



Document public

DOCUP 2002-2006

Cadre d'intervention C5-03

Projet de recherche :
Les mouvements de terrain de grande ampleur
dans les cirques et les grandes ravines de La Réunion

Module 3 : Dynamique des mouvements de terrain
de grande ampleur
Sous module 3.2 : Dynamique des remparts

Analyse de la fracturation et suivi des mouvements des remparts du Maïdo et de Mahavel par dispositif extensométrique

Rapport

BRGM/RP-56724-FR

Octobre 2008

1.89 3740.46 -625.5





Analyse de la fracturation et suivi des mouvements des remparts du Maïdo et de Mahavel par dispositif extensométrique

Rapport

BRGM/RP-56724-FR

octobre 2008

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Recherche du BRGM RISR15

JL. Nédellec, M. Cruchet
Avec la collaboration de L. Françoise

Vérificateur :

Nom : C. Garnier

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : M. Beurrier

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : La Réunion, mouvement de terrain, effondrements, éboulements, remparts, fissures, instrumentation, extensomètres

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

Nédellec JL, M. Cruchet - 2008 – *"Analyse de la fracturation et suivi des mouvements des remparts du Maïdo et de Mahavel par dispositifs extensométriques"* – rapport BRGM RP-56724-FR – 58 p. – 39 illustrations – 2 annexes

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le sous-module 3.2 du programme MVTERRE (Programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion) prévoit l'étude de la dynamique des mouvements en masse des grands remparts de La Réunion. Dans ce cadre, les remparts du Maïdo et de Mahavel, approchant 1000 m de hauteur, ont fait l'objet d'une part d'un levé et d'une analyse de la fissuration en crête des remparts, et d'autre part d'une instrumentation par une série d'extensomètres permettant de mesurer quotidiennement l'écartement des principales fissures présentes en tête de paroi.

L'objectif de ce sous-module était de mieux apprécier le mode de fonctionnement des effondrements en masse affectant les grands remparts.

L'étude et le suivi pendant 4 années de la fissuration en tête des parois de Mahavel et du Maïdo ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- les grands remparts de la Réunion (de l'ordre de 1000 m de hauteur), constitués d'un vaste empilement de coulées volcaniques sub-tabulaires, sont découpés par des fissures en arrière de la tête de paroi, subparallèles à cette dernière. L'origine de ces fissures de traction, quasi verticales en surface, est liée à la décompression naturelle du massif. Il a été constaté sur d'autres sites 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 ;
- ces fissures, dont l'ouverture est généralement inférieure à 50 cm, peuvent parfois atteindre 4 m de largeur, les discontinuités les plus larges étant principalement placées à proximité immédiate du rempart ;
- les fissures se placent essentiellement dans une bande de terrain dont la largeur depuis la crête de paroi est de l'ordre de 1/10 de la hauteur totale du rempart. Pour les parois plus anciennes (n'ayant pas été affectées par des éboulements en masse depuis plusieurs décennies ou plusieurs siècles), des fissures plus étroites et plus rares se développent jusqu'à une distance de l'ordre de 1/5 de la hauteur totale du rempart ;
- sur les 2 sites instrumentés, 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 ne montre pas de mouvement significatif des fissures, à l'exception des contrastes thermiques. 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 traduit peut-être un début d'affaissement d'un panneau rocheux par amorce de rupture du pied, mais il convient de rester prudent avec ce résultat isolé qui reste à confirmer ;

- à Mahavel, 4 extensomètres sur 7 ont enregistré pendant 2 années une lente ouverture progressive de l'ordre de 1 mm. Les 3 autres extensomètres ne montrent pas de mouvement significatif des fissures, à l'exception des contrastes thermiques. Ce rempart, "plus jeune", est peut-être dans une phase plus active de fissuration qu'au Maïdo avec ouverture plus rapide du massif par effet de décompression ;
- aucune relation directe n'a pu être mise en évidence entre résultats extensométriques et pluies quotidiennes enregistrées à proximité des sites. Toutefois, au regard des pluies exceptionnelles enregistrées à Mahavel en janvier 2001, deux semaines avant l'éboulement de 1 Mm³, on ne peut exclure que les eaux souterraines aient indirectement une action déstabilisatrice vis-à-vis d'une configuration déjà très proche de la rupture, et de toute façon vouée à un effondrement à court ou moyen terme ;
- le mode de déstabilisation à l'origine des vastes effondrements est assimilable à une rupture de l'assise de la colonne rocheuse sous le poids de cette dernière. En effet, lentement la fracturation se développe en profondeur sous l'action de la décompression et de la fatigue de la roche. De plus, la forme légèrement concave des fissures conduit progressivement à réduire les dimensions de l'assise de la colonne rocheuse. Le processus se poursuit jusqu'à ce que la contrainte verticale sur l'assise excède la résistance de cette dernière. La rupture est alors assimilable à un essai de compression axial sur échantillon avec développement d'une fracture oblique par rapport à la verticale. Les critères de rupture sont d'autant plus rapidement atteints que l'assise rocheuse est déjà préfracturée ou altérée. Dans ce cadre, les eaux souterraines en fragilisant un peu plus le système peuvent être le déclencheur par anticipation de l'effondrement ;
- le site de Mahavel présente, entre autres, pour singularité d'être affecté par une discordance de séries volcaniques à mi-rempart, les coulées inférieures ayant un pendage d'environ 30° vers l'aval. Cette configuration constitue clairement un facteur permanent favorable au développement d'éboulements en très grande masse, l'assise des écailles étant plus instable.

Ces actions du programmes de recherche MVTERRE ont donc permis d'améliorer la connaissance de la dynamique des grands remparts de La Réunion. Cependant, de nombreuses "zones d'ombre" subsistent et invitent à poursuivre ces recherches :

- poursuite du suivi des déplacements de fissure, en ayant peut être l'opportunité de suivre une amorce réelle de rupture de panneau ;
- complément d'instrumentation : par exemple suivi topographique sur le plateau et dans le rempart, pose d'inclinomètres ;
- complément d'investigation : profils géophysiques afin de repérer la profondeur des fissures ;
- meilleure compréhension de l'action des eaux souterraines sur l'initiation de la rupture.

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	8
2. PRESENTATION DES SITES ETUDIES	9
2.1. Rempart du Maïdo	9
2.1.1. Localisation	9
2.1.2. Morphologie	10
2.1.3. Géologie.....	12
2.1.4. Climat.....	13
2.1.5. Historique d'effondrements.....	14
2.2. Rempart de Mahavel	15
2.2.1. Localisation	15
2.2.2. Morphologie	16
2.2.3. Géologie.....	18
2.2.4. Climat.....	19
2.2.5. Historique d'effondrements.....	20
3. ANALYSE DE LA FISSURATION	21
3.1. Généralités	21
3.2. Site du Maïdo	21
3.2.1. Repérage de fissures	21
3.3. Site de Mahavel.....	26
3.3.1. Repérage de fissures	26
4. SUIVI PAR DISPOSITIF EXTENSOMETRIQUE	30
4.1. Site du Maïdo	30
4.1.1. Présentation du dispositif extensométrique	30
4.2. Site de Mahavel.....	36
4.2.1. Présentation du dispositif extensométrique	36
4.3. Résultats extensométriques et analyse du suivi	41
4.3.1. Difficultés rencontrées sur les deux sites.....	41
4.3.2. Résultats au rempart du Maïdo	41
4.3.3. Résultats au rempart de Mahavel.....	45
4.3.4. Interprétation	48
5. CONCLUSION.....	55

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation générale du rempart du Maïdo et de la zone d'étude (fonds IGN 1/100 000 & 1/25 000)	9
Illustration 2 – Positionnement de la zone d'étude (fond IGN 1/25 000).....	10
Illustration 3 – Tracé de la crête du rempart du Maïdo	11
Illustration 4 – Vue générale du rempart du Maïdo	12
Illustration 5 – Localisation de la station météorologique du Maïdo	13
Illustration 6 – Localisation générale du rempart de Mahavel (fond IGN 1/100 000 & 1/25 000)	15
Illustration 7 – Positionnement de la zone d'étude à Mahavel (fond IGN 1/25 000)	16
Illustration 8 – Tracé de la crête du rempart de Mahavel (orthophoto IGN)	17
Illustration 9 – Vue générale du rempart de Mahavel (cliché de 2002).....	18
Illustration 10 – Localisation de la station météorologique du Commerson ((fond IGN 1/100 000) ...	19
Illustration 11 – Disposition en plan des fissures par rapport au rempart du Maïdo	23
Illustration 12 – Fissure d'ouverture métrique sur le site du Maïdo	24
Illustration 13 – Fissure d'ouverture décimétrique sur le site du Maïdo.....	24
Illustration 14 – Distribution de l'ouverture des fissures en fonction de leur éloignement du rempart	25
Illustration 15 – Répartition de la position des fissures par rapport à la crête de rempart.....	25
Illustration 16 – Disposition en plan des fissures par rapport au rempart de Mahavel(fond BD topo IGN avant effondrement de 2001)	27
Illustration 17 – Exemple de fissure récente sur le site de Mahavel.....	28
Illustration 18 – Relation entre ouverture des fissures et distance au rempart.....	28
Illustration 19 – Répartition de la position des fissures par rapport à la crête de rempart.....	29
Illustration 20 – Positionnement des extensomètres et de la centrale d'acquisition	32
Illustration 21 – Capteurs extensométriques avant branchement.....	33
Illustration 22 – Rotules de fixation des capteurs.....	33
Illustration 23 – Exemple de capteur extensométrique en place	34
Illustration 24 – Station du Maïdo dans son environnement	34
Illustration 25 – Station du Maïdo.....	35
Illustration 26 – Recul du rempart de Mahavel en 1996 et 2001 (orthophoto IGN 2003)	37
Illustration 27 – Positionnement des extensomètres et de la centrale d'acquisition	38
Illustration 28 – Exemple de capteur extensométrique en place	39
Illustration 29 – Station de Mahavel dans son environnement	39
Illustration 30 – Station de Mahavel	40
Illustration 31 – Déplacements mesurés sur les extensomètres du Maïdo	42
Illustration 32 – Comparaison pluies / déplacement sur les extensomètres du Maïdo.....	44
Illustration 33 – Déplacements mesurés sur les extensomètres de Mahavel.....	46
Illustration 34 – Comparaison pluies / déplacement sur les extensomètres de Mahavel	47
Illustration 35 – Pluies journalières enregistrées à la station météorologique de Commerson en janvier 2001 (© Météo-France)	49
Illustration 36 – Pluies mensuelles enregistrées à la station météorologique de Commerson en 2001 (© Météo-France)	50
Illustration 37 – Schéma de principe de rupture de pied.....	51
Illustration 38 – Coupe schématique interprétative du rempart du Maïdo	53
Illustration 39 – Coupe schématique interprétative du rempart de Mahavel (schéma inspiré de P. Mairine : « La route du volcan, découverte de la Fournaise ancienne : Itinéraire géologique » 1998)	54

1. Introduction

Dans le cadre d'intervention C5.03 du DOCUP (soutenir la recherche et le développement sur les phénomènes de risques naturels), le BRGM s'est engagé dans la réalisation d'un programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion (programme MVTerre).

Le sous-module 3.2 du programme prévoit l'étude de la dynamique des mouvements en masse des grands remparts de La Réunion, escarpements rocheux qui délimitent les cirques et les grands canyons ("ravines") et dont les hauteurs peuvent approcher 1200 m.

Dans ce cadre, les remparts du Maïdo et de Mahavel ont fait l'objet d'une part d'un levé et d'une analyse de la fissuration en crête des remparts, et d'autre part d'une instrumentation par une série d'extensomètres permettant de suivre quotidiennement l'écartement des principales fissures présentes en tête de paroi. Le choix de ces sites a d'abord été motivé par l'existence d'un réseau de vastes fissures sur chacun d'eux, dans des secteurs d'altitude où la végétation est peu développée. De plus, il a paru essentiel de rechercher des contextes différents pour tenter de comprendre les mécanismes de déformation affectant ces escarpements. En effet, le rempart du Maïdo est représentatif des grandes parois délimitant les cirques du massif du Piton des Neiges. Il est peu actif, aucun éboulement, récent, en grande masse n'y a été recensé. A l'opposé, le site de Mahavel est situé à l'amont d'une grande ravine, la rivière des Remparts, qui entaille le massif volcanique du Piton de La Fournaise. Ce dernier est très actif et a été le siège de nombreux éboulements de grande ampleur, en 1911, 1965, 1996 et 2001.

Les objectifs de ce programme d'analyse de la fracturation, d'instrumentation et de suivi consistent à analyser l'évolution de ces fissures dans le temps afin de mieux apprécier le mode de fonctionnement de ces instabilités. A ce titre, une des finalités de ce sous-module est de rechercher une éventuelle relation entre ouverture des fissures et pluviométrie dans le secteur.

2. Présentation des sites étudiés

2.1. REMPART DU MAÏDO

2.1.1. Localisation

Le rempart du Maïdo domine le cirque de Mafate sur sa face Ouest (cf. Illustration 1). Il se situe sur la commune de Saint-Paul. On y accède depuis le littoral ouest, par la route du Maïdo, puis par des sentiers gérés par l'Office National des Forêts.



Illustration 1 – Localisation générale du rempart du Maïdo et de la zone d'étude (fonds IGN 1/100 000 & 1/25 000)

Le site plus particulièrement étudié (repérage de fissures et instrumentation par extensomètres) est localisé sur une bande de 100 à 200 m de largeur en crête de rempart, s'étendant sur environ 1,5 km vers le Sud-est depuis le belvédère touristique du Maïdo (cf. Illustration 2). Il est placé vers une altitude de + 2 250 m NGR.

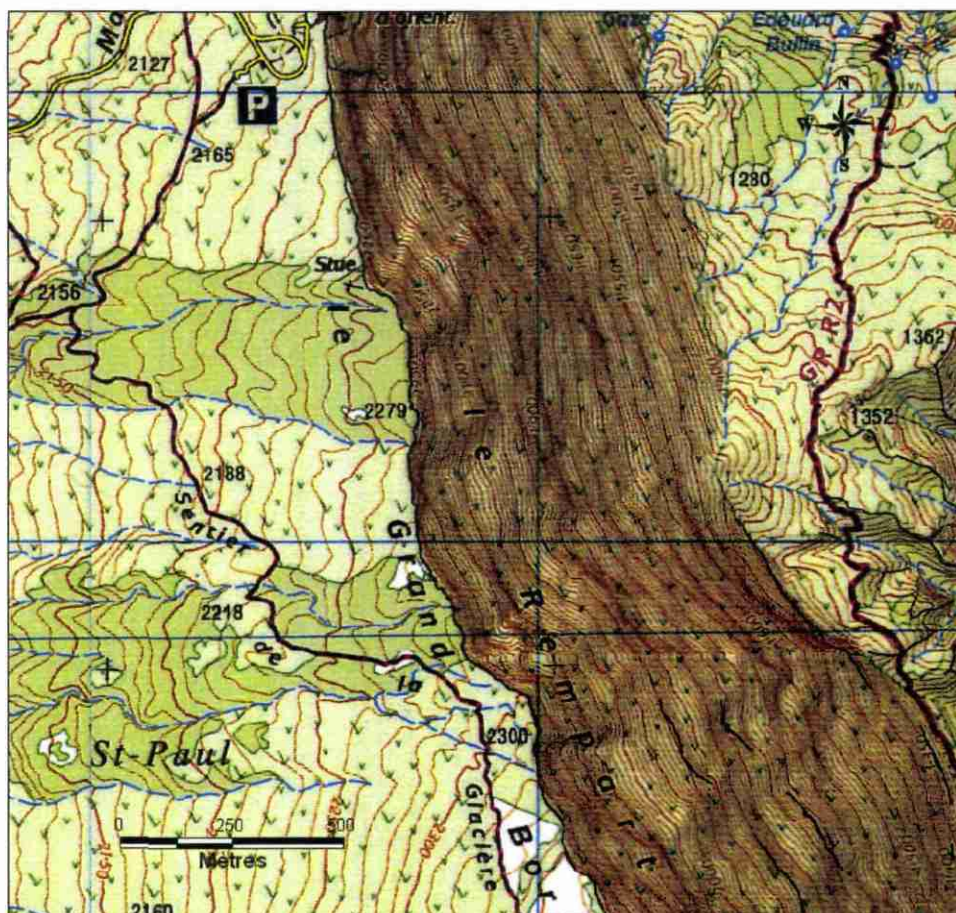


Illustration 2 – Positionnement de la zone d'étude (fond IGN 1/25 000)

2.1.2. Morphologie

Le rempart, dénommé le Grand Bord, présente une orientation globalement Nord-Ouest / Sud-est. Il s'étend sur plus de 13 km de longueur, passant par le Piton des Orangers (alt. 1944 m) jusqu'au Grand Bénare (alt. 2898 m).

Au Sud du Piton Maïdo, le tracé du rempart diffère singulièrement de celui de Mahavel par son caractère "relativement" rectiligne (cf. Illustration 3). En effet, ne s'y retrouvent pas les grandes formes en arc de cercle pouvant témoigner de vastes effondrements relativement récents. A l'opposé, au Nord du Piton Maïdo, des formes concaves successives apparaissent au niveau des crêtes, les rayons de courbure variant entre 0,5 et 1,5 km.

La hauteur moyenne du rempart est de 1 000 m. Elle croît du Nord vers le Sud, de 900 m au droit du belvédère touristique du Maïdo à 1 200 m sous le Grand Bénare.

La pente moyenne de l'escarpement est assez élevée, de l'ordre 55° . Cependant on remarquera en tête du rempart une frange plus redressée (70 à 80°) dont la hauteur n'excède généralement pas 30 m, constituée par une épaisse coulée de lave (cf. Illustration 4).

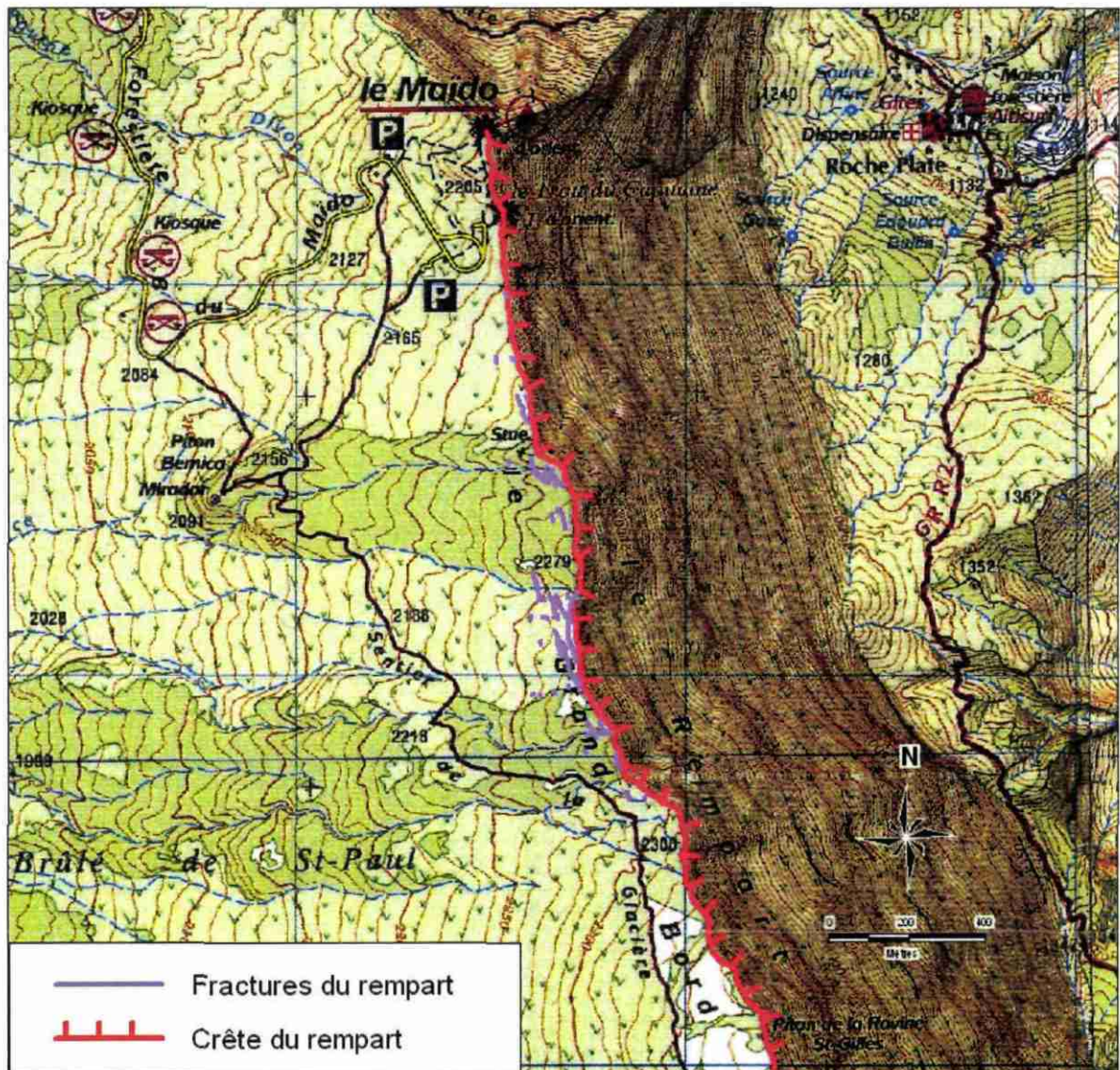


Illustration 3 – Tracé de la crête du rempart du Maïdo



Illustration 4 – Vue générale du rempart du Maïdo

2.1.3. Géologie

Le rempart du Maïdo est constitué d'un empilement métrique de coulées de lave et de couches de scories inclinées selon un pendage de 5 à 10 ° vers l'ouest (vers l'océan).

Depuis la base vers le sommet, la succession géologique décrivant le rempart est la suivante :

- série volcanique de la phase II du massif du Piton des Neiges (2 100 000 ans à 430 000 ans), essentiellement composée de coulées de basalte à olivine (Carte géologique G. Billard, 1974) ;
- série volcanique de la phase III du massif du Piton des Neiges (350 000 ans à 250 000 ans), constituée de coulées basaltiques et andésitiques à phénocristaux de feldspath (Carte géologique G. Billard, 1974) ;
- une coulée de lave plus épaisse coiffe les précédentes séries (Illustration 4). Son épaisseur peut dépasser localement 25 m. Son âge serait de 221 000 ans (Kieffer *et al* 1993) ;
- ces coulées sont recouvertes par « la dalle soudée », coulée formée de fragments de lave, emballée dans un ciment compact. Cette formation est conservée dans les dépressions.

2.1.4. Climat

Une station météorologique a été implantée en 1976 à proximité immédiate du belvédère du Maïdo. Les précipitations cumulées annuelles moyennes approchent 1 500 mm, avec un record mensuel excédant 3 000 mm et un record de pluies quotidiennes de l'ordre de 1 000 mm.

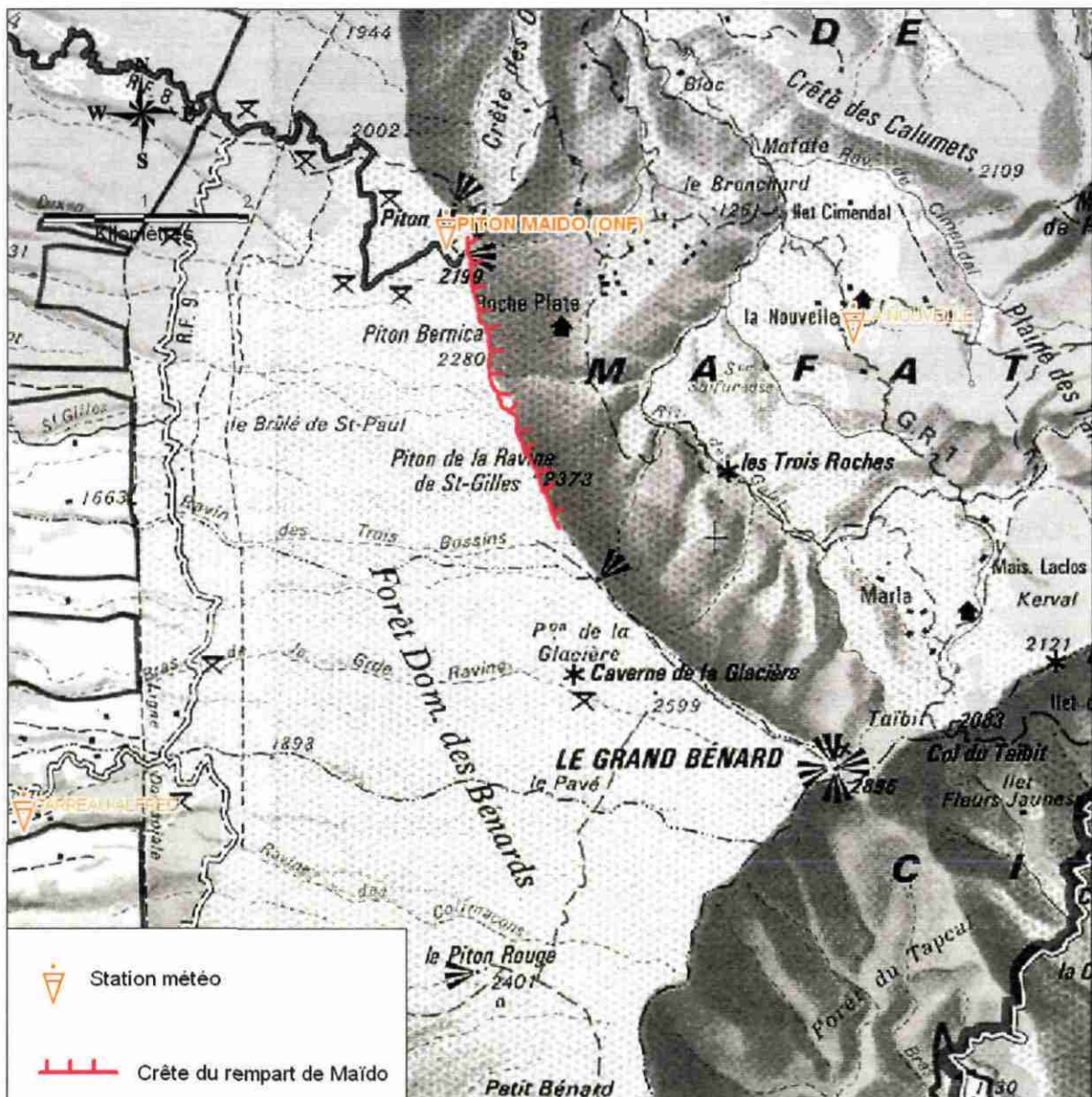


Illustration 5 – Localisation de la station météorologique du Maïdo et de la Nouvelle (cirque de Mafate).

Les températures des hautes planèzes à plus de 2 000 m d'altitude se singularisent par des contrastes relativement importants :

- en Aout (hiver austral) :
 - o température minimale moyenne de + 4° C
 - o température maximale moyenne de + 14° C
- en février (été austral) :
 - o température minimale moyenne de + 12° C
 - o température maximale moyenne de + 20° C

Il n'est pas rare d'observer du gel en hiver à cette altitude, et dans la même journée en début d'après midi, des températures dépassant +25° C au soleil.

2.1.5. Historique d'effondrements

Le dépouillement des archives publiques, et l'interrogation de riverains demeurant à proximité du pied du rempart, dans le cirque de Mafate, n'ont pas conclu en l'existence récente d'effondrements en masse au niveau du rempart du Maïdo. Des éboulis assez récents sont visibles en pied de versant, mais ils ne témoignent pas d'effondrement en masse de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes.

Ceci est en accord avec le tracé de la majorité de la crête du rempart qui est plutôt rectiligne au Sud du Piton Maïdo. La concordance est moins évidente au Nord du Piton Maïdo, ce dernier secteur étant peut être plus actif.

2.2. REMPART DE MAHAVAL

2.2.1. Localisation

Le rempart de Mahavel se situe au sein du massif du Piton de La Fournaise, sur la commune de Saint-Joseph (cf. Illustration 6). Il surplombe le Bras de Mahavel qui rejoint la rivière des Remparts. On y accède par la route du volcan depuis la Plaine des Cafres (RN3), puis par un sentier de randonnée.

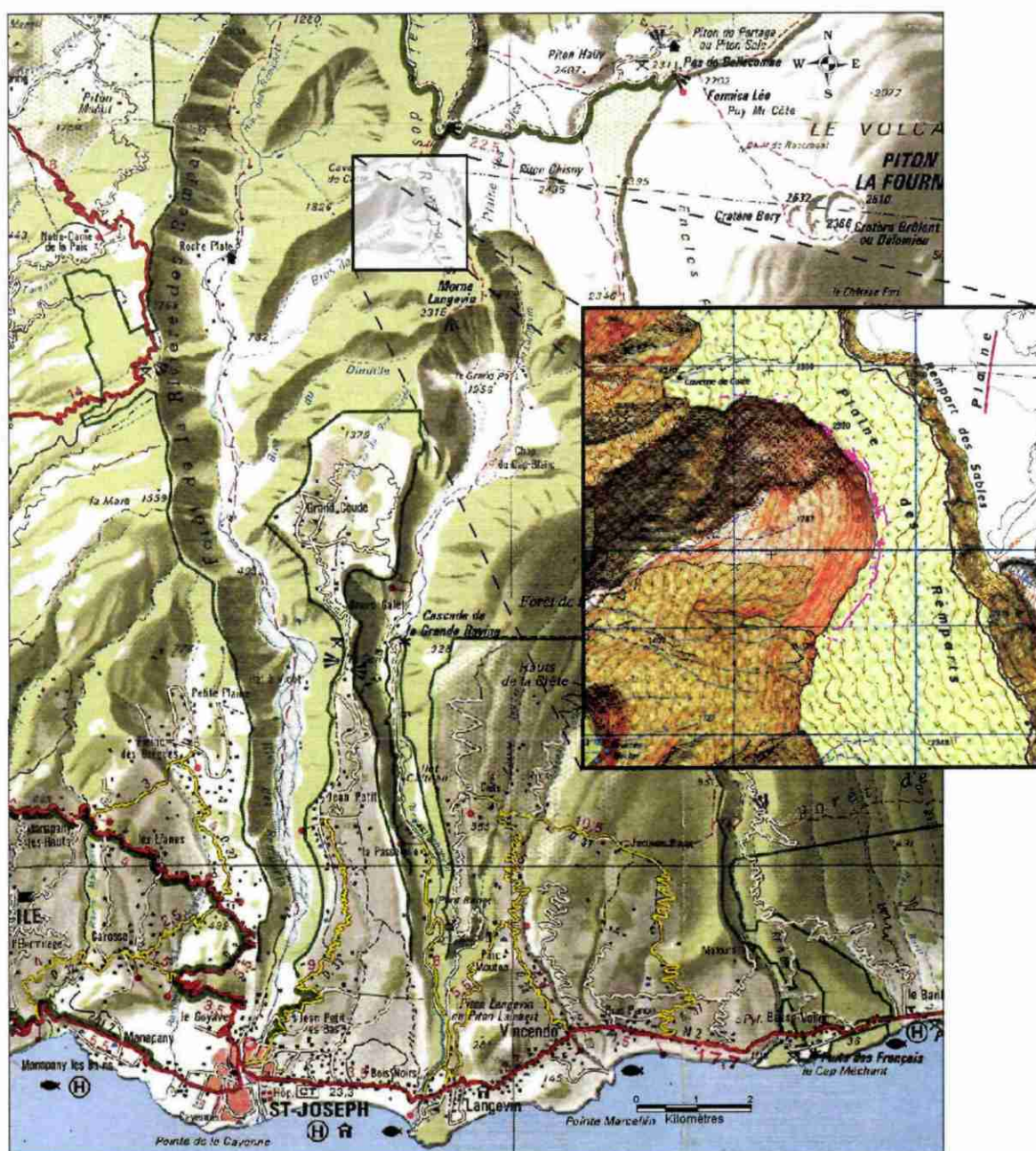


Illustration 6 – Localisation générale du rempart de Mahavel (fond IGN 1/100 000 & 1/25 000)

Le site plus particulièrement étudié (repérage de fissures et instrumentation par extensomètres) est localisé sur une bande de 100 à 200 m de largeur en crête de rempart, s'étendant sur environ 2 km (cf. Illustration 7). Il est placé vers une altitude de + 2 350 m NGR.

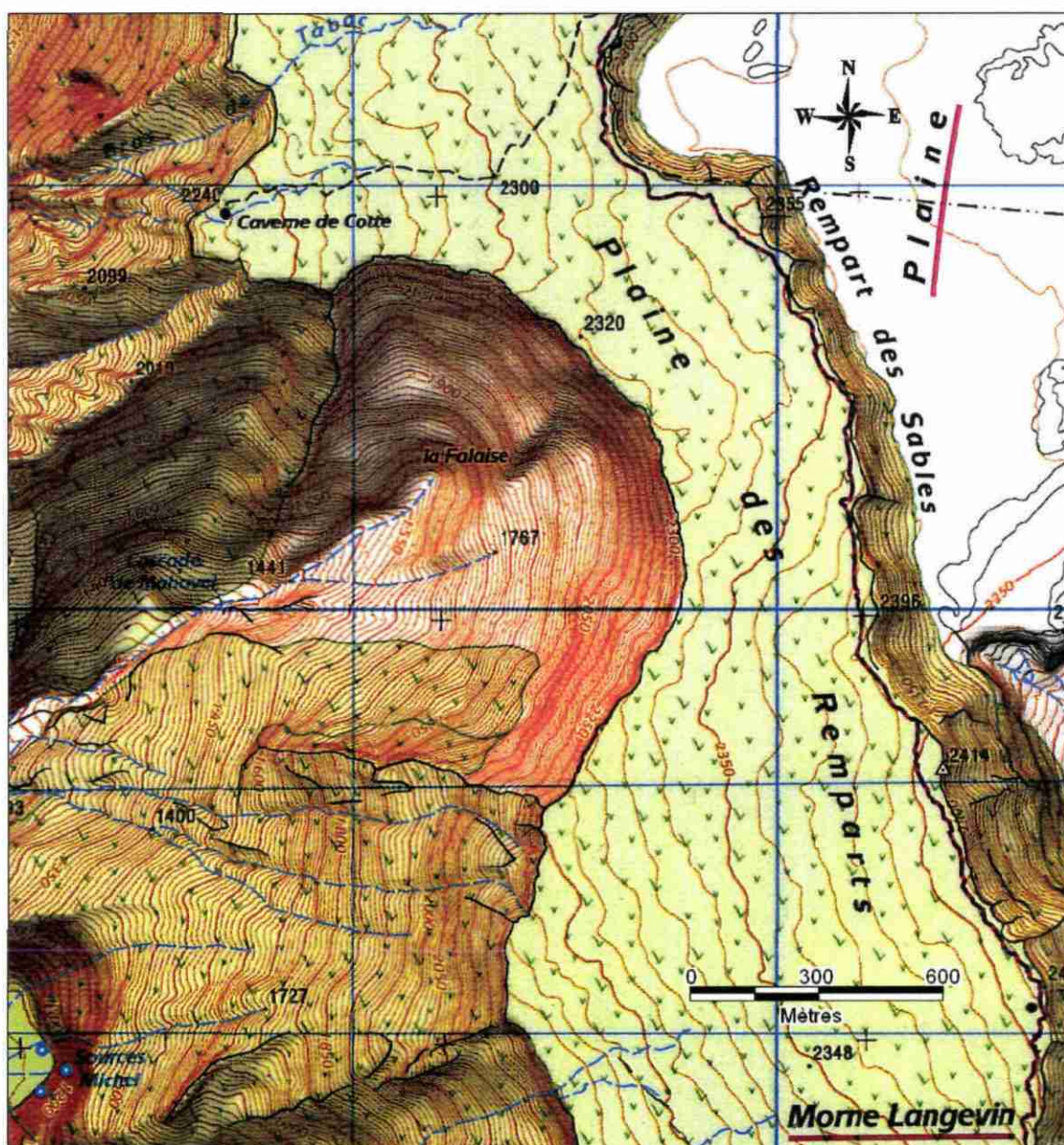


Illustration 7 – Positionnement de la zone d'étude à Mahavel (fond IGN 1/25 000)

2.2.2. Morphologie

Le site se présente comme un amphithéâtre (ou un entonnoir), de 700 m de rayon, en tête du Bras de Mahavel. La bordure de la niche d'arrachement, en forme de demi-cercle, s'étend sur une longueur de 2 km.

L'altitude du sommet du rempart est comprise entre 2300 m et 2350 m NGR. Le dénivelé entre le sommet et le point d'incision le plus oriental du Bras de Mahavel (alt. 1590 m) est de 700 m.

La pente du rempart est en moyenne de 58° (dénivelé de 720 m pour une distance horizontale de 450 m). Dans la partie supérieure, l'inclinaison atteint localement 70° . En pied d'escarpement, la pente s'adoucit ainsi que latéralement où elle est réduite à 45° environ.

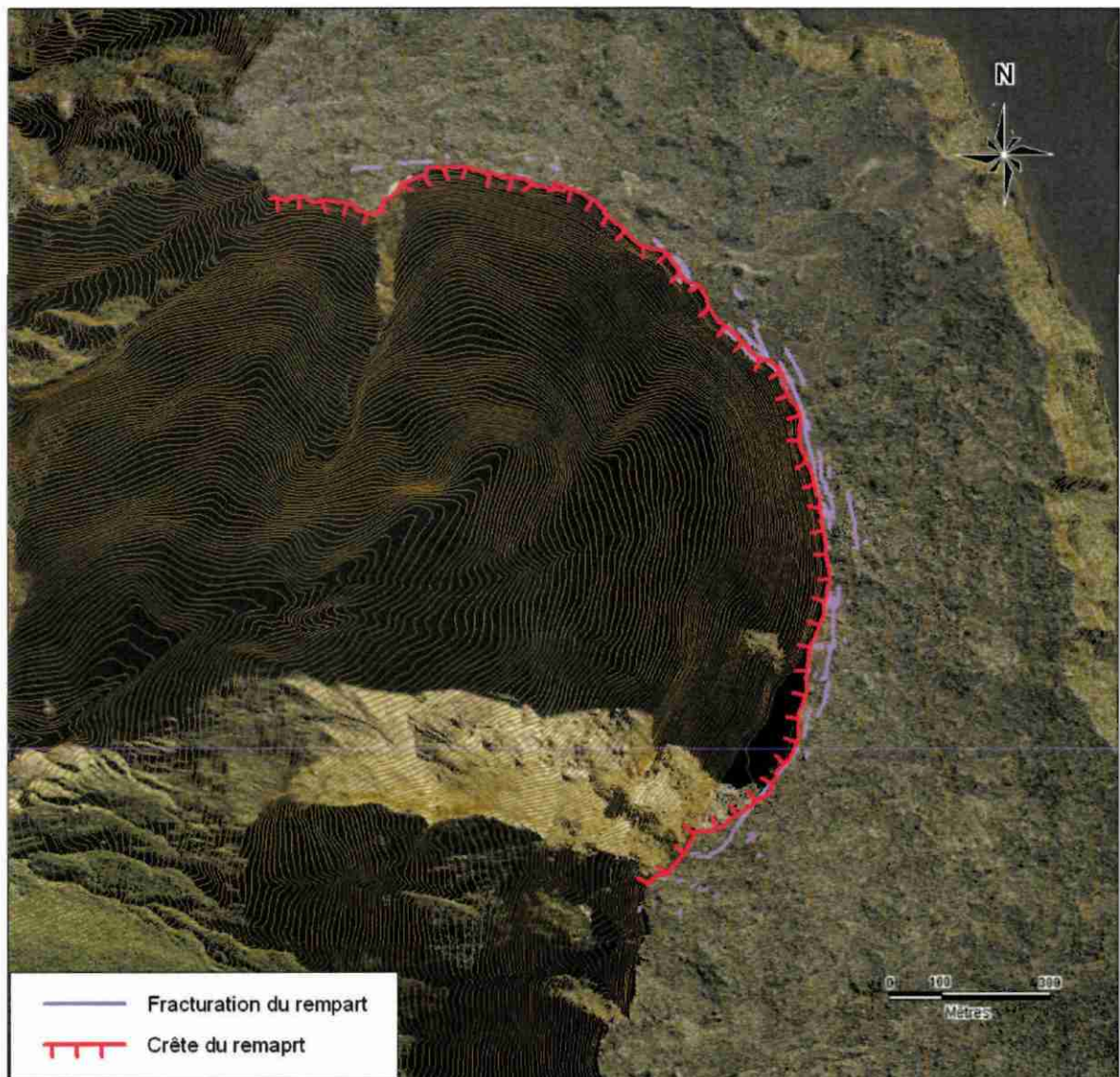


Illustration 8 – Tracé de la crête du rempart de Mahavel (orthophoto IGN)



Illustration 9 – Vue générale du rempart de Mahavel (cliché de 2002)

2.2.3. Géologie

Les séries constituant le rempart de Mahavel appartiennent aux formations récentes du massif de La Fournaise. Elles sont formées d'empilements réguliers de coulées de lave et de couches de scories d'épaisseur métrique.

Deux séries discordantes apparaissent clairement sur l'illustration 9. Depuis la base vers le sommet, la succession géologique décrivant le rempart est la suivante :

- la série du volcan de Mahavel, ou nommée série du bouclier ancien (150 000 à 450 000 ans) apparaît au pied de l'escarpement (carte géologique P. Bachellery, P. Mairine, O. Odon, 2006). Ces coulées ont un pendage assez prononcé pouvant atteindre 30° en direction du pied de rempart.
- les coulées de la partie haute formant le soubassement de La Plaine des Remparts (série dite des remparts - 65 000 à 150 000 ans - carte géologique P. Bachellery, P. Mairine, O. Odon, 2006) présentent un pendage faible vers l'ouest.

Le contact entre les 2 séries est assez redressé.

La configuration de ce site se différencie essentiellement de celle du Maïdo par une discordance de pendage entre les deux grandes séries composant le rempart. A Mahavel, la présence d'une assise présentant un aval pendage prononcé doit être assimilée comme étant un facteur déstabilisant pour l'édifice rocheux.

2.2.4. Climat

La station météorologique du Commerson a été implantée en 1968 à 3,4 km du rempart de Mahavel. Les précipitations cumulées annuelles moyennes approchent 3 500 mm, avec un record mensuel de 6 177 mm et un record de pluies quotidiennes de plus de 1 500 mm. A noter que la station météorologique du Commerson cumule à elle seule tous les records mondiaux de précipitation entre 4 jours (3 551 mm) et 15 jours (6 083 mm). Le climat de Mahavel est donc nettement plus arrosé qu'au Maïdo. Cela provient essentiellement de la localisation géographique du site qui est placé sur la façade "au vent", nettement plus humide, de l'île de la Réunion.

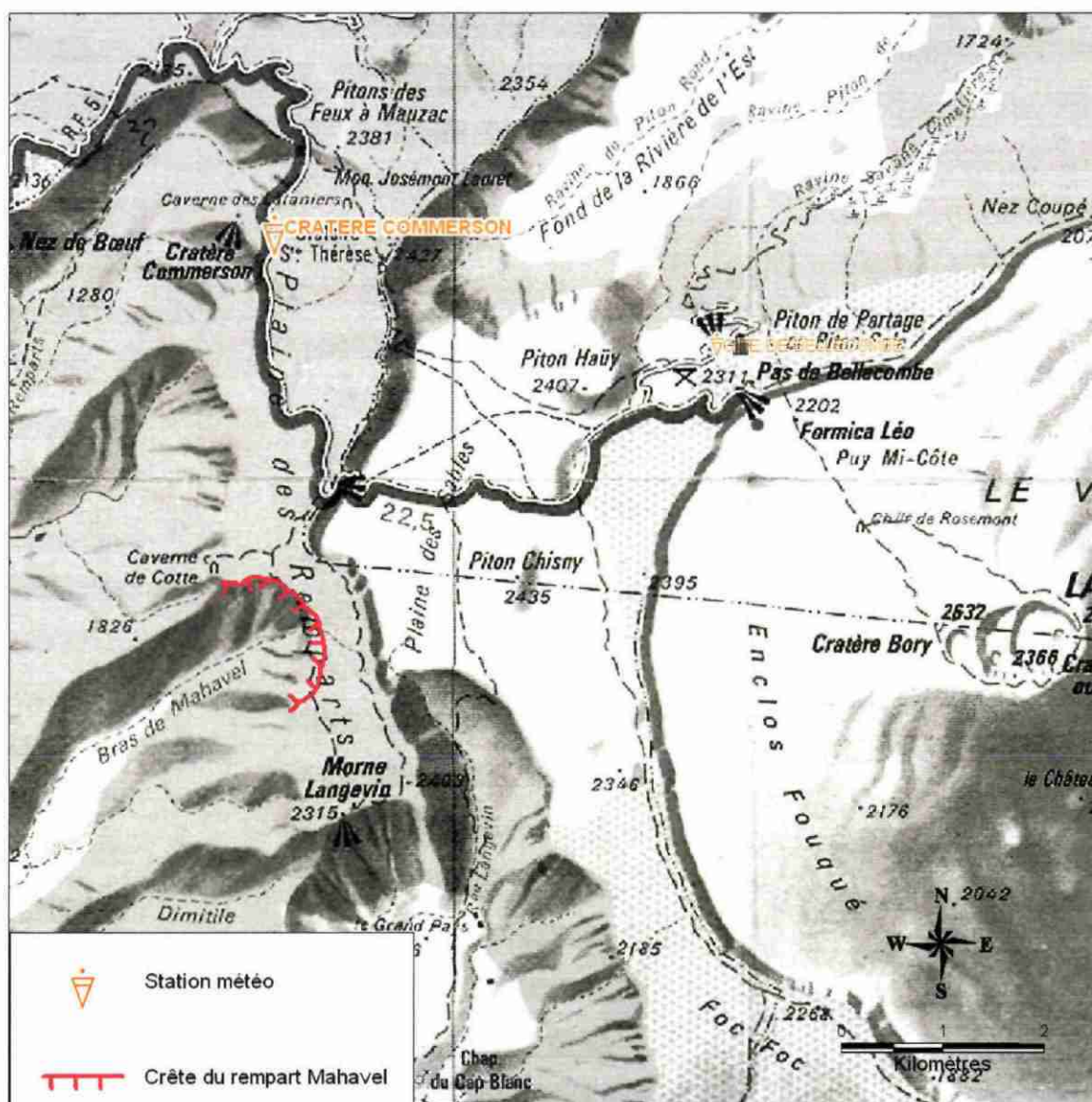


Illustration 10 – Localisation de la station météorologique du Commerson ((fond IGN 1/100 000))

A Mahavel, on retrouve des températures tout à fait similaires à celles enregistrées au Maïdo, se caractérisant par des contrastes assez prononcés :

- en Aout (hiver austral) :
 - o température minimale moyenne de + 4° C
 - o température maximale moyenne de + 14° C
- en Février (été austral) :
 - o température minimale moyenne de + 12° C
 - o température maximale moyenne de + 20° C

Comme au Maïdo, il n'est pas rare d'observer du gel en hiver à cette altitude, et dans la même journée en début d'après midi, des températures dépassant +25° C au soleil.

2.2.5. Historique d'effondrements

Le site de Mahavel est parmi les plus actifs de La Réunion en ce qui concerne les éboulements en grande masse. Historiquement, 4 effondrements majeurs ont été répertoriés depuis 1 siècle :

- 1911 : cet effondrement en masse est cité dans certaines archives sans que l'on puisse en apprécier le volume ;
- 1965 : entre 35 et 50 Mm³ effondrés selon les auteurs. Détachement d'une écaille qui mesurait 700 m de haut, environ 1000 m de longueur et dont l'épaisseur au sommet devait être de l'ordre de grandeur d'une cinquantaine de mètres. Les terrains écroulés étaient constitués au sommet de coulées peu pentues reposant sur des coulées et projections plus anciennes, présentant un pendage pouvant atteindre 30° vers le vide. Tous les auteurs s'accordent pour affirmer que cette configuration géologique s'est révélée très défavorable vis-à-vis de la stabilité du rempart. Cet effondrement s'est d'abord traduit par une gigantesque accumulation de débris rocheux dans le Bras de Mahavel, laissant craindre à l'époque la formation d'un embâcle naturel qui provoquerait l'apparition d'un lac, ce dernier risquant de se vidanger brutalement par rupture de la retenue. L'hypothèse d'une telle débâcle avait laissé planer une grave menace sur les aménagements dans la rivière des Rempart et sur la ville de Saint-Joseph, située 16 km en aval. Fort heureusement, bien qu'un lac de retenu se soit temporairement formé, aucune débâcle soudaine par rupture de l'obstacle n'est survenue, et l'accumulation de matériaux n'a progressé que relativement lentement vers l'exutoire de la rivière des Remparts.
- 09/01/1996 : un second effondrement de moindre importance survient - 5 Mm³ ;
- 18/01/2001 : dernier effondrement en masse connu - 2 Mm³.

Ces deux derniers épisodes sont assimilables à la purge naturelle de panneaux de volume "plus modestes" qui ne se seraient pas détachés en 1965 (cf. Illustration 26).

3. Analyse de la fissuration

3.1. GENERALITES

Les grands escarpements naturels sont tous affectés par un réseau de fissures en arrière de la crête de paroi, correspondant à des fractures de décompression liées au phénomène "d'appel au vide" provoqué par l'absence d'étreinte latérale dans un massif où les contraintes naturelles sont importantes.

Ces fissures disparaissent progressivement lorsque l'on s'éloigne du rempart, l'état de contraintes dans le massif revenant à la normale dans un milieu continu, c'est-à-dire une contrainte principale verticale σ_1 et une contrainte principale horizontale σ_3 . Le massif redevient alors entièrement comprimé.

La profondeur de ces fissures dans le massif est souvent moins bien connue. Il est cependant admis qu'elles se révèlent moins profondes lorsque l'on s'écarte de la crête de la paroi, et que leur forme est légèrement concave en profondeur, avec une tendance à se rapprocher de la paroi.

Peu d'auteurs se sont penchés sur la distribution et la dynamique des fissures en arrière des très grandes parois rocheuses naturelles. Le projet MVTERRE doit permettre d'apporter un éclairage sur la fissuration affectant les grands remparts de La Réunion.

3.2. SITE DU MAÏDO

3.2.1. Repérage de fissures

Préalablement à l'implantation du dispositif d'auscultation de la bordure du rempart, un levé des fissures a été effectué en mai 2003.

Les observations sont portées sur des profils perpendiculaires à la bordure du rempart, sur une distance de 150 m environ. 15 profils ont été levés, répartis sur un linéaire de 1500 m, depuis le parking du Maïdo jusqu'au point de rapprochement du sentier GR (Grande Randonnée) et de la bordure du rempart. Chaque fissure rencontrée a été positionnée (mesures au topofil et mesure de positionnement GPS.)

Les informations recueillies sont rassemblées dans le tableau en annexe 1. La largeur des fissures ainsi que leur éloignement par rapport à la bordure du rempart ont été notés.

Ces observations mettent en évidence les points suivants :

- l'essentiel des fissures est subparallèle à la crête du rempart, leur inclinaison apparente en surface étant verticale ;
- entre 1 et 7 fissures ont été repérées sur chaque profil, la moyenne étant de l'ordre de 3 et 4 fissures par profil. Ceci témoigne du caractère hétérogène du réseau de fissures ;
- les fissures les plus larges sont ouvertes de plusieurs mètres (cf. Illustration 12). Elles sont situées généralement plus près de la bordure du rempart (à moins de 60 m – cf. Illustration 14) ;
- les autres fissures présentent une ouverture de 5 à 50 cm (cf. Illustration 13) ;
- les fissures repérées sont situées jusqu'à 153 m de la bordure du rempart, ce qui, pour un rempart de 900 m, correspond à un rapport $L/H = 17\%$ (avec L = distance entre la fissure et la crête et H = hauteur du rempart) ;
- sur les 15 profils répertoriés, 50 % des fissures sont placées à moins de 30 m de la bordure du rempart, et 80 % à moins de 70 m (cf. Illustration 15 – Répartition de la position des fissures par rapport à la crête de rempart). En retenant cette valeur de 70 m, il pourra en être déduit que l'essentiel des fissures se développe dans une bande de terrain de largeur défini par un rapport $L/H = 8\%$;
- la disposition des fissures par rapport à la crête du rempart est assez hétérogène. De plus, les levés, bien que non exhaustifs, montrent que le réseau de fissures n'est pas continu sur l'ensemble de la zone. Toutefois, leur repérage en plan (cf. Illustration 11) semble montrer entre le profil 4 et le profil 9 l'amorce d'un faisceau de fissures parallèles délimitant une « écaille » de grande dimension, qui se termine au Nord vers "la Vierge" (petit oratoire en plein air). Son extension est de 600 m, pour une épaisseur de plus de 100 m. Ce panneau se retrouve assez bien dans le tracé de la crête de rempart, sous la forme d'un vaste promontoire dépassant de l'alignement moyen du bord de l'escarpement.

Levé des fractures : rempart du Maïdo

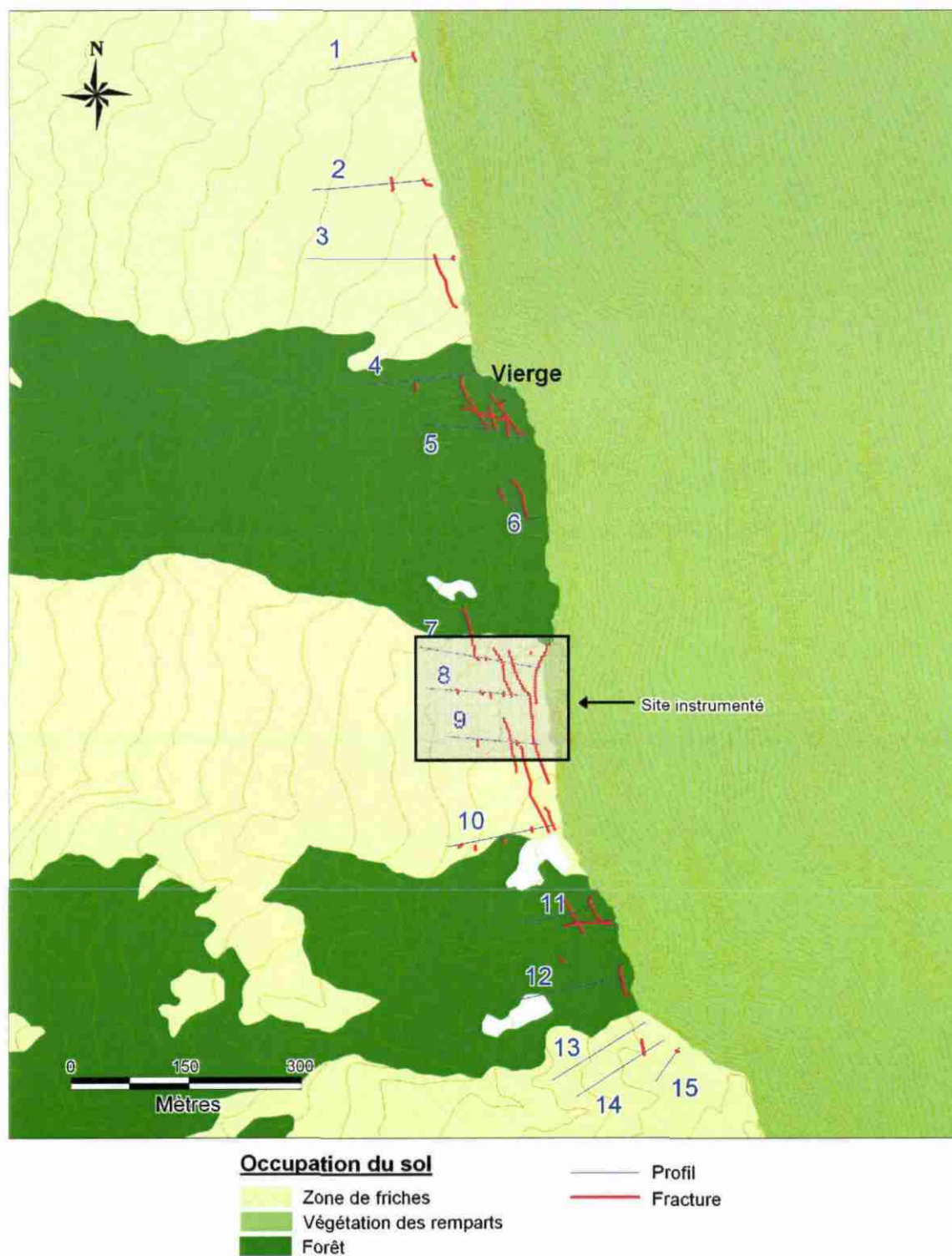


Illustration 11 – Disposition en plan des fractures par rapport à la tête de rempart du Maïdo



Illustration 12 – Fissure d'ouverture métrique sur le site du Maïdo



Illustration 13 – Fissure d'ouverture décimétrique sur le site du Maïdo

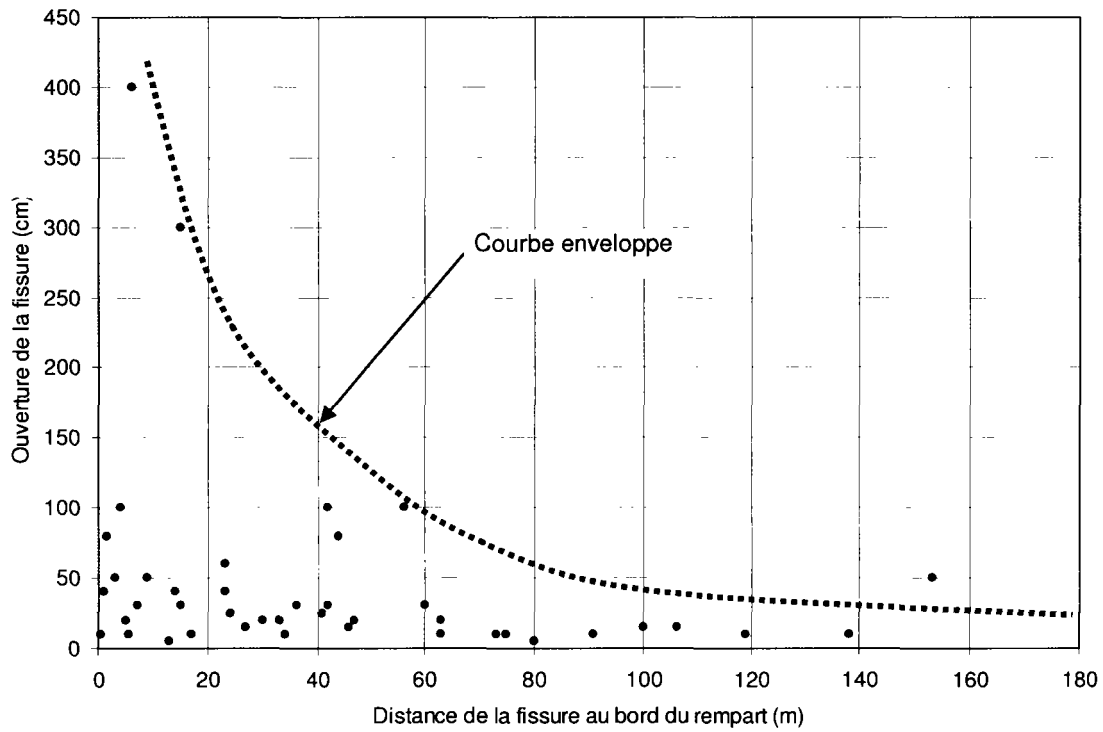


Illustration 14 – Distribution de l'ouverture des fissures en fonction de leur éloignement du rempart

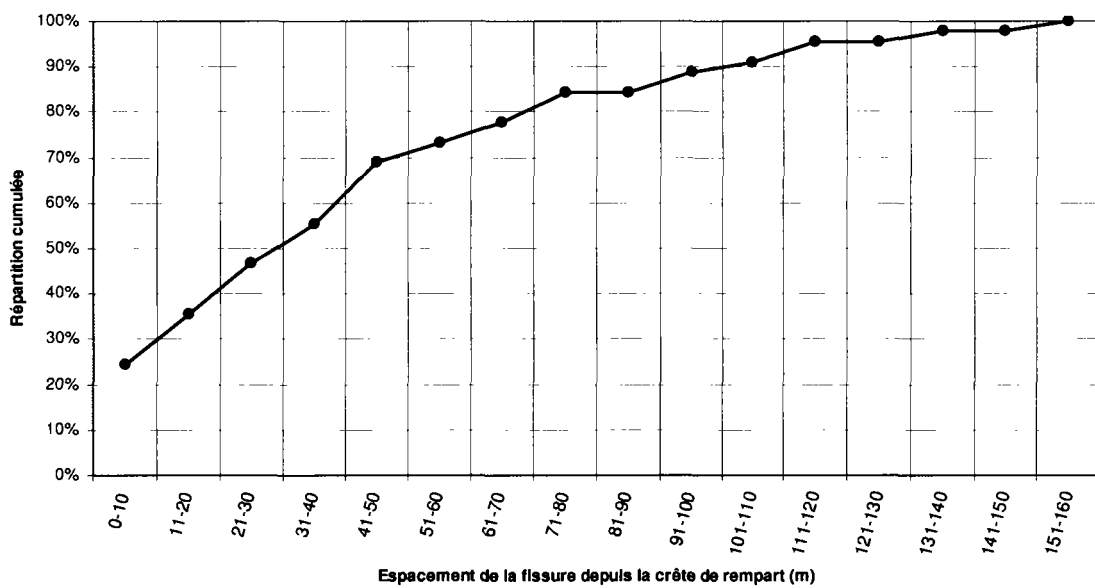


Illustration 15 – Répartition de la position des fissures par rapport à la crête de rempart

3.3. SITE DE MAHAVEL

3.3.1. Repérage de fissures

Comme pour le site du Maïdo, un relevé des fissures a été effectué en mai 2003 sur toute la bordure de la niche d'arrachement. Les observations ont été effectuées au droit de profils perpendiculaires à la bordure du rempart, sur une distance de 150 m environ. 15 profils ont été levés répartis sur le pourtour de la niche d'arrachement, c'est à dire sur un linéaire de 2000 ml. Chaque fissure rencontrée a été positionnée (mesures au topofil et mesure de positionnement GPS). Les informations recueillies sont rassemblées dans le tableau en annexe 2. La largeur des fissures ainsi que leur éloignement par rapport à la bordure du rempart ont été notés.

Ces relevés mettent en avant les éléments qui suivent :

- les fissures discontinues sont globalement parallèles à la bordure de l'escarpement principal (cf. Illustration 16). Dans le détail, elles présentent un tracé en dents de scie ;
- ces fissures présentent une inclinaison subverticale en surface ;
- entre 1 et 7 fissures ont été repérées sur chaque profil, la moyenne étant de l'ordre de 3 à 4 fissures par profil. Ceci témoigne à nouveau du caractère hétérogène du réseau de fissures ;
- les fissures les plus larges présentent une ouverture de 50 cm (cf. Illustration 17) ce qui tranche par rapport au Maïdo où certaines fissures étaient nettement plus ouvertes. Cela s'explique peut être par l'évolution relativement récente du rempart de Mahavel et donc des fissures associées. Par ailleurs, comme au Maïdo, les fissures les plus ouvertes sont observées préférentiellement à proximité du rempart, cette tendance étant toutefois moins nette pour le site de Mahavel ;
- les fissures repérées sont situées jusqu'à 91 m de la bordure du rempart, ce qui pour un rempart de 700 m, correspond à un rapport $L/H = 13 \%$ (avec L = distance entre la fissure et la crête et H = hauteur du rempart). Cette valeur est à nouveau plus faible que pour le Maïdo. L'état plus ancien de ce dernier en est peut-être l'explication. Il est intéressant de noter que lors des effondrements en masse de 1996 et 2001, des panneaux rocheux de près de 100 m de large se sont détachés, c'est-à-dire dans le même ordre de grandeur ;
- sur les 16 profils répertoriés, 50 % des fissures sont placées à moins de 15 m de la bordure du rempart, et 95 % à moins de 50 m. En retenant cette valeur de 50 m, il pourra en être déduit que l'essentiel des fissures se développe dans une bande de terrain de largeur définie par un rapport $L/H = 7 \%$. Ce ratio est tout à fait comparable à celui obtenu au Maïdo.

Levé de fractures : site de Mahavel

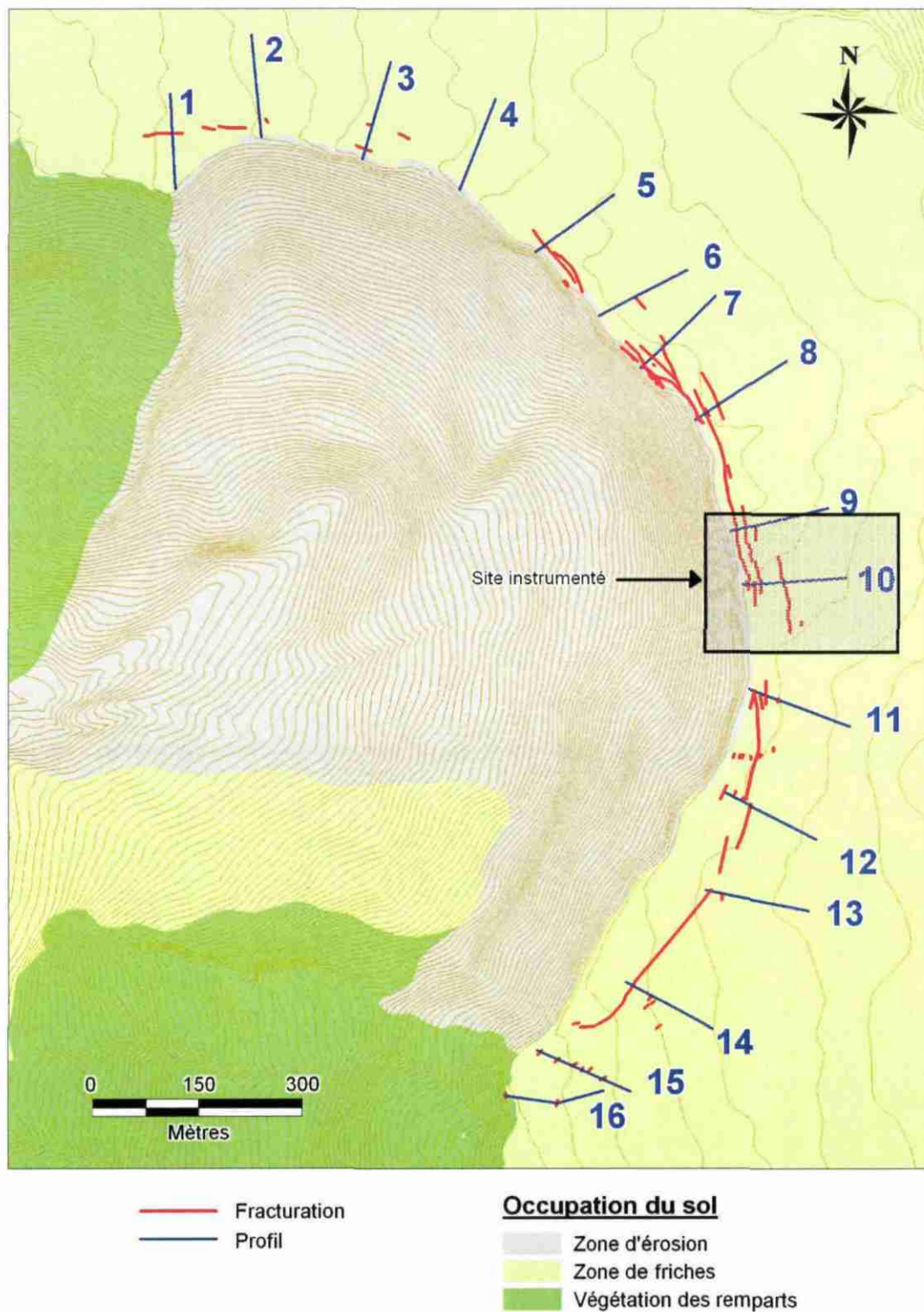


Illustration 16 – Disposition en plan des fractures par rapport au rempart de Mahavel (fond BD topo IGN avant effondrement de 2001)



Illustration 17 – Exemple de fissure récente sur le site de Mahavel

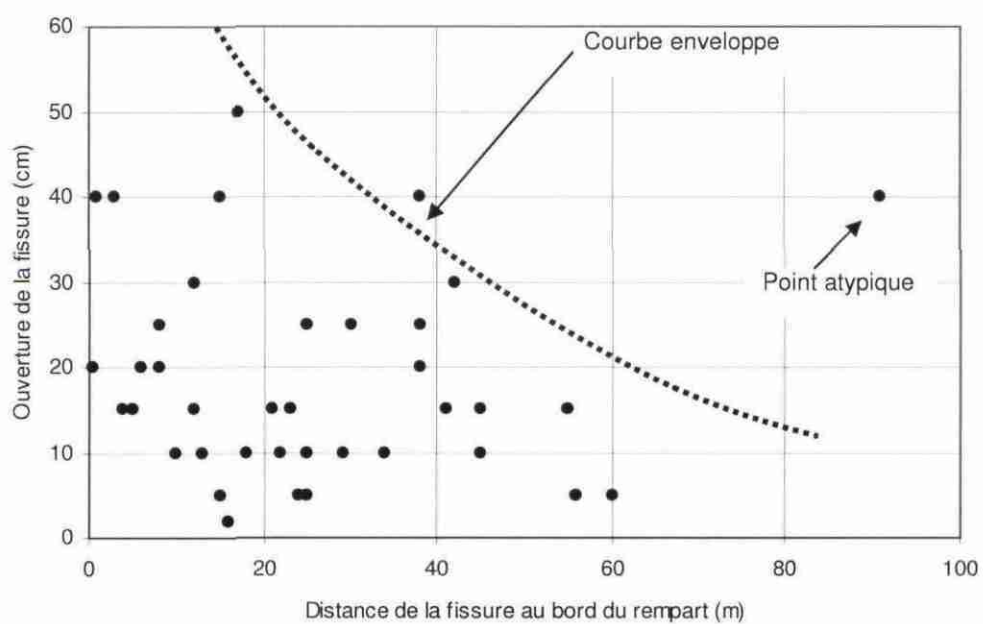


Illustration 18 – Relation entre ouverture des fissures et distance au rempart

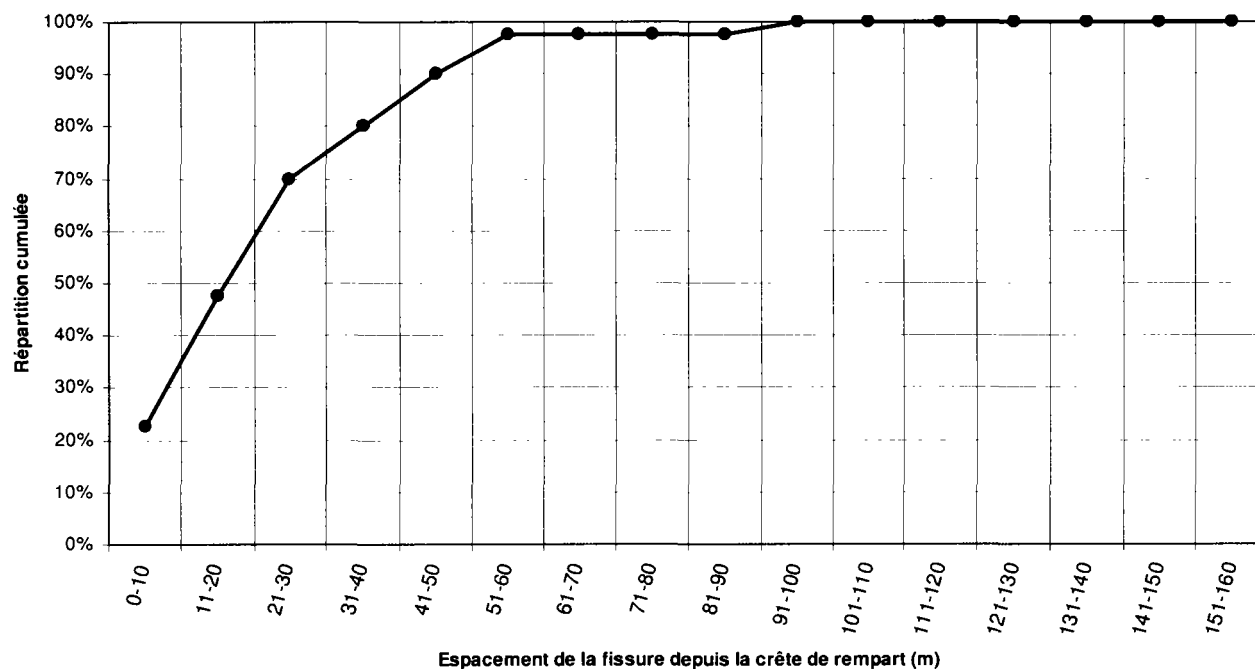


Illustration 19 – Répartition de la position des fissures par rapport à la crête de rempart

4. Suivi par dispositif extensométrique

4.1. SITE DU MAÏDO

4.1.1. Présentation du dispositif extensométrique

4.1.1.1. Choix du dispositif

Les moyens à mettre en œuvre en matière d'instrumentation et de suivi ont fait l'objet d'une réflexion générale sur les remparts de La Réunion (cf. rapport BRGM/RP-52887-FR).

Le parti pris a donc été de surveiller ponctuellement les mouvements éventuels des panneaux délimités par les crevasses (fissures) présentes à l'arrière des remparts, à Maïdo et Mahavel.

Initialement, il avait été choisi de mettre en place plusieurs types d'équipement :

- pose de capteurs de déplacements, type extensomètres, à cheval sur les fissures en question ;
- dispositif topographique de précision :
 - nivellement de points situés de part et d'autre des crevasses à l'aide d'un tachéomètre ;
 - mesures de distances horizontales entre les points contrôlés et un point de référence, à l'aide d'un distancemètre électro-optique (faisceau laser infrarouge) ;
- en fonction des mesures obtenues, des mesures inclinométriques étaient envisagées. Des capteurs inclinométriques auraient été disposés entre les crevasses surveillées.

Suite aux réunions de recadrage budgétaire et scientifique du projet, il a été choisi de limiter l'instrumentation au seul dispositif extensométrique.

4.1.1.2. Localisation du dispositif

Sur le kilomètre de zone d'étude ayant servi au repérage des fissures, une zone a été identifiée comme étant plus propice à l'installation d'un dispositif de suivi extensométrique (cf. Illustration 11). Il s'agit du vaste panneau de 600 ml identifié entre le profil 4 et le profil 9. La mise en évidence d'une telle structure a motivé l'implantation d'un dispositif de mesure de l'ouverture des fissures au moyen d'extensomètres. Le profil 9 a été retenu en raison de son accessibilité et de la faible fréquentation de cette zone par les promeneurs.

4.1.1.3. Détail du dispositif

La mise en place du dispositif extensométrique a été confiée à la société MINAUS, entreprise spécialisée dans les travaux d'instrumentation des sites naturels.

Il comprend 6 capteurs implantés sur des fissures situées à des distances variables de la bordure du rempart. Chaque capteur est relié à une centrale d'acquisition de mesure où les données sont stockées. Il s'agit de capteurs potentiométriques de course utile 25 mm dont la précision du constructeur est de $\pm 25 \mu\text{m}$, reliés à une station d'acquisition autonome (alimentée par batterie) interrogeable à distance par modem GSM deux fois par semaine.

Une mesure est effectuée toutes les 2 heures. Les mesures ont débuté le 20 octobre 2003.

De façon plus détaillée, la station d'acquisition (cf. Illustration 25) comporte :

- une armoire métallique de type électrique ;
- un ensemble de supports d'armoire,
- une centrale d'acquisition multi-capteurs de type OSIRIS d'origine IRIS Instruments,
- un multiplexeur de 16 voies de mesure d'origine ROCK-TEST,
- un modem GSM data d'origine IRIS Instruments,
- deux batteries de type automobile d'environ 45 Ah.

Pour le site du Maïdo, l'alimentation sur batterie s'est montrée particulièrement performante, car d'une situation prévoyant initialement un remplacement mensuel des batteries, il s'est rapidement révélé qu'une intervention tous les 6 mois suffisait.

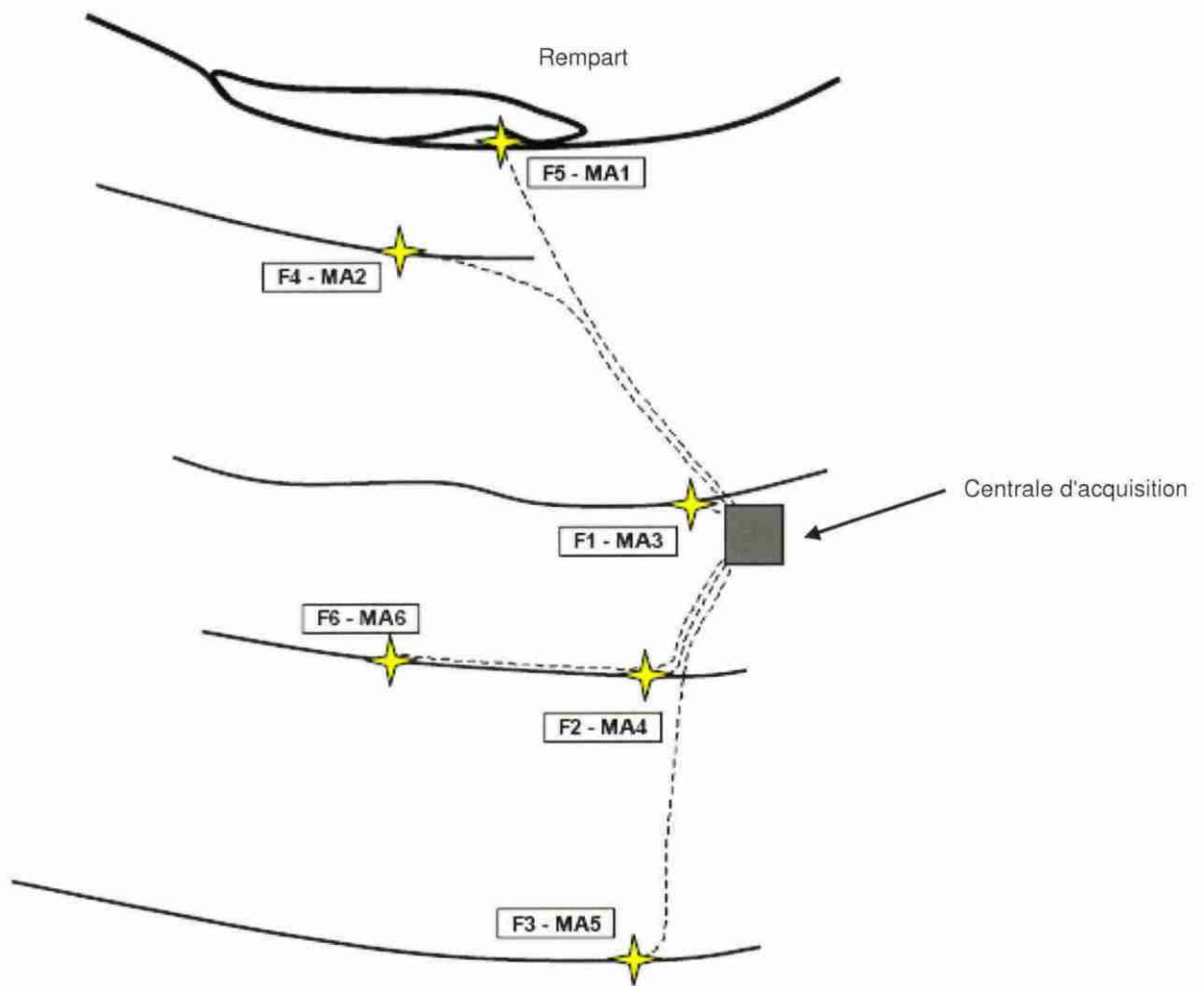


Illustration 20 – Positionnement des extensomètres et de la centrale d'acquisition

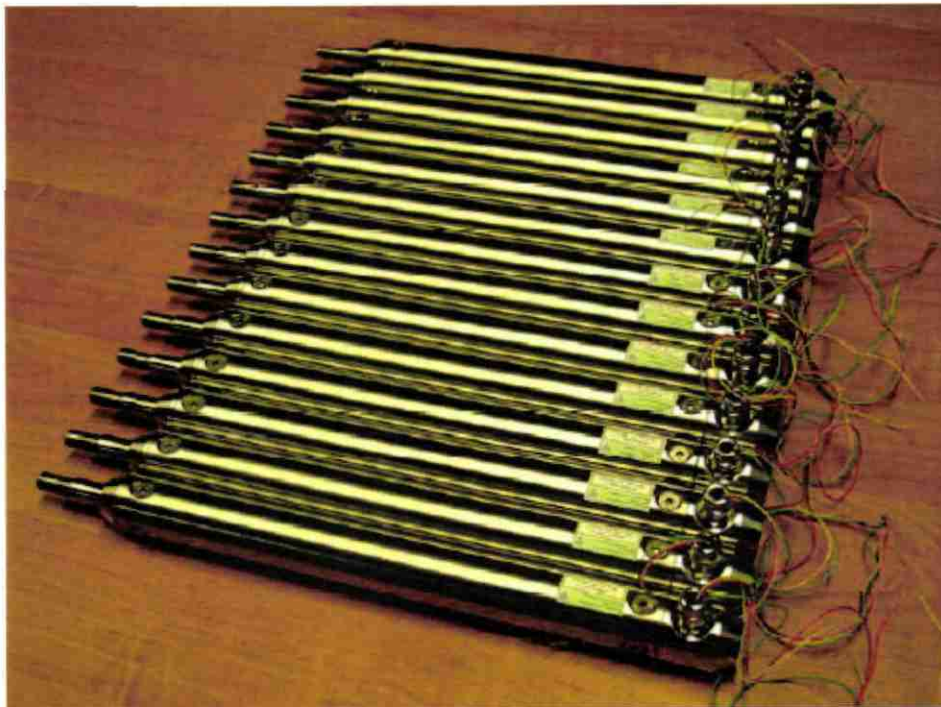


Illustration 21 – Capteurs extensométriques avant branchement

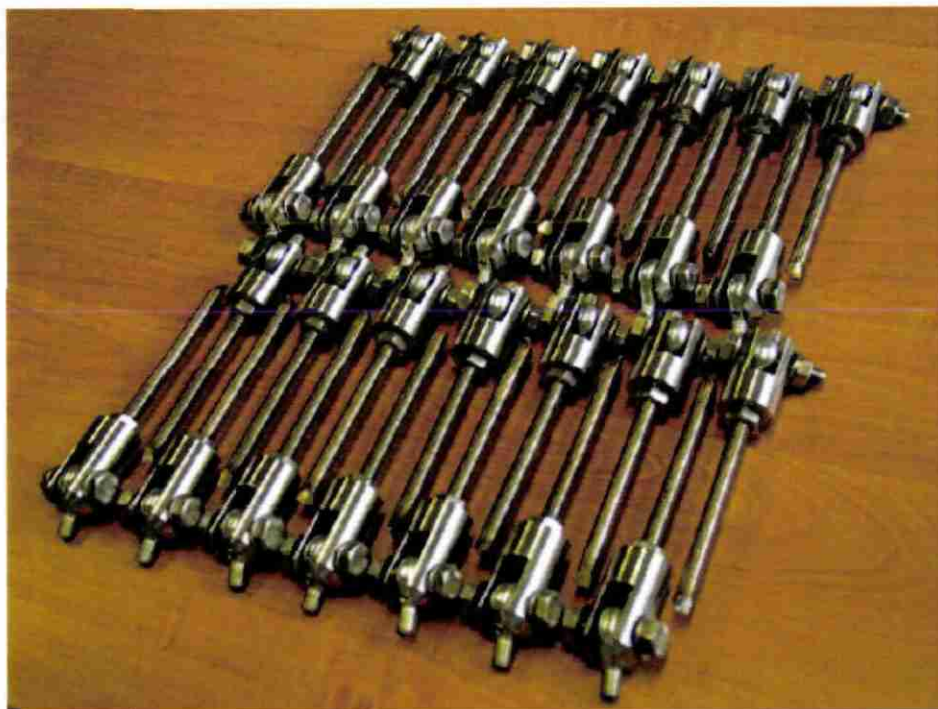


Illustration 22 – Rotules de fixation des capteurs



Illustration 23 – Exemple de capteur extensométrique en place



Illustration 24 – Station d'acquisition du Maïdo dans son environnement



Illustration 25 – Station du Maïdo

4.2. SITE DE MAHAVAL

4.2.1. Présentation du dispositif extensométrique

4.2.1.1. Choix du dispositif

Comme pour le site du Maïdo, suite aux réunions de recadrage budgétaire et scientifique du projet, il a été choisi de limiter l'instrumentation au seul dispositif extensométrique.

4.2.1.2. Localisation du dispositif

Si un report des levés de fissuration est effectué sur les fonds topographiques IGN de 1991 l'orthophoto de 1997 et sur l'orthophoto de 2003 (cf. Illustration 26), on constate que plusieurs parties du rempart ont disparu. Une partie du rempart a été emportée en 1996 et le dernier effondrement date lui de 2001.

En 1996, la surface disparue au niveau du sommet du rempart a été estimée à environ 50 000 m² pour un éboulement de 5 Mm³ entraînant un panneau de près de 100 m de largeur. En 2001, l'éboulement a emporté une surface d'une longueur de 600 m et d'une largeur pouvant à nouveau atteindre 100 m environ (cf. profils 7 à 12). La surface disparue en 2001 au niveau du plateau au sommet de rempart est estimée à plus de 20 000 m². Le volume qui avait été estimé à 1 million de m³ à l'époque est vraisemblablement de l'ordre de 2 millions de m³, en considérant le rapport surface /volume = 100 de 1996. Il avait donné naissance à une coulée de débris quelques mois plus tard, dans le cours amont de la rivière des Remparts.

Le réseau de fissures en arrière du panneau effondré en 1996 est apparu dense et marqué, évoquant une activité forte des fissures. Pour cette raison, il a été décidé d'équiper les fissures au droit du profil 10 (cf. Illustration 16).

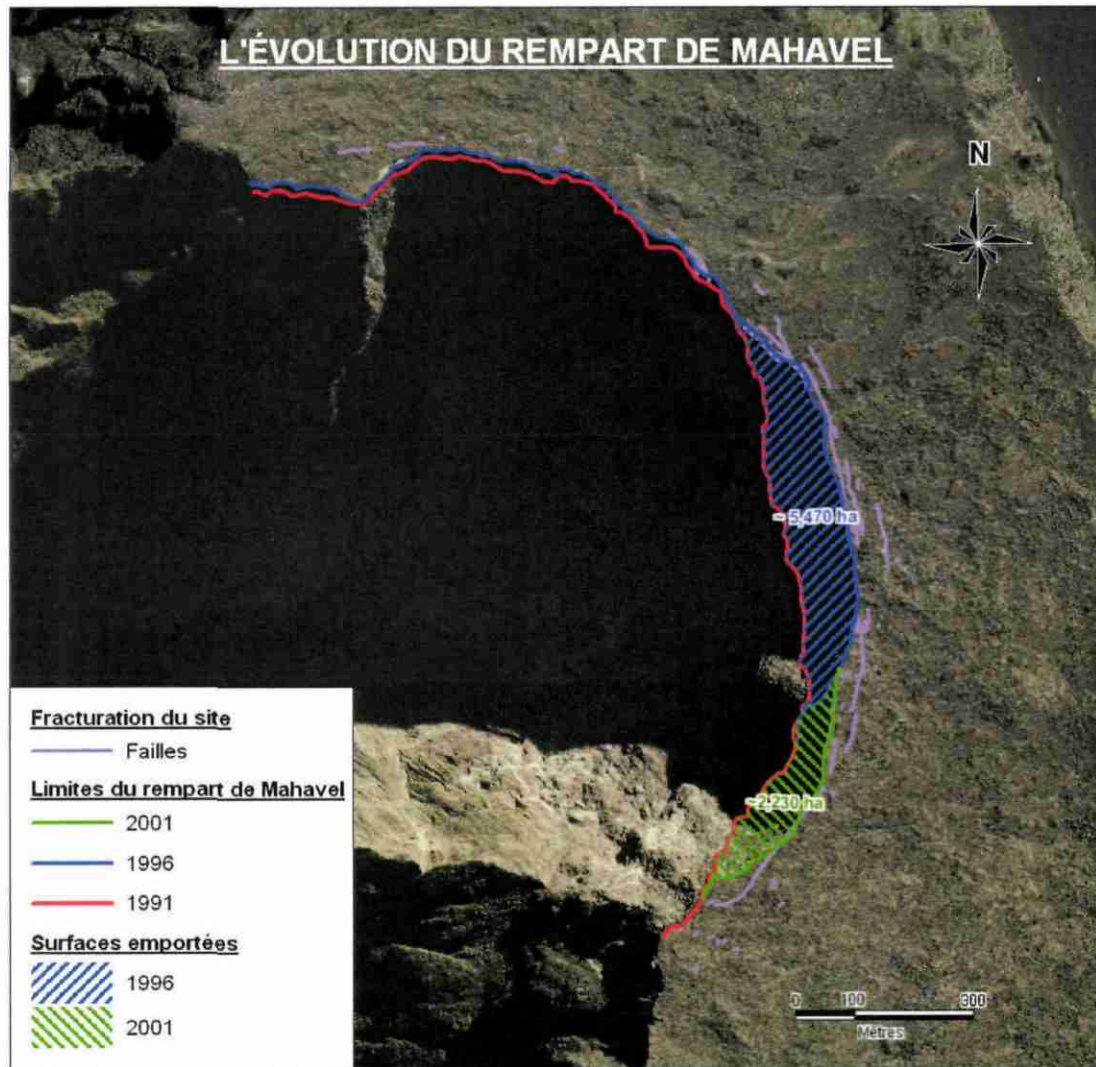


Illustration 26 – Recul du rempart de Mahavel en 1996 et 2001 (orthophoto IGN 2003)

4.2.1.3. Détail du dispositif

Les moyens mis en œuvre sur le site de Mahavel sont les mêmes que ceux retenus pour le site du Maïdo. Le dispositif comprend :

- un réseau de 7 extensomètres ;
- une armoire métallique de type électrique ;
- un ensemble de supports d'armoire ;
- une centrale d'acquisition multi-capteurs de type OSIRIS d'origine IRIS Instruments,
- un multiplexeur de 16 voies de mesure d'origine ROCK-TEST ;
- un modem GSM data d'origine IRIS Instruments ;
- deux batteries de type automobile d'environ 45 Ah.

Comme pour le site du Maïdo, la mise en place du dispositif extensométrique a été confiée à la société MINAUS.

Une mesure est effectuée toutes les 2 heures. Les mesures ont débuté le 20 octobre 2003.

Pour le site de Mahavel, l'alimentation sur batterie s'est montrée nettement moins efficace qu'au Maïdo (vraisemblablement en raison des conditions pluviométriques très défavorables régnant sur ce secteur) une intervention mensuelle s'étant révélée nécessaire.

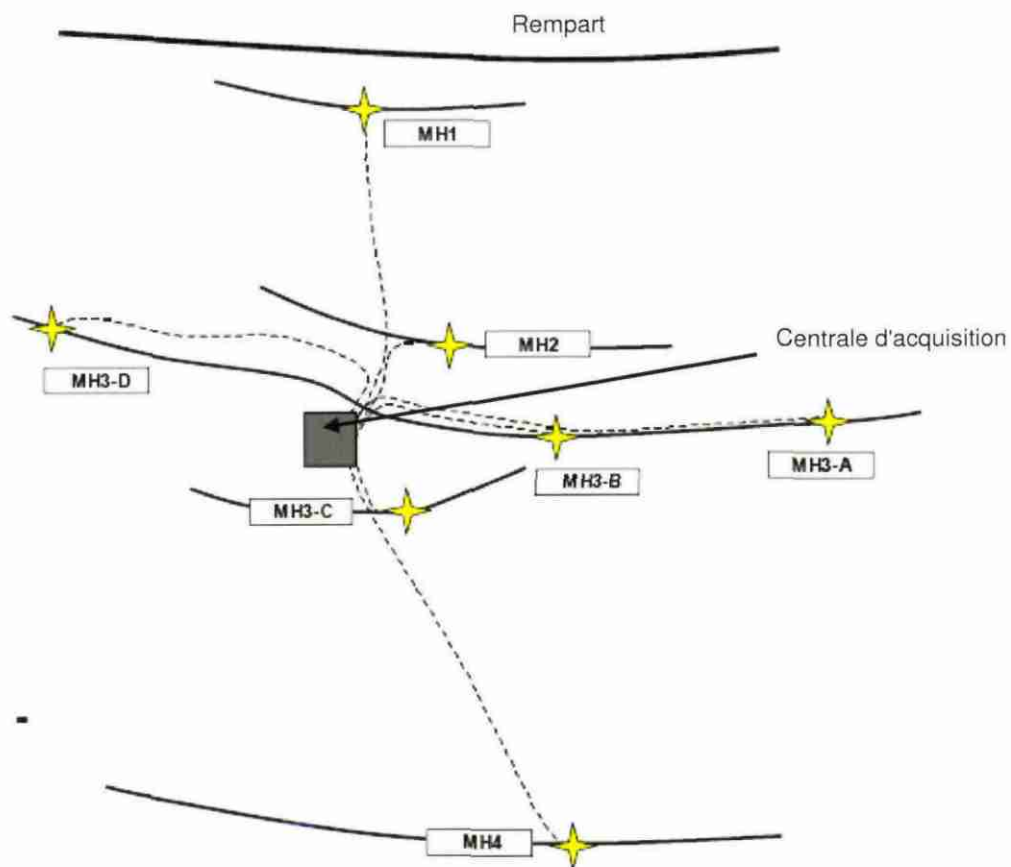


Illustration 27 – Positionnement des extensomètres et de la centrale d'acquisition



Illustration 28 – Exemple de capteur extensométrique en place



Illustration 29 – Station de Mahavel dans son environnement



Illustration 30 – Station de Mahavel

4.3. RESULTATS EXTENSOMETRIQUES ET ANALYSE DU SUIVI

4.3.1. Difficultés rencontrées sur les deux sites

De nombreuses difficultés techniques ont été rencontrées en ce qui concerne le dispositif d'instrumentation, que cela soit au niveau du site du Maïdo, comme celui de Mahavel. Parmi les principaux problèmes constatés, on citera :

- étanchéité des boîtiers, avec génération importante de condensation ;
- longévité des batteries, en particulier à Mahavel. Au Maïdo, les batteries ont montré une longévité étonnante nécessitant un remplacement uniquement tous les 6 mois ;
- foudre ayant frappé les boîtiers ;
- reconfiguration des signaux extensométriques, après dérive ;
- pannes électroniques sur la centrale d'acquisition ou sur le modem GSM (en particulier à Mahavel) ;
- création d'une ligne téléphonique analogique à l'agence BRGM de Saint-Denis permettant d'interroger les stations reliées par GSM ;
- virus informatique sur l'ordinateur servant au rapatriement des données, avec perte de plus de 6 mois de données.

Ceci s'est traduit d'une part par de nombreuses interruptions dans l'acquisition des données ou par des artéfacts de mesure perturbant considérablement l'analyse.

4.3.2. Résultats au rempart du Maïdo

4.3.2.1. Mouvements mesurés

Des résultats ont été obtenus entre octobre 2004 et juin 2008, c'est-à-dire sur plus de 4 années de suivi. Sur cette période, des interruptions ou des dérives de mesures sont à déplorer :

- entre août et décembre 2005 (dérives) ;
- entre février et octobre 2006 (pannes) ;
- entre août 2007 et mars 2008 (destruction de disque dur par un virus informatique).

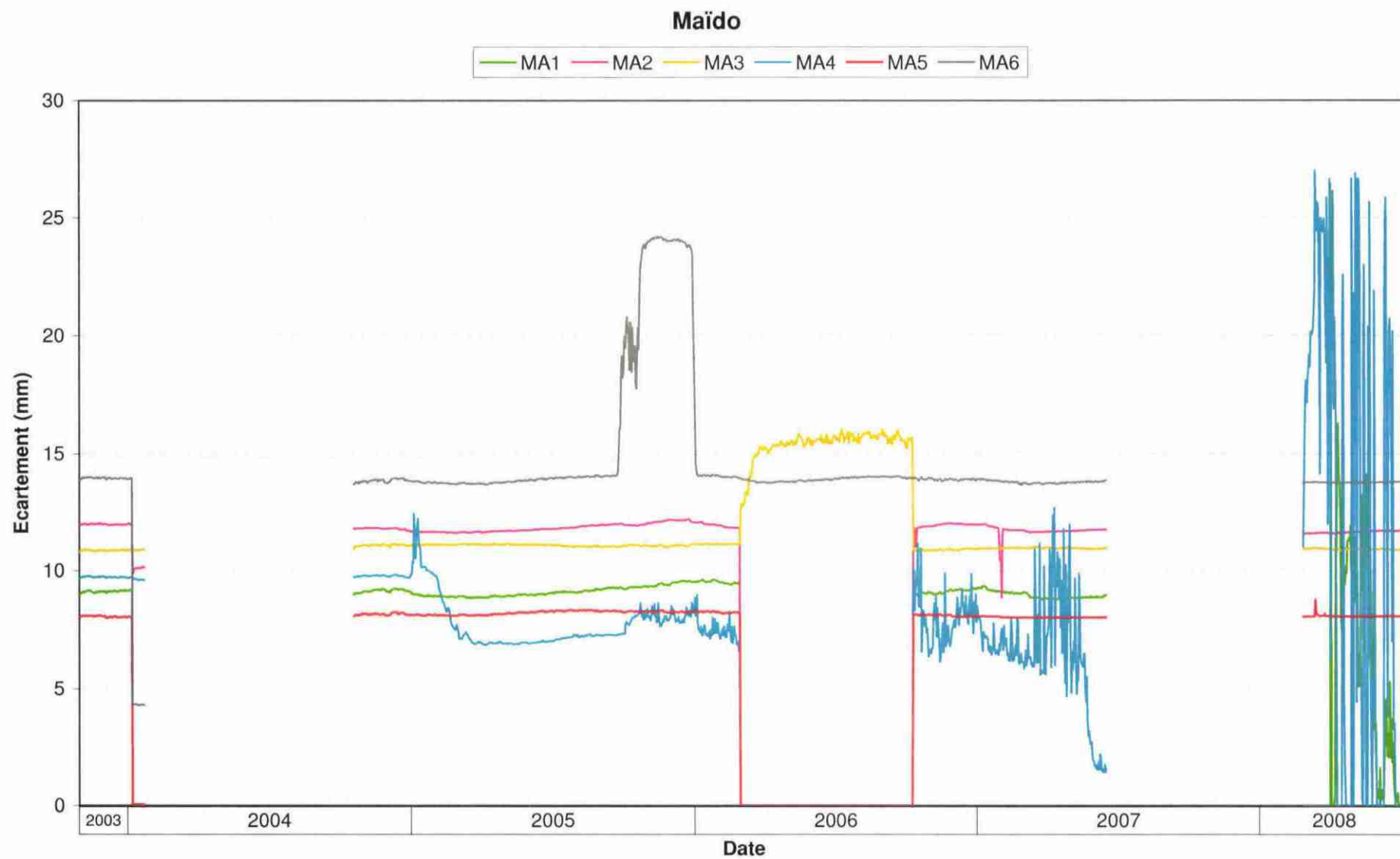


Illustration 31 – Déplacements mesurés sur les extensomètres du Maïdo

Si l'on fait abstraction des dérives liées à des artéfacts de mesure, le graphique ci-avant met en évidence les éléments suivants :

- hormis l'extensomètre MA04, les mesures ne montrent pas de déplacement significatif sur toute la période de suivi ;
- des mouvements réversibles de l'ordre du 1/10 de mm sont mesurés quotidiennement. Ils sont induits par les phénomènes de dilatation et de rétractation thermiques - issus du contraste de température entre le jour et la nuit ;
- à plus vaste échelle, de vastes ondulations sont perceptibles. Des déplacements lents et réversibles, n'excédant pas le millimètre, sont observés sur plusieurs mois. Il s'agit également de mouvements thermiques du rempart, mais cette fois associés au contraste entre saison chaude et saison "froide" ;
- l'extensomètre MA04 montre des mouvements nettement plus importants que les autres appareils : entre novembre 2004 et février 2005, une fermeture progressive d'environ 3 mm a été constatée. La période 2006-2007 est nettement plus délicate à interpréter en raison du bruit de fond constaté, difficilement assimilable à des mouvements millimétriques quotidiens. Cependant, une tendance à la fermeture semble ressortir, essentiellement en mai 2007 où la fissure se serait fermée rapidement de 5 mm. Cette tendance se confirme en 2008. Au total sur 4 ans, la fermeture de la fissure serait de l'ordre de 8 mm. Il convient de souligner que l'extensomètre MA04 n'est pas positionné sur la fissure la plus proche du rempart, mais également que l'appareillage MA06, placé latéralement sur la même fissure (cf. Illustration 20), ne montre pas de mouvement significatif pendant la même période hormis fin 2005, mais ce déplacement est plutôt assimilable à un artéfact lié à la foudre sur le dispositif. Il convient donc de rester prudent sur les résultats issus de MA04.

4.3.2.2. Relations avec les pluies

Le graphique précédent met en relation les mouvements extensométriques avec les pluies journalières enregistrées à la station météorologique du Maïdo.

Il s'avère qu'il n'y a pas de relation évidente entre pluie et déplacement du rempart, et ceci y compris pour l'extensomètre MA04 qui est affecté par le plus de mouvements apparents :

- les pluies les plus importantes de début 2006 – tempête DIWA – ne sont pas suivies de déplacements significatifs ;
- a contrario, les fermetures de fissures de mi 2007 ne sont pas précédées de pluies exceptionnelles.

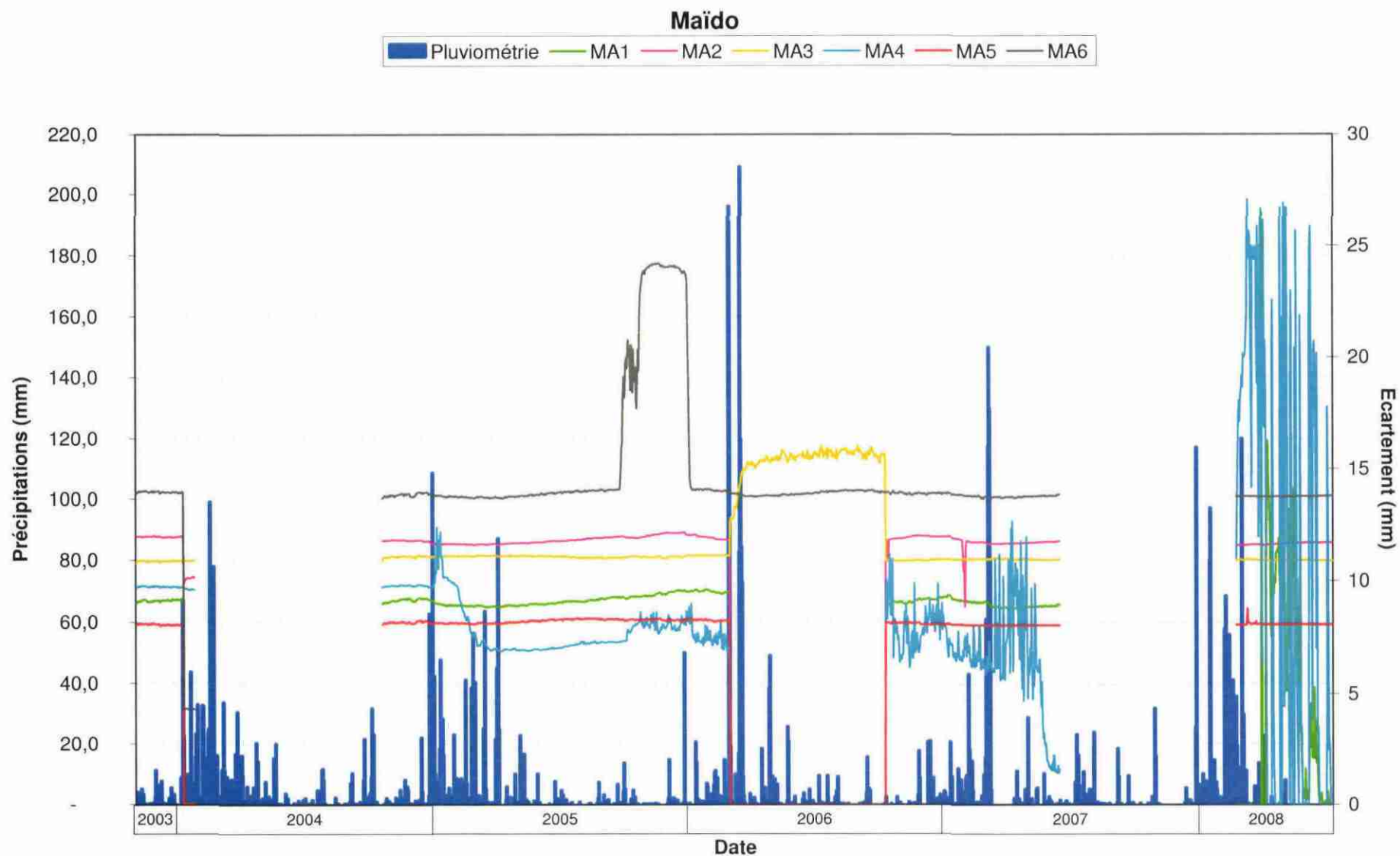


Illustration 32 – Comparaison pluies / déplacement sur les extensomètres du Maïdo

4.3.3. Résultats au rempart de Mahavel

4.3.3.1. Mouvements mesurés

Des résultats ont été obtenus entre février 2004 et décembre 2005, c'est-à-dire sur près de 2 années de suivi. Depuis, des pannes successives n'ont plus permis d'utiliser le dispositif de mesure de Mahavel.

Si l'on fait abstraction des artéfacts de mesure en début d'acquisition, le graphique ci-avant met en évidence les éléments suivants :

- les mesures ne montrent pas de déplacement important sur toute la période de suivi. Cependant les extensomètres MH2, MH3A, MH3D et 4 semblent mettre en évidence une légère ouverture de l'ordre de 1 mm en 2 années ;
- comme au Maïdo, des mouvements réversibles de l'ordre du 1/10 de mm sont mesurés quotidiennement. Ils sont induits par les phénomènes de dilatation et de rétraction thermiques issus du contraste de température entre le jour et la nuit ;
- à plus vaste échelle, de vastes ondulations, associées au contraste thermique entre saisons sont perceptibles. Conformément au Maïdo, l'amplitude de ces ondulations n'excède pas 1 mm.

4.3.3.2. Relations avec les pluies

Le graphique de l'illustration 34 permet la comparaison les mouvements extensométriques avec les pluies journalières enregistrées à la station météorologique de Commerson.

Comme au Maïdo, aucune relation évidente entre pluie et ouverture de fissure ne peut être mise en évidence.

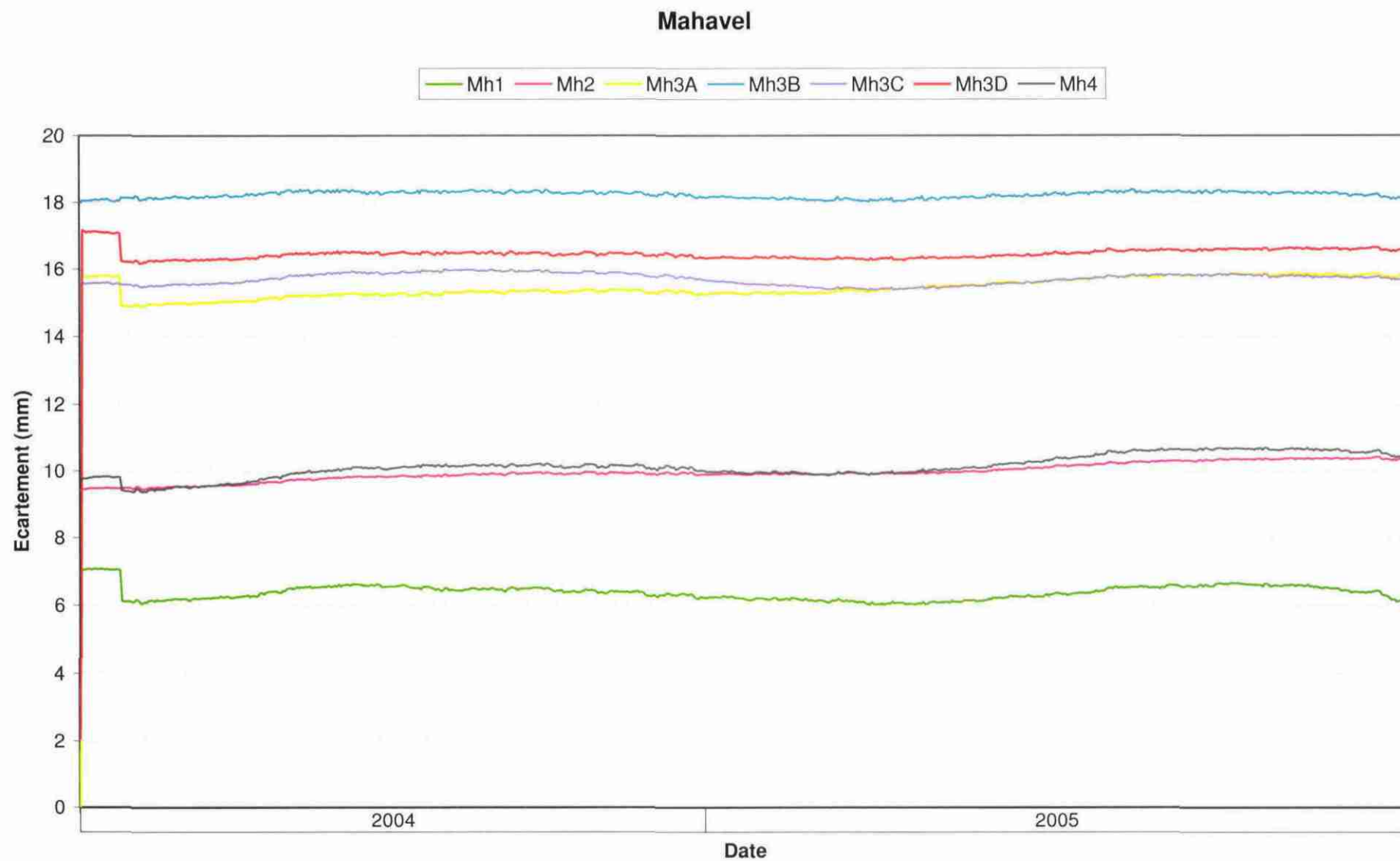


Illustration 33 – Déplacements mesurés sur les extensomètres de Mahavel

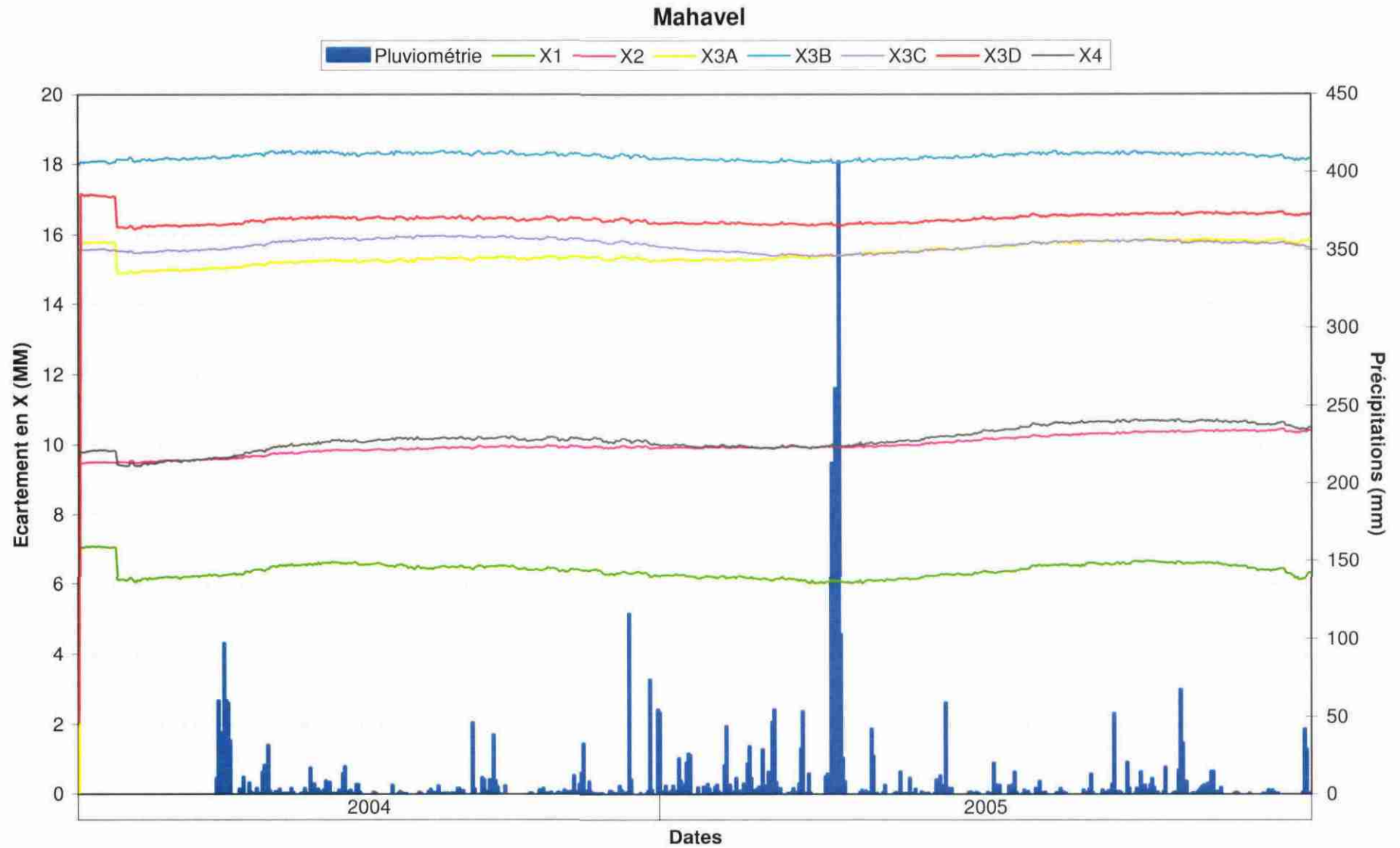


Illustration 34 – Comparaison pluies / déplacement sur les extensomètres de Mahavel

4.3.4. Interprétation

a) Relations avec les pluies

En premier lieu, les deux sites instrumentés se singularisent par des déplacements quasi nuls des fissures, hormis les mouvements thermiques réversibles quotidiens et saisonniers. Au Maïdo, seul l'extensomètre MA04 montre des mouvements de fermeture significatifs (8 mm en 4 ans). Cependant, ce résultat doit être considéré avec prudence en raison de son unicité. A Mahavel, plusieurs extensomètres traduisent une très légère tendance à l'ouverture progressive des fissures (1 mm en 2 années). On regrettera que cette station n'ait pas fonctionné plus longtemps pour confirmer ce mouvement.

En second lieu, l'absence de relation directe évidente entre pluies et ouverture de fissure doit être considérée comme un résultat exploitable.

Sur la base de ces enseignements, il est possible d'affirmer que sur les deux sites examinés les écroulements en masse ne semblent pas directement liés à une importante mise en pression hydraulique des fractures verticales, rapidement après des pluies exceptionnelles, et provoquant un basculement du pan rocheux. Cela s'explique par plusieurs raisons :

- la dimension de ces fractures qui se révèlent extrêmement drainantes, et qui nécessiteraient une alimentation considérable en eau pour permettre le développement de pressions suffisantes pour déplacer un panneau rocheux très volumineux. Par ailleurs, les niveaux scoriacés très ouverts peuvent contribuer au drainage du système ;
- les pentes moyennes de la paroi dans le rempart ne sont pas subverticales. Elles se rapprochent de 55°, sauf peut être en tête de paroi où la falaise se redresse. En conséquence, les panneaux rocheux ne sont pas dans une situation proche de l'équilibre gravitaire. Il serait donc nécessaire de développer un mouvement horizontal très important (plusieurs mètres, voire plus de 10 m) avant de permettre le basculement des gigantesques panneaux rocheux. Cette géométrie écarte également l'explication d'une rupture par flambement de la colonne de roche sous son propre poids ;
- au niveau du Maïdo, le plateau et les coulées sont inclinées de quelques degrés vers l'Ouest, c'est-à-dire à l'opposé du rempart. Cela signifie que les eaux infiltrées s'écartent rapidement du rempart, ce qui limite la possibilité de mise en pression des fissures ;
- à Mahavel, le pendage des coulées ramène les eaux infiltrées vers le rempart. Cependant, l'impluvium sur le plateau entre le rempart et le rempart de l'escarpement de la Plaine des Sables à l'Est est assez étroit : de l'ordre de 300 m. Le potentiel d'alimentation en eaux souterraines reste donc limité.

Cependant, si les précipitations n'apparaissent pas comme étant un facteur direct de déclenchement des effondrements de rempart sur les 2 sites étudiés (ce constat a été également fait sur d'autres sites de La Réunion comme par exemple l'effondrement du Bras des Roches Noires en décembre 2006), les eaux d'infiltration peuvent jouer un rôle indéniable dans la "fragilisation" de l'édifice rocheux. A ce titre, il est intéressant de s'intéresser à l'éboulement d'environ 2 millions de m³ qui s'est produit le 18/01/2001 à Mahavel. Les pluies enregistrées sur le pluviographe de la station Météo-France de

Commerson (cf. Illustration 35) ne mettent pas en évidence de pluie importante dans les quelques jours qui précèdent l'éboulement en masse. Néanmoins entre 11 et 13 jours au préalable, des pluies exceptionnelles ont été enregistrées : 1 310 mm le 6 janvier (valeur assez proche du records de la station dépassant les 1 500 mm / 24 h), et 2 133 mm cumulés en 3 jours. Même si chaque pluie exceptionnelle ne se traduit pas systématiquement par un éboulement, il est délicat de totalement écarter toute relation entre l'éboulement du 18 janvier 2001 et les très fortes pluies des 5, 6 et 7 janvier. Le décalage de plusieurs semaines entre les précipitations exceptionnelles et l'effondrement en masse démontre que les eaux infiltrées ayant transité jusqu'à la zone fracturée constituent un facteur de dégradation, ce qui ne semble pas être autant le cas des eaux de ruissellement ou se déversant directement dans les fissures, la pérennité de ces dernières directement dans la zone fracturée très drainante étant faible. Fort de ce constat, il est possible d'estimer que les pluies jouent un rôle indirect par l'intermédiaire des circulations souterraines. Cette action peut s'expliquer essentiellement de plusieurs façons :

- d'une part, par un effet de saturation dans le temps du remplissage argileux en fond de fissure, provoquant ainsi une chute de cohésion de ces argiles et une action de "lubrification". Cela se traduit par une baisse de la résistance au cisaillement de la fissure et donc un report de charge plus important du poids de la colonne de roche sur son assise ;
- d'autre part, des mises en pressions hydrauliques localisées dans les fissures. Bien qu'elles ne provoquent probablement pas directement une ouverture et un basculement des écaïles rocheuses, elles suffisent également à faire chuter la part de résistance en cisaillement entre les 2 épontes de la fissure, mais cette fois-ci vis-à-vis de la composante en frottement.

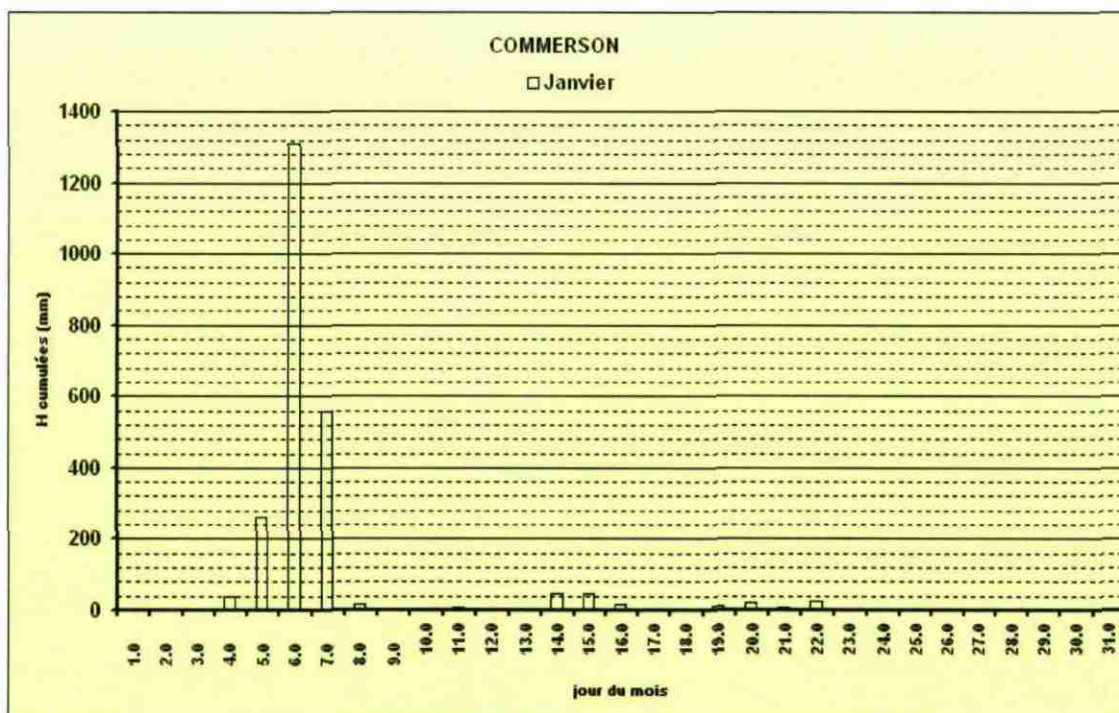


Illustration 35 – Pluies journalières enregistrées à la station météorologique de Commerson en janvier 2001 (© Météo-France)

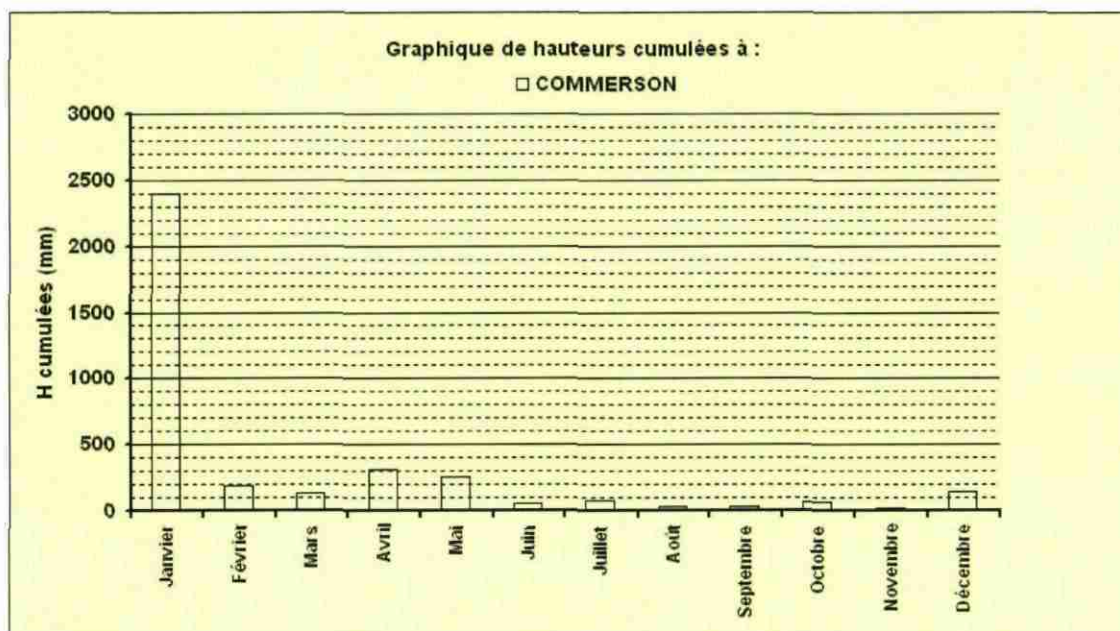


Illustration 36 – Pluies mensuelles enregistrées à la station météorologique de Commerson en 2001
(© Météo-France)

b) Typologie de la rupture

Ces constats amènent à conclure que l'effondrement des grands panneaux rocheux au niveau des remparts est probablement lié à une rupture du pied de la colonne rocheuse (cf. Illustration 37) sous l'action de son poids, et non à un basculement ou à flambement de l'écaïlle. Ceci est corroboré par la géométrie des cicatrices de ruptures dont la base s'incurve progressivement vers le rempart. Des phénomènes de basculement ou de flambement, auraient plutôt laissé des formes en "vires" assez larges à la base de la cicatrice, témoignage d'un décollement et d'un pivotement de la colonne de roche sur sa base.

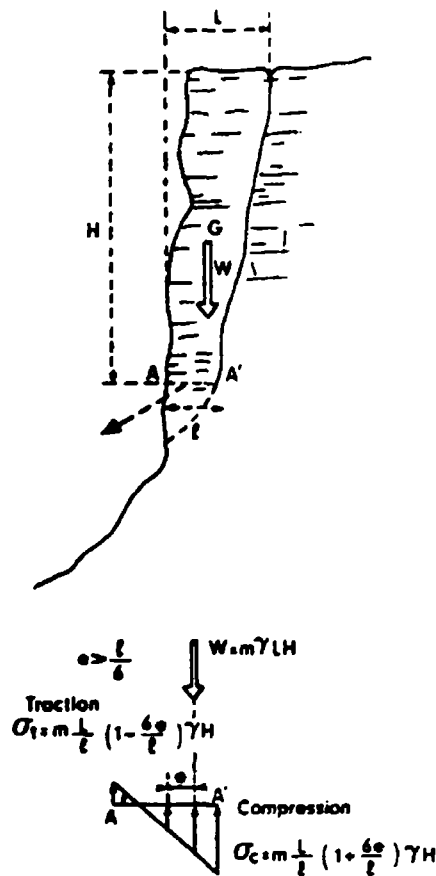


Illustration 37 – Schéma de principe de rupture de pied

Toutes les observations sur site et les modalisations faites sur des escarpements constitués d'empilements tabulaires démontrent que les fissures de traction se révèlent légèrement concaves en profondeur, et ont tendance à se rapprocher de la paroi. Cela signifie que pour des fissures de grande profondeur, outre que le poids de la colonne à supporter est très important, la largeur de l'assise de l'écaille sera d'autant plus faible que la fissure se développe en profondeur. Ainsi, si l'on néglige la part de résistance au cisaillement entre les épontes subverticales des fissures, cela se traduit par une contrainte verticale d'autant plus importante sur la base de l'écaille, que la fissuration est profonde.

Par ailleurs, les observations faites sur les grands fronts de carrière à ciel ouvert, ainsi que sur les remparts qui limitent le cratère du Dolomieu au sommet du Piton de la Fournaise – cratère effondré de 200 m en avril 2007 - montrent qu'après abattage en masse les fissures de décompression se développent très rapidement dans les quelques mois qui suivent. Par la suite, on observe une poursuite plus lente de l'ouverture des fissures existantes et l'apparition de nouvelles discontinuités plus éloignées des parois. Cela témoigne d'une évolution progressive de la fissuration dans le temps, d'abord très rapide, puis de plus en

plus lente, la fissuration progressant horizontalement et verticalement par décompression et effet de fatigue.

Ainsi, lorsque la fracturation a suffisamment évolué en profondeur, le poids de l'écaille de roche à supporter est tel que l'assise rocheuse vient à rompre, comme lors d'un essai d'écrasement uniaxial d'une éprouvette de béton. Cette situation de rupture sera atteinte prématurément si l'assise de la colonne de roche est déjà préfracturée ou altérée.

Le développement d'une cicatrice régulière oblique à la paroi ("coup de cuillère") est très représentatif de ce mode de rupture.

Pour les plus vastes effondrements de rempart, la largeur du panneau détaché sera de l'ordre de 10 à 20 % de la hauteur de la paroi.

Par ailleurs, on soulignera que l'adjonction d'eau souterraine au niveau des fissures dans les semaines qui suivent un épisode pluvieux important, peut être l'ultime facteur déclenchant vis-à-vis d'une situation déjà très évoluée et proche de la rupture, l'eau pouvant avoir une action en matière de baisse de la résistance au cisaillement des épontes des fissures ou provoquer une poussée hydraulique en fond de fissure. Toutefois, soulignons que des cas de rupture en masse totalement indépendants d'épisode pluvieux significatif sont connus.

c) Différences entre Maïdo et Mahavel

Concernant les remparts du Maïdo et de Mahavel, il convient donc d'imaginer que les éboulements en masse qui ont façonné ces sites ont été suivis d'une fissuration très rapide dans les premières dizaines de mètres en arrière des parois (principalement dans une bande de terrain de largeur de l'ordre de 1/10 de la hauteur du rempart). Cette fissuration, acquise en quelques semaines, s'est par la suite développée beaucoup plus lentement que cela soit verticalement ou horizontalement (en s'écartant de la paroi). L'instrumentation en place depuis fin 2003 suit cette seconde phase d'évolution lente, ce qui explique la relative stagnation des résultats extensométrique.

Cependant, entre le Maïdo et Mahavel, certaines différences sont à noter. En effet, si l'on fait abstraction de l'extensomètre MA04, dont les mouvements ne sont pas confirmés par le reste du réseau, le dispositif du Maïdo ne montre pas de mouvement hormis les déplacements réversibles liés aux contrastes thermiques. Ceci s'oppose à Mahavel où 4 extensomètres se sont ouverts progressivement de 1 mm en 2 années. Cette différence de comportement traduit une faible activité des fissures du rempart du Maïdo dont la configuration est très probablement plus ancienne que celle du rempart de Mahavel. Ce dernier est actif : il a été affecté depuis quelques décennies par de vastes effondrements.

Par ailleurs, à Mahavel il existe une discordance nette entre la série supérieure de coulées à pendage faible et la série inférieure pentée à 30° en aval pendage. Cette configuration constitue un contexte très favorable à la déstabilisation prématurée de l'assise des vastes écaïles, le mode de rupture s'assimilant plus à un glissement de la base selon la direction de la surface structurale, plutôt qu'au développement de plans de cisaillement recoupant des coulées tabulaires.

Enfin, si l'on considère qu'au Maïdo l'extensomètre MA04 enregistre des mouvements représentatifs d'une fermeture des fissures, cela peut traduire une légère tendance d'amorce de rupture en pied de l'écaïlle, le panneau en s'affaissant légèrement pouvant se refermer en tête alors que son pied s'écarte de la paroi. Néanmoins, cette hypothèse doit être confirmée dans la mesure où ce comportement reste très isolé sur le site étudié.

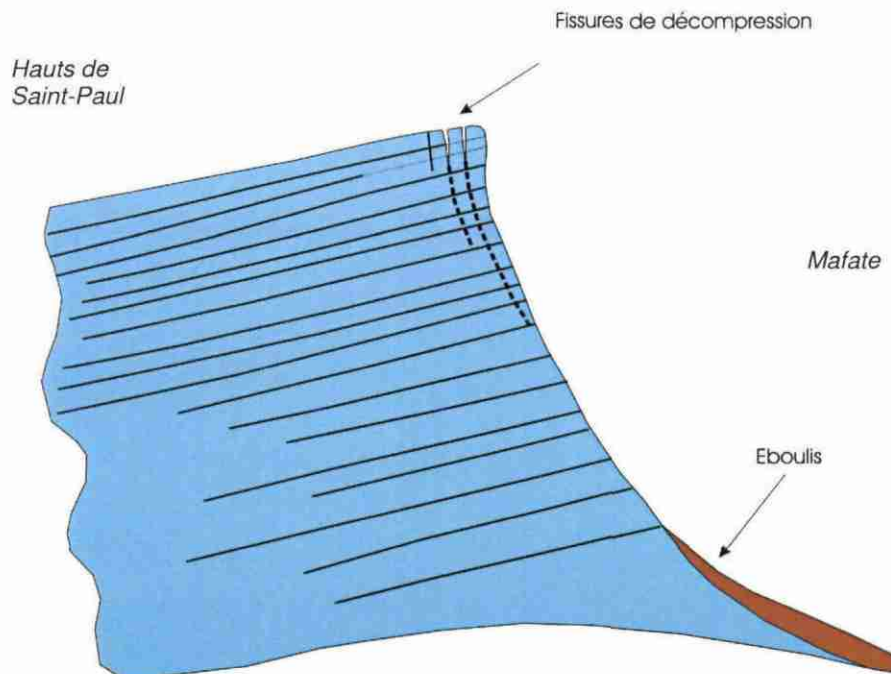


Illustration 38 – Coupe schématique interprétative du rempart du Maïdo

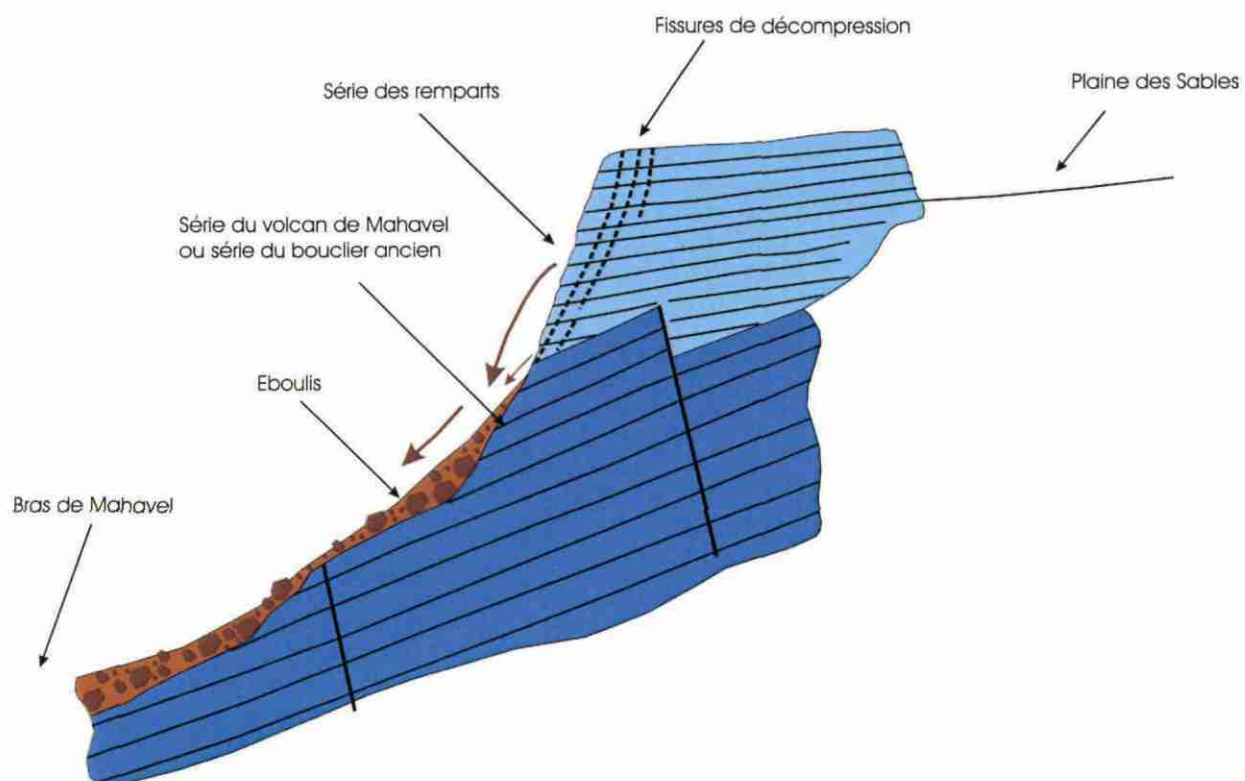


Illustration 39 – Coupe schématique interprétative du rempart de Mahavel (schéma inspiré de P. Mairine : « La route du volcan, découverte de la Fournaise ancienne : Itinéraire géologique » 1998)

5. Conclusion

L'étude et le suivi pendant 4 années de la fissuration en tête des remparts de Mahavel et du Maïdo ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- les grands remparts de la Réunion (de l'ordre de 1000 m de hauteur), constitués d'un vaste empilement de coulées volcaniques sub-tabulaires, sont découpés par de vastes fissures en arrière de la tête de paroi, subparallèles à cette dernière. L'origine de ces fissures de traction, quasi verticales en surface, est liée à la décompression naturelle du massif. Il a été constaté sur d'autres sites 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 ;
- ces fissures, dont l'ouverture est généralement inférieure à 50 cm, peuvent parfois atteindre 4 m de largeur, les discontinuités les plus larges étant principalement placées à proximité immédiate du rempart ;
- les fissures se placent essentiellement dans une bande de terrain dont la largeur depuis la crête de paroi est de l'ordre de 1/10 de la hauteur totale du rempart. Pour les parois plus anciennes (n'ayant pas été affecté par des éboulements en masse depuis plusieurs décennies ou plusieurs siècles), des fissures plus étroites et plus rares se développent jusqu'à une distance de l'ordre de 1/5 de la hauteur totale du rempart ;
- sur les 2 sites instrumentés 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 ne montre pas de mouvement significatif des fissures, à l'exception des contrastes thermiques. 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 traduit un réajustement interne (peut être un début d'affaissement d'un panneau rocheux par amorce de rupture du pied,) mais il convient de rester prudent avec ce résultat isolé qui reste à confirmer ;
- à Mahavel, 4 extensomètres sur 7 ont enregistré pendant 2 années une lente ouverture progressive de l'ordre de 1 mm. Les 3 autres extensomètres ne montrent pas de mouvement significatif des fissures, à l'exception des contrastes thermiques. Ce rempart, "plus jeune", est probablement dans une phase plus active de fissuration qu'au Maïdo avec ouverture plus rapide du massif par effet de décompression ;
- aucune relation directe n'a pu être mise en évidence entre résultats extensométriques et pluies quotidiennes enregistrées à proximité des sites. Toutefois, au regard des pluies exceptionnelles enregistrées à Mahavel en janvier 2001, deux semaines avant l'éboulement de 2 Mm³, on ne peut exclure que les eaux souterraines aient indirectement une action déstabilisatrice vis-à-vis d'une configuration déjà très proche de la rupture, et de toute façon vouée à un effondrement à court ou moyen terme ;

- le mode de déstabilisation à l'origine des vastes effondrements est assimilable à une rupture de l'assise de la colonne rocheuse sous le poids de cette dernière. En effet, lentement la fracturation se développe en profondeur sous l'action de la décompression et de la fatigue de la roche. De plus, la forme légèrement concave des fissures conduit lentement à réduire les dimensions de l'assise de la colonne rocheuse. Le processus se poursuit jusqu'à ce que la contrainte verticale sur l'assise excède la résistance de cette dernière. La rupture est alors assimilable à un essai de compression axial sur échantillon avec développement d'une fracture oblique par rapport à la verticale. Les critères de rupture sont d'autant plus rapidement atteints que l'assise rocheuse est déjà préfracturée ou altérée. Dans ce cadre, les eaux souterraines en fragilisant un peu plus le système peuvent être le déclencheur par anticipation de l'effondrement ;
- le site de Mahavel présente, entre autres, pour singularité d'être affecté par une discordance de séries volcaniques à mi-rempart, les coulées inférieures ayant un pendage d'environ 30° vers l'aval. Cette configuration constitue clairement un facteur permanent favorable au développement d'éboulements en masse, l'assise des écailles étant plus instable.

Ces actions du programmes de recherche MVTERRE ont donc permis d'améliorer la connaissance de la dynamique des grands remparts de La Réunion. Cependant, de nombreuses "zones d'ombre" subsistent et invitent à poursuivre ces recherches :

- poursuite du suivi des déplacements de fissure, en ayant peut être l'opportunité de suivre une amorce réelle de rupture de panneau ;
- complément d'instrumentation : par exemple suivi topographique sur le plateau et dans le rempart, pose d'inclinomètres ;
- complément d'investigation : profils géophysiques afin de repérer la profondeur des fissures ;
- meilleure compréhension de l'action des eaux souterraines sur l'initiation de la rupture.

Bibliographie

- [1] T. Cadet – Rapport sur le glissement de terrain dans la vallée du Bras de Mahavel – Préfecture de La Réunion.
- [2] BRGM (1965) – L'éboulement du rempart au lieu-dit "Le Bras de Mahavel" – BRGM TAN 65
- [3] BRGM (1966). Département de La Réunion – Etude Géologique de l'éperon rive droite de la Rivière des Remparts situé au droit du barrage de Mahavel – Evolution de la morphologie du barrage après le passage du cyclone Denise – rapport BRGM TAN 66 – A/12.
- Nédellec JL, Cruchet M. (2008) – *"Analyse des modes d'effondrement en masse sur plusieurs sites de La Réunion"* – rapport BRGM RP-56724-FR
- Mairine P. (1998) – « La route du volcan, découverte de la Fournaise ancienne : Itinéraire géologique » - Ed. Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise

ANNEXE 1

-

Levé de fissures au Maïdo

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
1	1	5 m	20 cm	N10E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	Nombreuses diaclases à partir de 28 m du rempart			23/04/2003
2	1	5.5 m	10 cm	N30E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	Diaclase : départ en biais du rempart			23/04/2003
2	2	47 m	20 cm	N350E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS 68 - Extension sur 10 m au nord et 15 m au sud			23/04/2003
3	1	0 m à 2 m	40 cm	N330E N200E	Vertical	0	coulée de lave (à vérifier)	Non colmatée	Bloc de 4 x 3 x4 m prêt à tomber	GPS 76	GPS 69	23/04/2003
3	2	17 m	10 cm	N30E	Vertical	0	(à vérifier)	Colmatée par endroit	Faible extension latérale	GPS 76	GPS 69	23/04/2003
3	3	23 m	10 cm à 1m	N155E	Vertical	0	coulée de lave (à vérifier)	Non colmatée	GPS : 70, 71, 72, 73, 74,75	GPS 76	GPS 69	23/04/2003
4	1	15 m	3 m	N0E	Vertical	0	coulée de lave	Colmatée	La fracture n'est pas nette, mais elle est dans l'alignement d'une fracture franche	GPS 77 statue de la vierge	GPS 78	23/04/2003
5	1	42 m	30 cm	N140E	Vertical	0	Tuf soudé	En grande partie colmatée	GPS 196	GPS 195	GPS 197	29/04/2003
5	2	56 m	1 m	N140E	Vertical	0	Tuf soudé	Colmatée		GPS 195	GPS 197	29/04/2003
5	3	112 m					Tuf soudé		Zone de fractures verticales et peu ouvertes sur le versant nord du talweg	GPS 195	GPS 197	29/04/2003
5	4	153 m	50 cm	N10E	Vertical	0	Tuf soudé	En partie colmaté sur le versant nord du talweg	GPS 197	GPS 195	GPS 197	29/04/2003
5	5	42 m	1 m	N10E	Vertical	0	Tuf soudé	Partie supérieure colmatée	Sur le versant nord du talweg	GPS 195	GPS 197	29/04/2003

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
5	6	24 m	25 cm	N150 E	Vertical	0	Tuf soudé		GPS 199	GPS 195	GPS 197	29/04/2003
6	1	23 m	40 cm	N140 E	Vertical	0	Tuf soudé	Quasi - totalement colmatée	GPS : 184, 185, 186, 187, 188 - Fracture très profonde	GPS 190	GPS 189	29/04/2003
6	2	63 m	20 cm	N0E	Vertical	0	Tuf soudé	Partie supérieure colmatée	GPS : 189 - visible sur 20 m	GPS 190	GPS 189	29/04/2003
7	1	0 à 3 m	0.8 m	N0E	Vertical	0	Tuf soudé ou lave ?	Non colmatée	Prêt à tomber	GPS 157	GPS 180	29/04/2003
7	2	13 m	5 cm	N20E	Vertical	0	Tuf soudé ou lave ?	Colmatée	GPS : 175	GPS 157	GPS 180	29/04/2003
7	3	44 m	0.8 m	N0E	Vertical	0	Tuf soudé ou lave ?	Non colmatée	GPS : 176	GPS 157	GPS 180	29/04/2003
7	4	60 m	30 cm	N120 E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 177	GPS 157	GPS 180	29/04/2003
7	5	80 m	5 cm	N20E	Vertical	0	Tuf soudé	Colmatée	GPS : 178	GPS 157	GPS 180	29/04/2003
7	6	91 m	10 cm	N150 E	Vertical	0	Tuf soudé	Colmaté par endroit	GPS : 179	GPS 157	GPS 180	29/04/2003
8	1	3 m	50 cm	N160E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 150, 146, 156, 157 - Fracture de grande taille	GPS 150	GPS 154	25/04/2003
8	2	14 m	40 cm	N 10 E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 155 - Fracture de grande taille	GPS 150	GPS 154	25/04/2003
8	3	33 m	20 cm	N 170 E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 151	GPS 150	GPS 154	25/04/2003
8	4	46 m	15 cm	N 0 E	Vertical	0	Tuf soudé	Partie supérieure couverte par sol		GPS 150	GPS 154	25/04/2003
8	5	63 m	10 cm	N 10 E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 152	GPS 150	GPS 154	25/04/2003
8	6	73 m	10 cm	N 0 E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée		GPS 150	GPS 154	25/04/2003
8	7	106 m	15 cm	N 0E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 153	GPS 150	GPS 154	25/04/2003

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
9	1	9 m	50 cm	N 170 E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144 fracture très profonde	GPS 133	GPS 137	25/04/2003
9	2	27 m	15 cm	N 170 E	Vertical	0	Tuf soudé	Recouverte par sol		GPS 133	GPS 137	25/04/2003
9	3	30 m	20 cm	N 170 E	Vertical	0	Tuf soudé	recouvert par sol	GPS : 134	GPS 133	GPS 137	25/04/2003
9	4	41 m	25 cm	N 10 E	Vertical	0	Tuf soudé	Non colmatée	GPS : 135, 147, 148, 149 - Fracture de grande taille et profonde	GPS 133	GPS 137	25/04/2003
9	5	100 m	15 cm	N 10 E	Vertical	0	Tuf soudé	Recouverte par sol	GPS : 136	GPS 133	GPS 137	25/04/2003
10	1	7 m	30 cm	N130E N170 E	Vertical	0	Coulée de lave (?)	Partiellement recouverte par sol	GPS : 112, 113, 114, 130	GPS 110	GPS 120	25/04/2003
10	2	15 m	30 cm	N170 E	Vertical	0	Coulée de lave (?)	Partiellement recouverte par sol	GPS : 115, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128	GPS 110	GPS 120	25/04/2003
10	3	34 m	10 cm	N 30 E	Vertical	0	Coulée de lave (?)	Partiellement recouverte par sol	GPS : 116	GPS 110	GPS 120	25/04/2003
10	4	75 m	10 cm	N 10 E	Vertical	0	Coulée de lave (?)	Partiellement recouverte par sol	GPS : 117 - Pas d'extension latérale visible	GPS 110	GPS 120	25/04/2003
10	5	119 m	10 cm	?	Vertical	0	Tuf soudé	Partiellement recouverte par sol	GPS : 118 - Fracture visible sur 50 cm de long seulement	GPS 110	GPS 120	25/04/2003
10	6	138 m	1 cm	N 90 E	Vertical	0	Tuf soudé	Colmatée	GPS : 119 - Fracture ou diaclase ?	GPS 110	GPS 120	25/04/2003
11	1	0.5 m	10 cm	N0E	Vertical	0	Coulée de lave	/		GPS 90	GPS 91	23/04/2003
11	2	0 à 8 m	1 m	N0E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	Fracture profonde (7m) - une grande écaille est prête à tomber	GPS 90	GPS 91	23/04/2003
11	3	36 m	30 cm	N160E	Vertical	0	Coulée de lave	En partie colmatée	Fracture profonde	GPS 90	GPS 91	23/04/2003

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
12	1	4.2 à 8 m	4 m	N0E	Vertical	0	coulée de lave et tuf consolidé (?)	En partie colmatée	Très grosse fracture de 44 m de long - GPS : 87,85	GPS 85	GPS 86	23/04/2003
13									Pas de fracture sur ce profil	GPS 84		23/04/2003
14	1	36 m	30 cm	N30 E	Vertical	0	?	En partie recouverte par sol	GPS : 100 - 23 m de long vers le nord	GPS 101	GPS 102	25/03/2003
15	1	1 m		N 130 E	Vertical	0	Coulée de lave (?)			GPS 82		23/04/2003

ANNEXE 2

-

Levé de fissures à Mahavel

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
1	1	4 m	15 cm	N60E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	Fracture ouverte sur le rempart	GPS 231	GPS : 233	21/05/2003
1	2	8 m	20 cm	N90E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée		GPS : 231	GPS : 233	21/05/2003
1	3	12 m	15 cm	N70E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée		GPS : 231	GPS : 233	21/05/2003
1	4	91 m	40 cm	N110E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	GPS : 232, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242 - Fracture s'élargissant vers le sud	GPS : 231	GPS : 233	21/05/2003
2	1	25 m	5 cm	N150E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	GPS : 244 - Fracture ou fissure de refroidissement ?	GPS : 243	GPS : 245	21/05/2003
3	1	13 m	10 cm	N150E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	GPS : 247, 248	GPS : 246	GPS : 250	21/05/2003
3	2	55 m	15 cm	N130E	Vertical	0	Sol	Partie supérieure en partie colmatée	GPS : 249	GPS : 246	GPS : 250	21/05/2003
4	-	-	-	-	-	-	-	-	Pas de Fracture	GPS : 253	GPS : 254	21/05/2003
5	1	13 m	10 cm	N0E	Vertical	0	Coulé de lave	En partie colmatée	GPS : 256 - 50 cm d'extension latérale	GPS : 255	GPS : 265	21/05/2003
5	2	17 m	50 cm à 1m	N140E	Vertical	0	Coulé de lave	Colmatée à 1 m de profondeur	GPS : 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263 - Fracture large et peu profonde	GPS : 255	GPS : 265	21/05/2003
6	1	56 m	5 cm	N150E	Vertical	0	Sol	Non colmatée	Peut être récent ?	GPS : 273	GPS : 276	21/05/2003
7	1	0 à 1 m	20 cm	N170E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	Cassure fraîche - La bordure du rempart est prête à s'effondrer	GPS : 291	GPS : 319	22/05/2003
7	2	6 m	20 cm	N180E	Vertical	0	Coulé de lave	En partie colmatée	Fracture majeure correspondant à la fracture 2 du profil 6	GPS : 291	GPS : 319	22/05/2003

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
7	3	16 m	2 cm	N165E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	GPS : 309	GPS : 291	GPS : 319	22/05/2003
7	4	22 m	10 cm	N160E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	GPS : 310, 311, 312, 313, 314, 315	GPS : 291	GPS : 319	22/05/2003
7	5	38 m	40 cm	N170E	Vertical	0	Coulé de lave	Non colmatée	Le sol est moins affecté que la coulée de lave sous-jacente	GPS : 291	GPS : 319	22/05/2003
8	1	8 m	25 cm	N170E	Vertical	50 cm	Sol	Non colmatée	Cassure fraîche - Fracture de 3 m de profondeur - GPS : 321, 322, 300	GPS : 320	GPS : 336	22/05/2003
8	2	15 m	40 cm	N10E	Vertical	0	Sol	Non colmatée	Cassure fraîche - GPS : 331	GPS : 320	GPS : 336	22/05/2003
8	3	38 m	20 cm	N170E	Vertical	0	Sol	Partie supérieure en partie colmatée	GPS : 332	GPS : 320	GPS : 336	22/05/2003
9	1	12 m	30 cm	N10E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	Suite de la fracture 2 du profil 8 - GPS : 327, 337, 338, 339, 340, 341, 342	GPS : 327	GPS : 350	22/05/2003
9	2	25 m	10 cm	N10E	Vertical	0	Coulée de lave	Partie supérieur en partie colmatée	GPS : 346 (343 - 344?)	GPS : 327	GPS : 350	22/05/2003
9	3	41 m	15 cm	N10E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 348	GPS : 327	GPS : 350	22/05/2003
10	1	10 m	10 cm	N10E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 359	GPS : 359	GPS : 361	22/05/2003
10	2	13 m	10 cm	N10E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée		GPS : 359	GPS : 361	22/05/2003
10	3	21 m	15 cm	N170E	Vertical	0	Coulée de lave	Partie supérieure en partie colmatée	GPS : 360	GPS : 359	GPS : 361	22/05/2003

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
10	4	23 m	15 cm	N170E	Vertical	0	Coulée de lave	Partie supérieure en partie colmatée	-	GPS : 359	GPS : 361	22/05/2003
10	5	29 m	10 cm	N10E	Vertical	0	Coulée de lave	Partie supérieure en partie colmatée	GPS : 358	GPS : 359	GPS : 361	22/05/2003
10	6	60 m	1 à 10 cm	N20E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357	GPS : 359	GPS : 361	22/05/2003
10 bis	7		40 cm	N35E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 416	GPS : 359	GPS : 361	22/05/2003
11	1	3 m	40 cm	N30E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	-	GPS : 362	GPS : 366	22/05/2003
11	2	18 m	10 cm	N0E	Vertical	0	Coulée de lave	En partie colmatée	GPS : 363	GPS : 362	GPS : 366	22/05/2003
11	3	25 m	25 cm	N20E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 364	GPS : 362	GPS : 366	22/05/2003
11	4	45 m	15 cm	N35E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 365	GPS : 362	GPS : 366	22/05/2003
11bis	5	-	10 cm	N40E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 367	GPS : 362	GPS : 366	22/05/2003
11 bis	6	-	25 cm	N30E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 368	GPS : 362	GPS : 366	22/05/2003
11 bis	7	38 m	25 cm	N30E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 369 - Cassure très fraîche	GPS : 362	GPS : 366	22/05/2003
12	1	1 m	40 cm	N20E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	-	GPS : 371	GPS : 377	22/05/2003
12	2	15 m	5 cm	N45E	Vertical	0	Coulée de lave	En partie colmatée	GPS : 372	GPS : 371	GPS : 377	22/05/2003
12	3	30 m	25 cm	N30E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 373	GPS : 371	GPS : 377	22/05/2003

N° du profil	N° fissure	Distance au rempart	Largeur	Direction	Direction du pendage	Rejet vertical apparent	Nature lithologique des terrains affleurant	Colmatage de la fracture	Remarques et points GPS	Début du profil coté rempart	Fin du profil	Profil levé le
12	4	34 m	10 cm	N10E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 374	GPS : 371	GPS : 377	22/05/2003
12	5	42 m	30 cm	N40E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 375	GPS : 371	GPS : 377	22/05/2003
12	6	45 m	10 cm	N40E	Vertical	0	Coulée de lave	En partie colmatée	GPS : 376	GPS : 371	GPS : 377	22/05/2003
13	1	5 m	15 cm	N20E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	-	GPS : 378	GPS : 380	22/05/2003
13	2	24 m	5 cm	N60E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 379	GPS : 378	GPS : 380	22/05/2003
13 bis	3	-	10 cm	N50E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 381	GPS : 378	GPS : 380	22/05/2003
13 bis	4	-	5 cm	N60E	Vertical	0	Coulée de lave	Non colmatée	GPS : 382	GPS : 378	GPS : 380	22/05/2003



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Service géologique régional "Réunion"
5, rue Sainte Anne
97400 – Saint-Denis - France
Tél. : 02 62 21 22 14