de la Médaille la semelle du glissement n'a pas été identifiée clairement. Cette couche étant de faible épaisseur et se situant en profondeur, selon le seul sondage à disposition, elle n'a pu être imagée par la méthode hélicoptée car en deçà des limites de précision de l'appareil (Reninger *et al.*, 2014). Seules des données supplémentaires acquises par moyen(s) terrestre(s) auraient pu éventuellement nous permettre de mieux caractériser cette semelle. **Notons également que l'apport des données EM hélicoptées dépend directement de la couverture disponible sur la zone d'étude**, cette couverture devant être compatible avec la taille de l'objet étudié. En effet, cette dernière n'est pas aussi bonne au niveau du glissement de Morne-Figue qu'au niveau de celui de la Médaille, les deux glissements de terrain documentés sur Morne-Figue étant de plus très ponctuels. Il apparaît alors que seul le glissement principal de Morne-Figue semble être assez bien

¹² Des études précédentes sous ALICE® ont déjà été réalisées en environnement tropicale sur des matériaux altérés mais pas à l'échelle du phénomène ou encore avec des données spatiales précises (maille de calcul ≤ 10 m)

couvert pour pouvoir être modélisé de manière précise. Ainsi, on regrettera le manque de données à l'est de la zone.

- **Précision spatiale des modèles géotechniques:** les modèles géotechniques ont été construits avec une série de transects densifiés sur les deux secteurs. Pour le site de la Médaille, une série de 20 forages a permis d'améliorer les informations issues des images EM afin de contraindre et caler le modèle géotechnique du site. A l'inverse, la partie Est du site de Morne-Figue ne bénéficie pas de cette densification des transects et la rétro-analyse des simulations sous ALICE® montre que, probablement, l'épaisseur modélisée des matériaux est supérieure à la réalité. Par conséquent, dans le cadre d'études sur d'autres sites, des essais doivent être entrepris avec un geo-modeller afin de trouver le juste compromis entre nombre de transects minimaux et précision du modèle géotechnique.
- **Type de phénomène et de matériaux pris en compte :** les calculs sous ALICE® ont porté sur trois types de phénomènes (i.e. glissement complexe, glissement rotationnel profond et glissement translationnel superficiel) localisés sur des matériaux altérés mais d'origine différente. Si le protocole de calage des caractéristiques géotechniques, sur ces matériaux, afin de réduire leur incertitude, a été testé avec succès, il convient de porter une attention particulière à cette étape pour des études futures similaires mais portant sur des environnements différents (i.e. autre type de laves altérées, autre type d'instabilités). Ainsi, il ne faudra pas s'affranchir de l'étape de calage et de nouveaux tests sur d'autres types de matériaux pour des phénomènes différents (e.g. repris de la typologie d'Atlan et Besson, 1983).

6.3. RECOMMANDATIONS

Pour conclure, les résultats issus de l'EM hélicoptère confrontés aux études antérieures et aux sondages existants ont permis d'envisager de nouvelles hypothèses sur la structure géologique des deux sites ainsi que sur le fonctionnement des glissements de terrain notamment celui de la Médaille. Ainsi, ont été définis :

- **Pour le site de la Médaille :** (i) un modèle géotechnique, supposé, non confirmé par manque de sondages profonds (> 35 mètres) et de sondages sur le compartiment aval¹³ ; (ii) un modèle de fonctionnement du glissement que confirment les différentes simulations sous ALICE®.
- **Pour le site de Morne-Figue :** (i) de nouvelles hypothèses quant à la structure géologique du site notamment sur l'existence de deux failles de part et d'autres du secteur S3 et plusieurs niveaux d'altération des basaltes ; (ii) un modèle géotechnique spatialisé précis notamment dans la partie amont où des transects issus de l'EM ont été densifiés.

Si les simulations sous ALICE® donnent de bons résultats, il convient de porter une attention particulière¹⁴ sur :

- **Les épaisseurs des formations.** Pour cela, en dépit de l'apport indéniable des données issues l'EM hélicoptère il est encore nécessaire de disposer d'un minimum de forages ou

¹³ Des observations de terrain ont été réalisées sur le site de la Médaille en Octobre 2016. Le secteur aval étant fortement végétalisé, il a été impossible de confirmer les hypothèses issues du rapport de Thiery *et al.* (2015)

¹⁴ Ces recommandations sont établies pour cette étude, mais elles sont applicables de manière générales pour toutes les problématiques de modélisation des instabilités gravitaires, en particulier pour une spatialisation de la susceptibilité et de l'aléa.

d'informations pour « caler » les épaisseurs issues de l'analyse des images électromagnétiques afin de limiter l'incertitude liée au contexte géologique local ;

- **La qualité du MNT** en entrée ainsi que son utilisation à la bonne échelle ;
- **Les caractéristiques géotechniques** à introduire dans le modèle par la définition d'enveloppe de distributions adaptées au site selon un protocole de calage fondé sur des rétro-analyses sur des phénomènes connus ;
- **Le niveau de la nappe d'eau**. En effet, faute de chroniques fiables de précipitations et de piézométrie il faut introduire une nappe d'eau « fictive » pas à pas afin de connaître son influence. Il convient également de bien retenir que pour ce type de modèle fondé sur des approches d'équilibre limite l'eau est considéré en statique et non pas en dynamique¹⁵.

¹⁵ L'utilisation de modèles plus complexes (e.g. modèle par différences finie de type FLAC 2D/3D) permettrait de tenir compte de cette dynamique, mais nécessiterait également plus de données d'entrée. La généralisation et la spatialisation seraient alors complexes à mettre en œuvre. L'avantage de l'approche de type ALICE® est de pouvoir modéliser/cartographier les secteurs potentiels de rupture de manière relativement rapide sans avoir un trop grand nombre de données à gérer et à analyser tout en tenant compte de facteurs de déclenchement (i.e. eau, accélération sismique si nécessaire). De plus la différence en terme de résultats (i.e. facteur de sécurité) n'est pas réellement significative. En effet, plusieurs essais, dont récemment ceux réalisés par Matthews *et al.* (2014) et Liu *et al.* (2015), montrent une faible différence en terme de résultats (Facteur de sécurité calculés) entre les deux approches.

7. Bibliographie

- Aleotti P., Chowdhury R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 58, 21–44.
- Allard J.F., 1989. RN1 carrefour Nord de Trinité – glissement du Morne Figue – Trinité – Martinique, Etude géotechnique. Rapport n°89 MTQ 082, 11p.
- Allard J.F., Bove Y., 1978. CD 25 Bis – Etude Géotechnique du glissement survenu au Quartier Morne Congo, Trinité (Martinique). Rapport BRGM 78. ANT. 4. 32 p.
- 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.
- Atlan Y. et Besson J.-C., 1983. Evolution des reliefs en liaison avec la sécurité et l'aménagement du territoire en Martinique. BRGM 83. ANT. 016. 24 p.
- 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. 72 p.
- Barras A. V., 2008. Expertise d'un glissement de terrain à Trinité, quartier Bonneville (Martinique)- Compte rendu de visite du 3 novembre 2008. Rapport BRGM/RP58604-FR. 25 p, 12ill.
- Barras, A. V., Dumont A., 2008. Reconnaissance géophysiques de soleil Levant – Le François, Martinique. Rapport BRGM/RP-55986-FR. 60 p., 12 ill, 4 annexes.
- 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.
- Beguiria, S, 2006. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management, *Natural Hazards*, 37, 315– 329
- Belz H., 1992. Projet de remplacement du pont sur la rivière Monsieur – RN 4 – Bambou - Courbaril – Duchamps. Reconnaissance géotechniques. BRGM-R-35110-ANT-4S-92. 80 p.
- Belz H. & Chassagneux D., 1993. Etude géotechnique complémentaire du glissement affectant la RN1 – L'Estrade glissement sud-aval chaussée. BRGM – R-37115-ANT-4S-93. 146 p.
- Chalivat P. & Chassagneux D., 1992. Projet de retenue collinaire au lieu-dit Sébastopol, commune de Ducos. Etude géologique et géotechnique préliminaire. BRGM-R-35590-ANT-4S-93. 39 p.
- Chung, C.J.F. & Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30, issue 3, 451-472. doi:10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b

Corominas J., van Westen C.J., Frattini P., Cascini L., Malet J.P., Fotopoulou S., Catani F., van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M.G., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervás J., Smith J. T., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ.* 73, 209–263.

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.

Guzzetti F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81, 166–184.

Haneberg W.C., 2000. Deterministic and probabilistic approaches to geologic hazard assessment *Environmental & Engineering Geoscience.* 6:209–226.

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.

Liu, S-Y., Shao, L-T., Li, H-J., 2015. Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods. *Computers and Geotechnics*, 63, 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.008>

Matthews C., Farook Z., Helm P-R, 2014. Slope stability analysis – limit equilibrium or the finite element method? *Ground Engineering*, 48 (5), 22-28. <http://www.oasys-software.com/media/press/Technical%20Paper%20-%20Slope%20Stability%20Analysis.pdf>

Mompelat J.M., 1994. Unités cartographiques et évaluation de l'aléa mouvements de terrain en Guadeloupe. Thèse doctorale de l'Université Paris 6 Pierre et Marie Curie.

Morgenstern N.R. and Price V., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique.* 15 (1), 79–93.

Morgenstern, N. R., 1967. Submarine slumping and the initiation of turbidity currents. *Marine Géotechnique.* A. F. Richards, ed., University of Illinois Press, Champaign, IL, 189–220.

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.

Olivier M., Monod B., Sedan O., 2012. Projet DO-SMS : utilisation du logiciel ALICE® pour l'élaboration de cartes d'aléa glissements de terrain. Rapport final. BRGM/RP-60249-FR, volume 1, 70 p., 50 fig., 5 ann.

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.

Reninger P.-A., Nachbaur A., Deparis J., Bernardie S., 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 – Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-64427-FR, p. 51, III. 41.

Reninger P.-A., Martelet G., Perrin J. 2015. Frame effective tilt correction for HEM data acquired over rugged terrain. *Near Surface Geoscience*, 6-10 September 2015, Turin.

Sedan O., 2013. Logiciel ALICE version 7-Guide d'utilisateur, Technical Report, RP-60004, BRGM, Orléans, France.

Sedan O. et Mompelat J.M., 1995. Convention de recherche BRGM-Région Martinique, Projet AR47, rapport de synthèse, rapport BRGM R 38433 ANT 95.

Sedan O., Terrier M., Hohmann A., Kobayashi H. Maton C., Rohmer J., 2011. Scénario de risque mouvements de terrain : Méthodologie et processus de réalisation, Rapport BRGM/RP-59065-FR, 291 pp., 100 fig., 19 tab., 8 ann.

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

Thiery D. 2003. Logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig., 3 ann.

Thiery Y., 2007. Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux 'mouvements de versant' : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Thèse de Doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 373p. 7 ann.

Thiery Y., Malet J-P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment. Geomorphology. 9 (1-2), 38-59.

Thiery Y., Maquaire O., Fressard M., 2014. Application of expert rules in indirect approaches for landslide susceptibility assessment. Landslides. 11, 411–424.

Thiery Y., Reninger P.-A., Nachbaur A., R. Vandromme, 2015. 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 – Phase 2. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-65407-FR, p. 52, ill. 31.

Thiery Y., Vandromme, R., Maquaire, O., 2017. Landslide susceptibility assessment by EPBM (expert physically based modelling): strategy of calibration in complex environment for different landslide types. World Landslide Forum. 2017 May 29th – 2017, 2nd June Vol. 2. Session 4. 8 p.

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., Lachassagne P., Lanini S., Ladouche B., Marechal J.-C., Petit V., 2007. Élaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives. Rapport final. BRGM/RP-55099-FR.

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.

Van Westen C.J., Rengers N., Soeters R., 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. Nat Hazard. 30, 399–419.

Van Westen C.J., van Asch T.W.J., Soeters R., 2006. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? Bull Eng Geol Environ. 65, 167–184.

Van Westen C.J., 2016. National Scale landslide Susceptibility assessment for Saint Lucia. CHARIM Caribbean Handbook on Risk Information Management - World Bank Group/GFDRR/ACPEU Natural Disaster Risk Reduction Program

Vazquez-Selem, L. & Zinck, J-A., 1994. Modelling gully distribution on volcanic terrains in the Huasca area, central Mexico; ITC Journal 1994-3 (1994), pp. 238–251

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

Westercamp D., Pelletier B., Thibault P.M., Traineau H., 1990. Carte géol. France (1 : 50 000ème), feuille Martinique. – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières.

Zinck J-A., Lopez, J., Metternicht, G-I., Shresta, D-P., Vazquez-Selem, L., 2001. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote-sensing and GIS techniques. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 3, Issue1, 43-53.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction Risques et Préventions**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr