

DOCUP 2002-2007 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 2 : Inventaire, détection et suivi des mouvements Sous-module 2.1 : Typologie. Etude des mouvements de terrain de grande ampleur

Etude du glissement de terrain de grande ampleur de Cap Sylvestre, Cirque de Cilaos

Rapport

BRGM/RP-56705- FR

Octobre 2008













Etude du glissement de terrain de grande ampleur de Cap Sylvestre, Cirque de Cilaos

Rapport

BRGM/RP-56705-FR

Octobre 2008

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

M. Cruchet, D. Moiriat

Vérificateur :

Nom : JL. Nédellec

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : JL. Nédellec

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 : lle de La Réunion, mouvement de terrain, glissements, Cilaos, Cap Sylvestre.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Cruchet M. , Moiriat D. (2008) – "Étude du glissement de terrain de grande ampleur de Cap Sylvestre, Cirque de Cilaos " – rapport BRGM RP-56705-FR – 45 p. – 24 illustrations.

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

Synthèse

Le sous-module 2.1 du programme de recherche MVTERRE sur l'étude des mouvements de terrain de grande ampleur à La Réunion prévoit le recensement et l'étude des mouvements de terrain de grande ampleur, en particulier en évaluant leurs mécanismes de fonctionnement. Le présent rapport examine plus spécifiquement le cas du glissement de terrain en masse du Cap Sylvestre dans le cirque de Cilaos.

Cette étude a mis en évidence les éléments suivants :

- la zone en mouvement, s'échelonnant sur environ 350 m de dénivelé, concerne près de 60 ha de terrain. Le volume instable est estimé à 30 Mm³;
- deux mouvements en masse affectent la zone :
 - essentiellement en partie Nord, un premier mécanisme est caractérisé par des mouvements bancs sur bancs dans un faciès brèchique induré et par une fracturation de versant dans les coulées de débris. Ce mouvement indique une extension vers le Nord et est facilité par les pendages conformes à la pente des matériaux indurés constitutifs du versant ;
 - surtout en partie Sud, un second mécanisme s'exprime par des tassements ou effondrements linéaires le long de discontinuités N-S. Ce mouvement, principal dans le versant, indique une extension vers l'Ouest. D'après l'analyse structurale, ce mouvement serait modelé par une structuration préexistante de discontinuités tectoniques d'orientation N-S.

Ces glissements datent d'avant 1961 et l'un profond a rejoué brutalement et ébranlé tout le versant lors du passage de Hyacinthe en janvier 1980 ;

- la dynamique n'est pas homogène sur la zone instable, le secteur Sud étant plus mobile avec une moyenne de 8,1 cm/an vers l'Ouest en partie basse du versant entre fin 2003 et fin 2007. Au Nord, le déplacement est réduit à 3,9 cm/an avec un composante légèrement plus vers le Nord-Est. On remarquera que ces vitesses de déplacement restent assez modestes au regard de celles enregistrées sur les grands glissements de Salazie ;
- le rôle des pluies est mal connu sur le site faute d'investigations plus poussées. Cependant, il a été constaté par les riverains des phases d'aggravement de la fissuration dans les semaines qui suivent les évènements pluvieux majeurs. Ceci met en évidence l'impact des eaux souterraines infiltrées dans la mécanique régissant l'instabilité.

Pour aller plus loin dans l'action de recherche sur le glissement en masse de Cap Sylvestre, divers points nécessiteraient d'être précisés ou engagés :

- la caractérisation géomécanique et hydrogéologique des formations constitutives du massif ;
- une définition plus fine de la géométrie des discontinuités ;
- la poursuite des mesures de déplacements des bornes géodésiques, complétée par la mise en place d'autres bornes ;
- une modélisation numérique appliquée au versant par la méthode des éléments distincts.

Sommaire

1.	INTRODUCTION	8
2.	PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	9
	2.1. Contexte	9
	2.2. Morphologie du versant de Cap Sylvestre	12
3.	OBSERVATIONS LITHOLOGIQUES ET STRUCTURALES	15
	3.1. Lithologies rencontrées	15
	3.2. Analyse structurale	20
4.	REPERAGE DES INDICES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN SUR LE VERSANT DE CAP SYLVESTRE	23
	4.1. Relevé et typologie des indices de mouvements de terrain	23
	4.2. Indices de mouvements de terrain supplémentaires Donnés par l'écoulement des eaux 30	
	4.3. Analyse de photographies aériennes - Evolution discontinue du versant	31
5.	CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT DE GRANDE AMPLEUR	33
	5.1. Résultats des observations	33
	5.2. Contours du mouvement de grande ampleur et superficie concernée	35
	5.3. Eléments de cinématique – Suivi des bornes géodésiques	36
6.	PROBLEMATIQUES	38
	6.1. Limites de l'étude	38
	6.2. Dynamique de versant	38
	6.3. Proposition de développements futurs	39
7.	CONCLUSION	41

Liste des illustrations

Figure 1: Estimations de quelques paramètres climatiques des îlets du cirque de Cilaos (Raunet, 1991)

- Figure 1a : situation de la zone d'étude
- Figure 1b : zone d'étude et position des coupes et des routes aval et amont
- Figure 1c : Vue générale NNE SSE de la zone d'étude
- Figure 1 d : Vue partielle en 3D du versant du Cap Sylvestre
- Figure 2 : Vue de la ravine Bras Sec depuis la route aval
- Figure 3 : Vue du Bonnet de Prêtre depuis la route amont

Figure 4 : Vue depuis le sentier des Calumets de la pente moyenne entre Le Bonnet de Prêtre et le Cap Sylvestre (au premier plan la Mare d'Affouches)

- Figure 5 : Vue de la dépression au Sud du Cap Sylvestre
- Figure 6 : Vue du Cap Sylvestre depuis un point au Sud de l'Ilet du Bonnet Carré
- Figure 7 : Lithologies rencontrées
- Figure 8 : Faciès brèchique n°1 induré
- Figure 9 : Coulée de débris en bordure de la route aval
- Figure 10 : Coulée de débris en pied de la ravine Bras Sec
- Figure 11 : Dyke dans une coulée lavique sur la route aval
- Figure 12 : Analyse structurale du versant de Cap Sylvestre et ses proches alentours
- Figure 13 : Carte des indices mouvements de terrain
- Figure 14 : Fracturation de versant dans une coulée de débris en bordure de la route aval
- Figure 15 : Mouvement banc sur banc des plans stratigraphiques du faciès brèchique 1 induré
- Figure 16 : Muret éclaté dans l'axe d'une ligne d'affaissement de la route aval
- Figure 17 : Vue partielle1 d'un effondrement résultant de Hyacinthe
- Figure 18 : Vue partielle 2 d'un effondrement résultant de Hyacinthe
- Figure 19 : Indice de suffosion dans la zone S2

Figure 20 : Fissuration en "dents de scies" dans la zone S3

Figure 21 : Vue partielle du flanc gauche de la ravine Bras Sec (faciès brèchique 1)

Figure 23 : Repérage des zones qui ont évoluées par photographies aériennes

Figure 24a : Schématique des deux mouvements observés

Figure 23 b : Localisation des principales zones en extension – Vue partielle du versant en 3D

Figure 23c : Limites du mouvement de fond de cirque

Figure 24 : Mouvements moyens annules enregistrées sur les bornes géodésiques entre décembre 2003 et novembre 2007 (en rouge : contours supposés de la zone instable)

1. Introduction

ans 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.

Le volet 2 du programme prévoyait l'identification et l'étude des mouvements de terrain de grande ampleur, avec notamment dans le sous-module 2.2, la mise en place d'un référentiel géodésique et la réalisation de campagnes de mesures de positionnement par GPS, dans le but de détecter et de quantifier les déplacements.

Le présent rapport, qui s'inscrit dans le cadre du rendu du sous-module 2.1 – inventaire, détection et suivi des mouvements de grande ampleur - synthétise les données acquises dans le cadre du programme MVTerre concernant le glissement de Cap Sylvestre dans le crique de Cilaos, et présente notamment l'analyse de la typologie de l'instabilité ainsi que l'exploitation des résultats du suivi géodésique mis en place fin 2003 dans la zone.

2. Présentation de la zone d'étude

2.1. CONTEXTE

La zone d'étude (Fig. 1a, 1b) se situe dans le cirque de Cilaos, l'un des trois cirques avec Salazie et Mafate appartenant au Massif du Piton des Neiges. Ces cirques -ont une origine morpho - tectonique récente (Chevallier, 1979), ce qui signifie que ces vastes effondrements sont provoqués par l'érosion des flancs du volcan ancien, érosion guidée par les discontinuités découpant le massif volcanique.

En effet, le climat tropical humide de La Réunion se singularise par des intensités exceptionnelles de précipitations durant l'été austral (l'Ile de la Réunion détient des records mondiaux de pluviométrie entre 12h -1170 mm- et 15 jours – 6083 mm). Ces pluies diluviennes poussent les équilibres naturels à leur limite et engendrent de nombreux mouvements de terrain qui sont essentiellement localisés au niveau des escarpements (remparts, falaises), à l'intérieur des cirques et dans une moindre proportion sur les planèzes. La pluviométrie est cependant très variable dans le temps et dans l'espace (Coudray, 2004) ; il existe des différences importantes à l'intérieur de chaque cirque du fait des effets orographiques : encaissement et exposition par rapport aux remparts périphériques (Raunet, 1991).

Le cirque de Cilaos est en position intermédiaire entre le cirque de Mafate plus sec et le cirque de Salazie plus humide. Son gradient pluviométrique, du pôle le plus sec au pôle le plus humide, est orienté SW – NE (Raunet, 1991). Le quart Nord - Est du cirque de Cilaos où se situe la zone d'étude, est inondé à partir du coteau de Kerveguen par les alizés humides venant de la côte Est et canalisés dans les plaines de Bébour – Bélouve.

	Alt. moy. (m)	Pluies estimées (mm/an)	Nb. de mois secs (< 50 mm)	Nb. de mois peu pluvieux (< 100 mm)
llet Dennemont	550	1700	4 à 5	6 à 7
Ilets Sources	1000			
Coteau des orangers	1170			
llet à Cordes	1100	1700 à 1900	4	6
Mare Sèche	1050			
Peter Both	900	[
Palmiste Rouge	880	2000 à 2200	2	5
Cilaos	1200			
Bras Sec (limite nord de				
la zone de cette étude)	1275			
Mare à Joseph		2600 à 2900	1	3à4
Grand Matarum	1380			
	1500			

Figure 1 : Estimations de quelques paramètres climatiques des îlets du cirque de Cilaos (Raunet, 1991)





Le secteur du Cap Sylvestre est donc soumis à une pluviométrie annuelle moyenne abondante et fréquente (1 mois sec par an) comparée à d'autres secteurs du cirque de Cilaos (Fig. 1). Cela entraîne un décapage continu des versants et des mouvements de terrain qui peuvent devenir catastrophiques lors de périodes dépressionnaires et cycloniques. En parcourant les archives de presse disponibles (Le Quotidien et Journal de l'Île de La Réunion), 3 trois évènements sont recensés affectant la zone d'étude et ses alentours à la suite ou pendant des évènements cycloniques :

- <u>cyclone Hyacinthe</u> (janvier 1980) : la RN 5 est emportée au niveau de Gueule Rouge sur 50 m. La route aval (Fig. 1b) a par ailleurs été complètement détruite par des glissements superficiels et profonds dont l'un daterait du cyclone de 1948 (Humbert et *al.* 1981). Il est tombé en cumul, du 16 au 27 janvier 1980, entre 3 et 4 m d'eau sur la zone d'étude (d'après la carte des isohyètes d'une étude hydrologique et climatique sur le cyclone Hyacinthe – Météo France). A titre informatif, les records de précipitation ont été établis à Cilaos en février 1973 lors du passage du cyclone Lydie (1,50 m en 48 h) et en mars 1952 (1,870 m en 24 h).
- <u>cyclone Clothilda</u> (février 1987) : la route de Bras sec (route aval Fig. 1b) est emportée sur 100m ;
- cyclone Firinga (février 1989) : l'îlet Gueule Rouge (Fig. 1b) est enclavé.

<u>Altitude</u>

Il existe bien d'autres évènements qui n'ont pas été recensés puisque tout le cours inférieur de Bras Sec (Fig. 1b) a été épisodiquement affecté, tant sur sa rive droite que sur sa rive gauche, par des désordres obstruant plus ou moins son lit (Humbert et *al.* 1981). Ces auteurs sont les premiers, après une reconnaissance de terrain et un examen de photographies aériennes, à indiquer que le versant du cap Sylvestre sur la rive gauche de Bras Sec (Fig. 1b, 1c) est affecté par un vaste mouvement de fond localement réactivé par des glissements et des ravinements superficiels. Ces auteurs rapportent enfin le témoignage d'un vieux paysan qui a vu évoluer le versant et dont ses parents lui disaient que le paysage de Cap Sylvestre se transformait sans cesse au cours des années.

2.2. MORPHOLOGIE DU VERSANT DE CAP SYLVESTRE

Le versant de Cap Sylvestre (Fig. 1b, 1c, 1d) se situe entre l'îlet Bras Sec au Nord et l'îlet de Gueule Rouge au Sud. Il est délimité :

- à l'Ouest par la ravine Bras Sec (Fig. 1b & 2), d'axe NE SW et qui rejoint à la cote moyenne + 950 m, son point le plus bas, la ravine Benjoin. Le lit de la ravine Bras Sec, obstrué de blocs et d'éboulis, est "sec" sur la majorité de son tracé (observation d'août 2004).
- à l'Est par le mont Le Bonnet de Prêtre qui culmine à 1712 m (Fig. 1 b, 1c & 3)

Ce versant est entaillé par de petites ravines (sans nom) et par la ravine Blanche qui s'écoule entre l'îlet de Gueule Rouge et l'îlet du Bonnet Carré avant de rejoindre la ravine Bras Sec (Fig. 1b).

Entre la ravine Blanche et le Cap Sylvestre, le versant est incliné vers l'Ouest (direction N – S des courbes de niveaux) tandis qu'entre le Cap Sylvestre et la Mare d'Affouches, le versant est incliné vers le NW (direction moyenne N50° des courbes de niveaux).

Entre le promontoire du Cap Sylvestre et la ravine Bras Sec, les pentes moyennes des terrains sont comprises entre 30 et 55° vers l'Ouest (Fig. 1d). Elles ne s'accroissent pas régulièrement avec l'altitude et montrent plutôt une déclivité "en dents de scies" indiquant de possibles mouvements de terrain. Au-delà la cote + 1350 m et après une petite dépression où passe la route amont rejoignant l'îlet Bonnet Carré (Fig. 1b), la pente moyenne croît régulièrement jusqu'à la falaise du mont Le Bonnet de Prêtre (Fig. 5 & 6).

Les photographies aériennes du secteur (Fig. 22) montrent, qu'entre le Bonnet de Prêtre à l'Est, la ravine Bras Sec à l'Ouest, la ravine Blanche au Sud et la Mare d'Affouches au Nord, toute la surface du versant de Cap Sylvestre est "chahutée", bosselée sans ordre apparent. Le promontoire rocheux du Cap Sylvestre (Fig. 5 & 6) se détache par ailleurs du paysage, il est bordé au Sud par une dépression des terrains où sont cultivées les lentilles de Cilaos (Fig. 6), cette dépression étant limitée plus au Sud par le flanc Nord de la ravine Blanche (Fig. 22).

Enfin, sur tout le versant de Cap Sylvestre, hormis sur les bordures des ravines, s'accroche une forêt hygrophile plus clairsemée au Nord. Le long de la route aval et de la route amont (Fig. 1b), se répartissent des zones cultivées généralement près des habitations.



Figure 2 : Vue de la ravine Bras Sec depuis la route aval



Figure 3 : Vue du Bonnet de Prêtre depuis la route amont



Figure 4 : Vue depuis le sentier des Calumets de la pente moyenne entre Le Bonnet de Prêtre et le Cap Sylvestre (au premier plan la Mare d'Affouches)



Figure 5 : Vue de la dépression au Sud du Cap Sylvestre



Figure 6 : Vue du Cap Sylvestre depuis un point au Sud de l'Ilet du Bonnet Carré

3. Observations lithologiques et structurales

3.1. LITHOLOGIES RENCONTREES

7 types principaux de matériaux sont observés sur les pentes du versant de Cap Sylvestre (Fig. 7) :

<u>Un faciès brèchique n°1</u> (Fig. 8) de couleur noirâtre avec des éléments anguleux ou arrondis parfois zéolitisés, de dimension supérieure à la dizaine de centimètres. Cette brèche est tantôt indurée, et est alors parcourue par des dykes d'épaisseur demi – métrique, tantôt en amas très friables et altérés dans lesquels aucune structure n'est repérable. Ce faciès arme toute la moitié basse du versant de Cap Sylvestre, on le trouve également dans les hauteurs au-dessus de la ravine Blanche. Sa stratification moyenne sur la route aval lorsqu'elle est indurée est d'orientation N60°_E 60 N, soit subparallèle aux courbes de niveaux du versant à cet endroit.

 Dans ou sur ce faciès brèchique n°1, se trouvent parfois sur les pentes, entre la ravine Bras Sec et la route aval, <u>des coulées de débris (Fig. 9 & 10)</u> remobilisant principalement des matériaux du faciès brèchique n°1. Sur la figure 7, sont notées les principales coulées observées mais on en trouve également en pied et sur le flanc gauche de la ravine Bras Sec.

- Sur la route aval entre la RN 5 et la ravine Blanche ou sur le promontoire du Cap Sylvestre, on trouve des lambeaux de coulées laviques zéolitisées (Fig. 11) et parcourues de dykes ou de sills. La stratification est d'orientation moyenne :
 - o N70°_E 60 N entre la RN5 et le point coté +1078,7 m sur la route aval ;
 - N130°_E 60 N entre le point coté +1078,7 m sur la route aval et la ravine Blanche. Elle tangente une discontinuité N130°_E passant par l'axe de la ravine Blanche.
 - N85°_E 70 N sur la route amont ;
 - o subhorizontale au mont Le Bonnet de Prêtre.
- <u>Un faciès brèchique n°2</u> récent qui résulte de l'effondrement d'une partie du Bonnet de Prêtre dont la loupe d'arrachement est bien visible sur la figure 4. Il s'agit en surface de chaos rocheux avec des éléments parfois de grandes tailles qui sont venus "ennoyer" la coulée lavique affleurant au Cap Sylvestre.



- <u>Des éboulis</u> que l'on peut observer un peu partout sur les pentes du versant. Ils sont particulièrement concentrés entre les cotes + 1175 m et + 1250 m dans la zone de replat du versant au pied du Cap Sylvestre.
- Enfin, affleurent <u>des colluvions de pente</u> au Sud et au Nord du versant de Cap Sylvestre.

En recoupant ses observations avec les travaux récents de Lacquement (2004) et les informations orales de P. Chevalier (géologue régional du BRGM Réunion), il est possible de préciser que :

- les coulées zéolitisées correspondent aux coulées laviques de la phase II (période d'émission volcanique du Piton des Neiges entre 2,1 Ma et 430 000 ans);
- le faciès brèchique n°1 correspond à la brèche dite B1 qui est la plus représentée dans le cirque de Cilaos et dont la puissance dépasse plusieurs centaines de mètres. Cette brèche matricielle, uniquement formée à partir du démantèlement des coulées laviques de la phase II, peut se répartir en 3 grands ensembles avec une absence de contact francs entre les différents ensembles. Le cirque tel qu'il est observé aujourd'hui résulterait essentiellement de la mise en place de la brèche B1;
- le faciès brèchique n°2 correspond à une brèche récente dont la mise en place est postérieure aux dernières coulées volcaniques identifiées en fond de cirque. Cette brèche, dite brèche du Bonnet de Prêtre, résulte de l'effondrement d'une partie du relief du Bonnet de Prêtre.;

Enfin, on remarquera que depuis la fin de l'activité volcanique du Piton des Neiges l'érosion s'est intensifiée avec le creusement des vallées et le démantèlement de l'ensemble des formations du massif. Ce démantèlement est à l'origine de la formation des brèches récentes.



Figure 8 : Faciès brèchique n°1 induré



Figure 9 : Coulée de débris en bordure de la route aval



Figure 10 : Coulée de débris en pied de la ravine Bras Sec



Figure 11 : Dyke dans une coulée lavique sur la route aval

3.2. ANALYSE STRUCTURALE

Les mesures, les observations à différents points de la zone d'étude (Fig. 12a secteurs A, B, C, D, E), ainsi que les observations par photographies aériennes (Fig. 22), font apparaître 4 familles principales de discontinuités :

- Une famille de discontinuités peu fréquente, d'orientation N125-130°_E à pendage subvertical, observables principalement dans les secteurs B et C. Dans le secteur B aux bords de la ravine blanche, l'orientation de la coulée est parallèle à cette direction de discontinuité. Ces discontinuités sont recoupées par les autres discontinuités et leurs sont donc antérieures.
- Une famille de discontinuités d'orientation N20 à 30°E 80 W ou E, décrochante dextre (stries avec pitch 22° S), qui recoupe toute la coulée entre la RN5 et la ravine blanche (secteur A). Ces failles décrochantes ont une forme ondulée (ampleur métrique à décamétrique) et sont soulignées par des dykes qui suivent leurs plans, ou par des filonnets étirés dans le plan de la discontinuité.
- Dans le secteur B, ces discontinuités ont une orientation moyenne N0°E 80 W ou E, puis dans le secteur D, leur orientation moyenne passe à N 160° E 80 W ou E. Elles recoupent alors le faciès brèchique n°1 induré et sont toujours parcourues localement par des dykes.
- Une famille de discontinuités d'orientation N90 à 115°E pendage de 60° à 80° N ou S, de même forme ondulée (secteur C) que la famille précédente mais beaucoup moins fréquente et moins exprimée. Aucun sens de mouvement n'a pu être observé et d'après les recoupements observés dans le secteur C, elles seraient contemporaines de la famille précédente.
- Un faisceau de discontinuité N60 à 70°E recoupe le Bonnet de Prêtre et le Piton Béthoune au Nord Est de la zone d'étude. Ces discontinuités n'ont pu être observées sur les affleurements indurés, néanmoins les observations du paysage et des photographies aériennes (Fig. 22) tendraient à montrer que leur pendage est vers le NW.

Par ailleurs, les mesures réalisées par Billard en 1976 dans le tunnel de Gueule Rouge (secteur F - Fig. 12a) sont cohérentes avec les mesures de cette étude et montrent que la direction $N30^{\circ}_{E}$ est la plus fréquente au sud de la zone d'étude. Ce même auteur (1979) précise que tout le secteur du Bonnet de Prêtre est faillé par un faisceau d'accidents Nord – Sud qui tranche verticalement l'extrémité Est de la chaîne Est des Gueules Rouges. Du reste, ces fractures $N30^{\circ}_{E}$ sont responsables de l'abaissement des flancs des Pitons de Gueule Rouge et du Bonnet de Prêtre (Fig. 1a, Chevallier, 1979). Cet auteur rattache également les fractures $N0^{\circ}_{E}$ à cette famille $N30^{\circ}_{E}$. Il précise en outre que le réseau $N70^{\circ}_{E}$ est guidé par les intrusions anciennes et qu'il est surtout observable par photographie aérienne.





Fig 12. Analyse structurale du versant de Cap Sylvestre et ses proches alentours

De façon synthétique, un repérage par photographie aérienne (Fig. 22 en partie) des principaux traits structuraux dans un rayon de 1,5 km autour de Cap Sylvestre (Fig. 12b) montre que la direction la plus fréquente est N55-60°_E. Ce repérage montre également que tous les effondrements, arrachements sont guidés par les structures préexistantes (conclusion déjà formulée par Chevallier, 1979). De même, le tracé des ravines emprunte des directions tectoniques (par ex. pour la ravine Bras Sec, les coudes correspondent à des plans de discontinuités).

Enfin, il est possible de préciser le champ de contraintes tectonique lié à la fracturation Nord-Sud parallèle aux dykes. En appliquant la méthode graphique des dièdres droits (uniquement valable pour des familles de discontinuités résultant d'un même état de contraintes), et sachant que pour des discontinuités décrochantes la contrainte principale σ^2 est perpendiculaire au plan des discontinuités, on trouve une contrainte principale σ^1 comprise entre N30°_E et N70°_E (compression NE-SW) et une contrainte principale σ^3 comprise entre N120°_E et N150°_E (extension NW-SE).

Ce résultat est cohérent avec le modèle trouvé par Chevallier (1979) pour la mise en place du système intrusif qui recoupe les brèches primitives : la direction N30°_E serait la direction du décrochement dextre et la direction N70°_E (direction de la contrainte σ 1) représenterait les fissures d'extension.

Il n'est malheureusement pas possible d'aller plus loin dans l'analyse sans d'autres mesures, ni une chronologie plus fine des évènements.

4. Repérage des indices de mouvements de terrain sur le versant de Cap Sylvestre

4.1. RELEVE ET TYPOLOGIE DES INDICES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN

<u>Mouvement de terrain n°1</u> : en suivant la route aval du Nord en se déplaçant vers le Sud, plusieurs indices de mouvements de terrain sont observables dans le faciès brèchique n°1 lorsque les plans de stratification dans les niveaux indurés sont subparallèles aux courbes de niveaux :

dans une coulée de débris, des fractures courbes d'orientation moyenne N90°_E à pendage décroissant de 70 à 20° N (Fig 13, 14), plans sur lesquels viennent tangenter des segments plus raides. Ces formes sont typiques de fractures liées à une décompression gravitaire dont le sens est globalement vers le Nord (Fig. 13).



Figure 14 : Fracturation de versant dans une coulée de débris en bordure de la route aval



dans tout l'affleurement de brèche indurée longeant la route aval, un jeu en failles normale de la stratification (Fig. 13) avec un mouvement banc sur banc (Fig. 15). Ces discontinuités recoupent la fracturation tectonique orientée N-S ouverte et décomprimée dans ce secteur, et indiquent un mouvement de versant vers le Nord.



Figure 15 : Mouvement banc sur banc des plans stratigraphiques du faciès brèchique 1 induré

En suivant la route aval du Nord en allant vers le Sud, apparaissent, lorsque les courbes de niveaux sont d'orientation Nord – Sud jusqu'à la ravine Blanche (Fig. 13), de nombreux indices de contraction des terrains : reptation avec arbres couchés, fissurations du muret bordant la route aval, lignes d'affaissement sur la route aval (Fig. 16).



Figure 16 : Muret éclaté dans l'axe d'une ligne d'affaissement de la route aval

Mouvement de terrain n°2 : Entre les cotes + 1175 m et +1275 m, au pied du Cap Sylvestre dans une zone de replat et de concentration d'éboulis (Fig. 5 & 13) :

- au Nord et juste à l'aplomb du mouvement de terrain observé sur la route aval dans les matériaux indurés (mouvement banc sur banc de la stratification) et non indurés (fracturation courbe), on observe une fissuration en bordure du talus, subparallèle aux courbes de niveaux. La zone végétalisée est difficile d'accès et le talus présente des "marches d'escaliers" en bordure.
- au Sud, au pied de la dépression indiquée figure 5, dans une zone d'éboulis envahie par les broussailles, on observe de grands linéaments d'orientation N-S (Fig. 13) dont la largeur décroît en s'éloignant du front du versant (observations limitées du fait du couvert végétal très dense). Près du versant, ces linéaments sont larges de plus de 2 m et profond de plus d'1 m (Fig. 17, 18) Ces accidents seraient survenus lors de Hyacinthe d'après plusieurs paysans interrogés (3 témoignages) qui indiquent tous cette zone comme la principale s'étant effondrée brutalement une nuit après 14 jours de pluies intenses.



Figure 17 : Vue partielle1 d'un effondrement résultant de Hyacinthe



Figure 18 : Vue partielle 2 d'un effondrement résultant de Hyacinthe

Par ailleurs, dans toute la zone du promontoire rocheux de Cap Sylvestre, entre +1275 m et +1330 m, d'anciens d'arrachements et parfois des arbres couchés dans des zones humides (Fig. 13) sont observables.

Autour et au-dessus de la route amont, se trouve une zone de chaos rocheux avec des indices de ravinement souterrain (suffosion, zone S2 Fig. 13). Cette zone est alignée avec :

- la zone S3 qui présente des éboulis en gradins (indices d'extension) et une fissuration des terrains (Fig. 13, 19 & 20);
- la zone S1 (Mare d'Affouches) qui n'est autre qu'une terrasse alluviale (Fig. 4 & 13);
- un arrachement situé vers la cote + 1350 m au-dessus de la ravine Blanche.



Figure 19 : Indice de suffosion dans la zone S2



Figure 20 : Fissuration en "dents de scies" dans la zone S3

Dans la ravine Bras Sec, aucune fracturation courbe n'a été observée sur le flanc gauche de la ravine mais les flancs sont recouverts par les éboulis ou des coulées de débris successives qui calfeutrent les discontinuités potentielles. Les coulées de débris ou le faciès brèchique n° 1 présentent parfois des fractures arrière et sont creusées par l'érosion (Fig. 21).



Figure 21 : Vue partielle du flanc gauche de la ravine Bras Sec (faciès brèchique 1)

Enfin au Nord de la zone en bordure Ouest de la route aval près d'une aire de repos (Fig. 13), les bordures du replat sont fissurées en gradins et montrent une évolution de la loupe d'arrachement qui longe la route aval à cet endroit.

4.2. INDICES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN SUPPLEMENTAIRES DONNES PAR L'ECOULEMENT DES EAUX

- Au-dessus de la cote +1350 m, les petits ruisseaux qui s'écoulent des pentes du Bonnet de Prêtre disparaissent dans les zones S1 et S2 (Fig. 13). Au niveau de la zone S3, le même phénomène est constaté légèrement plus au Sud tandis que dans la zone S3 même est rencontrée une végétation et des secteurs humides.
- Dans la zone du Cap Sylvestre entre les cotes +1275 m et +1350 m (Fig. 13), sont observables des zones humides sur les flancs de ce promontoire rocheux. Elles s'accompagnent d'arrachement des terrains ou d'arbres couchés.
- Dans la zone où ont été localisés les effondrements dus à Hyacinthe (Fig. 13), l'eau disparaît en amont de cette zone et réapparaît en aval en dessous de la cote + 1200 m où l'on voit une ligne d'émergence dans le paysage, bordée par un contraste de végétation.
- Entre les cotes + 1175 m et +1275 m, au pied du Cap Sylvestre dans une zone de replat et de concentration d'éboulis (Fig. 13), les eaux venant du NE du secteur d'études (aux alentours de la Mare d'Affouches) sont drainées soit vers la petite ravine d'axe E-W et coupant la route aval au Nord juste à l'aplomb de l'arrachement bordant la route aval, soit vers le Sud-Ouest (parallèlement à une discontinuité N60°_E repérée par photographie aérienne) où elles disparaissent vers la cote + 1150 m. Elles réapparaissent vers la cote + 1120 m, en dessous de la route aval.
- Dans la ravine Bras Sec, on observe de l'eau seulement sur une partie Sud (observations à une époque sèche de l'année).

4.3. ANALYSE DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES - EVOLUTION DISCONTINUE DU VERSANT

Le Fond d'archives BRGM dispose de photographies aériennes IGN couvrant la zone d'études et datant de 1961, 1966, 1978, 1984 et 1997.

- Sur les photographie de 1961 et 1966 (Fig. 22 a), on observe :
 - Un effondrement au Nord de la zone d'étude (zone entourée par des tirets rouges) indiquant un départ de matériaux vers le Nord. Cet effondrement de forme elliptique s'est produit dans la zone où ont été observés la fracturation de versant et les mouvements banc sur banc de la stratification dans le faciès brèchique n°1 (Mvt n°1 Fig. 13).
 - La zone où sont survenus les effondrements linéaires lors de Hyacinthe est déjà bien marquée dans le paysage, ce qui confirme les observations de Humbert et al. (1981) sur l'activité avant Hyacinthe de cette zone. Par ailleurs, ces effondrements linéaires sont dans le prolongement direct de discontinuités tectoniques Nord –Sud (Mvt n°2 Fig. 13).
- <u>Sur la photographie de 1978 (Fig. 22 b)</u>, il est possible de voir que les traits de l'effondrement au Nord de la zone tendent à s'estomper dans le paysage par rapport à 1966. La route aval a été par ailleurs tracée.

Une autre zone aux alentours de la zone S3 (Fig. 13) s'est également transformée par rapport à 1966.

 <u>Sur la photographie de 1984 (Fig. 22 c)</u>, le cyclone Hyacinthe est passé depuis quatre ans. La zone des effondrements linéaires a évolué par rapport à 1978 et d'autres linéaments parallèles à des discontinuités tectoniques sont apparus près de la ravine Bras Sec.

Par ailleurs, la zone de Cap Sylvestre est plus "chahutée" qu'en 1978 et la zone aux alentours de la zone S3 a encore évolué.

- <u>Sur la photographie de 1997 (Fig. 22 d)</u>, les zones du Cap Sylvestre et la zone aux alentours de la zone S3 (Fig. 13) ont encore évolué par rapport à 1984.

Enfin, les discontinuités Est - Ouest sont plus incisées dans le paysage que précédemment.



Campagne IGN 1966



Campagne IGN 1984



Campagne IGN 1978



Campagne IGN 1997

A N



5. Caractéristiques du mouvement de grande ampleur

5.1. **RESULTATS DES OBSERVATIONS**

Le repérage des indices mouvements de terrain, des zones humides et des écoulements des eaux ainsi que les observations de photographies aériennes de 1961 à 1997, permettent d'avancer que les mouvements survenus sur le versant de Cap Sylvestre sont guidés par les discontinuités préexistantes du massif, discontinuités tectoniques et plans stratigraphiques.

Ce versant est affecté par la conjonction de deux mouvements (au moins) datant d'avant 1961 et dont l'un profond a rejoué brutalement et ébranlé tout le versant lors du passage de Hyacinthe en janvier 1980 :

- <u>Un mouvement n°1</u> (Fig. 13, 14 et 15) qui s'observe bien dans la partie Nord du versant lorsque les courbes de niveaux sont parallèles à la stratification d'orientation moyenne N60°_E à pendage Nord. Ce mouvement est caractérisé par des mouvements bancs sur bancs dans le faciès brèchique n°1 et par une fracturation de versant dans les coulées de débris. Ce mouvement indique une extension vers le Nord et est facilité par les pendages conformes à la pente des matériaux indurés (faciès brèchique 1 et coulée lavique).
- <u>Un mouvement n°2</u> (Fig. 13, 17 et 18) qui s'exprime pour l'instant surtout dans la partie Sud du versant lorsque les courbes de niveaux ont une orientation N-S, par des tassements ou effondrements linéaires le long de chemins tectoniques N-S. Ce mouvement 2 indique une extension vers l'Ouest. Il est par ailleurs, d'après les photographies aériennes et les observations, plus étendu que le mouvement 1. C'est le phénomène majeur du versant de Cap Sylvestre et il n'est pas caractérisé, d'après les observations, par des discontinuités courbes en profondeur indiquant une surface de décollement tel un glissement profond. Il s'agit plutôt de tassements profonds survenant là où existent des discontinuités tectoniques d'orientation N-S.

On peut résumer schématiquement ces deux mouvements observés (Fig. 23 a) en plaçant sur un stéréogramme les trois directions principales de la fracturation tectonique N-S (N30°_E, N0°_E et N150°_E) et un plan stratigraphique d'orientation moyenne N60°_E à pendage Nord. Si seulement le poids des terrains est en jeu (ce qui est une approximation valable et raisonnable pour un mouvement de versant), alors la contrainte compressive principale σ 1 est verticale et égale à la pression lithostatique. Cela entraîne un jeu en faille normale du plan stratigraphique à pendage Nord (extension vers le Nord) et une ouverture des discontinuités tectoniques d'axe N-S (extension NE-SW).

Par ailleurs, les indices MVT ont été classés suivant qu'ils indiquaient une extension ou une contraction des terrains (Fig. 13). Cela permet de cerner les zones en extension sur le versant de Cap Sylvestre (Fig. 23 b, 23 c). On en distingue trois principales dont les limites restent imprécises (en pointillé sur la figure 23 c) :



Fig 24b : Localisation des principales zones en extension Vue partielle du versant en 3D

- une zone d'extension au-dessus de la route amont (zone amont) comprend la zone active S3 (Fig. 13, 22) et les zones d'infiltration des eaux (zones S1 et S2, Fig. 14);
- une zone d'extension à mi-hauteur du versant (zone à mi-hauteur) comprend des zones actives entre 1961 et 1997, dont les tassements dûs à Hyacinthe ;
- une zone d'extension moins large en pied de pente (zone aval) où deux tassements suivant des directions tectoniques sont apparus après Hyacinthe (Fig. 23 c).

Les zones d'extension amont et à mi-hauteur se caractérisent de plus par le changement qu'elles imposent à l'écoulement des eaux. En effet, l'eau à tendance à disparaître dans ces zones d'infiltration et à resurgir plus en aval (Fig. 13).

5.2. CONTOURS DU MOUVEMENT DE GRANDE AMPLEUR ET SUPERFICIE CONCERNEE

De par les observations réalisées, il est possible de cerner les contours de ce mouvement de grande ampleur sur le versant de Cap Sylvestre (Fig. 23 c) :

- au Sud, la limite est précisée par l'axe de la ravine Blanche qui emprunte une direction tectonique N130°_E et par le contraste lithologique présent le long de la route aval entre le faciès brèchique n°1 et la coulée lavique. Le pendage de cette coulée lavique est par ailleurs orienté vers le NE à cet endroit ;
- à l'Ouest et au Nord Ouest, la limite est définie par l'axe de la ravine Bras Sec.
 L'examen des flancs de la ravine n'a pas montré, que ce soit en rive gauche ou en rive droite, une fracturation de versant avec des cisaillements comme dans un glissement profond. Le flanc droit de la ravine Bras Sec doit par ailleurs jouer un rôle de butée
- au Nord, la limite passerait par la discontinuité Est-Ouest qui borde la Mare d'Affouches et traverse l'arrachement en bordure de la route aval (Fig. 13). Il est possible néanmoins l'élargir étant donné les courbes de niveaux et suivre la limite du faciès brèchique n°2 qui a suivi les vallons existants ;
- à l'Est, la limite est définie par l'alignement de la Mare d'Affouches, les zones S1, S2 et S3 (Fig. 14). Il est possible, notamment au Sud du versant et au-dessus de la ravine Blanche, que cette limite soit placée encore plus à l'Est du versant étant donné l'activité de la zone S3.

Au total, c'est une surface de versant de plus de 60 ha concernée par ce mouvement profond de fond de cirque. Cette taille de mouvement est comparable aux surfaces de mouvements d'ampleur telle le mouvement de La Clapière à Saint Etienne de Tinée (Alpes Maritimes) dont la surface dépasse 80 ha (Gugliemi, 2004) ou celui des Ruines de Séchilienne (Isère) avec le tassement du versant Sud du Mont Sec, mais bien en deçà des 2 plus importants glissements actifs de La Réunion que sont les glissements de Grand Ilet (398 ha)et de Hell-Bourg / Mare à Poule d'Eau (467 ha) à Salazie.

Le volume mobilisable est en revanche plus difficile à estimer sachant que l'on ne connaît pas la profondeur de ce mouvement. Mais si l'on considère l'ensemble de la zone, la différence d'altitude moyenne entre la ravine Bras Sec et la limite Est du mouvement est de 350 m, ce qui donne un volume total théorique mobilisable de plus de 200 millions de m³. Ce volume semble toutefois excessif. Une épaisseur moyenne en mouvement de 50 m

conduirait à un volume de glissement de l'ordre de 30 Mm³ (à comparer aux 60 millions de m³ pour La Clapière, 100 millions de m³ pour les Ruines de Séchilienne pour les volumes totaux mobilisables (Cojean et *al.* 2002), et près de 500 Mm³ pour le glissement de Grand llet à Salazie).

5.3. ELEMENTS DE CINEMATIQUE – SUIVI DES BORNES GEODESIQUES

Sept bornes géodésiques ont été implantées dans la zone supposée en mouvement du glissement de Cap Sylvestre, ou à proximité immédiate (cf. Fig 24). Ces bornes ont été placées en décembre 2003 et relevées en novembre 2007, soit 4 années plus tard. En effet, les difficultés administratives rencontrées sur le projet n'ont pas permis de procéder à 2 levés annuels comme initialement prévus.

Une des bornes n'a pas été retrouvée, probablement supprimée par un agriculteur ayant besoin de récupérer de la terre cultivable.

Les mesures effectuées sur plus de 150 bornes géodésiques sur l'ensemble des 3 cirques de La Réunion ont montré qu'un déplacement vers l'Est entre 1 et 2 cm n'est pas significatif, cette valeur résultant probablement d'artéfacts de traitement des données liés à un changement de référentiel entre les 2 sessions de mesures.

Ainsi, si l'on écarte les déplacements apparents inférieurs à 2 cm, la figure 24 met en évidence les éléments suivants :

- sur les 4 bornes exploitables dans la zone supposée en mouvement, 3 montrent des déplacements horizontaux significatifs échelonnés entre 3,2 et 8,1 cm/an vers l'Ouest. Il convient de souligner que ces valeurs sont nettement plus faibles que les déplacements maximaux obtenues sur les 2 grands glissements actifs de Salazie (jusqu'à 170 cm / an);
- les mouvements ne sont pas homogènes ; la borne Sud-Ouest présente la valeur la plus forte. Elle se place néanmoins dans la zone du mouvement n°1, glissement considéré comme majeur dans la zone d'étude ;
- les déplacements semblent s'amortir vers l'amont, ce qui reste très classique, même si l'on pourra s'étonner de la valeur négligeable obtenue sur la borne Nord-Est ;
- une légère rotation vers le Nord de la composante en déplacement de la borne Nord-Ouest est constatée, ce qui est conforme à l'analyse faire précédemment ;
- les tassements montrent une tendance plutôt similaire avec des valeurs échelonnées entre 4,2 et 9,4 cm / 4 ans, soit respectivement en moyenne 1,1 et 2,4 cm / an (les déplacements verticaux sont classiquement plus faibles que les déplacements horizontaux), les valeurs les plus élevées étant constatées sur les bornes situées en partie Sud de la zone active. L'amortissement vers l'amont est moins prononcé que les déplacements horizontaux;
- en dehors de la zone supposée instable, les bornes ne montrent pas de mouvement significatif ;



Figure 24 : Mouvements moyens annuels enregistrés sur les bornes géodésiques entre décembre 2003 et novembre 2007 (en bleu : déplacements plinémétriques moyens annuels ; en vert : tassements cumulés sur 4 ans - en rouge : contours supposés de la zone instable)

Le site n'ayant pas fait l'objet d'un suivi pluriannuel des bornes géodésiques, il n'est pas possible de mettre en évidence une relation entre événements pluvieux et déplacements de terrains, malgré l'occurrence de 2 tempêtes tropicales ou cyclones pendant la période de suivi : Diwa en 2006 et Gamède en 2007. Toutefois, les témoignages des riverains ont démontré que la fissuration s'accentue dans les semaines qui suivent chaque épisode pluvieux majeur. De plus, les nombreuses résurgences et infiltrations dans le massif mettent en évidence les circulations d'eau souterraines, toujours propices à la déstabilisation des terrains.

6. Problématiques

6.1. LIMITES DE L'ETUDE

Les résultats de cette étude, basée essentiellement sur des observations de terrain, demandent à être confortés par :

- une cartographie plus précise des lithologies rencontrées : le repérage et la délimitation de toutes les coulées de débris et d'éboulis permettraient de mieux cibler les zones actives ou ayant été mobilisée par le passé ;
- si le rôle de la fracturation Nord-Sud est clair, des relevés structuraux supplémentaires expliciteraient le rôle des discontinuités Est-Ouest observables et permettraient par ailleurs de délimiter des compartiments dans le versant. En effet étant donné le découpage du massif par les discontinuités préexistantes, il semble que le versant soit un agencement de compartiments provoquant de reports de charges (suivant le pendage) qui restent à préciser : si deux mouvements principaux ont été observés, il est probable qu'il en y ait d'autres localement (rejeu en "damier");
- le régime d'écoulement des eaux à l'intérieur du massif demande des observations supplémentaires qui seraient riches d'information : mesures de débits en amont et en aval à la saison sèche et à la saison humide, localisation plus précise des émergences pérennes ou diffuses et localisation plus précise des zones d'infiltration.

Par ailleurs, nous n'avons pas de données existantes sur le champ de contraintes tectoniques local actuel dans la zone du Bonnet de Prêtre et son influence potentielle sur le mouvement de versant. L'extension Nord - Sud trouvée (Fig. 23 a) pourrait avoir une composante tectonique au vu de l'analyse du champ de contraintes responsable de la fracturation N-S (*cf.* § 3.2 Analyse structurale). Aussi, sur la route aval, il a été observé un diaclasage tardif (ampleur métrique) dans les matériaux indurés d'orientation N150°_E à pendage subvertical qui recoupe toutes les autres discontinuités et dont l'origine reste à préciser.

6.2. DYNAMIQUE DE VERSANT

Les évènements recensés dans le secteur du Bonnet de Prêtre, les données MVTerre ainsi que les données climatiques laisse entrevoir une dynamique de versant continue avec des accélérations importantes des mouvements lors des épisodes cycloniques : lors de Hyacinthe, on sait que les très fortes pluies tombées en une quinzaine de jours sur la zone ont accéléré et aggravé des tassements déjà existants à mi-hauteur du versant et près de la ravine Bras Sec (Fig. 13).

Une courbe déformation totale (en extension) – temps, montrerait une croissance régulière de la déformation marquée par des pics (accélération – relaxation) suite à des cyclones ou de manière générale à des dépressions tropicales. Cette allure a été mise en évidence sur les deux glissements de Salazie.

Mais cela n'explique pas le moteur du phénomène : est-on en présence d'une décompression de versant continue (simplement liée au poids des terres et à l'appel au vide facilité par la pluviométrie régulière et abondante sur la zone) et accélérée lors des phénomènes cycloniques (comme à Salazie), ou le moteur du phénomène est-il simplement entretenu par les accélérations lors des périodes cycloniques ?

Par ailleurs, les mouvements observés lors de Hyacinthe impliquent la question de savoir s'il existe un seuil critique (hauteur d'eau/temps donné) au-delà duquel tout le versant pourrait être mis en charge et mobilisé. Ou quelle que soit la hauteur d'eau, seuls quelques compartiments du versant seraient affectés comme l'évolution discontinue par photographie aérienne tendrait à le montrer (Fig. 23).

On peut également se poser la question de savoir, lorsque la déformation totale aura atteint une certaine valeur critique, s'il n'y aura pas une accélération, déclenchée ou non par un cyclone, jusqu'à la mise en mouvement de tout le versant (analogie avec le stade accéléré en fluage après un stade long dit fluage stationnaire et marqué par une croissance linéaire de la déformation avec le temps) ?

De plus, il conviendrait d'en savoir plus sur la profondeur des discontinuités et les mécanismes en jeu lors de fortes pluies :

- mise en charge hydraulique des fractures puis effondrement spontané ?
- altération des matériaux dans les discontinuités entraînant une diminution de leurs caractéristiques mécaniques ?

Si les ouvertures des discontinuités Nord –Sud croissent avec le temps, il en est peut-être de même en profondeur.

6.3. **PROPOSITION DE DEVELOPPEMENTS FUTURS**

En complément des observations et afin de mieux cerner les mécanismes mis en jeu dans ce mouvement profond, il serait souhaitable, outre des observations in situ plus fine, de mieux caractériser :

- les matériaux hétérogènes, indurés ou non indurés, souvent remaniés et altérés, physiquement (porosité, perméabilité, densité, présence d'argiles gonflantes, teneur en eau) et mécaniquement (cohésion, angle de frottement, résistance à la traction en condition saturée);
- les discontinuités ;

Une poursuite des mesures de déplacements des bornes géodésiques, complété par la mise en place d'autres bornes, notamment en amont sur la limite Est du mouvement de fond de cirque, permettraient de mieux comprendre l'évolution de la zone arrière du mouvement. De plus, des mesures pluriannuelles livreraient plus d'informations sur les relations entre les déplacements et les pluies.

Enfin, une modélisation numérique appliquée à ce versant apporterait des informations supplémentaires (elle devrait se faire par la méthode des éléments distincts étant donné le découpage du massif par la fracturation) mais elle semble délicate à mettre en œuvre tant les paramètres sont nombreux et souvent mal maîtrisés :

- géométrie et caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux ;
- forme du versant (modélisation en 3D);

- fracturation : plusieurs familles, profondeur des discontinuités, extension ;
- taux d'abrasion des matériaux sur le flanc de la ravine Bras Sec, ce qui implique une diminution de la butée ;
- localisation des zones saturées.

7. Conclusion

L'étude du glissement de terrain de Cap Sylvestre dans le cirque de Cilaos a mis en évidence les éléments suivants :

- la zone en mouvement, s'échelonnant sur environ 350 m de dénivelé, concerne près de 60 ha de terrain. Le volume instable est estimé à 30 Mm³ ;
- deux mouvements en masse affectent la zone :
 - essentiellement en partie Nord, un premier mécanisme est caractérisé par des mouvements bancs sur bancs dans un faciès brèchique induré et par une fracturation de versant dans les coulées de débris. Ce mouvement indique une extension vers le Nord et est facilité par les pendages conformes à la pente des matériaux indurés constitutifs du versant ;
 - surtout en partie Sud, un second mécanisme s'exprime par des tassements ou effondrements linéaires le long de discontinuités N-S. Ce mouvement, principal dans le versant, indique une extension vers l'Ouest. D'après l'analyse structurale, ce mouvement serait modelé par une structuration préexistante de discontinuités tectoniques d'orientation N-S.

Ces glissements datent d'avant 1961 et l'un profond a rejoué brutalement et ébranlé tout le versant lors du passage de Hyacinthe en janvier 1980 ;

- la dynamique n'est pas homogène sur la zone instable, le secteur Sud étant plus mobile avec une moyenne de 8,1 cm/an de déplacement horizontal vers l'Ouest en partie basse du versant entre fin 2003 et fin 2007. Au Nord, le déplacement est réduit à 3,9 cm/an avec une composante légèrement plus vers le Nord-Est. On remarquera que ces vitesses de déplacement restent assez modestes au regard de celles enregistrées sur les grands glissements de Salazie ;
- le rôle des pluies est mal connu sur le site faute d'investigations plus poussées. Cependant, il a été constaté par les riverains des phases d'aggravement de la fissuration dans les semaines qui suivent les évènements pluvieux majeurs. Ceci met en évidence l'impact des eaux souterraines infiltrées dans la mécanique régissant l'instabilité.

Pour aller plus loin dans l'action de recherche sur le glissement en masse de Cap Sylvestre, divers points nécessiteraient d'être précisés ou engagés :

- caractérisation géomécanique et hydrogéologique des formations constitutives du massif;
- géométrie plus fine des discontinuités ;
- poursuite des mesures de déplacements des bornes géodésiques, complété par la mise en place d'autres bornes ;
- modélisation numérique appliquée au versant par la méthode des éléments distincts.

Bibliographie

ALVARADO GE. , MORA R. , PERALDO G (2003) - The june 2000 Arancibia debris avalanche bloc-slide, Costa Rica - In Landslide News # 14/15, pp. 29-32

ANDERSON SA., **SITAR N.** (1995) – Analysis of rainfall-induced debris flows – J. geotech. Eng -121 (7); ASCE, p. 544-552

ANDERSON SA., **THALLAPALLY L** (1996) – Hydrologic response of a steep tropical slope to heavy rainfall - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 3, 1489-1495, Trondheim

ANDERSON SA., **ZHU JH.** (1996) – Assessing the stability of the tropical residual soil slope - – 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 1073-1077, Trondheim

Arnaud N. (2005) – Le processus de démantèlement des volcans, le cas d'un volcan bouclier en milieu océanique : Piton des Neiges (Ile de La Réunion). Thèse Université de La Réunion, Laboratoire des Sciences de la Terre. 422 p., 6 ann.

Arnaud N., Bachélery P. : Dismantling process of basaltic shield volcanoes: origin of the Piton des Neiges Breccias- Reunion Island. Example of the Salazie cirque. Laboratoire des Sciences de la Terre de la faculté des Sciences et Technologies (LSTUR) de l'Université de La Réunion.

Bellanger A., **Aunay B.** (2008) - Suivi des glissements de Hell-Bourg et de Grand llet par les stations GPS permanentes – Rapport RP-56708-FR – 62 p., 58 illustrations

BHANDARI RK, **VIRAJH DIAS AA.** (1996) – Rain triggered slope movements as indicators of landslides dynamics - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 3, 1515-1520, Trondheim

Billard. G. (1976) – Tunnel de Gueule Rouge (RN5) – Reconnaissance géologique. – Rapport BRGM n° 76REU06, juillet 1976, 4 p, 4 Ann.

Billard. G. (1979) – Notice explicative de la carte géologique au 1/ 50 000 de La Réunion, Doc. BRGM, 40 p.

BONNARD Ch., et al. (1995) – Large lanslides and possibilities of sudden reactivation – 44th geomech. Colloquy, Salzburg

BRAND EW., (1984) – Landsiles in southeast Asia, a state of art – Proc. 4th Int. Symp. on landslides, vol. 1, pp 17-59, Toronto

BRGM - Cartographie des risques géologiques (1996). Cartographie de l'aléa « mouvements de terrain ». Commune de Salazie. Rapport BRGM 96REU47, 27p.

BRGM - Dossier synthétique sur les risques mouvement de terrain (1997). Commune de Salazie. Rapport BRGM 97REU39, 3 annexes, 21p.

Chevalier P. (2003) – Cartographie géologique au 1/10 000 du Cirque de Salazie – rapport d'avancement. Rapport BRGM/RP-56281-FR, 52 p., 38 fig., 1 tab., 1 ann.

Chevallier L. (1979) – Structures et évolution du volcan Piton des Neiges – Ile de La Réunion – Leurs relations avec les structures du Bassin Mascareignes – Océan Indien Occidental - Thèse Université de Grenoble, 187 p., 1 carte en Ann.

CHIGIRA M., INOKUCHI T. (2003) – Landslides triggered by august 1998 heavy Rainfall, Northern Japan – In Landslide News # 14/15, pp. 11-14

Cojean R., Durville J-L, Effendiantz L., Fleurisson J.A, Goueffon M., Laigle D., Laugier P., Le Mignon G., Pollet N., Potherat P., Richard D. et Thénevin I. (2002) – Risques naturels et montagne : Mouvements de terrain et risques hydrologiques associés et induits. Evaluation des méthodes et moyens et prévention et analyse des retours d'investissement. Information préventive. Rapport final, 290 p, Contrat Fondation MAIF.

Coudray J. (2004) – Gestion intégrée des eaux à La Réunion : vision d'ensemble et problèmes clef - Revue Géologues n°137, p 69 à 78.

Cruchet M. (2001). Suivi des mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques de Salazie et Cilaos. Bilan des travaux engagés de 1995 à 2000. Rapport BRGM/RP-51105-FR-2001 SGR/REU20, 5 fig., 1 tab., 1 annexe, 21p.

Cruchet M. (2004) – Les mouvements de terrain à La Réunion - Revue *Géologues* n°137, p 89 à 94.

Cruchet M., **Moiriat D**. (2008) – "Étude du glissement de terrain de grande ampleur de Cap Sylvestre, Cirque de Cilaos " – rapport BRGM RP-56705-FR – 53 p. – 24 illustrations.

Cruchet M. (1993) – Les risques naturels majeurs dans les secteurs de Mare à Poule d'eau, Hell-Bourg et llet à Vidot, bilan des connaissances, réflexions sur les actions à engager. Rapport BRGM n°93REU48.

Cruchet M. (2000) – Suivi des déformations au cours de l'année 1999, route d'Hell-Bourg (RD48), Cirque de Salazie, lle de La Réunion. Rapport BRGM/RP-50112-FR, 2000 SGR/REU07, 7 fig., 5 tab, 22 p, 2 Ann.

Cruchet M. (2000) – Suivi des mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques de Salazie et Cilaos. Bilans des travaux engagés de 1995 à 2000. Rapport BRGM-RP-51105-FR, 2001 SGR/REU 20, 5 fig., 1 tab, 20 p, 1 Ann.

Cruchet M. (2001) – Suivi des déformations au cours de l'année 2000, route d'Hell-Bourg (RD48), Cirque de Salazie, lle de La Réunion. Rapport BRGM/RP-51108-FR, 2000 SGR/REU16, 8 fig., 5 tab, 22 p, 2 Ann.

Cruchet M. (2002) – Affaissement du plateau de Mare à Poule d'Eau au droit du lotissement des Bambous – Avis géologique et recommandations. 13 p., 13fig., 1 ann.

Devernaud L., Stieltjes L. (1989) – Evaluation et zonage des risques naturels sur la commune de Salazie : application à la rédaction du POS et à ses annexes sanitaires. Rapport BRGM 89REU12.

E. Lucas (2008) – Etude du glissement de terrain de grande ampleur de Mathurin– Cirque de Salazie –. Rapport BRGM/RP-56707-FR., 55 p, 36 fig., 2 tabs., 1ann.

Garnier C, Lucas E. (2008) – Etude du glissement de terrain de grande ampleur d'Hell-Bourg, Cirque de Salazie – Ile de La Réunion - Rapport BRGM/RP-56725-FR - 76 p, 61 fig., 3 tab., 1 ann.

Garnier C. (2008) – Etude du glissement de terrain de grande ampleur de Grand llet, Cirque de Salazie – lle de La Réunion - . Rapport BRGM/RP-56706-FR. 74 p, 54 fig. , 3 tableaux, 1 annexe

Garnier C. (2008) – Synthèse des résultats du suivi géodésique réalisé dans les cirques du Massif du Piton des Neiges – Rapport BRGM/RP-56699-FR, 50 p., 26 illustrations, 7 tableaux, 4 annexes

Garnier C. (2008). Avis suite à un glissement de terrain sur le secteur de Mathurin. Compte-rendu d'intervention du 26 février 2008. Note technique BRGM / SGR / REU – 2008-24

GOSTELOW TP. (1991) – Rainfall and landslides – CEC Report EUR 12918 EN, Prevention and control of landslides and other mass movements, pp 139-161, Brussels

Gugliemi Y. (2004) – Le glissement de terrains de La Clapière : un observatoire du comportement des mouvements de versants rocheux fracturés de grande ampleur – La déformation active du Sud Est de la France – Conférences CEREGE – mars 2004 – p12.

Humbert. M, Pasquet R et Stieltjes L. (1981) – Les risques géologiques dans les cirques de Salazie et de Cilaos, 101 p, 2 cartes en Ann.

Humbert. M, Pasquet R et Stieltjes L. (1981) – Les risques géologiques dans les cirques de Salazie et de Cilaos, 101 p, 2 cartes en Ann. - Rapport BRGM 81SGN543REU

HUTCHINSON, J.N. (1998) – General report : morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology – 5th Int. Symp. Landslides, Vol. 1, 3-35, Lausanne

JIBSON RW. (1989) - Debris flows in southern Puerto Rico - Geol. Soc. AM. Pub. 236

Lacquement. F (2004) – Cartographie du cirque de Cilaos – Campagne 2003 - Rapport BRGM RP-52972-FR, 92 p, 89 fig.

Lerebour P., Stieltjes L. (1984) – Aménagement de la Mare à Poule d'Eau en base de loisirs – Analyse des risques naturels concernant le site de la Mare à Poule d'Eau. Rapport BRGM 84REU14.

MACFARLANE DF., **SILVESTER PK. BENCK JM. WHITFORD ND.** (1996) – Monitoring strategy and performance of instrumentation in the Clyde Power Project Landslides, New Zealand - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 3, 1557-1554, Trondheim

MAHARAJ R. (1996) – Landslide processes and characteristics from south-eastern Jamaica, West Indies - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 1097-1122, Trondheim

MASSON DG., **WATTS AB.** (1995) – Slope failures and devris avalanches on the flanks ok the volvanic islands – the Canary Islands – In Landslide News # 9, pp. 21-24

Moiriat D. (2006). Avis et recommandations sur six secteurs du cirque de Salazie suite au passage de la tempête tropicale DIWA. Compte rendu de visite du BRGM du 28 avril 2006.

Moulin M., Lebon D., Frissant N. (2002) : Synthèse hydrogéologique du cirque de Salazie (lle de La Réunion). Rapport BRGM/RP-51450-FR, 2002 SGR/REU 01, 91p., 35figs., 11 tabs., 4 ann.

NOSETTO A., **POLLONI G.**, **ALEOTTI P.**, **BALDELLI P.** (1996) – Heavy rain triggered landslides in the Alba area during November 1994 flooding event in the Piemonte Region (Italy) - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 3, 1955-1960, Trondheim

POLEMIO M., **SDAO F**. (1997) – Landslide hazard and critical rainfall in Southern Italy – 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 847-852, Trondheim

POUGET P. (1993) – Relations pluviométrie-piézométrie-déplacements d'un versant naturel instable – Revue Française de Géotechnique 64, pp. 57-61

RAHARDJO H., **CHANG MF.**, **LIM TT.** (1996) – Stability of residual soil slopes as affected by rainfalls - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 1100-1114, Trondheim

Raunet M. (1991) – Le milieu physique et les sols de l'Ile de La Réunion – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement., 438 p.

Raunet M. (1991). Le milieu physique et les sols de l'Ile de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole- Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, 438p.

SUAREZ J. (1996) – Erosion induces landslides in tropical environments - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 1115-1119, Trondheim

TAN BK. (1996) – Geologic factors contributory to landslides – Some case studies in Malaysia - 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 1121-1124, Trondheim

WATTS CR., **MACFARLANE DF.** (1996) – Engineering geology of the Cairnmuir Landslide; New Zealand – 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 931-936, Trondheim

ZIKA P., **KOSTAK B** (1996) – The stability investigations of the rock massif Certova Stena – Devil's Wall – 7th Int. Symp. on landslides, vol. 2, 941-945, Trondheim

ZISCHINSKY, U. (1996) – On deformation of high slopes – Congr. Int. Soc. Rock Mech., vol 2, 179-185, Lisboa



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Service géologique régional Réunion 5, Rue Sainte-Anne BP 906 97478 Saint-Denis – Réunion – France Tél. : 02.62.21.22.14