



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 – Phase2

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-65407-FR
Décembre 2015



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 – Phase2

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-65407-FR

Décembre 2015

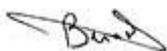
Y. Thiery, P.-A. Reninger, A. Nachbaur, R. Vandromme

Vérificateur :

Nom : **S. Bernardie**

Date : 19/01/2016

Signature :



Approbateur :

Nom : **G. Grandjean**

Fonction : **Directeur adjoint**

Date : 21/01/2016

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 hélicopté, mouvement de terrain, Antilles, aléa, ALICE.

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

Y. Thiery, P.-A. Reninger, A. Nachbaur, R. Vandromme (2015) – Exploitation de levés d'électromagnétisme hélicopté 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.

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 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, 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 en mouvement alors qu'un seul était généralement admis.

La phase 2 de ce projet, a pour objectif :

- De caractériser de manière plus précise les différentes couches de terrain mobilisables ;
- 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 premières cartes d'aléa sur des secteurs plus large en intégrant les données issues de l'EM hélicopté.

Ce rapport concerne les tâches 1 et 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. Seul le glissement de la Médaille a été étudié, le secteur de Morne-Figue fera l'objet du même type d'étude en année 2. Les résultats de cette étude montrent que :

- Le glissement de la Médaille est composé de deux corps superposés ce qui était 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 tend à confirmer l'exploitabilité de cette approche dans un contexte volcanique complexe sur des secteurs instables.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 9 |
| 2. Site d'étude..... | 11 |
| 2.1. HISTORIQUE DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE LA MEDAILLE | 11 |
| 2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE | 12 |
| 2.2.1. Substratum andésitique | 13 |
| 2.2.2. Formation dacitique en place ou sous forme bréchique et d'éboulis | 14 |
| 2.2.3. Nuées ardentes ou tufs, au nord du glissement surplombant les brèches dacitiques | 15 |
| 2.2.4. Contexte structural..... | 15 |
| 3. Imagerie, interprétations et caractérisations géo-mécaniques..... | 17 |
| 3.1. IMAGERIES | 17 |
| 3.1.1. Principes..... | 17 |
| 3.1.2. Cartographie de la résistivité 2D | 17 |
| 3.2. INTERPRETATIONS | 19 |
| 3.2.1. Sondages et coupes | 19 |
| 3.2.2. Corrélation entre les résultats de l'EM hélicoptère et les sondages | 20 |
| 3.2.3. Modèle conceptuel du glissement de la Médaille | 25 |
| 4. ALICE® : principes, variables utilisées et stratégie de modélisation | 27 |
| 4.1. ALICE® : PRINCIPES ET PRESENTATION DU MODELE | 27 |
| 4.1.1. Introduction | 27 |
| 4.1.2. Principes..... | 27 |
| 4.1.3. Intérêt d'ALICE® pour l'étude | 28 |
| 4.2. VARIABLES UTILISEES..... | 29 |
| 4.2.1. Le(s) MNT(s)..... | 29 |
| 4.2.2. Construction du modèle géotechnique..... | 29 |
| 4.2.3. Caractéristiques géotechniques retenues | 33 |
| 4.2.4. Hydrogéologie..... | 33 |
| 4.3. PROTOCOLE DE MODELISATION..... | 34 |
| 5. Résultats | 37 |
| 5.1. CHOIX DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES | 37 |
| 5.2. INFLUENCE DE LA MAILLE DE CALCUL | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3. INFLUENCE DE LA NAPPE D'EAU | 42 |
| 6. Conclusion : intérêts, limites, recommandations | 47 |
| 6.1. INTERETS ET LIMITES DE L'APPROCHE | 47 |
| 6.1.1. Intérêts | 47 |
| 6.1.2. Limites actuelles | 50 |
| 6.2. RECOMMANDATIONS & PERSPECTIVES | 50 |
| 7. Bibliographie | 53 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Illustration 1 - Localisation des deux sites d'études choisis. Source : Scan25 de l'IGN. | 11 |
| Illustration 2- Localisation du glissement de La Médaille (d'après Reninger et al., 2014). | 12 |
| Illustration 3- Carte de synthèse géologique précisée à partir des reconnaissances de terrain, les données topographiques et les informations disponibles dans la bibliographie. Source modifiée : carte géologique au 1 : 50 000 ^{ème} (Westercamp et al., 1990).13 | |
| Illustration 4 - Carte du glissement de la Médaille. Le relief est dérivée du MNT Lidar de 2013. La localisation des compartiments A, B, C et D du glissement sont repris des travaux de Hazmoune et al. (2002). | 15 |
| Illustration 5 -Grille de résistivité entre 4 et 7 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques | 17 |
| Illustration 6- Grille de résistivité entre 38 et 47 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques. | 18 |
| Illustration 7- Sondages disponibles dans la BSS. | 19 |
| Illustration 8- Exemples de coupes interprétatives de la partie amont du glissement de la Médaille (d'après Deneufbourg, 1968). A – Présentation du glissement et des compartiments instables (le relief est dérivé du MNT Lidar 2013 à un pas de 1 m). B – Situation des coupes d'après Deneufbourg (1968). C - Coupe H transversale au compartiment A. D – Coupe E longitudinale au compartiment A. | 20 |
| Illustration 9- Localisation des points de mesure (en noir) et d'une coupe, en rouge, tracée au niveau du glissement de la Médaille. La localisation des points d'observation sur les coupes EM sélectionnées, le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques sont également reportés. | 21 |
| Illustration 10– Coupe de résistivité 1 (cf. Illustration 9). Les forages à proximité ont été projetés. | 22 |
| Illustration 11 – Corrélation des formations interprétées grâce aux images de l'EM hélicoptère avec les interprétations de Deneufbourg (1968). La coupe est localisée dans l'illustration 8. | 23 |
| Illustration 12– Evolution schématique du glissement de la Médaille (modifié d'Humbert, 1986). La phase D correspond à la phase actuelle du glissement de la Médaille. | 24 |
| Illustration 13– Interprétation géomorphologique des compartiments A et C du glissement de terrain de la Médaille suite à l'analyse des images EM hélicoptères et la mise en cohérence avec les sondages et interprétations antécédantes. | 26 |

- Illustration 14– 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. 28
- Illustration 15 – Exemples des 3 MNT disponibles pour l'étude. A - BD Alti®, B - MNT 2010 (Litto3D). C - MNT Lidar 2013. Les MNT sont représentés sous forme de reliefs ombragés. Les compartiments instables sont superposés au relief..... 30
- Illustration 16 – Représentation simplifiée du modèle géotechnique retenu pour ALICE®. 32
- Illustration 17– Représentation 3D des interfaces introduites dans ALICE®. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013. 32
- Illustration 18– Caractéristiques géotechniques pour chaque type de formation. Elles représentent les extrêmes issus des différents rapports relatifs au site de la Médaille..... 33
- Illustration 19– Exemples de fenêtre de paramétrage des caractéristiques des rupture par profils sous ALICE®. 34
- Illustration 20– Carte experte de probabilité de rupture les plus fortes au sein du glissement de la Médaille (maille de calcul de 10 m). Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013.... 36
- Illustration 21– Distributions des caractéristiques géotechniques retenues dans ALICE® pour R2 (éboulis décaïques) et R3 (éboulis et brèches andésitiques). 37
- Illustration 22– Cartes des probabilités de rupture simulées sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues. A gauche la carte experte (illustration 20), à droite la carte simulée avec les constantes (i.e. taille de glissement fixée à 50 m, rupture circulaire, nappe d'eau maximum). Les calculs sont réalisés au pas de **10 m**. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013. 37
- Illustration 23– Différence entre la carte expert (illustration 20) et la carte simulée sous ALICE® (illustration 22). 38
- Illustration 24 – Cartes des probabilités de rupture. A gauche la carte experte, à droite la carte simulée sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues (illustration 21) et les constantes détaillées en illustration 22 (les calculs sont réalisés au pas de **25 m**. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013). 39
- Illustration 25 – Différence entre la carte expert et la carte simulée sous ALICE® au pas de **25 m** (Illustration 24). 39
- Illustration 26 – Cartes des probabilités de rupture. A gauche la carte experte (Illustration 20), à droite la carte simulée sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues (Illustration 21) et les constantes détaillées en illustration 22 (les calculs sont réalisés au pas de **10 m**. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013). 40
- Illustration 27– Différence entre la carte expert et la carte simulée sous ALICE® au pas de **10 m** (Illustration 26). 40
- Illustration 28 – Cartes des probabilités de rupture. A gauche la carte experte (Illustration 20), à droite la carte simulée sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues (illustration 21) et les constantes détaillées en illustration 22 (les calculs sont réalisés au pas de **5 m**. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013). 41
- Illustration 29 – Différence entre la carte expert et la carte simulée sous ALICE® au pas de **5m** (Illustration 28). 41
- Illustration 30 – Influence de la nappe d'eau introduite dans ALICE® selon le type de matériaux. A gauche conditions « sèches » (0); à droite conditions « très fortement saturés »(1). Les calculs sont réalisés au pas de 10 m, la taille des glissements fixée à 50 m, les caractéristiques géotechniques sont celles présentées en illustration 20. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013..... 44

Illustration 31 – *Influence du niveau de la nappe d'eau pour les simulations sous ALICE® pour les matériaux R2+R3. Les calculs sont réalisés au pas de 10 m, la taille des glissements fixées à 50 m. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013. 45*

Illustration 32– *Coupe synthétique du glissement (en haut) et représentation simplifiée du modèle géotechnique (en bas) sans l'apport des informations issues de l'EM hélicoptère... 48*

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 par exemple 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, analyse 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 l'exploration minière mais également au sein d'études environnementales. Comme exemples d'application de l'électromagnétisme, on retient en particulier la cartographie de vallées enfouies au Danemark (Jørgensen *et al.*, 2003), l'étude d'un glissement de terrain en Autriche (Supper *et al.*, 2013), la caractérisation de l'interface eau douce/eau salée en Italie (Viezzoli *et al.*, 2010) ou encore l'imagerie d'un aquifère perché sur l'île Santa Cruz dans les Galápagos (d'Ozouville *et al.*, 2008).

Parallèlement à ces résultats prometteurs, le BRGM a entrepris dès 2010 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 hélicoptée 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 hélicopté 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 ne concerne que l'année 1 de la phase 2, dont les objectifs peuvent être déclinés en 5 sous-tâches:

1. Comparaisons/corrélations entre les données de géophysique hélicoptée et les données de terrain sur le site de la Médaille (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 l'étude et recommandations pour l'intégration des données issues de l'EM hélicopté pour des environnements volcaniques complexes.

2. Site d'étude

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

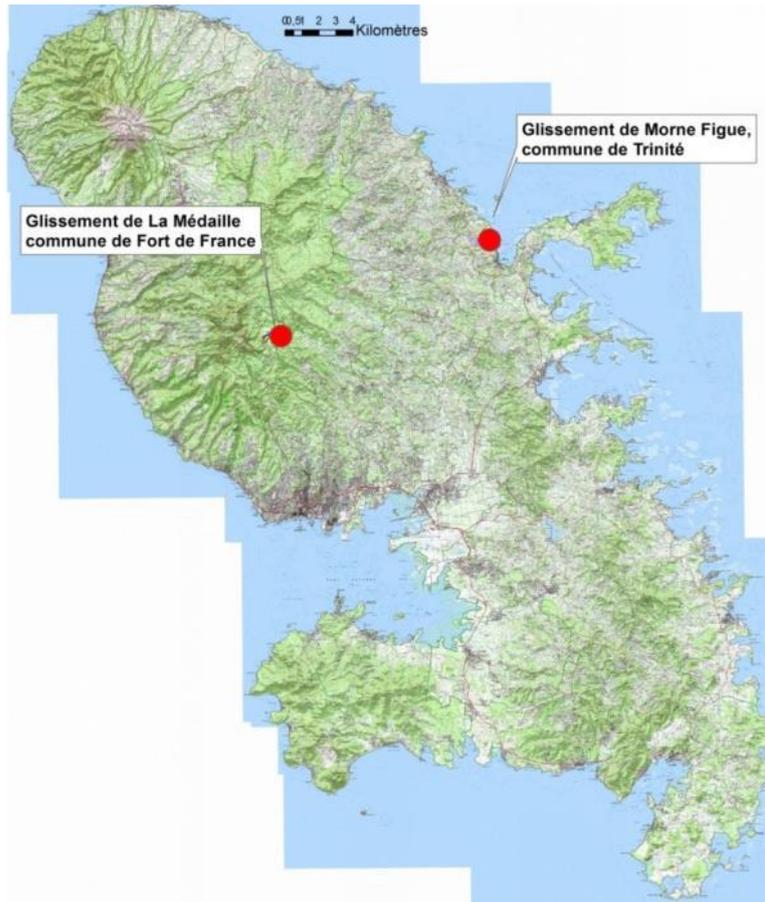


Illustration 1 - Localisation des deux sites d'études choisis. Source : Scan25 de l'IGN.

2.1. HISTORIQUE DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE LA MEDAILLE

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

Le glissement principal (en bleu sur l'illustration 2) est connu depuis de nombreuses années. Il met en mouvement 260 000 m³ de terrain sur plus de 8 ha, depuis la route vers l'aval côté est. Cependant, bien avant, Deneufbourg (1968) ainsi que Humbert (1986) évoquent un vaste glissement fossile qui explique la présence d'éboulis dacitiques, dont l'emprise a été reportée en jaune sur l'illustration 2, à partir des informations de la carte géologique (Westercamp *et al.*, 1989, 1990).

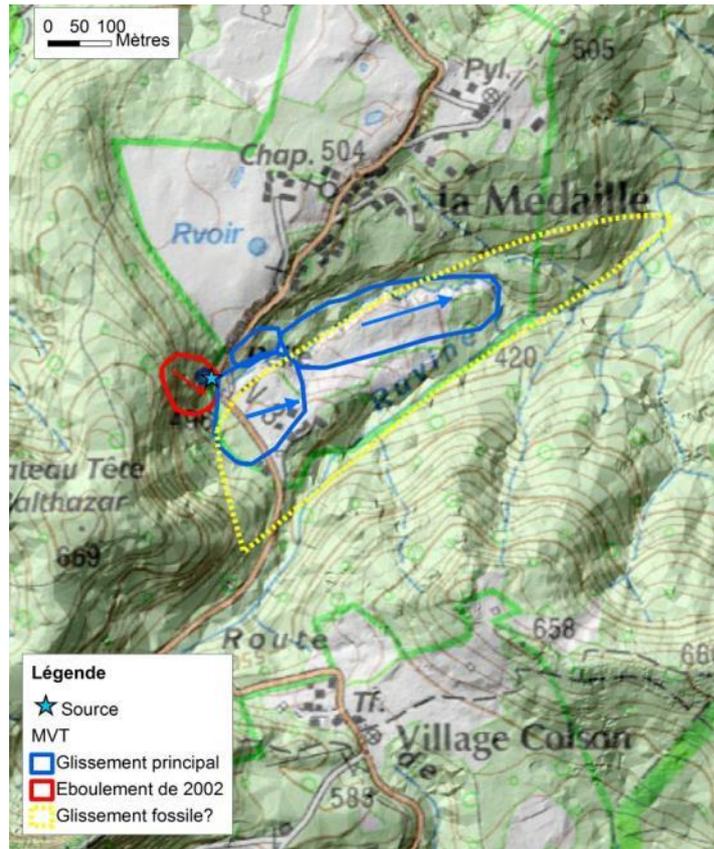


Illustration 2- Localisation du glissement de La Médaille (d'après Reninger et al., 2014).

Concernant la reprise récente du glissement, la phase paroxysmale a eu lieu en octobre 1916. Le glissement s'est déclenché brutalement, dans l'axe de la Source, en emportant l'ancien village de la Médaille faisant 5 victimes (cf. plaque commémorative sur site, Humbert, 1986). D'autres mouvements brutaux ont été observés ensuite, notamment en 1958, 1966, 1993 (tempête Cindy), conduisant au déplacement du tracé de la route nationale plus en aval. Depuis, le Conseil Régional entreprend régulièrement le rechargement de la chaussée, qui s'enfonce régulièrement, emportée dans le sens du mouvement d'ensemble. Aujourd'hui, la ravine La Source a retrouvé son niveau de base, en s'incisant profondément dans le glissement de 1916 (de plusieurs dizaines de mètre en 70 ans ; Humbert, 1986). Cette incision récente est source de désordres par érosion régressive des berges, notamment en rive droite. Le glissement est généralement décrit comme fonctionnant par compartiment plus moins dépendant (Hazmoune et al., 2002 ; Illustration 4).

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

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Située au pied du massif des Pitons du Carbet, la zone de la Médaille est formée de formations dacitiques reposant sur un substratum andésitique plus ancien, argilisé au sommet (Humbert, 1986 ; illustration 3). Certaines interprétations qui suivent sont reprises de la phase 1 du projet (Reninger et al. 2014).

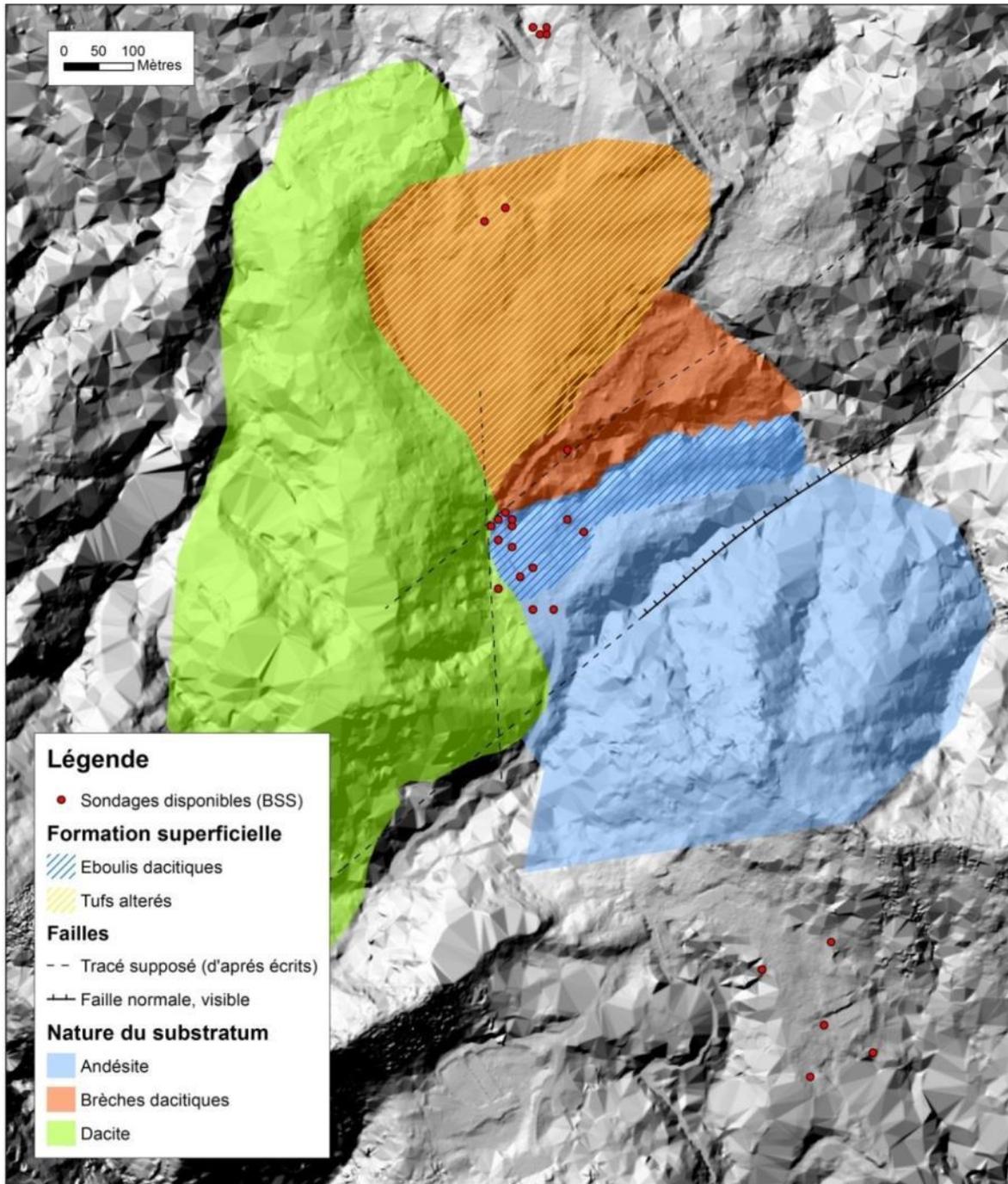


Illustration 3- Carte de synthèse géologique précisée à partir des reconnaissances de terrain, les données topographiques et les informations disponibles dans la bibliographie. Source modifiée : carte géologique au 1 : 50 000^{ème} (Westercamp et al., 1990).

2.2.1. Substratum andésitique

Sur le secteur étudié, la formation andésitique est la plus ancienne, issue de l'épisode volcanique du Morne Jacob, il y a 2,2 à 2,8 Ma. D'après la carte géologique, il s'agirait d'une coulée massive d'andésite porphyrique sombre à hyperstène et augite. Cette formation est communément interprétée comme le substratum du glissement. Plus précisément, les sondages l'ont décrit comme une lave andésitique, grise, gris-bleu ou gris vert (sondages

1173ZZ0009, 1173ZZ0014, 1173ZZ0028). Un seul des sondages évoque une andésite « porphyrique » comme décrite dans la carte géologique (sondage 1173ZZ0015).

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

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

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

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

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

Les formations dacitiques surmontant l'horizon andésitique sont présentes sous trois formes :

- En amont de la route nationale, elles constituent la falaise du cirque de la Médaille et seraient relativement saines. Elles sont recouvertes sur 3 à 7 m d'une couche d'éboulis composé de débris dacitiques et de sable limoneux, légèrement argileux, de couleur marron à gris (Sedan, 2002 ; Dubois, 2003).
- Sous forme de brèches volcaniques et recouvertes par des tufs, elles arment le plateau au nord du glissement. Au sommet du plateau, on recoupe de 10 à 20 m de cette formation dacitique altérée sans avoir recoupé une dacite saine. Ces horizons altérés sont décrits comme tendres mais « peu argileux » et se dégradant « en sable grossier gros à jaune » (sondages 1173ZZ0001, 002, 003, 004, 005), voire « sable quartzeux » ou « argileux-quartzeux ».
- Sous forme d'éboulis dacitiques, dans l'emprise du glissement. Les éléments arrachés à la falaise, forment aux pieds de celle-ci un cône d'éboulis constitué de blocs dacitiques dans une matrice sablo-argileuse. Ces éboulis dacitiques sont imprégnés par une nappe d'eau souterraine, dont le niveau hydrostatique varie en moyenne de 5 à 10 m de profondeur (cf. Deneufbourg, 1968). Les éboulis dacitiques ont entre 15 et 20 m d'épaisseur environ au niveau de la route nationale.

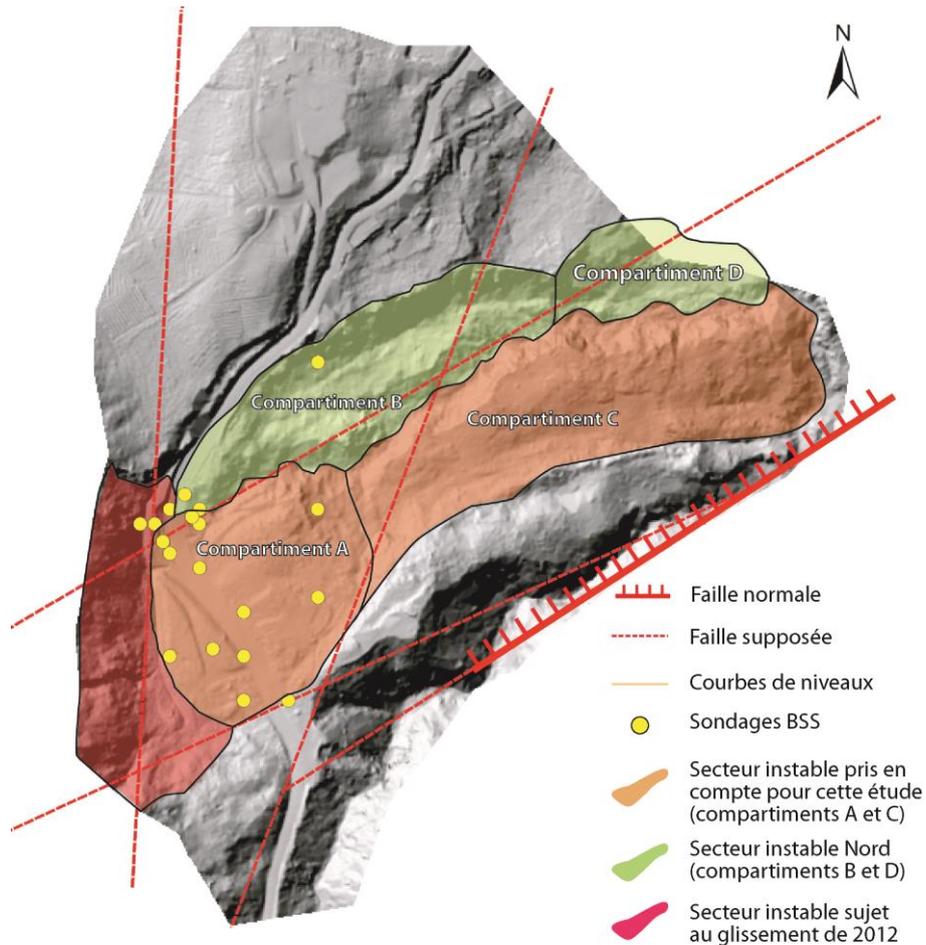


Illustration 4 - Carte du glissement de la Médaille. Le relief est dérivé du MNT Lidar de 2013. La localisation des compartiments A, B, C et D du glissement sont repris des travaux de Hazmoune et al. (2002).

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

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

2.2.4. Contexte structural

Le secteur serait affecté par un réseau de failles développé décrit par Deneufbourg (1967). Plusieurs structures faillées (failles normales) constitueraient les limites Nord et Sud du glissement (Illustrations 3 et 4). La structure la mieux connue est la faille limitant le glissement au sud, observable au niveau de la ravine Cadore. Elle est orientée sud-ouest nord-est, le compartiment nord étant effondré (Belz et Chalivat, 1996).

Une autre faille de direction Nord-Sud (cf. Illustration 3 et 4), parallèle aux falaises du cirque, limite l'amont du glissement. Cet escarpement de ligne de faille a été mis en évidence par Deneufbourg (1968). Ainsi à l'Ouest se situe la dacite et à l'Est l'andésite.

3. Imagerie, interprétations et caractérisations géo-mécaniques

3.1. IMAGERIES

3.1.1. Principes

Les principes de l'EM hélicoptère et les traitements effectués dans le cadre de cette étude sont décrits dans Reninger *et al.*, 2014. Ils ne sont pas repris ici. Les résultats suivants servent de base pour élaborer le modèle géotechnique à introduire dans ALICE® et utilisés au chapitre 4 et 5.

3.1.2. Cartographie de la résistivité 2D

L'illustration 5 présente la grille de la résistivité entre 4 et 7 m de profondeur sur laquelle ont été reportés les contours géologiques (hachures) ainsi que la localisation du glissement et des failles.

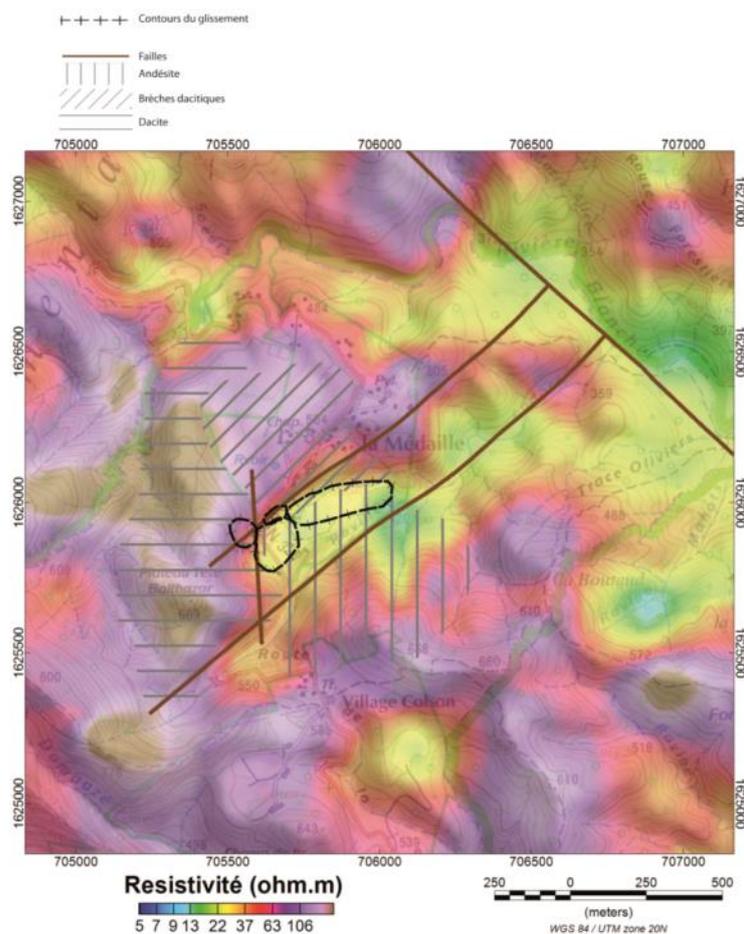


Illustration 5 -Grille de résistivité entre 4 et 7 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques

La dacite, l'andésite et les brèches dacitiques apparaissent globalement résistantes, la dacite étant la formation la plus résistante. En surface, au niveau du glissement, une formation de résistivité intermédiaire est mise en évidence, celle-ci correspondrait globalement aux éboulis, notamment dacitiques, décrits dans les différents rapports (Deneufbourg, 1968 ; Dubois, 2003).

Entre 38 et 47 m de profondeur, une formation conductrice est observée sur la grille de résistivité (Illustration 6). Cette dernière est présente au niveau du glissement. La dacite apparait, comme précédemment, avec une forte résistivité.

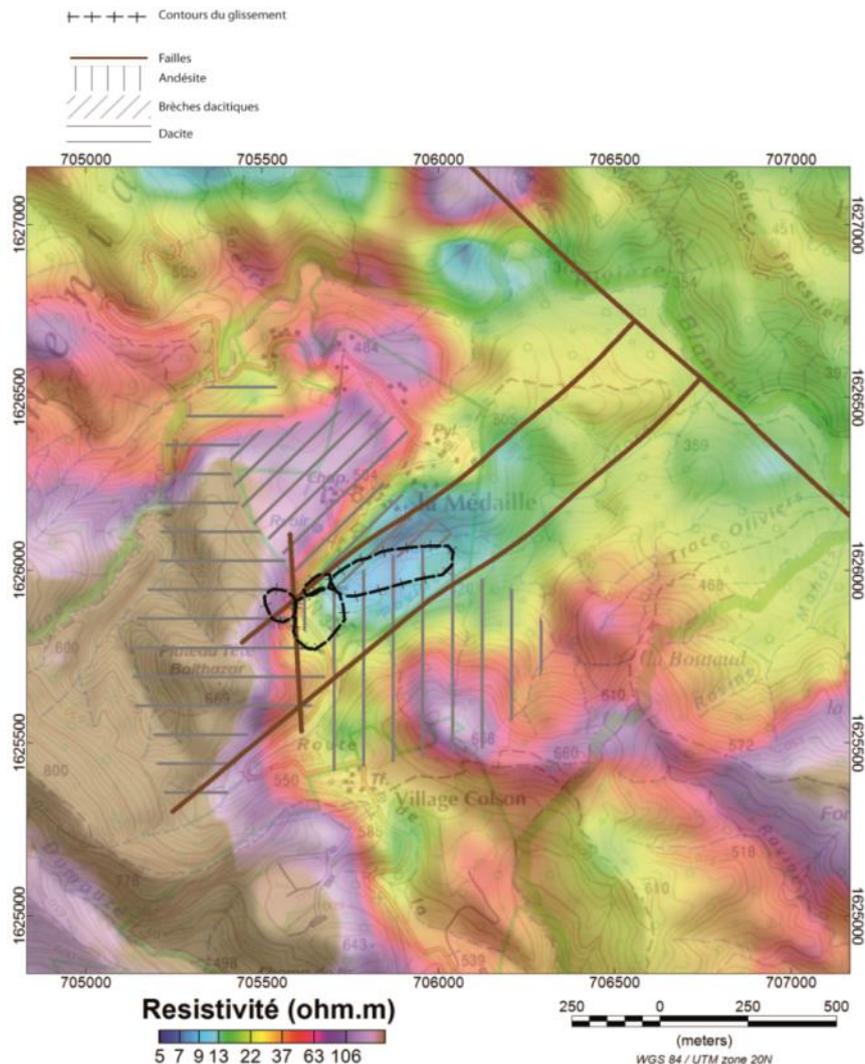


Illustration 6- Grille de résistivité entre 38 et 47 m de profondeur sur laquelle sont reportés le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques.

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

3.2. INTERPRETATIONS

3.2.1. Sondages et coupes

Dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS), une vingtaine de forage possèdent une coupe géologique à proximité (Illustrations 7 et 8). La plupart sont carottés, notamment ceux issus des campagnes de 1967, 1968 et 1981. La description géologique des logs de sondages peut être considérée comme fiable, malgré des difficultés pour différencier certaines épaisseurs de formations. Par ailleurs, après vérification, l'altitude indiquée à l'époque correspond plus ou moins à l'altitude actuelle (+/- 5 m).

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

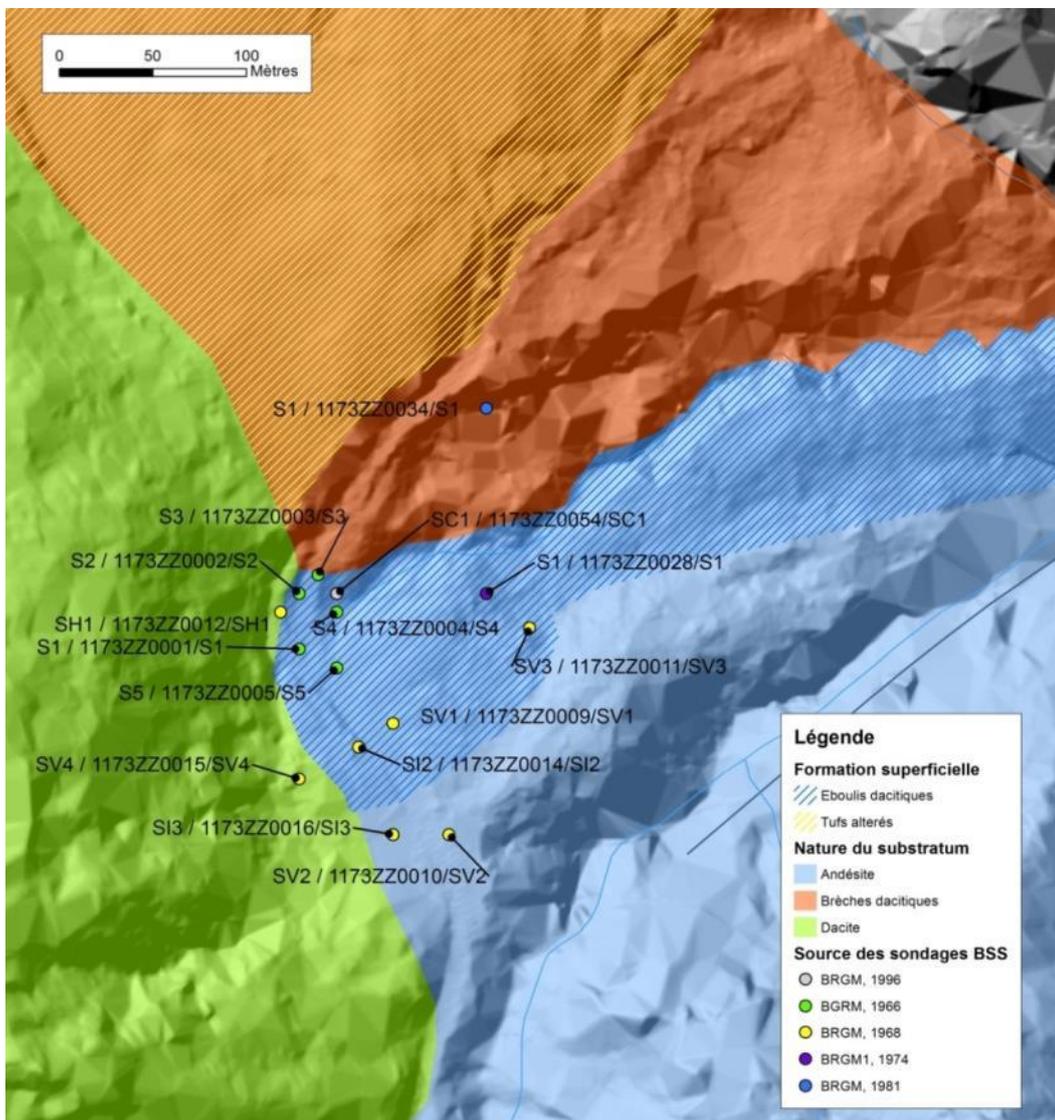


Illustration 7- Sondages disponibles dans la BSS.

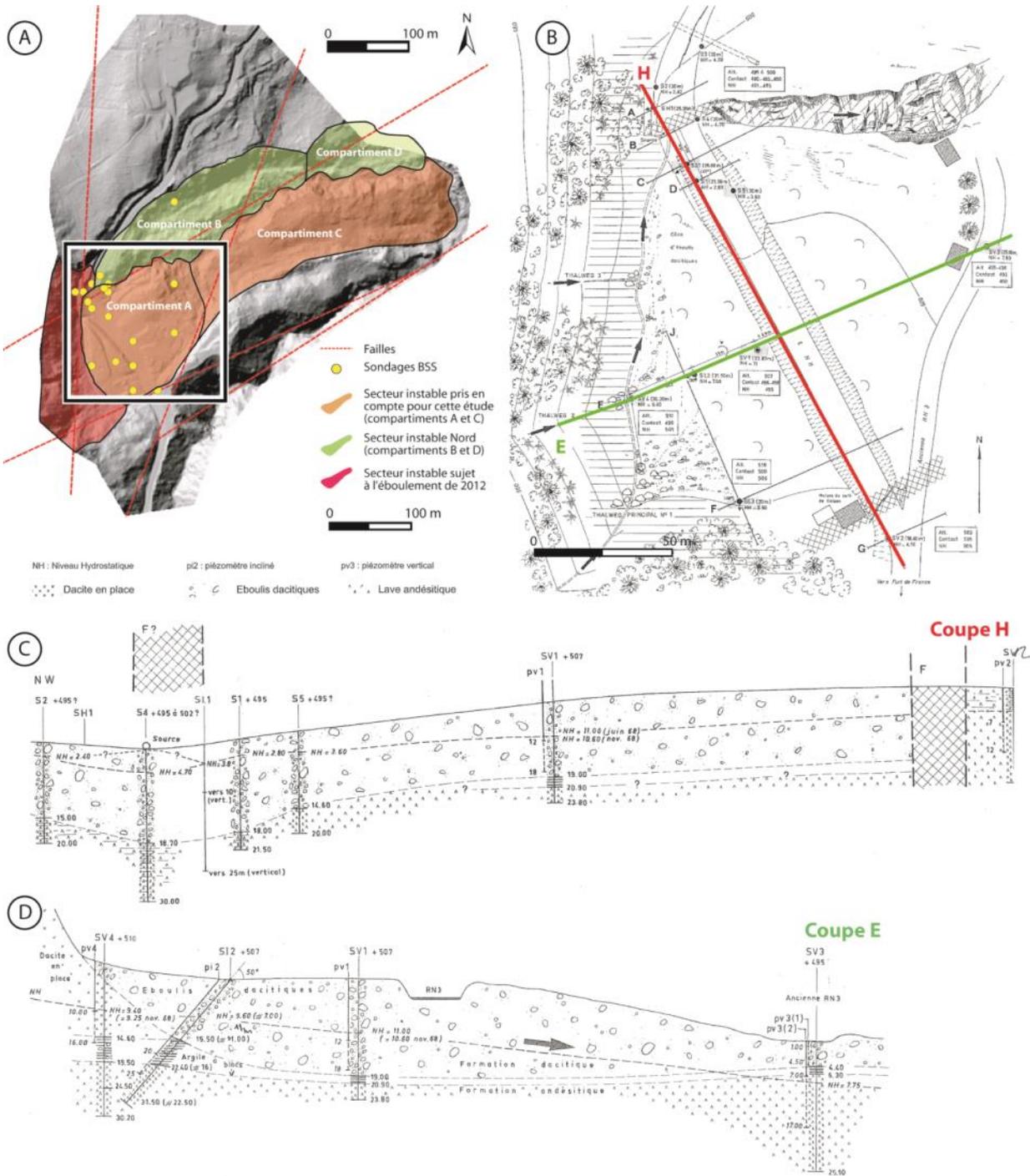


Illustration 8- Exemples de coupes interprétatives de la partie amont du glissement de la Médaille (d'après Deneufbourg, 1968). A – Présentation du glissement et des compartiments instables (le relief est dérivé du MNT Lidar 2013 à un pas de 1 m). B – Situation des coupes d'après Deneufbourg (1968). C - Coupe H transversale au compartiment A. D – Coupe E longitudinale au compartiment A.

3.2.2. Corrélation entre les résultats de l'EM hélicoptère et les sondages

Afin de comparer les résultats de l'EM hélicoptère aux données géologiques (forages, failles), différentes coupes, cohérentes avec la localisation des points de mesure, ont été tracées dans un cube de résistivité 3D. Une première description des coupes a été réalisée dans le rapport

de la phase 1 (Reninger *et al.*, 2014). Il n'est repris ici qu'un profil (en rouge sur l'illustration 9) afin de mettre en évidence les formations en jeu.

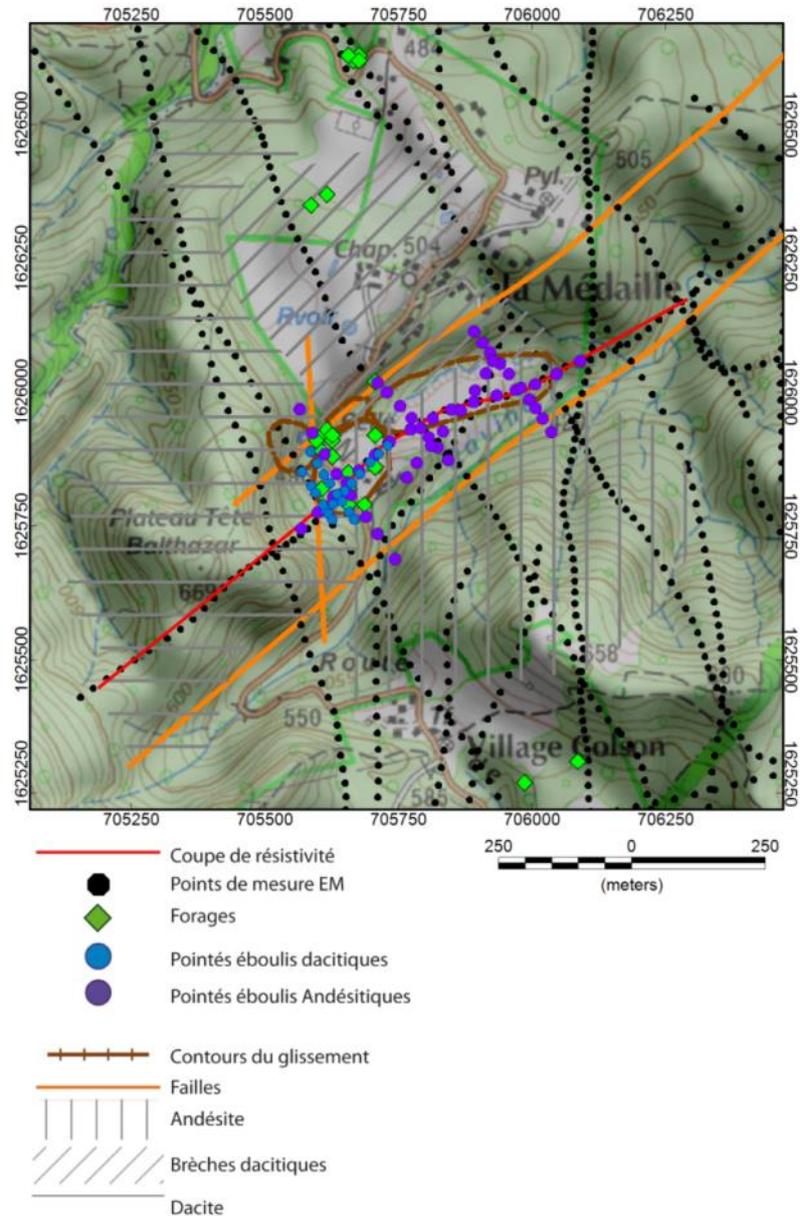


Illustration 9- Localisation des points de mesure (en noir) et d'une coupe, en rouge, tracée au niveau du glissement de la Médaille. La localisation des points d'observation sur les coupes EM sélectionnées, le contour du glissement de terrain, les failles documentées et les contours géologiques sont également reportés.

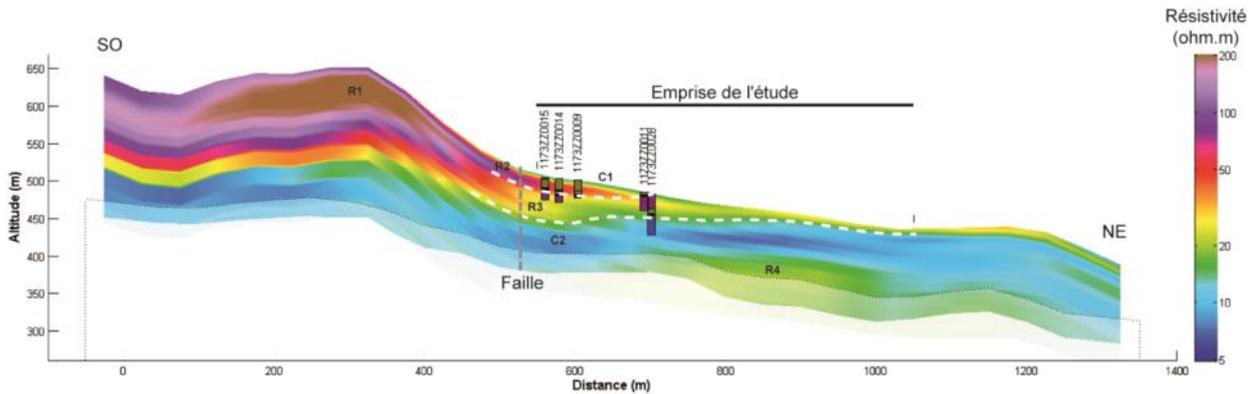


Illustration 10– Coupe de résistivité 1 (cf. Illustration 9). Les forages à proximité ont été projetés.

L'illustration 10 présente le profil retenu (en rouge sur l'illustration 9) sur lequel sont projetés les différents forages recoupés. Six formations principales semblent finalement ressortir (Illustration 10) :

- (R1), épaisse couche résistante correspond au morne dacitique (en amont du glissement) ;
- (C1) en surface, fine couche conductrice pouvant correspondre à un niveau supérieur plutôt argileux plus ou moins épais (de 1 à 3 m, Deneufbourg, 1968) ;
- (R2) couche résistante sub-affleurante assimilée aux formations détritiques d'éboulis dacitiques, l'épaisseur varie de 4-5 m à une 20^{aine} de mètres. Cette couche correspond aux formations dacitiques mises en évidence par Deneufbourg en 1967 et 1968 ; Illustration 11) ;
- (R3), couche d'une épaisseur de 20 à 30 mètres, légèrement plus conductrice et sous-jacente à (R2), qui correspondrait aux andésites tantôt décrites comme éboulis, tantôt décrites comme brèches, dans les forages ;
- (C2) une couche conductrice épaisse qui serait recoupée par 1173ZZ0028 à environ 30 mètres de profondeur et correspondrait à de l'andésite fortement altérée au niveau de la première passe et « plus saine » au niveau de la seconde. Cette couche serait séparée de (R3) par un horizon argileux plus ou moins épais (de 2 à 5 m) peu identifiable sur la coupe EM, car d'épaisseur inférieure aux limites de résolution de la méthode à cette profondeur. Sa conductivité relativement importante ne peut être expliquée qu'avec ces seules données : l'altération, une minéralisation particulière ou la saturation en eau (plutôt minéralisée) pouvant par exemple en être la raison ;
- (R4), formation plus résistante présente en profondeur. En l'absence de données, il est difficile d'en donner une interprétation. Cependant, d'après le contexte géologique, il s'agirait probablement d'andésite. La faille semble impacter directement la géométrie des différentes formations : (R3) apparaît plus épais à l'aplomb de celle-ci tandis que (C2) et (R4) s'approfondissent.

Cet enchaînement de trois couches successives (R2 ; R3 ; C2) au niveau du glissement, identifiées suite à la comparaison des résultats EM aux différents forages documentés et séparant clairement l'andésite en deux couches distinctes, est peu mis en évidence voire

absent des travaux précédents et remet en cause l'explication d'un glissement présent essentiellement grâce à un horizon argileux sous (R2). Il apparaît alors que le glissement possède deux corps superposés (d'environ 20 et 30 mètres d'épaisseurs respectivement) qui pourraient fonctionner plus ou moins indépendamment.

Ainsi, l'imagerie EM hélicoptère a permis de mettre en évidence :

- Six contrastes lithologiques dont la dacite et l'andésite qui 'arment' le relief ;
- Un horizon particulièrement conducteur (C2) au sein de la formation andésitique, dont l'emprise est cohérente avec celle du glissement et qui pourrait caractériser sa base ;
- Deux corps superposés correspondant au glissement de la Médaille. Cette thèse de deux corps superposés (R2 et R3) étayerait les conclusions d'Humbert (1986) sur une mise en place du glissement de la Médaille en quatre étapes (Illustration 12) avec (i) une phase de mise en place d'éboulis dacitiques sur de l'andésite détritique, (ii) une première phase de glissement, (iii) une deuxième phase de glissement (i.e. glissement de 1916), (iv) une phase de sapement de berge provoquant des déstabilisations permanentes des matériaux d'aval en amont (effet domino) sous forme de compartiment et correspondant à la phase de glissement actuelle. L'apport d'éboulis dacitiques est toujours d'actualité notamment sous la forme de glissement superficiel comme en 2012.

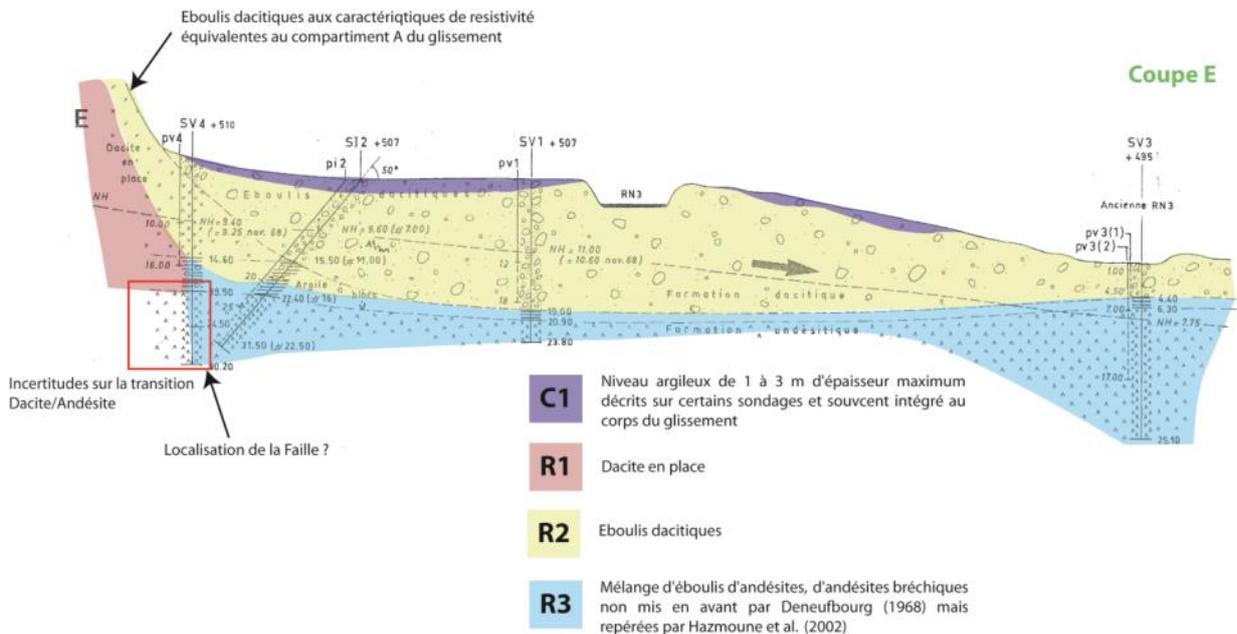


Illustration 11 – Corrélation des formations interprétées grâce aux images de l'EM hélicoptère avec les interprétations de Deneufbourg (1968). La coupe est localisée dans l'illustration 8.

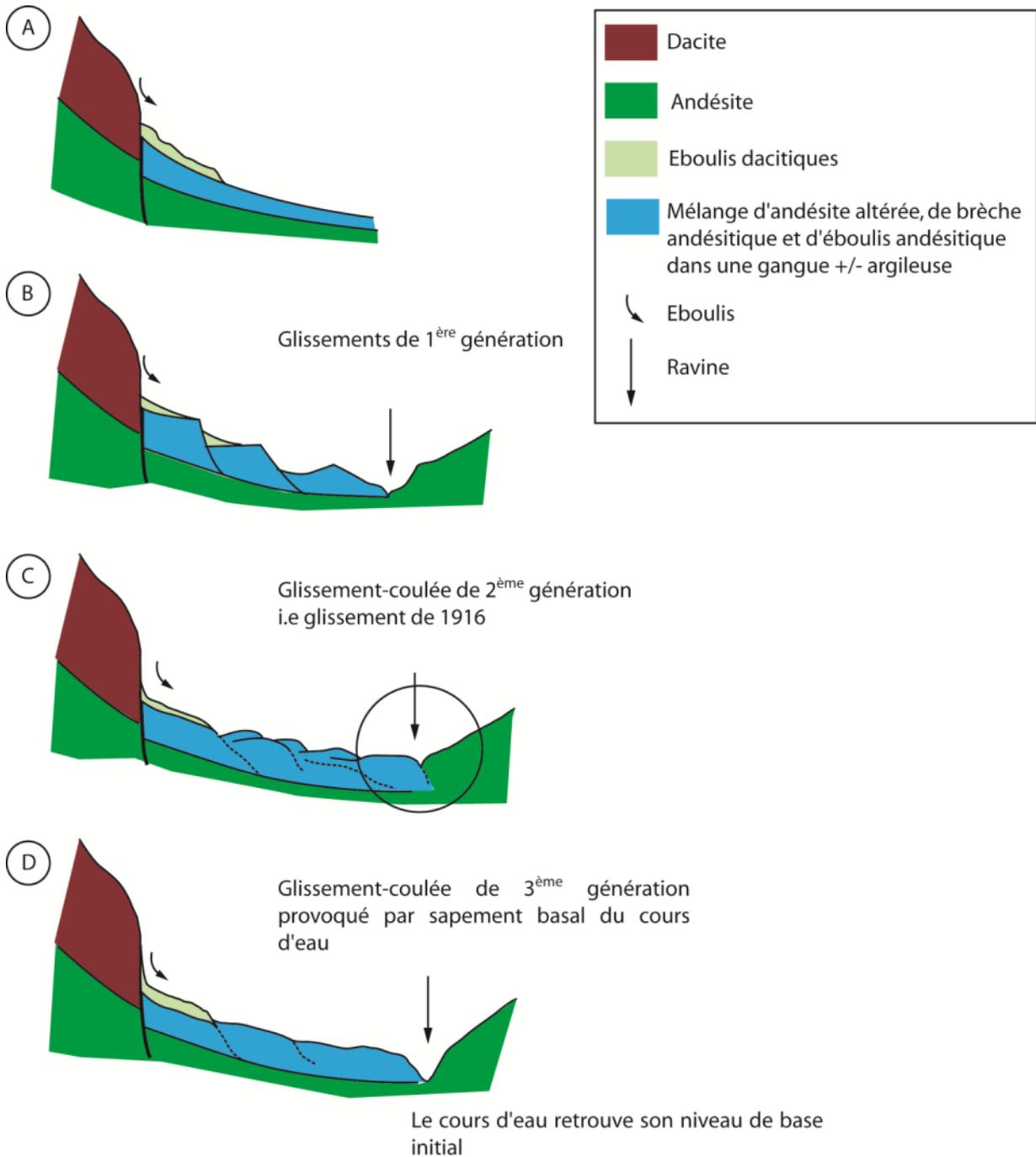


Illustration 12– Evolution schématique du glissement de la Médaille (modifié d'Humbert, 1986). La phase D correspond à la phase actuelle du glissement de la Médaille.

3.2.3. Modèle conceptuel du glissement de la Médaille

En tenant compte des travaux précédents (Deneufbourg, 1966, 1967, 1968 ; Humbert, 1986 ; Hazmoune *et al.*, 2002 et Chargueron *et al.*, 2004, et des résultats de l'EM hélicoptère, un modèle conceptuel a été réalisé. Il doit (i) permettre de mieux appréhender le fonctionnement du glissement et les formations en jeux et (ii) aider à la création du modèle géotechnique.

Ainsi, une comparaison entre la topographie du glissement, les épaisseurs de formations identifiées et les descriptions des études antérieures a été entreprise. Les hypothèses suivantes sont focalisées sur l'emprise du glissement représentée sur l'illustration 13.

- Le glissement de la Médaille fonctionne par compartiments plus ou moins dépendants avec un compartiment amont (compartiment A) à la direction générale SW/NE différente et des vitesses inférieures à celles du glissement aval (compartiment C, direction générale WSW/ENE) ;
- Le compartiment A (ou compartiment amont appelé également CA), de 150 m de long environ, correspond plus ou moins à l'emprise de (R2) ;
- CA est séparé du compartiment C (appelé également CC) (en aval) par une rupture de pente nette correspondant à l'amincissement puis à la disparition de la couche d'éboulis dacitique (R2) ; cette dernière passant d'une vingtaine de mètres à deux mètres sur une longueur assez courte (une dizaine de mètres) (Illustration 13). Cette rupture de pente correspondrait à la cicatrice d'arrachement de CC ;
- CC est composé essentiellement par la couche (R3), il est déstabilisé par le sapement basal du cours d'eau (rupture de butée), le glissement se réalisant le long du contact R3/C2 représentée par la couche très argileuse observée à une 30^{aine} de mètres sous la topographie (Hazmoune *et al.*, 2002) ;
- Cette déstabilisation de CC entraîne à son tour CA vers l'aval par une autre rupture de butée. Cette déstabilisation est favorisée par le fait qu'une nappe d'eau permanente se situe dans ce compartiment, nappe d'eau alimentée par une source en amont.

Enfin, il reste deux questions quant au fonctionnement réel du glissement :

- Pour le compartiment A : glisse-t-il sur l'épaisseur d'argile située entre 15 et 20 mètres sous la surface (matérialisée par la ligne en pointillée jaune dans l'illustration 13), au contact des éboulis andésitiques ? Ou l'emprise du compartiment est-elle plus profonde, ce dernier glissant alors sur la même surface de glissement que le compartiment C ?
- Quels sont les seuils de précipitations (cumul, intensité) réels qui font que les matériaux sont déstabilisés ? Malgré un relevé des précipitations depuis 1969 (relevés quotidiens) et des essais pour suivre la piézométrie de manière régulière (notamment entre 2001 et 2003), il n'a pas été possible de corrélérer les niveaux de nappes, les précipitations et leurs intensités avec les vitesses et les relevés d'instabilités. Il faudrait des chroniques plus complètes pour affiner cet axe de recherche (Hazmoune *et al.*, 2002).

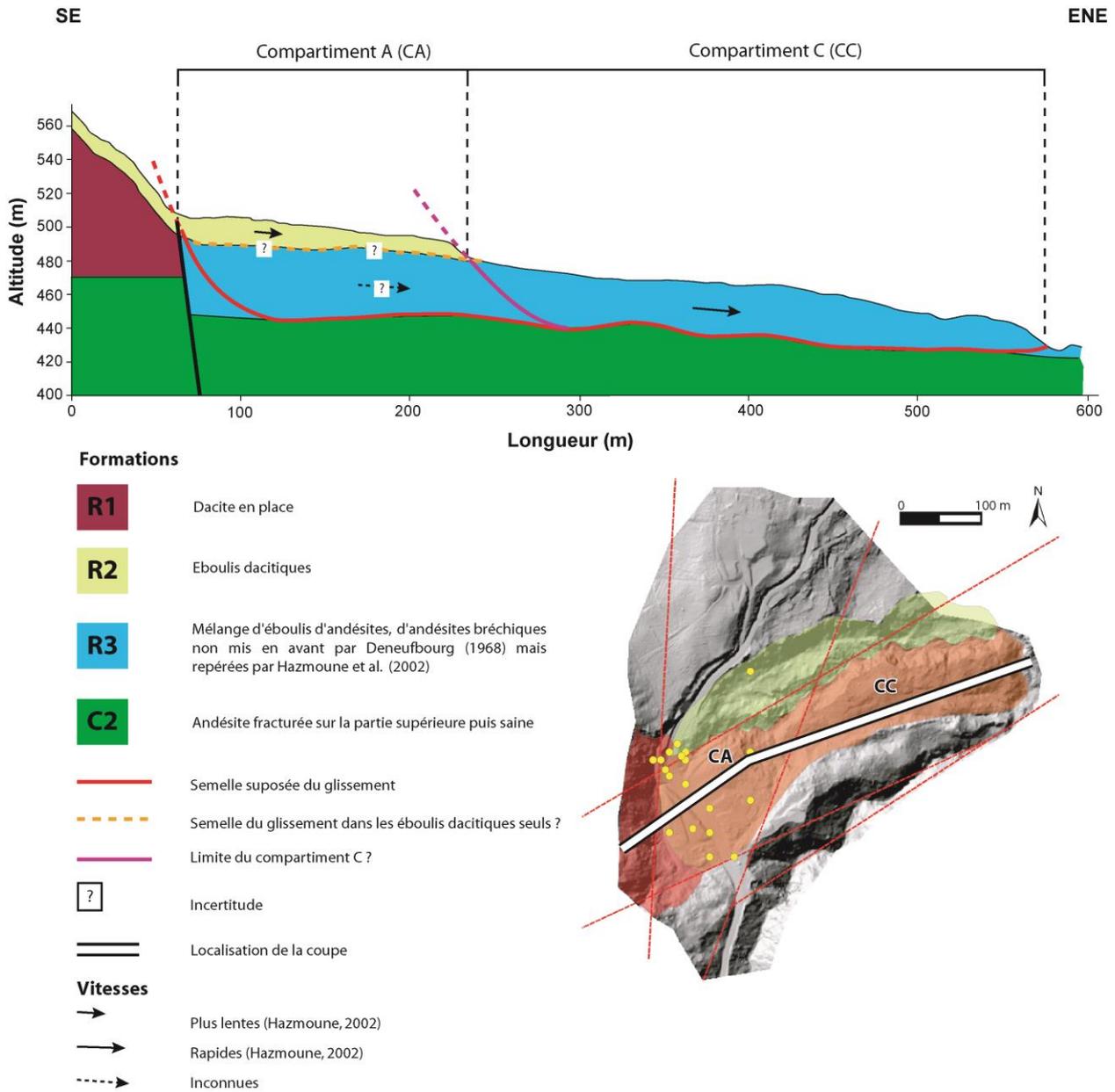


Illustration 13– *Interprétation géomorphologique des compartiments A et C du glissement de terrain de la Médaille suite à l'analyse des images EM hélicoptères et la mise en cohérence avec les sondages et interprétations antérieures.*

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 (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 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).

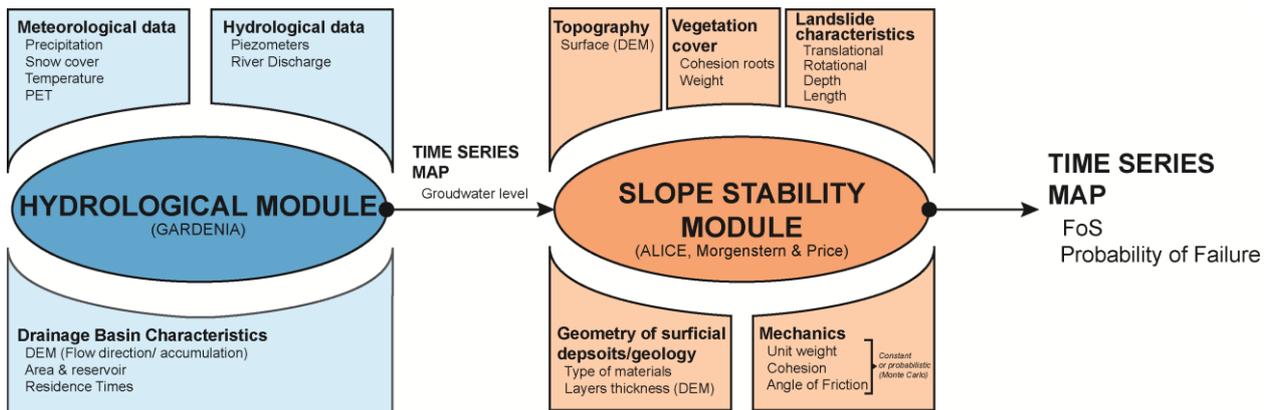


Illustration 14– Schématisation du principe de fonctionnement d'ALICE® couplé au module hydrologique GARDENIA®. Dans cette étude seul est utilisé le module ALICE® calculant des probabilités de rupture selon une nappe d'eau empirique.

Le modèle peut-être couplé avec un modèle hydrogéologique de type GARDENIA®. 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 le SDRMvt 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 jeu et instables.

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

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 hélicoptère.

4.2. VARIABLES UTILISEES

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

4.2.1. Le(s) MNT(s)

Trois types de modèles numériques de terrain (MNT) sont disponibles (Illustration 15) :

- 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 Fort de France (MNT Litto3D) ;
- Un MNT Lidar levé en 2013, au pas de 1 m, et centré sur le site de la Médaille.

La BDAlti® et le MNT Litto3D n'ont pas été utilisés pour cette étude.

- 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 (Reinger *et al.*, 2014). La BDAlti® élaborée à partir de carte IGN au 1 : 25 000^{ème} vectorisée n'a pas cette précision.
- Concernant le MNT Litto3D, malgré une résolution (en planimétrie et en altimétrie) supérieure à la BDAlti®, des artefacts sur certains versants ont été observés. Il a été décidé, pour cette étude, de ne pas l'utiliser afin de ne pas créer de perturbations pour le modèle géotechnique. Une réflexion pour supprimer ces artefacts sera engagée en année 2 de la phase 2 du projet.

Ainsi, pour cette étude, seul le MNT Lidar 2013, centré sur le site de la Médaille est utilisé.

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, des sondages antécédents et des conclusions de la phase 1 du projet, plusieurs couches, représentant les différents faciès interprétés, ont été construites.

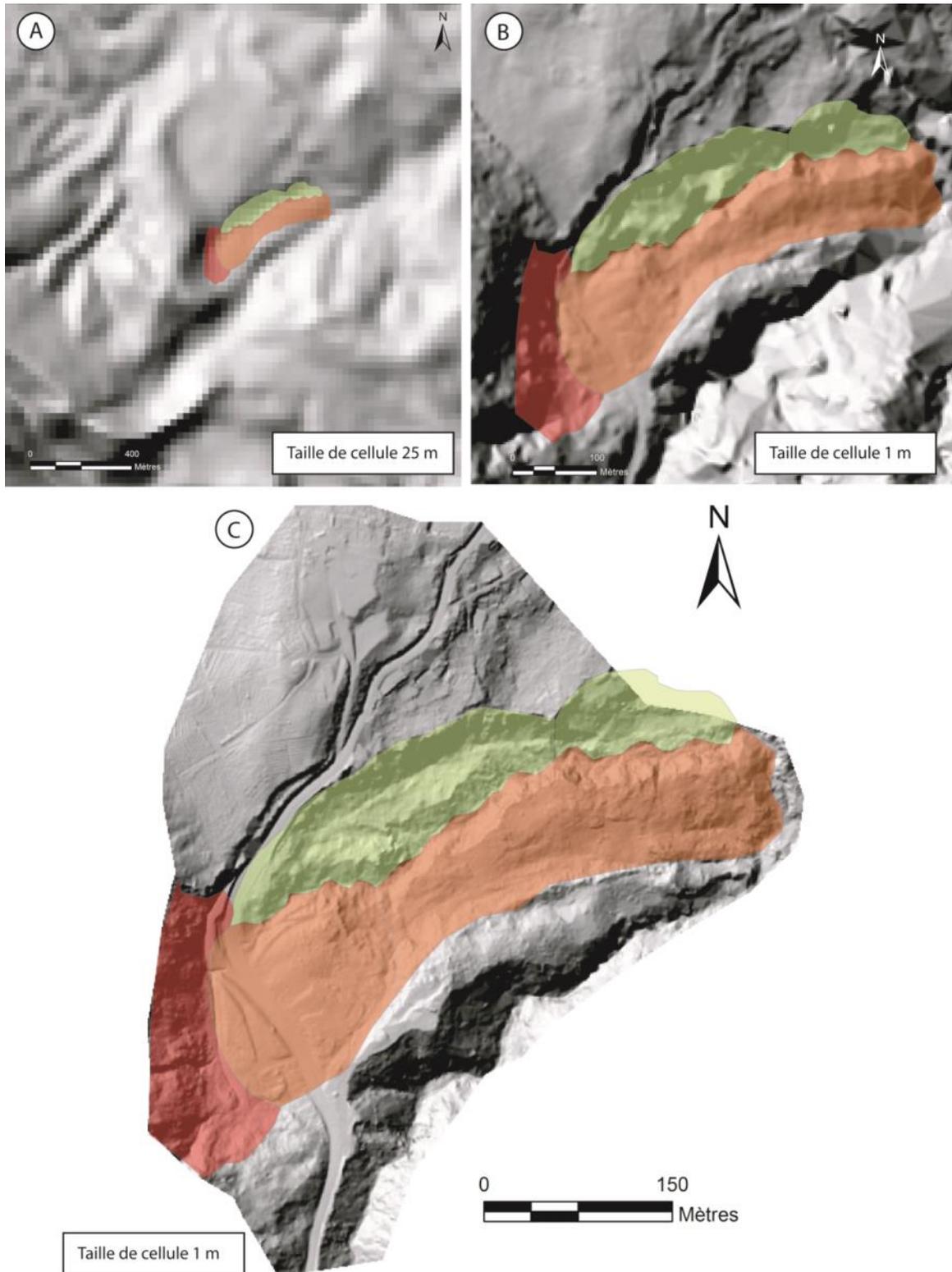


Illustration 15 – Exemples des 3 MNT disponibles pour l'étude. A - BD Alti@. B - MNT 2010 (Litto3D). C - MNT Lidar 2013. Les MNT sont représentés sous forme de reliefs ombragés. Les compartiments instables sont superposés au relief.

Chacune d'elle a été construite 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 hélicopté (la localisation des différents points est donnée sur l'illustration 9) et (ii) des épaisseurs de formation calculées grâce aux sondages de la BSS. Les couches ont été calées à partir du MNT Lidar de 2013. Quatre couches ont été définies (Illustrations 16 et 17) :

- Une première couche correspondant aux éboulis dacitiques (R2). Ces éboulis se retrouvent (i) en amont du glissement sur la partie aux pentes raides et (ii) sur le compartiment A du glissement. Cette couche est visible sur les coupes issues de l'EM hélicopté et est largement décrite dans les différents rapports sur le site de la Médaille entre 1966 et 2003. L'épaisseur varie de quelques mètres à une quinzaine de mètres en amont du glissement. Sur le compartiment A du glissement l'épaisseur varie de +/- 20 mètres à 2 mètres.
- Une deuxième couche correspondant aux éboulis andésitiques (R3). Cette couche est présente sur toute la surface du glissement. Comme pour (R2) celle-ci est visible sur les coupes issues de l'EM hélicopté, son épaisseur est mal contrainte par les forages (seul le sondage 1173ZZ0028 la décrirait entièrement, avec une épaisseur comprise entre 20 et 26 mètres). La couche varie d'une 40^{aine} de mètres sous le compartiment A à quelques mètres en aval du glissement. Sa particularité est d'être sous (R2) une partie du glissement. La partie non surmontée par (R2) correspond plus ou moins au compartiment C décrit par Hazmoune *et al.* (2002) et Chargueron *et al.* (2004).
- Une troisième couche correspondant à la dacite saine (R1). Cette couche se situe sous (R2) jusqu'à la rupture de pente concave correspondant à la limite amont de la masse glissée. Elle est limitée en aval par la faille de direction Nord-Sud. Son épaisseur varie de 90 à une 20^{aine} de mètres.
- Une quatrième couche correspondant à de l'andésite altérée/fracturée à saine (C2) d'après le forage 1173ZZ0028. Cette couche limite (R1) et (R3). Elle représenterait le substratum pour le glissement et possède une épaisseur infinie pour le modèle.

La faille n'est pas prise en compte dans le modèle géotechnique.

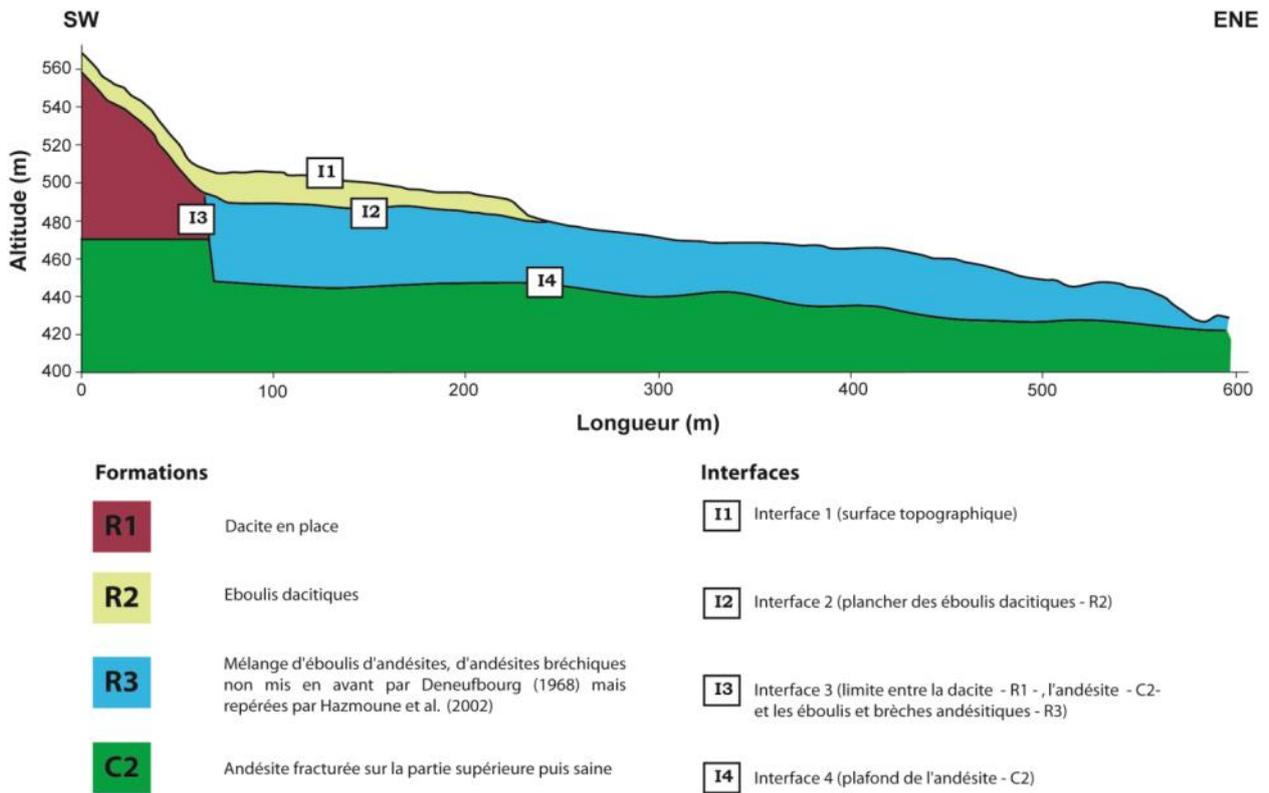


Illustration 16 – Représentation simplifiée du modèle géotechnique retenu pour ALICE®.

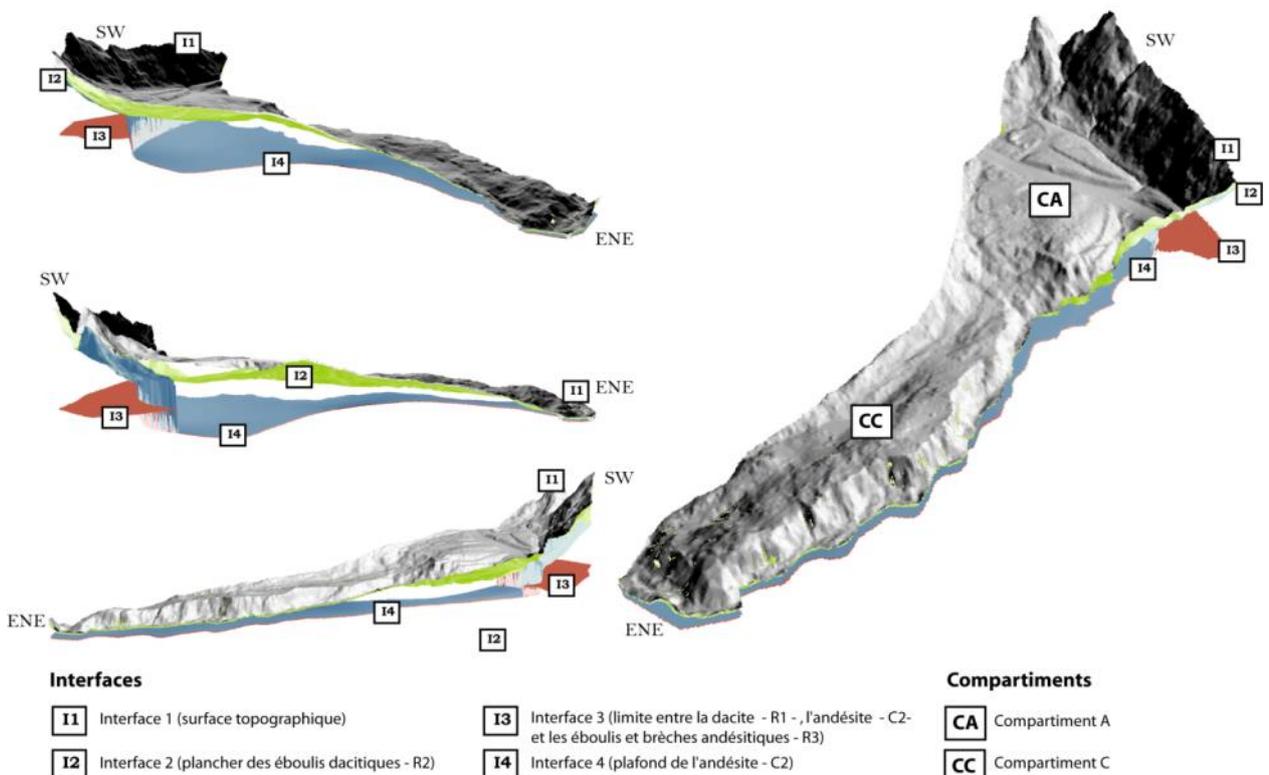


Illustration 17– Représentation 3D des interfaces introduites dans ALICE®. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013.

4.2.3. Caractéristiques géotechniques retenues

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

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

Ces paramètres sont obtenus généralement par des essais en laboratoire. En Martinique et sur le site de la Médaille, certains essais ont été réalisés notamment dans les formations dacitiques du compartiment A du glissement (Allard, 1981 ; Atlan et Besson, 1983).

L'illustration 18 synthétise les différentes caractéristiques pour les différentes formations. Une forte hétérogénéité peut-être observée au sein des dacites altérées/éboulées et des éboulis andésitiques.

Pour la dacite saine et l'andésite les caractéristiques ont été choisies selon la littérature et notre avis expert.

| | γ (kN.m^{-3}) | c (KPa) | φ (°) |
|--|---------------------------------|-----------|---------------|
| <i>Eboulis dacitiques (R2)</i> | 11-16 | 12-35 | 5-30 |
| <i>Eboulis Andésitique (R3)</i> | 8-16 | 6-40 | 10-30 |
| <i>Substratum (R1 ou C2)</i> | 30 | 40 | 40 |

Illustration 18– *Caractéristiques géotechniques pour chaque type de formation. Elles représentent les extrêmes issus des différents rapports relatifs au site de la Médaille.*

4.2.4. Hydrogéologie

Quelques études piézométriques et pluviométriques ont été menées sur le site de la Médaille. Les différents rapports mentionnent :

- Un niveau de nappe d'eau entre cinq et une quinzaine de mètres sous la surface ;
- Des chroniques de précipitations quotidiennes depuis 1969 ;
- Des tentatives de corrélation entre les intensités des précipitations, le niveau de nappe et certains paroxysmes du glissement (ANTEA, 2000). Ces tentatives ont débouché sur l'hypothèse que les intensités de précipitations sont prépondérantes pour l'activation du glissement mais sans confirmations chiffrées, faute de suivis réguliers (ANTEA, 2000 ; Hazmoune *et al.*, 2002).

Ainsi, le suivi piézométrique étant très ponctuel et les relevés pluviométriques intermittents, il n'est pas possible de modéliser le comportement de la nappe d'eau suivant les précipitations au sein des formations.

Toutefois, dans ALICE®, il est possible d'imposer un niveau d'eau en fixant une profondeur constante pour le secteur étudié. Devant le manque de chronique de précipitations, l'incertitude

des niveaux piézométriques collectés et le manque de donnée à l'exutoire, c'est cette stratégie qui a été choisie.

4.3. PROTOCOLE DE MODELISATION

Le protocole pour modéliser les probabilités de rupture est divisé en 4 étapes. Les étapes 1, 2 sont réalisées avec des variables 'constantes' qui sont :

- Une taille de glissement de 50 m, ce qui correspond plus ou moins à l'analyse morphométrique de la rupture du compartiment CC ;

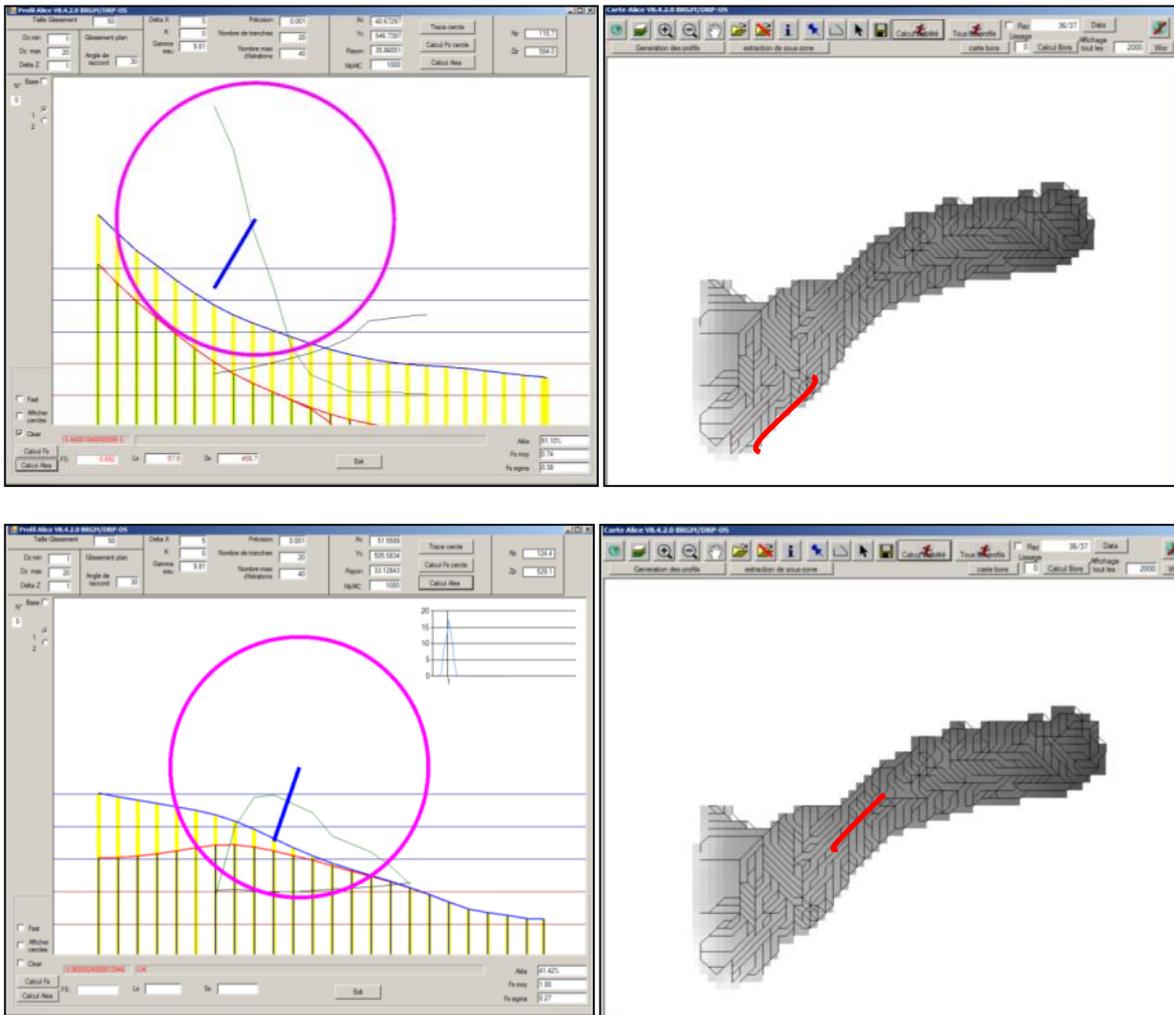


Illustration 19– Exemples de fenêtre de paramétrage des caractéristiques des ruptures par profils sous ALICE®.

- Une rupture de type rotationnel, ce qui correspond aux indices morphologiques et aux descriptions de Deneufbourg (1968) et Atlan et Besson (1983) ;
- Le taux de remplissage de la nappe d'eau est fixé à 1 (considérant alors un niveau piézométrique maximum).

L'illustration 19 montre la fenêtre ALICE® avec les caractéristiques de calage pour les constantes décrites ci-dessus.

Les étapes 3 et 4 sont réalisées avec les variables optimums validées lors des étapes 1 et 2.

Le détail des 4 étapes est décrit ci-dessous :

- Première étape : recherche des caractéristiques géotechniques des formations R2 et R3. Devant l'incertitude conditionnée par la forte amplitude des relevés (forte hétérogénéité) empêchant d'avoir des échantillons représentatifs, il a été décidé de représenter les caractéristiques géotechniques sous forme de distribution triangulaire. Les calculs sont réalisés au pas de 10 m.
- Deuxième étape : influence de la maille de calcul. Pour les modèles spatiaux (statistiques et/ou déterministes) la maille de calcul conditionne les résultats (Thiery, 2007). Ainsi, il a été décidé de réaliser des calculs pour une maille de 25 m, 10 m et 5 m avec les caractéristiques géotechniques définies lors de l'étape 1. Cette étape doit permettre de définir une maille de calcul optimum pour les glissements de terrain de type la Médaille.
- Troisième étape : influence de la nappe d'eau. Ayant une forte incertitude sur le niveau piézométrique, il a été décidé de réaliser les simulations en imposant le niveau de nappe. Le niveau d'eau choisi varie de 0 (pas de nappe → matériaux secs) à 1 (nappe d'eau maximum → matériaux complètement saturés). Quatre seuils sont définis : 0 (sec), 0.5 (modérément saturé), 0.75 (fortement saturé), 1 (complètement saturé). La nappe d'eau est introduite pour la formation R2 seule, puis pour R3 seul et enfin en tenant compte d'une nappe d'eau commune aux deux couches (R2+R3).
- Quatrième étape : scénarii pour certaine taille de rupture. Cette étape définit des exemples pour la taille de glissement de terrain à introduire pour obtenir des résultats cohérents.

Les cartes obtenues sont classées en 3 classes. Ces classes sont définies ainsi : (i) probabilité de rupture faible à modérée, (ii) probabilité de rupture modérée à forte et probabilité de rupture très forte.

Les cartes obtenues sont comparés dans un premier temps une carte 'experte' élaborée à l'aide du MNT Lidar 2013 au pas de 1 m et tenant compte des facteurs aggravants et participant à la déstabilisation du glissement (Illustration 20 ; Glenn *et al.*, 2006), soit :

- Les pentes $> 10^\circ$ (calculées sur la base du MNT Lidar 2013) ;
- La rugosité (i.e. ruptures de pente sur des distances très courtes calculées sur la base du MNT Lidar 2013) correspondant à la déstructuration de la surface selon le degré d'activité du glissement ; plus la surface est déstructurée plus le glissement est actif (Glenn *et al.*, 2006) ;
- La proximité des cours d'eau qui participent à la déstabilisation par sapement basal (rupture de butée). L'influence de ce sapement correspond approximativement à la largeur de la ravine, soit une largeur d'environ 30 m)
- La proximité d'une source d'eau.

Cette carte n'est pas à proprement parler une carte d'aléa, elle n'a pas vocation à être une référence sauf pour comparer les simulations. Cette dernière présente trois niveaux de

« probabilités de rupture » : faible à modérée, modérée à forte, très forte. Cette carte, calculée au pas de 1 m, est ré-échantillonnée par agrégation au(x) pas de 5 m, 10 m, et 25 m pour l'analyse de sensibilité de la maille de calcul.

Dans un deuxième temps, des validations 'terrains' seront réalisées afin de valider les hypothèses engendrées par les différentes simulations réalisées.

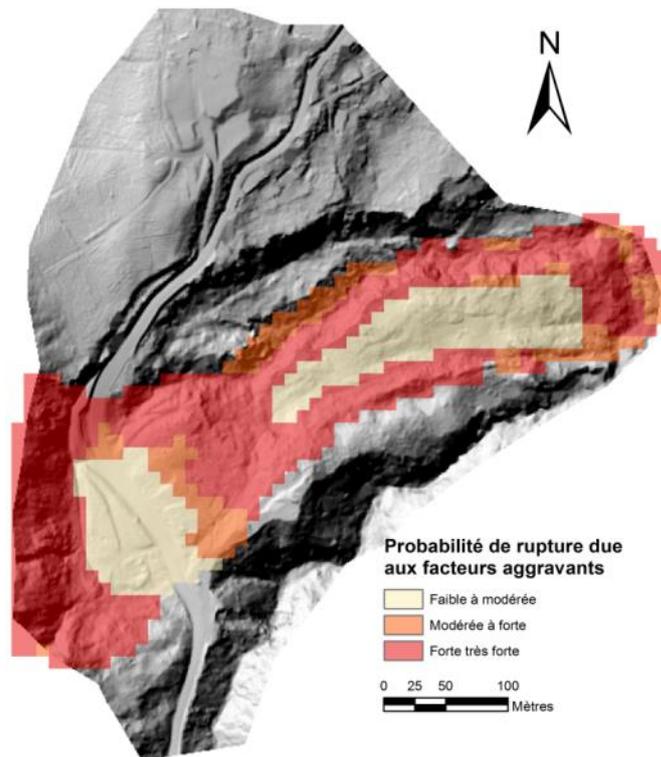


Illustration 20– Carte experte de probabilité de rupture des plus fortes au sein du glissement de la Médaille (maille de calcul de 10 m). Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013.

5. Résultats

5.1. CHOIX DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Pour les caractéristiques géotechniques, il a été choisi d'utiliser des distributions triangulaires pour les formations (R2) et (R3) (Illustration 21). Afin que les résultats soient stables en terme de probabilités 500 itérations (selon un tirage de Monte-Carlo) ont été réalisées pour chaque carte.

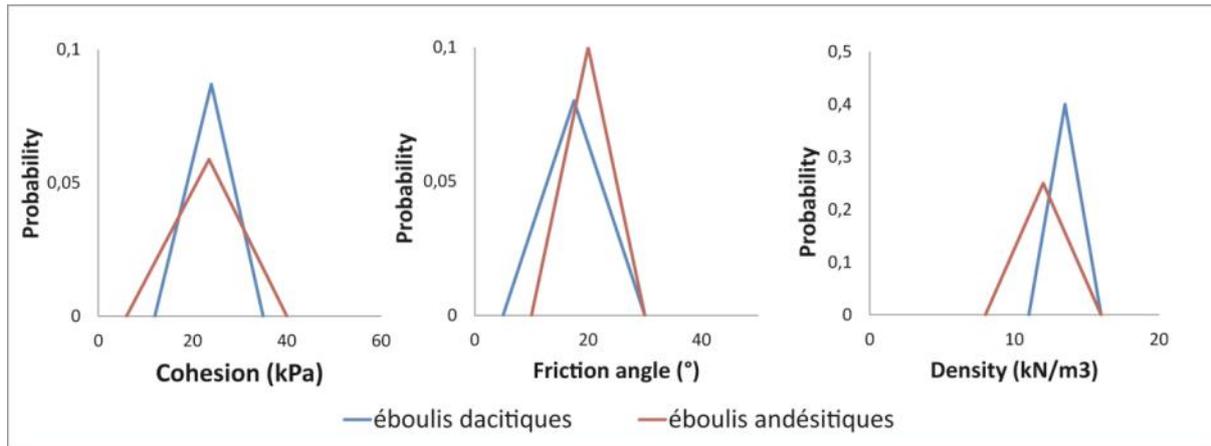


Illustration 21– Distributions des caractéristiques géotechniques retenues dans ALICE® pour R2 (éboulis dacitiques) et R3 (éboulis et brèches andésitiques).

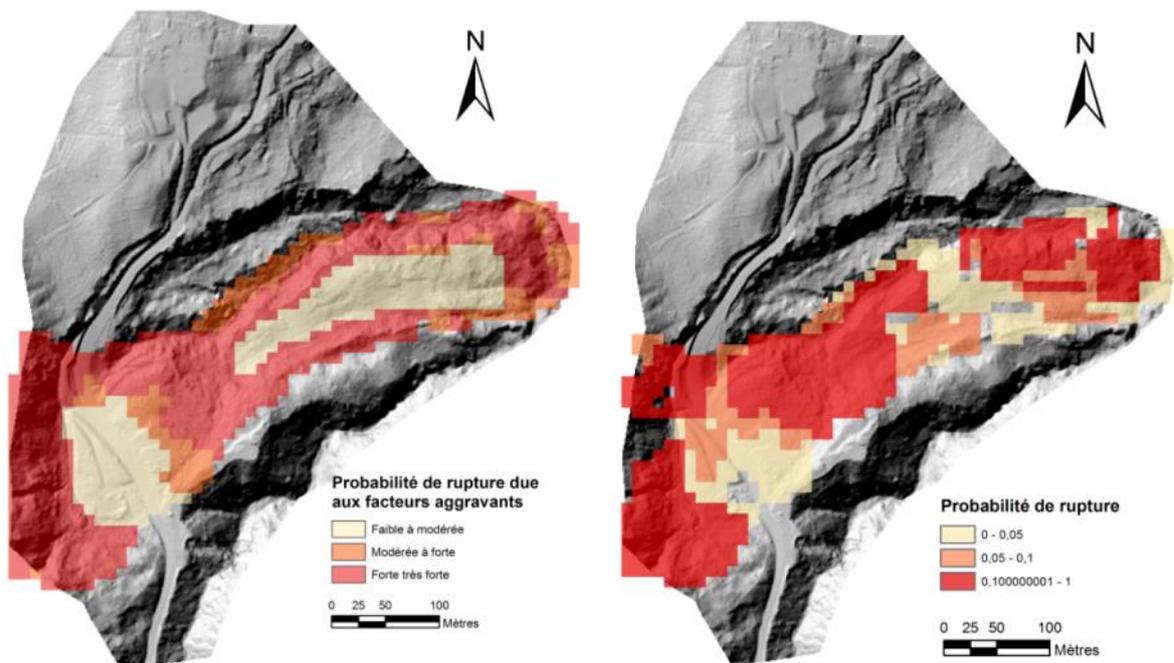


Illustration 22– Cartes des probabilités de rupture simulées sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues. A gauche la carte experte (illustration 20), à droite la carte simulée avec les constantes (i.e. taille de glissement fixée à 50 m, rupture circulaire, nappe d'eau maximum). Les calculs sont réalisés au pas de 10 m. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013.

Les résultats montrent, que par rapport à la carte expert, avec ces distributions pour R2 et R3, le code de calcul simule correctement les secteurs à forte probabilité de rupture (Illustration 22) avec 71.1% de pixels bien classés 19.5% de pixels modérément bien classés et 9.4% de pixels mal classés, et ce avec des paramètres constants de calage (taille de glissement, type de glissement, taux de remplissage de la nappe) (Illustration 23).

Ainsi, les distributions triangulaires choisies sont considérées comme étant représentatives pour le calcul du facteur de sécurité, elles sont gardées pour les étapes suivantes.

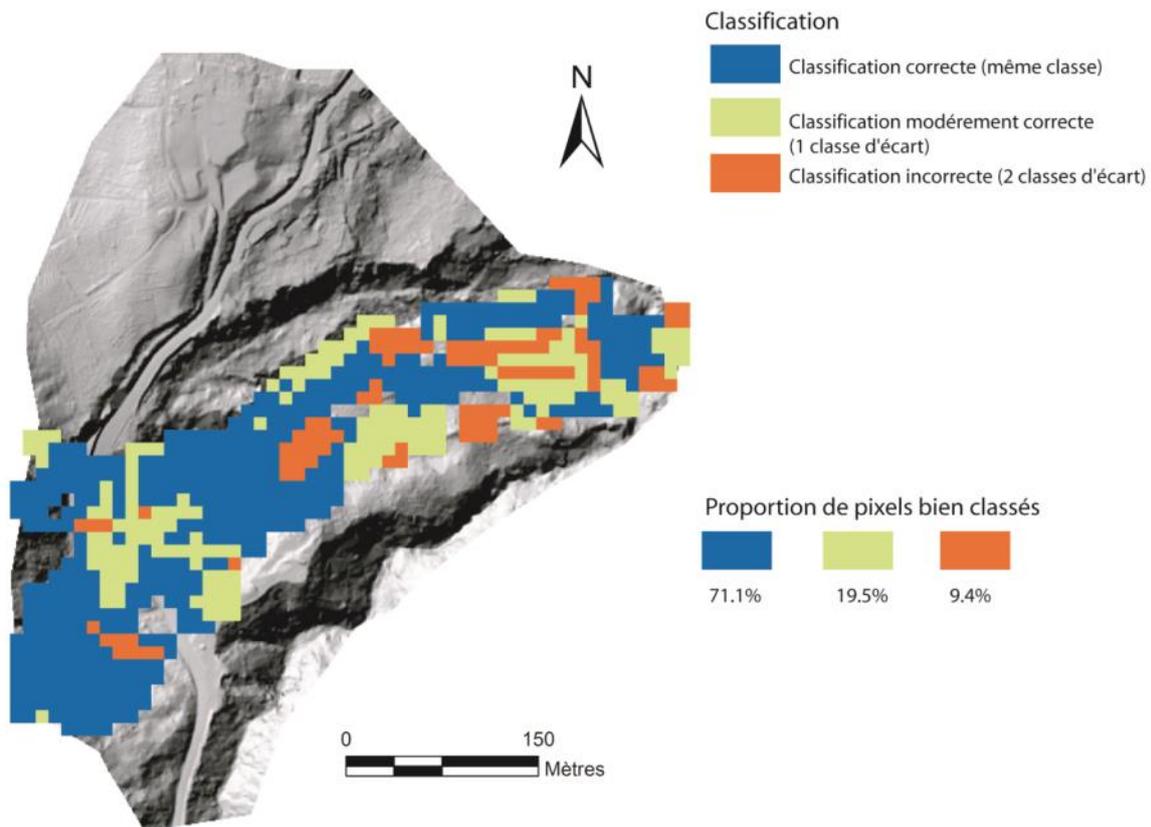


Illustration 23– Différence entre la carte expert (illustration 20) et la carte simulée sous ALICE® (illustration 22).

5.2. INFLUENCE DE LA MAILLE DE CALCUL

La taille de la maille de calcul conditionne les résultats de simulations numériques : 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 de bons résultats. En effet, les segments à partir desquels sont calculés les facteurs de sécurité sont de taille réduite, ce qui oblige à caler le modèle sur des instabilités de petite taille non représentatives des conditions réelles.

Ainsi, dans le cadre de cette étude, le MNT Lidar 2013 a été dégradé au pas de 5 m, 10 m et 25 m. Cette étude sur la maille de calcul doit permettre de choisir, selon l'échelle de travail envisagée en phase 2, la maille de calcul optimum pour des glissements de terrain du même type que la Médaille sur un secteur plus large. Afin de valider les résultats des simulations la

carte expert a également été ré-échantillonnée selon les mêmes tailles de maille de calcul (cf. § 4.3). Le même type d'étude sera réalisé en année 2 de la phase 2 pour les glissements de terrain du type Morne-Figue afin de comparer puis valider ces tests. Les illustrations 24, 25, 26, 27, 28, 29 montrent les résultats pour des glissements de 50 m avec une maille de calcul de 25 m, 10 m, 5 m.

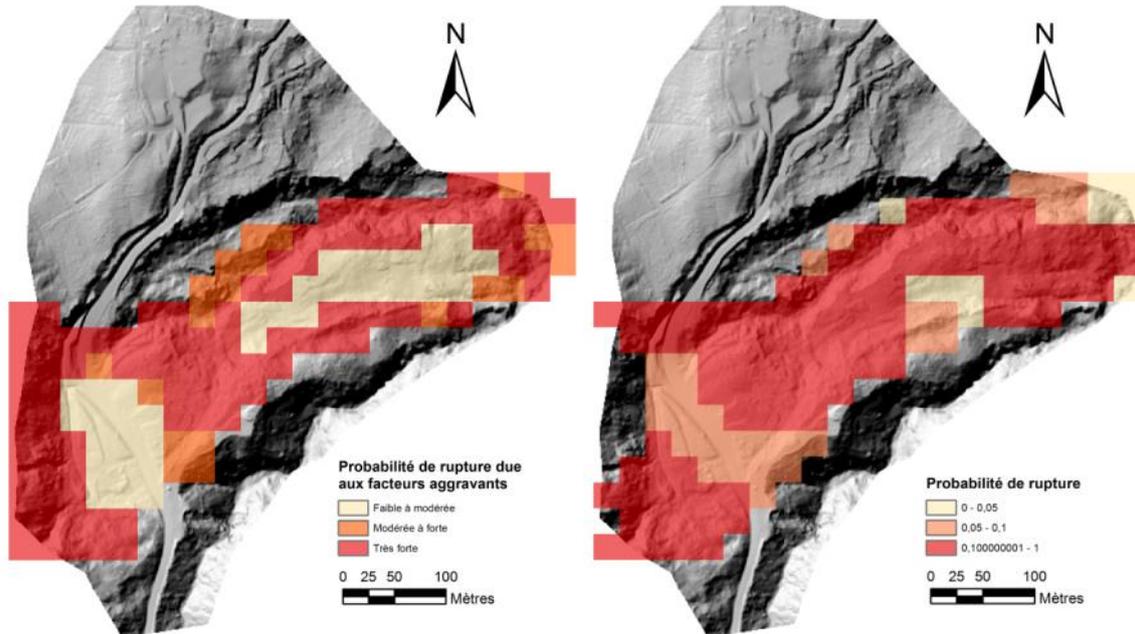


Illustration 24 – Cartes des probabilités de rupture. A gauche la carte experte, à droite la carte simulée sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues (illustration 21) et les constantes détaillées en illustration 22 (les calculs sont réalisés au pas de **25 m**. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013).

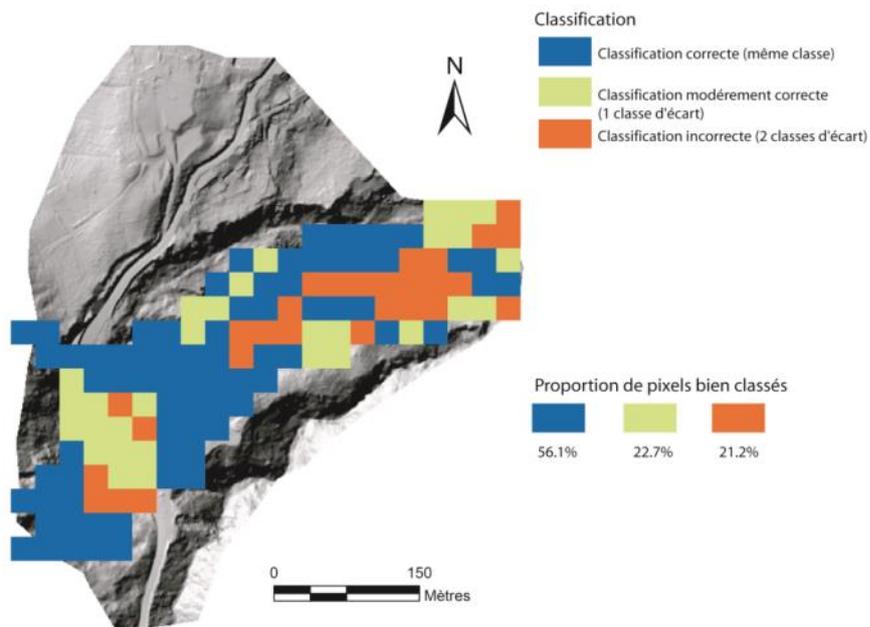


Illustration 25 – Différence entre la carte expert et la carte simulée sous ALICE® au pas de **25 m** (Illustration 24).

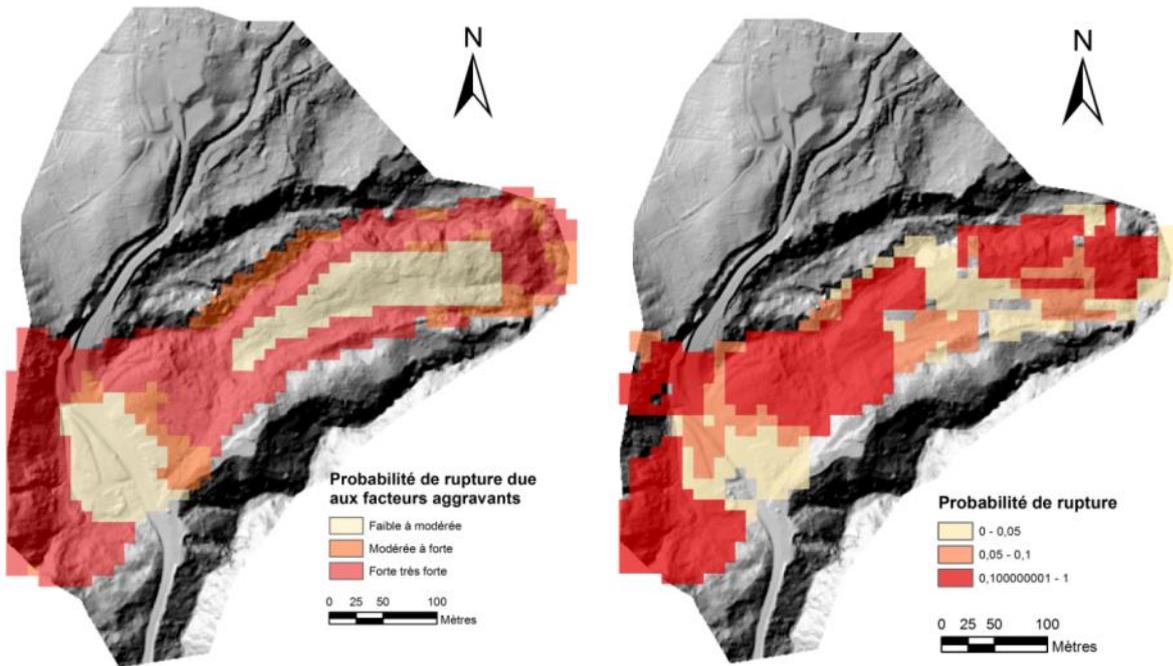


Illustration 26 – Cartes des probabilités de rupture. A gauche la carte experte (Illustration 20), à droite la carte simulée sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues (Illustration 21) et les constantes détaillées en illustration 22 (les calculs sont réalisés au pas de 10 m. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013).

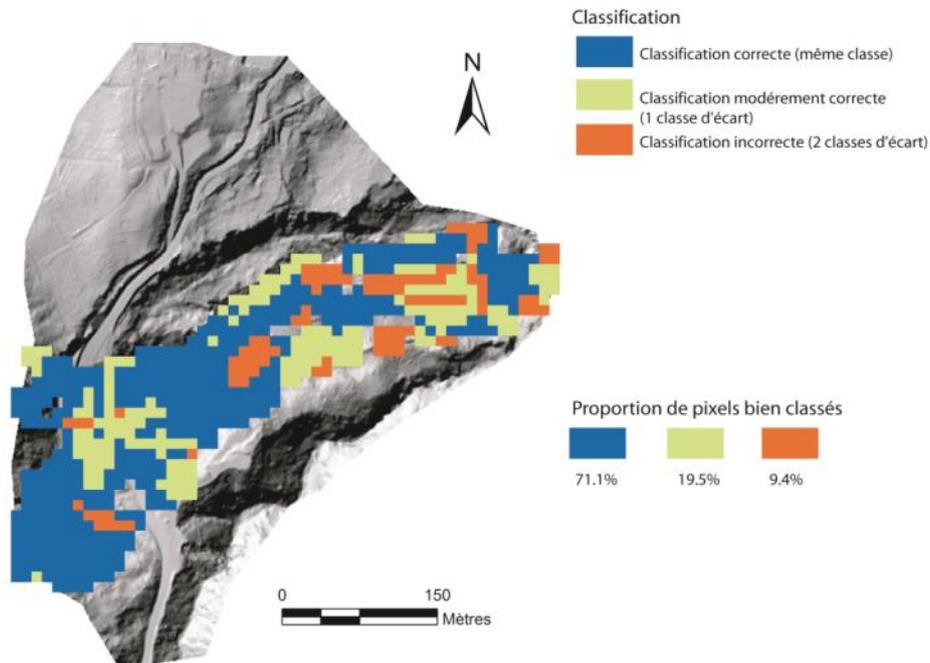


Illustration 27– Différence entre la carte expert et la carte simulée sous ALICE® au pas de 10 m (Illustration 26).

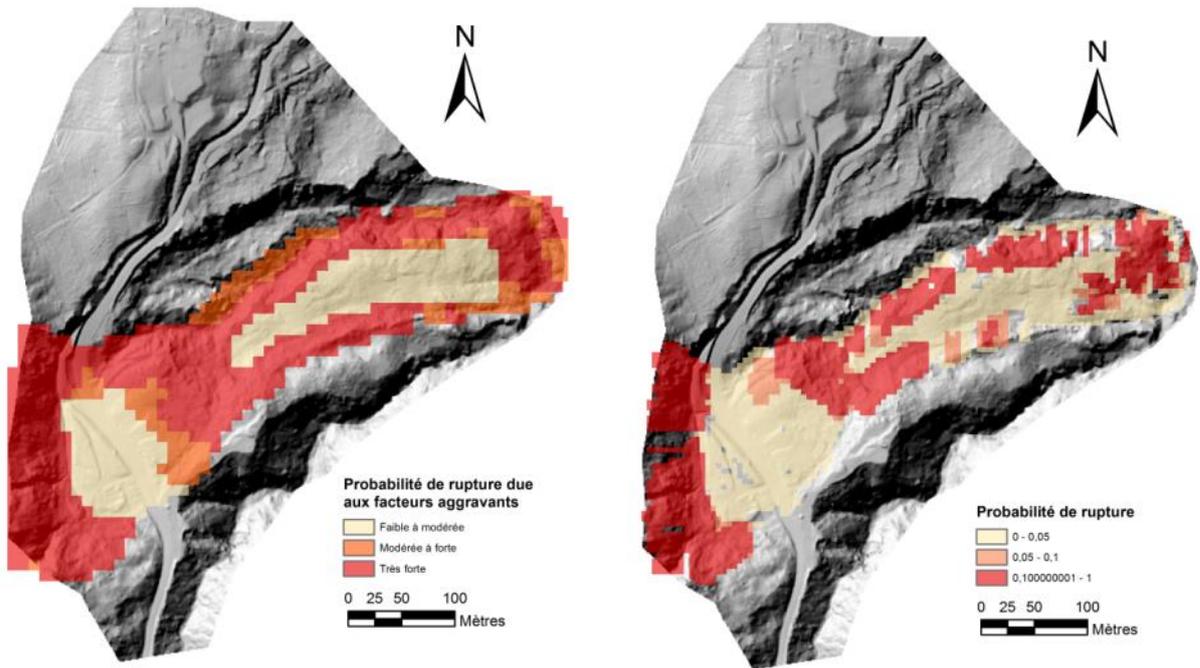


Illustration 28 – Cartes des probabilités de rupture. A gauche la carte experte (Illustration 20), à droite la carte simulée sous ALICE® en introduisant les distributions des caractéristiques géotechniques retenues (illustration 21) et les constantes détaillées en illustration 22 (les calculs sont réalisés au pas de 5 m. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013).

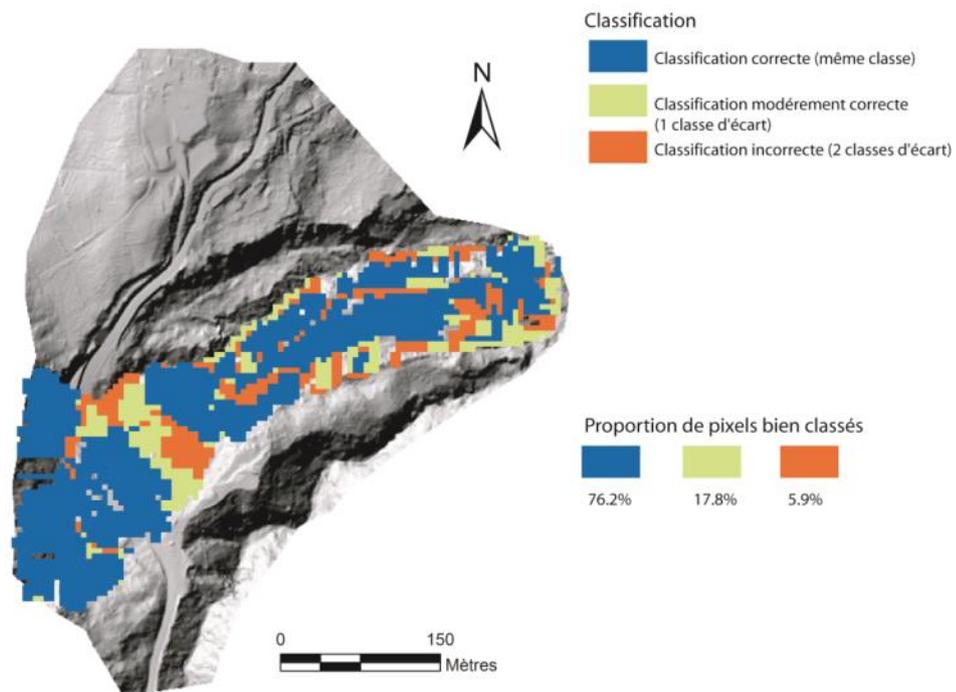


Illustration 29 – Différence entre la carte expert et la carte simulée sous ALICE® au pas de 5m (Illustration 28).

Un croisement entre les résultats sous ALICE® et la carte experte a été réalisé pour vérifier statistiquement la cohérence des simulations avec la vision experte :

- Pour la carte au pas de 25 m, 56.1% des classes simulées sont correctement classées ;
- Pour la carte au pas de 10 m, 71.9% des classes simulées sont correctement classées ;
- Pour la carte au pas de 5 m, 76.2% des classes simulées sont correctement classées.

D'un point de vue strictement statistique la carte simulée à 5 m paraît correspondre le mieux à la carte experte. Toutefois, 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). Ainsi :

- Pour la carte au pas de 25 m, le secteur amont n'est pas pris en compte ; cela est dû aux segments calculés qui n'existent pas dans cette partie, le MNT généralisant trop la pente. Le secteur proche de la route est en classe modérée car les pentes calculées à partir du MNT sont $> 5^\circ$ alors que dans la réalité elles sont plus faibles. La partie au centre du compartiment C est considérée comme ayant la plus forte probabilité de rupture. La partie aval proche du cours d'eau est en probabilité de rupture « modérée à forte » alors que nous pouvons la considérer comme très forte (sapement basal et rupture de butée).
- Pour la carte au pas de 10 m, la partie amont est bien reconnue en probabilité « très forte de rupture », l'escarpement du compartiment C ainsi que sa partie aval sont bien simulés par le code avec des probabilités très fortes.
- Pour la carte au pas de 5 m, il apparaît que si des secteurs sont bien reconnus avec des probabilités « très fortes » de rupture comme l'aval de l'escarpement du compartiment C ou les secteurs proches des cours d'eau, certains secteurs comme la limite sud du compartiment C ou l'amont de l'escarpement du compartiment C (proche de la rupture de pente) sont en probabilité « faible à modérée » alors qu'elles devraient être en « modérée à forte » (proximité de rupture de pente).

Les résultats statistiques et l'analyse experte conduisent, pour cette étude, à retenir une maille de calcul de 10 mètres. Il est à noter que de nouvelles simulations, avec d'autres paramètres (i.e. taille de rupture et maille de calcul), sont envisagées pour l'année 2 de la phase 2 afin de valider le choix de la taille de cellule selon l'échelle de travail désirée. Pour ce faire un traitement du MNT Litto3D de 2010 sera réalisé afin de corriger certains artefacts. Il sera ensuite ré-échantillonné au pas de 25 mètres, de 10 mètres et 5 mètres et appliqué sur les secteurs 'larges' de la Médaille et de Morne-Figue.

5.3. INFLUENCE DE LA NAPPE D'EAU

A partir des distributions de référence, en fixant une maille de calcul à 10 mètres et des glissements d'une taille de 50 mètres, plusieurs scénarii hydriques ont été établis pour observer le comportement du glissement de la Médaille.

Le niveau de nappe a été fixé dans les matériaux d'éboulis dacitiques seuls (R2), dans les matériaux d'éboulis et de brèches andésitiques seuls (R3), en tenant compte des deux types de matériaux ensemble (R2+R3).

Pour chaque type de matériaux choisis, cinq scénarii ont été fixés avec à chaque fois un taux de remplissage (correspondant à une profondeur de nappe constante), soit :

- 0 : conditions sèches (taux de remplissage nul) ;
- 0.5 : conditions modérément saturées (taux de remplissage de 50%) ;
- 0.75 : conditions saturées (taux de remplissage de 75%) ;
- 0.9 : conditions fortement saturées, la nappe est proche du maximum estimé (taux de remplissage de 90%) ;
- 1 : conditions très fortement saturées, c'est-à-dire que la totalité des formations sont saturées (la nappe est à son maximum, le taux de remplissage est de 100%).

L'illustration 30 montre l'influence de chaque type de matériaux (R1 ; R3 ; R2+R3) en conditions 'sèches' (0) et 'très fortement saturées' (1).

- En conditions 'sèches', le glissement de la Médaille stricto-sensu n'est pas instable. Seul les éboulis dacitiques sur les pentes très fortes ont une probabilité de rupture forte et permanente.
- En tenant compte essentiellement de R2, les ruptures potentielles en conditions 'très fortement saturées' sont mal représentées. Seul l'amont du glissement et la partie aval du compartiment A connaît une probabilité de rupture forte,
- En tenant compte essentiellement de R3, en conditions 'très fortement saturées', les secteurs de rupture potentielle sont clairement identifiés (i) en aval du compartiment C, proche de la ravine, et (ii) en amont du compartiment C.
- En tenant compte de R2+R3, en conditions 'très fortement saturées', sont identifiés 3 secteurs très instables (i) les éboulis en amont du glissement qui ont été déstabilisés en 2002, (ii) la partie en amont de la rupture de pente faisant la transition entre le compartiment A et C ainsi que la partie aval et (iii) la partie aval du glissement, proche de la ravine. Le compartiment A apparaît en classe « modérément à fortement instable ».

Cette série de simulations reflète les observations mentionnées précédemment dans les différents rapports concernant le glissement de la Médaille.

Elles montrent que le fait de tenir compte des deux types de matériaux identifiés grâce aux images EM hélicoptère apporte de nouvelles informations sur la manière dont ce type de glissement doit être analysé.

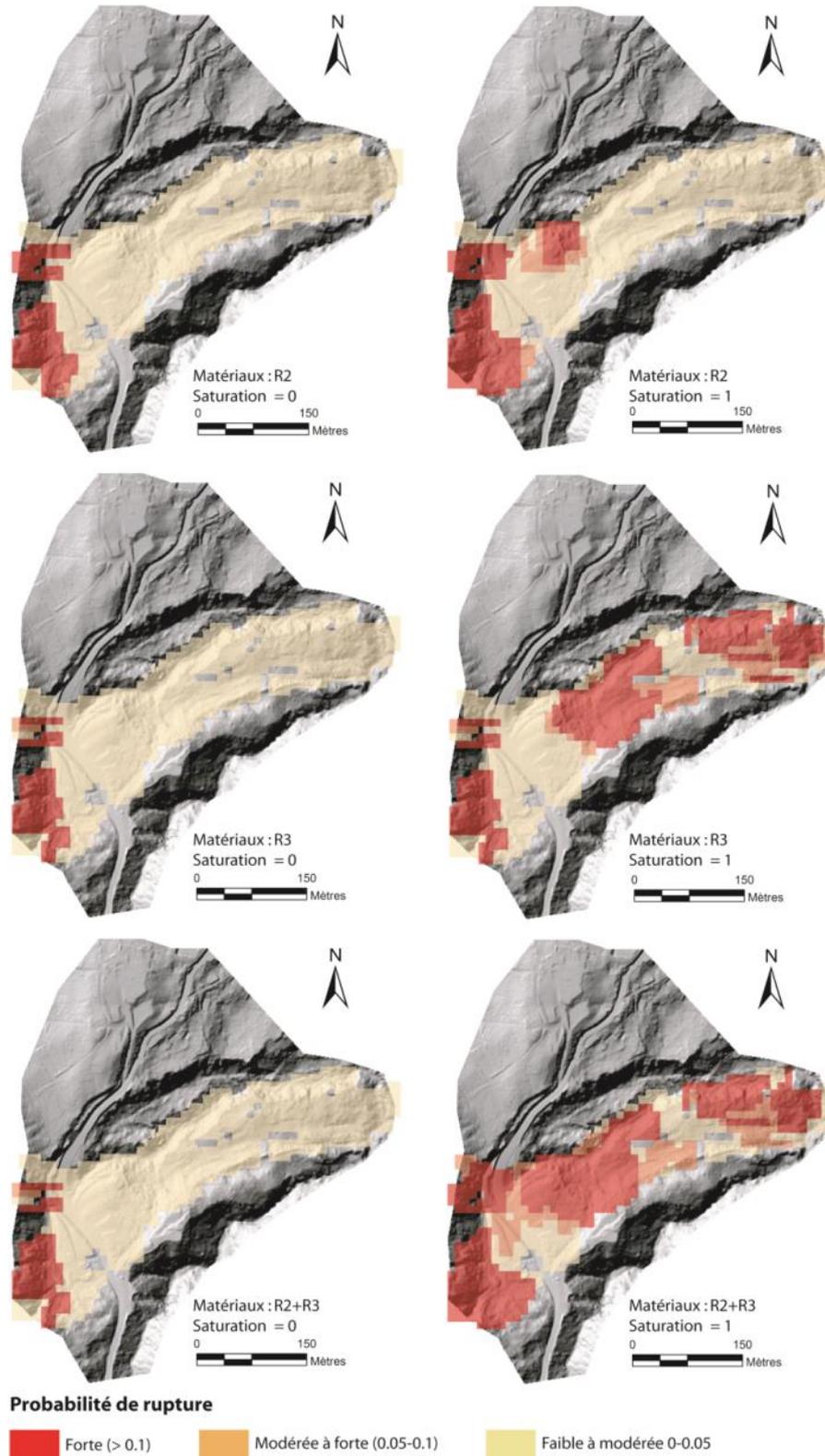


Illustration 30 – Influence de la nappe d'eau introduite dans ALICE® selon le type de matériaux. A gauche conditions « sèches » (0) ; à droite conditions « très fortement saturés »(1). Les calculs sont réalisés au pas de 10 m, la taille des glissements fixée à 50 m, les caractéristiques géotechniques sont celles présentées en illustration 20. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013.

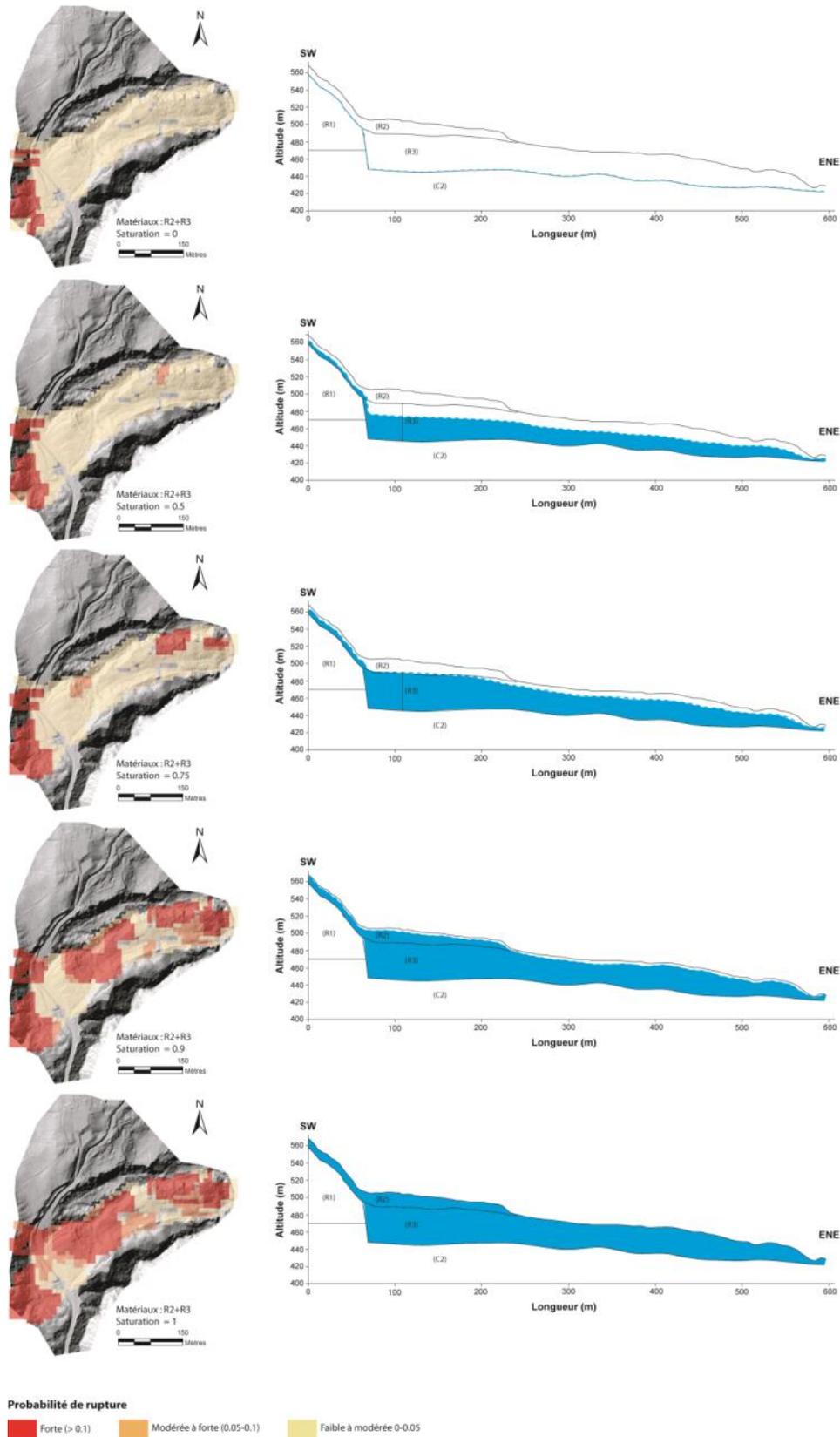


Illustration 31 – Influence du niveau de la nappe d'eau pour les simulations sous ALICE® pour les matériaux R2+R3. Les calculs sont réalisés au pas de 10 m, la taille des glissements fixées à 50 m. Le relief est dérivé du MNT Lidar 2013.

L'illustration 31 montre l'influence de la nappe d'eau lorsque cette dernière varie dans R2+ R3. Ces simulations confirment que l'eau est le moteur prépondérant dans les mécanismes participant à l'instabilité récurrente du glissement de la Médaille.

En effet en deçà d'un taux de remplissage de 0.9 (soit une forte saturation), pour R2+R3, les simulations montrent que le glissement stricto-sensu reste globalement stable. Cela confirme que les niveaux de nappe d'eau observés lors des différents sondages de 1968 et post-1968 qu'ils soient bas ou hauts (entre -10 mètres et -5 mètres, Deneufbourg, 1968), jouent peu sur l'instabilité du glissement. Ainsi, ce dernier fonctionne non seulement parce que les matériaux sont imbibés en permanence par la source amont mais également avec un apport d'eau supplémentaire extérieur comme des précipitations exceptionnelles (en quantité et en intensité), confirmant certaines conclusions antécédentes (ANTEA, 2000).

Ce type de simulation montre également que si des travaux de drainage doivent être réalisés, ces derniers devraient l'être sur la totalité du glissement et non pas essentiellement sur le compartiment A. En effet, il faut tenir compte de la partie aval (compartiment C) qui entraîne le compartiment A par rupture de butée.

Enfin, dans le cadre de la modélisation d'instabilité sur des secteurs plus larges dans des matériaux de même type, il est nécessaire de tenir compte du niveau de la nappe d'eau et d'établir des scénarii en conditions 'sèches' et 'humides/saturées', la difficulté étant de pouvoir intégrer des chroniques de précipitations (intensité et cumul) et faire une rétro-analyse des évènements.

6. Conclusion : intérêts, limites, recommandations

L'objectif général de l'étude est de mettre œuvre une méthodologie permettant l'interprétation conjointe des mesures EM et de données plus classiques, telles que les paramètres géotechniques, géologiques et hydrogéologiques, pour la caractérisation des glissements de terrain. Seuls les travaux menés en année 1 de la phase 2 de ce projet sont rapportés dans ce rapport. 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.

Cette étude est réalisée sur le glissement de terrain de la Médaille, pour lequel de nombreuses informations géologiques sont disponibles. Ces informations ont permis de créer et compléter un modèle géotechnique fondé conjointement sur le MNT Lidar 2013, l'interprétation des résultats d'EM hélicopté et les sondages acquis depuis 1968. Le modèle obtenu a été introduit dans ALICE® pour estimer les conditions de stabilité du glissement de terrain de la Médaille et observer par rétro-analyse si les données issues de l'EM pouvaient être utiles dans le cadre d'une modélisation déterministe. Le but de cette étude est d'appliquer la même démarche sur un secteur plus étendu de la Médaille et le secteur de Morne-Figue.

Ainsi, à ce stade de l'étude et pour conclure il est apparu 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 en milieu géologique faillé.

Ces conclusions permettent de donner quelques recommandations et d'évoquer les perspectives pour l'année 2 de la phase 2.

6.1. INTERETS ET LIMITES DE L'APPROCHE

6.1.1. Intérêts

Intérêt de l'EM hélicopté pour cette étude

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 notamment pour le glissement de la Médaille. Ainsi, de nouvelles informations supposées, mais non confirmées faute de sondages profonds, ont été obtenues, comme l'existence de deux corps principaux superposés (R2, éboulis dacitiques ; et R3 éboulis et brèches andésitiques) composant le glissement de terrain de la Médaille.

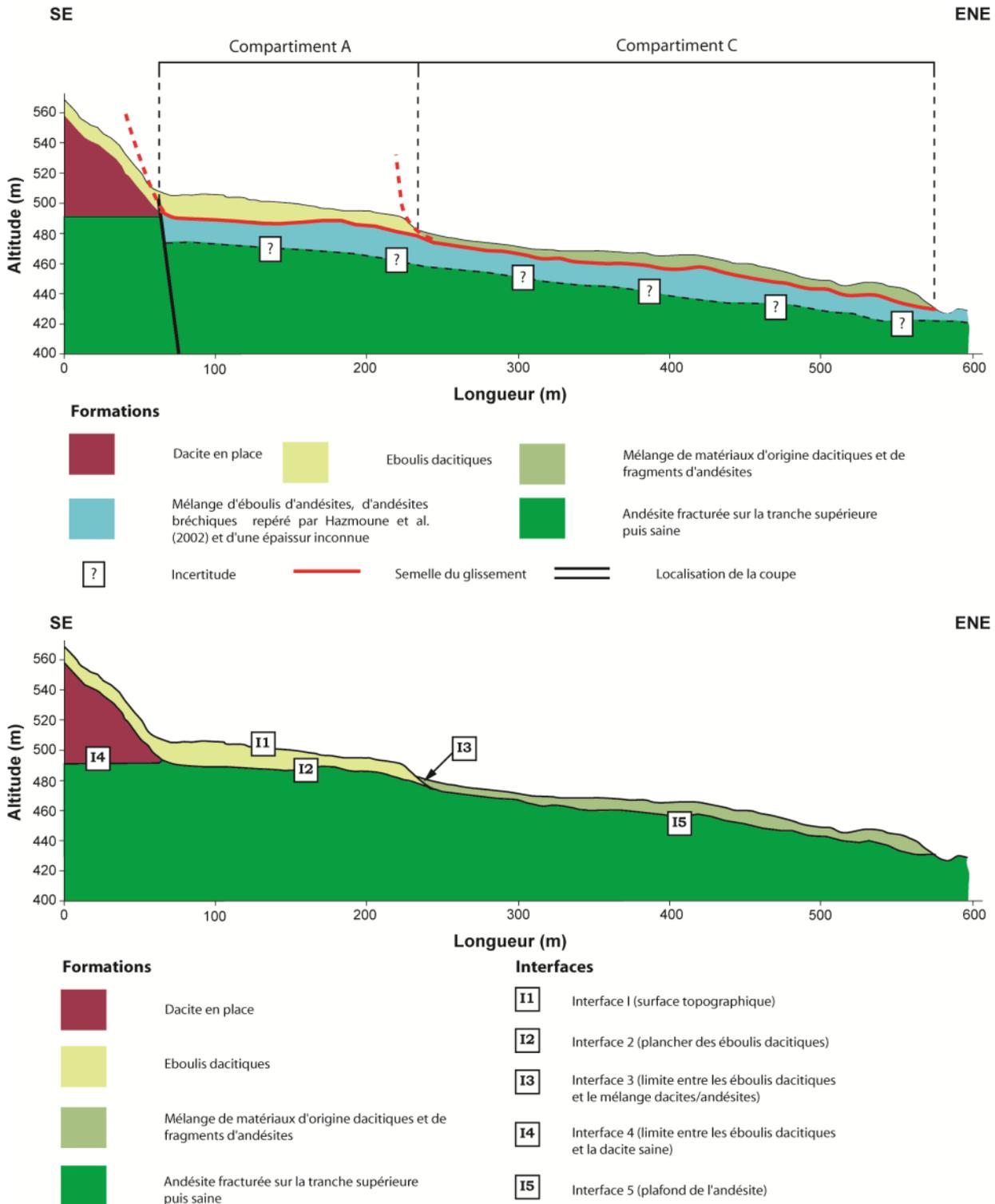


Illustration 32– Coupe synthétique du glissement (en haut) et représentation simplifiée du modèle géotechnique (en bas) sans l'apport des informations issues de l'EM hélicoptère.

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. L'illustration 32 montre le modèle géotechnique fondé sur les descriptions des travaux antérieurs (Deneufbourg, 1967, 1968 ; Humbert, 1986 ; Hazmoune *et al.*, 2002). Le corps du

glissement identifié dans un matériau hétérogène d'origine andésitique (identifié en R3 pour cette étude) n'aurait pas été pris en compte et une épaisseur de formations dacitiques entre 20 et 5 m d'épaisseur en amont et un mélange hétérogène d'une épaisseur comprise entre 5 et 10 m de dacites et de fragments d'andésites en aval auraient été retenus tout le long du glissement. La semelle du glissement aurait été localisée à l'interface entre ces deux formations et le mélange d'éboulis et de brèches d'origine andésitiques comme l'évoque Deneufbourg (1968) et Hazmoune *et al.* (2002).

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 (compartiment C) et un compartiment amont (compartiment A).

Intérêt de la modélisation sous ALICE®

Introduit dans ALICE®, le modèle géotechnique a 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 de la zone modélisée.

Les résultats montrent qu'avec les caractéristiques géotechniques retenues 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 d'occurrence de mouvement des secteurs les plus instables du glissement de la Médaille. Au-delà de ces résultats, il faut retenir que :

- Ces simulations confirment le modèle conceptuel envisagé : le glissement de la Médaille fonctionne bien par compartiment, les probabilités de rupture sont bien identifiées sur des secteurs clefs comme la limite entre le compartiment A et le compartiment C et toute la partie aval du compartiment C. Ce type de résultats permet d'envisager l'utilisation d'ALICE® dans cet environnement non seulement à méso-échelles (i.e. 1 : 25 000^{ème} - 1 : 10 000^{ème}) mais également à l'échelle du phénomène afin de mieux comprendre son fonctionnement.
- La confirmation du fonctionnement du glissement par compartiment permet de compléter la typologie esquissée par Atlan et Besson (1983), typologie fondée sur l'épaisseur des matériaux, leur type et la forme de la rupture ;
- 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 C également car ce dernier participe à la déstabilisation du compartiment A ;
- 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.

6.1.2. Limites actuelles

Si les résultats issus de l'EM hélicopté ont permis de définir deux corps pour le glissement de la Médaille, les analyses actuelles n'ont pas permis de définir clairement la semelle du glissement. Cette couche étant de faible épaisseur et en profondeur, selon le seul sondage à disposition, il est plus que probable qu'elle ne puisse 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) pourraient éventuellement nous permettre de mieux caractériser cette semelle.

Cette étude a porté sur le glissement de la Médaille, afin d'élargir la cartographie d'aléa sous ALICE® pour des secteurs de plus grandes superficies. Il faut dorénavant définir les différentes épaisseurs des formations aux alentours. Ainsi, une spatialisation des épaisseurs de ces dernières estimées grâce au traitement des données de résistivités relevées avec l'EM hélicopté est engagée. Du fait du contexte tectonique complexe, par la présence de plusieurs failles bien identifiées, une attention particulière doit-être accordée à cette spatialisation afin que le modèle géotechnique soit cohérent et corresponde à la réalité.

Les simulations sous ALICE® ont été réalisées avec une maille de calcul de 10 mètres adaptée au site de la Médaille. Dans le cadre des modélisations sur un secteur plus large la question est de savoir si cette taille de maille de calcul est adaptée notamment car la résolution planimétrique de l'EM hélicopté est en général de 30 m, mais surtout le site de la Médaille bénéficie d'une vingtaine de sondages 'profonds' proches permettant de 'caler' les informations issues de l'EM hélicopté avec des observations terrain de manière optimum, ce qui ne sera pas obligatoirement le cas ailleurs.

Il faut, également, envisager des tests sur différentes tailles de rupture (i.e. 25 m et 75 m). En ce sens les tests sur le glissement de Morne-Figue doivent également aider à trouver une taille de rupture pour un type de glissement différent.

Enfin, les simulations ont été réalisées pour des glissements complexes de type la Médaille en secteur géologique complexe. Actuellement, si le protocole de modélisation est reproductible, les résultats acquis pour cette étude ne sont pas transposables pour des glissements de terrain d'un autre type. Il est nécessaire de multiplier les simulations sur d'autres sites avec des glissements de terrain aux caractéristiques différentes et représentatives de la Martinique comme le glissement de Morne-Figue en suivant le protocole établi dans ce rapport.

6.2. RECOMMANDATIONS & PERSPECTIVES

Pour conclure, les résultats issus de l'EM hélicopté confrontés aux sondages ont permis d'envisager de nouvelles hypothèses sur le fonctionnement du glissement de la Médaille. Ainsi, ont été définis :

- Un modèle géotechnique, supposé, non confirmé par manque de sondages profonds (> 35 mètres) et de sondages sur le compartiment C ;
- Un modèle de fonctionnement que confirment les différentes simulations sous ALICE®.

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

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

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 ;
- 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 pour connaître son influence.

Enfin, dans le cadre de ce projet les prochains tests sous ALICE® porteront sur :

- Le site de Morne-Figue dont l'emprise spatiale et les épaisseurs de formations ont été identifiées par Reninger *et al.* (2014) ;
- Des secteurs plus larges, après avoir construit les modèles géotechniques correspondant grâce aux données de l'EM hélicopté, afin de valider les hypothèses établies lors de ce travail.

Chaque secteur soumis à une modélisation sous ALICE® sera ensuite soumis à une validation terrain (sous forme d'observations in-situ et d'une carte géomorphologique) et comparé avec les cartes PPR existantes.

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.
- ANTEA, 2000. RN 3 Glissement de terrain au lieu-dit « La Médaille » - Fort de France. Synthèse Géotechnique - A21824. 2 ann.
- 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.
- Allard J.F., 1981. Glissement nord de la Médaille – Fort de France, étude géotechnique. Note BRGM. 81. MQE. 15.
- 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.
- Belz H., Chalivat P., 1996. R.N. 3, Lieu-dit "La Médaille", Fort de France, Martinique - Reconnaissances géologiques et géotechniques dans la partie Nord du glissement de terrain. Synthèse des connaissances et recommandations. Rapport BRGM N 2342, Septembre 1996, 16 p., 2 fig., 3 tabl., 5 ann.
- Chargueron C., Comte J.-P., Mathon C., Périan G., 2004. Glissement de terrain de « La Médaille » - RN3- (commune de Fort de France) Phase 3 : 2002-2003. Suivi topographique, piézométrique et instrumentation. Rapport BRGM/RP-52893-FR, 42 p. 14 fig. 6 tabl. 8 ph., 3 ann.
- J. 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., Herva's J., Smith J. T., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ*. 73, 209–263.
- Deneufbourg G., 1967. Compte rendu de la reconnaissance de terrain au lieu-dit "La Médaille" - Fort de France (Martinique) - 15 novembre 1966. BRGM.
- Deneufbourg G., 1968. Etude géologique des glissements de la Trace (R.N. 3) entre camp de Balata et le quartier propreté (Martinique). Décembre 1968. BRGM 68 RME 024 ANT.
- Dubois L., 2003. Mission « Mouvement de terrain ». Les 20 et 21 mars 2003. Rapport CETE Normandie-Centre pour la Direction Départementale de la Martinique. Affaire n°8482.
- d'Ozouville N., Auken E., Sorensen K., Violette S., de Marsily G., Deffontaines B., Merlan G., 2008. Extensive perched aquifer and structural implications revealed by 3D resistivity mapping in a Galapagos volcano. *Earth and Planetary Science Letters*. 269, 517-521.
- Glenn NF, Streutker DR, Chadwick DJ, Thackray GD, Dorsch SJ, 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology* 73 (1).131-148.

- Haneberg W.C., 2000. Deterministic and probabilistic approaches to geologic hazard assessment *Environmental & Engineering Geoscience*. 6:209–226.
- Hazmoune A., Closset L., La Fata P., 2002. Glissement de terrain au lieu-dit "La Médaille" – N3 – Fort de France – Synthèse des connaissances et bilan du suivi topographique 2000-2001. BRGM/RP-51496-FR, 36p. 5 fig.; 7 tabl., 1 pl.h.t., 8 ann.
- Humbert M., 1986. Mouvement de terrain sécurité et aménagement du quartier de la Médaille (commune de Fort de France). BRGM 86 MQE 035.
- Jørgensen F., Sandersen P.B.E., Auken E., 2003. Imaging buried Quaternary valleys using the transient electromagnetic method. *Journal of Applied Geophysics* 53. 199-213
- 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., 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 – Phase1. Rapport final. BRGM/RP-64427-FR, p. 51, Ill. 41.
- Sedan. O., 2002. Glissement de La Médaille du 17 Septembre 2002 (RN3 – PR 15, commune de Fort-De-France, Martinique). Compte rendu de la visite du 21/11/2002. Avis sur l'évaluation du risque et la démarche de prévention
- 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.

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

Vittecoq B., Deparis J., Violette S., Jaouën T., Lacquement F., 2013. Influence of successive phases of volcanic construction and erosion on Mayotte Island's hydrogeological functioning as determined from a helicopter-borne resistivity survey correlated with borehole geological and permeability data Original Research Article *Journal of Hydrology* 509. 519-538.

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.

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

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



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