

Document public

Rapport d'expertise :

Diagnostic des risques géologiques au niveau du belvédère principal du site touristique du Maïdo

BRGM/RP-68145-FR
Juillet 2018

Cadre de l'expertise : Appuis à l'ONF

Date de réalisation de l'expertise : 14/06/2018

Localisation géographique du sujet de l'expertise : Site du Maïdo, Commune de Saint-Paul (974)

Auteurs BRGM : Aunay B., Reboul K.

Demandeur : ONF

Office National des Forêts

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001. Contact : qualite@brgm.fr

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM. Il constitue un tout indissociable et complet ; une exploitation partielle ou sortie du contexte particulier de l'expertise n'engage pas la responsabilité du BRGM.

La diffusion des rapports publics est soumise aux conditions de communicabilité des documents, définie en accord avec le demandeur. Aucune diffusion du présent document vers des tiers identifiés ne sera volontairement engagée par le BRGM sans notification explicite du demandeur.

Le BRGM a mis en place un dispositif de déontologie visant à développer une culture de l'intégrité et de la responsabilité dans le quotidien de tous ses salariés.

Après examen, il est ressorti qu'il n'existait aucun lien d'intérêt :

- **entre le BRGM et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise,**
- **entre les salariés du BRGM qui seront impliqués et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise.**

susceptible de compromettre l'indépendance et l'impartialité du BRGM dans la réalisation de cette expertise.

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Vérificateur : Nom : C. Garnier	Date : 27/07/18 Fonction : Ingénieur risques
Approbateur : Nom : S. Bes de Berc	Date : 05/09/2018 Fonction : Directrice régionale

Mots-clés : expertise, risque naturel, éboulement, chute de bloc, fissure, faille, fracture, La Réunion (974)

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

Aunay B., Reboul K. (2018) – Diagnostic des risques géologiques au niveau du belvédère principal du site touristique du Maïdo. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP- 68145-FR. 34 p.

© BRGM, 2018, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Introduction 5
2. Contexte général 6
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE 6
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE 8
2.3. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE 9
2.4. HISTORIQUE - PHENOMENES RECENSES OU OBSERVES SUR LE SECTEUR DU MAÏDO 10
2.5. CADRE REGLEMENTAIRE 11
2.6. CAS DES EFFONDREMENTS DE REMPART 12
2.6.1 Morphologie (Nedellec and Cruchet, 2008b) 13
2.6.2 Critères de prédisposition (Nedellec and Cruchet, 2008b) 13
2.6.3 Rôle des précipitations (Nedellec and Cruchet, 2008b) 14
2.6.4 Développement de la fissuration (Nedellec and Cruchet, 2008b) 14
2.6.5 Typologie de la rupture 15
2.6.6 Recensement des événements de grande ampleur 15
3. Constat 16
3.1. OBSERVATIONS 16
3.2. AUSCULTATION DES FISSURES DES REMPARTS 22
4. Cartographie du PPR sur le site du Maïdo 24
4.1. ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN 24
4.2. PPR REGLEMENTAIRE 24
5. Evaluation des risques au niveau du belvédère du Maïdo 30
6. Recommandations 31
7. Déclaration 33
8. Bibliographie 34

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation générale de la zone concernée (scan100 et scan25 - IGN©) 6

Illustration 2 - Localisation détaillée (ortho+scan25 – IGN©) de la zone concernée 7

Illustration 3 - Extrait de la carte géologique au 1/100 000 (BRGM/LGSR, 2006) et localisation du site 8

Illustration 4 – Contexte morphologique du site touristique du Maïdo (orthophotoIGN©) 9

Illustration 5 – Exemples de couloirs d'éboulement mineurs observés le 14/06/2018 et non bancarisés 10

Illustration 6 – Rapports BRGM relatifs aux phénomènes d'effondrement de rempart 12

Illustration 7 – Eboulements en masse et grande masse référencés à La Réunion 15

Illustration 8 – Localisation des fissures observées sur le site touristique du Maïdo 17

Illustration 9 – Localisation des observations des planches photographiques des illustrations suivantes 18

Illustration 10 – Description des principales fissures au nord du point de vue du Maïdo 19

Illustration 11 – Description des principales fissures au sud du point de vue du Maïdo 20

Illustration 12 – Description des principales fissures à proximité immédiate du point de vue le plus haut du Maïdo 21

Illustration 13 - Exemple de capteurs extensométriques en place et station d'acquisition du Maïdo dans son environnement 22

Illustration 14 - Déplacements mesurés sur les extensomètres du Maïdo dans le cadre du projet MvTerre-1. 23

Illustration 15 – Fissures et aléa mouvements de terrain (scan 25K IGN©) 25

Illustration 16 – Fissures et aléa mouvements de terrain (orthophoto IGN©) 26

Illustration 17 – Fissures et zonage réglementaires du PPR de Saint-Paul (scan 25K IGN©) 27

Illustration 18 – Fissures et zonage réglementaires du PPR de Saint-Paul (orthophoto IGN©) 28

Illustration 19 – Fissures et zonage réglementaires du PPR de Saint-Paul (orthophoto IGN©) 29

Illustration 20 – Localisation des barrières actuelles (flèches jaunes) 32

Illustration 21 - Schéma de principe de l'auscultation des remparts de La Réunion 33

Provisoire

1. Introduction

L'ONF a sollicité le BRGM (Direction régionale de La Réunion) pour réaliser un diagnostic afin d'évaluer les risques géologiques sur le site touristique du Maïdo, sur le territoire de la commune de Saint-Paul à La Réunion. Ce diagnostic s'inscrit dans le cadre d'une étude qui vise à développer et améliorer les actuels aménagements du site du Maïdo.

Les objectifs de la mission d'expertise sont les suivants :

- Identifier si possible la nature du phénomène redouté ;
- Evaluer le niveau de risques résiduels ;
- Si nécessaire, établir des recommandations en matière de sécurisation.

Ce diagnostic a été établi par un intervenant du BRGM. Il s'appuie sur des observations visuelles effectuées lors d'une visite du site réalisée le 14/06/2018, en présence notamment de représentants de l'ONF. En complément, une analyse des informations disponibles relatives au contexte général est menée au travers de la consultation des bases de données accessibles.

Au-delà, l'expertise s'est appuyée sur la consultation des rapports BRGM produits dans le cadre des projets de recherche MvTerre-1 et 2[1].

Un débriefing de l'expertise a été réalisé à l'issue de la visite, au cours duquel les principaux éléments de conclusion ont été formulées aux participants. Ces éléments ont également été communiqués le 19/06/2018 lors d'une réunion de restitution élargie sur le site[2].

L'expertise s'inscrit dans le cadre d'un appui à l'ONF mené par le BRGM au titre de l'année 2018.

Ce rapport d'expertise ne constitue pas une étude géotechnique de détail mais pointe les éléments pouvant porter atteinte à la sécurité des personnes en particulier et des biens, au droit du site expertisé. Il vise également à apporter les premières recommandations en matière de sécurisation, sur la base du diagnostic établi, recommandations qui ont pour partie au moins vocation à être complétées/précisées dans le cadre d'études complémentaires spécifiques ultérieures.

[1] http://www.brgm.fr/projet/mvterre-2-detection-suivi-modelisation-mouvements-terrain-grande-ampleur-reunion - Projet cofinancé par les fonds européen FEDER, la Région Réunion, le Département de La Réunion et le BRGM.

[2] Réunion organisée par l'ONF dans le cadre de l'étude d'aménagement du site du Maïdo.

2. Contexte général

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le diagnostic des risques géologiques a été effectué au niveau du belvédère principal du site touristique du Maïdo (Illustration 1 et illustration 2).

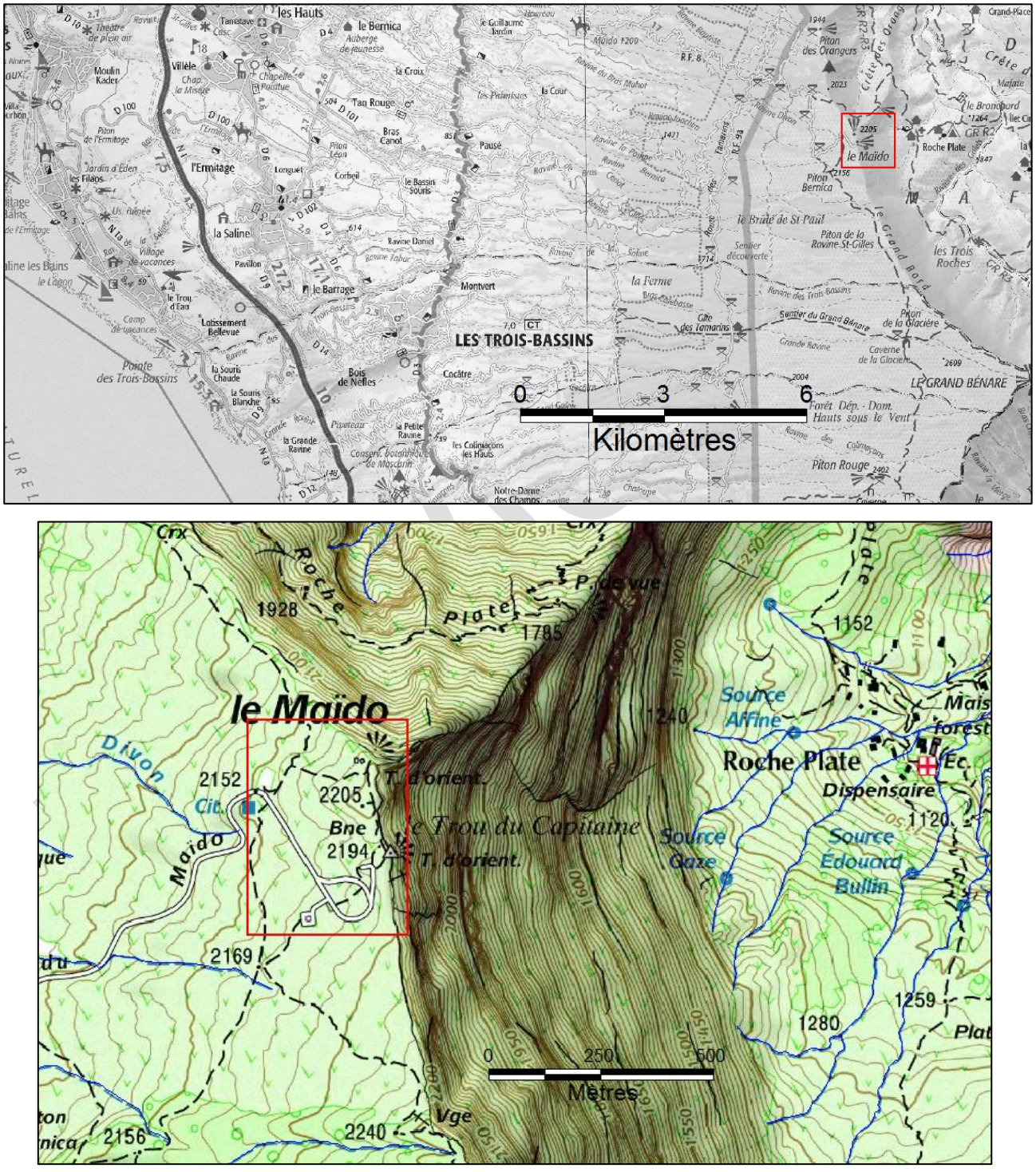


Illustration 1 - Localisation générale de la zone concernée (scan100 et scan25 - IGN©)
Cadre rouge : site touristique du Maïdo

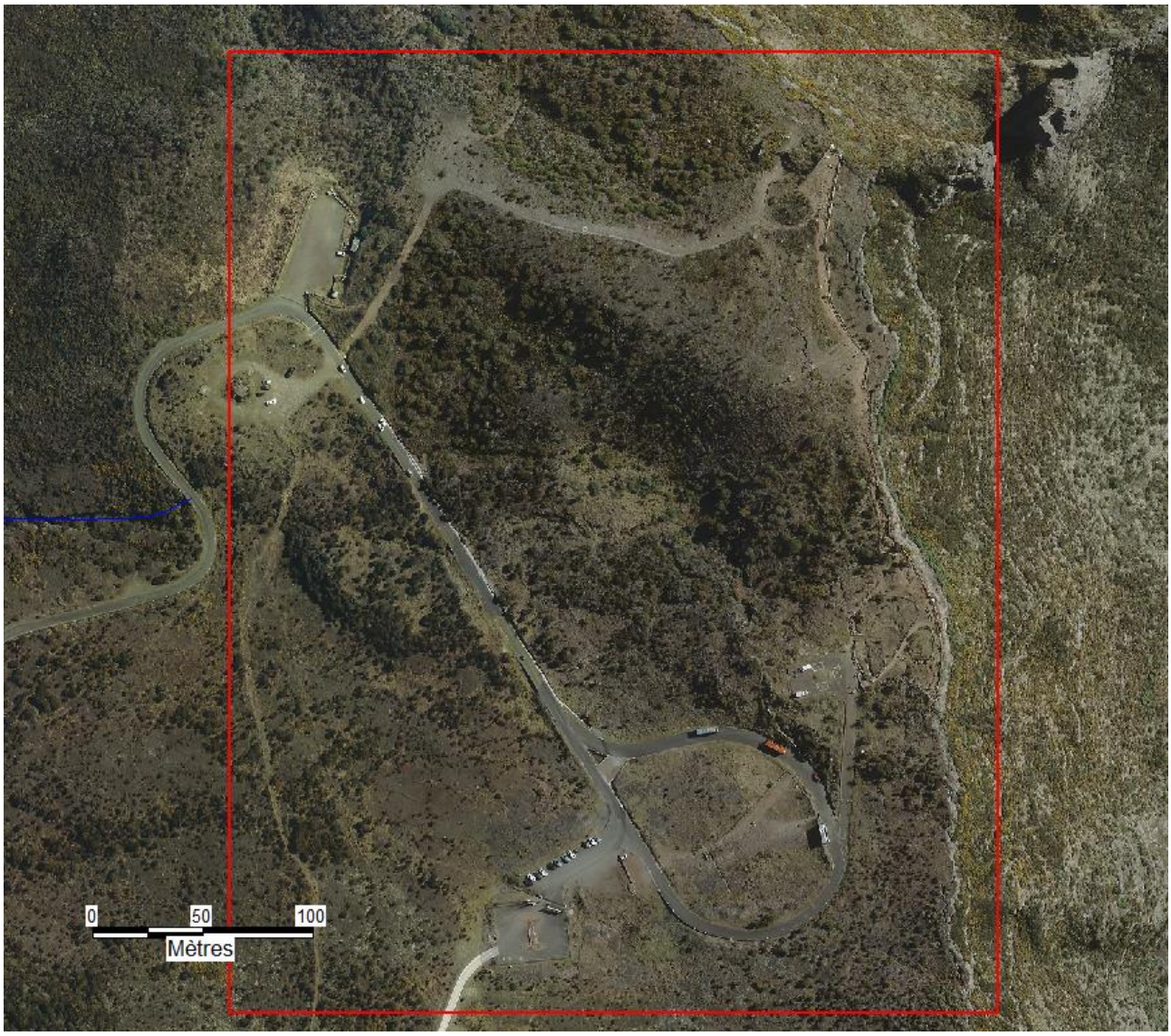


Illustration 2 - Localisation détaillée (ortho+scan25 – IGN©) de la zone concernée

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'après la carte géologique au 1/100 000 (BRGM/LGSR, 2006), la zone concernée se situe au toit de la série différenciée qui arme les principaux sommet sur le pourtour du massif du Piton des Neiges.

Cette zone est caractéristique des grands remparts de La Réunion, qui sont constitués d'un vaste empilement de coulées volcaniques sub-tabulaires sur une hauteur de l'ordre de 800 à 1 000 m.

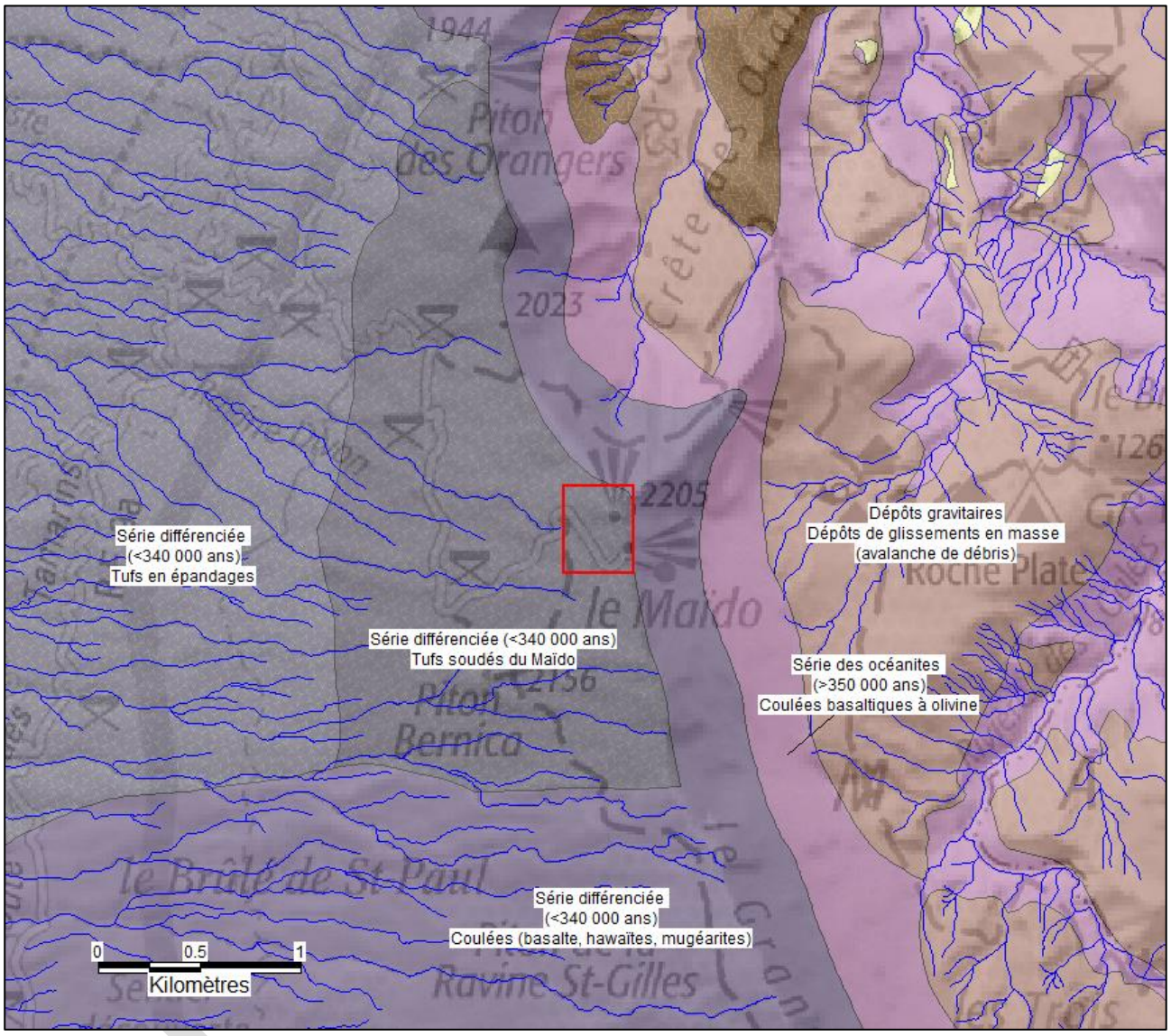


Illustration 3 - Extrait de la carte géologique au 1/100 000 (BRGM/LGSR, 2006) et localisation du site

2.3. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

Le site touristique du Maïdo surplombe le rempart ouest du cirque de Mafate. Ce rempart d'une hauteur de l'ordre de 1 000 m présente une pente variable entre 50 et 60° dans ce secteur (Illustration 4). Ponctuellement, la pente peut être plus forte dans la partie haute du rempart.

D'une manière générale les zones de rempart sont découpées par de vastes fissures en arrière de la tête de paroi, subparallèles à cette dernière (Nedellec and Cruchet, 2008a). L'origine de ces fissures de traction, quasi verticales en surface, est liée à la décompression naturelle du massif. Par retour d'expérience d'événements majeurs affectant de vastes versants à La Réunion (voir § 2.6 – p. 12), il a été constaté qu'après un vaste effondrement en masse, de nouvelles fissures apparaissent très rapidement en quelques semaines dans les premières dizaines de mètres en arrière de la paroi, l'évolution ralentissant significativement par la suite. Lentement et progressivement, la fissuration va s'étendre en arrière du rempart et en profondeur, où les discontinuités vont acquérir une forme légèrement concave les rapprochant vers la paroi.

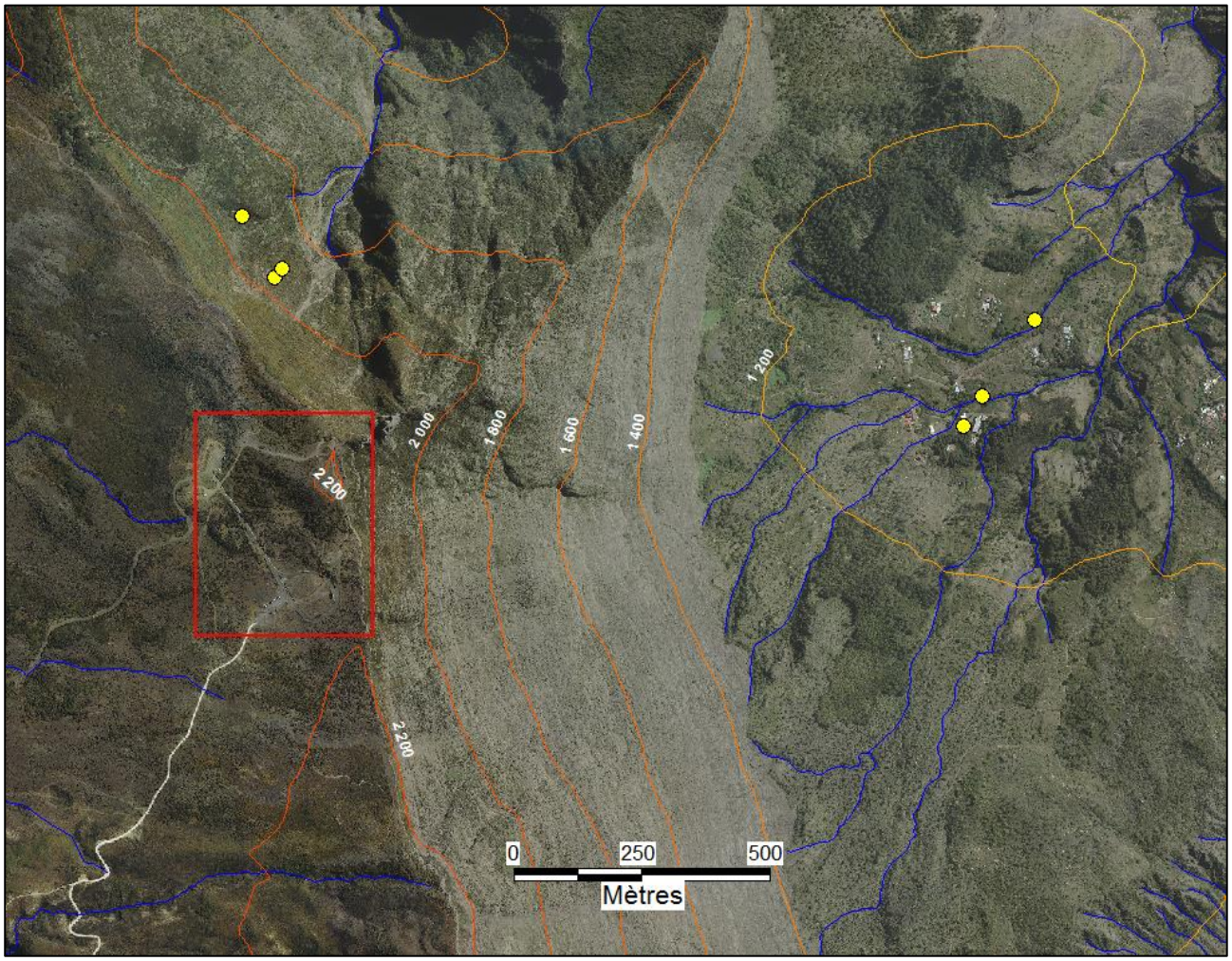


Illustration 4 – Contexte morphologique du site touristique du Maïdo (orthophotoIGN©)
Altitude exprimée par les courbes de niveaux espacées de 200 m.
Ronds jaunes : événements gravitaires (www.georisques.gouv.fr) – voir § Historique ci-après.

2.4. HISTORIQUE - PHENOMENES RECENSES OU OBSERVES SUR LE SECTEUR DU MAÏDO

La base de données nationale sur les mouvements de terrains (www.georisques.gouv.fr), gérée par le BRGM, mentionne trois événements gravitaires à proximité immédiate du site touristique du Maïdo (Illustration 4). Il s'agit de chute de blocs et/ou d'éboulement qui ont été recensés entre 2002 et 2003 (volume indéterminé).

Au vu de la configuration morphologique du rempart, des cicatrices ou des couloirs d'éboulement observés, il convient de rappeler que d'autres événements gravitaires se sont très probablement produits sur le rempart sans qu'ils n'aient été référencés ou bancarisés (Illustration 5).

En effet, la morphologie du site (rempart de plus de 1 000 m de hauteur) dans le contexte réunionnais[3] est propice aux déstabilisations gravitaires.

Dans le cas où aucun enjeu n'a été impacté, il est probable que les événements gravitaires d'ampleur faible à moyenne n'aient pas été recensés. Pour mémoire, les enjeux sont limités à l'aval immédiat du site touristique du Maïdo. Le sentier de randonnée et les habitations de l'Ilet Roche-Plate sont des enjeux plus éloignés, non atteints par les événements gravitaires d'ampleur limitée. Il est ainsi très vraisemblable que la connaissance historique sur le site soit très parcellaire, y compris pour des événements plus ou moins récents

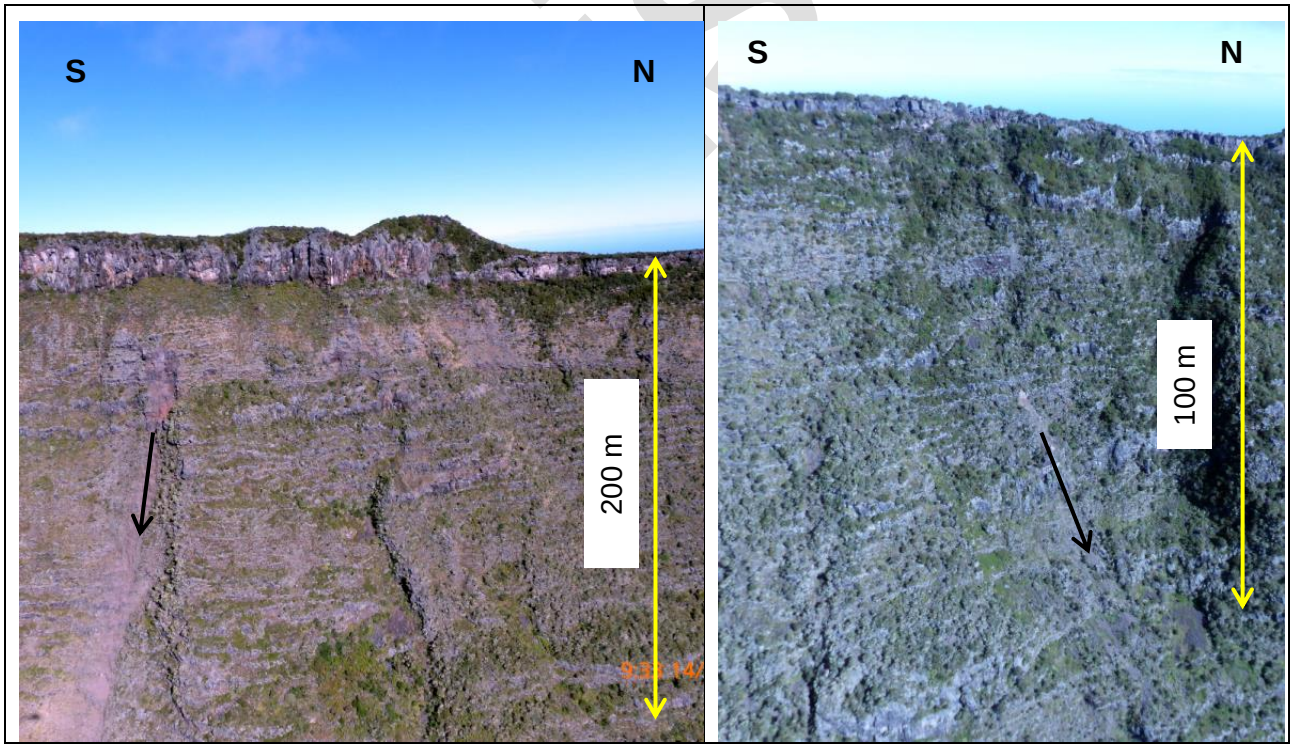


Illustration 5 – Exemples de couloirs d'éboulement mineurs observés le 14/06/2018 et non bancarisés

[3] Hétérogénéité des formations volcaniques, altération, climat tropical humide, forte intensité des précipitations lors des perturbations tropicales (cyclone ou tempête)…

2.5. CADRE REGLEMENTAIRE

La commune de Saint-Paul (hors secteur Mafate) a fait l'objet d'un arrêté préfectoral d'approbation du Plan de Prévention des Risques naturels (PPR) en date du 26/10/2016 (arrêté préfectoral n°2160 SG/DRCTCV).

Ce PPR « inondations et mouvements de terrain » intègre notamment les aléas chutes de blocs, éboulements, et également l'impact de ces phénomènes sur les terrains en crête de rempart (risque d'effondrement brutal et de perte de terrains le cas échéant qui engendre un risque de « recul » de la crête des remparts).

A ce titre, la formulation suivante figure dans les notes de présentation des PPR afin d'évoquer la problématique « recul rempart » :

- Les chutes de blocs et éboulements génèrent une « perte » de matériaux au sein des falaises et des remparts qui peut engendrer, selon l'ampleur des effondrements pouvant se produire, des reculs de plusieurs mètres à dizaines de mètres en partie sommitale de ces derniers. Ces éboulements sont des évènements brutaux, parfois sans signe précurseur visible en surface notamment en recul de la crête du rempart concerné. Toutefois, des **indices précurseurs** de ce type d'effondrement pouvant affecter la crête de rempart et les terrains en recul sont parfois présents et visibles en surface comme une **fracturation subparallèle à la bordure du rempart** ou encore un décrochement (matérialisé par un tassement) du compartiment proche de la crête du rempart et délimité par une ligne de fracturation.

Les illustrations relatives à la cartographie des PPR figurent dans le présent rapport au paragraphe « Aléa mouvement de terrain (p. 24) ».

2.6. CAS DES EFFONDREMENTS DE REMPART

Au-delà de ces événements gravitaires de « petite » ampleur peu ou pas recensés sur le secteur, la connaissance géologique régionale met en évidence l'existence de phénomènes de très grande ampleur dénommés « effondrement de rempart ». Il s'agit d'effondrements en masse de parois rocheuses pouvant générer des volumes déstabilisés de l'ordre de quelques millions à dizaines de millions de mètres cube (Mm^3).

Ce type d'événement catastrophique n'a pas été observé sur le site du Maïdo au cours des deux derniers siècles[4]. Toutefois, des événements d'effondrement de rempart ont été observés et décrits sur d'autres secteurs de La Réunion. Concrètement, le phénomène d'effondrement de rempart à La Réunion est certes exceptionnel, mais sa période de retour pourrait être de l'ordre de la centaine d'années en fonction des secteurs concernés et dans des configurations défavorables.

Ces phénomènes ont notamment été analysés dans le cadre du projet MvTerre-1 (Illustration 6).

Objet du rapport	N° de rapport BRGM	Auteurs / année
Auscultation des remparts de La Réunion – moyens à mettre en œuvre	RP-52887-FR	(Mathon, 2003)
Suivi des déformations des remparts de La Réunion - Présentation des dispositifs du Maïdo et de Mahavel	RP-52939-FR	(Cruchet and Frissant, 2003)
Typologie des éboulements rocheux et des modes de rupture associés - étude bibliographique -Applications au contexte de l'ile de La Réunion	RP-52909-FR	(Nedellec and Cruchet, 2003)
Analyse de la fracturation et suivi des mouvements des remparts du Maïdo et de Mahavel par dispositif extensométrique	RP-56724-FR	(Nedellec and Cruchet, 2008a)
Analyse des modes d'effondrement en masse sur plusieurs sites de La Réunion	RP-56729-FR	(Nedellec and Cruchet, 2008b)

Illustration 6 – Rapports BRGM relatifs aux phénomènes d'effondrement de rempart

Les principaux éléments de connaissance des phénomènes d'effondrement de rempart sont synthétisés dans le rapport BRGM/RP-56729-FR (Nedellec and Cruchet, 2008b) et sont repris ci-dessous. Si nécessaire, ces éléments de connaissance sont replacés dans le contexte du site touristique du Maïdo. Ils proviennent principalement d'observations réalisées sur les sites suivants, sélectionnés selon des critères de représentativité, de qualité des données et d'existence d'effondrements récents :

- le Cratère Dolomieu (Piton de la Fournaise – cas particulier, en relation avec l'éruption volcanique d'avril 2007)
- le rempart de Mahavel (amont du bassin versant de la Rivière des Remparts)
- le Grand éboulis (amont du bassin versant du la Rivière des Pluies)
- le Piton d'Enchaing (centre de Salazie)
- la Route du Littoral – PR 11+900

[4] Début supposé du référencement des événements remarquables dans les cirques.

Provisoire

- le Bras des Roches Noires (amont du bassin versant du Bras de la Plaine / rivière Saint-Etienne)

Ces éléments sont plus récemment repris dans le cadre d'une application opérationnelle en vue de proposer des évolutions méthodologiques sur les PPR multi-aléas des communes de La Réunion (Rey and Bielen, 2016).

2.6.1 Morphologie (Nedellec and Cruchet, 2008b)

Les éboulements en masse mobilisant au moins plusieurs dizaines de milliers de mètres cube nécessitent généralement la présence de parois rocheuses de plus de 100 m de hauteur. La Réunion présente des grands escarpements, constitués d'empilements de coulées essentiellement basaltiques, pouvant approcher 1 200 m de hauteur où des effondrements de plusieurs millions de m^3 ont été recensés.

La pente moyenne des grands escarpements est généralement comprise entre 55° et 70° (*55° dans le cas du Maïdo*), les inclinaisons plus raides étant essentiellement réservées aux parois de hauteur plus modérées et très actives (ex : falaises marines) ou aux parties sommitales de rempart. Les morphologies concaves de bordures de rempart actives sont très fréquentes, le rayon de courbure étant assez souvent dans la proportion de la hauteur de l'escarpement, sans que cela soit une règle stricte. Cette forme concave tend à « recomprimer » la roche dans le massif par effet de voûte.

2.6.2 Critères de prédisposition (Nedellec and Cruchet, 2008b)

Parmi les critères de prédisposition aux grandes instabilités, les principaux éléments identifiés sont les suivants :

- hauteur importante de l'escarpement (*1 000 m dans le cas du Maïdo*), et forte inclinaison de la paroi : ces deux paramètres vont dans le sens d'une plus forte capacité à la décompression du massif, générant l'apparition de vastes fissures de traction en arrière de la paroi ;
- présence de faciès rocheux altérés ou hydrothermalisés fragilisant l'édifice et développant des niveaux moins perméables. Plusieurs paramètres vont dans ce sens :
    - affleurement de séries volcaniques anciennes dans la paroi ;
    - existence d'interruptions importantes en matière d'épisodes effusifs. Par exemple le contact entre les formations de la phase II et celles de la phase III du Piton des Neiges s'est traduit par un arrêt du volcanisme pendant environ 80 000 ans, ce qui a favorisé l'apparition de faciès d'altération continentale au toit des formations anciennes pendant cette période ;
    - proximité de l'axe du Piton des Neiges où les phénomènes hydrothermaux ont été plus fréquents et soutenus en raison de la relative proximité de la cheminée magmatique (*ne concerne pas le contexte du Maïdo*) ;
- présence de dykes, intrusions magmatiques tardives très redressées formant d'une part des plans de décollement privilégiés, et d'autre part un obstacle à la circulation des eaux souterraines, et donc un contexte favorisant leur mise en pression (*non observé dans le cas du Maïdo*) ;
- l'existence de formations ou de discontinuités orientées en aval-pendage, c'est-à-dire vers l'extérieur de la paroi. Outre que la résistance au cisaillement/glissement des panneaux rocheux se révèle moindre, ce type de configuration favorise les circulations d'eau souterraines vers la paroi, pouvant ainsi contribuer au développement de surpressions hydrostatiques et à la déstabilisation de panneaux rocheux instables (*non observé dans le cas du Maïdo*) ;

- la présence d'un cours d'eau vif pouvant directement saper le pied de paroi (*ne concerne pas le contexte du Maïdo*).

2.6.3 Rôle des précipitations (Nedellec and Cruchet, 2008b)

Aucun des cas examinés dans le détail dans le cadre du projet MvTerre-1 (suivi par extensomètres ou analyse des pluies avant un effondrement) n'a permis de mettre en évidence une relation directe entre les pluies tombées dans les jours qui précèdent l'événement et les éboulements en masse, ou plus simplement les mouvements de la paroi (accentuation de l'ouverture des fissures de traction).

Cependant, même si au moins trois cas (Roches Noires, Dolomieu et Piton d'Enchaing) ne montrent quasi-aucun rôle de l'eau (précipitations récentes) dans le déclenchement de l'instabilité, il s'avère que pour 3 autres cas (Falaise du Littoral, Mahavel, et Rivière des Pluies) l'enregistrement de pluies exceptionnelles dans les 2 mois qui précèdent montre que les pluies peuvent avoir une action indirecte (avec combinaison éventuelle des phénomènes suivants) :

- par sapement du pied de paroi en éliminant une partie de la butée de pied (Rivière des Pluies), voire en entamant directement la paroi ;
- par action des eaux infiltrées, ayant relativement lentement progressé vers les fissures en arrière de la paroi. Ces eaux peuvent agir de différentes façons dans les fissures :
    - baisse de cohésion des argiles de remplissage, ce qui réduit la résistance au cisaillement entre les épontes des discontinuités ;
    - mise en pression des fissures et meilleur report du poids des colonnes rocheuses sur leur assise ;
    - dans une moindre mesure, action de basculement des écailles de roche.

Ceci ne se conçoit que pour des massifs fracturés relativement peu perméables, ou tout au moins présentant des niveaux plus fermés.

Au-delà des cas observés dans le cadre du projet MvTerre-1, il convient de rappeler que l'eau joue un rôle prépondérant (différents mécanismes) dans l'évolution des remparts et le déclenchement instabilités pour les chutes de blocs et les éboulements.

2.6.4 Développement de la fissuration (Nedellec and Cruchet, 2008b)

L'analyse de la fissuration qui s'est développée suite à l'effondrement du cratère Dolomieu lors de l'éruption d'avril 2007 a parfaitement mis en évidence que la fracturation de décompression en arrière des parois néoformées se développe très rapidement. Au bout de quelques semaines, l'essentiel de la fissuration en surface est déjà en place (probablement 80 % de fracturation acquise en 1 mois et 90 % en 3 mois). Ce point avait déjà été constaté sur des grands fronts de carrière.

Le site du Dolomieu, ainsi que ceux du Maïdo et de Mahavel, ont également mis en évidence, plusieurs points essentiels vis-à-vis de la fracturation se développant à l'arrière des grandes parois constituées d'empilements volcaniques tabulaires :

- la majorité des fissures se développe dans une bande de terrain dont la largeur L est de l'ordre de L = H/10, avec H = hauteur du rempart. D'autres fissures, plus espacées sont présentes au-delà jusqu'à une limite de l'ordre de L = H/5. Ces fissures, plus éloignées, apparaissent plus tardivement, souvent après quelques années ;
- la plupart des fissures mesure environ quelques décimètres de largeur, les plus larges (jusqu'à 4 m) étant souvent les plus proches du bord de la paroi ;
- les fissures sont subparallèles à la bordure du rempart, avec toutefois une forme légèrement concave qui rejoint la paroi ;
- en profondeur, les fissures d'abord subverticales en tête, tendent à lentement se rapprocher de la paroi. Les fissures les plus profondes sont les plus proches du rempart.

Provisoire

2.6.5 Typologie de la rupture

La majorité des effondrements en masse étudiés correspond avant tout à une rupture de pied. En effet, dans une configuration où de vastes fractures se sont développées en arrière de la paroi par décompression du massif (phénomène "d'appel au vide"), d'abord rapidement, puis nettement plus lentement, des écailles rocheuses s'individualisent pour peser de plus en plus massivement sur leur assise rocheuse. La fracturation légèrement concave progresse en profondeur (par effet de fatigue) et vers la paroi jusqu'à ce qu'un niveau de fondation ne puisse supporter toute la masse en équilibre.

La présence d'un niveau, soit plus fracturé, soit plus altéré, ou d'une discontinuité orientée vers la paroi (ex. de Mahavel) peut suffire à atteindre les critères de la rupture. La présence très fréquente d'une forme concave en "coup de cuillère" à la base de la cicatrice de l'effondrement est un indicateur pertinent de ce type de mécanisme.

Cependant, il convient de souligner que l'adjonction d'eau souterraine, dans une configuration déjà très fragilisée, peut suffire à être l'ultime déclencheur de l'instabilité en masse. Il en est de même pour une sollicitation sismique liée à l'activité du volcan.

2.6.6 Recensement des événements de grande ampleur

La tableau ci-dessous recense les phénomènes d'effondrement de rempart (recul de rempart).

Les termes « éboulement en grande masse ou éboulement catastrophique » sont employés pour décrire ces événements gravitaires dont le volume dépasse 1 Mm^3 (1 000 000 m^3).

Les termes « éboulements en masse ou éboulement majeur » sont employés pour décrire ces événements gravitaires dont le volume est compris entre 100 m^3 et 1 Mm^3.

Lieu-dit (commune)	Date	Description
Grand-Sable[5] (Salazie)	25/11/**1875**	20 Mm^3 – effondrement catastrophique du flanc nord-est du Gros-Morne - 63 morts
Rempart de Mahavel – Rivière des Remparts (Saint-Joseph) 4 effondrements majeurs répertoriés depuis 50 ans :	**1904**	Evènement référencé dans les archives mais sans estimation du volume effondré
	1965	Entre 35 et 50 Mm^3 effondrés selon les sources - Détachement d'une écaille (700 m de haut, 1 000 m de long et épaisseur au sommet devait être de l'ordre de 50 m
	09/01/**1996**	5 Mm^3
	18/01/**2001**	1 Mm^3
Grand-Eboulis de la Rivière des Pluies (Saint-Denis)	01/03/**2002**	500 000 m^3
Bras des Roches Noires (amont du Bras de la Plaine) (Entre-Deux)	Décembre **2006** (hors saison cyclonique)	1.6 Mm^3 Détachement d'une écaille de 300 m de long, 150 m de haut et 35 m d'épaisseur.

Illustration 7 – Eboulements en masse et grande masse référencés à La Réunion
Seuls les événements dont le volume est supérieur à 500 000 m^3 sont listés dans ce tableau.
Les volumes référencés ci-dessus sont des estimations et reposent sur des observations réalisées après le phénomène d'éboulement.

[5] http://www.mi-aime-a-ou.com/histoire_annee_1875.php

3. Constat

3.1. OBSERVATIONS

Le présent diagnostic a été établi par un intervenant du BRGM. Il s'appuie sur des observations visuelles effectuées lors d'une visite héliportée puis pédestre du site réalisée le 14/06/2018, en présence notamment de représentants de l'ONF.

Les observations réalisées in-situ ont été complétées par l'analyse de l'orthophoto aérienne (IGN©, 2012). Ces éléments factuels sont reportés sur les illustrations de synthèse ci-après (illustration 8 à illustration 12). Les observations visaient à identifier les fissures ouvertes en tête de rempart. Ces fissures correspondent à la manifestation en surface de la décompression du rempart, pouvant engendrer, à terme, son effondrement (Nedellec and Cruchet, 2008b).

Il est rappelé que les observations ne sont pas exhaustives sur la zone en raison de l'importante surface à investiguer (de l'ordre de 4 hectares), de l'absence de sentier et du couvert végétal dense par endroit.

Les fissures observées sont subparallèles au rempart. Les ouvertures sont variables : de quelques centimètres à plus de 1 mètre.

Les fissures d'ouverture métrique se situent à proximité immédiate du rempart (≈ 1 à 5 m), que cela soit au nord ou au sud du site touristique (Illustration 10 - réseau de fissure 1). Ces fissures délimitent des compartiments rocheux qui sont peu connectés au rempart : seule l'embase des compartiments est directement en contact avec le rempart. Le volume de ces compartiments rocheux est de l'ordre de la centaine de m^3.

Les fissures d'ouverture centimétrique à décimétrique se situent à plusieurs dizaines de mètres de la bordure du rempart (Illustration 10 - réseau de fissure 2), c'est-à-dire à 20 à 40 m de distance en moyenne, avec un maximum à une distance de 100 m de la bordure du rempart. Le volume de ces compartiments rocheux n'est pas quantifiable dans la mesure où la profondeur des fissures est inconnue ; toutefois, un volume minimum de 100 000 m^3 est proposé (200 m en allongement N-S x 20 à 40 m depuis la bordure du rempart).

Hormis pour le cas de la fissure la plus éloignée (100 m du rempart), ces fissures sont relativement continues et alignées selon la direction N-S. Il reste envisageable, de façon discontinue au moins, que l'on puisse retrouver des fissures dans le prolongement de cette fissure observée.

Les observations réalisées sur ces réseaux de fissures sont cohérentes avec celles effectuées sur le site suivi dans le cadre du projet de MvTerre-1, à environ 1 km sud-est du point de vue du Maïdo (voir p. 22 - § Auscultation des fissures des remparts).

Provisoire

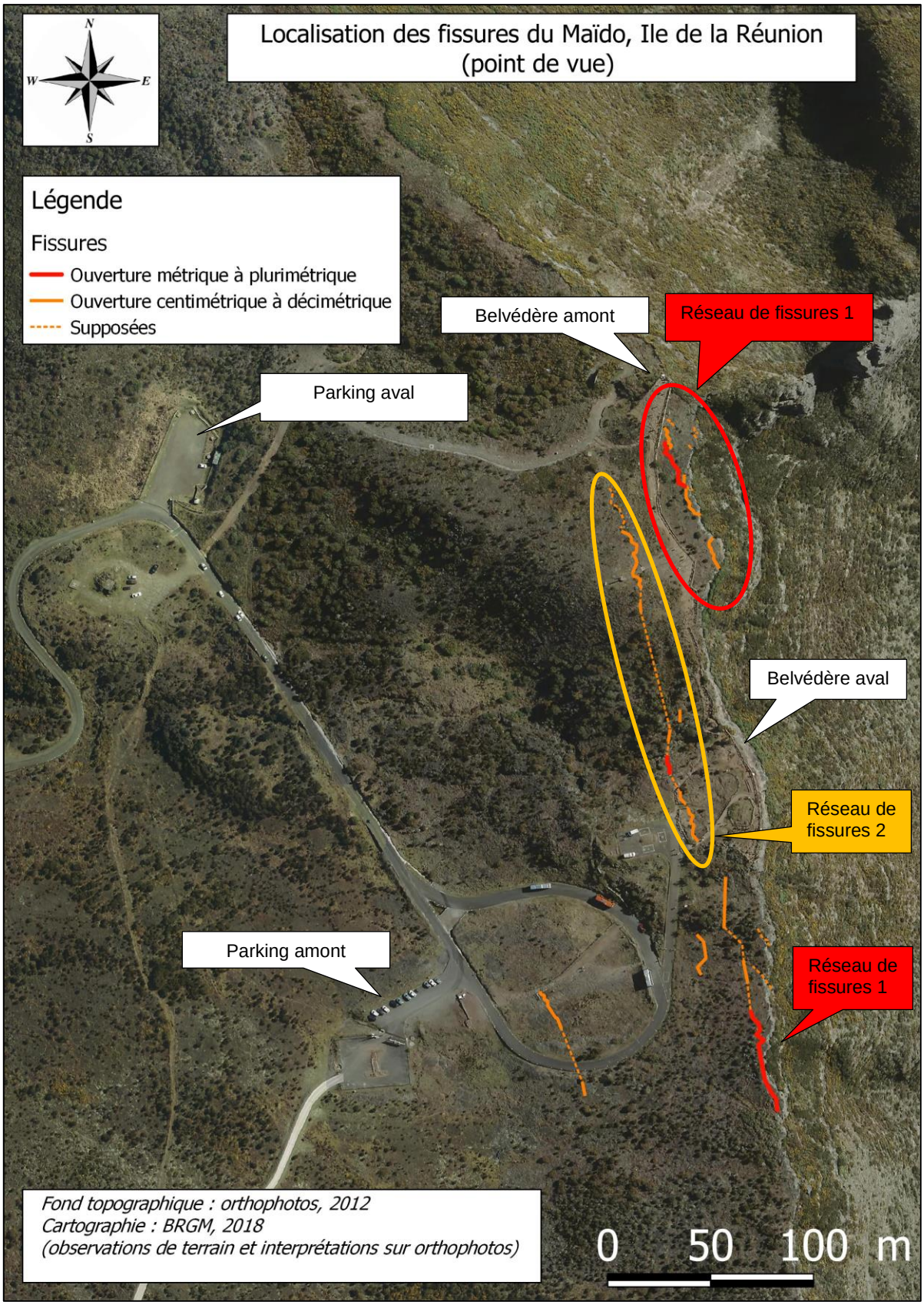


Illustration 8 – Localisation des fissures observées sur le site touristique du Maïdo

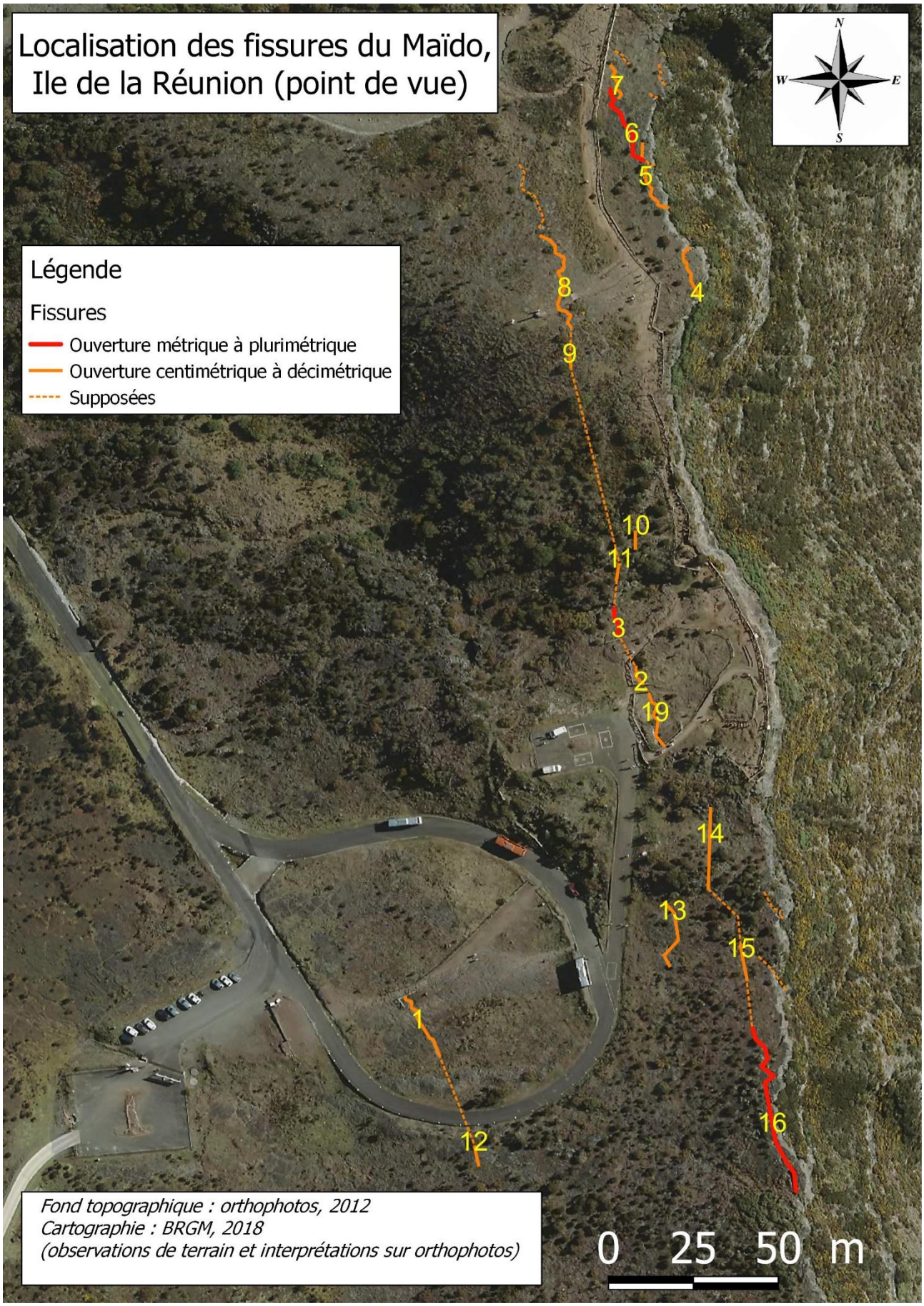
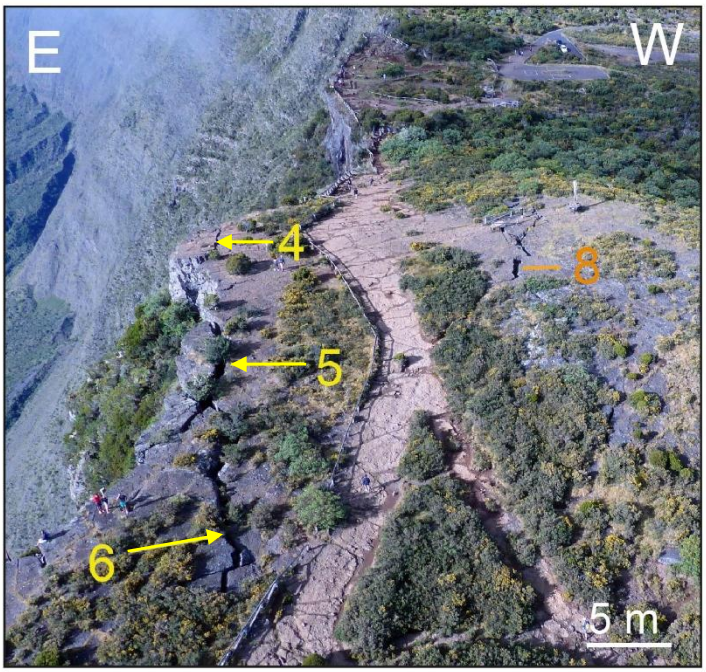


Illustration 9 – Localisation des observations des planches photographiques des illustrations suivantes



Réseau de fissure 1 : en bordure de rempart

Réseau de fissure 2 : distant d'une vingtaine de m du rempart

Photo A : vue aérienne du Nord des remparts du Maïdo



Photo B : fissure 4 d'1 m d'ouverture et de 4-5 m de profondeur



Photo C : fissure 5 d'1-2 m d'ouverture et de 4-5 m profondeur



Photo D : fissure 6 d'1-1.5 m d'ouverture et d'1-2 m de profondeur

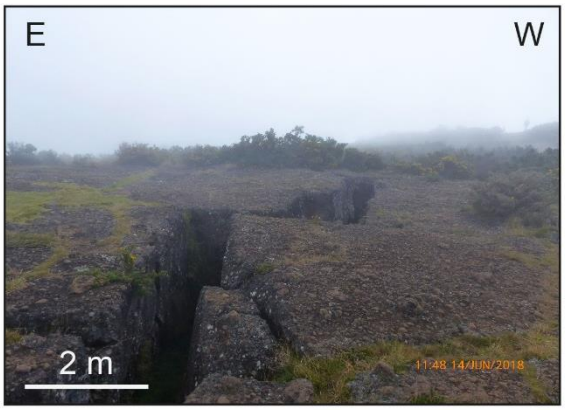
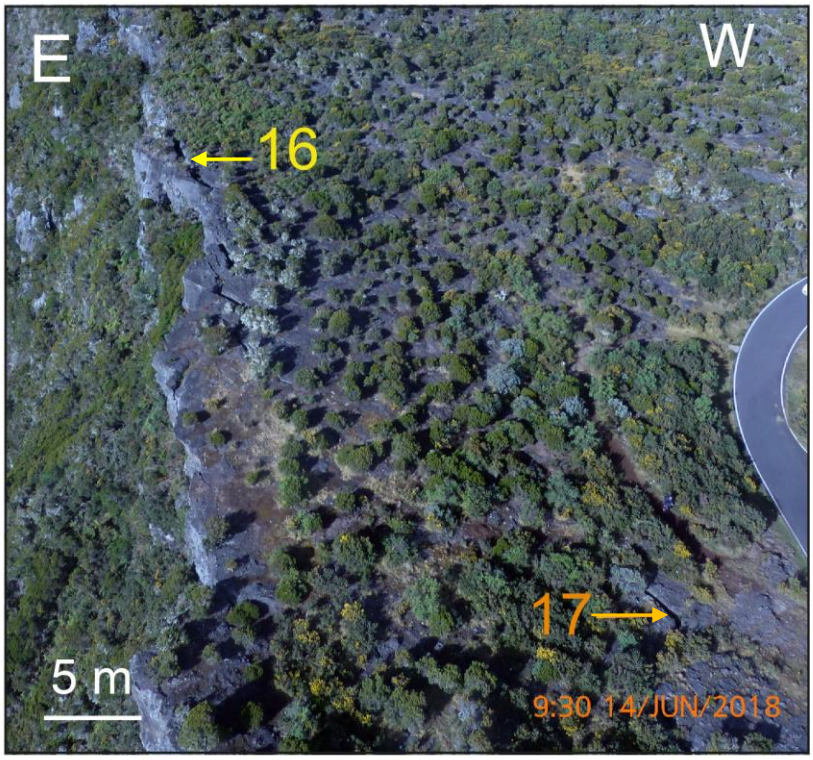


Photo E : fissure 8 de 50 cm d'ouverture et d'1-2 m de profondeur

Illustration 10 – Description des principales fissures au nord du point de vue du Maïdo



Réseau de fissure 1 : en bordure de rempart

Réseau de fissure 2 : distant d'une vingtaine de m du rempart

Photo A : vue aérienne du Sud des remparts du Maïdo



Photo B : fissure 16 de 0.5 à 1 m d'ouverture et de 4-5 m de profondeur



Photo C : fissure 17 de 50 cm d'ouverture et d' 1-2 m de profondeur

Illustration 11 – Description des principales fissures au sud du point de vue du Maïdo

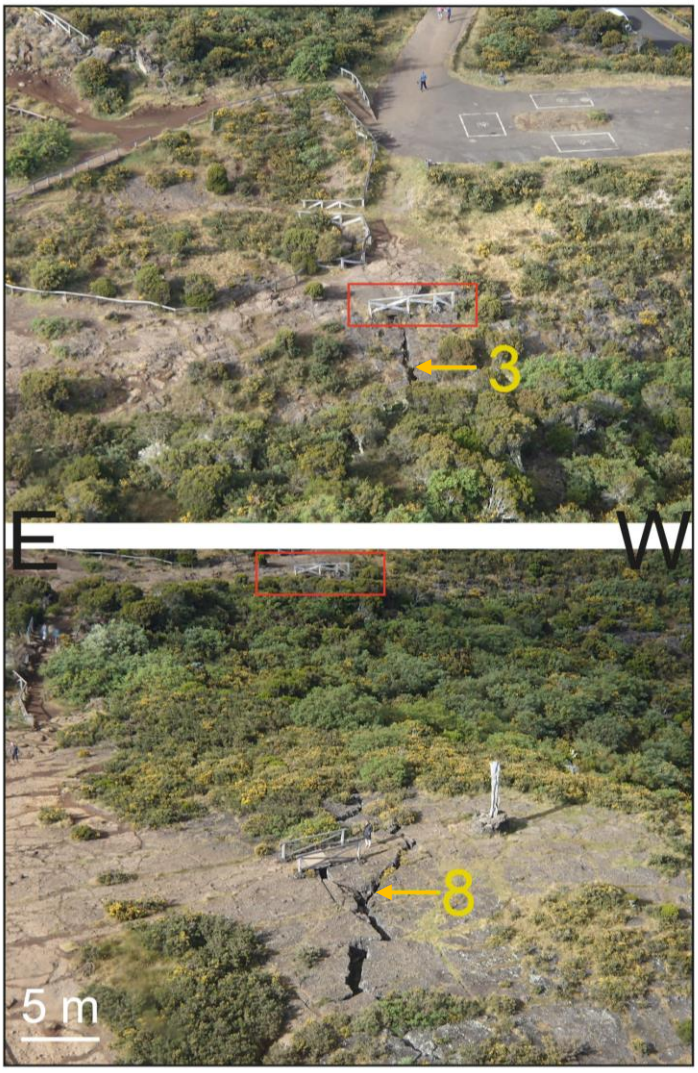


Photo A : vue aérienne des fissures distantes d'une vingtaine de m des remparts du Maïdo (suivi de la continuité)



Photo B : fissure 3 d'ouverture < 1 m et d'1 à 2 m de profondeur



Photo C : fissure 8 de 50 cm d'ouverture et d'1 m de profondeur

Illustration 12 – Description des principales fissures à proximité immédiate du point de vue le plus haut du Maïdo

3.2. AUSCULTATION DES FISSURES DES REMPARTS

Dans le cadre du projet de recherche MvTerre-1, un suivi des mouvements du rempart du Maïdo a été effectué par des dispositifs extensométriques entre octobre 2004 et juin 2008. Le site instrumenté se situait en bordure du rempart à environ 1 km sud-est du point de vue du Maïdo (Illustration 13).



Illustration 13 - Exemple de capteurs extensométriques en place et station d'acquisition du Maïdo dans son environnement
(Nedellec and Cruchet, 2008a)

Les dispositifs extensométriques ont parfaitement mis en évidence de légers déplacements réversibles engendrés par des contrastes thermiques entre le jour et la nuit (0,1 mm) ou saisonniers (1 mm). Au Maïdo, le dispositif extensométrique n'a pas montré pas de mouvement significatif des fissures, à l'exception des contrastes thermiques (Illustration 14). Aucune relation évidente n'a pu être observée entre les conditions pluviométriques et les mouvements.

Seul l'extensomètre MA04 a mesuré une fermeture de 8 mm en 4 années, sans que cela ne se retrouve ailleurs, y compris sur l'appareil placé latéralement sur la même discontinuité. Néanmoins, ce résultat conserve un caractère hypothétique. Il pourrait s'agir d'un début d'affaissement d'un panneau rocheux par amorce de rupture du pied et donc basculement du panneau, mais il convient de rester très prudent avec ce résultat isolé qui n'a pu être confirmé à ce jour.

Provisoire

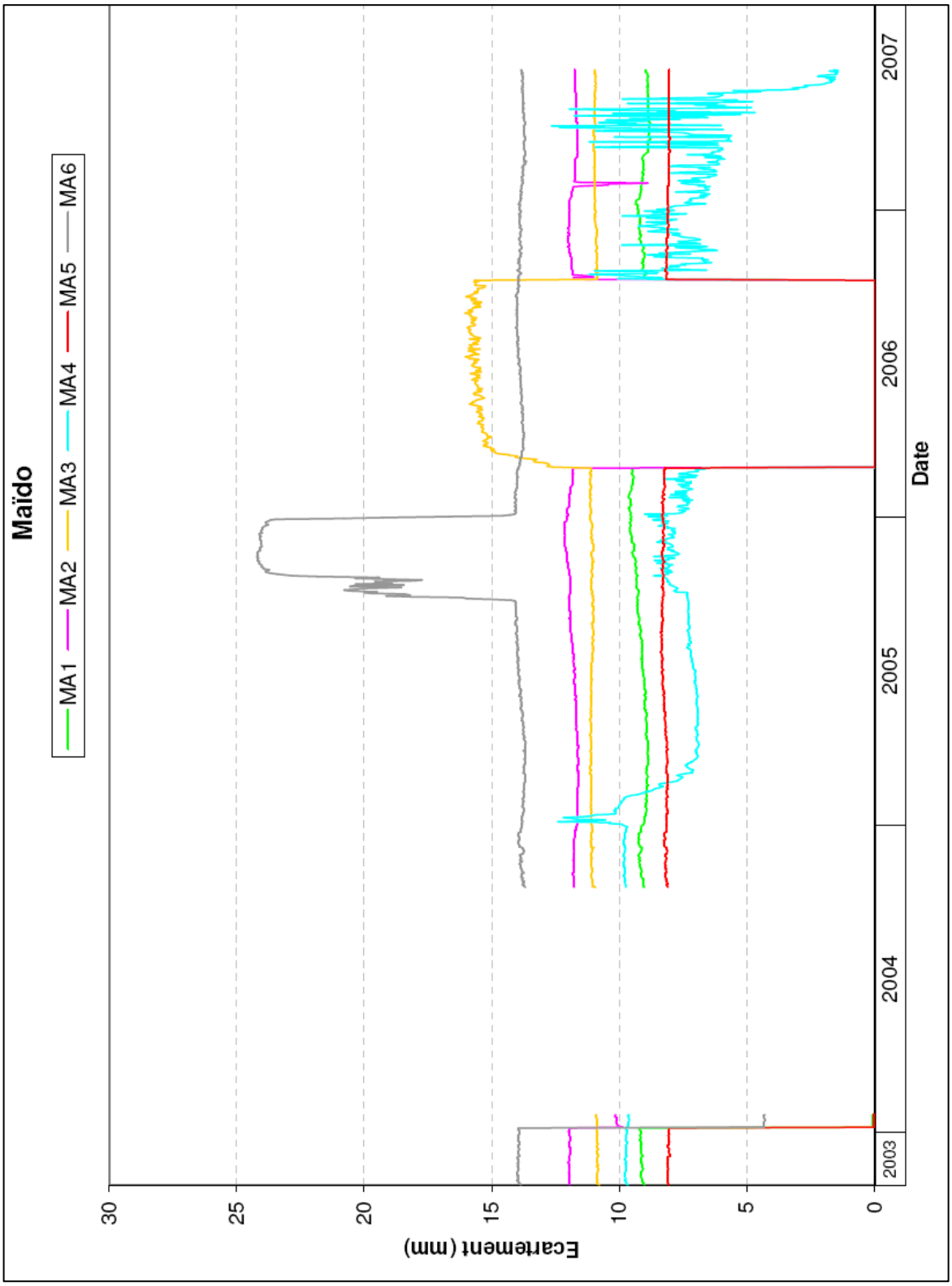


Illustration 14 - Déplacements mesurés sur les extensomètres du Maïdo dans le cadre du projet MvTerre-1. Les données sont relativement bruitées (présences d'artéfacts) et doivent être considérées avec prudence.

4. Cartographie du PPR sur le site du Maïdo

Au-delà de l'observation de fissures ouvertes, le PPR de la commune de Saint-Paul impose une réglementation en terme d'aménagement du site touristique du Maïdo.

Les observations réalisées in-situ et sur orthophotos sont reportées sur la cartographie de l'aléa mouvement de terrain et du PPR de la commune de Saint-Paul (voir § 2.5 Cadre règlementaire - p.11).

4.1. ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN

La quasi-totalité des fissures appartiennent à la zone d'aléa mouvement de terrain très élevé (illustration 15 et illustration 16), qui correspond, de manière empirique, à une bande de terrain dont la largeur L est de l'ordre de L = H/10, avec H = hauteur du rempart (voir § 2.6.4 - Développement de la fissuration - p. 14). Concrètement, la hauteur du rempart est de 1 000 m et l'emprise de l'aléa mouvement de terrain très élevé est de 100 m à partir de la bordure du rempart. Cette limite correspond d'ailleurs à la fissure la plus éloignée observée sur le site touristique du Maïdo.

Au-delà de la zone d'aléa mouvement de terrain très élevé, l'aléa mouvement de terrain élevé a été cartographié selon la règle empirique L = H/5, qui correspond à une zone où des fissures peuvent également être présentes d'après les analyses menées sur le cas des effondrement de rempart (Nedellec and Cruchet, 2008b). Aucune fissure n'a été observée dans cette zone d'aléa mouvement de terrain élevée pour le site touristique du Maïdo. Toutefois, les observations n'ont pas été exhaustives sur la zone en raison de l'importante surface à investiguer (de l'ordre de 4 hectares), de l'absence de sentier et du couvert végétal.

Enfin, une fine bande d'aléa moyen permet d'établir une transition entre l'aléa mouvement de terrain élevé et l'aléa faible.

La méthodologie évoquée ci-dessus est conforme à celle décrite dans le rapport « *PPR multi-aléas des communes de La Réunion. Propositions d'évolutions méthodologiques* - (Rey and Bielen, 2016) ».

4.2. PPR REGLEMENTAIRE

Les zones d'aléas mouvement de terrain élevé et très élevé sont traduites par une zone réglementaire rouge 1 (R1) au titre du PPR approuvé de la commune de Saint-Paul dont le principe général est l'inconstructibilité de nouveaux bâtiments, y compris les stationnements collectifs au niveau du terrain naturel. Les équipements légers et de loisirs et les aménagements associés (kiosques de pique-nique, sanitaires publics…) sont autorisés, sous réserve de la mise en place d'une information à l'attention des futurs utilisateurs sur l'existence de risques naturels et indiquant les mesures de prévention et de sauvegarde à respecter.

Les zones d'aléa mouvement de terrain moyen sont traduites par une zone réglementaire rouge 2 (R2) au titre du PPR approuvé de la commune de Saint-Paul dont le principe général est également l'inconstructibilité de nouveaux bâtiments. Certains aménagements sont néanmoins possibles dans ces secteurs.

Les interdictions et autorisations relatives à ces zones sont précisées dans le document « *Plan de prévention des risques naturels prévisibles - Inondations et mouvements de terrain - Règlement - Septembre 2016 – BRGM –DEAL* ». Ces informations ne sont pas reprises dans le présent rapport afin de ne pas dénaturer le niveau de détail des textes réglementaires[6].

[6] Le PPR (arrêté préfectoral, règlement, cartographies…) est consultable sur le site de la Préfecture http://www.reunion.gouv.fr/saint-paul-a234.html

Provisoire

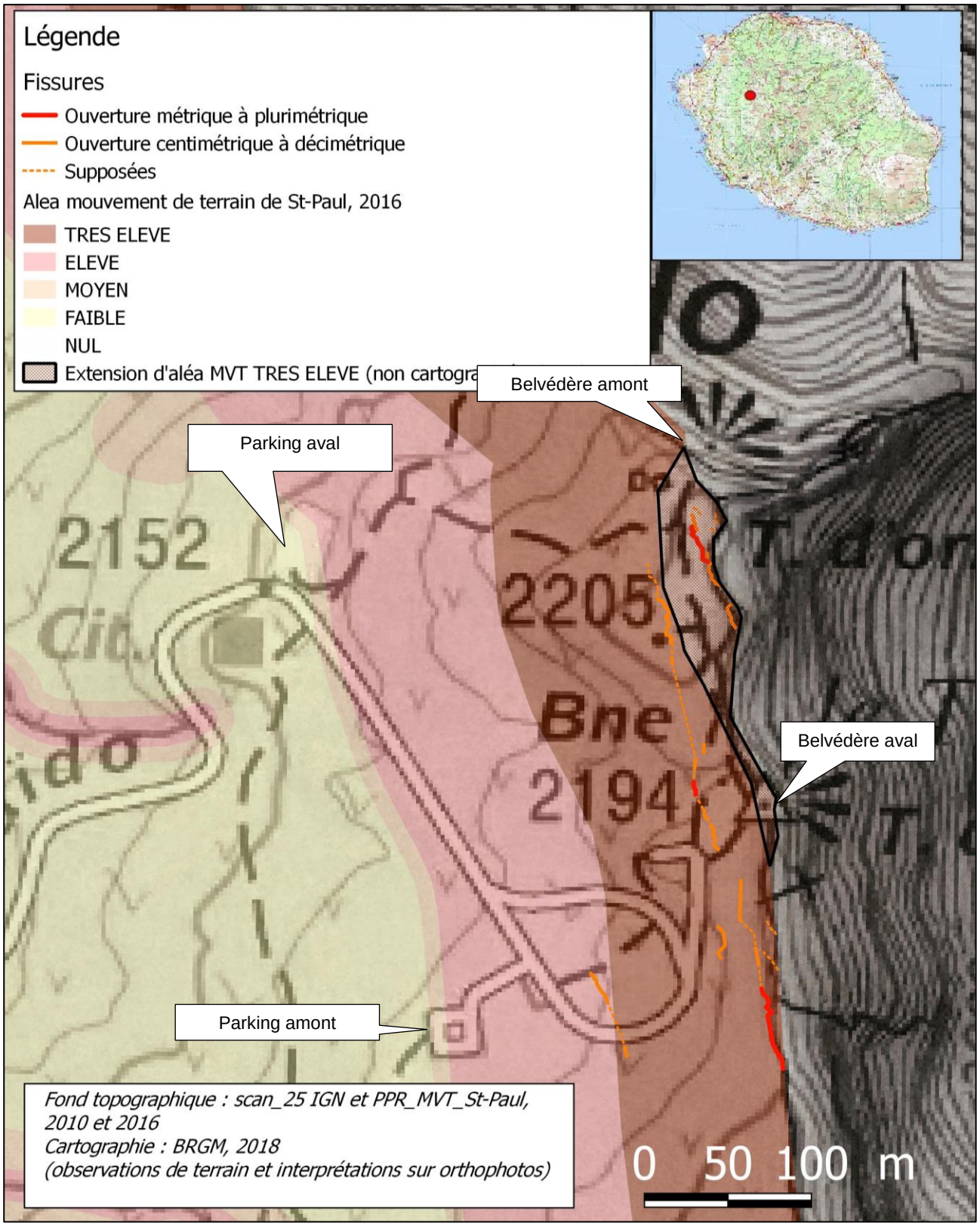


Illustration 15 – Fissures et aléa mouvements de terrain (scan 25K IGN©)

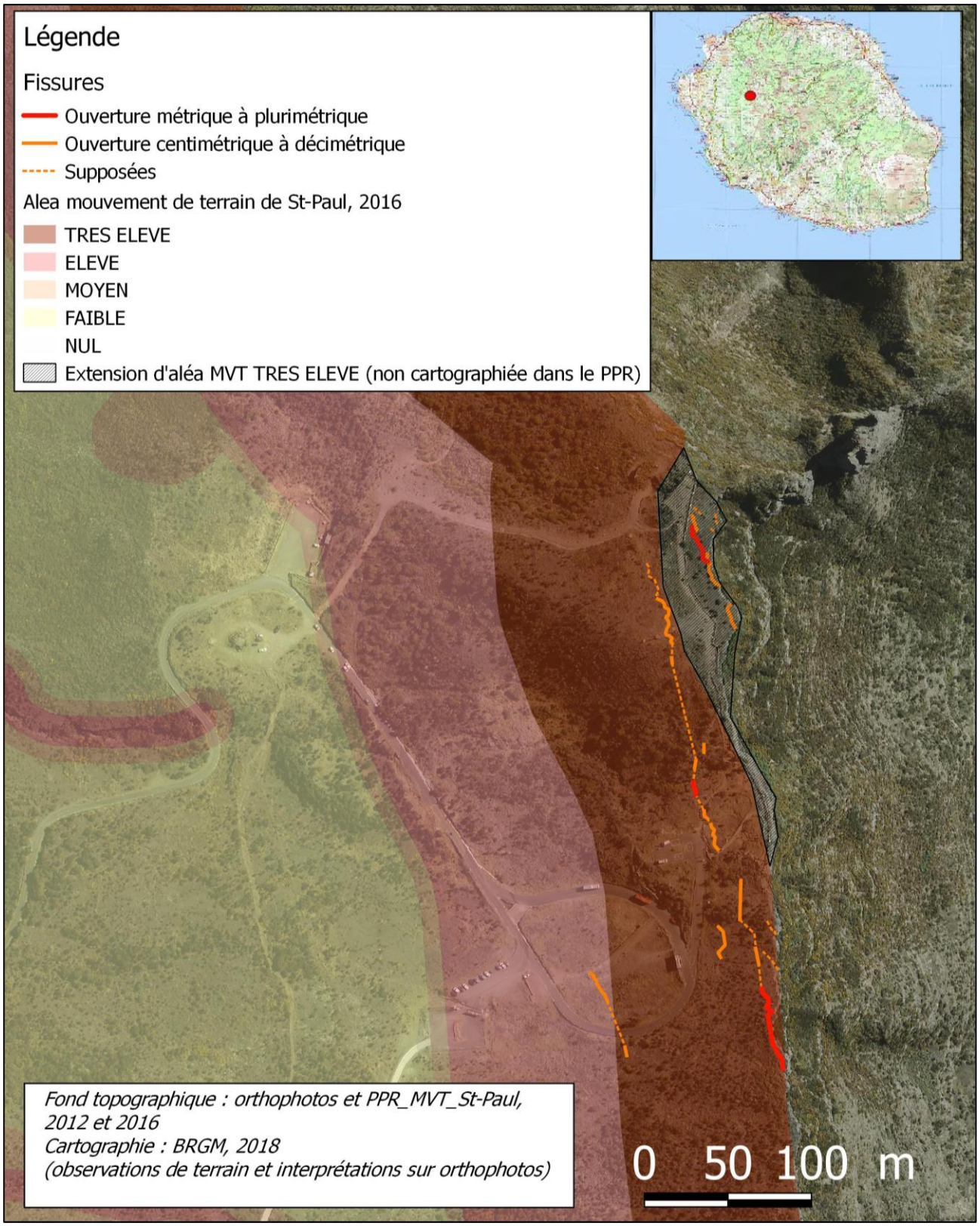


Illustration 16 – Fissures et aléa mouvements de terrain (orthophoto IGN©)

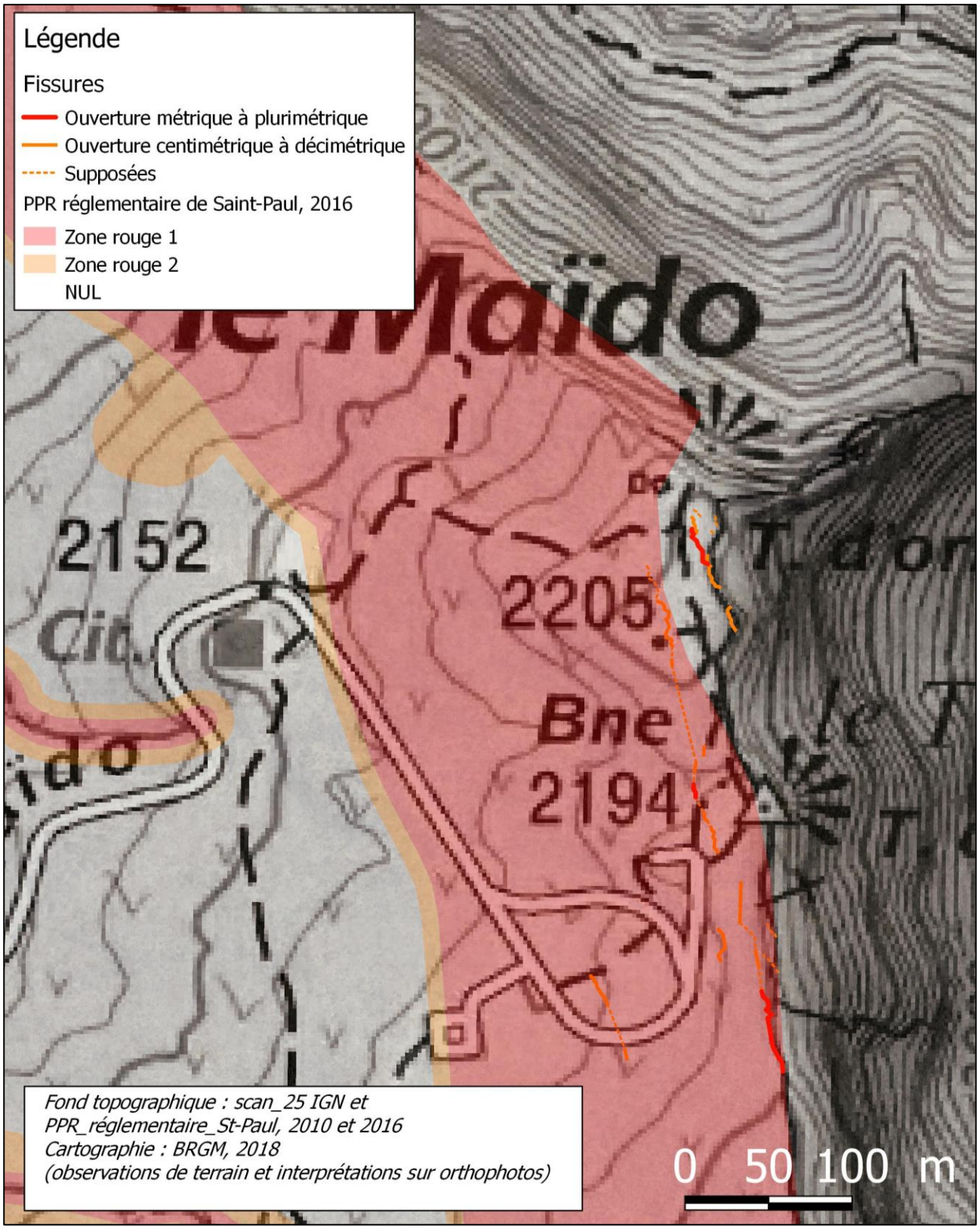


Illustration 17 – Fissures et zonage réglementaires du PPR de Saint-Paul (scan 25K IGN©)

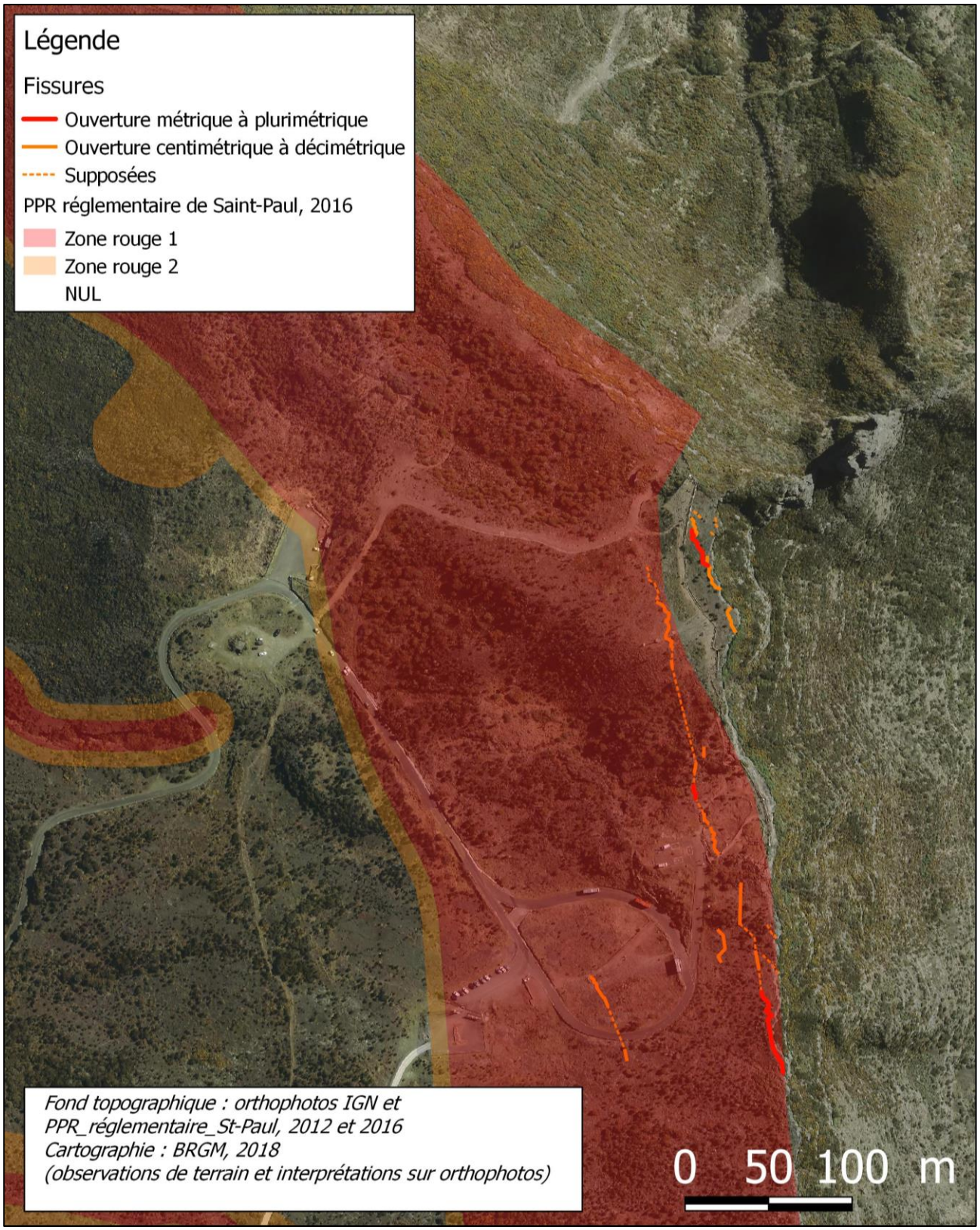


Illustration 18 – Fissures et zonage réglementaires du PPR de Saint-Paul (orthophoto IGN©)

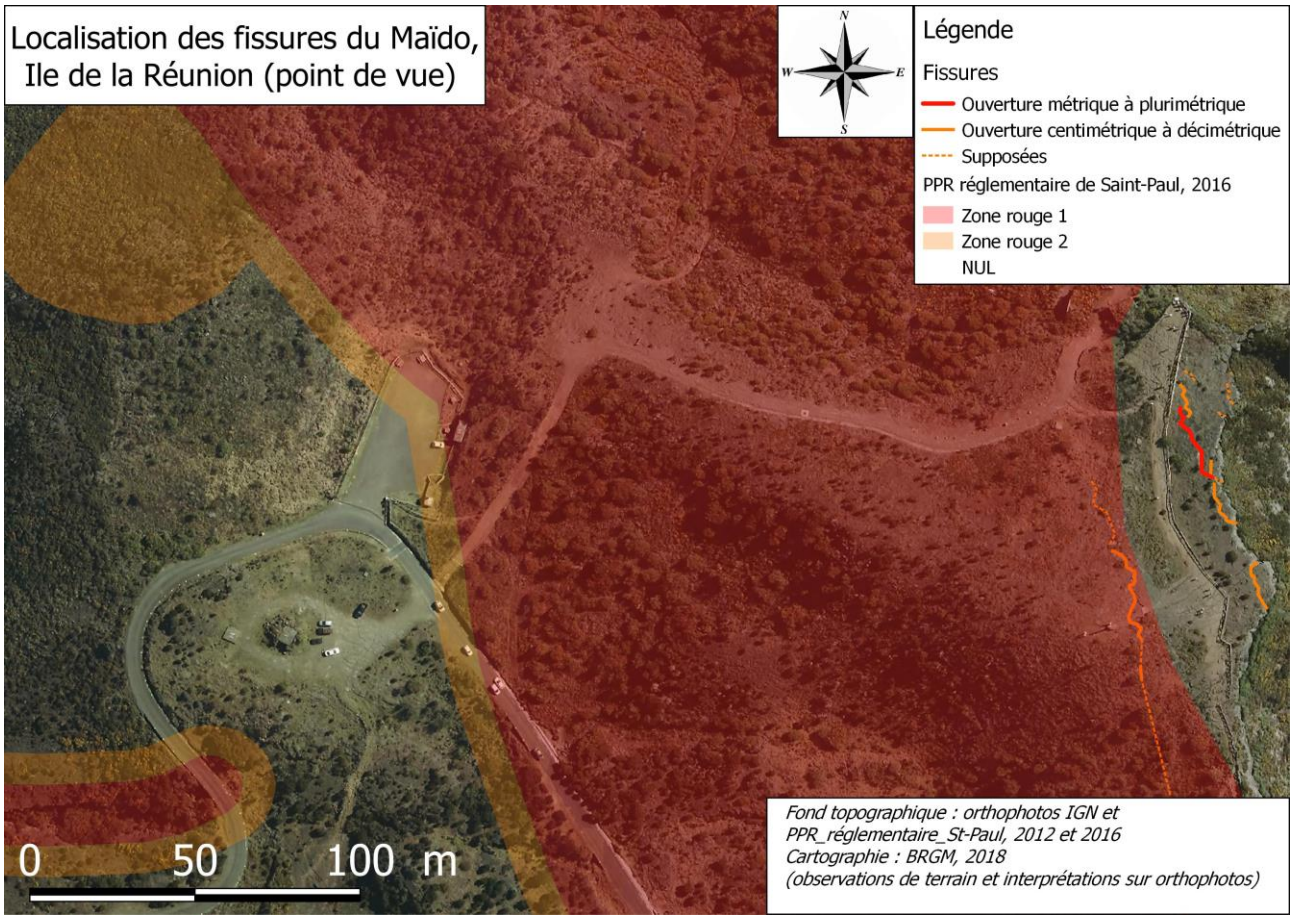


Illustration 19 – Fissures et zonage réglementaires du PPR de Saint-Paul (orthophoto IGN©)
Zoom sur le parking aval

5. Evaluation des risques au niveau du belvédère du Maïdo

Sur le site touristique du Maïdo, des indices de possible rupture à plus ou moins court terme ont été observés (fissures ouvertes en recul de la crête de rempart délimitant des compartiments instables). Ces observations réalisées à l'échelle du site du Maïdo sont en cohérence avec la cartographie du PPR qui est réalisée à l'échelle de la commune.

Les observations de terrain permettent de hiérarchiser les risques associés à deux réseaux de fissures distincts :

- Le réseau de fissure 1 (à proximité immédiate de la bordure du rempart - Illustration 10), délimite des compartiments qui sont peu connectés au rempart. L'échéance d'un effondrement de ces compartiments ne peut être déterminée précisément en l'absence d'un suivi adapté (Cruchet and Frissant, 2003). Toutefois, **il ne peut être exclu un effondrement à (très) court terme**[7] du fait que les compartiments s'individualisent[8] pour peser de plus en plus massivement sur leur assise rocheuse qui se démantèle, jusqu'à ce que ce niveau d'assise ne puisse plus supporter toute la masse en équilibre[9]. Les volumes concernés par ce type d'effondrement seraient de l'ordre de la **centaine à quelques centaines de m³** (éboulements en masse / éboulement majeur).
  Ce phénomène d'effondrement pourrait survenir lors de précipitations intenses, comme c'est très fréquemment le cas dans le contexte réunionnais, mais également lors de la saison sèche. A l'échelle du site touristique, seul le belvédère le plus élevé est concerné par la présence de ces compartiments rocheux. Ces derniers sont actuellement délimités par des barrières en bois discontinues. Bien qu'une signalisation du danger soit présente sur ce site, les barrières sont ponctuellement franchies par les touristes (signalisation en partie effacée ou masquée par la végétation) ;
- Le réseau de fissure 2 (Illustration 12), se développant à plusieurs dizaines de mètres de la bordure du rempart, présente un niveau de risque très élevé, mais néanmoins inférieur aux secteurs affectés par le réseau de fissure 1 (ci-dessus). La quasi-totalité de la zone touristique est concernée par ce réseau de fissure 2. Concrètement, les usagers du site franchissent les fissures afin d'accéder au point de vue, ce qui constitue la pratique normale au vue de l'aménagement actuel du site.
  L'échéance d'un effondrement de ces compartiments ne peut être déterminée précisément en l'absence d'un suivi adapté (Cruchet and Frissant, 2003). Les volumes concernés par ce type d'effondrement seraient de l'ordre de quelques Mm³ à plusieurs dizaines de Mm³ (éboulement en grande masse ou éboulement catastrophique).
  Bien que ce type de phénomène ait été observé environ 5 fois sur les 50 dernières années sur différents secteurs de La Réunion, il n'est pas envisageable de se prononcer sur une occurrence d'effondrement sur le secteur du Maïdo. L'échéance ne peut toutefois être exclue au cours des années à venir mais plus vraisemblable à l'horizon de quelques dizaines d'années voire du siècle.
  Il convient enfin de rappeler, que des signes précurseurs de risque imminent ont été observés avant l'éboulement en grande masse du Bras des Roches Noires (phénomènes gravitaires mineurs observés dans les mois qui ont précédé l'éboulement en grande masse - (Nedellec and Cruchet, 2008b)). De même, des phénomènes précurseurs sont observés en préalable aux éboulements en (grande) masse des falaises de craie en métropole. **Sur la base des connaissances actuelles**, on peut émettre l'hypothèse pour le site du Maïdo, que des signes précurseurs seraient observés dans les jours qui précèdent un phénomène d'effondrement en (grande) masse. Néanmoins, le risque que ces signes précurseurs

[7] Très court terme : quelques mois à 2 ans environ – Court terme : 5 à 10-20 ans

[8] Diminution des connexions latérales et longitudinales avec le rempart en fonction du temps

[9] Il s'agit là d'un mode de rupture possible, mais d'autres pourraient existent également.

passent inaperçus ne peut être écarté et il convient de rappeler la nécessité d'effectuer un suivi géologique de l'évolution du site.

6. Recommandations

Le présent diagnostic s'inscrit dans le cadre d'une étude, pilotée par l'ONF, qui vise à développer et améliorer les actuels aménagements du site du Maïdo.

Au vu de la hiérarchisation des risques résiduels exposés ci-dessus, il convient d'**interdire l'accès aux usagers du site au secteur affecté par le réseau de fissure 1**[10] (à proximité immédiate du belvédère le plus élevé - Illustration 20) par le renouvellement des barrières existantes et d'une signalisation adaptée (visible et explicite). A ce titre, les risques seront d'autant mieux perçus avec la présence de panneaux qui visent à expliquer pourquoi des fissures sont présentes sur ce site.

Les barrières existantes et la signalisation actuelle ne sont pas suffisamment efficaces dans la mesure où plusieurs usagers ont été remarqués au-delà du réseau de fissure 1 lors du présent diagnostic. L'emprise de la zone à interdire correspond à la zone déjà délimitée par les barrières existantes.

En ce qui concerne les secteurs affectés par le réseau de fissure 2, au vu des connaissances géologiques et de l'indéniable intérêt touristique du secteur, une démarche d'interdiction est difficilement soutenable et envisageable.

Toutefois, il peut être envisagé de mettre en place un **suivi des mouvements de terrain**[11] afin de bénéficier d'observations objectives sur l'évolution temporelle de la fissuration associée aux mouvements de terrain (Illustration 21). L'instrumentation mise en place devra être suffisamment robuste pour résister aux mauvaises conditions météorologiques et les données devront être traitées régulièrement afin de s'assurer de la stabilité des compartiments, mais également du bon fonctionnement des appareils.

Ce suivi du site devra être complété par la réalisation de diagnostics géologiques dans le cas où des mouvements de terrains (chute de blocs, ouvertures de fissures…) seraient observées. Un suivi périodique, notamment après d'importantes précipitations[12], peut être envisagé afin d'assurer un recensement systématique des événements gravitaires.

En outre, ce suivi pourrait être utilisé en vue d'une valorisation du contexte géologique (site géo-touristique).

[10] Au-delà du risque géologique relatifs aux mouvement de terrain, le risque de chute des usagers dans les fissures est existant.

[11] Une analyse des solutions techniques envisageables pour assurer le suivi devra être effectuée (extensomètre, inclinomètre, ou autre méthode innovante ?).

[12] Cyclone ou intensité des précipitations avec une période de retour supérieure à 10 ans.

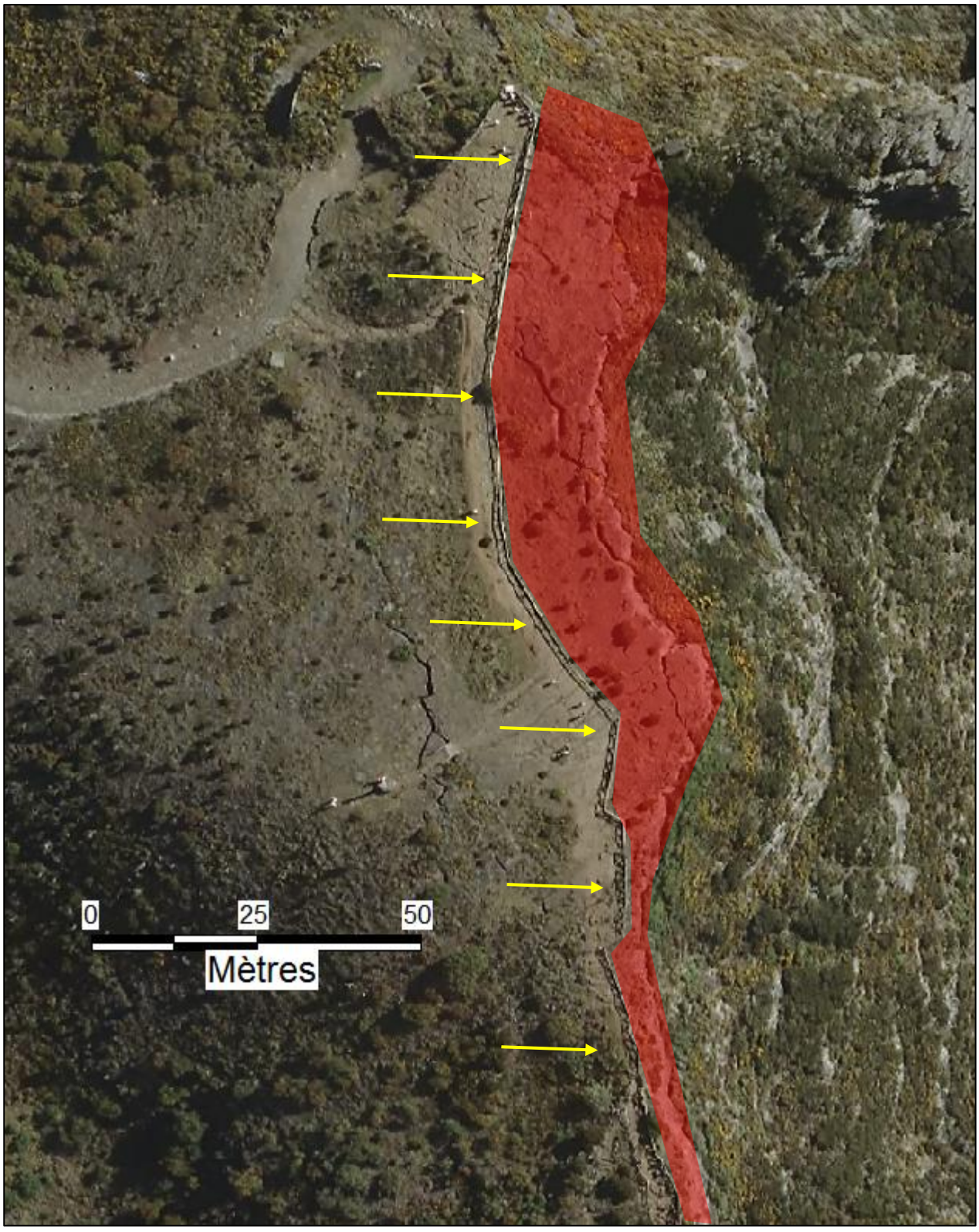


Illustration 20 – Localisation des barrières actuelles (flèches jaunes)
Zone dont l'accès dont être interdit en rouge

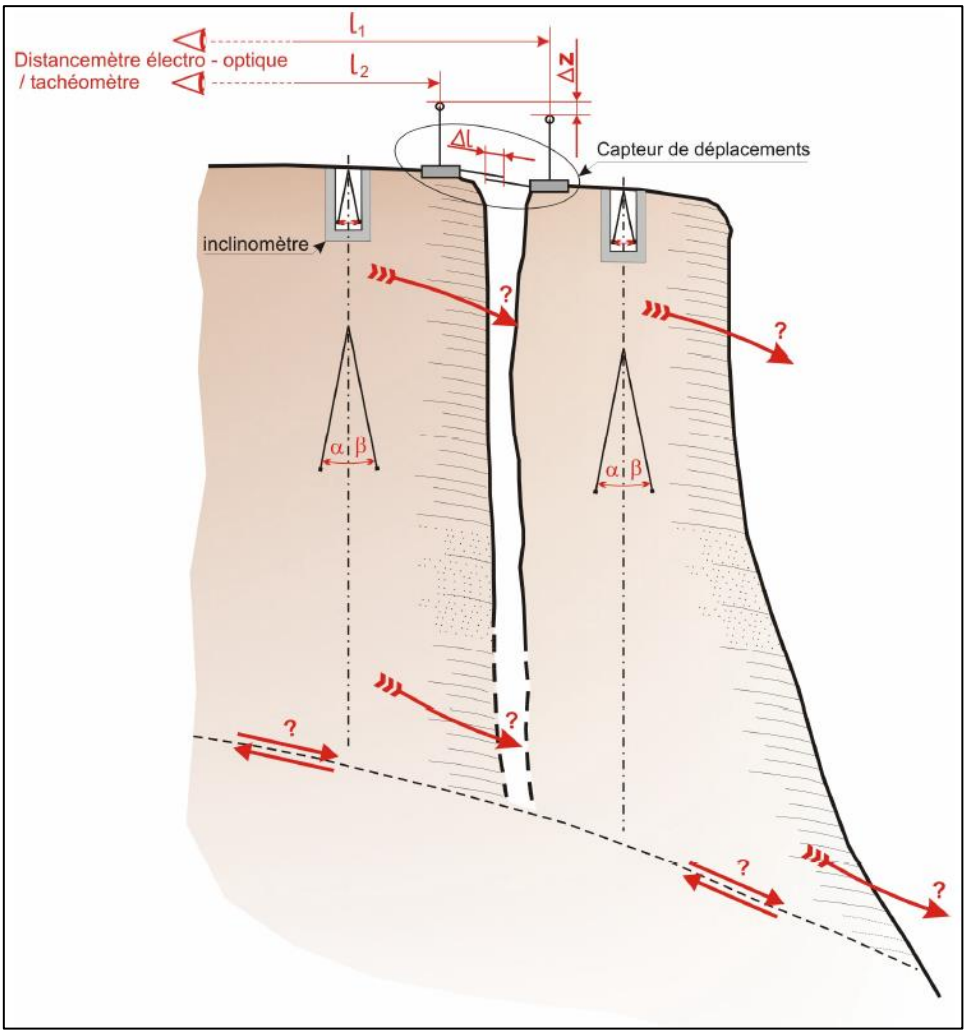


Illustration 21 - Schéma de principe de l'auscultation des remparts de La Réunion (Mathon, 2003)

7. Déclaration

Le BRGM déclare qu'il n'existe aucun lien d'intérêt :

- ***entre le BRGM et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise,***
- ***entre les salariés du BRGM qui seront impliqués et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise,***

susceptible de compromettre l'indépendance et l'impartialité du BRGM dans la réalisation de cette expertise.

8. Bibliographie

BRGM/LGSR, 2006. Carte géologique de la Réunion au 1/100 000.

Cruchet, M., Frissant, N., 2003. Suivi des déformations des remparts de La Réunion Présentation des dispositifs du Maïdo et de Mahavel (Rapport BRGM/RP-52939-FR).

Mathon, C., 2003. Auscultation des remparts de La Réunion - moyens à mettre en oeuvre (No. Rapport BRGM/RP-52887-FR).

Nedellec, J.-L., Cruchet, M., 2008a. Analyse de la fracturation et suivi des mouvements des remparts du Maïdo et de Mahavel par dispositif extensométrique (No. Rapport BRGM/RP-56724-FR).

Nedellec, J.-L., Cruchet, M., 2008b. Analyse des modes d'effondrement en masse sur plusieurs sites de La Réunion (No. Rapport BRGM/RP-56729-FR).

Nedellec, J.-L., Cruchet, M., 2003. Typologie des éboulements rocheux et des modes de rupture associés. Etude bibliographique Applications au contexte de l'île de La Réunion (Rapport BRGM/RP-52909-FR).

Rey, A., Bielen, O., 2016. PPR multi-aléas des communes de La Réunion. Propositions d'évolutions méthodologiques. Rapport final (No. Rapport BRGM/RP-66346-FR). BRGM.

http://www.mi-aime-a-ou.com/histoire_annee_1875.php

Provisoire



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

Direction Régionale La Réunion
5, rue Sainte Anne - CS 51016
97404 Saint-Denis Cedex
Tel. : 02 62 21 84 86